

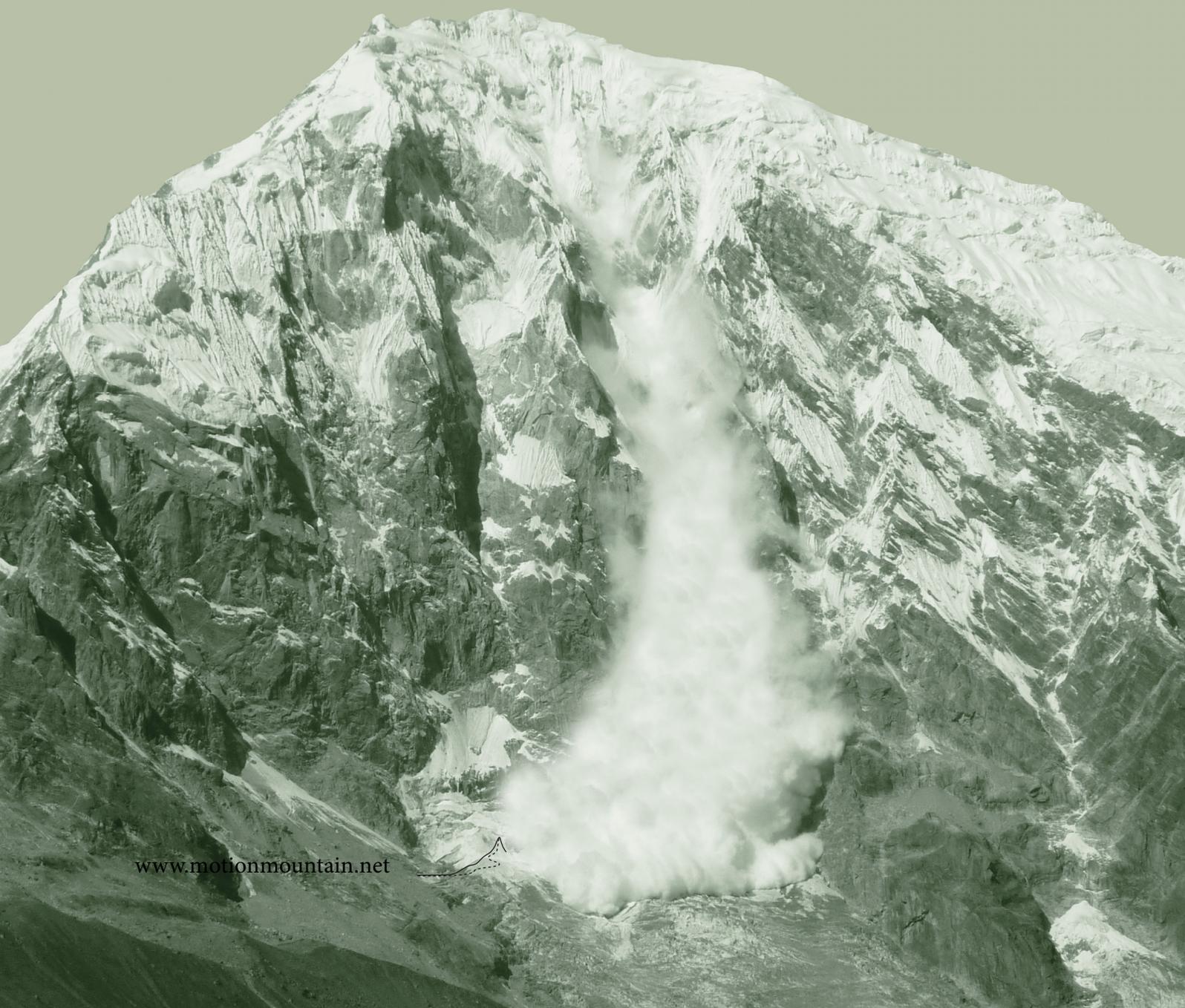
Christoph Schiller

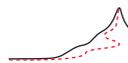
Traducido por Enrique Ynfante Milá

LA MONTAÑA DEL MOVIMIENTO

LA AVENTURA DE LA FÍSICA – VOL.III

LUZ, CARGAS Y CEREBROS

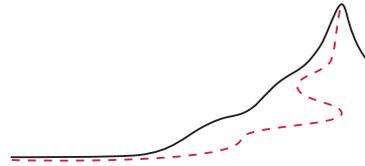




Christoph Schiller

Traducido por Enrique Ynfante Milá

LA MONTAÑA DEL MOVIMIENTO



La Aventura de la Física
Volumen III

Luz, Cargas y Cerebros

Edición 30, libremente disponible en formato pdf
con películas en www.motionmountain.net

Editio trigesima prima.

Proprietas scriptoris © Chrestophori Schiller
primo anno Olympiadis trigesimae secundae.

Omnia proprietatis iura reservantur et vindicantur.
Imitatio prohibita sine auctoris permissione.
Non licet pecuniam expetere pro aliqua, quae
partem horum verborum continet; liber
pro omnibus semper gratuitus erat et manet.

Trigésima primera edición.

Copyright © 1990–2022 de Christoph Schiller,
desde el tercer año de la vigésima cuarta Olimpiada
hasta el primer año de la trigésima segunda Olimpiada.

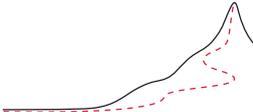


Este fichero pdf ha obtenido licencia bajo la "Creative Commons Attribution-Noncommercial-No Derivative Works 3.0 Germany Licence", cuyo texto completo se puede encontrar en la página web creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de, con la restricción adicional de que la reproducción, distribución y uso, en todo o en parte, de *cualquier* producto o servicio, ya fuera comercial o no, no está permitida sin el consentimiento escrito del propietario del copyright. El fichero pdf fue y así permanece libre para que todo el mundo pueda leerlo, almacenarlo e imprimirlo para uso personal y distribuirlo electrónicamente, pero únicamente sin modificación alguna y solamente de manera no lucrativa.

Para Britta, Esther y Justus Aaron

τῷ ἐμοὶ δαίμονι

Die Menschen stärken, die Sachen klären.



PREFACIO

“Primum movere, deinde docere.*”
Antigüedad

Esta serie de libros está escrita para cualquiera que tenga curiosidad por el movimiento en la Naturaleza. ¿De qué depende el movimiento de las personas, de los animales, de las imágenes y del espacio vacío? La respuesta nos lleva a muchas aventuras y este volumen, presentan las mejores cuando se explora todo lo eléctrico. Nos guían desde el pesaje de la corriente eléctrica, hasta la utilización de los campos magnéticos para sanar fracturas de huesos y hasta el uso de la luz para cortar metales y la comprensión del cerebro humano.

En la estructura de la física, mostrada en la Figura [Figura 1](#), el movimiento debido a la electricidad, es el aspecto más fascinante desde el punto de partida en su parte inferior. En realidad, casi todo a nuestro alrededor se debe a procesos eléctricos. La presente introducción a la electricidad, el magnetismo, la luz y el cerebro, es el tercero de una colección de seis volúmenes sobre una visión general de la física. Es el resultado de una triple aspiración que he perseguido desde 1990: presentar el movimiento de una manera sencilla, actualizada y cautivadora.

Con el fin de ser *sencillo*, el texto se centra en los conceptos, mientras mantiene el uso de las matemáticas al mínimo necesario. A la comprensión de los conceptos de la física se le ha dado prioridad frente al uso de las fórmulas en los cálculos. El texto en su totalidad se encuentra dentro del alcance de un estudiante de primer nivel universitario.

Con el fin de estar *actualizado*, el texto se enriquece con muchas joyas - tanto teóricas como empíricas - que se encuentran dispersas a través de la literatura científica.

Con el fin de ser *cautivador*, el texto intenta sorprender al lector tanto como sea posible. La lectura de un libro de física general debiera ser como asistir a un espectáculo de magia. Miramos, quedamos sorprendidos, no creemos lo que ven nuestros ojos, pensamos y finalmente entendemos el truco. Cuando observamos la Naturaleza, frecuentemente tenemos la misma experiencia. De hecho, cada página presenta al lector, al menos una sorpresa o una provocación sobre la que pensar. Se proponen numerosos e interesantes desafíos.

El lema del texto, *die Menschen stärken, die Sachen klären*, una frase famosa en pedagogía, se traduce como: 'Para fortalecer a los hombres, aclarar las cosas'. Aclarar las cosas - y adherirse sólo a la verdad - requiere coraje, ya que el cambio de los hábitos

* 'Primero mover, después enseñar.' En las lenguas modernas, al referido tipo de *movimiento* (al interior, al del sentimiento) se lo conoce como *motivación*; ambos términos provienen de la misma raíz latina.

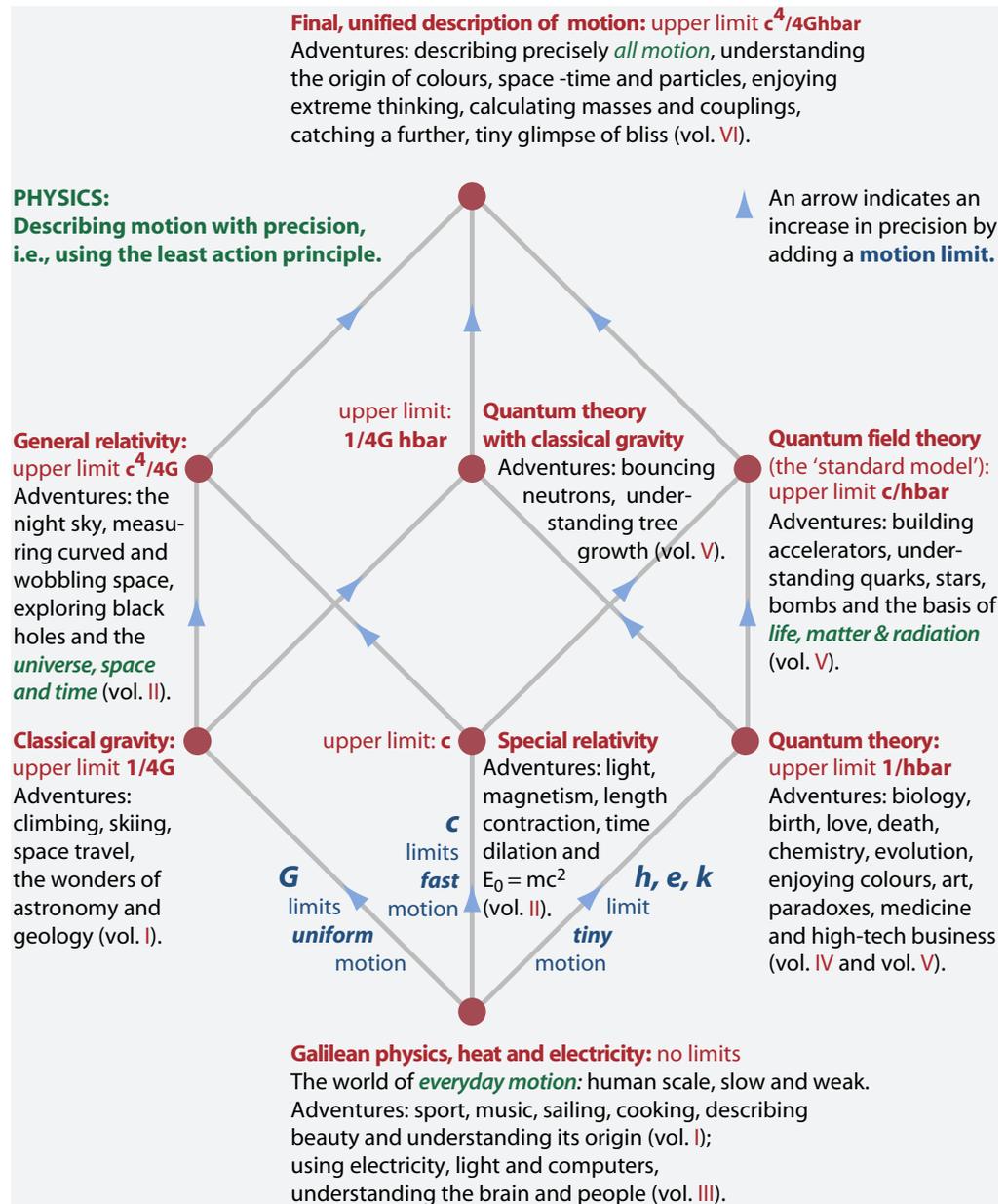


FIGURA 1 Un mapa completo de la física, la ciencia del movimiento, como propuso por primera vez Matvei Bronshtein (b. 1907 Vinnytsia, d. 1938 Leningrad). El cubo de Bronshtein comienza por la parte inferior con el movimiento cotidiano, y muestra las conexiones con los campos de la física moderna. Cada conexión incrementa la precisión de la descripción y se debe a un límite al movimiento que debe ser tenido en cuenta. Para el movimiento uniforme, los límites vienen dados por la constante gravitacional G , para los movimientos rápidos, por la velocidad de la luz c , y para movimientos diminutos, por la constante de Planck h , la carga elemental e y la constante de Boltzmann k .

de pensamiento produce miedo, a menudo oculto tras la ira. Pero mediante la superación de los miedos, nos volvemos más fuertes. Y experimentamos emociones intensas y hermosas. Todas las grandes aventuras de la vida permiten esto, y la exploración de movimiento es una de ellas. Que lo disfruten!

Christoph Schiller

UTILIZACIÓN DE ESTE LIBRO

La notas al margen remiten a referencias bibliográficas, a otras páginas o a las soluciones de los desafíos. En la edición en color, las notas marginales que hacen referencia a pies de página y los punteros a sitios web, han sido mecanografiados en verde. Con el tiempo, los enlaces de Internet tienden a desaparecer. La mayoría de ellos pueden ser recuperados vía www.archive.org, la cual guarda una copia de viejas páginas de Internet-. En la edición libre pdf de este libro, disponible en www.motionmountain.net, en todos los punteros verdes y enlaces se pueden hacer click para tener acceso al asunto. La edición pdf también contiene todas las películas; éstas pueden ser visualizadas directamente en Adobe Reader.

Las soluciones y consejos para los *desafíos* se presentan en el apéndice. Los Desafíos se clasifican como fácil (e), nivel de estudiante estándar (s), difícil (d) y nivel de investigación (r). Los Desafíos para los que no hay solución todavía, se han incluido, no obstante, en el libro, y están marcados (ny).

CONSEJO PARA LOS ALUMNOS

El aprendizaje nos permite descubrir qué tipo de persona podemos ser. El aprendizaje amplía el conocimiento, mejora la inteligencia y nos proporciona un sentimiento de logro. Por tanto, un libro para aprender, especialmente uno sobre la naturaleza, debería resultar eficiente y agradable. ¡Evite los malos métodos de aprendizaje como si fuera la peste!. No utilice un marcador o un lápiz para resaltar o subrayar el texto sobre el papel. Es una pérdida de tiempo, proporciona un falso confort y vuelve el texto ilegible. Y nunca aprenda de una pantalla. En particular, nunca, jamás, aprenda de Internet, de vídeos, de juegos o de un smartphone. La mayor parte de Internet, casi todos los vídeos y todos los juegos son veneno y drogas para el cerebro. Los smartphone son dispensadores de drogas que crean adicción en la gente e impiden el aprendizaje. Nadie poniendo marcas sobre un papel o mirando una pantalla está aprendiendo de manera eficiente o está disfrutando haciendo eso.

De mi experiencia como estudiante y profesor, un método de aprendizaje que nunca fallaba para transformar alumnos sin éxito en los más exitosos concluí: si usted lee un libro para estudiar, resuma cada sección que haya leído, *con sus propias palabras e imágenes, en voz alta*. Si usted es incapaz de hacerlo, lea la sección de nuevo. Repita esto hasta que pueda resumir con claridad lo que lee con sus propias palabras e imágenes en voz alta. ¡Y disfrute la narración en voz alta!. Usted puede hacer esto solo o con amigos, en una habitación o mientras camina. Si hace esto con todo lo que lee, usted reducirá el tiempo de aprendizaje y de lectura de manera significativa; disfrutará aprendiendo de buenos textos mucho más y odiará los malos textos mucho menos. Los expertos del mé-

todo pueden utilizarlo incluso mientras escuchan una conferencia, en voz baja, evitando así tener que tomar notas siempre.

CONSEJO PARA LOS PROFESORES

A un profesor le gustan sus alumnos y le gusta guiarlos en la exploración del campo de conocimiento que han elegido. Su entusiasmo por el trabajo es la clave para la satisfacción en el trabajo. Si usted es un enseñante, antes del inicio de una lección, imagine, sienta y dígame a sí mismo cómo es su forma de disfrutar el tema de la lección; a continuación, imagine, sienta y dígame a sí mismo cómo va a llevar a cada uno de sus alumnos a deleitarse con ese tema tanto como lo hace usted. Haga este ejercicio de forma consciente, cada vez. Va a minimizar problemas en su clase y maximizar su éxito en la enseñanza.

Este libro no está escrito con los exámenes en la mente; está escrito para que los profesores y estudiantes *entiendan* y *disfruten* de la física, la ciencia del movimiento.

VALORACIÓN Y/O COMENTARIOS

La última edición pdf de este texto es y permanecerá libre para su descarga desde Internet. Estaría encantado de recibir un correo por su parte en la dirección 'fb@motionmountain.net', especialmente sobre los asuntos siguientes:

- Desafío 1 s
- ¿Qué no está claro y debería ser mejorado?
 - ¿Qué relato, tema, acertijo, imagen o película echó de menos?

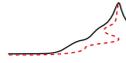
También es bienvenida la ayuda sobre los puntos específicos enumerados en la página web www.motionmountain.net/help.html. Todos los comentarios o críticas serán tenidos en cuenta para la mejora de la siguiente edición. Les animamos al envío de sus comentarios tanto a través de correo como si lo hace en un pdf con notas añadidas resaltadas en amarillo, para proveer ilustraciones o fotografías, o contribuir a la errata wiki de la website. En el caso de que deseara traducir algún capítulo del libro a su propio idioma, por favor, póngalo en mi conocimiento.

En nombre de todos los lectores, gracias de antemano por sus comentarios. Por una contribución particularmente útil, su nombre podría ser mencionado - si así lo desea - en la sección de reconocimientos, podría recibir una recompensa o ambas cosas.

SOPORTE

Cualquier donación para el beneficio de esta organización sin fines de lucro exenta de impuestos, que produce, traduce y publica esta serie de libros es ¡bienvenida! Para obtener más información, consulte la página web www.motionmountain.net/donation.html. Si lo desea, su nombre quedará incluido en la lista de patrocinadores. Gracias de antemano por su ayuda en nombre de los lectores de todo el mundo.

La edición en papel, en inglés, de este libro está disponible, sea en color o blanco y negro, a través de www.amazon.com. Y ahora, disfruten de la lectura.

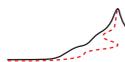


CONTENIDO

- 16 1 ELECTRICIDAD LÍQUIDA, CAMPOS INVISIBLES Y VELOCIDAD MÁXIMA
- Campos: ámbar, imán y teléfonos móviles 17 • ¿Cómo se puede hacer un rayo? 19
 - Carga eléctrica 24
 - Intensidad/fortaleza/potencia del campo eléctrico 26
 - Acumuladores de cargas 31 • ¿Qué es la electricidad? 31
 - ¿Es posible detectar la inercia de la electricidad? 31
 - ¿Cómo se detectan los campos eléctricos 35
 - Imanes y otros materiales magnéticos 41
 - ¿Cómo detectan los animales los campos magnéticos? 42
 - Magnetismo y electricidad 45
 - ¿Cómo se puede construir un motor? 45
 - ¿Qué corrientes fluyen en el interior de un imán? 48
 - Descripción de los campos magnéticos 49
 - Electromagnetismo 52
 - Los invariantes y el Lagrangiano de los campos electromagnéticos 54
 - Los usos de los efectos electromagnéticos 55
 - ¿Cómo funcionan los nervios? 56
 - Cómo prueban los motores que la relatividad es correcta. 58
 - Curiosidades y retos divertidos sobre cosas eléctricas y magnéticas 61
 - Resumen: tres hechos básicos sobre la electricidad 81
- 82 2 DESCRIPCIÓN DE LA EVOLUCIÓN DEL CAMPO ELECTROMAGNÉTICO
- Primera ecuación de campo para la electrodinámica 82
 - Segunda ecuación de campo para la electrodinámica 84
 - Validez y esencia de las ecuaciones de campo de Maxwell 86
 - Colisión de partículas cargadas 87
 - ¿Qué es el contacto? 88
 - El campo gauge – el potencial vector electromagnético 89
 - El Lagrangiano del electromagnetismo 93
 - El tensor energía-cantidad de movimiento y sus simetrías de movimiento 95
 - Energía y momentos del campo electromagnético 96
 - ¿Qué es un espejo? ¿Tiene paridad invariante la Naturaleza? 97
 - ¿Cuál es la diferencia entre campos eléctricos y campos magnéticos? 99
 - ¿Podría ser diferente la electrodinámica? 100
 - El cerebro: el desafío más difícil para la electrodinámica 101
 - Desafíos y curiosidades divertidas sobre la electrodinámica 103
 - Resumen del movimiento del campo electromagnético 104
- 105 3 ¿QUÉ ES LA LUZ?
- ¿Qué son las ondas electromagnéticas? 106
 - Experimentos con ondas electromagnéticas 108
 - La luz como onda 109
 - La luz y otras ondas electromagnéticas 115
 - Polarización de ondas electromagnéticas 120
 - Alcance de la radiación electromagnética 125
 - La lentitud en el progreso de la física – y en la relatividad 128
 - ¿Cómo se ve el mundo cuando se viaja en un rayo de luz? 129
 - ¿Se puede tocar la luz? 129
 - Guerra, luz y mentiras 134
 - ¿Qué es el color? 134
 - Diversión con los arcoíris 141
 - ¿Cuál es la velocidad de la luz? ¿Qué es la velocidad de señal? 142
 - Señales y predicciones 146
 - Adios, éter 147
 - Desafíos y curiosidades divertidas sobre la luz, la polarización y la fase geométrica 148
 - Resumen sobre la luz 155
- 156 4 LAS IMÁGENES Y EL OJO – LA ÓPTICA
- Formas de captar imágenes 156
- 158 Fuentes de luz
- ¿Por qué podemos vernos los unos a los otros? Cuerpos negros y la temperatura de la luz 159
 - Límites a la concentración de la luz 162
 - Medición de la intensidad de luz 163
 - Otras fuentes de luz y de radiación 166
 - La

- radiación como arma 167
- 168 **Imágenes – que transportan luz**
 Fabricando imágenes con espejos 168 • ¿Siempre viaja la luz en línea recta? – Refracción 169 • De la refracción atmosférica a los espejismos 173 • De la refracción a las lentes 176 • Doblando la luz con tubos – fibra óptica 179 • 200 años tarde – índices de refracción negativa 181 • Metamateriales 182 • Luz alrededor de las esquinas – difracción 183 • Superando el límite de la difracción 185 • Otras formas de doblar la luz. 187 • Utilizando las interferencias para la creación de imágenes 188 • ¿Cómo se hacen los hologramas y otras imágenes tridimensionales? 189 • Imágenes a través del escaneo 194 • Tomografía 199
- 201 **El ojo y el cerebro: adquisición y proceso de imágenes biológicas.**
 ¿Vemos lo que existe? 201 • El ojo humano 205 • Ojos humanos versus otros ojos 207 • ¿Cómo podemos tomar imágenes del interior del ojo? 210 • ¿Cómo demostrar que eres un santo? 214
- 214 **Mostrar imágenes**
 Electrones saltarines y la mayor decepción de la industria de la televisión 215 • Desafíos y curiosidades divertidas sobre las imágenes y la vista 217 • Resumen sobre óptica aplicada 231
- 233 5 **EFFECTOS ELECTROMAGNÉTICOS**
 ¿Es un rayo una descarga? – La electricidad en la atmósfera 233 • ¿Existe el rayo globular? 238 • Campos magnéticos planetarios 239 • Levitación 242 • ¿Hace la gravedad que las cargas irradian? 246 • Materia, levitación y efectos electromagnéticos 247 • Todos los cuerpos emiten radiación 256 • Desafíos y curiosidades sobre los efectos electromagnéticos 257
- 264 6 **RESUMEN Y LÍMITES DE LA ELECTRODINÁMICA CLÁSICA**
 El espacio es curvo, no plano 265 • Los valores de carga son discretos, no continuos 266 • ¿Con qué rapidez se mueven las cargas? 267 • ¿Qué movimiento ocurre en el interior de los átomos? 268 • Desafíos y curiosidades sobre las cargas discretas 269
- 271 7 **LA HISTORIA DEL CEREBRO**
 Evolución 272 • Niños, leyes y física 273 • Electrónica de polímeros 276 • ¿Por qué un cerebro? 280 • Neuronas y redes 281 • ¿Qué es la información? 283 • ¿Qué es la memoria? 284 • La capacidad del cerebro 288 • Curiosidades sobre el cerebro y la memoria 290
- 298 8 **LENGUAJE Y CONCEPTOS**
 ¿Qué es el lenguaje? 298 • Componentes de un idioma y sus jerarquías 300 • ¿Son las matemáticas un idioma? 304 • ¿Qué es un concepto? 306 • ¿Qué son los conjuntos? ¿Qué son las relaciones? 307 • El infinito – y sus propiedades 310 • Funciones y estructuras 312 • Números 313 • ¿Son siempre útiles las matemáticas? 318 • Curiosidades y desafíos divertidos sobre las matemáticas 320
- 323 9 **OBSERVACIONES, MENTIRAS Y PATRONES DE LA NATURALEZA**
 Los conceptos físicos, ¿son descubiertos o creados? 324 • ¿Cómo encontramos los conceptos físicos, los patrones y las reglas? 326 • ¿Qué es una mentira? 327 • ¿Qué es una buena mentira? 329 • ¿Es verdadera esta declaración? – Un poco sobre las tonterías 333 •

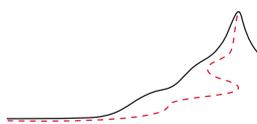
- Curiosidades y desafíos divertidos sobre mentiras y tonterías 335
- 340 Las observaciones y su recopilación
 ¿Recogen los instrumentos suficientes observaciones? 341 • ¿Se conocen todos los observables físicos? 342 • ¿Llevan tiempo las observaciones? 345 • ¿Es la inducción un problema para la física? 345
- 347 La búsqueda de la precisión y sus implicaciones
 ¿Qué son las interacciones? – Sin emergencia 348 • ¿Qué es la existencia? 349 • ¿Existen las cosas? 351 • ¿Existe el vacío? 352 • ¿Es infinita la Naturaleza? 353 • ¿Es un conjunto el Universo? 354 • ¿Existe el Universo? 356 • ¿Qué es la creación? 356 • ¿Está diseñada la Naturaleza? 359 • ¿Qué es una descripción? 360 • Razón, propósito y explicación 361 • Unificación y demarcación 362 • Cerdos, simios y el principio antrópico 363 • ¿Necesitamos causa y efecto en las explicaciones? 365 • ¿Se requiere la conciencia? 366 • Curiosidad 367 • Valor 369
- 372 10 LA FÍSICA CLÁSICA EN UNA CÁSCARA DE NUEZ
 ¿Qué se puede mover? 372 • Propiedades del movimiento clásico 373 • El futuro del planeta Tierra 375 • La esencia de la física clásica – lo infinitamente pequeño y la falta de sorpresas 377 • Resumen: ¿Por qué todavía no hemos alcanzado la cumbre de la montaña? 379
- 381 A UNIDADES, MEDIDAS Y CONSTANTES
 Unidades SI 381 • El significado de la medición 384 • Precisión y exactitud de las mediciones 384 • Límites a la precisión 386 • Las constantes físicas 386 • Números útiles 394
- 395 DESAFÍOS, PISTAS Y SOLUCIONES
- 417 BIBLIOGRAFÍA
- 446 CRÉDITOS
 Reconocimientos 446 • Créditos de películas 447 • Créditos de imágenes 447
- 452 ÍNDICE DE NOMBRES
- 464 ÍNDICE DE MATERIAS





LUZ, CARGAS Y CEREBROS

En nuestro objetivo por aprender cómo se mueven las cosas, la experiencia de escalar y otros movimientos nos llevan a descubrir que las imágenes están producidas por cargas, que las cargas se mueven, se acumulan e interactúan, y que hay una carga mínima en la Naturaleza. Comprendemos lo que el amor tiene que ver con los imanes y el ámbar, por qué el cerebro es un dispositivo tan interesante, y lo que distingue una buena de una mala mentira.



CAPÍTULO 1

ELECTRICIDAD LÍQUIDA, CAMPOS INVISIBLES Y VELOCIDAD MÁXIMA

Verdaderamente, ¿qué es la *luz*? El estudio de la relatividad nos dejó por completo en la oscuridad, más aún, nos embarcamos en ella precisamente para encontrar una respuesta a esa pregunta. En verdad, hemos aprendido cómo el movimiento de la luz se compara con la de otros objetos. También aprendimos que la luz es una entidad en movimiento que no se puede parar, que la luz marca la velocidad límite para cualquier tipo de energía, y que la luz es nuestro patrón de medida para la velocidad. No obstante, no hemos aprendido nada sobre la naturaleza de la luz en sí misma, ni sobre los *colores*, ni sobre cómo las gotas de lluvia** y otras materias los producen.

Vol. II, página ??

Una segunda pregunta queda abierta: ¿qué es el *contacto*? Todavía no lo sabemos. En nuestra exploración de la relatividad aprendimos que todas las interacciones, incluyendo el contacto, se deben al intercambio de algo. Pero, ¿de qué? Sólo aprendimos que realmente las interacciones mecánicas no existen ¿Cual es la naturaleza del contacto?

Aflora también una tercera pregunta: ¿cómo *sentimos* el contacto o el tacto? ¿Qué son los *sensores* y cómo es procesado su resultado, los datos, en el cerebro o en las máquinas? No solamente el cerebro sino todos los otros sistemas de proceso de datos utilizan la electricidad. ¿Cuales son los *datos* y qué es la *electricidad*?

Vol. I, página 247

Las respuestas a las preguntas sobre la naturaleza de la luz, el contacto y el cerebro, *no* están relacionadas con la gravitación. Si hiciéramos una lista de los motores encontrados en este mundo, nos daríamos cuenta de que la gravitación apenas describe ninguno de ellos. Ni el movimiento de las olas del mar, el fuego o los terremotos, ni siquiera ese que produce una suave brisa es causado por la gravedad. Lo mismo es de aplicación al movimiento de la luz en un arco iris o al movimiento de los músculos. ¿Ha escuchado usted alguna vez los latidos de su propio corazón con un estetoscopio? También puede utilizar, como muchos médicos hacen ahora, un teléfono móvil para registrar los latidos de su corazón.) Sin haberlo hecho, no puede decir que ha experimentado el misterio del movimiento. Su corazón late uno 3000 millones de veces durante su vida. Luego se para.

Desafío 2 e

Uno de los más asombrosos descubrimientos de la ciencia fue el que el origen de los latidos del corazón, el fuego, la luz y el pensamiento mismo están conectados a observaciones realizadas miles de años anteriormente utilizando dos piedras singulares. Estas piedras muestran que

▷ Todos aquellos ejemplos de movimientos que son llamados *mecánicos* en la

** La fotografía con un arco iris circular encima [página 15](#) fue tomada en 2006 desde Telstra Tower en Canberra (© Oat Vaiyaboon).

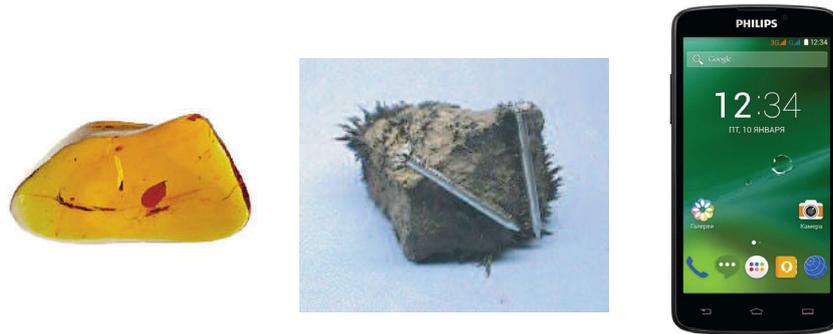


FIGURA 2 Objetos rodeados por campos: el ámbar (c. 1 cm) atrae el serrín, el imán (calmita) (c. 1 cm) atrae limaduras de hierro y un teléfono móvil (c. 10 cm) atrae a otros teléfonos móviles y a la gente (© Wikimedia, Philips).

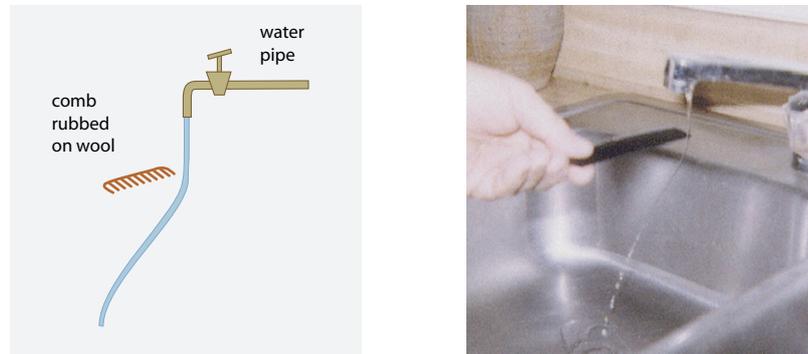


FIGURA 3 Cómo sorprender a los niños, especialmente con clima seco (fotografía de © Robert Fritzius).

vida diaria son, sin excepción, de origen *eléctrico*.

Ref. 1 En particular, la solidez, la suavidad y la impenetrabilidad de la materia son debidas a la electricidad interna. Pero también la emisión de luz, la formación de colores y el trabajo de nuestros nervios y cerebros es debido a procesos eléctricos. Como estos aspectos forman parte de la vida cotidiana, podemos dejarlo aparte de las complicaciones debidas a la gravedad y al espacio-tiempo curvo.

La exploración de la luz, el contacto y el cerebro implica explorar cómo los magos levitan objetos. En realidad, la manera más productiva de estudiar el movimiento eléctrico es comenzar, como en el caso de la gravedad, con aquellos tipos de movimiento que son generados sin ningún contacto entre los cuerpos implicados. Esto puede suceder de tres maneras.

CAMPOS: ÁMBAR, IMÁN Y TELÉFONOS MÓVILES

Siempre es posible sorprender a un niño con los efectos mostrados en la **Figura 3**: un peine frotado sobre un trozo de lana desvía el chorro de agua de un grifo. El mismo efecto se puede conseguir con un globo lleno de aire frotado con lana. Cualquiera puede desviar chorros de agua sin ningún contacto.

Los griegos ya habían observado este efecto hacía muchos años. De hecho, la historia de la electricidad comienza con los árboles. Los árboles tienen una especial relación con la electricidad. Cuando se tala un árbol, aparece una resina viscosa. Con el tiempo se solidifica y, tras millones de años, se forma el *ámbar*. Cuando el ámbar se frota con una piel de gato, adquiere la propiedad de atraer objetos pequeños, tales como serrín o pedacitos de papel. Esto ya era conocido por Thales de Mileto, uno de los siete sabios originales, del siglo sexto B.C.E. La misma observación se puede realizar con otras muchas combinaciones de polímero, por ejemplo con peines y cabellos, con las suelas de los zapatos sobre alfombras, y polvo y una lente o un tubo de rayos catódicos dentro de una antigua televisión. Otro efecto interesante puede observarse cuando se acerca un peine frotado a una vela encendida. (¿Puede imaginar qué es lo que sucede?)

Desafío 3 s

Otra parte de la historia de la electricidad está relacionada con los *imanes*, un mineral de hierro encontrado en varias cuevas alrededor del mundo, por ejemplo, en una región (todavía) llamada Magnesia en la provincia griega de Thessalia, y en algunas regiones de Asia central. Cuando dos piedras de este mineral se encuentran cerca una de la otra, se atraen o repelen entre sí, dependiendo de su orientación relativa. Adicionalmente, el imán atrae objetos hechos de cobalto, níquel o hierro.

También hoy se pueden encontrar algunos objetos en la Naturaleza con propiedades más sofisticadas, tal como el mostrado en la parte derecha de la [Figura 2](#). Algunos de esos objetos permiten que se pueda hablar con un amigo que esté muy lejos, otros desbloquean las cerraduras de los coches, y aún otros permiten encender la televisión.

En resumen, en la Naturaleza hay situaciones donde unos cuerpos ejercen influencia sobre otros *a distancia*. El espacio que rodea a un cuerpo que ejerce tal influencia se dice que contiene un campo. Un *campo (físico)* es una entidad que se manifiesta a sí mismo por la aceleración de otros cuerpos en una región dada del espacio.

▷ Un campo es un espacio que cambia los momentos.

O si lo prefieres, *un campo es un espacio que ejerce fuerzas*. O de otra manera, un campo es un espacio con alguna estructura extra. A pesar de esta estructura extra, los campos, como el espacio, son invisibles. Los tres objetos que acabamos de mencionar producen tres tipos de campos.

1. El campo que rodea al ámbar – llamado ἤλεκτρον en griego, proveniente de una raíz que quiere decir ‘brillante, resplandeciente’ – es conocido como *campo eléctrico*. El nombre se debe a una propuesta realizada por el famoso médico y a veces físico William Gilbert (b. 1544 Colchester, d. 1603 Londres). Los objetos rodeados por un campo eléctrico permanente son llamados *electret*. Los electret no son tan comunes; entre otros usos, se utilizan en ciertos tipos de sistemas de altavoces, condensadores o micrófonos. Los electret pueden ser ciertos cristales o polímeros.
2. A los campos que rodean el mineral encontrado en Magnesia se les llaman *campos magnéticos* y a los objetos que producen un campo permanente, *imanes*. La mayoría de los magnetos (imanes), pero no todos, provienen de metales.
3. El campo alrededor de un teléfono móvil se conoce como campo de *radio* o, como veremos posteriormente, campo *electromagnético*. A diferencia de los campos anteriores, oscilan con el tiempo. Más adelante descubriremos que otros muchos obje-

Ref. 2

tos están rodeados por tales campos, aunque estos son con frecuencia muy pequeños. Los objetos que emiten campos oscilantes, tales como los teléfonos móviles o las lámparas, son llamados radiotransmisores o emisores electromagnéticos. Ciertos radiotransmisores, como veremos, son ya familiares en la vida cotidiana: lámparas y láseres.

Los experimentos muestran que los campos carecen de *masa* y de soporte material. Los campos tienen influencia sobre los cuerpos a distancia. Como los campos son invisibles, para hacerlos imaginables, necesitamos colorearlos. En la [Figura 4](#) se muestran algunas formas de colorear campos *eléctricos*. La coloración está inspirada en los experimentos con las semillas y el polvo. Las visualizaciones de campos magnéticos y campos de radio, se muestran más abajo. Estas figuras son la mejor forma para *visualizar* campos eléctricos; También el investigador que propuso por primera vez el concepto de campo, Michael Faraday, utilizó tales imágenes.

Explorando las visualizaciones de campos, nos damos cuenta de que podemos representar campos eléctricos bien como una flecha diminuta o vector, emparejado a cada punto del espacio, o bien como un paquete de líneas en cada región del espacio. Ambas visualizaciones son útiles. Encontraremos más visualizaciones más adelante.

Durante mucho tiempo, campos eléctricos, magnéticos y radio, fueron raramente tenidos en cuenta en la vida cotidiana. En realidad, en el pasado, la mayoría de países tenían leyes que ¡prohibían la producción de tales campos!. Aún hoy, hay leyes que restringen seriamente las propiedades de máquinas que utilizan y producen tales campos. Estas leyes requieren que cualquier dispositivo que se mueva, produzca sonido o creen imágenes que se muevan, los campos necesitan permanecer *dentro* del dispositivo. También por esta razón, un mago que mueve un objeto sobre una mesa utilizando un imán escondido todavía causa sorpresa y entretiene a su audiencia. Para sentir la fascinación de los campos más intensamente, miraremos con más profundidad los resultados de unos cuantos experimentos.

¿CÓMO SE PUEDE HACER UN RAYO?

Todo el mundo ha visto el relámpago de un rayo o ha observado el efecto que puede tener al golpear un árbol. Obviamente el rayo es un fenómeno que se desplaza. Fotografías tales como la de la [Figura 5](#) muestran que el recorrido del relámpago avanza a una velocidad media de unos 600 km/s. Pero *¿qué* es lo que se mueve? Para averiguarlo, tendremos que encontrar una manera de hacer un rayo nosotros mismos. En 1995, la compañía de coches Opel accidentalmente redescubrió un antiguo y sencillo método para conseguirlo.

Los ingenieros de Opel inadvertidamente habían construido un mecanismo de generación de chispas en el interior de los coches; cuando se llenaba el tanque de gasolina, se generaban chispas, las cuales, a veces, producían una explosión del combustible en la estación de servicio. Opel tuvo que volver a construir 2 millones de vehículos.

¿Qué habían hecho mal los ingenieros? Inconscientemente habían copiado las condiciones para un dispositivo generador de chispas que nadie había podido construir en su casa y que había sido inventado originalmente por William Thomson:* el *generador*

* William Thomson (b. 1824 Belfast, d. 1907 Largs), importante físico y profesor de la Glasgow University.

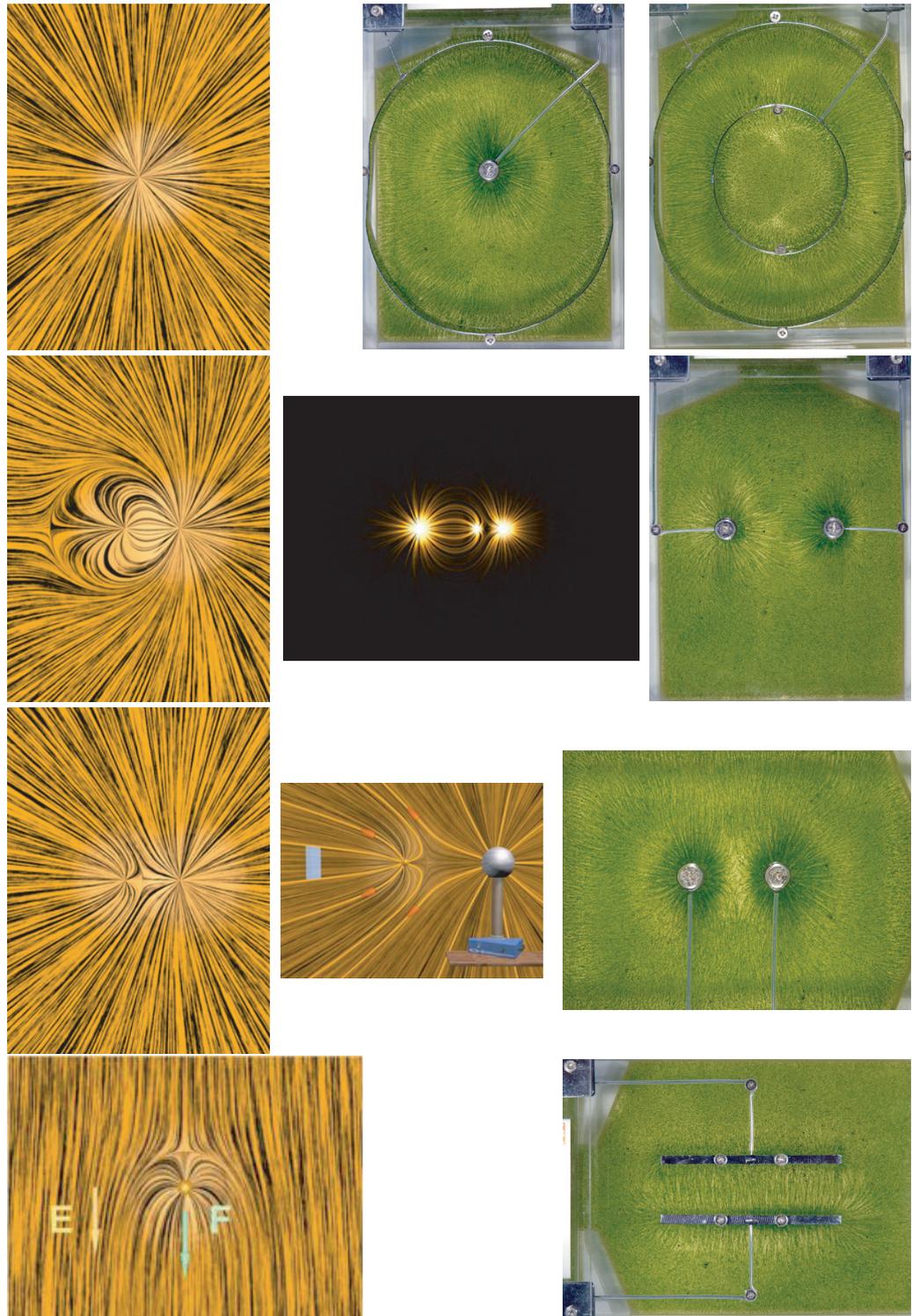


FIGURA 4 Visualizando lo que es invisible con un ordenador gráfico (izquierda) y con semillas en aceite (derecha): *un campo eléctrico es un espacio con una estructura*. Arriba: El campo alrededor de un punto o carga esférica; segunda fila: dos o tres cargas de diferentes signos; tercera fila: dos cargas del mismo signo; abajo: una carga en un campo externo E , y el campo entre dos placas. La carga sentirá una fuerza F dirigida a lo largo de las llamadas *líneas de campo eléctrico*; La densidad de las líneas proporcióna la intensidad del campo y por tanto la fortaleza de la fuerza (© MIT, Eli Sidman, MIT).



FIGURA 5 Rayo: una fotografía tomada con una cámara en movimiento, mostrando su múltiples trazos (© Steven Horsburgh).

Ref. 4

Desafío 4 s

Kelvin. Para repetir su experimento hoy, tomaríamos dos grifos de agua, cuatro latas de alubias vacías, de las que dos estarían abiertas por ambos lados, unas cuerdas de nylon y unos cables de metal. Montándolo todo como indica la **Figura 6**, y dejando el agua correr, obtendremos un extraño efecto: periódicamente grandes chispas saltarán de un cable a otro en el punto donde están más próximos, dando fuertes estallidos. ¿Puede imaginar qué condición para el flujo debe cumplirse para realizar este trabajo? ¿Y qué tuvo que hacer Opel para reparar los coches que retiró?

Si se cierra el flujo del agua en un generador Kelvin justamente antes de que salte la última chispa, observaremos que ambos cubos son capaces de atraer serrín y pedacitos de papel. Por tanto el generador se comporta de la misma forma que un trozo de ámbar que se frota, solo que con más estallidos en el cubo. Ambos cubos, y las piezas de metal unidas, están por lo tanto rodeados de campos eléctricos. Los campos se incrementan con el tiempo hasta que salta la chispa. Sólo después de la chispa, los cubos están (casi) sin campo eléctrico que los rodea. Obviamente, el flujo del agua de alguna manera almacena algo en cada cubo; hoy día llamamos a esto *carga eléctrica*. También decimos que tales cuerpos están *eléctricamente cargados*. Este y otros experimentos muestran también que la carga puede *fluir* en los metales. Cuando los campos eléctricos están suficientemente cargados, la carga puede también fluir a través del aire, produciendo chispas o rayos.

Trabajó en la determinación de la edad de la Tierra, demostrando que tenía mucho más de 6000 años, como varias sectas creían, aunque también mantenía (falsamente) que la Tierra era mucho más joven de lo que los geólogos y Darwin (correctamente) habían deducido. Influyó fuertemente en el desarrollo de la teoría del magnetismo y la electricidad, la descripción del éter, y la termodinámica. Propagó la utilización del término 'energía' con el significado que se le da hoy día, en lugar de los confusos términos antiguos. Fue uno de los últimos científicos en propagar las analogías mecánicas para la explicación de fenómenos, y por lo tanto fuertemente opuesto a la descripción del electromagnetismo de Maxwell. Fue principalmente por esta razón por la que no recibió el Premio Nobel. Fue también una de las mentes detrás de la instalación del primer cable telegráfico trasatlántico. Victoriano y religioso hasta los huesos, cuando fue nombrado caballero, eligió el nombre de un pequeño riachuelo cerca de su casa como su nuevo nombre; se convirtió por tanto en el Baron Kelvin de Largs. Es por esto que la unidad de temperatura lleva el nombre de un arroyo escocés.

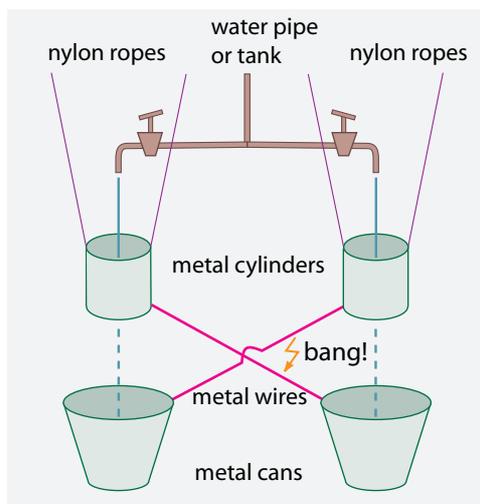


FIGURA 6 Un sencillo generador Kelvin; El de la izquierda enciende una bombilla de luz fluorescente utilizando el goteo de agua (photograph © Harald Chmela).

También encontramos que los dos cubos están rodeados por *dos tipos diferentes* de campos eléctricos: Los cuerpos que son atraídos por un cubo son repelidos por el otro. El genio universal Charles Dufay (b. 1698 Paris, d. 1739 Paris) descubrió que:

- ▷ Existen *dos tipos diferentes* de cargas eléctricas.

En una larga y cuidadosa serie de experimentos, confirmó que *todos* los materiales que probó podían estar cargados eléctricamente y que todas las cargas podían clasificarse en dos tipos. Fue el primero que demostró que:

Ref. 5

- ▷ Cuerpos de la *misma* carga se *repelen* el uno al otro, y cuerpos de *diferente* carga se *atraen* entre sí.

Dufay mostró en detalle que todos los experimentos sobre la electricidad se pueden explicar con estas afirmaciones. Dufay llamó a estos dos tipos de cargas 'vítrea' y 'resinosa'. Por desgracia, Dufay murió a temprana edad. No obstante, sus resultados se difundieron con rapidez. Unos cuantos años después, Georg Bose los utilizó para desarrollar el primer motor electrificado, con el que realizó la exploración de las chispas y la ciencia de la electricidad se puso de moda en Europa.*

Veinte años después de Dufay, en la década de 1750, el político y físico a tiempo parcial Benjamin Franklin (b. 1706 Boston, d. 1790 Philadelphia) propuso llamar a la electricidad creada en una varilla de cristal frotada con un paño seco *positiva* en lugar de vítrea,

* De hecho, la moda aún continúa. Hoy, existen muchas formas de producir chispas y aún arcos, es decir, chispas prolongadas. Hay una considerable subcultura de gente que construye tales generadores de alto voltaje como pasatiempo en su propia casa; Véase, por ejemplo, la web www.kronjaeger.com/hv. Hay una considerable subcultura de gente que hace esto profesionalmente, pagada con el dinero de los impuestos: la gente que construyen los aceleradores de partículas.

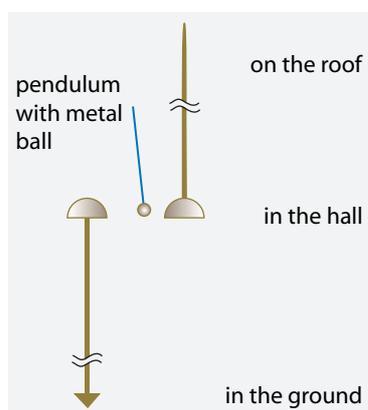


FIGURA 7 – una copia del carillón eléctrico de Gordon – es uno de los muchos experimentos que muestran de modo impresionante que las cargas pueden fluir.

y a aquella sobre un pedazo de ámbar *negativa* en lugar de resinosa. Por tanto, en lugar de dos tipos de carga eléctrica, él propuso que

- ▷ Realmente solamente hay *un* tipo de carga.

Los cuerpos pueden tener o mucha o muy poca de ella. Con los nuevos términos, los cuerpos del mismo signo se repelen unos a otros, los cuerpos con cargas opuestas se atraen mutuamente; las cargas de signo opuesto que fluyen juntas se cancelan unas con otras. Valores absolutos grandes de cargas implican grandes efectos de carga. Tomó más de cien años que esos conceptos fueran unánimemente aceptados.

En resumen, *los efectos eléctricos son debidos al flujo de cargas*. Ahora, todo lo que fluye toma su tiempo. ¿Cuán rápida es la electricidad? Una forma sencilla de medir la velocidad de la electricidad es producir una pequeña chispa en uno de los extremos de un cable de metal y observar cuanto tiempo tarda en aparecer la chispa por el otro extremo del cable. En la práctica, las dos chispas son casi simultáneas; la velocidad medida es mucho más alta que cualquier otra que podamos observar en nuestro entorno. ¿Cómo puede medir la velocidad? ¿Y por qué investigadores diferentes encontraron valores tan distintos para la velocidad en este experimento? El resultado de estos experimentos es que la velocidad de la electricidad es frecuentemente un alto porcentaje del de la velocidad de la luz – aunque nunca tan rápida como ella.

Desafío 5 s

Chispas, arcos eléctricos y rayos son similares. ¿Son flujos de cargas? En 1752, los experimentos llevados a cabo en Francia, siguiendo una sugerencia de Benjamin Franklin, publicado en Londres en 1751, demostró que se puede atraer electricidad desde una tormenta con una barra larga.* Las nubes de una tormenta están rodeadas de campos eléctricos. Estos experimentos hicieron a Franklin famoso en el mundo entero; ellos fueron también el comienzo del uso del pararrayos en todo el mundo. Posteriormente, Franklin construyó un pararrayos en su propia casa, pero de un tipo poco usual, como se muestra en la [Figura 7](#). Este dispositivo, inventado por Andrew Gordon, es llamado *carillón eléctrico*. ¿Puede imaginar lo que hacía en su salón durante el mal tiempo, con todas las

Ref. 6

* Los detalles de cómo es generado el rayo y cómo se propaga son todavía un asunto de investigación. Se da una introducción en [página 233](#).



FIGURA 8 Un equipo sencillo para confirmar la conservación de la carga eléctrica: si una piel frotada es movida desde el primer recipiente al segundo, la carga obtenida desde el primero es transferida al segundo recipiente, como muestran los dos electrómetros (© Wolfgang Rueckner).

Desafío 6 s cosas de metal y por qué? (No repita este experimento; cualquier dispositivo atado a un pararrayos puede matar.)

En resumen, *los campos eléctricos empiezan en los cuerpos* – siempre que estén cargado. La carga se puede alcanzar por frotación y otros procesos. Hay dos tipos de carga, negativa y positiva. *La carga puede fluir*: entonces recibe el nombre de *corriente eléctrica*. Los peores conductores de la corriente son los polímeros; se llaman *aislantes* o *dieléctricos*. Una carga depositada en un aislante permanece en el sitio donde fue puesta. Por el contrario, los metales son buenos conductores; una carga puesta sobre un conductor se esparce por toda su superficie. Los mejores conductores son la plata y el cobre. Esta es la razón de que en el presente, tras doscientos años del uso de la electricidad, la mayor concentración de cobre en el mundo esté bajo la superficie de Manhattan. También el aire es generalmente un aislante. No obstante, las cargas eléctricas pueden fluir a través del aire si el campo eléctrico tiene fuerza suficiente; esto produce chispas o, cuando la chispa es grande, un rayo.

CARGA ELÉCTRICA

Ya que todos los experimentos con cargas eléctricas pueden ser explicados por llamar a las dos cargas positiva y negativa, se puede deducir que algunos cuerpos tienen más y otros menos carga que uno que esté descargado, conocido como cuerpo *neutro*. Por tanto, las cargas eléctricas solo fluyen cuando dos cuerpos diferentemente cargados entran en contacto. Ahora bien, si la carga puede fluir y acumularse, deberíamos ser capaces de medir, de alguna manera, su cantidad. Obviamente, la *cantidad* de carga eléctrica de un cuerpo, generalmente abreviado q , debiera ser definida según la influencia que el cuerpo, digamos un poco de serrín, siente cuando está sometido a ese campo. La carga por tanto está definida mediante la comparación con una carga de referencia estándar. Para un cuerpo cargado de masa m acelerado en un campo, su carga q viene determinada por la relación

$$\frac{q}{q_{\text{ref}}} = \frac{dp/dt}{dp_{\text{ref}}/dt}, \quad (1)$$



FIGURA 9 Diferentes electrómetros: un electrómetro casero hecho con un bote de mermelada, un antiguo electrómetro (abierto) de precisión Dolezalek, la *Ampolla de Lorenzini* de un tiburón, y un moderno electrómetro digital (© Harald Chmela, Klaus Jost en www.jostimages.com, Advantest).

es decir, comparando la variación de su cantidad de movimiento con el cambio de la cantidad de movimiento de la carga de referencia. La carga determina por lo tanto el movimiento de los cuerpos en los campos eléctricos de la misma manera que la masa determina el movimiento de los cuerpos en los campos gravitacionales. La carga es consecuentemente la segunda propiedad intrínseca de los cuerpos, después de la masa, que descubrimos en nuestro paseo.

En la práctica, la carga eléctrica se mide con electrómetros. Varios de esos dispositivos se muestran en la [Figura 9](#). Las principales propiedades experimentales de las cargas eléctricas descubiertas por la experimentación con electrómetros son recogidas en la lista de la [Tabla 1](#).

La unidad de carga, el *culombio*, se define como un flujo estándar a través de un cable metálico, como se explica en el apéndice A. Esto es posible porque todos los experimentos muestran que

- ▷ La carga se *conserva*, *fluye* y se puede *acumular*.

En otras palabras, si la carga eléctrica de un sistema físico cambia, la razón siempre es

TABLA 1 Propiedades de la carga eléctrica clásica: una densidad escalar.

CARGAS ELÉCTRICAS	PROPIEDAD FÍSICA	NOMBRE MATEMÁTICO	DEFINICIÓN
Puede ser distinguida	distinguibilidad	elemento de un conjunto	Página 307
Puede ser ordenada	secuencia	orden	Vol. IV, página ??
Puede ser comparada	mensurabilidad	metricidad	Vol. IV, página ??
Puede cambiar gradualmente	continuidad	completitud	Vol. V, página ??
Puede ser sumada	acumulabilidad	aditividad	Vol. I, página 87
Puede ser separada	separabilidad	positiva o negativa	
No tiene orientación	escalar	número	Página 313
No cambia	conservación	invariancia	$q = \text{const}$

Ref. 7

que la carga está fluyendo hacia adentro o hacia afuera del sistema. Esto es fácilmente comprobable con dos frascos metálicos conectados a dos electrómetros, como muestra la [Figura 8](#). *La carga por tanto se comporta como una sustancia fluida*. Por ello nos vemos forzados a utilizar para su descripción una cantidad escalar q , que puede tomar valores positivos, cero o valores negativos para un cuerpo físico.

Describir la carga como una cantidad escalar permite aplicar todas las situaciones de la vida cotidiana al comportamiento de la carga eléctrica. No obstante, como en el caso de todos los conceptos clásicos encontrados previamente, algunos resultados experimentales para la carga eléctrica en las situaciones cotidianas de la [Tabla 1](#) resultarán ser solamente aproximados. Experimentos más precisos requerirán una revisión de la idea del cambio continuo del valor de la carga. A pesar de ello, hasta ahora, ningún contraejemplo sobre la conservación de la carga, ha sido observado.

En resumen, *la carga eléctrica es una cantidad escalar que describe el origen de los campos eléctricos. La carga eléctrica se conserva*. No hay forma de destruir o crear la carga eléctrica. Anteriormente hemos mencionado que los objetos sin carga eléctrica son llamados *neutros*. También los cuerpos neutros son influidos por los campos eléctricos. Esto sucede porque un objeto cargado colocado en la proximidad de un objeto neutro, es capaz de polarizarlo. La *polarización eléctrica* es la separación de las cargas positivas y las negativas en dos regiones diferentes de un cuerpo. Por esta razón, los objetos neutros, tales como el cabello o un chorro de agua, son atraídos generalmente por un cuerpo cargado, como un peine frotado. Ambos, aisladores y conductores pueden estar polarizados; y la polarización ocurre tanto para simples moléculas, como para objetos cotidianos o estrellas completas.

INTENSIDAD/FORTALEZA/POTENCIA DEL CAMPO ELÉCTRICO

Las cargas producen atracción y repulsión sobre otras cargas. Equivalentemente, las cargas cambian su cantidad de movimiento; las cargas ejercen fuerzas sobre otras cargas. Esto sucede a grandes distancias. Experimentos que exploran la energía y la conservación de la cantidad de movimiento muestran que la mejor descripción de estas interacciones es la que se ha mantenido hasta ahora: una carga produce un campo, el campo

TABLA 2 Valores de cargas eléctricas observadas en la Naturaleza.

OBSERVACIÓN	CARGA
Carga más pequeña no evanescente	$1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Carga por bit de una memoria de ordenador	por debajo de 10^{-15} C
Carga de un pequeño condensador	10^{-7} C
Promedio del flujo de carga de un rayo	1 C to 100 C
Carga almacenada en una batería de coche completamente cargada	0,2 MC
Carga del planeta Tierra	-1 MC
Carga repartida por una moderna central eléctrica en un año	$3 \cdot 10^{11} \text{ C}$
Carga total de signo positivo (o negativo) observada en el Universo	$10^{60 \pm 1} \text{ C}$
Carga total observada en el Universo	0 C

luego actúa sobre una segunda carga.

Experimentos tales como los de la [Figura 4](#) muestran que:

- ▷ El *campo eléctrico* forma líneas en el espacio.

Como consecuencia, el campo eléctrico se comporta como una pequeña flecha fija en cada punto \mathbf{x} del espacio. Los campos eléctricos vienen descritos por una dirección y una magnitud. La dirección local del campo viene dada por la dirección de la línea de campo – la tangente de la línea de campo. La magnitud local del campo viene dada por la densidad local de las líneas de campo. La dirección y la magnitud no dependen del observador. Resumiendo

- ▷ El *campo eléctrico* $\mathbf{E}(\mathbf{x})$ es un campo *vectorial*.

Los experimentos muestran que está mejor definido por la relación

$$q\mathbf{E}(\mathbf{x}) = \frac{d\mathbf{p}(\mathbf{x})}{dt} \quad (2)$$

tomada para cada punto del espacio \mathbf{x} . La definición del campo eléctrico está basada por lo tanto en cómo *mueve* las cargas. En general, el campo eléctrico es un vector

$$\mathbf{E}(\mathbf{x}) = (E_x, E_y, E_z) \quad (3)$$

Desafío 7 e y se mide en múltiplos de la unidad N/C o V/m.

La definición del campo eléctrico asume que la carga de prueba q es tan pequeña que no causa ninguna perturbación en el campo E . Por ahora dejemos este asunto debajo de la alfombra. Esto es un movimiento drástico: de esta forma estamos ignorando la teoría cuántica y todos los efectos cuánticos; volveremos con ello más adelante.

La definición del campo eléctrico también asume que el espacio-tiempo es plano, y que ignora todos los asuntos relacionados con la curvatura del espacio-tiempo.

TABLA 3 Algunos campos eléctricos observados.

OBSERVACIÓN	CAMPO ELÉCTRICO
Campo a 1 m de distancia de un electrón en el vacío	Desafío 9 s
Valores de campo sensibles para los tiburones	por debajo de 0,5 $\mu\text{V}/\text{m}$
Ruido cósmico	10 $\mu\text{V}/\text{m}$
Campo de un transmisor de radio FM de 100 W a 100 km de distancia	0,5 mV/m
Campo en el interior de conductores, tales como un cable de cobre	0,1 V/m
Campo justamente debajo de una línea de alto voltaje	0.1 to 1 V/m
Campo de una antena GSM a 90 m	0,5 V/m
Campo dentro de una casa corriente (típica)	1 a 10 V/m
Campo de una bombilla de 100 W a 1 m de distancia	50 V/m
Campo de tierra en la atmósfera terrestre	100 to 300 V/m
Campo dentro de nubes de tormenta	hasta más de 100 kV/m
Campo eléctrico máximo en el aire antes de que aparezcan chispas	1 a 3 MV/m
Campos eléctricos en membranas biológicas	10 MV/m
Campos eléctrico en el interior de los condensadores	hasta 1 GV/m
Campos eléctricos en pulsos láser de petavatios	10 TV/m
Campos eléctricos en iones U^{91+} , en el núcleo	1 EV/m
Campo eléctrico práctico máximo en el vacío, limitado por la producción de electrones pares	1,3 EV/m
Campo eléctrico máximo posible en la Naturaleza (campo eléctrico de Planck corregido $c^4/4Ge$)	$1,9 \cdot 10^{62} \text{ V/m}$

Desafío 8 s

Por cierto, ¿la definición de campo eléctrico que se ha dado asume una velocidad de la carga mucho menor que la de la luz?

Para describir completamente el movimiento debido a la electricidad, se necesita una relación que explique cómo las cargas *producen* campos eléctricos. Esta relación fue establecida con precisión (pero no por primera vez) durante la Revolución Francesa por Charles-Augustin de Coulomb, en su propia finca.* Encontró que alrededor de cualquier cuerpo de pequeño tamaño o de forma esférica con una carga Q *en reposo* existe un campo eléctrico. Para una posición a una distancia r , este campo eléctrico E viene dado por

$$E(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \frac{\mathbf{r}}{r} \quad \text{donde} \quad \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9,0 \text{ GV m/C} . \quad (4)$$

Más adelante extenderemos la relación para una carga en movimiento. La extraña proporcionalidad constante es válida universalmente. La constante está definida con la lla-

* Charles-Augustin de Coulomb (b. 1736 Angoulême, d. 1806 Paris), ingeniero y físico, proporcionó, con sus cuidadosos experimentos sobre las cargas eléctricas, una base firme para el estudio de la electricidad.

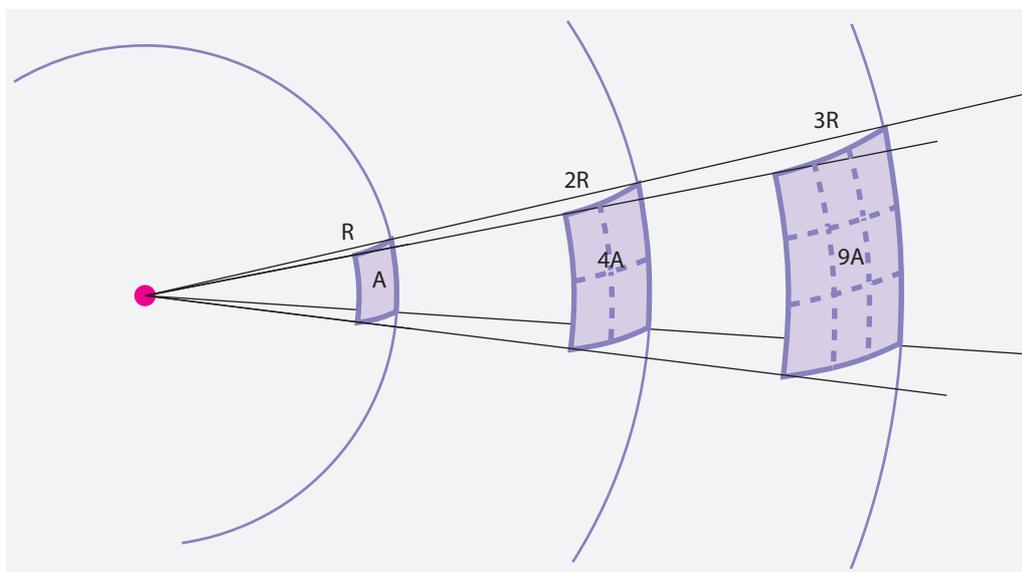


FIGURA 10 Una visualización de la fórmula de Coulomb y la ley de Gauss.

Desafío 10 s

mada *permisividad del espacio libre* ϵ_0 y se debe a la forma en la que históricamente se definió por primera vez la unidad de carga.* El punto esencial de la fórmula es el decrecimiento del campo con el cuadrado de la distancia; ¿puede imaginar el origen de esta dependencia? Una sencilla manera de representar la fórmula de Coulomb se ilustra en la Figura 10.

Las dos ecuaciones anteriores nos permiten escribir la interacción entre dos cuerpos cargados como

$$\frac{d\mathbf{p}_1}{dt} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \frac{\mathbf{r}}{r} = -\frac{d\mathbf{p}_2}{dt}, \quad (5)$$

donde $d\mathbf{p}$ es la variación de la cantidad de movimiento y \mathbf{r} es el vector que conecta los dos centros de masas. Esta es la famosa expresión para la atracción y la repulsión electrostática. También se debe a Coulomb. La relación es solamente válida para cuerpos cargados que sean de *pequeño tamaño* o *esféricos*, y más que nada, solamente para cuerpos que están *en reposo* con respecto a los otros y al observador. La exploración de las interacciones entre cargas en reposo se conoce como *electrostática*.

Los campos eléctricos aceleran las cargas. Como resultado, en la vida cotidiana, los campos eléctricos poseen dos propiedades importantes: contienen energía y pueden polarizar cuerpos. La energía contenida se debe a la interacción electrostática entre dos cargas. La fortaleza de su interacción es considerable. Por ejemplo, es la base para la fuerza de nuestros músculos. La fuerza muscular es un efecto macroscópico de la relación de

* También son posibles otras definiciones de ésta y otras constantes de proporcionalidad que pueden encontrarse más adelante, siguiendo un *sistemas de unidades* diferentes del sistema SI usado aquí. El sistema SI se presenta en detalle en la apéndice A. Entre los antiguos competidores, el sistema unitario Gaussiano utilizado con frecuencia para cálculos teóricos, el sistema unitario de Heaviside-Lorentz, el sistema unitario electrostático y el sistema unitario electromagnético son los más importantes.

Ref. 8

TABLA 4 Propiedades del campo eléctrico clásico: un vector (polar) para cada punto del espacio.

LOS CAMPOS ELÉCTRICOS PUEDEN	PROPIEDADES FÍSICAS	NOMBRE MATEMÁTICO	DEFINICIÓN
Atraer cuerpos	acelerar cargas	emparejarse	ecuación (4)
Repeler cuerpos	acelerar cargas	emparejarse	ecuación (4)
Ser distinguibles	distinguibilidad	elemento de un conjunto	Página 307
Cambiar gradualmente	continuo	espacio vectorial real	Vol. I, página 87, Vol. V, página ??
Apuntar a cualquier sitio	dirección	espacio vectorial, dimensionalidad	Vol. I, página 87
Ser comparados	mensurabilidad	metricidad	Vol. IV, página ??
Ser añadidos	acumulable	espacio vectorial	Vol. I, página 87
Tener ángulos definidos	dirección	espacio vectorial Euclidiano	Vol. I, página 87
Exceder cualquier límite	infinitud	ilimitados	Página 308
Cambiar de dirección bajo la reflexión	polaridad	vector de paridad-impar	Página 97
Mantener la dirección bajo reversión temporal	polaridad	vector temporal-par	Página 97

Coulomb(5). Otro ejemplo es la fortaleza material del acero o del diamante. Como descubriremos, todos los átomos se mantienen unidos por la atracción electrostática. Para convencerse usted mismo de la fortaleza de la atracción electrostática, responda a lo siguiente: ¿Cual es la fuerza entre dos cajas con un gramo de protones cada una, situadas en los dos polos de la Tierra? Trate de imaginar el resultado antes de calcular el impresionante valor.

Desafío 11 s

La atracción eléctrica es, por tanto, mucho más fuerte que la atracción gravitacional. ¿Cual es la relación entre las dos? La relación de Coulomb para campos alrededor de una carga puede ser reformulado de la siguiente manera como ayuda en la generalización para cuerpos no esféricos. Tomemos una superficie cerrada, esto es, una superficie que encierre un cierto volumen. La integral del campo eléctrico sobre esta superficie A , el flujo eléctrico, es la carga encerrada Q dividida por ϵ_0 :

Desafío 12 e

$$\oint_{\text{superficie cerrada } A} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}. \quad (6)$$

Desafío 13 s

Esta relación matemática, llamada '*ley de Gauss*',* es equivalente al resultado de Coulomb. (Nótese que la forma simplificada proporcionada aquí, es solamente válida para

* Carl-Friedrich Gauß (b. 1777 Braunschweig, d. 1855 Göttingen) junto a Leonhard Euler, el matemático más importante de todos los tiempos. Un famoso niño prodigio, que a la edad de 19 años, construyó el heptadecágono regular con un compás y una regla (véase la www.mathworld.wolfram.com/Heptadecagon.html). Quedó tan orgulloso de su resultado que colocó un dibujo de la figura en su tumba. Gauss propor-

situaciones estadísticas.) Ya que en el interior de los conductores el campo eléctrico es cero, la relación de Gauss implica, por ejemplo, que si una carga q está rodeada por una esfera de metal no cargada, la superficie *externa* de la esfera metálica presenta la misma carga q .

Desafío 14 e

Vol. V, página ??

Desafío 15 s

¿Se atraen entre sí los cuerpos neutros descargados? En primera aproximación, no sería así. Pero cuando la cuestión es investigada con más profundidad, encontraremos que se pueden atraer entre ellos. ¿Podría encontrar las condiciones para que esto sucediera? De hecho, las condiciones son de máxima importancia, ya que nuestros propios cuerpos, que están hechos de moléculas neutras, están sostenidos de esta manera.

ACUMULADORES DE CARGAS

Debido a la gran intensidad de las interacciones electromagnéticas, la separación de cargas no es una tarea fácil. Esta es la razón por la que los efectos eléctricos solamente han sido utilizados de manera generalizada desde hace apenas cien años. La humanidad tuvo que esperar a que fueran inventados dispositivos prácticos y eficientes que fueran capaces de separar las cargas y ponerlas en movimiento: para usar los efectos, se necesitan *acumuladores de cargas*. Algunos de estos dispositivos se muestran en la [Figura 11](#). ¿Puede explicar si las baterías o cualquier otro de estos dispositivos son fuentes de carga?

Desafío 16 s

Por supuesto, cada acumulador de carga requiere energía. Las baterías de los teléfonos móviles y los canales de iones de las células vivas utilizan energía química para realizar el truco. Elementos termoeléctricos, como los utilizados en algunos relojes, usan la diferencia de temperatura entre la muñeca y el aire para separar las cargas; las células solares utilizan la luz, los elementos piezoeléctricos usan la tensión y los dinamos o los generadores Kelvin utilizan la energía cinética.

¿QUÉ ES LA ELECTRICIDAD?

El término *electricidad* se usa también para dar nombre a un campo de investigación. Normalmente, el nombre se utiliza para referirse a la corriente eléctrica. De forma general, el término es usado para hacer referencia a los efectos de las cargas eléctricas, de su movimiento y de sus campos.

De hecho, el vocabulario utilizado esconde una pregunta más profunda: ¿cual es la naturaleza de la carga eléctrica? Con objeto de resolver este asunto extremadamente difícil, comenzamos con la siguiente pregunta.

¿ES POSIBLE DETECTAR LA INERCIA DE LA ELECTRICIDAD?

Si la carga eléctrica es verdaderamente algo *que fluye* a través de los metales, deberíamos ser capaces de observar los efectos mostrado en la [Figura 12](#): la carga eléctrica debería

cionó muchos resultados en la teoría de los números, topología, estadística, álgebra, números complejos y geometría diferencial los cuales son parte de las matemáticas modernas y llevan su nombre. Entre sus muchos logros, desarrolló una teoría sobre la curvatura y el desarrollo de la geometría no-Euclidiana. También trabajó sobre el electromagnetismo y la astronomía.

Gauss tenía un carácter difícil, siempre trabajó para sí mismo y no creó escuela. Publicó poco y su lema fue: *pauca sed matura*. Como consecuencia, cuando otro matemático publicaba un nuevo resultado, él sabía un cuaderno en el que tenía ya anotado el mismo resultado años antes. Estos cuadernos están ahora disponibles online, en la www.sub.uni-goettingen.de.



FIGURA 11 Distintos tipos de bombas de carga: una dinamo de bicicleta, un alternador de una central eléctrica, una máquina Wimshurst, una anguila eléctrica, una célula voltáica, una hoja y una célula solar (© Wikimedia, Q-Cells).

caer, debería tener inercia y podría ser separable de la materia. Y en verdad, cada uno de esos efectos han sido observados. Por ejemplo, cuando una larga barra de metal se pone verticalmente, podemos medir una diferencia de potencial eléctrico, un *voltaje*, entre sus dos extremos. En otras palabras, se puede medir el *peso* de la electricidad de esta forma. De manera similar, se puede medir la diferencia de potencial entre los dos extremos de una barra acelerada. Alternativamente, se puede medir la diferencia de potencial entre el centro y el borde de un disco metálico en rotación. El último experimento fue, de hecho, la manera en la cual la razón q/m para las corrientes en los metales fue medida con precisión por primera vez. El valor para la inercia de la electricidad es

$$q/m \approx -1,8(2) \cdot 10^{11} \text{ C/kg} \quad (7)$$

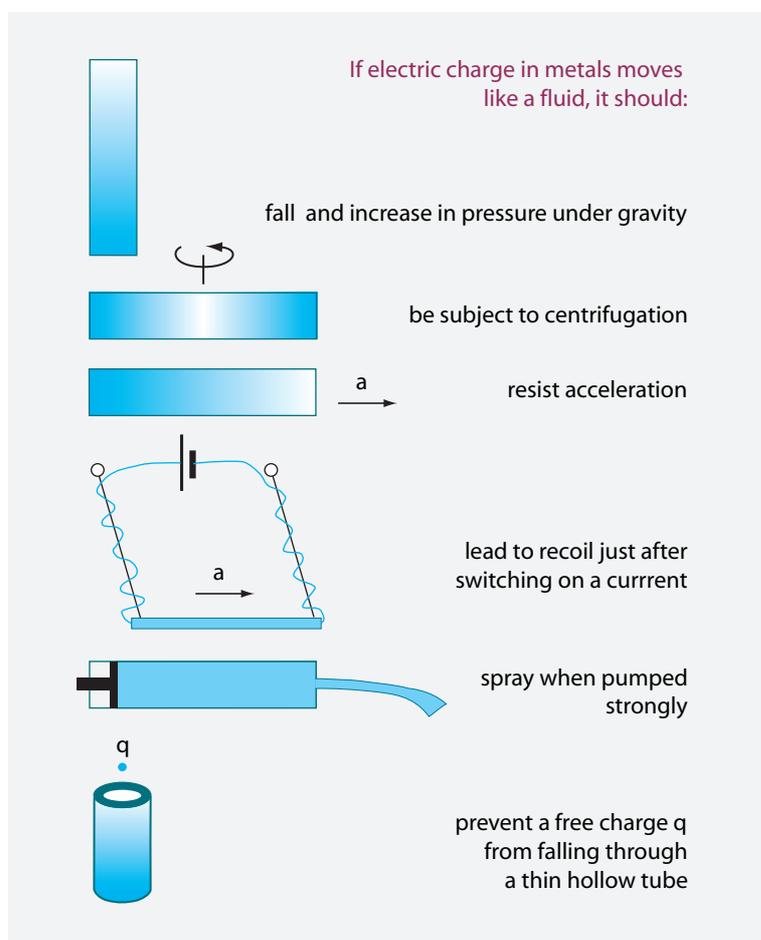


FIGURA 12
Consecuencias del flujo de electricidad, en la manera que es expuesto en el texto.

para todos los metales, con pequeñas variaciones en el segundo dígito. El signo menos es debido a la definición de carga. En resumen, la carga eléctrica de los metales tiene masa, aunque es muy pequeña.

Ref. 10 Si la carga eléctrica tiene masa, cada vez que cambiamos una corriente eléctrica, se producirá un *retroceso*. Este simple efecto se puede medir fácilmente y confirma la relación carga-masa dada anteriormente. También se observa la emisión de corriente en el aire o en el vacío; de hecho, el tubo de rayos catódicos del interior de las viejas televisiones utilizaban este principio para generar el rayo que producía las imágenes. La emisión funciona mejor con objetos metálicos de puntas afiladas. Los rayos creados de esta manera – podría decirse que están ‘libres’ de electricidad – son llamados *rayos catódicos*. Con un pequeño porcentaje de desviación, presentan la misma relación carga-masa de la expresión (7). Esta correspondencia muestra, por tanto, que las cargas se mueven casi tan libremente en los metales como en el aire; esta es la razón por la que los metales son tan buenos conductores de la corriente eléctrica.

Ref. 11 Si una carga eléctrica *cae* dentro de una barra metálica de metal, podemos llegar a la sorprendente conclusión de que los rayos catódicos no pueden caer por un tubo de metal

vertical. Como veremos más adelante, los rayos catódicos están formados por electrones libres. El nombre de ‘electrón’ se debe a George Stoney. Los electrones son las cargas más pequeñas y más luminosas que se mueven en los metales; son generalmente – pero no siempre – los ‘átomos’ de la electricidad. En particular, los electrones conducen la corriente eléctrica en los metales. La carga de un electrón es pequeña, 0,16 aC, por lo tanto, la carga normal que fluye en la vida cotidiana la forman enormes cantidades de electrones; como resultado, la carga eléctrica se comporta como un fluido continuo. La partícula en sí misma fue descubierta y presentada en 1897 por Johann Emil Wiechert (b. 1861 Tilsit, d. 1928 Göttingen) y de forma independiente, tres meses después, por Joseph John Thomson (b. 1856 Cheetham Hill, d. 1940 Cambridge).

Los rayos catódicos no podrían caerse por un tubo vertical porque la aceleración debida al campo eléctrico generado por el desplazamiento de la electricidad en el tubo de metal y la aceleración gravitacional se contrarrestarían. Así, los electrones no deberían poder caerse por un delgado y largo cilindro. Este no debería ser el caso si la electricidad en los metales no se comportara como un fluido. El experimento ha sido llevado a cabo realmente, y se ha observado una reducción de la aceleración en caída libre para los electrones del 90 %. ¿Puede imaginar por qué el valor ideal del 100 % no se ha conseguido?

Desafío 17 e

Ref. 12

Desafío 18 s

Experimentos de precisión realizados con cargas provenientes de metales muestran que la relación carga-masa guardan una relación de

$$q/m = -1,758\ 820\ 150(44) \cdot 10^{11} \text{ C/kg} \quad (8)$$

Las partículas con esta propiedad reciben el nombre de *electrones*. En la Naturaleza también existen otros tipos de cargas, con diferente relación carga-masa. Citemos como ejemplos los *iones* encontrados en las baterías y las hojas de las plantas, los *muones* encontrados en los rayos cósmicos, y los *mesones* producidos en los aceleradores de partículas. Nos encontraremos con estas partículas más adelante en nuestra aventura.

Puesto que la corriente eléctrica se comporta como un líquido, deberíamos poder medir su velocidad. El primero que lo hizo, en 1834, fue Charles Wheatstone. En un famoso experimento, utilizó un cable de una longitud de un cuarto de milla para producir tres chispas: una al principio, otra al final y otra en el centro. Luego montó en un reloj mecánico un espejo que se movía con bastante rapidez para observar los reflejos de las tres chispas. Notando que había un cierto retraso entre las imágenes de las chispas, calculó una velocidad de propagación de 0,45 Gm/s, aunque con un gran margen de error. Posteriormente, unas medidas más precisas mostraron que la velocidad siempre estaba por debajo de 0,3 Gm/s, y que ello dependía del metal y del tipo de aislamiento del cable. El alto valor de la velocidad convenció a mucha gente para la utilización de la electricidad en la transmisión de mensajes. En realidad, estos experimentos miden la *velocidad de señal* de las ondas electromagnéticas transportadas por cables metálicos. La velocidad real de las cargas eléctricas resulta ser mucho más baja, como se mostrará más adelante. Una versión moderna del experimento de la velocidad de señal, para los amantes de los ordenadores, utiliza el comando ‘ping’ del sistema operativo UNIX. El comando ‘ping’ mide el tiempo de ida y vuelta que tarda una señal emitida por un ordenador en encontrar a otro ordenador. Si la longitud del cable que une ambos ordenadores es conocida, se puede calcular la velocidad de la señal. Sólo tiene que intentarlo.

Página 267

Ref. 13

Desafío 19 e

TABLA 5 Algunos valores observados de la corriente eléctrica.

OBSERVACIÓN	CORRIENTE
Corriente más pequeña jamás medida (para un electrón en movimiento)	3 aA
Señal en un nervio humano	20 μ A
Corriente mortal para los humanos	tan baja como 20 mA, normalmente 100 mA
Corriente generada por la máquina de un tren	600 A
Corriente de un rayo	10 a 100 kA
Corriente más alta producida por los humanos	20 MA
Corriente en el interior de la Tierra, en el origen de su campo magnético	c. 100 MA
Corriente máxima posible en la Naturaleza (corriente eléctrica corregida de Planck $e\sqrt{c^5/4\hbar G}$)	1,5 YA

Ref. 14

La velocidad de la electricidad resulta *demasiado baja* para mucha gente. Los chips de los ordenadores podrían ser más rápidos si ella fuera más alta. Y los ordenadores conectados a los mercados de valores están localizados físicamente lo más cerca posible de ellos, puesto que la ventaja en tiempo que proporciona una distancia corta para la comunicación (incluyendo el retraso interno de los chips) es esencial para obtener un buen rendimiento financiero en algunos mercados de contratación.

En resumen, los experimentos muestran que *todas las cargas tienen masa*. Y como todos los cuerpos con masa, *las cargas se mueven más despacio que la luz*. La carga es una propiedad de la materia; las imágenes y la luz no tiene carga.

¿CÓMO SE DETECTAN LOS CAMPOS ELÉCTRICOS

¿Por qué la electricidad es peligrosa para los humanos? La principal razón es que el propio cuerpo humano está controlado por 'cables eléctricos'. Como resultado, la electricidad aplicada a los cuerpos humanos desde fuera interfiere con las señales internas. Esto ya era conocido desde 1789. En ese año el doctor en medicina Luigi Galvani (b. 1737 Bologna, d. 1798 Bologna) descubrió que la corriente eléctrica hace que los músculos de un animal muerto se contraigan. El famoso primer experimento utilizó ancas de rana: cuando se les aplicaban electricidad, se retorcián violentamente. Investigaciones posteriores confirmaron que todos los nervios hacen uso de señales eléctricas. Utilizando electricidad, puede conseguirse, por ejemplo, que cadáveres recientes se muevan. Los nervios son los 'cables de control' de los animales. Exploraremos los nervios con más detalles posteriormente.

Página 56

Estando eléctricamente controlados, todos los animales pueden detectar fuertes campos eléctricos. Los humanos pueden sentir campos de unos 10 kV/m, cuando el pelo se eriza. Por el contrario, otras especies animales pueden sentir campos eléctricos (y mag-

TABLA 6 Algunos sensores para la corriente eléctrica.

MEDIDA	SENSOR	RANGO
Multímetro convencional de 20 euros	caída de voltaje sobre una resistencia	hasta <i>c.</i> 3 A
Umbral de percepción	nervio humano	sentido desde 0,1 mA en adelante
Contractura muscular reversible no peligrosa	nervio humano	hasta 10 mA durante un tiempo prolongado, o hasta 200 mA como máximo 10 ms
Cambio de ritmo	corazón humano	parada cardíaca cuando aproximadamente 20 mA fluye por él
Contracción muscular fuerte con algún daño	nervio humano	hasta 100 mA en tiempo prolongado, o hasta 1 A como máximo 200 ms
Emisión de humo, fuertes quemaduras	piel humana	desde 1 A
Fuego	árboles	desde 1 kA
Anguila eléctrica <i>Electrophorus electricus</i>	innato	hasta 1 A y 500 V

Página 25

néticos) mucho más débiles. Esta habilidad se conoce como *electrorrecepción*. Los tiburones, por ejemplo, pueden detectar campos por debajo de $0,5 \mu\text{V}/\text{m}$ usando sensores especiales, la *Ampolla de Lorenzini*, la cual se encuentra alrededor de su boca. Los tiburones las utilizan para detectar el campo creado por sus presas cuando se mueven en el agua; esto les permite capturar a sus presas incluso en la oscuridad.

Los músculos de las presas vivas generan campos eléctricos. Algunas especies animales han desarrollado sensores de campos eléctricos para detectarlas en aguas demasiado turbias para poder ver en ellas. La salamandra es un ejemplo, así como el ornitorrinco (*Ornithorhynchus anatinus*), el famoso mamífero picudo, que también puede sentir los campos eléctricos; sin embargo ellos perciben solamente sensibilidades del orden de mV/m . En realidad, solamente se conocen unos pocos mamíferos capaces de percibir campos eléctricos: además de los ornitorrincos también los equidnas (llamados también taquiglósidos) pueden sentir los campos eléctricos con sus picos. En 2011, se descubrió que el delfín de Guayana, *Sotalia guianensis*, puede sentir campos del orden de $0,5 \text{ mV}/\text{m}$ con órganos de su hocico. Se conjetura que otros delfines también poseen esta habilidad.

Numerosos peces, los conocidos como *peces eléctricos*, son capaces de *generar* campos eléctricos con objeto de conseguir de una manera más eficaz la detección de sus presas.* Esta estrategia es utilizada, por ejemplo, por el pez elefante (*Gnathonemus petersii*). La

* Hasta el año 2000 no consiguió la tecnología hacer uso del mismo efecto. Hoy en día, los sensores del airbag de los coches, con frecuencia utilizan campos eléctricos para detectar si la persona que ocupa el asiento es un niño o un adulto, para modificar, por tanto, la forma en que se comporta el airbag en caso de accidente.

- Ref. 15 sensibilidad conseguida está por debajo de 2 mV/m. En realidad, ¡algunos peces eléctricos utilizan la *variación temporal* de los campos eléctricos creados por un dipolo para comunicarse!. Se comunican entre ellos sus especies, sus sexos, sus identidades, y se comunican sobre el cortejo, la agresión, el apareamiento y el peligro. La frecuencia que utilizan se mueven en un rango comprendido entre unos pocos y 200 Hz, y los campos son los de un dipolo creado entre las partes anterior y posterior de sus cuerpos.
- Ref. 16

El más aterrador – y el más feo – de los animales eléctricos es la anguila eléctrica, *Electrophorus electricus*. Puede alcanzar los 2 m de largo y un peso de hasta 20 kg. Ya que los campos eléctricos tienen efectos más fuertes en el aire que en el agua, cuando una presa vadea su territorio, la anguila frecuentemente salta fuera del agua para agarrar a su presa, de tal manera que pueda matarla más fácilmente utilizando sus órganos productores de corriente de alta intensidad y alto voltaje 500 V y 1 A. Es capaz de matar caballos de esta manera.

Ningún animal terrestre posee sensores para campos eléctricos débiles, ya que cualquier campo eléctrico en el aire se descarga violentamente cuando se topa con un animal cuyo cuerpo se encuentra relleno de agua.* Verdaderamente, la atmósfera por lo general tiene un campo eléctrico vertical bajo, de unos 100 V/m; en el interior del cuerpo humano este campo es descargado con un rango de $\mu\text{V}/\text{m}$, lo cual es bastante inferior al campo eléctrico interno de un animal. En otras palabras, los humanos no poseen sensores para campos eléctricos bajos porque son animales terrestres. (¿Poseen los humanos la habilidad de sentir campos eléctricos en el agua? Nadie parece saberlo.) No obstante, hay algunas excepciones. Quizá sepa que algunas personas mayores pueden percibir en sus articulaciones la aproximación de un tormenta. Esto se debe a la coincidencia entre la frecuencia del campo magnético emitida por las nubes tormentosas – de unos 100 kHz – y la frecuencia resonante de las membranas celulares de los nervios.

Desafío 20 r

Página 117

El agua que contiene el cuerpo humano también supone que los campos eléctricos en el aire que se producen en la Naturaleza raramente son peligrosos para los humanos. Pero siempre que un humano sienta de manera consciente campos eléctricos, por ejemplo cuando un alto voltaje hace que su cabello se erice, la situación es potencialmente peligrosa

La alta impedancia del aire también significa que, en el caso de campos electromagnéticos que varían con el tiempo, los humanos son mucho más propensos a ser afectados por el componente magnético que por el componente eléctrico.

Las plantas también sienten y aún producen campos eléctricos. En el interior de muchas plantas de gran tamaño, se intercambian señales eléctricas, para informar sobre daños producidos por insectos. En 2016, los investigadores finalmente descubrieron el mecanismo molecular mediante el cual las células de las plantas podían sentir los campos eléctricos. Ya era conocido desde mucho tiempo atrás, que las flores con frecuencia están cargadas negativamente. En 2013, se demostró que las abejas son capaces de sentir esos campos. Las abejas generalmente están cargadas positivamente, debido a efectos aerodinámicos. La carga negativa de las plantas también hace que el polen se adhiera mejor a la abeja.

* Aunque algunos animales terrestres que pueden nadar mucho tiempo bajo el agua si tienen sensores de campos eléctricos.



FIGURA 13 Distintos tipos de imanes e imanes eficaces: la aguja de un brújula, algunas herraduras magnéticas, dos galaxias, el órgano magnético de una paloma, la Tierra, un elevador magnético, y el Sol. (© Wikimedia, Shambhavi, Anthony Ayiomamitis, NASA).

TABLA 7 Búsquedas de monopolos magnéticos, i.e., para cargas magnéticas, en más de 140 experimentos.

B Ú S Q U E D A	C A R G A M A G N É T I C A
Carga magnética más pequeña sugerida por la teoría cuántica $g = \frac{h}{e} = \frac{eZ_0}{2\alpha} = 4,1 \text{ pWb}$	
Búsqueda en minerales, desde las montañas a la profundidad del océano	ninguna, solamente dipolos Ref. 17
Búsqueda en meteoritos y materiales lunares	ninguna, solamente dipolos Ref. 17
Búsqueda en rayos cósmicos	ninguna (una falsa alarma en la década de 1970), solamente dipolos Ref. 17
Búsqueda con aceleradores de partículas	ninguna, solamente dipolos Ref. 17

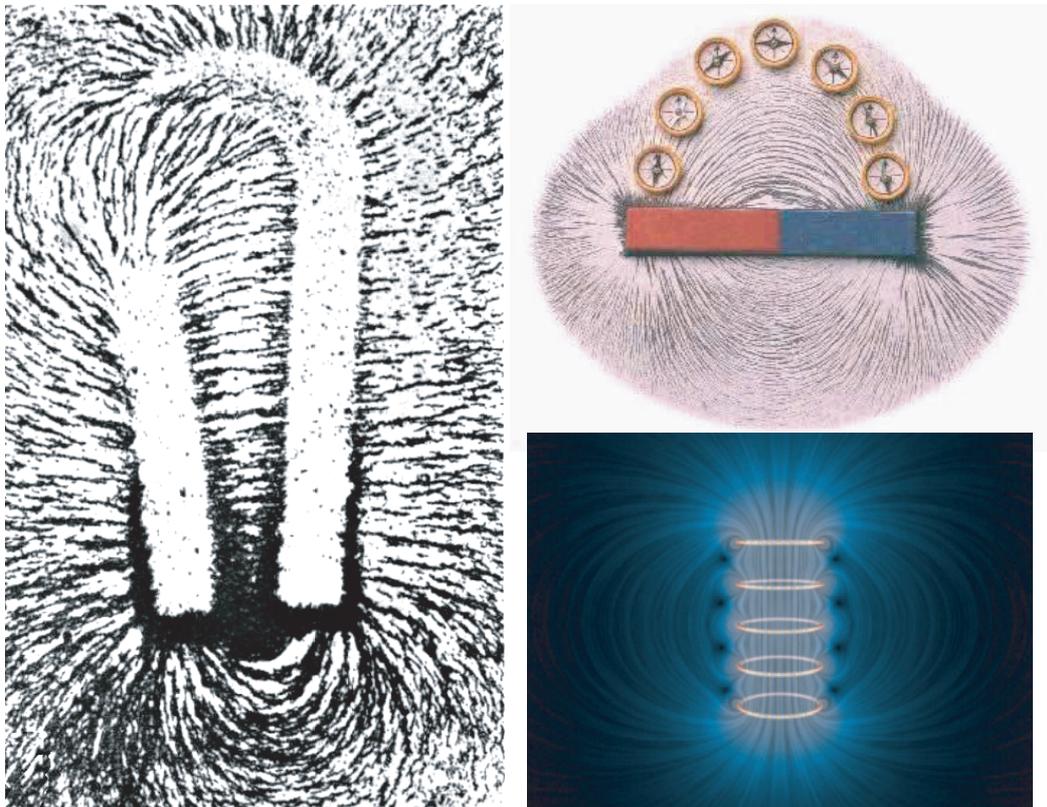


FIGURA 14 Visualizando campos magnéticos alrededor de imanes (magnetos) y bobinas – con limaduras de hierro, con agujas de brújulas y limaduras de hierro, y con gráficos de ordenador (© Wikimedia, MIT).

TABLA 8 Algunos campos magnéticos observados.

OBSERVACIÓN	CAMPO MAGNÉTICO
Campo magnético medido más bajo (e.g., Resonancia de campos de Schumann)	1 fT
Campos magnéticos producidos por corrientes cerebrales	0,1 pT a 3 pT
Campo magnético producido por una simple acción muscular	1 pT
Campos magnéticos intergalácticos	1 pT a 10 pT
Campo magnético en el torso humano debido a corrientes del corazón	100 pT
Campo magnético de nuestra galaxia	0,5 nT
Campo magnético debido al viento solar	0.2 a 80 nT
Campo magnético justamente debajo de un cable eléctrico de alto voltaje	0.1 a 1 μ T
Campo magnético de la Tierra	20 a 70 μ T
Campo magnético dentro de una casa con electricidad	0.1 a 100 μ T
Campo magnético cerca de un teléfono móvil	100 μ T
Campo magnético que influye en la calidad visual de imágenes en la oscuridad	100 μ T
Campo magnético cerca de un imán de hierro	100 mT
Manchas solares	1 T
Campos magnéticos cerca de un imán permanente de alta tecnología	max 1,3 T
Campos magnéticos que producen sensación de frío en los humanos	5 T o más
Campos magnéticos en un acelerador de partículas	10 T
Campo magnético estático máximo producido con bobinas superconductoras	22 T
Campos magnéticos estáticos más altos producidos en el laboratorio, utilizando imanes híbridos	45 T
Mayores campos magnéticos <i>pulsados</i> producidos sin destrucción de las bobinas	76 T
Campo magnético pulsado producido, con una duración aproximada de 1 μ s, utilizando bobinas de impacto	1000 T
Campo de una enana blanca	10 ⁴ T
Campos en un láser de pulsos de petawatios	30 kT
Campo de una estrella de neutrones	desde 10 ⁶ T a 10 ¹¹ T
Campo magnético crítico cuántico	4,4 GT
Campo mayor jamás medido, sobre un magnetar - magnetoestrella - y un repetidor gamma suave SGR-1806-20	0.8 a 1 \cdot 10 ¹¹ T
Campo magnético estimado cerca del núcleo atómico	1 TT
Máximo campo magnético posible en la Naturaleza (campo magnético de Planck corregido $c^3/4Ge$)	6,3 \cdot 10 ⁵³ T

IMANES Y OTROS MATERIALES MAGNÉTICOS

El estudio del magnetismo progresó en el mundo independientemente del estudio de la electricidad. Fue hacia finales del siglo XII, cuando la brújula comenzó a utilizarse en Europa. En esa época, ya se producían acalorados debates sobre si señalaba el norte o el sur. Posteriormente, en 1269, el ingeniero militar Pierre de Maricourt (b. 1219 Maricourt, d. 1292 desconocido) publicó su estudio sobre materiales magnéticos. Encontró que todo imán tiene *dos* puntos de más alta magnetización, a los que llamó *polos*. También descubrió que aún después de dividir un imán en partes, cada una de las piezas siempre mantiene los dos polos; cuando se deja que la piedra rote libremente, uno apunta al norte y el otro al sur.

Ref. 18

- ▷ Todos los imanes son dipolares.

Los dos polos reciben el nombre de *polo norte* y *polo sur*. Maricourt, así mismo, descubrió que

- ▷ Polos iguales se repelen, y polos diferentes se atraen.

Como consecuencia, el polo norte magnético de la Tierra es el más cercano al polo sur y viceversa.

Los imanes están rodeados por campos magnéticos. Los campos magnéticos, al igual que los campos eléctricos, pueden ser visualizados con líneas de campos. La [Figura 14](#) muestra algunas formas de hacerlo. Inmediatamente podemos notar la principal diferencia entre las líneas de los campos magnéticos y la de los campos eléctricos: las líneas de los campos magnéticos no tienen principio ni final, mientras que las de los campos eléctrico sí. (No obstante, las líneas de campos magnéticos por lo general no son cerradas; esto ocurre solamente en casos muy especiales.) La dirección de las líneas de campo señala la dirección del campo magnético, y la densidad de las líneas proporciona la magnitud del campo.

Como muestra la [Figura 13](#), muchos sistemas de la Naturaleza se comportan como imanes. La existencia de dos polos magnéticos es válida para todos los imanes de la Naturaleza: moléculas, átomos y partículas elementales son o bien dipolos o no son magnéticas.

- ▷ No existen los imanes de un solo polo.

Las líneas del campo magnético podrían comenzar o terminar en un monopolio magnético – si existiera alguno. A pesar de la promesa de reconocimiento eterno, ningún monopolio magnético ha sido encontrado jamás. Las búsquedas se resumen en la [Tabla 7](#).

Los imanes tienen una segunda propiedad importante, mostrada en la [Figura 15](#): los imanes, a través de su campo magnético, transforman materiales no-magnéticos en materiales magnéticos. Hay, por tanto, una *polarización magnética*, similar a la polarización eléctrica. La cuantía de la polarización depende de cada material; la [Tabla 9](#) muestra algunos valores.

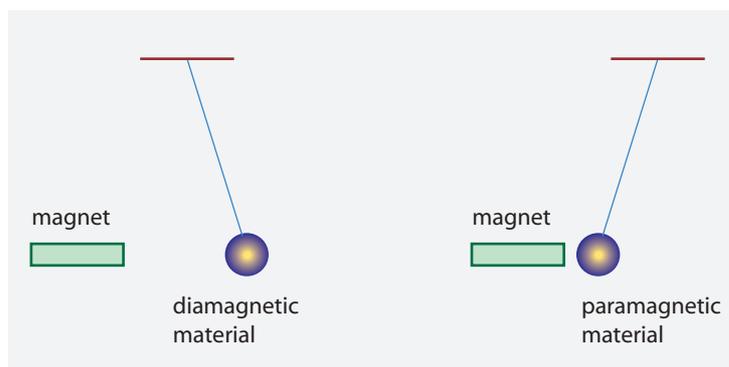


FIGURA 15 Los dos tipos básicos de comportamiento de los materiales magnéticos (observados en un campo *no homogéneo*): diamagnetismo y paramagnetismo.

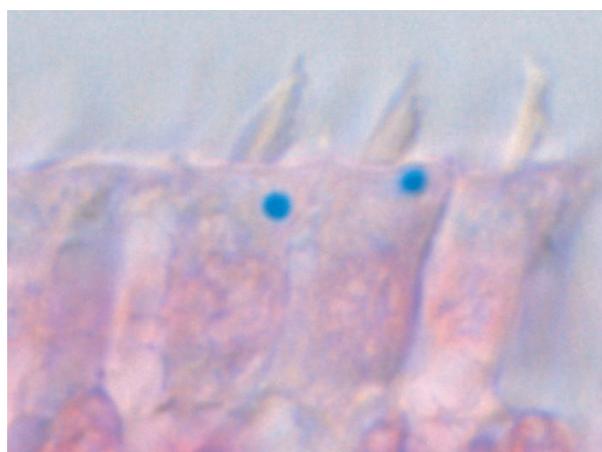


FIGURA 16 Células teñidas en el oído interno de palomas; la química utilizada proporciona a las partículas de hierro una coloración azul. Las partículas magnéticas se encuentran justamente debajo de sus cabellos (© Institute of Molecular Pathology, Vienna).

- Algunos materiales, los llamados materiales *diamagnéticos*, son *repelidos* por los imanes, aunque generalmente por fuerzas débiles.
- Otros, los conocidos como materiales *paramagnéticos*, son *atraídos* por los imanes.
- Algunos materiales importantes, los *materiales ferromagnéticos*, tales como el acero, *retienen* la polarización magnética: quedan magnetizados permanentemente. Esto sucede cuando los átomos del material quedan alineados a causa de un imán externo. Los materiales ferromagnéticos se utilizan para producir *imanes* permanentes – por tanto se trata de imanes artificiales.

Los materiales magnéticos son esenciales para la producción industrial de la corriente eléctrica y forman parte de la mayoría de los dispositivos que utilizan la electricidad.

¿CÓMO DETECTAN LOS ANIMALES LOS CAMPOS MAGNÉTICOS?

“Cualquier idiota puede hacer más preguntas que las que siete sabios pueden responder.”
Antigüedad

Es sabido que las abejas melíferas, los tiburones, las palomas, las grullas canadienses, otras variedades de aves, el salmón, la trucha, las tortugas de mar, los delfines y determi-

TABLA 9 Las propiedades magnéticas de los materiales – para campos estáticos a temperatura ambiente.

MATERIAL	PERMEABILIDAD MAGNÉTICA RELATIVA μ_r
Materiales diamagnéticos $\mu_r < 1$, repelidos por los imanes	
Superconductores Tipo I	0
Grafito pirolítico altamente orientado	0.999 55
Bismuto	0.999 83
Grafito	0.999 84
Oro	0.999 966
Cobre	0.999 9936
Agua	0.999 9912
Animales y plantas en general	como el agua
Materiales paramagnéticos $\mu_r > 1$, atraídos por los imanes	
Aire, oxígeno	1.000 0019
Partículas biomagnéticas en los organismos vivos	1.000 006
Aluminio	1.000 022
Platino	1.000 26
Materiales ferromagnéticos $\mu_r \gg 1$, capaces de formar imanes	
SmCo	c. 1.04
NdFeB	c. 1.15
Cobalto	80 a 200
Níquel	100
Hierro	300 a 10 000
Permalloy	c. 8 000
Ferritas	hasta 15 000
μ -metal	hasta 140 000
Metales amorfos	hasta 500 000

Ref. 19 **nadas bacterias pueden detectar los campos magnéticos. Esa habilidad se conoce como *magnetorrecepción*. Todas estas formas de vida, utilizan esta habilidad para la navegación. El método de detección más común es el uso de partículas magnéticas en el interior de una célula; por tanto las células sienten cómo estos pequeños imanes innatos se comportan en un campo magnético. Los imanes son minúsculos, por lo general de unos 50 nm de tamaño. Estos pequeños imanes se utilizan para navegar a lo largo de los campos magnéticos de la Tierra. A los animales de mayor tamaño, la variaciones del campo magnético de la Tierra, 20 a 70 μ T, les muestran un paisaje que es parecido al paisaje visible por los humanos. Pueden recordarlos y utilizarlos para la navegación.**

De hecho, las aves migratorias como las grullas canadienses (*Grus canadensis*) parecen tener *dos* formas de detectar los campos magnéticos. Ante todo, ellas poseen pequeños cristales de hierro localizados en el interior de las neuronas que les proporcionan

TABLA 10 Propiedades dieléctricas de los materiales – para campos estáticos a temperatura ambiente.

MATERIAL	PERMITIVIDAD ELÉCTRICA RELATIVA ϵ_r
Materiales dieléctricos	
Vacío	1
Aire	1.0006
Teflón	2.1
Grafito	10 a 15
Dióxido de Silicona	3.9
Silicona	11.7
Metanol	30
Agua	80.1
Dióxido de Titanio	86-173
Materiales paraeléctricos	
Titanato de Estroncio (una Perovskita)	310
Titanato de Estroncio-Bario (una Perovskita)	500
Materiales ferroeléctricos $\epsilon_r \gg 1$, capaces de formar electretes	
Niobato de Litio (por debajo de 1430 K)	...
Titanato de Bario	1 250 a 10 000
Polímeros Ferroeléctricos	hasta 100 000
Titanato de Calcio- Cobre	más de 250 000

Nota: los valores de la permitividad eléctrica depende de la frecuencia de los campos aplicados y de la temperatura. Los valores proporcionados aquí son solamente válidos para campos eléctricos estáticos a temperatura ambiente. Los valores para frecuencias más altas u otras temperaturas muestran fuertes variaciones. [Página 79](#)

- un mapa magnético que es utilizado para la navegación local. Durante mucho tiempo se pensó que estas neuronas estaban localizadas en la piel sobre el pico. Desde hace unos años, parece finalmente que este, frecuentemente llamado, 'hecho' era un error colectivo; las verdaderas partículas magnéticas sensoras están probablemente localizadas en las neuronas interiores de los oídos de las aves, justamente debajo de las pelusas, tal como muestra la [Figura 16](#). El segundo sentido magnético para la migración de las aves consiste en una brújula de inclinación magnética, la cual les informa sobre el ángulo formado entre las líneas de campo magnético y la vertical. La base de este sistema la forman moléculas proteínicas magnéticamente sensibles, las conocidas como *criyptocromos*. El mecanismo está localizado en el ojo y su base es la luz azul. Este segundo sentido magnético, todavía no comprendido adecuadamente, es utilizado por las aves para decidir la dirección general en la cual volar.
- Ref. 20
- Ref. 21

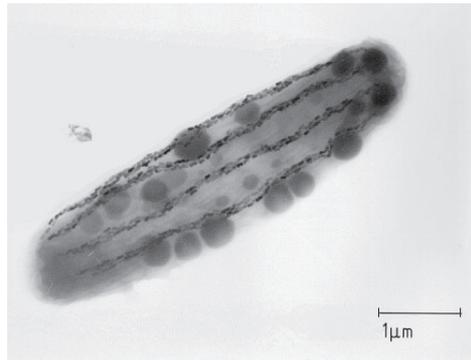


FIGURA 17 La bacteria magnetotáctica *Magnetobacterium bavaricum* con sus magnetosomas (© Marianne Hanzlik).

Desafío 21 r

¿Pueden los humanos detectar campos magnéticos? Hasta ahora, no existe una respuesta definitiva. En el cerebro humano se encuentran microcristales magnéticos, pero el hecho de que los humanos puedan detectar campos magnéticos, es todavía una cuestión abierta. ¿Quizás podría usted concebir una forma de probar esta posibilidad?

Por el contrario, los campos magnéticos pulsados u oscilantes sí pueden ser detectados por los humanos. Hay pruebas anecdóticas de que 0,2 T oscilando a 170 kHz produce insensibilidad en los dedos durante unos cuantos días. Son también reclamados algunos efectos de los campos pulsados sobre el bienestar, pero eso es cuestionable; por otro lado, los campos magnéticos oscilantes sí tienen efecto positivos en la curación de los huesos fracturados.

MAGNETISMO Y ELECTRICIDAD

¿Están relacionados el magnetismo y la electricidad? A principios del siglo XIX, François Arago* descubrió que sí lo estaban. Inspeccionó un barco que había resistido una fuerte tempestad. Por esa época, los barcos eran de madera. El barco había sido alcanzado por un rayo; como resultado, el barco necesitaba una nueva brújula. Por tanto los rayos tienen la habilidad de desmagnetizar las brújulas. Arago sabía que los rayos son un fenómeno eléctrico. Concluyó que el magnetismo y la electricidad debían estar relacionados.

En resumen, el magnetismo debe estar relacionado con el *movimiento* de las cargas eléctricas. Si el magnetismo está relacionado con el movimiento, debería ser posible utilizar el magnetismo y la electricidad para mover la materia.

¿CÓMO SE PUEDE CONSTRUIR UN MOTOR?

“El Comunismo es el poder de los concejos locales más la electrificación de la totalidad del país.”
Lenin.**

* François Arago (b. 1786 Estagel, d. 1853 Paris) fue físico y político; era amigo de Alexander von Humboldt.

** Lenin (b. 1870 Simbirsk, d. 1924 Gorki), fundador de la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas, en 1920 estableció esta afirmación como el centro de su plan de desarrollo para el país. En Rusia, a los concejos locales de esa época se les llamaban soviets.

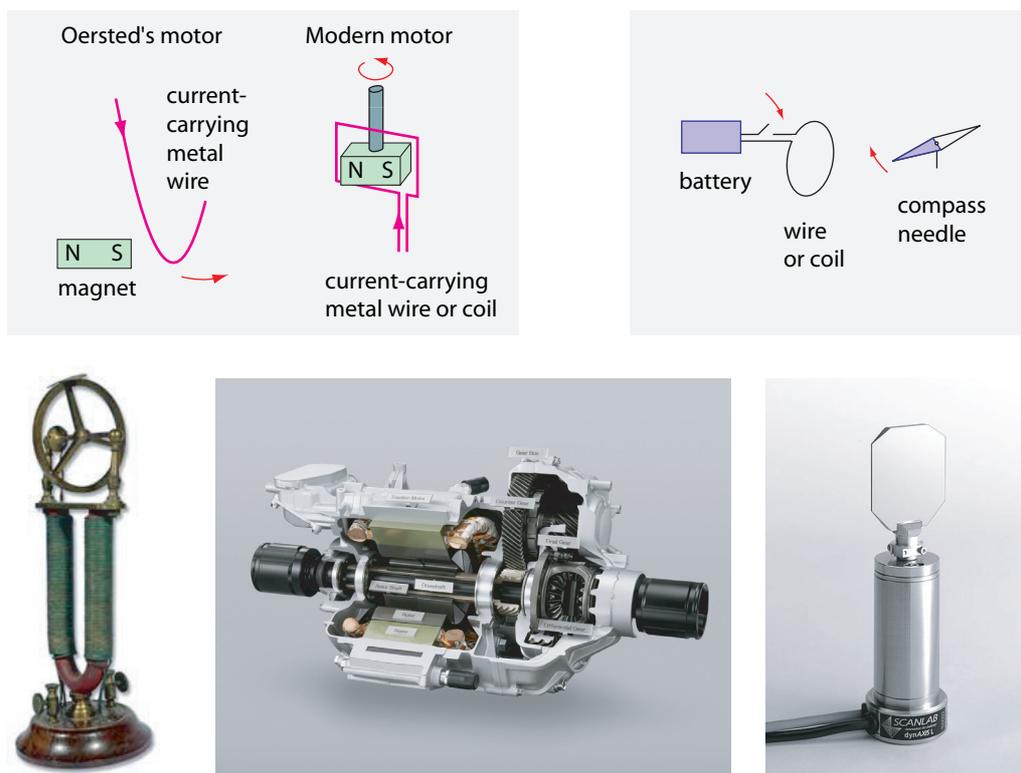


FIGURA 18 Versión antigua y moderna de un motor eléctrico, y un galvanómetro de espejo con un rango de rotación limitado, utilizado por el láser de dirección dirigida. Sus tamaños son aproximadamente 20 cm, 50 cm y 15 cm (© Wikimedia, Honda, Wikimedia).

La razón para la famosa definición de Lenin fueron dos descubrimientos. Uno fue hecho en 1820 por Hans Christian Oersted* y el otro en 1831 por Michael Faraday.** Las consecuencias de estos experimentos cambiaron completamente el mundo en menos de un siglo.

El 21 de Julio de 1821, Hans Christian Oersted publicó, en Latín, un panfleto, que sacudió a Europa como una tormenta. Oersted había encontrado – en una clase de prácticas para sus alumnos – que cuando una corriente se transmite por un cable, un imán colocado en sus cercanías se pone en movimiento. En otras palabras, había encontrado que

* Hans Christian Oersted (b. 1777 Rudkøbing, d. 1851 Copenhagen) físico y profesor, fundó la escuela que posteriormente se convirtió en la Technical University Denmark.

** Michael Faraday (b. 1791 Newington Butts, d. 1867 London) nació en el seno de una familia sencilla, sin escolarización y de profundas y cándidas ideas religiosas. De muy joven fue asistente del químico más famoso de su tiempo, Humphry Davy (b. 1778 Penzance, d. 1829 Geneva). Faraday no poseía experiencia matemática, pero llegó a ser un físico influyente y con el tiempo fue miembro de la Royal Society. Un hombre modesto, que rehusó a todos los otros honores en su vida. Realizó trabajos sobre temas de química, la estructura atómica de la materia y, el más importante de todos, desarrolló la idea de los campos (magnéticos) y de las líneas de campo. Usó los campos para describir todos sus numerosos descubrimientos experimentales sobre el electromagnetismo, tales como el efecto Faraday. Los campos fueron matemáticamente descritos posteriormente por Maxwell, quien por esa época era la única persona en toda Inglaterra que se interesó por el concepto de campo definido por Faraday.

- ▷ El flujo de la electricidad puede *desplazar* cuerpos.

Como consecuencia del panfleto de Oersted, todo el mundo en Europa con un mínimo de habilidad comenzó a experimentar con la electricidad. Experimentos posteriores mostraron que *dos* cables por los que fluyen cargas se atraen o repelen entre sí, dependiendo de si las corrientes son paralelas o antiparalelas. Estos y otros experimentos muestra que

- ▷ Los cables portadores de una corriente eléctrica se comportan como imanes.

De hecho, lo opuesto es también verdadero: Si imaginamos corrientes de una intensidad mínima que se mueven en círculos en el interior de un imán, obtendremos una descripción precisa para todos los campos magnéticos observados en la Naturaleza. En otras palabras, Oersted había encontrado la prueba definitiva de que la electricidad puede ser transformada en magnetismo.

Poco tiempo después, Ampère* encontró que las *bobinas* incrementan estos efectos dramáticamente en comparación con los cables.

- ▷ Las bobinas se comportan como pequeños imanes.

En particular, las bobinas transportadoras de corriente, como los imanes, siempre tienen dos polos, generalmente conocidos como polo norte y polo sur magnéticos. Polos opuestos se atraen y polos iguales se repelen mutuamente. Ampère estaba tan orgulloso de su descubrimiento que inventó un nombre especial para la electricidad conducida por las bobinas; las llamó *solenoides*.

Como es bien sabido, la Tierra es en sí misma un gran imán, con su polo norte magnético cerca del polo sur geográfico y viceversa. Todas las brújulas muestran esto. Sin embargo, el campo magnético de la Tierra *no* se debe a que un imán permanente y sólido esté en su interior. El núcleo sólido de la Tierra, a 6 ± 1 kK, está demasiado caliente para ser un imán permanente; en lugar de eso, el campo magnético se debe a corrientes que circulan por fuera de él, el núcleo líquido. ¡La Tierra se parece más, por tanto, a un solenoide que a un imán!. Por cierto, la potencia que almacena esta geodinamo se estima que está entre 200 y 500 GW y ello se debe al calor en el centro de la Tierra. Exploraremos la geodinamo más adelante.

Página 240

* André-Marie Ampère (b. 1775 Lyon, d. 1836 Marseille), físico y matemático. Autodidacta, leyó la famosa *Enciclopedia* cuando era un niño; con una vida llena de tragedias personales, se cambió desde las matemáticas a la química y a la física, trabajó como maestro de escuela y no publicó nada importante hasta 1820. Luego, el descubrimiento de Oersted se difundió por toda Europa: la corriente eléctrica puede desviar agujas magnéticas. Ampère trabajó durante años sobre este problema y en 1826, publicó el resumen de su descubrimiento, lo que llevó a que Maxwell lo llamara 'Newton de la electricidad'. Ampère identificó y desarrolló muchas otras áreas de la electrodinámica. En 1832, él y sus técnicos también construyeron la primera *dinamo*, o generador rotativo de corriente. Por supuesto, la unidad de corriente eléctrica lleva su nombre.

Ampère tenía dos gatos, a los que quería muchísimo, uno grande y otro pequeño. Cuando iba a su laboratorio a realizar experimentos, los gatos querían entrar, pero pronto querían salir. Un día él se cansó. Hizo dos agujeros en la puerta, uno grande y otro pequeño.

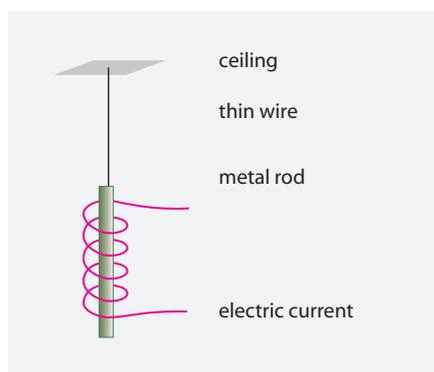


FIGURA 19 La corriente hace que una barra metálica gire.

Todas las relaciones entre la electricidad y el magnetismo pueden utilizarse para la construcción de *motores eléctricos*. Primero, la corriente eléctrica de una bobina es utilizada para generar un campo magnético; luego el campo es usado para mover un imán sujeto al eje de un motor. Los detalles sobre cómo llevarlo a cabo de manera efectiva dependen del tamaño que tenga el primer motor; todo esto constituye una ciencia en sí mismo: la ingeniería eléctrica. La [Figura 18](#) muestra algunos ejemplos de motores eléctricos.

¿QUÉ CORRIENTES FLUYEN EN EL INTERIOR DE UN IMÁN?

Los monopolos magnéticos, no existen. Por lo tanto, todos los campos magnéticos de la Naturaleza son debidos a cargas eléctricas que se mueven. Pero esto resulta extraño; si todos los campos magnéticos son debidos al movimiento de cargas, este debe ser el caso en el interior de las limaduras de hierro o dentro de un imán permanente común. ¿Puede ser demostrado esto?

En 1915, dos hombres en Holanda encontraron una manera simple de probar que en cualquier imán permanente, las cargas se están moviendo. Suspendieron una barra metálica del techo mediante un delgado hilo y enrollaron un cable a su alrededor, tal como muestra la [Figura 19](#). Predijeron que las pequeñísimas corrientes del interior de la barra se alinearían a causa del campo magnético de la bobina. Como resultado, ellos esperaban que una corriente que pasara a través de la bobina debería hacer que la barra rotara sobre su eje. Realmente, cuando enviaron una fuerte corriente por la bobina, la barra rotó. (Como resultado de la corriente, la barra quedó magnetizada.) Hoy, a este efecto se lo conoce con el nombre de *efecto Einstein-de Haas* después de que estos dos hombres lo imaginaran, lo midieran y lo explicaran.* El efecto, por tanto, muestra que aún en el caso de un imán permanente, el campo magnético se debe a un movimiento interno de cargas. La importancia del efecto Einstein-de Haas también enseña que las partículas que se mueven son electrones. Doce años después, en 1927, quedó claro que el momento angu-

Ref. 22

* Wander Johannes de Haas (b. 1878 Lisse, d. 1960 Bilkhoven) fue un físico que es más conocido por dos efectos electromagnéticos adicionales identificados después, el *efecto Shubnikov-de Haas* (el fuerte incremento de la resistencia magnética del bismuto a bajas temperaturas y campos magnéticos) y el *efecto de Haas-van Alphen* (la susceptibilidad magnética del bismuto a bajas temperaturas es una función periódica de los campos magnéticos).

lar responsable del efecto es una mezcla entre el momento angular orbital y el momento angular de espín (spin); en realidad, el espín del electrón representa un papel central en este efecto. Exploraremos el espín del electrón en el volumen sobre teoría cuántica. En resumen,

- ▷ Los polos magnéticos se deben a los ejes de rotación de las cargas.

En particular, un imán tiene dos polos porque los ejes de rotación tienen dos extremos.

Ref. 23
Vol. IV, página ??

Los imanes permanentes están hechos de materiales ferromagnéticos. Su magnetización permanente se debe al ajuste de movimientos rotacionales microscópicos. Debido a esta conexión, se puede predecir un efecto aún más sorprendente: girando un trozo de material ferromagnético no magnetizado, quedará magnetizado, porque las minúsculas corrientes de rotación se alinearían entonces a lo largo del eje de rotación. Este efecto en realidad ya había sido observado; recibió el nombre de *efecto Barnett* tras su descubrimiento. De la misma manera que el efecto Einstein–de Haas, la importancia del efecto Barnett es que se puede utilizar también para determinar la razón giromagnética del electrón. En resumen, también el efecto Barnett prueba que los espines de los electrones (generalmente) juegan un papel más importante en el magnetismo que en su momento angular orbital.

DESCRIPCIÓN DE LOS CAMPOS MAGNÉTICOS

Desafío 22 e

Todos los experimentos muestran que el campo magnético presenta una dirección determinada en el espacio, y una magnitud común a todos los observadores (en reposo), cualquiera que sean sus orientaciones. Por lo tanto, estaríamos tentados de describir al campo magnético como un vector. No obstante, esto sería erróneo, ya que el campo magnético no se comporta como una flecha cuando la colocamos delante de un espejo. Imagine que un sistema produce un campo magnético dirigido hacia la derecha. Puede ser cualquier sistema, un muelle, una máquina, etc. Ahora construya o imagine un segundo sistema que sea exactamente la versión especular del primero: un muelle especular, una máquina especular, etc. El sistema magnético producido por el sistema especular no apunta a la izquierda, como probablemente usted hubiera esperado: continúa apuntando hacia la derecha. (Compruébelo usted mismo.) En palabras sencillas, los campos magnéticos *no* se comportan exactamente como una flecha.

En otras palabras, *no* es del todo correcto describir una campo magnético por un vector $\mathbf{B} = (B_x, B_y, B_z)$, ya que los vectores se comportan como flechas. El campo magnético es un *pseudovector* o un *vector axial*; el momento angular y el torque son también ejemplos de tales cantidades. La manera adecuada de describir al campo magnético es por

TABLA 11 Propiedades del campo magnético clásico: un vector axial.

EL CAMPO MAGNÉTICO PUEDE	PROPIEDAD FÍSICA	NOMBRE MATEMÁTICO	DEFINICIÓN
Atraer corrientes	desviar cargas	acoplamiento	ecuación (10)
Repeler corrientes	desviar cargas	acoplamiento	ecuación (10)
Ser distinguible	distinguibilidad	elemento de un conjunto	Página 307
Cambiar gradualmente	continuo	espacio vectorial real	Vol. I, página 87, Vol. V, página ??
Apuntar a cualquier lugar	dirección	espacio vectorial, dimensionalidad	Vol. I, página 87
Ser comparado	mensurabilidad	metricidad	Vol. IV, página ??
Ser incrementado	aditividad	espacio vectorial	Vol. I, página 87
Tener ángulos definidos	dirección	espacio vectorial Euclidiano	Vol. I, página 87
Exceder cualquier límite	infinitud	ilimitado	Página 308
Mantener su dirección bajo reflexión	axialidad	vector de paridad par, pseudovector	Página 97
Cambiar de dirección bajo inversión de tiempo	axialidad	vector temporal con paridad impar	Página 97

una cantidad*

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 & -B_z & B_y \\ B_z & 0 & -B_x \\ -B_y & B_x & 0 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

conocido como *tensor antisimétrico*.

El *campo magnético* viene definido por la aceleración que imparte en el movimiento de cargas. Se ha observado que para una carga q de masa m , esta aceleración cumple lo siguiente

$$\mathbf{a} = \frac{q}{m} \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (10)$$

La relación es llamada con frecuencia *aceleración de Lorentz*, después de que el importante físico Hendrik A. Lorentz** fuera el primero que la estableció con claridad.*** La aceleración de Lorentz, también llamada *aceleración de Laplace*, define la magnitud y

* Hasta recientemente, la cantidad \mathbf{B} no fue denominada ‘campo magnético’. Nosotros aquí seguiremos la definición moderna, más lógica, que sustituye a la tradicional, donde a \mathbf{B} se lo conocía como ‘densidad de flujo magnético’ o ‘inducción magnética’ y otra cantidad, \mathbf{H} , era llamada – incorrectamente, pero durante más de un siglo – campo magnético. Esta cantidad \mathbf{H} no aparecerá en nuestro paseo, pero es importante para la descripción del magnetismo de los materiales.

** Para más detalles sobre Hendrik A. Lorentz (b. 1853 Arnhem, d. 1928 Haarlem), véase el volumen sobre relatividad.

*** La expresión $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ es el vector producto de dos vectores. La forma más práctica de calcular el vector

TABLA 12 Algunos sensores para campos magnéticos estáticos y campos magnéticos cuasi-estáticos.

MEDICIÓN	SENSOR	RANGO
Voltaje	Sensor de efecto Hall	hasta muchos T
Fuerza electromotriz inducida (voltaje)	palomas	desde unos pocos nT
Estímulo para el crecimiento de huesos	piezoelectricidad y magnetostricción de huesos	desde 50 mT
Fuerza electromotriz inducida (voltaje)	nervios humanos	desde pocos T
Sensaciones en el tórax y en los hombros	nervios humanos	fuertes cambios de gradientes
Tiburones	voltaje inducido cuando serpentean	unos pocos nT
Plantas	incierto	efectos pequeños en el crecimiento

la dirección del campo magnético \mathbf{B} . La unidad del campo magnético se llama tesla y se abrevia como T. Tenemos $1 \text{ T} = 1 \text{ N s/C m} = 1 \text{ V s/m}^2 = 1 \text{ V s}^2/\text{A m}$.

Desafío 23 s

El campo magnético es definido y medido por su influencia en el movimiento de cargas. Exploremos la definición. ¿Asume la definición de campo magnético que hemos dado aquí una velocidad de carga mucho menor que la de la luz?

Página 266

La definición de campo magnético asume, como la dada para el campo eléctrico, que la carga de prueba q es tan pequeña que no interfiere al campo \mathbf{B} que se quiere medir. Nuevamente, volvemos a ignorar este asunto de la interferencia, lo que significa que ignoraremos todos los efectos cuánticos hasta el final de nuestra aventura.

La definición de campo magnético también asume que el espacio-tiempo es plano, y que se pasa por alto todo lo relacionado con la curvatura del espacio-tiempo.

La aceleración de Lorentz constituye el efecto fundamental que un campo magnético tiene sobre una carga en movimiento. La aceleración de Lorentz constituye la raíz de cualquier motor eléctrico. Un motor eléctrico es un dispositivo que utiliza un campo magnético de la manera más eficiente que sea posible para acelerar las cargas que fluyen por un cable. A causa del movimiento de las cargas, el conductor también se mueve. En un motor eléctrico, la electricidad se transforma en magnetismo y luego en movimiento. Los primeros motores eléctricos eficientes se construyeron en la década de 1830.

producto $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ componente por componente viene dada por el determinante

$$\mathbf{v} \times \mathbf{B} = \begin{vmatrix} \mathbf{e}_x & v_x & B_x \\ \mathbf{e}_y & v_y & B_y \\ \mathbf{e}_z & v_z & B_z \end{vmatrix} \quad \text{o, más chapuceramente} \quad \mathbf{v} \times \mathbf{B} = \begin{vmatrix} + & - & + \\ v_x & v_y & v_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix}. \quad (11)$$

Esto es fácil de recordar y fácil de operar, ya sea con letras o con valores numéricos. (Aquí, \mathbf{e}_x es el vector base unitario en el dirección x .) Desarrollado por completo, es equivalente a la relación

$$\mathbf{v} \times \mathbf{B} = (v_y B_z - B_y v_z, B_x v_z - v_x B_z, v_x B_y - B_x v_y) \quad (12)$$

que resulta más difícil de recordar.

Las cargas que se mueven producen campos magnéticos. De la misma forma que para los campos eléctricos, se necesita conocer de qué manera viene determinada la *potencia* de un campo magnético creado por una carga en movimiento. Experimentos como el de Oersted, muestran que el campo magnético de una carga puntual q en movimiento, con una velocidad \mathbf{v} produce un campo \mathbf{B} dado por

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} q \frac{\mathbf{v} \times \mathbf{r}}{r^3} \quad \text{donde} \quad \frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7} \text{ N/A}^2. \quad (13)$$

A esto se lo conoce como '*ley*' de Ampère. De nuevo, el extraño factor $\mu_0/4\pi$ se debe a la forma en la que históricamente fueron definidas las unidades eléctricas. La constante μ_0 es llamada *permeabilidad del vacío* y se define como la fracción del newton por ampere al cuadrado, que aparece en la fórmula. Es fácil de ver que el campo magnético tiene una intensidad dada por \mathbf{vE}/c^2 , donde \mathbf{E} es el campo eléctrico medido por un observador que se mueve *con* la carga. Esto es una de las muchas pistas de que el magnetismo es un efecto relativista.

Desafío 24 e

Desafío 25 s

Nótese que la ecuación (13) solamente es válida para velocidades y aceleraciones pequeñas. ¿Puede encontrar la relación general?

ELECTROMAGNETISMO

En 1831, Michael Faraday descubrió una pieza adicional del rompecabezas formado por la electricidad y el magnetismo, algo que incluso el gran Ampère había pasado por alto. Se dio cuenta de que

- ▷ Un imán *en movimiento* produce un flujo de corriente en un circuito eléctrico.

El magnetismo, por tanto, puede convertirse en electricidad. Este importante descubrimiento permitió el flujo de corriente eléctrica por generadores, llamados *dinamos*, utilizando la potencia del agua, el viento o el vapor de agua. De hecho, la primera dinamo fue construida en 1832 por Ampère y sus colaboradores. Las dinamos dieron comienzo al uso de la electricidad en todo el mundo. Detrás de cualquier enchufe eléctrico en una pared hay una dinamo en algún lugar.

Oersted había encontrado que la corriente eléctrica puede producir campos magnéticos. Faraday había encontrado que los campos magnéticos podían producir corrientes eléctricas y campos eléctricos. Los campos eléctricos y los magnéticos son por tanto dos aspectos del mismo fenómeno: el *electromagnetismo*. Todavía tuvieron que pasar otros treinta años para desenmarañar su completa descripción.

Experimentos adicionales muestran que los campos magnéticos también producen campos eléctricos cuando se observa desde el punto de vista de algo que se mueve. Usted podría comprobar ésto en cualquiera de los ejemplos expuestos desde la Figuras 18 hasta la 44.

- ▷ El magnetismo es la electricidad relativista.

Los campos magnéticos y los campos eléctricos se transforman parcialmente los unos en los otros cuando se cambia de una estructura de referencia inercial a otra. Por tanto, campos magnéticos y eléctricos se comportan como el espacio y el tiempo, los cuales también se confunden cuando se pasa de un marco inercial a otro. En tal caso, la teoría especial de la relatividad nos dice que debe haber por lo tanto de un único concepto, un *campo electromagnético*, que los englobe a ambos. Adentrándonos en los detalles, se encuentra que el campo electromagnético F que rodea a los cuerpos cargados tiene que venir descrito por un *tensor antisimétrico de rango 4* (4-tensor)

$$F^{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 0 & -E_x/c & -E_y/c & -E_z/c \\ E_x/c & 0 & -B_z & B_y \\ E_y/c & B_z & 0 & -B_x \\ E_z/c & -B_y & B_x & 0 \end{pmatrix} \text{ o } F_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 0 & E_x/c & E_y/c & E_z/c \\ -E_x/c & 0 & -B_z & B_y \\ -E_y/c & B_z & 0 & -B_x \\ -E_z/c & -B_y & B_x & 0 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Obviamente, el campo electromagnético F , y por lo tanto, cada componente de estas matrices, están supeditados al espacio y al tiempo. Sobre todo, las matrices muestran que la electricidad y el magnetismo son dos caras del mismo efecto.* Adicionalmente, como los campos eléctricos aparecen solamente en la fila superior y la columna más a la izquierda, las expresiones muestran que, en la vida cotidiana, para velocidades pequeñas, la electricidad y el magnetismo *pueden* estar separados. (¿Por qué?)

Desafío 26 s

Utilizando la notación relativista, el campo electromagnético viene definido por tanto por la 4-aceleración b que la produce sobre una carga q de masa m y 4-velocidad u :

$$mb = qFu \quad \text{o, equivalentemente, en notación 3-vector} \\ dE/dt = qEv \quad \text{y} \quad d\mathbf{p}/dt = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}). \quad (15)$$

Las expresiones muestran cómo la potencia dE/dt (la letra E se refiere a la energía, mientras que \mathbf{E} se refiere al campo eléctrico) y el 3-fuerza $d\mathbf{p}/dt$ dependen de los campos eléctrico y magnético.** La expresión 4-vector y la expresión 3-vector significan lo mismo; La simplicidad de la primera es el origen de las enrevesadas matrices de (14) que describen el campo electromagnético F .

Enfaticemos que la *relación de Lorentz extensa* (15) es la *definición* del campo electromagnético F , ya que el campo se define como esa 'cosa' que acelera las cargas. En particular, todos los dispositivos que ponen cargas en movimiento, tales como baterías

* En realidad, la expresión para el campo eléctrico contiene siempre la expresión $1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ en lugar de utilizar la velocidad de la luz c . En breve se explicará la razón de esta sustitución.

** La notación de los componentes, usando la convención de notación que implica la suma sobre un conjunto de términos indexados en los que el mismo índice aparece dos veces en el mismo término, la definición de la fuerza de Lorentz sería

$$mb^\mu = m \frac{du^\mu}{d\tau} = qF^\mu{}_\nu u^\nu \quad \text{o} \\ m \frac{d}{d\tau} \begin{pmatrix} \gamma c \\ \gamma v_x \\ \gamma v_y \\ \gamma v_z \end{pmatrix} = q \begin{pmatrix} 0 & E_x/c & E_y/c & E_z/c \\ E_x/c & 0 & B_z & -B_y \\ E_y/c & -B_z & 0 & B_x \\ E_z/c & B_y & -B_x & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \gamma c \\ \gamma v_x \\ \gamma v_y \\ \gamma v_z \end{pmatrix}. \quad (16)$$

o dinamos, así como todos los dispositivos que se ponen en movimiento por un flujo de cargas, tales como los motores eléctricos y los músculos, se ajustan a esta relación. Esto es el por qué esta relación se estudia generalmente, en la forma 3-vector, en la escuela secundaria. La relación de Lorentz describe todos los casos en los cuales el movimiento de objetos puede ser detectado a simple vista o percibidos por nuestros sentidos, tal como el movimiento de un motor eléctrico en un tren de alta velocidad, en un ascensor y en una turbina dental, el movimiento de la imagen que genera un chorro de electrones en un tubo de rayos catódicos en el interior de una vieja televisión, o el barrido de una señal eléctrica en un cable o en los nervios del cuerpo.

Ref. 24, Ref. 25

En resumen, hemos encontrado que la interacción entre dos cargas puede ser descrito a través de dos afirmaciones: Primero, las cargas *producen* campos eléctricos y magnéticos; segundo, las cargas *quedan afectadas* por los campos eléctricos y magnéticos. Las cargas se mueven y los campos dependen del tiempo. Su estudio es por lo tanto llamado *electrodinámica*.

LOS INVARIANTES Y EL LAGRANGIANO DE LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS*

Desafío 27 e

El tensor campo electromagnético F es un 4-tensor *antisimétrico*. (¿Puede escribir la relación entre $F^{\mu\nu}$, $F_{\mu\nu}$ y $F^{\mu}{}_{\nu}$?) Como cualquier tensor antisimétrico, el campo electromagnético tiene dos *invariantes*, i.e., dos propiedades extraídas del mismo que son iguales para todos los observadores. La primera invariante es la expresión

$$B^2 - E^2/c^2 = \frac{1}{2} \text{tr } F^2 \quad (17)$$

y la segunda invariante es el producto

$$4EB = -c \text{tr } F^* F . \quad (18)$$

Desafío 28 s

¿Puede confirmar las dos invariantes, utilizando la definición de traza tr como la suma de los elementos de una diagonal?

La expresión del primer invariante, $B^2 - E^2/c^2 = \frac{1}{2} \text{tr } F^2$, resulta ser (proporcional a) la densidad Lagrangiana del campo electromagnético. En particular, este primer invariante es un escalar. Este primer invariante implica que si E es mayor, menor o igual a cB para un observador, también lo es para todos los demás. Como ocurre con todas las cantidades intensivas que evolucionan, el Lagrangiano es proporcional al *cuadrado* de la cantidad intensiva. El signo menos de la expresión, es el mismo signo menos que aparece también en $c^2t^2 - x^2$: Resulta de la mezcla de campos eléctricos y magnéticos que provienen de los impulsos.

La densidad Lagrangiana puede ser usada para definir la acción clásica del campo electromagnético:

$$S = \int \frac{\epsilon_0}{2} E^2 - \frac{1}{2\mu_0} B^2 dt dV . \quad (19)$$

* En una primera lectura puede omitirse esta sección.

Vol. IV, página ??

Página 82

Como siempre, la acción mide el *cambio* que hay en un sistema; por tanto, define la cantidad de cambio que se produce cuando un campo electromagnético se modifica. (La expresión para el cambio, o acción, de un rayo de luz en movimiento se reduce al producto de su intensidad y el cambio de fase total.) Por lo tanto, la acción de un campo electromagnético se incrementa con su intensidad y con su frecuencia. En general, esta expresión para la acción puede ser utilizada para describir el movimiento del campo electromagnético usando el *principio de mínima acción*. En realidad, el principio indica las ecuaciones de evolución del campo electromagnético, las cuales son conocidas como *ecuaciones de Maxwell para la electrodinámica*. Este enfoque es el camino más sencillo para deducirlas. Nos referiremos a estas ecuaciones de campo con detalle próximamente.

La segunda invariante del tensor de campo electromagnético, $4\mathbf{E} \cdot \mathbf{B} = -c \operatorname{tr} \mathbf{F}^* \mathbf{F}$, es un pseudoescalar, que determina si el ángulo entre los campos eléctrico y magnético es agudo u obtuso para todos los observadores.*

LOS USOS DE LOS EFECTOS ELECTROMAGNÉTICOS

La aplicación de los efectos electromagnéticos a la vida cotidiana ha cambiado el mundo. Por ejemplo, la instalación de luz eléctrica en las calles de las ciudades casi ha eliminado asaltos callejeros tan comunes hasta entonces. Éstos y el resto de dispositivos eléctricos aprovechan el hecho de que las cargas puedan fluir por los metales y, en particular, que la energía electromagnética pueda ser transformada

- en energía mecánica – como lo hacen los altavoces, los motores y los músculos;
- en luz – como en las lámparas, los láser, la fibra de vidrio, los gusanos de luz, los calmares gigantes y otros varios animales del océano profundo;
- en calor – como hornos eléctricos, mantas, teteras y por las anguilas eléctricas para aturdir y matar a sus presas;
- en efectos químicos – como en la electrolisis, los cargadores de baterías, la galvanoplastia y el cerebro;
- en la producción del frío – como en refrigeradores y elementos Peltier, pero en ningún sistema vivo conocido;
- en señales de ondas de radio – como en radio y televisión, pero en ningún sistema vivo conocido;

* En realidad hay un tercer invariante de Lorentz, bastante menos conocido. Es específico para el campo electromagnético y se trata de una combinación del campo con su potencial vector:

$$\begin{aligned} \kappa_3 &= \frac{1}{2} A_\mu A^\mu F_{\rho\nu} F^{\rho\nu} - 2A_\rho F^{\rho\nu} F_{\nu\mu} A^\mu \\ &= (\mathbf{A} \cdot \mathbf{E})^2 + (\mathbf{A} \cdot \mathbf{B})^2 - |\mathbf{A} \times \mathbf{E}|^2 - |\mathbf{A} \times \mathbf{B}|^2 + 4\frac{\varphi}{c} (\mathbf{A} \cdot \mathbf{E} \times \mathbf{B}) - \left(\frac{\varphi}{c}\right)^2 (E^2 + B^2). \end{aligned} \quad (20)$$

- Ref. 26 Esta expresión es un invariante de Lorentz (pero no condición); conocerla puede ser de ayuda para clarificar asuntos confusos, tales como la falta de existencia de ondas en las que los campos eléctricos y magnéticos sean paralelos. En realidad, para las ondas monocromáticas planas las tres invariantes *desaparecen* en la condición del medidor de Lorentz. También las cantidades $\partial_\mu j^\mu$, $j_\mu A^\mu - j$ siendo la corriente eléctrica – y $\partial_\mu A^\mu$ son invariantes de Lorentz. (¿Por qué?) La última, la independencia de trama de la divergencia del 4-potencial, refleja la invariancia para el medidor elegido. El medidor para el que la expresión se hace cero es llamado *medidor de Lorentz*.
- Página 93
Desafío 29 s

— en información almacenada – como discos magnéticos, ordenadores, la memoria humana y la de los animales.

A causa de todas estas opciones, luz eléctrica, láseres, baterías, motores eléctricos, refrigeradores, radio, teléfonos, rayos-X, televisión y ordenadores, la vida humana ha cambiado completamente en menos de un siglo.

Los efectos electromagnéticos son útiles, por tanto, para llevar a cabo algo en un lugar y tiempo determinados, o sea, para producir activadores. Además, los efectos electromagnéticos resultan útiles para capturar información en nuestro entorno, por tanto para producir sensores.

Página 248

Muchos de estos usos del electromagnetismo también ocurren en los sistemas biológicos. Sin embargo, ningún sistema biológico hace uso de rayos-X. (¿Por qué?) Ningún ser vivo parece usar refrigeración eléctrica. (¿Por qué?) Y podría haber sistemas biológicos que se comunicaran vía ondas de radio?

Desafío 30 s

Desafío 31 s

¿CÓMO FUNCIONAN LOS NERVIOS?

Los nervios son asombrosos. Sin nervios, no podríamos experimentar placer, no podríamos sentir dolor, no veríamos y no oiríamos. Sin nervios, no viviríamos. Pero ¿cómo transportan las señales los nervios?

Página 35

En 1789, como ya se mencionó anteriormente, Luigi Galvani descubrió que los nervios transportaban señales eléctricas, haciendo experimentos con ancas de rana. ¿Son cables los nervios? Siglo y medio después de Galvani, resultó claro que los nervios, más precisamente, los axones nerviosos (neuritas), no conducen la electricidad utilizando electrones, como hacen los cables metálicos, sino mediante las *iones*. Las señales nerviosas se propagan utilizando el movimiento de los iones de sodio Na^+ y de potasio K^+ a través de la membrana celular de los nervios. La velocidad de la señal resultante oscila entre 0,5 m/s y 120 m/s, dependiendo del tipo de nervio. (Los axones nerviosos recubiertos de mielina, una proteína que actúa como aislante eléctrico, son más rápidos que los axones no recubiertos.) La velocidad de la señal es suficiente para la supervivencia de la mayoría de las especies – ayuda al cuerpo a salir corriendo en caso de peligro.

Los nervios son diferentes de los cables también en otros aspectos: ellos no transmiten señales de tensión constante, sino solamente señales *pulsadas*. El primer modelo aproximado a su forma de comportamiento fue presentado en 1952 por Hodgkin y Huxley. Mediante observaciones sobre el comportamiento de iones de potasio y de sodio, dedujeron una elaborada ecuación de ejecución que simula el voltaje V de los nervios, y consecuentemente, la forma de propagación de las señales. La ecuación reproduce los característicos picos de voltaje medidos en los nervios, mostrados en la [Figura 20](#).

Ref. 27

El mecanismo exacto con los cuales los iones cruzan las membranas, utilizando los llamados *canales proteínicos*, no fue desvelado hasta veinte años después. A pesar de este enorme trabajo y, no obstante, haber recibido Hodgkin y Huxley el Premio Nobel de Medicina por su trabajo, el modelo no puede ser correcto. El modelo no explica la reversibilidad del proceso de propagación, el cambio de grosor observado en el nervio durante la propagación ni la excitación de los nervios por simple deformación o cambios de la temperatura; sobre todo, el modelo no explica el funcionamiento de los anestésicos. El funcionamiento detallado de los nervios permanecía desconocido.

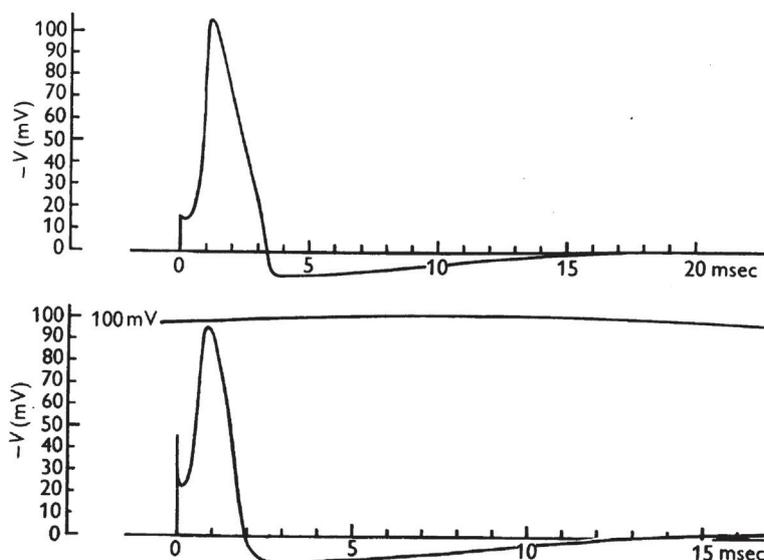


Fig. 13. Upper curve: solution of eqn. (26) for initial depolarization of 15 mV, calculated for 6° C. Lower curve: tracing of membrane action potential recorded at 9.1° C (axon 14). The vertical scales are the same in both curves (apart from curvature in the lower record). The horizontal scales differ by a factor appropriate to the temperature difference.

FIGURA 20 Señales eléctricas calculadas (arriba) y medidas (abajo) en un nervio, según Hodgkin y Huxley.

Ref. 28

Fue hacia el año 2000 cuando Thomas Heimburg y su equipo descubrieron la forma de propagación de las señales nerviosas. Él demostró que un pulso nervioso es una onda solitón electromagnética de la membrana cilíndrica. En la membrana cilíndrica, la estructura proteínica cambia de líquida a sólida y vuelve otra vez a líquida. Este breve, anillo ligeramente más grueso de proteínas sólidas se propaga a lo largo del cilindro: en esto consiste el pulso nervioso. En resumen, el pulso nervio no hace que las proteínas se muevan, pero hace que se mueva la región sólida. El modelo se muestra en la [Figura 21](#). (El término 'sólido' tiene un significado técnico preciso en los sistemas de dos dimensiones y describe un estado ordenado específico de las moléculas.) Este modelo de propagación explica todas las propiedades de los pulsos nerviosos que permanecía inexplicados anteriormente. En particular, explica que los anestésicos funcionan porque se disuelven en la membrana y por tanto bloquean la formación y la propagación de los anillos. Todas las predicciones cuantitativas del modelo se ajustan a las observaciones.

En resumen, las señales nerviosas son pulsos electromecánicos; resultan ser una mezcla de corriente y ondas sonoras. El modelo electromecánico para los nervios explica cómo se propagan las señales, cómo se siente el dolor y por qué no se siente ningún dolor mientras se está anestesiado.

Resulta interesante saber que, el modelo electromecánico de la propagación de pulsos nervios no explica (todavía) por qué se pierde la consciencia durante la anestesia. Esto es un proceso adicional que tiene lugar en el cerebro. Es conocido que la pérdida de consciencia está relacionada con el cambio de las ondas cerebrales, pero los detalles son todavía asunto de investigación. Los cerebros aún poseen propiedades maravillosas para

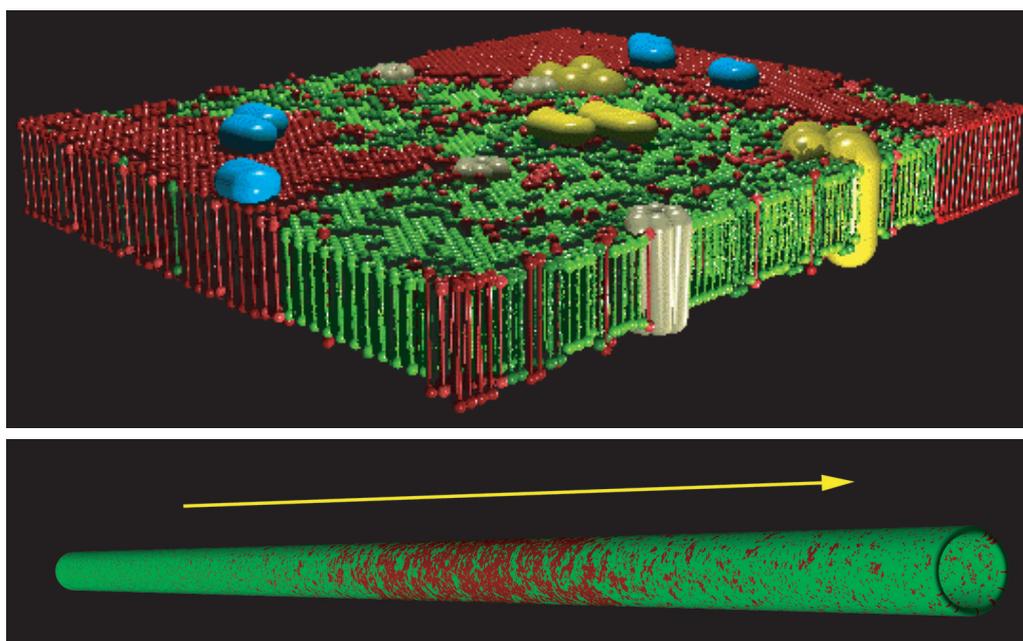


FIGURA 21 Arriba: Una biomembrana, con lípidos de tipo sólido (rojo), lípidos líquidos (verde) y varias proteínas disueltas (amarillo, azul, blanco). Abajo: un pulso nervioso propagándose como una transformación de fase bidimensional líquido/sólido/líquido a lo largo de una membrana cilíndrica nerviosa (© Thomas Heimburg/Wiley-VCH).

ser exploradas.

CÓMO PRUEBAN LOS MOTORES QUE LA RELATIVIDAD ES CORRECTA.

“La única operación matemática que he realizado en mi vida fue girar la manivela de una calculadora.”

Michael Faraday

Todos los motores eléctricos se basan en el resultado de que las corrientes eléctricas interactúan con los campos magnéticos. El ejemplo más sencillo es la atracción de dos cables por los que circulan corrientes paralelas. Esta sola observación, llevada a cabo en 1820 por Ampère, es suficiente para darse cuenta de que es imposible conseguir que la velocidad de un movimiento pueda superar a una cierta velocidad máxima. La razón es bellamente sencilla.

Ref. 29

Modifiquemos el experimento original e imaginemos dos barras largas de masa m cargadas eléctricamente, que se mueven en la misma dirección a una velocidad v y con una separación d . Un observador que se mueve con las barras vería una repulsión electrostática entre las dos barras dada por

Desafío 32 e

$$ma_e = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2\lambda^2}{d} \quad (21)$$

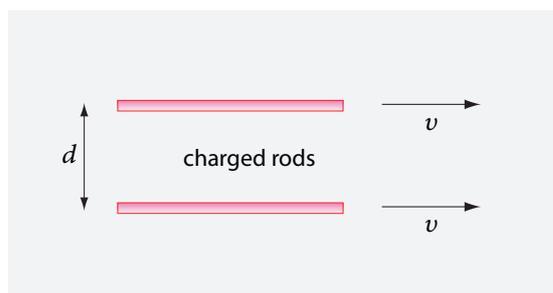


FIGURA 22 Barras cargadas que se mueven en paralelo ilustran el aspecto relativista del magnetismo, tal como se ha explicado en el texto.

donde λ es la carga por longitud de las barras. Un segundo observador, *en reposo* ve dos efectos: la repulsión electrostática y la atracción descubierta por Ampère. El segundo observador por tanto observa

Desafío 33 e

$$ma_{em} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2\lambda^2}{d} + \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\lambda^2 v^2}{d}. \quad (22)$$

Esta expresión debe ser consistente con lo que observa el primero. Este sería el caso si ambos observadores encontrarán repulsiones. Resulta fácil comprobar que el segundo observador ve una repulsión, como la vería el primero, solamente si

$$v^2 < \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} = c^2. \quad (23)$$

Esta velocidad máxima c , con un valor de 0,3 GM/s, es por tanto válida para cualquier objeto que porte cargas. Pero ocurre que *todos* los objetos en la vida cotidiana contienen cargas: por lo tanto, existe una velocidad máxima para la materia.

Desafío 34 d

¿Es capaz de ampliar esta discusión de una velocidad máxima también para las partículas neutras? En un minuto, descubriremos más sobre este límite de velocidad que ya conocemos.

Otro argumento para el magnetismo como efecto relativista es el siguiente. En un cable con corriente eléctrica, la carga es cero para un observador en reposo con respecto al cable: el cable es *neutro* para el observador. La razón es que las cargas entran y salen al cable al mismo tiempo que para el observador. Ahora imagine a un observador que vuele a lo largo del cable. los eventos de entrada y salida ya no ocurren simultáneamente nunca más; el cable estará *cargado* para un observador en movimiento. (La carga depende de la dirección del movimiento del observador.) Ahora imagine que el observador en movimiento está eléctricamente cargado. Será atraído o repelido por el cable, porque para él, el cable está cargado. El observador en movimiento dirá que la atracción es debida al campo *eléctrico* del cable. El observador en reposo también notará la atracción o la repulsión del observador en movimiento, pero, como para él, el cable es neutro, deducirá que las cargas en movimiento experimentan una fuerza – posiblemente con un valor ligeramente diferente, pero esto es un tecnicismo – debido a la corriente eléctrica que circula por el cable; el observador en reposo dirá entonces que un cable con corriente estará rodeado por un campo *magnético* que sólo produce efectos sobre cargas en movimiento.

TABLA 13 Valores para el voltaje observado en la Naturaleza.

OBSERVACIÓN	VOLTAJE
Voltaje más pequeño medido	c. 10 fV
Nervios humanos	70 mV
Celda Volta	1 V
Celda voltaica ('batería')	1,5 V
Principales en las casas	230 V o 110 V
Anguila eléctrica	100 a 600 V
Vía de un tranvía	500 V
Chispas al frotar un jersey de fibra	1 kV
Valla eléctrica	0.7 a 10 kV
Vía del tren	15 kV
Bujías de los automóviles	15 kV
Televisión en color tubo de rayos catódicos	30 kV
Tubo de rayos-X	30 a 200 kV
Microscopio electrónico	0,5 kV a 3 MV
Pistola aturdidora	65 a 600 kV
Relámpago	10 a 100 MV
Registro de voltaje de un acelerador	1 TV
Voltaje máximo posible en la Naturaleza, el voltaje de Planck corregido $\sqrt{c^4/16\pi\epsilon_0 G}$	$5,2 \cdot 10^{26}$ V

En resumen, los efectos eléctricos se deben a la mayor o menor cantidad de cargas eléctricas estáticas y a sus campos eléctricos; el magnetismo, los efectos magnéticos y los campos magnéticos son debidos a las cargas eléctricas en *movimiento*.* La existencia de campos magnéticos es una consecuencia relativista de la existencia de campos eléctricos. En particular, el magnetismo *no* se debe a las partículas con cargas magnéticas. Tales partículas, llamadas monopolos magnéticos, no existen. (Sin embargo, las cargas magnéticas pueden ser utilizadas como una herramienta matemática para la descripción de materiales.) La potencia del magnetismo, usado en cualquier motor eléctrico en funcionamiento, incluyendo el de su cepillo de dientes, prueba la certeza relativista: en la Naturaleza existe un máximo para la velocidad de todas las masas y todas las cargas. Ambos campos, eléctrico y magnético, transmiten energía y cantidad de movimiento. Son dos caras de la misma moneda.

Página 104

Página 267

Desafío 35 d

* 'Los electrones se mueven en los metales con una velocidad de alrededor de 1 $\mu\text{m/s}$; por lo que si yo caminara con la misma velocidad por un cable que transportara una corriente constante, no sería capaz de sentir ningún campo magnético.' ¿Qué es erróneo en esta afirmación?

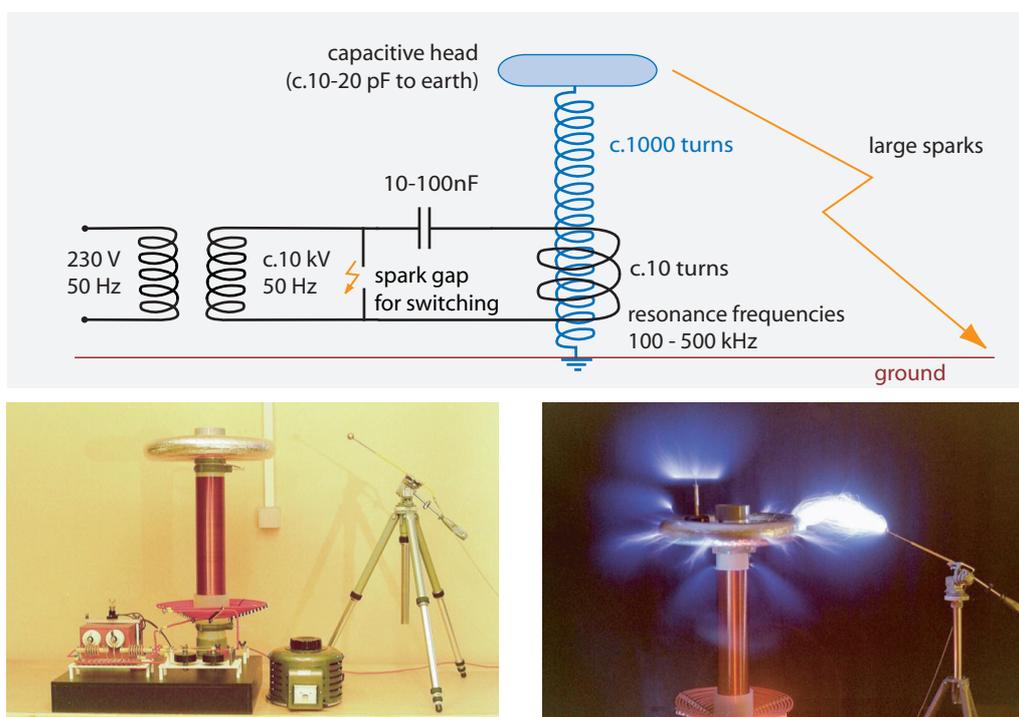


FIGURA 23 Diagramas, realización y operación de una bobina Tesla, incluyendo chispas y descargas en la corona (fotografías © Robert Billon).

CURIOSIDADES Y RETOS DIVERTIDOS SOBRE COSAS ELÉCTRICAS Y MAGNÉTICAS

“ Alii vero et facta mirati et intellecta assecuti.* ”
Augustine de Hippo

Antes de que estudiemos en detalle el movimiento del campo electromagnético, divirtámonos un poco con la electricidad.

* *

Hoy en día, divertirse con chispas resulta sencillo. La bobinas de Tesla, así llamadas después de Nikola Tesla** son los artilugios más simples que existen para producir en casa una gran cantidad de chispas. ¡Cuidado!: resulta peligroso; esta es la razón de que estos

* ‘No obstante otros se maravillaron sobre los hechos y comprendieron sus significados.’ Augustine, Sermon 98, 3. Augustine de Hippo (b. 354 Tagaste, d. 430 Hippo Regius) fue un moralista teológico influyente. A pesar de ello, no se ocupó de su hijo extramarital ni tampoco de la madre de su hijo, porque su propia madre se lo había prohibido.

** Никола Тесла (b. 1856 Smiljan, d. 1943 New York City), ingeniero e inventor. Inventó y fomentó el sistema de corriente alterna polifásico, el motor eléctrico de corriente alterna, la comunicación inalámbrica, las luces fluorescentes y muchas otras aplicaciones de la electricidad. Fue también uno de los inventores de la radio. La unidad SI para el campo magnético, lleva su nombre. De carácter extravagante, sus ideas a veces resultaron irrealizables; por ejemplo, imaginó que sus bobinas podrían usarse para la transmisión de la electricidad prescindiendo de cables.

dispositivos no se puedan comprar (casi) en ningún sitio. En la [Figura 23](#), se muestra el diagrama básico y un ejemplo. Las bobinas de Tesla tiene el aspecto de grandes setas de metal (para evitar descargas no deseadas) y en numerosos sitios web o en cualquiera de los numerosos clubs de entusiastas, tal como el www.stefan-kluge.de, se pueden encontrar los planos para su construcción.

* *

En 1722, George Graham descubrió, observando la aguja de una brújula, que el campo magnético de la Tierra muestra variaciones diarias. ¿Puede imaginar por qué suceden esas variaciones?

Desafío 36 s

* *

Si el sólo hecho de golpear una puerta de madera produce un efecto eléctrico, deberíamos ser capaces de detectar campos con sólo hacer eso. ¿Puede idear un experimento para comprobarlo?

Desafío 37 d

* *

Los pájaros no sufren daños si se posan sobre un cable eléctrico sin aislamiento. No obstante, nunca se observan pájaros sobre grandes torres de líneas de alta tensión de 100 kV o más, que transportan electricidad a largas distancias. ¿Por qué?

Desafío 38 s

* *

¿Cómo puede distinguir un imán de una barra de metal no-magnetizada, del mismo tamaño y material, sin utilizar medios externos?

Desafío 39 s

* *

En la planta baja de una casa hay tres interruptores que controlan tres bombillas situadas en la primera planta. Usted está en la planta baja y sólo puede subir a la primera una vez. ¿Cómo puede saber qué interruptor controla cada bombilla?

Desafío 40 s

* *

¿Cómo conectaría una bombilla a su interruptor principal y a tres más de tal manera que pudiera ser encendida y/o apagada en cualquiera de los tres? ¿Y con cuatro interruptores? Nadie tomará a un físico en serio si es capaz de escribir las ecuaciones de Maxwell, pero no puede resolver este pequeño problema.

Desafío 41 s

* *

Los primeros aparatos construidos para generar corriente eléctrica fueron grandes rotadoras. Después, en 1799 Alessandro Volta (b. 1745 Como, d. 1827 Como) inventó un nuevo dispositivo para generar electricidad al que llamó *pila*; hoy su elemento básico se conoce como *célula (voltaica)*, una *célula primaria** o, menos correctamente, una *batería*. (Hablando correctamente, una batería es una colección de células, como las que se encuentran en los coches.) Las células voltaicas es basan en procesos químicos; proporcionan mucha más corrientes y son más pequeñas y más fáciles de transportar que las

* Una *célula secundaria* es una célula recargable.

máquinas electrostáticas. La invención de la batería cambió la investigación de la electricidad tan profundamente que Volta se hizo mundialmente famoso. Por fin, una fuente de electricidad sencilla y fiable estaba disponible para poder experimentar con ella; al contrario que las rotadoras, las pilas son compactas, trabajan en cualquiera que sean las condiciones atmosféricas y no hacen ruido.

Una manzana o una patata o un limón con una pieza de cobre y otra de zinc insertadas, es una de las posibles células voltaicas más sencillas. Proporcionan un voltaje de aproximadamente 1 V y puede ser utilizada para que funcione un reloj digital o para producir chasquidos en unos auriculares. Volta fue también el descubridor de la 'ley' de carga $q = CU$ para un condensador (siendo C la capacidad, y U el voltaje), y el inventor del electroscopio de condensador de alta sensibilidad. A pesar de ser un hombre modesto, la unidad de potencial eléctrico, o 'tensión', como Volta solía llamarlo, proviene de su nombre. Una 'batería' está formada por un gran número de células voltaicas; el término fue tomado de otro anteriormente utilizado con fines estrictamente militares*. La batería de un teléfono móvil es solamente el sustituto de un cierto número de manzanas y patatas.

* *

En todas las células biológicas hay células voltaicas. Para la halobacteria, las células voltaicas internas son esenciales para su supervivencia. Viviendo en agua salada, las células voltaicas internas evitan que mueran por ósmosis.

* *

Desafío 43 s Un desafío famoso: Haga pilas alcalinas llenas y vacías, por ejemplo, del tipo AA, comportarse de manera diferente o igual al caer sobre un piso de piedra (duro)?

* *

Desafío 44 d ¿Qué pasa en la Figura 24? ¿Por qué la mayoría de esas fotos están tomadas con buen tiempo y con niños rubios?

* *

Desafío 45 s Un PC o un teléfono se pueden comunicar sin cables, utilizando ondas de radio. ¿Por qué esos y otros dispositivos eléctricos no pueden obtener su *energía* a través de ondas de radio, lo que supondría la eliminación de los cables conductores de la corriente eléctrica?

* *

El almacenamiento magnético parece mucho menos misterioso si se visualiza. La Figura 25 muestra cuan simplemente se puede hacer. El método también permite tomar películas. ¿Qué sucede en el interior de un metal cuando se magnetiza? La bonita película en www.youtube.com/watch?v=HzxTqQ40wSU y www.youtube.com/watch?v=LFC6tbbMUaA, realizada por Hendryk Richert de Matesy, muestra cómo las zonas de

Desafío 42 e * Una pila hecha de un conjunto de placas de zinc, una hoja de papel secante empapado de agua salada y una moneda de cobre, se puede construir fácilmente en casa y puede ser probado en una calculadora o un reloj digital.



FIGURA 24 Efecto común en un parque infantil (© Evan Keller).

magnetización cambian cuando se aproxima un imán a una pieza de metal. También estas películas han sido realizadas con un sencillo microscopio, usando como única ayuda un polarizador y una capa de granate de hierro de ytrio sobre un cristal.

* *

También las plantas reaccionan a los campos magnéticos. en particular, diferentes campos magnéticos producen diferentes patrones de crecimiento. El mecanismo, relacionado con el sistema criptocromo, son todavía objeto de investigación.

* *

Los imanes se puede utilizar para acelerar bolas de acero. El ejemplo más famoso es el *rifle de Gauss* mostrado en la [Figura 26](#). Si la bola del extremo izquierdo rueda suavemente hacia el primer imán, la tercera bola es expulsada con fuerza. Luego el proceso se repite: la velocidad se incrementa aún más para la quinta, la séptima y la novena bola. El experimento nunca deja de sorprender a aquellos ojos que lo ven por primera vez. ¿De dónde procede la cantidad de movimiento de la bola final?

Desafío 46 e

* *

Los objetos que no guardan simetría derecha-izquierda reciben el nombre de *quiral*, de la palabra griega para 'mano'. ¿Puede construir un espejo que *no* cambie la quiralidad (i.e., que no 'cambie la derecha y la izquierda')? ¿De dos maneras diferentes?

Desafío 47 s

* *

Un rollo de cinta adhesiva es un objeto peligroso. Tirar del rollo con rapidez produce una emisión de luz (mediante tribolumenescencia) y pequeñas chispas. Se sospecha que varias explosiones en minas fueron ocasionadas cuando esas chispas produjeron la ignición de una mezcla de gases.

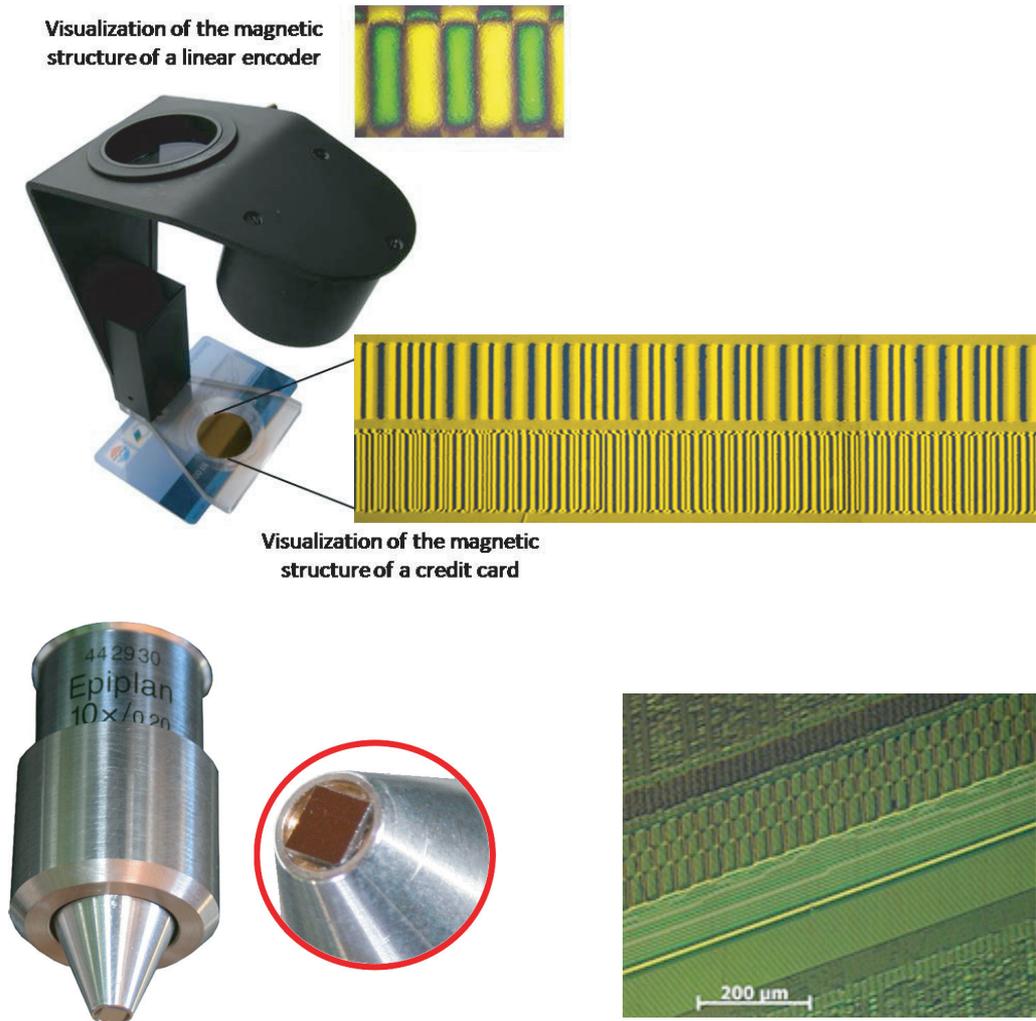


FIGURA 25 Arriba: cómo ver la información almacenada en la banda magnética de una tarjeta de crédito sin ningún aparato electrónico, utilizando solamente una lente, un polarizador y una capa magneto-óptica; abajo: cómo ver la información en un disco duro de la misma manera, añadiendo una simple placa de vidrio recubierta a un microscopio polarizador (© Matesy).

* *

Desafío 48 s

Tome un sobre, humedézcalo y ciérrelo. Tras dejarlo secar durante uno o dos días, ábralo en la oscuridad. En ambos lados del papel que está siendo separados, el sobre resplandece con color azul. ¿Por qué? ¿Es posible acelerar la velocidad de la prueba con un secador de pelo?

* *

Una carga en un campo eléctrico siente una fuerza. En otras palabras, el campo eléctrico produce una *energía potencial* sobre las cargas. Como la energía se conserva, la energía potencial eléctrica se podría transformar en energía cinética o en energía térmica. ¿Qué

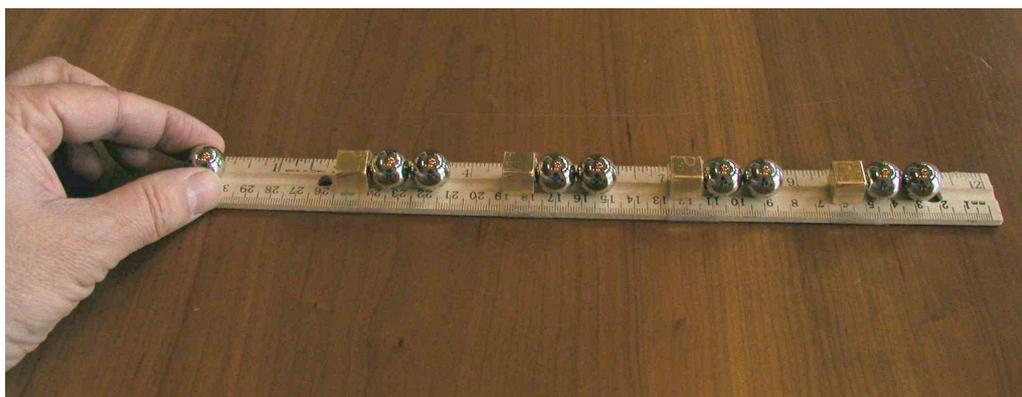


FIGURA 26 Un rifle de Gauss, hecho con una cuantas bolas de acero y cuatro imanes sujetos a una regla con cinta adhesiva (© Simon Quellen Field).

Desafío 49 e es lo que permitiría realizar estas dos posibilidades? ¿Qué es lo que lo impediría?

* *

El electromagnetismo está lleno de sorpresas y ofrece muchos efectos que pueden ser reproducidos en casa. Internet está llena de descripciones de cómo construir bobinas de Tesla para producir chispas, pistolas de bobina o pistolas de raíles para disparar objetos, máquinas electrostáticas para hacer que su pelo se ponga de punta y mucho más. Si le gustan los experimentos, solamente búsquelos por esos términos. Algunas personas se ganan la vida mostrando en un escenario los efectos de la alta tensión, tales como largas descargas desde sus dedos o su pelo. Un buen ejemplo es Robert Krampf, también conocido como 'Mr. Electricidad', en thehappyscientist.com. No emule estas actuaciones; es raramente comentado que algunos de ellos han sufrido accidentes peligrosos mientras los llevaban a cabo.

* *

Ref. 30

Las descargas en movimiento vistas en tantas pantallas, llamado *globos de plasma*, son producidas en un globo de cristal relleno de helio, neón u otros gases inertes a baja presión, generalmente 0.1 a 10 kPa, un voltaje aplicado de 5 a 10 kV y generalmente una frecuencia de 30 a 40 kHz. En esas condiciones la temperatura de los iones de las descargas se encuentran a temperatura ambiente, por lo que no hay peligro; la temperatura de los electrones, la cual no se puede notar, es de alrededor de 20 000 K. La aproximación de la mano a la esfera modifica la energía potencial y por tanto, también la forma de la descarga. Si se aproxima un tubo fluorescente a este artilugio, el tubo se encenderá; y moviendo el dedo sobre el tubo, se puede 'mágicamente' cambiar la región encendida. Internet está llena de información sobre globos de plasma.

* *

La alta tensión puede hacer que la corriente se propague a través del aire, ya que el aire se vuelve conductor en presencia de grandes campos eléctricos. Con tales descargas, las moléculas de aire se ponen en movimiento. Como resultado, se puede conseguir que



FIGURA 27 Una afición peligrosa, aquí llevada a cabo por Robert Krampf (© Wikimedia).

objetos que se encuentren unidos a una fuente de alta tensión pulsada se eleven en el aire, siempre que se optimice este movimiento del aire de tal manera que se dirija hacia abajo en todos los lugares. La alta tensión es entonces utilizada de manera efectiva para acelerar aire ionizado en una dirección y, como resultado, el objeto se moverá en la dirección opuesta, usando el mismo principio que los cohetes. En la [Figura 29](#), se muestra un ejemplo que utiliza la fuente de corriente de una pantalla de ordenador. (¡Cuidado: peligro!) Numerosos sitio web explican cómo construir en casa esos llamados elevadores; en la [Figura 29](#), la botella y la vela son utilizadas como un aislador de alto voltaje con el fin de situar los dos delgados cables de alta tensión (no visible en la fotografía) lo suficientemente alto en el aire, con objeto de evitar descargas en el ambiente o que interfieran el movimiento del elevador. Por desgracia, la mayoría de los sitios web – no todos – proporcionan erróneas o confusas explicaciones del fenómeno. Estas websites ofrecen, por tanto, una buena oportunidad para aprender a distinguir los hechos de las especulaciones.

Desafío 50 e

* *

Los efectos eléctricos producidos por la fricción y por el flujo líquido son pequeños en general. No obstante, en la década de 1990, una serie de petroleros desaparecieron repentinamente. Los marineros habían refrigerado las paredes exteriores de los tanques de petróleo con una manguera con agua de mar. La fumigación produjo una carga del tanque; una descarga posterior, hizo que los vapores de petróleo se incendiaran. Se produjo una explosión y consecuentemente los petroleros se hundieron. Accidentes similares también se producen regularmente cuando se mueven productos químicos de un tanque a otro.

* *

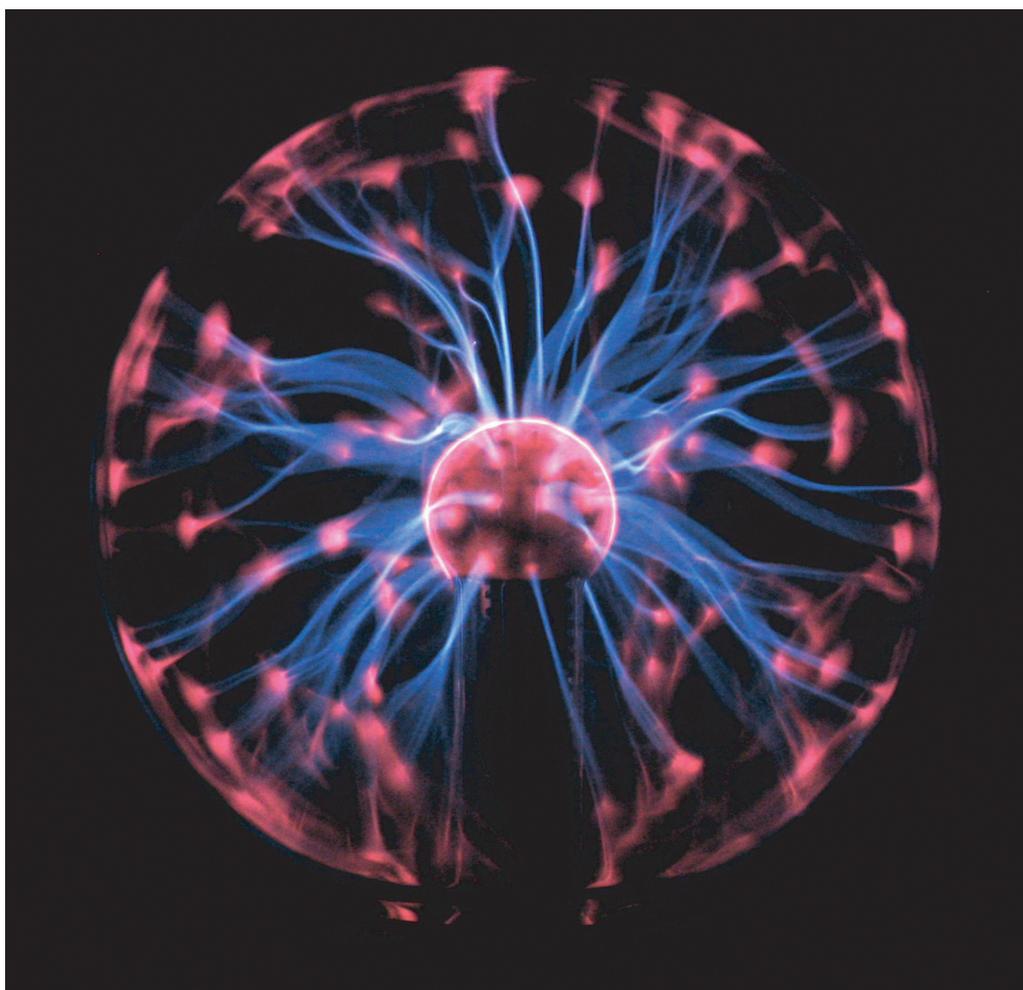


FIGURA 28 Una esfera de cristal a baja presión, o globo de plasma, con un diámetro de 30 cm y un generador de alta tensión incorporado, mostrando sus características descargas eléctricas. En un globo de plasma corriente, las descargas se mueven a su alrededor – despacio e irregularmente. (© Philip Evans).

El frotamiento de una cuchara de plástico con un paño de lana, hace que se cargue. Esa cuchara cargada se puede utilizar para extraer la pimienta en una mezcla de sal y pimienta, sosteniendo la cuchara sobre la mezcla. ¿Por qué?

Desafío 51 s

* *

Cuando las cargas se mueven, producen un campo magnético. En particular, cuando los iones en el interior de la Tierra se mueven a causa de la convección del calor, éstos producen el campo magnético de la Tierra. Cuando los iones a cierta altura de la atmósfera se mueven por el viento solar, se forma una tormenta geomagnética; La fuerza de su campo puede ser tan alta como la Tierra misma. En 2003, se descubrió un mecanismo adicional. Cuando las mareas mueven el agua de los océanos, los iones de sal del agua del mar producen un pequeñísimo campo magnético; se puede medir con los magnetómetros de

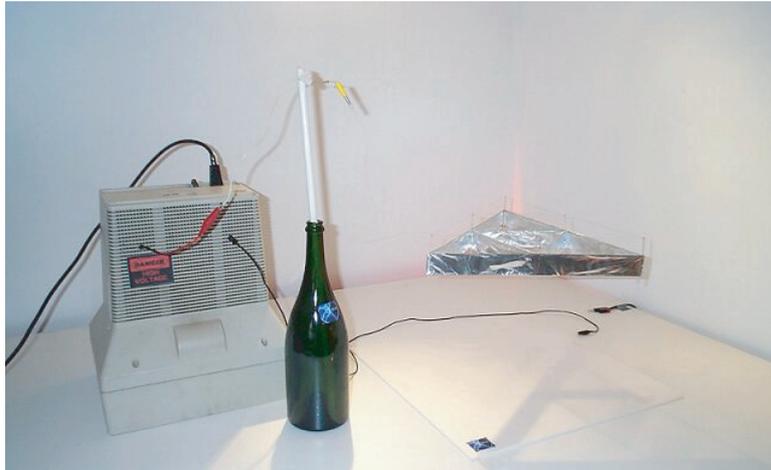


FIGURA 29 Levantar un objeto luminoso – cubierto con papel de aluminio – utilizando una descarga de alta tensión (© Jean-Louis Naudin en www.jlnlabs.org).

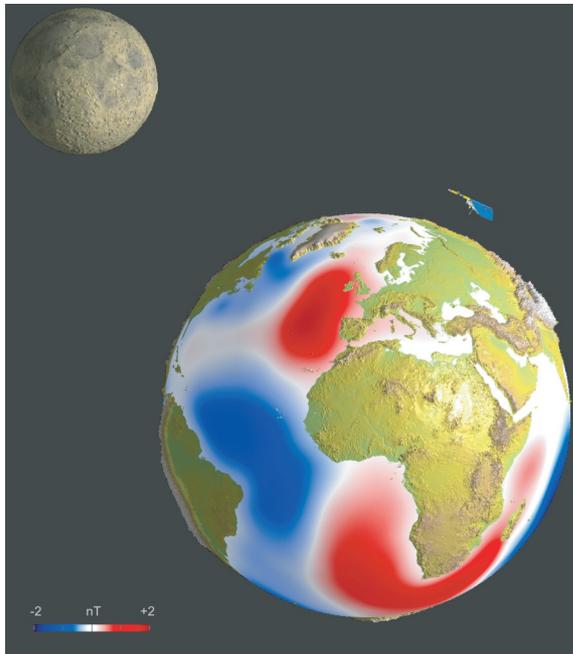


FIGURA 30 Campo magnético a causa de las mareas (© Stefan Maus).

alta sensibilidad de los satélites que orbitan la Tierra. Tras dos años de mediciones desde un pequeño satélite, fue posible realizar una bonita película de los flujos oceánicos. La **Ref. 31** **Figura 30** ofrece una impresión.

* *

El campo magnético de la Tierra está claramente influenciado por el Sol. La **Figura 31** muestra los detalles de cómo la corriente de partículas cargadas procedentes del Sol, el *viento solar*, influye en las líneas de campo y en distintos procesos que tienen lugar en

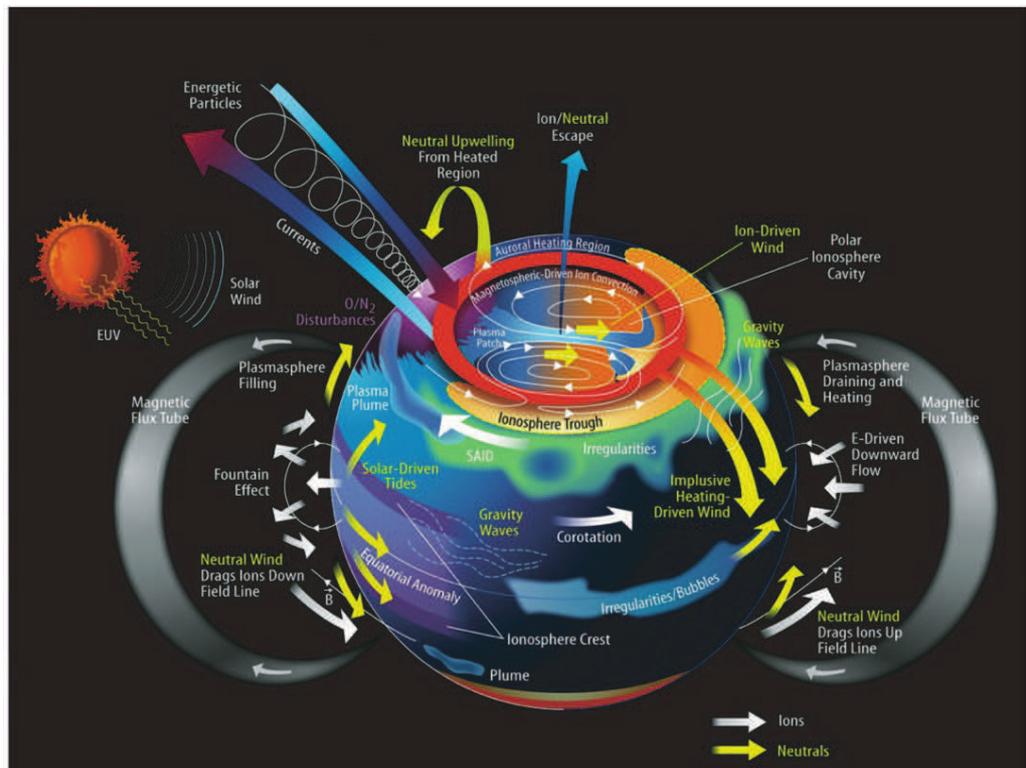
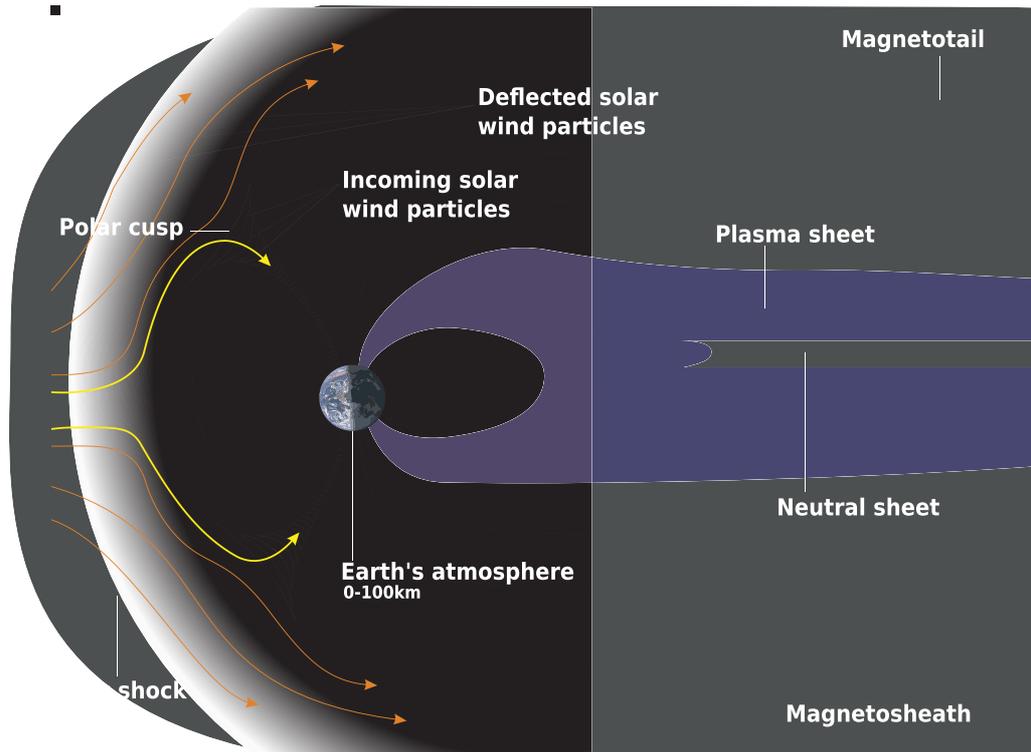


FIGURA 31 Arriba: la interacción del viento solar y el campo magnético de la Tierra. Abajo: el entorno magnético de la Tierra (cortesía de la NASA).

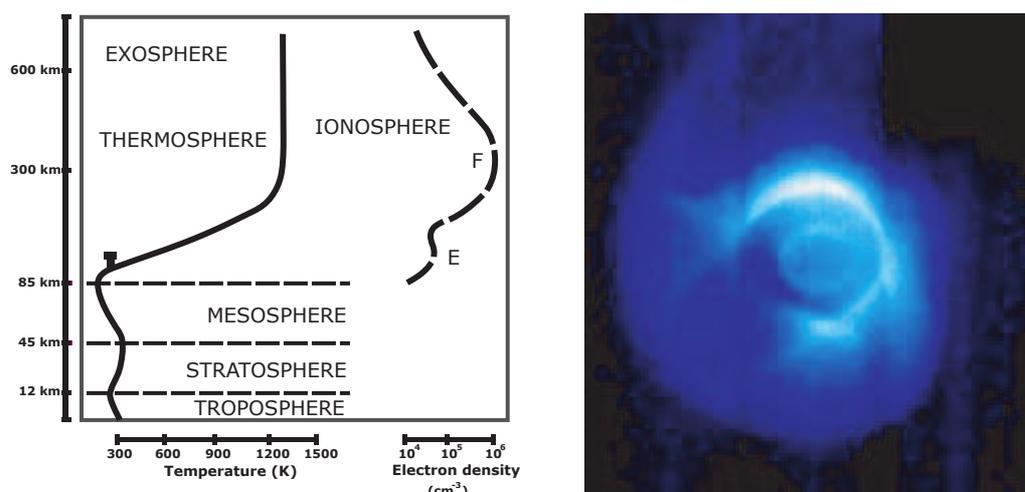


FIGURA 32 Nombres de las capas alrededor de la Tierra y una fotografía del plasma frío, o magnetosfera, rodeando la Tierra, tomada en el extremo ultravioleta, y mostrando tanto el anillo de la base de cada aurora como la cola apuntando hacia el Sol (cortesía de la NASA).

la atmósfera superior. La **Figura 32** muestra los efectos. Los detalles de este fascinante proceso son todavía objeto de investigación.

* *

Los nombres electrodo, electrolito, ion, ánodo y cátodo fueron sugeridos por William Whewell (b. 1794 Lancaster, d. 1866 Cambridge) por encargo de Michael Faraday; Faraday no poseía una educación formal y le pidió a su amigo Whewell la formación de dos palabras griegas. Para ánodo y cátodo, Whewell escogió palabras que literalmente significan 'calle arriba' y 'calle abajo'. Posteriormente Faraday popularizó esos términos, así como los otros mencionados anteriormente.

* *

Desafío 52 s El pulso luminoso más corto producido hasta ahora tenía una duración de 100 as. ¿A cuantas longitudes de onda de luz verde correspondería?

* *

¿Cuanto tiempo duran las baterías? En la Oxford University, en Clarendon Hall, los visitantes pueden observar una batería que hace funcionar un timbre eléctrico desde 1840. Las dos baterías, dos pilas Zamboni, generan alta tensión y baja intensidad, suficiente para mantener al timbre funcionando. Otros dispositivos similares, utilizando pilas Zamboni, han permanecido en funcionamiento con las mismas baterías por más de 100 años en Italia.

* *

Desafío 53 s ¿Por qué observamos con frecuencia sombras de casas y sombras de árboles, pero nunca sombras de los cables eléctricos que cuelgan en las calles?

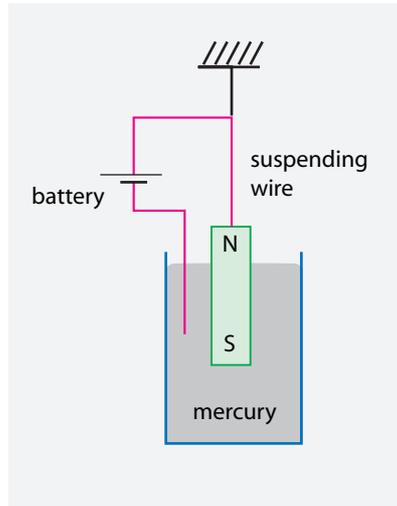


FIGURA 33 Motor unipolar.

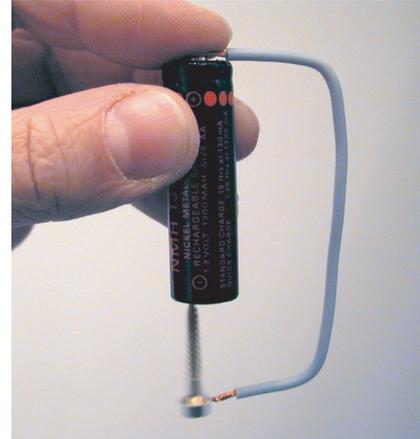


FIGURA 34 El motor más sencillo (© Stefan Kluge).

* *

Desafío 54 s ¿Cómo mediría la velocidad de la punta de un rayo? ¿Qué rango de valores espera obtener?

* *

Ref. 32 Uno de los motores eléctricos más simples posibles fue descubierto por Faraday en 1831. Un imán suspendido sobre mercurio comenzará a girar alrededor de su eje si una corriente fluirá a través de él. (Ver la Figura 33.) Adicionalmente, cuando se fuerza al imán a girar, el dispositivo (frecuentemente llamado rueda de Barlow) también funciona como generador de corriente; ¡la gente incluso ha tratado de generar corriente doméstica con tal sistema! ¿Puede explicar cómo funciona?

Desafío 55 s

La versión moderna de este motor hace uso de una batería, un cable, un imán conductor de samario-cobalto y un destornillador. El resultado se muestra en la Figura 34.

* *

Ref. 33 El campo magnético de la Tierra tenía una fuerza dipolar de $7,8 \cdot 10^{22} \text{ A m}^2$. Ello nos protege, junto con la atmósfera, de los letales vientos solares y de las partículas de la radiación cósmica, por desviación hacia los polos. A día de hoy, la falta de campo magnético nos sometería a una alta radiación en los días soleados; pero en el pasado, esta falta habría impedido la evolución de la especie humana. Debemos nuestra existencia al campo magnético de la Tierra. En el presente, el campo magnético decrece alrededor de un 5 % por siglo. Parece ser que desaparecería temporalmente en unos 1500 años; no está claro si la consecuencia sería un incremento de la radiación cósmica golpeando la superficie de la Tierra o si el viento solar por sí mismo, se haría cargo del efecto protección.

* *

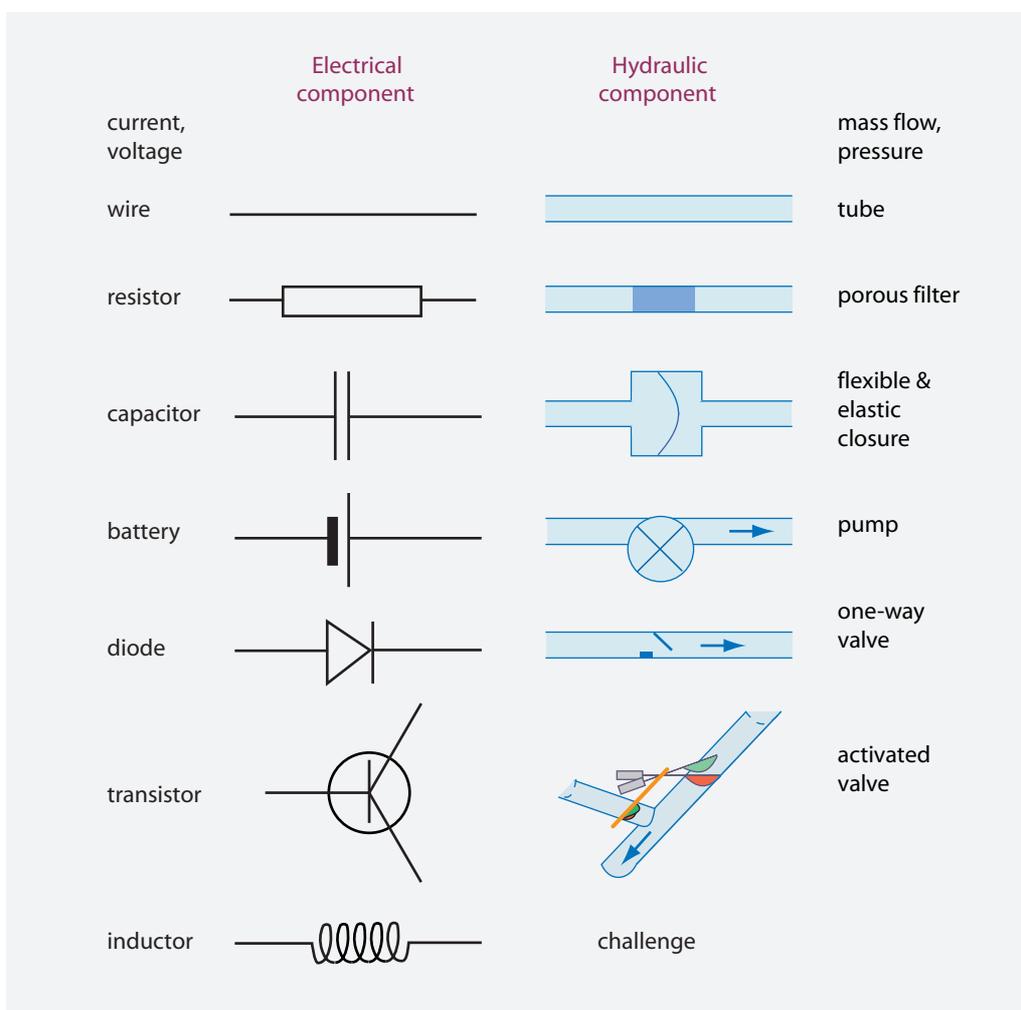


FIGURA 35 Relación entre la electrónica y el flujo de agua.

Desafío 56 s

Comparar la electricidad con el agua es un buen camino para comprender la electrónica. La Figura 35 muestra varios ejemplos que aún los jóvenes pueden usar. ¿Puede completar la comparación para una bobina, y por tanto para un transformador?

La imagen también incluye el *transistor*. Este dispositivo, como el componente hidráulico mostrado, se puede utilizar tanto para controlar una gran corriente o una corriente pequeña. Por tanto, los transistores pueden usarse como *interruptores* y como *amplificadores*. Esta es la razón por la que todos los circuitos electrónicos, desde radios a teléfonos móviles y ordenadores, hacen un gran uso de transistores. Un ordenador o móvil moderno normalmente contiene varios millones de transistores, la mayoría ensamblados en los llamados *circuitos integrados*. El diseño de estos dispositivos es una ciencia en sí mismo.

* *

Todavía existe otra forma de llevar la analogía previa en otra dirección: es posible construir una analogía matemáticamente consistente entre circuitos eléctricos y campos continuos. Los circuitos requeridos son redes infinitas o mallas en todas las direcciones del espacio, y se conocen como *discretizaciones magnéticas*. Si quiere pensar en términos eléctricos, puede divertirse buscando esto. Sólo tiene que buscar ese término en Internet.

* *

La ionosfera que rodea la Tierra tiene una frecuencia resonante de 7 Hz; por esta razón cualquier aparato que mida bajas frecuencias siempre encontrará señales de este valor.
Desafío 57 s ¿Puede dar una explicación de la frecuencia?

* *

El efecto Kirlian, el cual permite realizar tales enigmáticamente bonitas fotografías, no es una propiedad de los objetos, sino el resultado de un campo eléctrico aplicado, variante en el tiempo.

* *

En los hogares, la electricidad se utiliza generalmente en forma de corriente alterna. En otras palabras, realmente no hay electrones circulando por los cables; como la velocidad de deriva de los electrones en los alambres de cobre es del orden de $1 \mu\text{m/s}$, los electrones solamente se mueven hacia atrás y hacia adelante a 20 nm. ¡Nada fluye dentro o fuera de los cables! ¿Por qué las compañías eléctricas requieren un flujo real de dinero a cambio, en lugar quedar satisfechas con un movimiento de dinero de ida y vuelta?
Página 267
Desafío 58 e

* *

¿Tienen la misma carga los electrones que los protones? Los experimentos muestran que los valores son los mismos por lo menos en los veinte primeros dígitos. ¿Cómo podría comprobarlo?
Desafío 59 ny

* *

Los valores de las cargas son independientes de la velocidad, aún cerca de la velocidad de la luz. ¿Cómo lo confirmaría?
Desafío 60 ny

* *

Los imanes pueden ser utilizados, incluso por los los escolares, para escalar muros de hierro. Eche un vistazo al sitio web www.physicslessons.com/TPNN.htm.

* *

¿Se puede utilizar imanes para fabricar una cama flotante? En 2006, un arquitecto holandés presentó al público un pequeño modelo de una bonita cama flotante, mostrado a la izquierda de la **Figura 36**, que se mantenía flotando en el aire mediante imanes permanentes. Para evitar que la cama se volcara, estaba sujeta al suelo por cuatro cuerdas. En su sitio web, el arquitecto también ofrecía una versión a tamaño real de la misma cama, a un precio superior al millón de dólares americanos. No obstante, las imágenes de la cama a escala – las dos únicas imágenes que existen – no son fotografías, sino gráficos



FIGURA 36 El problema de la cama flotante: mientras el modelo de la izquierda, con una longitud de unos 40 cm y una altura flotante de unos cuantos centímetros, existe y ha sido admirado por muchos, el escalado a una versión a tamaño real, a la derecha, es imposible (© Janjaap Ruissenars en www.UniverseArchitecture.com). Las dos imágenes de la derecha *no* son fotografías: ellas muestran un sueño, no una realidad. ¿Por qué?

Desafío 61 s de ordenador, ya que este sueño es un imposible. ¿Por qué?

* *

Página 121

Los campos magnéticos extremadamente altos producen efectos extraños. Para campos de 10^{10} T, el vacío se vuelve efectivamente birrefringente, los fotones pueden dividirse y fusionarse y los átomos se exprimen. Los átomos de hidrógeno, por ejemplo, se estima que se hacen doscientas veces más estrechos en una dirección. Por fortuna, estas condiciones solamente existen en determinadas estrellas de neutrones, llamadas *magnetoestrellas*.

* *

La 'ley' de Ohm, la observación por la que para casi todos los materiales la corriente I es proporcional al voltaje U , es

$$U \sim I \quad \text{o} \quad \frac{U}{I} = R = \text{const.} \quad (24)$$

y se debe a un maestro de escuela. Georg Simon Ohm (b. 1789 Erlangen, d. 1854 Munich), fue un maestro de escuela y físico. Exploró la validez de la proporcionalidad en gran profundidad y con muchos materiales; en aquellos días, tales medidas eran difíciles de llevar a cabo. Ohm descubrió que la proporcionalidad era aplicable a la mayoría de los materiales y a mucho niveles de corriente, siempre y cuando la temperatura, la densidad del material y las densidades de carga permanecieran constantes. La proporcionalidad,

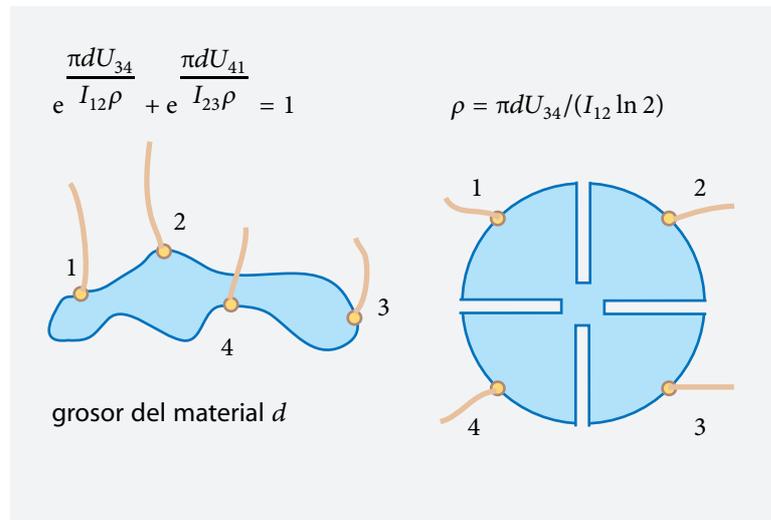


FIGURA 37 ¿Puede deducir la fórmula de Van der Pauw para la resistencia específica ρ de capas homogéneas de cualquier forma (izquierda) o su caso especial para una firma simétrica (derecha)?

por tanto, no es válida para situaciones con chispas o para los semiconductores. Pero sí es aplicable para la mayoría de los conductores sólidos, en particular para los metales.

Los esfuerzos de Ohm sólo fueron reconocidos al final de su vida, y finalmente fue promocionado a profesor de la Technical University de Munich. Posteriormente la unidad de *resistencia eléctrica* R – este es el nombre oficial para el factor proporcionalidad entre el voltaje, el cual se mide en *volt*, y la intensidad de corriente, que se mide en *ampere* – fue nominada con su nombre. Un *ohm* es definido y escrito como $1 \text{ V/A} = 1 \Omega$.

Hoy, la relación de Ohm es fácil de medir. Recientemente, aún la resistencia eléctrica de los átomos individuales han sido medidos: en el caso del xenón resulta ser de unos $10^5 \Omega$. También se encontró que los átomos de plomo son diez veces más conductores que los del oro. ¿Puede imaginar por qué?

Ref. 34
Desafío 62 ny

* *

Desde hace muchas décadas, la 'ley' de Ohm se enseña en la escuela secundaria hasta que todos los estudiantes de la clase hayan perdido el interés por la materia. Por ejemplo, la energía eléctrica P transformada en calor en una resistencia viene dada por

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} . \quad (25)$$

Vol. I, página 379 Ya hemos mencionado esta relación hace poco; échele un vistazo. Ahora usted conoce todo lo que necesita ser conocido sobre esta materia. Sobre todo, la expresión para la energía eléctrica en una resistencia reseña la calefacción eléctrica, por ejemplo la calefacción de una estufa en una cocina moderna o en una máquina de café.

* *

La 'ley' de Ohm, a pesar de parecer sencilla, encierra muchos aspectos matemáticamente fascinantes. Por ejemplo, en 1958, el físico holandés J.L. van der Pauw probó una impre-

Desafío 63 d sionante fórmula y un método que permite la medición de la resistencia específica ρ de capas de material de *cualquier* forma. Tan sólo se necesita unir cuatro alambres de oro a la capa en sus bordes. La resistencia específica viene dada por la expresión mostrada en la **Figura 37**. ¿Puede intuir cómo se deduce la fórmula? (Este no es un problema fácil.) La fórmula redujo en gran manera la carga de trabajo de los laboratorios de todo el mundo; antes de que la fórmula hubiera sido descubierta, en todos los experimentos, los investigadores también tenían que producir muestras separadas y precisas, que permitieran medir la resistencia específica del material que estaban investigando.

* *

Ref. 35 Una buena forma de hacer dinero es producir electricidad y venderla. In 1964, fue inventado un método completamente nuevo por Fletcher Osterle. El método fue presentado al gran público en un bonito experimento en 2003. Larry Kostiuk y su grupo tomó un placa de vidrio, añadió una capa conductora en cada lado y luego grabó varios cientos de miles de canales minúsculos en la placa: 450 000 microcanales, cada uno de alrededor de 15 μm de diámetro, en la placa de 2 cm de diámetro. Cuando se hizo circular agua por los canales, se generó una corriente. Los contactos de las dos placas conductoras pueden ser usados como contactos de una batería y generar 1,5 μA de corriente eléctrica.

Desafío 64 s Este simple dispositivo utiliza los efectos que el vidrio, como la mayoría de los aislantes, recubierto de una capa cargada produce cuando es sumergido en un líquido. ¿Puede imaginar por qué se genera la corriente? Por desgracia, la eficiencia de la electricidad generada es solamente de aproximadamente un 1 %, lo que hace al método mucho menos interesante que una sencilla rueda de palas que alimenta una dinamo.

* *

Para bonitas animaciones sobre campos magnéticos y eléctricos, consultar el sitio web web.mit.edu/8.02t/www/802TEAL3D/visualizations.

* *

Desafío 65 s A veces la Electrostática es contra-intuitiva. Tome una esfera conductora aislada, de radio R , y un punto cargado localizado fuera de la misma, ambos con la misma carga. Aún cuando cargas de igual signo se repelen mutuamente, a distancias cortas de la esfera, el punto pequeño es atraído hacia a esfera. ¿Por qué? ¿A qué distancia d se repelen?

* *

Los semiconductores de arseniuro de galio pueden ser representados por los llamados puntos cuánticos y *puntos de contacto*. Estas estructuras permiten contar electrones aislados. Ahora esto se hace de manera rutinaria en varios laboratorios por todo el mundo.

* *

Ref. 36 Las cargas de dos condensadores en serie, generalmente no son iguales, como lo establece la ingenua teoría. Para perfectos, condensadores sin fuga, la relación de voltaje viene dada por la razón de capacidad inversa $V_1/V_2 = C_2/C_1$, debida a la igualdad de las cargas eléctricas almacenadas. Esto se deduce fácilmente de la **Figura 38**. No obstante, en la práctica, ésto es solamente correcto para intervalos de tiempos entre unos pocos minutos

Desafío 66 s y unas pocas docenas de ellos. ¿Por qué?

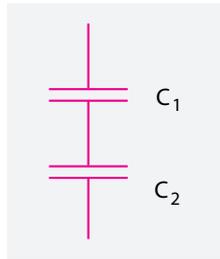


FIGURA 38
Condensadores en serie.

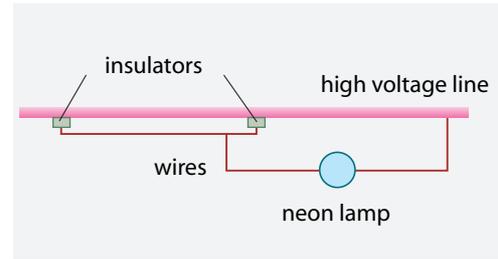


FIGURA 39 Una lámpara de neón colgando en una línea de alta tensión.

* *

En determinados cables de alta tensión que pueden observarse en el paisaje, pequeñas lámparas de neón, llamadas *balisores*, que brillan cuando fluye la corriente, como muestra la **Figura 39**. ¿Cómo funcionan?

Desafío 67 s

* *

Durante la lluvia o la niebla, las líneas de alta tensión hacen ruidos con frecuencia; algunas veces *cantan*. ¿Qué está pasando?

Desafío 68 s

* *

La *polarizabilidad eléctrica* es la propiedad de la materia responsable de la desviación que sufre el agua que sale de un grifo cuando se le acerca un peine cargado. Se define como la fuerza de un dipolo eléctrico inducida por la aplicación de un campo eléctrico. La definición simplemente traduce la observación de que muchos objetos quedan cargados cuando están sometidos a un campo eléctrico. A propósito, cómo quedan cargados los peines cuando se les frota con un paño, un fenómeno conocido como *electrificación*, es todavía un misterio para la ciencia moderna.

Página 17

* *

Un campo magnético puro no puede ser transformado en un campo eléctrico puro por cambio del marco de observación. Lo mejor que se puede conseguir es un estado similar a una *mezcla igual* de campos magnéticos y eléctricos. ¿Puede proporcionar un argumento para dilucidar esta relación?

Desafío 69 s

* *

Calcular la resistencia de las redes infinitas es uno de los problemas más cautivadores de la electricidad, como se muestra en la **Figura 40**. ¿Puede encontrar la solución?

Desafío 70 ny

* *

Para cada valor límite de la Naturaleza existe una relación de indeterminación correspondiente. Esto es también válido para la electricidad y el límite de la carga mínima. En realidad, existe una relación de indeterminación para los condensadores, de la forma

$$\Delta C \Delta U \geq e \quad (26)$$

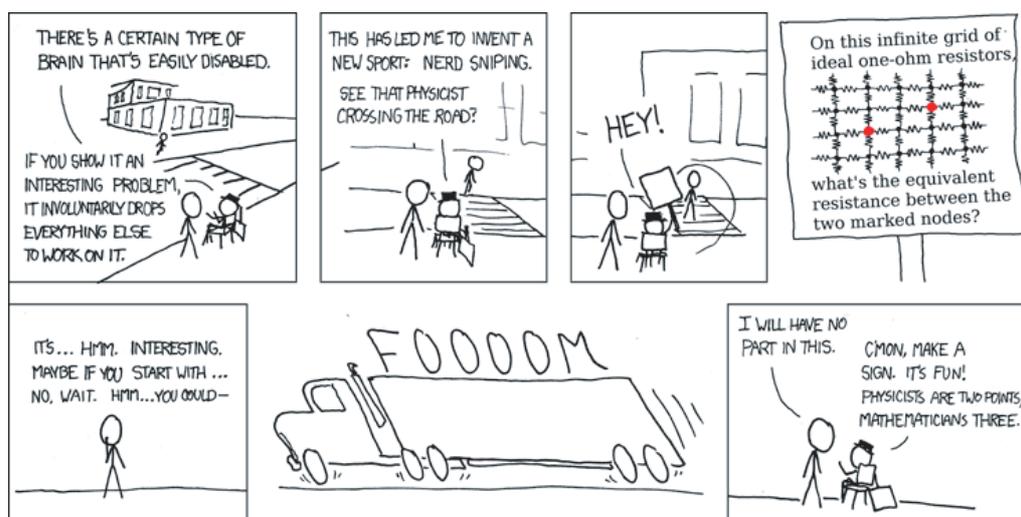


FIGURA 40 Un problema eléctrico que no es fácil (© Randall Munroe).

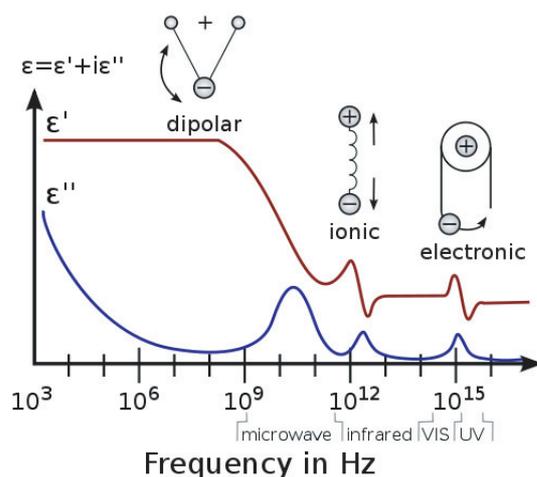


FIGURA 41 Cambio de la permitividad relativa (real e imaginaria) con la frecuencia para un material inexistente (mix), y el proceso general responsable para los diferentes dominios (© Kenneth Mauritz).

donde e es la carga del positrón, C la capacidad y U la diferencia de potencial. Existe también una relación de indeterminación entre la corriente eléctrica I y el tiempo t

$$\Delta I \Delta t \geq e. \quad (27)$$

Ref. 37 Ambas relaciones pueden ser encontradas en la literatura.

* *

Las propiedades eléctricas de los materiales, en contraste con sus propiedades magnéticas, varían fuertemente con la frecuencia de los campos eléctricos aplicados. La **Figura 41** ilustra cómo la permitividad cambia con la frecuencia, y qué procesos microscópicos constituyen la base de la propiedad a esa específica frecuencia. El gráfico es sólo

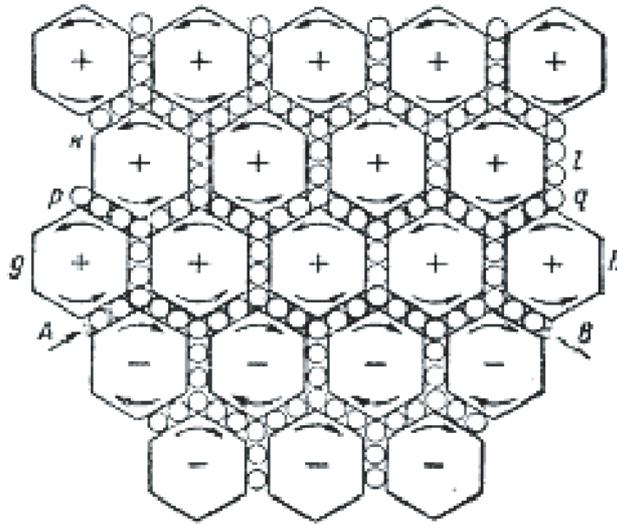


FIGURA 42 Modelo fallido de Maxwell para el vacío.

un esquema: muestra dispositivos de diferentes materiales combinados entre ellos. En la Naturaleza, las partes reales y las imaginarias de la permitividad vienen relacionadas por la llamada *relaciones de Kramers-Kronig*, las cuales son importantes para muchos materiales en asuntos relacionados con el fenómeno de las onda. Las dos curvas del gráfico no las siguen completamente.

* *

Desafío 71 e

Si un eje gira, se puede colocar un imán en su extremo. Con el imán giratorio se puede construir un taquímetro extremadamente barato. ¿De qué manera?

* *

Desafío 72 s

En los escritos de Maxwell de 1861 sobre el electromagnetismo, incluyó la Figura 42 como modelo de campos magnético y eléctrico en el vacío ¿cual es el mayor problema que presenta este modelo?

* *

Ref. 38

¿Durante cuánto tiempo los circuitos integrados basados en el silicio podrán hacerse cada vez más y más pequeños? Las opiniones sobre este asunto difieren. Las predicciones optimistas, frecuentemente llamadas 'ley' de Moore, se alternan con las predicciones realizadas a partir de 2011, que pronostican que la reducción del tamaño será moderada debido al alto coste de los equipos requeridos para llevarlo a acabo. Por ejemplo, la siguiente generación de obleas de paso a paso (wafer steppers), las máquinas más caras para la producción de chips de silicio, deberán trabajar en el extremo ultravioleta – generalmente 13 nm – para conseguir transistores de más pequeño tamaño. Para esta longitud de onda, el aire es un amortiguador y las lentes tienen que ser remplazadas por espejos. No está claro que esto sea factible tanto técnica como económicamente. El futuro lo dirá.

* *

En la década de 1990, imágenes de microscopio mostraron, sorprendentemente, que los colmillos de los narvales están llenos de terminaciones nerviosas. Por lo tanto, los colmillos probablemente son órganos sensoriales. No obstante, no se comprenden los detalles y el exacto uso de los mismos. ¿Cómo lo descubriría?

Desafío 73 s

RESUMEN: TRES HECHOS BÁSICOS SOBRE LA ELECTRICIDAD

Los experimentos descritos hasta ahora muestran tres resultados básicos:

- ▷ Las cargas eléctricas afectan, por lo tanto producen efectos sobre otras cargas.
- ▷ Las cargas eléctricas se conservan.
- ▷ Las cargas, como todo lo material, se mueve más despacio que la luz.

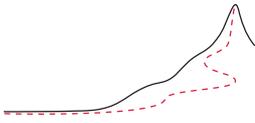
De estas tres afirmaciones – la definición de carga, la conservación de la carga y la invariancia de la velocidad de la luz – se pueden deducir todos los aspectos de la electrodinámica clásica. Un resumen alternativo podría ser: *las cargas se conservan; sus efectos obedecen a la relatividad.*

Ref. 39 En particular, el Lagrangiano de la electrodinámica y las ecuaciones de campo de Maxwell, pueden ser deducidos a partir de esas tres afirmaciones; ellas describen la forma en las que las cargas *producen* cualquier campo eléctrico, magnético o electromagnético. También se puede deducir la fuerza de Lorentz; ella describe cómo el movimiento de cargas masivas está relacionado con el movimiento del campo electromagnético.

Ref. 39 La prueba de la conexión entre la conservación de la carga y las ecuaciones de campo puede hacerse matemáticamente; no lo vamos a presentar aquí, porque de alguna

Ref. 40 manera el álgebra está envuelta en ello. La conexión fundamental a recordar es: toda la electrodinámica se desprende de las propiedades de las cargas que hemos descubierto hasta ahora.





CAPÍTULO 2

DESCRIPCIÓN DE LA EVOLUCIÓN DEL CAMPO ELECTROMAGNÉTICO

Vol. IV, página ??

Los campos eléctricos y los campos magnéticos cambian: dicho de manera sencilla, se mueven. ¿Cómo sucede exactamente? En la década de 1860, James Clerk Maxwell** reunió todo el conocimiento experimental que pudo encontrar, y extrajo la precisa descripción del movimiento del campo electromagnético. Veinte años más tarde, Heaviside y Hertz extractaron, de los difíciles documentos de Maxwell escritos en una inusual notación de cuaterniones, los principales puntos de sus ideas, llamando a sus resúmenes *teoría de Maxwell del campo electromagnético*.

El movimiento del campo electromagnético queda descrito por un conjunto de ecuaciones de evolución. Para la descripción relativista, este conjunto lo forman *dos* ecuaciones, mientras que para el caso no-relativista, lo forman *cuatro* ecuaciones. Todas las observaciones de la electrodinámica clásica se derivan de estas ecuaciones. De hecho, si fueran tenidos en cuenta adecuadamente los efectos cuánticos, con ellas podrían describirse *todos* los efectos electromagnéticos de la Naturaleza.

PRIMERA ECUACIÓN DE CAMPO PARA LA ELECTRODINÁMICA

La primera ecuación de campo relativista de la electrodinámica es la precisa afirmación de que los campos electromagnéticos *se producen en las cargas*, y en ningún otro lugar. Se puede escribir como***

$$\begin{aligned} d\mathbf{F} &= j\mu_0 \\ \text{o, equivalentemente} \\ \nabla \cdot \mathbf{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \text{y} \quad \nabla \times \mathbf{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \mu_0 \mathbf{j}. \end{aligned} \quad (28)$$

** James Clerk Maxwell (b. 1831 Edinburgh, d. 1879 Cambridge) es uno de los físicos más importantes e influyentes. Encontró el electromagnetismo unificando de manera teórica la electricidad y el magnetismo, tal como se describe en este capítulo. Su trabajo sobre formas termodinámicas constituyó el segundo pilar de su actividad. Adicionalmente, estudió la teoría de los colores y desarrolló el triángulo de los colores; fue uno de los primeros en realizar fotografías en color. Es considerado por muchos como el mejor físico que ha habido. Tanto 'Clerk' como 'Maxwell' eran sus apellidos.

*** Hay una cierta libertad para escribir estas ecuaciones, debido a que los diferentes autores absorben diferentes combinaciones de las constantes c and μ_0 para la definición de las cantidades F , A y j . La versión que se cita aquí es la más común de todas ellas. Las ecuaciones pueden ser generalizadas para aquellos casos en los que las cargas no estén rodeadas por el vacío, sino localizadas en el interior de la materia. No exploraremos estas situaciones en nuestro paseo ya que, como veremos posteriormente, el aparente caso particular del vacío, en realidad describe toda la Naturaleza.

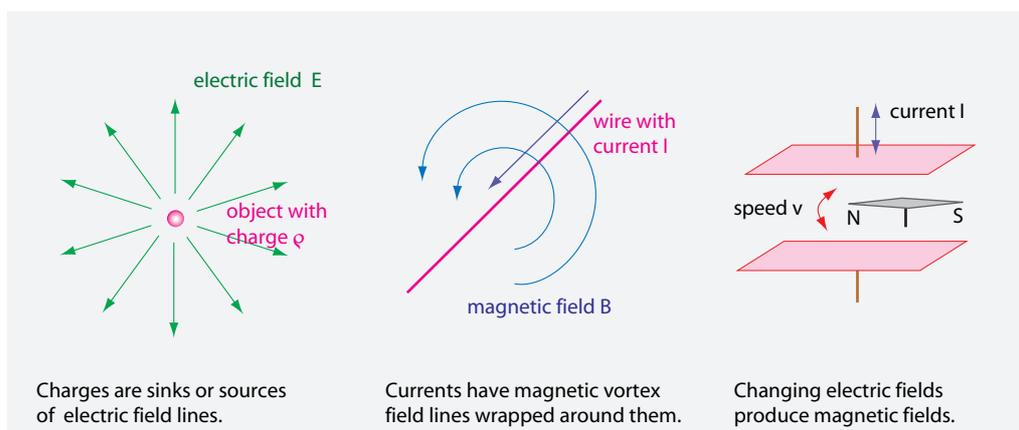


FIGURA 43 La primera de las ecuaciones de campo de Maxwell para la electrodinámica, ilustrada en tres dibujos.

Cualquiera de estas dos formas equivalentes* para escribir la primera ecuación de Maxwell, lo que establece es una sencilla afirmación:

- ▷ *Las cargas eléctricas producen el campo electromagnético.* Lo llevan junto con ellas.

Por ejemplo, la primera ecuación describe la atracción del polvo por los objetos cargados eléctricamente y el funcionamiento de los electroimanes.

Esta primera ecuación de campo es equivalente a las tres observaciones básicas ilustradas en la Figura 43: la 'ley' de Coulomb sobre la atracción y repulsión de cargas, la 'ley' de Ampère sobre la atracción y repulsión de cables portadores de corriente, y la *adición de Maxwell*, la observación de que los cambios en los campos eléctricos producen efectos magnéticos. De manera más precisa, si conocemos dónde se encuentran las cargas y cómo se mueven, se puede determinar el campo electromagnético \mathbf{F} que éstas generan. Las *cargas estáticas*, descritas por una densidad ρ , producen campos *electrostáticos*, y las cargas en movimiento, descritas por una densidad de corriente (en 3 dimensiones) \mathbf{j} , producen una mezcla campos eléctricos y magnéticos. Las *corrientes estacionarias* son el origen de los campos *magnetoestáticos*. En general, las cargas que se mueven producen campos que se mueven.

Desafío 74 e

La primera ecuación de campo también contiene la *regla de la mano derecha* aplicada al producto vectorial, para los campos magnéticos creados alrededor de los cables. Y como se ha mencionado anteriormente, la expresión también establece, con más claridad

* En su forma de componentes, la primera ecuación puede ser escrita

$$d_{\mu} \mathbf{F}^{\mu\nu} = \mathbf{j}^{\nu} \mu_0 = (\rho c, \mathbf{j}) \mu_0 = (\rho_0 \gamma c, \rho_0 \gamma \mathbf{v}) \mu_0 \quad \circ$$

$$(\partial_t/c, \partial_x, \partial_y, \partial_z) \begin{pmatrix} 0 & -E_x/c & -E_y/c & -E_z/c \\ E_x/c & 0 & -B_z & B_y \\ E_y/c & B_z & 0 & -B_x \\ E_z/c & -B_y & B_x & 0 \end{pmatrix} = \mu_0 (\rho c, \mathbf{j}) . \quad (29)$$

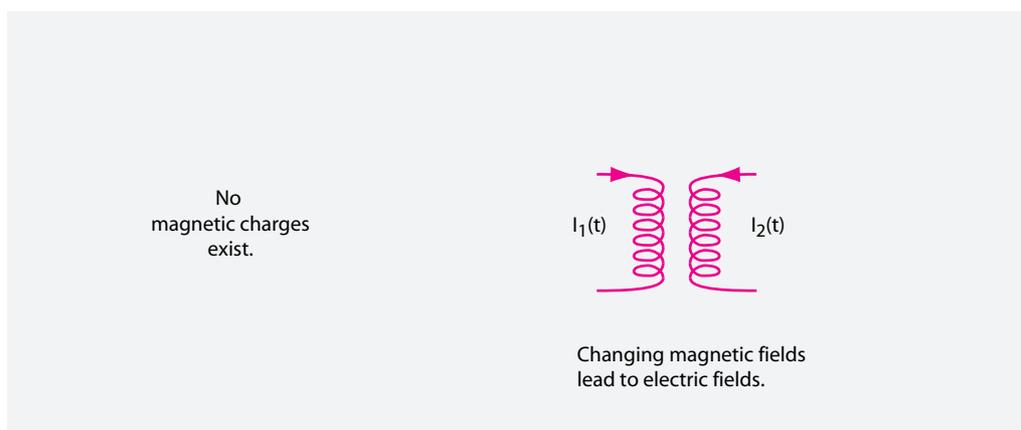


FIGURA 44 Segunda ecuación de campo para la electrodinámica.

en su segunda forma, que el cambio de los campos eléctricos producen campos magnéticos. El efecto es esencial para la parte primaria de los transformadores. El pequeño factor $1/c^2$ implica que el efecto es pequeño; por lo que se necesitan bobinas con *muchas* vueltas o *fuertes* corrientes eléctricas para producir o detectar el efecto.

SEGUNDA ECUACIÓN DE CAMPO PARA LA ELECTRODINÁMICA

La segunda de las ecuaciones de campo de Maxwell, ilustrada en la Figura 44, manifiesta la observación de que en la Naturaleza *no* hay cargas magnéticas, i.e., que no hay fuentes de campos magnéticos. Como resultado, la ecuación también proporciona una descripción precisa de cómo un cambio en los campos crean campo eléctricos y viceversa – conocida con frecuencia como '*ley*' de Faraday. La segunda de las ecuaciones de Maxwell para la electrodinámica puede venir expresada como

$$d^*F = 0 \quad \text{con} \quad {}^*F^{\rho\sigma} = \frac{1}{2}\epsilon^{\rho\sigma\mu\nu}F_{\mu\nu}$$

o, equivalentemente

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \text{y} \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}. \quad (30)$$

La segunda ecuación de campo* por tanto, expresa la *falta de fuentes para el tensor campo dual* *F . En otras palabras,

* En forma de componentes, la segunda ecuación de Maxwell puede escribirse

$$d_\mu {}^*F^{\mu\nu} = 0 \quad \text{o}$$

$$(\partial_t/c, \partial_x, \partial_y, \partial_z) \begin{pmatrix} 0 & -B_x & -B_y & -B_z \\ B_x & 0 & E_z/c & -E_y/c \\ B_y & -E_z/c & 0 & E_x/c \\ B_z & E_y/c & -E_x/c & 0 \end{pmatrix} = (0, 0, 0, 0) \quad \text{o}$$

$$\epsilon^{\sigma\mu\nu\rho} \partial_\mu F_{\nu\rho} = 0 \quad \text{o}$$

$$\partial_\mu F_{\nu\rho} + \partial_\nu F_{\rho\mu} + \partial_\rho F_{\mu\nu} = 0. \quad (31)$$

- ▷ *En la Naturaleza no hay cargas magnéticas, i.e., no hay monopolos magnéticos.*

No existen fuentes de campos magnéticos. Por consiguiente, la segunda ecuación de campo establece que si dividimos en partes un imán, sin tener en cuenta dónde se encuentran sus polos norte y sur, cada una de las partes tendrá *dos* polos y nunca quedará una pieza con un solo polo.

Puesto que no hay cargas magnéticas, las líneas de campo magnético no tienen *principio ni final*; no solamente las líneas de campo magnético es inducido por cargas, no, sino que *ninguna* línea de campo magnético tiene principio ni final. Por ejemplo, las líneas de campo, continúan por el interior de los imanes. La falta de comienzos y finales se expresa matemáticamente estableciendo que el *flujo magnético* a través de una superficie cerrada S – tal como una esfera o un cubo – *siempre desaparece*: $\int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$. En otras palabras, todas las líneas de campo que entran en un volumen cerrado también salen de él.* Ningún flujo magnético abandona un volumen. Esto se conoce generalmente como '*ley*' de Gauss para el campo magnético.

Más aún, la segunda ecuación de campo expresa que

- ▷ *Las variaciones de los campos magnéticos producen campos eléctricos.*

Este efecto se utiliza en la parte secundaria de los transformadores y las dinamos. El producto cruzado de la expresión, implica que un campo eléctrico generado de esta manera – también llamado *campo electromotriz* – no contiene puntos de principio o de final. Por lo que las líneas de campo electromotriz pueden formar círculos: Para la mayoría de los casos prácticos estas líneas circulan a lo largo de los circuitos eléctricos. En resumen, un campo eléctrico puede tener vórtices (de la misma manera que ocurre para los campos magnéticos), pero solamente en presencia de un campo magnético cambiante. El signo menos es fundamental para asegurar la conservación de la energía (¿Por qué?) y recibe un nombre especial: es llamado *regla de Lenz*.

Desafío 75 ny

En la práctica, se necesita que la segunda ecuación de Maxwell se utilice conjuntamente con la primera. ¿Puede ver por qué?

Desafío 76 ny

Notemos que el tensor dual $*F$ se deduce del tensor de campo F por sustitución de E/c por B y B por $-E/c$. Esto se conoce como *transformación de dualidad*. Más adelante se ampliará esta información sobre dualidad.

Página 99

Ref. 41

* A diferencia de lo que se dice o se escribe con frecuencia en libros de física, las líneas de campo magnético *no* son, en general, líneas cerradas; ni, en general, *tampoco* bucles o líneas de vórtice. Las líneas cerradas de campo magnético solamente ocurren en los cables convencionales; ni siquiera hay bucles en las bobinas helicoidales. De hecho, en todas las situaciones normales, no académicas, las líneas de campo magnético comienzan y acaban en el infinito espacial.

Las *líneas* de campo magnético son una herramienta matemática, que no proporcionan una descripción completamente útil sobre el campo magnético. El campo magnético resulta mucho mejor descrito por su *vector campo*.

VALIDEZ Y ESENCIA DE LAS ECUACIONES DE CAMPO DE MAXWELL

Anteriormente vimos que la ecuación de evolución de Lorentz

$$m\mathbf{b} = qF\mathbf{u}$$

o, equivalentemente

$$d\mathbf{E}/dt = q\mathbf{E}\mathbf{v} \quad \text{y} \quad d\mathbf{p}/dt = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (32)$$

describe cómo se mueven las cargas originando el movimiento de los campos. Junto a la ecuación de evolución de Lorentz, las dos ecuaciones de evolución de Maxwell (28) y (30) describen *todos* los fenómenos electromagnéticos que tienen lugar a escala cotidiana, desde teléfonos móviles, baterías de coches, a ordenadores personales, láseres, rayos, hologramas y arco iris. En otras palabras, esta descripción de campos electromagnéticos es completa para la vida cotidiana. Sólo los efectos cuánticos y los efectos del espacio-tiempo curvado no están incluidos.

Las ecuaciones de Maxwell parecen muy complejas. Pero no deberíamos olvidar que contienen solamente *cuatro* ideas básicas.

1. Las cargas eléctricas cumplen la 'ley' de Coulomb.
2. Las cargas eléctricas se mueven más lentamente que la luz.
3. Las cargas eléctricas se conservan.
4. Las cargas magnéticas no existen.

Si queremos ser verdaderamente simplistas, las ecuaciones de Maxwell son solamente la formulación relativista de la 'ley' de Coulomb. En realidad, como hemos visto anteriormente, las ecuaciones de Maxwell son sólo el resultado lógico de la conservación de la carga.

Ref. 39

Las ecuaciones de Maxwell continúan siendo fascinantes a día de hoy. Sus aplicaciones son numerosas, desde la industria a la medicina que salva vidas, desde juguetes y música a los materiales científicos, investigación sobre la fusión y la astronomía. Transporte, telecomunicaciones, ordenadores, electrónica, la mayoría de los trabajos, la vida humana y prácticamente la totalidad de sus placeres dependen de la electricidad y el magnetismo. Ya en 1899, después de que Heinrich Hertz pusiera las ecuaciones de Maxwell en su forma moderna, dijo y escribió:

Man kann diese wunderbare Theorie nicht studieren, ohne bisweilen die Empfindung haben, als wohne den mathematischen Formeln selbständiges Leben und eigener Verstand inne, als seien dieselben klüger als wir, klüger sogar als ihre Erfinder, als gäben sie mehr heraus, als seinerzeit in sie hineingelegt wurde. *

Cuando Ludwig Boltzmann escribió su libro sobre el electromagnetismo en 1893, añadió el siguiente lema lírico al principio del capítulo sobre las ecuaciones de Maxwell:

* 'Uno no puede estudiar esta maravillosa teoría sin a veces tener el sentimiento de que estas fórmulas matemáticas poseen vida independiente y su propia inteligencia, de que son más listas que nosotros, más listas aún que sus descubridores, y de que ellas nos dan más de lo que se puso originalmente en ellas.'

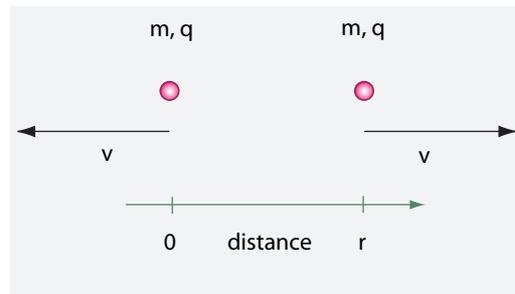


FIGURA 45 Ilustración de partículas cargadas tras una colisión.

War es ein Gott der diese Zeichen schrieb,
 Die mit geheimnisvoll verborgnen Trieb
 Die Kräfte der Natur um mich enthüllen
 Und mir das Herz mit stiller Freud erfüllen?*

En verdad, las fórmulas de Maxwell han retenido su fascinación. Todavía, cada año se descubren y desarrollan nuevas aplicaciones por todo el mundo.

En esta aventura, no exploraremos muchas aplicaciones de las ecuaciones de campo. Dejaremos a un lado la mayoría de ellas y continuaremos directamente hacia nuestro objetivo de entender la conexión entre los campos electromagnéticos, el movimiento cotidiano y el movimiento de la luz. De hecho, el campo electromagnético posee una propiedad importante que hemos mencionado al comienzo: el campo en sí puede moverse. En particular, el campo puede transportar energía, momento lineal y momento angular.

COLISIÓN DE PARTÍCULAS CARGADAS

Los campos electromagnéticos se mueven. Un sencillo experimento clarificará el significado del movimiento de campos: Cuando dos partículas cargadas colisionan, la cantidad de movimiento total *no* se conserva. Comprobémoslo.

Imagine dos partículas de idéntica masa y con la misma carga inmediatamente después de un choque entre ellas, cuando se están alejando una de la otra. La situación se ilustra en la Figura 45. Imagine así mismo que las masas sean grandes, de tal manera que la aceleración producida por su repulsión eléctrica sea pequeña. Para un observador en el centro de gravedad del sistema formado por las dos, cada partícula sentirá una aceleración del campo eléctrico de la otra. Este campo eléctrico E viene dado por la llamada *fórmula de Heaviside*

$$E = \frac{q(1 - v^2/c^2)}{4\pi\epsilon_0 r^2}. \quad (33)$$

En otras palabras, el sistema completo presenta una cantidad de movimiento total nula para este observador.

* '¿Fue un dios quien escribió estos signos / que con oculto secreto / descubre las fuerzas de la Naturaleza que me rodean / y llenan mi corazón de jubiloso silencio?' Estas cuatro líneas de Boltzmann parafrasean las cuatro líneas del *Fausto* de Goethe.

Sea un segundo observador, que se mueve con respecto al primero a una velocidad v , de tal manera que la primera carga le parezca en reposo. La expresión (33) proporciona dos valores *diferentes* para los campos eléctricos, uno para cada posición de cada una de las partículas. En otras palabras, el sistema formado por las dos partículas no es un movimiento inercial, como cabría esperar; la cantidad de movimiento total no se conserva para este observador. La cantidad de movimiento perdida es pequeña, pero ¿dónde fue a parar?

Ref. 42

Desafío 78 s

Ref. 43

Este, en principio, sorprendente efecto ha sido puesto en forma de teorema por Van Dam y Wigner. Ellos demostraron que, para un sistema de partículas que interactúan a una cierta distancia, la energía-cantidad de movimiento total de una partícula no puede permanecer constante en todos los sistemas inerciales.

La cantidad de movimiento total del sistema se conserva solamente porque

- ▷ el campo magnético en sí mismo también porta alguna cantidad de movimiento.

En resumen, la cantidad de movimiento se conserva en el experimento, pero parte de él se la lleva el campo. La cantidad precisa depende del observador.

Por lo tanto, dos partículas cargadas en colisión, nos muestran que los campos electromagnéticos tienen cantidad de movimiento. Si los campos electromagnéticos tienen cantidad de movimiento, podrían *golpear* objetos y ser golpeados por ellos. Como mostraremos más adelante, la luz es también un campo electromagnético. Por lo que debería ser posible mover objetos proyectando luz sobre ellos. Podríamos incluso ser capaces de suspender partículas en el aire iluminándolas desde abajo. Ambas suposiciones son correctas, y presentaremos algunos experimentos sobre ello en breve.

Página 129

Podemos concluir que cualquier clase de campo que produzca interacciones de partículas debe llevar tanto energía como cantidad de movimiento, ya que el argumento se aplica en todos estos casos. En particular, se aplica a las interacciones nucleares. En realidad, en la parte cuántica de nuestra aventura todavía encontraremos un resultado adicional: todos los campos están compuestos ellos mismos de partículas. La energía y la cantidad de movimiento de los campos se convierten entonces en un estado obvio de su existencia. En resumen, tiene sentido decir que los campos electromagnéticos se mueven, ya que son portadores de energía y cantidad de movimiento.

¿QUÉ ES EL CONTACTO?

La exploración de las colisiones, junto al resultado de que la materia consiste en partículas cargadas, nos permite concluir que

- ▷ El contacto cotidiano es el intercambio de campos electromagnéticos.

En particular, hemos aprendido que el contacto real no existe en la vida cotidiana.

- ▷ En el contacto cotidiano, *en realidad nada se toca* con nada.

Tenemos que enterrar un sueño que han guiado a los pensadores durante siglos: el mun-

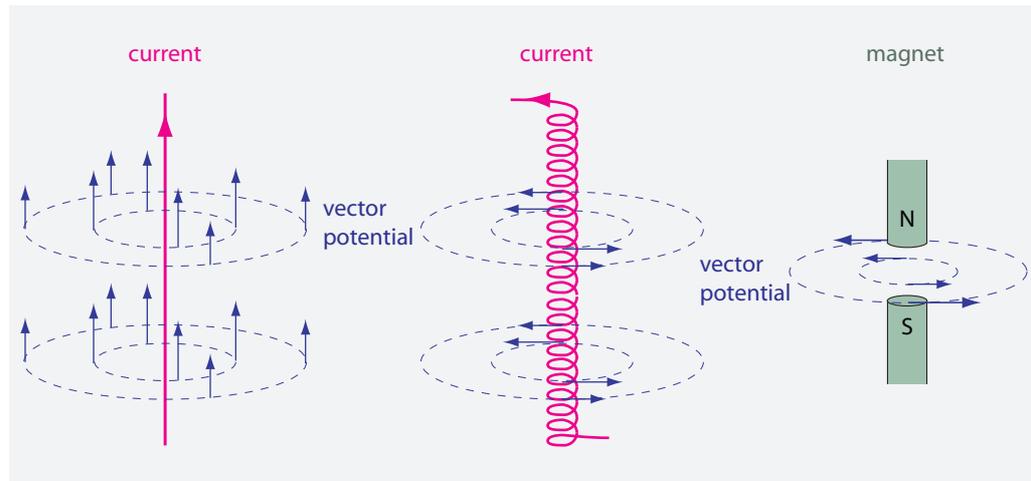


FIGURA 46 Potencial vector para situaciones seleccionadas.

do no es mecánico. Todos los procesos a nuestro alrededor son o eléctricos o gravitacionales.

EL CAMPO GAUGE – EL POTENCIAL VECTOR ELECTROMAGNÉTICO*

Al estudio del movimiento de campos se le llama *teoría de campo* y la electrodinámica es el ejemplo principal. (El otro ejemplo clásico lo constituye la dinámica de fluidos; matemáticamente, el movimiento electromagnético y el movimiento de los fluidos son muy similares.) La teoría de campos es un bonito asunto; las líneas de campo, las líneas equipotenciales y las líneas de vórtex son algunos de los conceptos introducidos en este dominio. Ellos entusiasman a muchas personas.** No obstante, en esta escalada centraremos nuestra discusión sobre el movimiento.

Hemos visto que los campos nos obligan a extender nuestro concepto del movimiento. El movimiento no consiste solamente en el cambio de estado de los objetos, sino también en el *cambio en el estado de los campos*. Por tanto necesitaremos, también para los campos, una descripción completa de sus estados.

Las observaciones utilizando ámbar e imanes, han demostrado que los *campos electromagnéticos poseen energía y cantidad de movimiento*. Los campos pueden proporcionar energía e impulso a las partículas. Los experimentos con motores han demostrado que los objetos pueden añadir energía y cantidad de movimiento a los campos. Por tanto se necesita definir una *función de estado* que permita definir energía y cantidad de movimiento para los campos eléctrico y magnético. Y como los campos eléctrico y magnético transportan energía, sus movimientos deben observar el límite de velocidad de la Naturaleza.

* En una primera lectura se puede saltar esta sección.

** ¿Cuál es la relación, para campos estáticos, entre las líneas de campo y las superficies equipotenciales? ¿Puede una línea de campo cruzar una superficie potencial dos veces? Para más detalles sobre temas como éstos, consulte libro de texto *libre* de BO THIDÉ, *Electromagnetic Field Theory*, en su sitio web www.plasma.uu.se/CED/Book. Y desde luego, eche una ojeada a los textos, en inglés, de Schwinger y de Jackson.

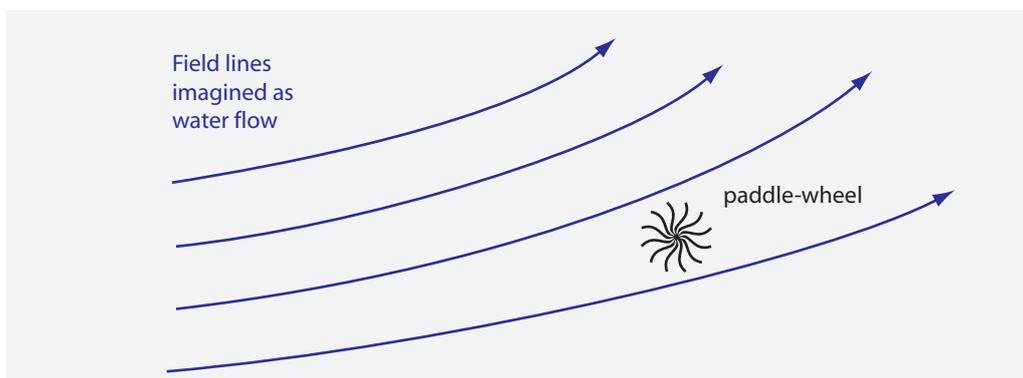


FIGURA 47 Visualización del rotacional de un campo vectorial. Imagine que el campo es un flujo de aire y compruebe si la pequeña rueda de palas gira; si lo hace, el rotacional local es distinto de cero. La dirección del rotacional es la del eje de la rueda de palas que muestra la mayor velocidad de rotación.

Hertz y Heaviside definieron la función de estado para los campos en dos pasos. El primero fue la definición del *potencial vector (magnético)*, el cual describe la cantidad de movimiento por carga que proporciona un campo:

Ref. 44

$$\mathbf{A} = \frac{\mathbf{p}}{q} . \quad (34)$$

Cuando una partícula cargada atraviesa un potencial magnético $\mathbf{A}(\mathbf{x})$, su cantidad de movimiento varía según $q\Delta\mathbf{A}$; cambia según resulte ser la diferencia entre los valores del potencial en el punto de partida y el final, multiplicada por su carga. Debido a esta definición, el potencial vector tiene la propiedad de que

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} = \text{rot } \mathbf{A} \quad (35)$$

i.e., que el campo magnético es el *rotacional* del potencial magnético. En la mayoría de los idiomas al rotacional se le llama *rotación* y se abrevia como rot. Para visualizar en qué consiste el rotacional o rotación, imagine que los vectores de campo son vectores de la velocidad del aire que fluye. Ahora ponga una minúscula rueda de palas en un punto, como muestra la [Figura 47](#). Si da vueltas, el rotacional es distinto de cero. La velocidad de rotación de la rueda de palas resultará máxima para alguna dirección del eje; esta velocidad máxima define la intensidad, así como la dirección del rotacional en ese punto. (La regla de la mano derecha resulta implícita.) Por ejemplo, el rotacional para las velocidades de un cuerpo sólido que gira es, en todas partes, 2ω , o el doble de la velocidad angular.

Desafío 80 ny

Ref. 45

Desafío 81 ny

El potencial vector para un alambre largo y recto por el que circula corriente es paralelo al mismo; tiene una magnitud

$$A(r) = -\frac{\mu_0 I}{4\pi} \ln \frac{r}{r_0} , \quad (36)$$

la cual depende de la distancia radial r desde el cable y de una constante de integración r_0 . Esta expresión para el potencial vector, representada en la [Figura 46](#), muestra cómo la corriente en movimiento produce un momento lineal en el campo electromagnético que lo rodea. En el caso de un solenoide, el potencial vector 'circula' alrededor del mismo. La magnitud obedece la expresión

$$A(r) = -\frac{\Phi}{4\pi r}, \quad (37)$$

donde Φ representa el flujo magnético en el interior del solenoide. Observemos que, en general, el potencial vector es *arrastrado* por cargas en movimiento. El efecto de arrastre decrece para largas distancias. Esto casa bien con la imagen del potencial vector como cantidad de movimiento del campo magnético.

Esta conducta del potencial vector alrededor de las cargas, recuerda la forma en la que la miel es arrastrada por la cuchara que se mueve en ella. En ambos casos, el efecto arrastre se hace menor con la distancia. No obstante, el potencial vector, a diferencia de la miel, *no* produce ninguna fricción que retarde el movimiento de la carga. El potencial vector por tanto, se comporta como un líquido sin rozamiento.

En el interior del solenoide, el campo magnético es constante y uniforme. Para tal campo \mathbf{B} tendremos el potencial vector

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{1}{2} \mathbf{B} \times \mathbf{r}. \quad (38)$$

En este caso, el potencial magnético crece con el incremento de la distancia al origen.* En el centro de un solenoide, el potencial se desvanece. La analogía de la miel arrastrada presenta exactamente el mismo comportamiento.

Sin embargo, hay una trampa. El potencial magnético *no* se define de una sola forma. Si $\mathbf{A}(\mathbf{x})$ es un potencial vector, entonces el potencial vector diferente

$$\mathbf{A}'(\mathbf{x}) = \mathbf{A}(\mathbf{x}) + \nabla \Lambda, \quad (39)$$

donde $\Lambda(t, \mathbf{x})$ es una función escalar, es *también* un potencial vector para la misma situación. (Sin embargo, el campo magnético \mathbf{B} se mantiene igual.) Todavía peor, ¿puede confirmar que el correspondiente valor (absoluto) del impulso también cambiará? Esta inevitable ambigüedad, llamada *invariancia de indicador* o *simetría de indicador*, es una propiedad fundamental del campo electromagnético. Lo exploraremos en mayor detalle más adelante.

No sólo la cantidad de movimiento, sino también la energía del campo electromagnético se definen de manera ambigua. En realidad, el segundo paso en la especificación de un estado para el campo electromagnético, es la definición del *potencial eléctrico* como

* esto es solamente posible mientras el campo permanezca constante; ya que los campos decrecen nuevamente para largas distancias – a causa de que la energía de un campo es siempre finita – también el potencial vector decrece a medida que las distancias se hacen mayores.

Ref. 44 la energía U por carga:

$$\varphi = \frac{U}{q} \quad (40)$$

En otras palabras, el potencial $\varphi(\mathbf{x})$ en un punto \mathbf{x} es la energía que se necesita para llevar una unidad de carga al punto \mathbf{x} partiendo de un punto donde el potencial es cero. La energía potencial entonces, viene determinada por $q\varphi$. A partir de esta definición, el campo eléctrico \mathbf{E} es simplemente la *variación* del potencial según la posición corregida por la dependencia temporal del impulso, i.e.,

$$\mathbf{E} = -\nabla\varphi - \frac{\partial}{\partial t}\mathbf{A}, \quad (41)$$

Obviamente, hay libertad para elegir la definición del potencial. Si $\varphi(\mathbf{x})$ es un potencial posible, entonces

$$\varphi'(\mathbf{x}) = \varphi(\mathbf{x}) - \frac{\partial}{\partial t}\Lambda \quad (42)$$

es también una función potencial para la misma situación. Esta libertad es la generalización de la existente para definir la energía hasta una constante. Sin embargo, el campo eléctrico \mathbf{E} permanece constante para todos los potenciales.

Ref. 44 Para estar convencidos de que los potenciales son verdaderamente la energía y la cantidad de movimiento del campo electromagnético, observemos que para una carga en movimiento tendremos

Desafío 84 ny

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2}mv^2 + q\varphi \right) &= \frac{\partial}{\partial t} q(\varphi - \mathbf{v}\mathbf{A}) \\ \frac{d}{dt} (m\mathbf{v} + q\mathbf{A}) &= -\nabla q(\varphi - \mathbf{v}\mathbf{A}), \end{aligned} \quad (43)$$

lo que muestra que los cambios de energía generalizada y de la cantidad de movimiento de una partícula (en el lado izquierdo) son debidos a la variación de energía y del impulso del campo electromagnético (en el lado derecho).*

En la notación relativista 4-vector, la energía y la cantidad de movimiento del campo aparecen juntas en una cantidad. La función de estado del campo electromagnético se hace

$$A^\mu = (\varphi/c, \mathbf{A}) \quad (44)$$

y es llamada *4-potencial*. Es fácil ver que la descripción de campo es completa, ya que tenemos

$$\mathbf{F} = d\mathbf{A} \quad \text{o} \quad \mathbf{F}^{\mu\nu} = \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu \quad (\text{y} \quad \mathbf{F}_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu), \quad (45)$$

lo que significa que el campo electromagnético \mathbf{F} viene especificado completamente por

* esta conexión también muestra por qué la expresión $P^\mu - qA^\mu$ aparece tan regularmente en las fórmulas; en verdad, juega un papel fundamental en la teoría cuántica de una partícula en el campo electromagnético.

el 4-potencial A .^{*} Pero como se acaba de decir, el 4-potencial mismo *no* está definido de una sola manera. En realidad, cualquier otro 4-potencial equivalente A' estará relacionado con A por la misma *transformación gauge*

$$A'^{\mu} = A^{\mu} + \partial^{\mu}\Lambda \quad (46)$$

donde $\Lambda = \Lambda(t, x)$ es cualquier campo escalar arbitrariamente elegido. El nuevo campo A' nos conduce al *mismo* campo electromagnético, y a las mismas aceleraciones y evoluciones. El 4-potencial A es por tanto la *sobredescripción* de una determinada situación física, como varias alternativas de medidas *diferentes*, que corresponden a la *misma* situación física.^{**} Por consiguiente, debemos comprobar que todos los resultados medidos son independientes de las transformaciones gauge, i.e., que todos los observables son cantidades invariantes gauge. Dichas cantidades invariantes gauge son, como acabamos de ver, los campos F y $*F$, y, en general, todas las cantidades clásicas. Añadamos que muchos físicos teóricos utilizan perezosamente el término 'campo electromagnético' para designar tanto las cantidades $F^{\mu\nu}$ como A^{μ} .

Existe una sencilla imagen, debida a Maxwell, que ayuda vencer las dificultades conceptuales del potencial vector. Resulta que la integral de línea cerrada sobre A_{μ} es invariante gauge, porque

$$\oint A^{\mu} dx_{\mu} = \oint (A^{\mu} + \partial^{\mu}\Lambda) dx_{\mu} = \oint A^{\mu} dx_{\mu} . \quad (47)$$

En otras palabras, si imaginamos al potencial vector como una cantidad que nos permite asociar un número a un anillo diminuto en cada punto del espacio, conseguiremos una buena imagen invariante gauge del potencial vector.^{***}

Ahora que hemos definido una función de estado para describir la energía y la cantidad de movimiento del campo electromagnético, veamos con más detalle lo que sucede cuando se mueve un campo electromagnético.

EL LAGRANGIANO DEL ELECTROMAGNETISMO****

En lugar de utilizar el campo y las ecuaciones de Lorentz, el movimiento de una partícula cargada y el movimiento relacionado del campo electromagnético, se puede describir también utilizando un Lagrangiano. No es difícil darse cuenta de que la acción S_{CED}

* La conexión entre A_{μ} y A'^{μ} , la misma que para cualquier otro 4-vector, fue mencionada anteriormente; ¿puede repetirla?

** La elección de una función Λ se llama frecuentemente *elección de un calibre (o de una medida)*; el cuadripotencial (4-potential) A se conoce también como *campo gauge*. Estos extraños términos tienen razones históricas y son ahora de uso común para todos los físicos.

Ref. 46 *** El la parte del texto sobre teoría cuántica veremos que el exponente de esta expresión $\exp(iq \oint A_{\mu} dx^{\mu})/\hbar$, generalmente conocida como *factor de fase*, puede ser observada directamente en los experimentos.

**** Esta sección puede ser saltada en una primera lectura.

Desafío 87 ny para una partícula en la electrodinámica clásica, se puede definir simbólicamente por*

$$S_{\text{CED}} = -c^2 m \int d\tau - \frac{1}{4\mu_0} \int \mathbf{F} \wedge * \mathbf{F} - \int j \wedge A, \quad (48)$$

que en notación de índice, se escribiría

$$S_{\text{CED}} = -mc \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{\eta_{\mu\nu} \frac{dx_n^\mu(s)}{ds} \frac{dx_n^\nu(s)}{ds}} ds - \int_{\mathbf{M}} \left(\frac{1}{4\mu_0} \mathbf{F}_{\mu\nu} \mathbf{F}^{\mu\nu} + j_\mu A^\mu \right) d^4x, \quad (49)$$

o, en notación 3-vector, vendría expresado como

$$S_{\text{CED}} = -c^2 m \int d\tau + \int (qvA - q\varphi) dt dV + \int \left(\frac{\epsilon_0}{2} E^2 - \frac{1}{2\mu_0} B^2 \right) dt dV. \quad (50)$$

La parte nueva sería la medida del cambio – o acción – debida al campo electromagnético. El cambio de campo puro vendría dado por el término $\mathbf{F} \wedge * \mathbf{F}$, y el cambio debido a la interacción con la materia, vendría dado por el término $j \wedge A$.

El principio de mínima acción, como de costumbre, establece que el cambio en un sistema tiende a ser siempre lo más pequeño posible, La acción S_{CED} conduce a las ecuaciones de evolución al exigir que la acción sea estacionaria bajo variaciones δ y δ' de las posiciones y de los campos que se desvanecen en el infinito. En otros términos, el principio de mínima acción requiere que

$$\begin{aligned} \delta S = 0 \quad \text{cuando} \quad x_\mu = x_\mu + \delta_\mu \quad \text{y} \quad A_\mu = A_\mu + \delta'_\mu, \\ \text{siempre que} \quad \delta x_\mu(\theta) \rightarrow 0 \quad \text{para} \quad |\theta| \rightarrow \infty \\ \text{y} \quad \delta A_\mu(x_\nu) \rightarrow 0 \quad \text{para} \quad |x_\nu| \rightarrow \infty. \end{aligned} \quad (51)$$

Vol. I, página 271

Desafío 88 ny

De la misma manera que para el caso de la mecánica, utilizando el método variacional para dos variables A y x , se recuperan las ecuaciones de evolución para la posición de partículas y campos

$$b^\mu = \frac{q}{m} \mathbf{F}_\nu^\mu u^\nu, \quad \partial_\mu \mathbf{F}^{\mu\nu} = j^\nu \mu_0, \quad \text{y} \quad \epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} \partial_\nu \mathbf{F}_{\rho\sigma} = 0, \quad (52)$$

que ya conocemos: se trata de la relación de Lorentz y de las dos ecuaciones de campo. Obviamente, son equivalentes al principio variacional basado en S_{CED} . Ambas descripciones deben ser completadas especificando las *condiciones iniciales* de las partículas y de los campos, así como las *condiciones del contorno* de este último. Necesitaremos las derivadas primera y la de orden cero de las posiciones de las partículas, y las derivada de orden cero para el campo electromagnético.

* El producto descrito por el símbolo \wedge , ‘cuña’ o ‘sombrero’, y el operador de dualidad $*$ tienen un significado matemático preciso. Entrar en lo que hay detrás, el concepto de *forma (matemática)*, nos apartaría mucho de nuestro camino.

Con el Lagrangiano, (48) toda la electrodinámica clásica puede ser descrita y comprendida. Para el resto de nuestra exploración de la electrodinámica, nos centraremos en temas específicos de este vasto campo.

EL TENSOR ENERGÍA-CANTIDAD DE MOVIMIENTO Y SUS SIMETRÍAS DE MOVIMIENTO

Sabemos por la mecánica clásica que llegamos a las definiciones de energía y de cantidad de movimiento a través del teorema de Noether. En particular, tanto la definición como la conservación de la energía y el impulso, surgen de la simetría de Lorentz del Lagrangiano. Por ejemplo, hemos conocido que las partículas relativistas poseen un *vector* energía- cantidad de movimiento. En el punto en el que la partícula está situada, este vector describe su energía y cantidad de movimiento.

Puesto que el campo electromagnético no es una entidad localizada, en la manera que lo es una partícula puntual, sino una entidad extensa, se hace necesaria una descripción más completa. Al objeto de describir totalmente la energía-cantidad de movimiento del campo electromagnético, necesitaremos conocer el *flujo* de energía y la cantidad de movimiento para cada punto del espacio de manera separada *para cada dirección*. Esto hace necesario que su descripción deba hacerse mediante un *tensor*, el llamado *tensor energía-cantidad de movimiento* \mathbf{T} del campo electromagnético.

Vol. II, página 195

El campo eléctrico multiplicado por una carga, es la fuerza sobre esa carga, o de manera equivalente, el aumento de su cantidad de movimiento por unidad de tiempo. La generalización para el campo electromagnético completo \mathbf{F} , y para el vector de fuerza-potencia completa (o 4-force) \mathbf{K} es

$$F^{\mu\nu} j_{\mu} = K^{\nu} = \partial_{\mu} T^{\mu\nu} \quad . \quad (53)$$

Esta breve ecuación, que también puede ser deducida del Lagrangiano, encierra mucha información. En particular, expresa que cada cambio en la energía del campo es la suma de la energía radiada fuera (vía flujo de energía descrito por el vector de Poynting \mathbf{S}) y del cambio de la energía cinética de las cargas. La ecuación también establece una afirmación similar para la cantidad de movimiento del campo electromagnético.

Los componentes detallados del tensor energía-cantidad de movimiento \mathbf{T} resultan ser

$$\mathbf{T}^{\mu\nu} = \left(\begin{array}{c|c} \text{densidad de} & \text{densidad de impulso o} \\ \text{energía} & \text{flujo de energía} \\ \hline \text{densidad de impulso o} & \text{densidad de flujo} \\ \text{flujo de energía} & \text{del impulso} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c|c} u & \mathbf{S}/c = c\mathbf{p} \\ \hline c\mathbf{p} & T \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c|c} (\epsilon_0 E^2 + B^2/\mu_0)/2 & \epsilon_0 c \mathbf{E} \times \mathbf{B} \\ \hline \epsilon_0 c \cdot & -\epsilon_0 E_i E_j - B_i B_j / \mu_0 \\ \mathbf{E} \times \mathbf{B} & 1/2 \delta_{ij} (\epsilon_0 E^2 + B^2/\mu_0) \end{array} \right) \quad (54)$$

donde $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{B}/\mu_0$ es el *vector de Poynting* que describe la densidad de flujo de energía del campo electromagnético. El tensor energía-cantidad de movimiento \mathbf{T} obedece una relación de continuidad: describe una cantidad conservada.

Desafío 89 e

Podríamos resumir diciendo que en la Naturaleza, se conservan la energía y la cantidad de movimiento, si se tiene en cuenta el impulso y la energía del campo electromagnético. Y el tensor energía-cantidad de movimiento muestra una vez más que la electrodinámica en una descripción invariante gauge (invariante de calibre o invariante de medida): los valores para la energía y el impulso son independientes de las opciones de medida. El tensor energía-cantidad de movimiento, así como la función de Lagrange, muestra que la electrodinámica es invariante bajo la *inversión del movimiento*. Si todas las cargas cambiaran su dirección de movimiento – una situación llamada frecuente y confusamente ‘inversión de tiempo’ – se moverían hacia atrás recorriendo los mismos caminos que utilizaron en su movimiento hacia adelante. Cada ejemplo de movimiento debido a causas eléctricas o magnéticas puede tener lugar también en sentido inverso.

Desafío 90 s

Por otra parte, la vida cotidiana muestra muchos efectos eléctricos y magnéticos que no son invariantes en el tiempo, tales como la ruptura de cuerpos o la quema de bombillas eléctricas. ¿Podría explicar cómo encajan estas dos situaciones de invariancia?

Vol. II, página ??

Notemos también que las cargas y la masa destruyen una posterior simetría para el vacío ya mencionada en la relatividad especial: sólo el vacío es invariante bajo transformaciones conformes. En particular, solamente el vacío es invariante bajo una inversión espacial $r \rightarrow 1/r$. Cualquier otro sistema físico no cumple la simetría conforme.

En resumen, el movimiento electromagnético, así como todos los demás ejemplos de movimiento encontrados hasta ahora, es determinista, más lentos que c , reversibles y conservados. Esto no supone una gran sorpresa. Sin embargo, existen otras dos simetrías del electromagnetismo que merecen una mención especial.

ENERGÍA Y MOMENTOS DEL CAMPO ELECTROMAGNÉTICO

Todas las entidades que se mueven tienen energía, momento lineal (impulso, momento o cantidad de movimiento) y momento angular. Esto también es aplicable al campo electromagnético. En realidad, la descripción hasta ahora nos permite que podamos expresar la energía *total* $E_{\text{energía}}$ del campo electromagnético como

$$E_{\text{energía}} = \frac{1}{4\pi} \int \frac{\epsilon_0}{2} (\mathbf{E}^2 + c^2 \mathbf{B}^2) dV . \quad (55)$$

La energía es, por tanto, cuadrática para los campos.

Para el momento lineal total \mathbf{p} se obtiene

$$\mathbf{p} = \frac{1}{4\pi} \int \epsilon_0 \mathbf{E} \times \mathbf{B} dV . \quad (56)$$

La expresión dentro de la integral representa la *densidad del momento*. El vector relacionado $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{B}/\mu_0$, es el llamado *vector de Poynting** y describe el *flujo de energía*; es un campo vectorial y tiene como unidad de medida el W/m^2 . El vector de Poynting es la densidad de momento dividido por c^2 ; en verdad, la relatividad especial implica que el momentum y la energía que fluyen por los campos electromagnéticos están relacionados por el factor c^2 . El vector de Poynting describe entonces la energía que fluye por

* John Henry Poynting (b. 1852 Monton, d. 1914 Birmingham) introdujo el concepto en 1884.



FIGURA 48 ¿Cual de los dos es el paisaje original? (NOAA).

unidad de superficie y por unidad de tiempo, o en otras palabras, la potencia por superficie. Como se mostrará más adelante, el vector de Poynting es una componente del tensor energía-cantidad de movimiento.

Página 95

¿Podría dibujar un gráfico del campo del vector de Poynting para un cable portador de corriente? ¿Para un transformador?

Desafío 91 s

Ref. 47

Para el momento angular total tendremos

$$\mathbf{L} = \frac{\epsilon_0}{4\pi} \int \mathbf{E} \times \mathbf{A} \, dV = \frac{\epsilon_0}{4\pi} \int \mathbf{r} \times (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) \, dV, \quad (57)$$

donde \mathbf{A} es el potencial vector magnético.

En resumen, el campo electromagnético tiene momento lineal, momento angular y energía, con valores bien definidos. Sin embargo, para las situaciones cotidianas, los valores reales son despreciablemente pequeños, como es posible que quiera comprobar.

Desafío 92 e

¿QUÉ ES UN ESPEJO? ¿TIENE PARIDAD INVARIANTE LA NATURALEZA?

En el transcurso de nuestro paseo estudiaremos en distintas ocasiones las extrañas propiedades de los espejos. Comenzaremos por la más sencilla. Pintando cada una de sus manos de un color distinto, todo el mundo puede observar que los espejos *no* cambian la derecha por la izquierda, ni tampoco cambia lo de arriba por lo de abajo, sin embargo, un espejo convierte a un *manco* de la mano izquierda en uno de la mano derecha. De hecho, lo hace cambiando el frente por la espalda.

La electrodinámica proporciona una segunda respuesta: un espejo es un dispositivo que conmuta los polos magnéticos norte y sur pero sin conmutar las cargas. ¿Puede confirmarlo con un diagrama?

Desafío 93 s

Pero, ¿se puede distinguir siempre la izquierda de la derecha? Parece fácil: este texto es completamente diferente a una versión ɹɹɹɹɹɹɹɹ de la misma manera que lo son otros muchos objetos de nuestro entorno. Pero tomemos un simple paisaje. ¿Es capaz de decir cual es el original de los dos cuadros de la Figura 48?

Sorprendentemente, es realmente imposible distinguir una pintura original de la Naturaleza de su imagen especular si ésta no contiene alguna traza humana. En otras palabras, la naturaleza cotidiana es de alguna manera simétrica izquierda-derecha. Esta observación es tan común que todas las posibles excepciones han sido estudiadas en

profundidad. Son ejemplos de ello el movimiento de las mandíbulas de las vacas cuando rumian, el crecimiento helicoidal de las plantas, como el lúpulo, la dirección espiral de las conchas de caracol o el giro a la izquierda de los murciélagos al salir de sus cuevas. El ejemplo más famoso es la posición de corazón. El mecanismo por el que adopta esta posición es todavía objeto de investigación. Recientes investigaciones han descubierto que el movimiento orientado de los cilios de los embriones, en la región llamada *nodo*, determina la asimetría derecha-izquierda. Más adelante exploraremos este asunto.

Vol. V, página ??

La mayoría de los cuerpos humanos tiene más músculos en la parte derecha para los diestros, como Albert Einstein y Pablo Picasso, y correspondientemente en la parte izquierda para los zurdos, como Charlie Chaplin y Peter Ustinov. Esta asimetría refleja una asimetría del cerebro humano, llamada lateralización, la cual es fundamental para la naturaleza humana.

Otra asimetría del cuerpo humano es el remolino del cabello en la parte posterior de la cabeza; la mayoría de los humanos tiene solamente uno, y en el 80 % de los casos gira a la izquierda. Pero mucha gente tiene más de uno. ¿Podría nombrar otras asimetrías corporales?

Desafío 94 s

La simetría izquierda-derecha de la Naturaleza aparece porque la naturaleza cotidiana está sometida a la gravitación y, como veremos, al electromagnetismo. Ambas interacciones comparten una importante propiedad: sustituyendo todas sus coordenadas por sus valores opuestos, el resultado de la ecuación permanece invariable. Esto significa que cualquier solución para esas ecuaciones, i.e., para cualquier sistema de origen natural, una imagen especular es una posibilidad que puede ocurrir también de manera natural. La naturaleza cotidiana, por lo tanto, no puede distinguir entre la derecha y la izquierda. En realidad, hay diestros y zurdos, gente con su corazón en la izquierda y otros con sus corazones en el lado derecho, etc.

Para explorar a fondo este extraño aspecto de la Naturaleza, haga el siguiente experimento: imagine que está intercambiando mensajes de radio con un marciano; ¿Podría explicarle lo que es la derecha y la izquierda de tal manera que, cuando se encuentren, usted esté seguro de que están hablando de la misma cosa?

Desafío 95 s

Realmente, la *simetría especular* en la naturaleza cotidiana – también conocida como su *invariancia de paridad* – está tan generalizada que la mayoría de los animales no pueden distinguir la izquierda de la derecha en un sentido más profundo. La mayoría de los animales responden a estímulos especulares con respuestas especulares. Resulta difícil enseñarles distintas formas de reacción, y esto es sólo casi-posible para los mamíferos. Los muchos experimentos llevados a cabo en este área dieron como resultado que los animales poseen un sistema nervioso simétrico, pero, posiblemente sólo los humanos presentan *lateralización*, i.e., una mano preferida y diferentes usos de la parte izquierda y derecha del cerebro.

Ref. 49

Como resumen de este paréntesis señalaremos que, la electrodinámica es simétrica izquierda-derecha, o invariante de paridad. ¿Puede demostrar esto utilizando su Lagrangiano?

Desafío 96 s

¿Por qué los metales proporcionan buenos espejos? Los metales son fuertes y absorben la luz. Cualquier absorbente fuerte tiene brillo metálico. Esto es cierto para los metales, si son suficientemente gruesos, pero también para los cristales coloreados o tintados. Cualquier material que absorba fuertemente una longitud de onda luminosa también la reflejará eficientemente. El motivo de esta fuerte absorción por un metal son los elec-

trones de su interior; los cuales se pueden mover casi libremente y por tanto, absorber la mayoría de las frecuencias de luz visible; esto provoca ondas evanescentes en el material y una fuerte reflexión. La fuerte reflexión aparece tan pronto como la longitud de absorción es tan baja como una longitud de onda. Esta es la razón de que, por ejemplo, el café fuerte, el té fuerte y el vapor fuerte alcalino funcionen como espejos. (No obstante, la reflexión fuerte es también posible sin una absorción fuerte, como muestra el omnipresente dieléctrico multicapa.)

Página 97 He aquí un rompecabezas: un espejo cóncavo muestra una imagen invertida; de la misma manera que lo hace un espejo plano que se curva parcialmente por la horizontal.

Desafío 97 s ¿Qué pasaría si se rotara el espejo alrededor de la línea de visión?

¿CUAL ES LA DIFERENCIA ENTRE CAMPOS ELÉCTRICOS Y CAMPOS MAGNÉTICOS?

Por supuesto, la respuesta estándar es que el campo eléctrico tiene fuentes y el campo magnético, no; como resultado, los campos magnéticos solamente presentan pequeños efectos relativistas de importancia cuando la velocidad de la cargas es alta o cuando se anulan los campos eléctricos.

Vol. V, página ?? Para situaciones donde está involucrada la materia, los campos se pueden distinguir claramente de sus fuentes. Hasta hoy, nunca se ha encontrado ninguna partícula con una carga magnética, conocida por el nombre de *monopolo magnético*, aunque su existencia se considere posible en algunos modelos especulativos de partículas físicas. Si se encontraran, la acción (48) tendría que ser modificada, añadiendo un cuarto término, con el nombre de densidad de corriente magnética. No obstante, a pesar de los intensos esfuerzos realizados en su búsqueda, tales partículas no han sido detectadas aún.

Para el espacio vacío, cuando la materia no está a su alrededor, sería posible adoptar una visión completamente diferente. En el espacio vacío los campos eléctrico y magnético pueden ser vistos como dos formas distintas de una misma cantidad, ya que una transformación del tipo

$$\begin{aligned} E &\rightarrow cB \\ B &\rightarrow -E/c \end{aligned} \quad (58)$$

Desafío 98 s llamada transformación de la *dualidad* (electromagnética), transforma cada ecuación de Maxwell para el vacío, en la otra. El signo menos es necesario para esto. (En realidad, hay aún más de tales transformaciones; ¿puede encontrarlas?) Alternativamente, la transformación de dualidad convierte \mathbf{F} en $*\mathbf{F}$. En otras palabras, en el espacio vacío, *no podemos* distinguir el campo eléctrico del campo magnético. En particular, resulta imposible decir, para una línea de campo en el vacío, si se trata de de una línea de campo magnético o una línea de campo eléctrico.

La materia sería simétrica bajo dualidad, solamente si las cargas magnéticas, llamadas monopolos, existieran. En tal caso, la transformación (58) podría extenderse a

$$c\rho_e \rightarrow \rho_m, \quad \rho_m \rightarrow -c\rho_e. \quad (59)$$

Durante mucho tiempo, se pensó que la dualidad podría ser utilizada en la búsqueda de

Ref. 50 la definitiva teoría unificada de la física. No obstante, esta esperanza se ha evaporado. La razón para este fracaso se remonta a un hecho pequeño pero feo: La dualidad electromagnética cambia el signo del Lagrangiano, y por tanto, de la acción. Por consiguiente, la dualidad electromagnética no es una simetría real de la Naturaleza y, entonces, no sirve de ayuda en la obtención de una comprensión más profunda del electromagnetismo.

Desafío 99 e

La dualidad, por cierto, es una simetría que *solamente* funciona en el espacio-tiempo de Minkowski, i.e., en el espacio-tiempos de $3 + 1$ dimensiones. Matemáticamente, la dualidad está próximamente relacionada con la existencia de los cuaterniones, con la posibilidad de interpretar las dilataciones de Lorentz como rotaciones en $3 + 1$ dimensiones, y finalmente, sin ser menos importante, con la posibilidad de definir otras estructuras matemáticas suaves distintas a la estándar en el espacio R^4 . Estas conexiones matemáticas son misteriosas para el tiempo presente; de alguna manera apuntan al papel especial que el espacio-tiempo de *cuatro* dimensiones juega en la Naturaleza. En el último volumen de nuestra aventura, estos detalles se volverán más aparentes .

¿PODRÍA SER DIFERENTE LA ELECTRODINÁMICA?

Ref. 39 Hemos visto que la electrodinámica se basa en tres ideas: la conservación de la carga, el límite de velocidad para la carga y la relación del cuadrado inverso de Coulomb. ¿Podría cualquiera de ellas ser erróneas o necesitar una modificación?

Los experimentos implican que la única candidata para una modificación es la relación de Coulomb. En realidad, cualquier interacción, tal como la relación de Coulomb (4), que actúa, para un observador determinado, entre dos partículas con independencia de su 3-velocidad, debe depender de la 3-velocidad para otros observadores inerciales.* Tal interacción debe depender también de la 4-velocidad, para asegurar el requerimiento de la relatividad especial de que la 4-aceleración debe ser 4-ortogonal a la 4-velocidad. El caso más simple de tal interacción es el de una interacción en la cual la aceleración es proporcional a la 4-velocidad. Junto al requerimiento de que la interacción deja a la masa en reposo constante, recuperamos entonces la electrodinámica. Otras interacciones no concuerdan con la experimentación.

Ref. 51

De hecho, los requerimientos de simetría gauge y de invariancia relativista también hacen imposible modificar la electrodinámica. En resumen, no parece posible tener un comportamiento diferente a $1/r^2$ para una interacción clásica.

Ref. 52

¿Quizás fuera posible una minúscula desviación de la relación de Coulomb? Una dependencia del cuadrado inverso implicaría una desaparición de la masa de la luz y de las partículas de luz, o sea, de los fotones. ¿Es la masa realmente cero? el tema ha sido estudiado concienzudamente. Un fotón masivo conduciría a una dependencia de la longitud de onda en el vacío, a desviaciones de la 'ley' del cuadrado inverso, a desviaciones de la 'ley' de Ampère, a la existencia de ondas electromagnéticas longitudinales y mucho más. Ninguna evidencia de estos efectos han sido jamás encontrados. Un resumen de estos estudios muestra que la masa del fotón se encuentra por debajo de 10^{-53} kg, o quizás de 10^{-63} kg. Algunos argumentos no han sido universalmente aceptados, por lo que el límite varía de unos investigadores a otros.

* Esto puede ser deducido a partir de la relatividad especial, mediante el razonamiento de [página 58](#) o mediante la fórmula al pie de [página 76](#) en el volumen II.

Una pequeña masa no evanescente para el fotón podría cambiar la electrodinámica de laguna manera. La inclusión de una masa minúscula no plantea especiales problemas, y el Lagrangiano correspondiente, el llamado *Lagrangiano de Proca*, ya ha sido estudiado, por si acaso.

Ref. 52

Estrictamente hablando, no se puede decir que la masa del fotón se desvanezca. En particular, un fotón con una longitud de onda de Compton igual al radio del universo visible, no podría distinguirse, mediante ningún experimento, de uno de masa cero. Esto proporciona una masa límite de 10^{-69} kg para el fotón. Fotones con un valor tan pequeño para su masa no invalidan la electrodinámica tal como la conocemos. Nótese que actualmente, los límites experimentales son todavía mucho mayores. En principio, todavía es posible una sorpresa.

De manera interesante, una masa no-cero para el fotón, podría implicar la falta de monopolos magnéticos, así como podría romperse la simetría entre campos eléctricos y magnéticos. Por lo tanto es importante por una parte, intentar mejorar experimentalmente el límite de la masa para los fotones y por otra parte, explorar si el límite debido al tamaño del universo tiene algunas implicaciones en este tema. La pregunta todavía está abierta.

En resumen, parece extremadamente difícil, si no imposible, encontrar modificaciones a la electrodinámica que vengan respaldados por los experimentos. La electrodinámica es fija de una vez por todas.

EL CEREBRO: EL DESAFÍO MÁS DIFÍCIL PARA LA ELECTRODINÁMICA

Los investigadores que trabajan en la electrodinámica clásica todavía se enfrentan a un tema teórico y experimental fascinante: comprender el proceso del pensamiento. Los investigadores afrontan dos desafíos en este dominio. Primero, deben encontrar maneras para *modelar* el proceso del pensamiento. Segundo, la tecnología para *medir* las corrientes en el cerebro debe ser ampliada. En ambos casos, los progresos recientes han sido espectaculares.

Se ha llevado a cabo una importante investigación sobre los niveles de modelización del pensamiento. Por ejemplo, investigar utilizando tomografías por ordenador, los escaneos PET y las imágenes MRI han mostrado que la distinción entre el *consciente* y la *inconsciencia* puede ser medida: tiene bases biológicas. Los pensamientos conscientes y los inconsciente tiene lugar en diferentes regiones del cerebro. Los procesos psicológicos, tales como la *represión* de pensamientos desagradables, se pueden observar realmente en los escáneres cerebrales. Los modeladores del cerebro han aprendido que algunos conceptos de la psicología son descripciones de procesos físicos reales. Este acercamiento de la investigación está todavía en su infancia, pero resulta muy prometedor.

Sobre aspectos específicos del funcionamiento del cerebro, tales como aprendizaje, almacenamiento, reconocimiento de formas, localización de fuentes de sonido o formación de mapas, la moderna neurobiología y la experimentación animal han permitido elaborar modelos para realizar predicciones cuantitativas. Más adelante se dará más información sobre este asunto.

Página 291

En la parte experimental, la investigación sobre dispositivos de magnetoencefalografía está obteniendo rápidos progresos. El campo magnético producido por las corrientes del cerebro es tan débil como 10 fT, lo que requiere sensores a temperatura de helio lí-

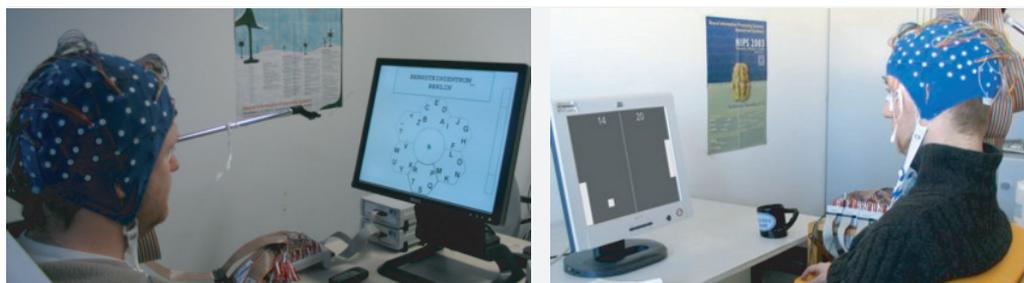


FIGURA 49 Mecanografía de una carta y juego de un partido de vídeo-tenis utilizando solamente el pensamiento (© Fraunhofer FIRST).

quido y un gran aislamiento para el ruido de fondo. La mejora de la sensibilidad y la resolución espacial de estos sistemas constituye una tarea fundamental. De igual manera, en los modelos de ordenador y en los algoritmos se está progresando con rapidez.

La totalidad del programa podría completarse tan pronto como, en un futuro distante, un sensible aparato de medida pudiera detectar lo que está pasando en el interior del cerebro y, de esa manera, deducir o 'leer' los pensamientos de una persona, mediante esas medidas. La lectura del pensamiento podría ser el más complejo de los desafíos a los que la ciencia y la tecnología se enfrentaran. Pero, hablando con claridad, tal hazaña requeriría maquinaria complicada y costosa, así que no hay peligro de un mal uso de la técnica. Existen buenas razones para creer que la lectura completa del pensamiento nunca será posible de esta forma, debido a la falta de localización del pensamiento cognitivo dentro del cerebro y a las posibles variaciones en el proceso cognitivo de una persona a otra. Pero la comprensión y la modelización del cerebro será una tecnología útil en numerosos aspectos de la vida cotidiana, especialmente para los discapacitados.

En el camino hacia la lectura del pensamiento, los pequeños progresos obtenidos hasta ahora, ya resultan fascinantes. Mediante un casco lleno de contactos eléctricos – lo que se conoce como *interfaz cerebro-ordenador* – y con sólo mirar la pantalla del ordenador, es ahora posible la escritura de cartas usando tan sólo la potencia del cerebro. Tal sistema se muestra en la [Figura 49](#). El usuario controla el ordenador con el simple hecho de *imaginar* que mueve el puntero de la pantalla con su mano derecha. Las corrientes creadas en el cerebro por este proceso imaginativo son interpretadas y traducidas a comandos de ordenador por un dispositivo electrónico. El sistema, basado en algoritmos de circuitos neuronales, funciona con sólo 20 minutos de entrenamiento para una persona determinada. De esta manera, el sistema permite que la gente que sufre una parálisis total puedan comunicarse de nuevo con el resto. El sistema es tan rápido que permite jugar 'vídeo-tenis mental' en la pantalla de un ordenador.

Ref. 53

La escritura con sólo el pensamiento es posible gracias a que la región del cerebro responsable de la mano está cerca del cráneo, de tal manera que las señales para la rotación de la mano pueden ser leídas con suficiente resolución espacial por los electrodos del casco. Los investigadores conocen que limitaciones de resolución, no permiten convertir, de esa manera, los movimientos de los dedos en comandos. Para esas tareas de alta resolución, todavía los electrodos necesitan ser *implantados* dentro de la adecuada región cerebral. En cualquier caso, a día de hoy la duración funcional de tales electrodos se limita a unos cuantos meses, de tal manera que el sueño de controlar máquinas o

incluso limbos artificiales de esta forma, es todavía distante.

Ref. 54 Una investigación reciente con una interfaz cerebro–ordenador, sugiere que en un futuro no tan distante, un ordenador podría leer un número secreto, tal como el PIN de una tarjeta de crédito, en el que estuviera pensando una persona. Las siguientes décadas producirán más de esos resultados.

DESAFÍOS Y CURIOSIDADES DIVERTIDAS SOBRE LA ELECTRODINÁMICA

No sólo los animales, sino también las plantas pueden sentir los campos eléctricos y magnéticos. Al menos para los campos magnéticos, los sensores parecen utilizar mecanismos muy similares a los usados por los animales y las bacterias.

* *

Para sistemas de tamaño cotidiano – y mayores –, los motores electromagnéticos son los más efectivos. Para tamaños microscópicos, los motores electrostáticos son los más efectivos. Son los utilizados en los sensores y en los pequeños actuadores. Por el contrario, los sistemas de gran potencia utilizan corriente alterna en lugar de corriente continua.

* *

Desafío 100 s Si calcula el vector de Poynting para un imán cargado – o más sencillo, una carga puntual cerca de un imán – conseguirá un resultado sorprendente: la energía electromagnética fluye en círculos alrededor del imán. ¿Cómo es posible? ¿Dónde nace este momento angular?

Ref. 55 Aún peor, cualquier átomo es un ejemplo de tal sistema – en realidad de dos sistemas. ¿Por qué no son tenidos en cuenta estos efectos en los cálculos de la teoría cuántica?

* *

Desafío 101 s Las ondas electromagnéticas perfectamente esféricas son imposibles en la Naturaleza. ¿Puede demostrarlo utilizando las ecuaciones del electromagnetismo de Maxwell o incluso sin ellas?

* *

Los espejos existen de muchas formas. Un espejo importante para las ondas de radio es la ionosfera: en especial durante la noche, cuando desaparecen ciertas capas absorbentes, la ionosfera permite la recepción de estaciones radiofónicas desde muy lejos. Cuando el tiempo es favorable, es posible recibir ondas de radio emitidas desde las antípodas. Otro espejo de radio es la Luna; mediante modernos receptores es posible recibir señales de radio y, aún desde hace algunos años, señales de televisión reflejadas por la Luna.

* *

Desafío 102 s En el pasado, los libros de texto decían que el vector de Poynting, el flujo de energía electromagnética, no estaba definido de manera exclusiva. Aún Richard Feynman habla sobre este asunto en sus *Lectures on Physics*, en la sección 27-4. ¿Puede usted demostrar que no existe tal ambigüedad en el vector de Poynting, y que esos libros de física están todos equivocados?

* *

Ref. 56 No existen las cargas magnéticas. Con más precisión, no existe ninguna partícula con carga magnética no nula. Pero, no obstante, podemos introducir la cantidad matemática 'carga magnética' – a la que llamamos generalmente '*fortaleza del polo magnético*' – en tanto en cuanto sea requerido que todos los objetos tengan siempre igual cantidad de valor de cargas magnéticas opuestas. Con esta condición, la carga magnética es la divergencia de la magnetización y obedece a la ecuación de magnetización de Poisson, en un sorprendente paralelo al caso eléctrico.

* *

Ref. 57 Un objeto reciente de investigación son las soluciones a las ecuaciones de campo del vacío que tiene líneas de campo *anudadas*. En teoría tales soluciones existen, como demuestran varios autores. No obstante, ninguno ha podido hacer realidad tal solución en un experimento.

* *

Desafío 103 s Cualquier enchufe de pared es un dipolo impulsado por un campo de corriente alterna. ¿Por qué un enchufe, que lleva 230 V o 100 V a 50 Hz o 60 Hz, no emite campos electromagnéticos?

* *

Desafío 104 e ¿Por qué un transformador de voltaje contiene un núcleo ferromagnético?

* *

Desafío 105 s ¿Hay motores electromagnéticos en los sistemas biológicos?

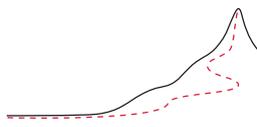
RESUMEN DEL MOVIMIENTO DEL CAMPO ELECTROMAGNÉTICO

Resumiendo, el campo electromagnético transporta energía, momento lineal y momento angular. Por tanto es adecuado decir que el campo electromagnético *se mueve*. El movimiento del campo electromagnético viene descrito por el principio de mínima acción, o equivalentemente, por las ecuaciones de Maxwell.

El movimiento del campo electromagnético puede visualizarse como el movimiento de sus líneas de campo eléctrico y magnético. El movimiento de los campos conservan la energía y la cantidad de movimiento. El movimiento de los campos electromagnéticos es continuo, relativo, reversible y espejo-invariante.

Estos resultados nos llevan directamente a preguntarnos: ¿Cuál es la naturaleza de la luz?





Ref. 58

La naturaleza de la luz ha fascinado a los exploradores de la Naturaleza desde al menos el tiempo de los antiguos griegos. La respuesta apareció en 1848, cuando Gustav Kirchhoff notó que los valores a ambos lados de la siguiente ecuación concordaban con un cierto margen de error de medida:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} . \quad (60)$$

Esta igualdad sugiere la respuesta a la pregunta realizada hacía miles de años:

- ▷ La luz es una onda electromagnética.

Diez años después, en 1858, Bernhard Riemann** probó matemáticamente que cualquier onda electromagnética en el vacío debe propagarse a una velocidad c determinada por la ecuación anterior. Observemos que las cantidades del lado derecho son eléctricas y magnéticas, mientras que la cantidad de la izquierda es óptica. Por tanto la expresión de Kirchhoff y Riemann unifica el electromagnetismo y la óptica. El valor moderno para la velocidad de las ondas electromagnéticas, generalmente llamado c del Latín *celeritas*, es

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s} . \quad (61)$$

Página 381

El valor de c es un número entero, porque el metro hoy día se *define* de tal manera que se obtenga exactamente ese número.

En 1865, Maxwell sintetizó en sus ecuaciones, todos los datos que, sobre electricidad y magnetismo, se habían reunido en los 2500 años anteriores. Casi nadie leyó sus documentos, ya que los escribió utilizando cuaterniones. Posteriormente las ecuaciones fueron simplificadas, de manera independiente, por Heinrich Hertz y Oliver Heaviside. Ambos llegaron al resultado original de Riemann: en el caso del espacio vacío, las ecuaciones de los potenciales electromagnéticos se puede escribir como

$$\square A = 0 \quad \text{o, equivalentemente} \quad \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 A_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2} = 0 . \quad (62)$$

** Bernhard Riemann (b. 1826 Breselenz, d. 1866 Selasca), matemático importante. Un matemático innovador, también estudió el espacio curvo, proporcionando varios de los fundamentos conceptuales y matemáticos de la relatividad general, pero murió a edad temprana.

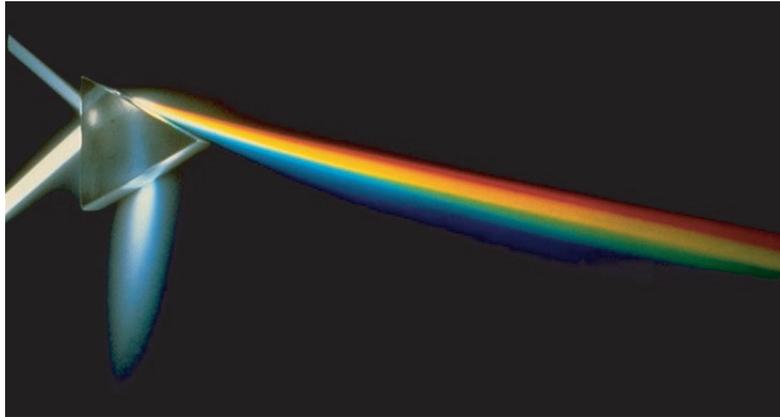


FIGURA 50 Luz blanca viajando a través de un prisma de cristal (fotografía de Susan Schwartzberg, © Exploratorium www.exploratorium.edu).

Desafío 106 e Esta ecuación de evolución es una *ecuación de onda*, porque admite soluciones del tipo

$$A(t, \mathbf{x}) = A_0 \sin(\omega t - \mathbf{k}\mathbf{x} + \delta) = (A_{0x}, A_{0y}, A_{0z}) \sin(2\pi f t - 2\pi \mathbf{x}/\lambda + \delta), \quad (63)$$

Vol. I, página 312

las cuales son normalmente llamadas *ondas electromagnéticas planas* armónicas. Recordemos que una *onda* en física es cualquier propagación del desequilibrio, y que una *onda armónica* viene descrita por una curva sinusoidal.

Tal curva electromagnética plana armónica en el vacío satisface la ecuación (62) para cualquier valor de la *amplitud* A_0 , de *fase* δ , y de *frecuencia angular* ω , siempre que la frecuencia angular y el *vector de onda* \mathbf{k} satisfagan la relación

$$\omega(\mathbf{k}) = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} k \quad \text{o} \quad \omega(\mathbf{k}) = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \sqrt{\mathbf{k}^2}. \quad (64)$$

La relación $\omega(\mathbf{k})$ entre la frecuencia angular y el vector de onda, la llamada *relación de dispersión*, constituye la propiedad principal para cualquier tipo de onda, ya sea una onda sonora, de agua, una onda electromagnética, o de cualquier otra clase.

La relación de dispersión específica (64) es *lineal* e implica una *velocidad de fase* c , la velocidad a la que se mueven las crestas y los valles de una onda, viene dada por $c = \omega/k = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$, coincidiendo por tanto con el resultado de Kirchhoff y Riemann.

Los experimentos en el espacio vacío confirman que la velocidad de fase c es independiente de la frecuencia, la amplitud o la fase de la onda. Esta velocidad de fase constante c es lo que caracteriza a las ondas electromagnéticas, y las distingue de los otros tipos de ondas de la vida cotidiana.

¿QUÉ SON LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS?

Para tener una idea más clara de las ondas electromagnéticas, exploremos sus propiedades. La ecuación de onda (62) para el campo electromagnético es *lineal* en el campo; Esto significa que la suma de dos situaciones permitidas es en sí misma, una situación permitida. Matemáticamente hablando, cualquier *superposición* de dos soluciones es también

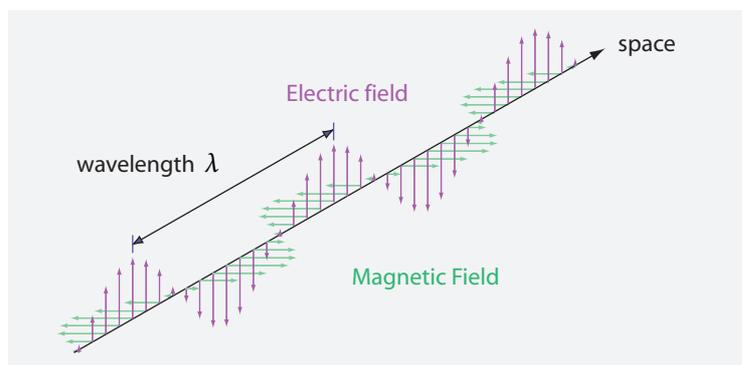


FIGURA 51 La estructura general de una onda electromagnética plana, monocromática y polarizada linealmente en un instante determinado de tiempo.

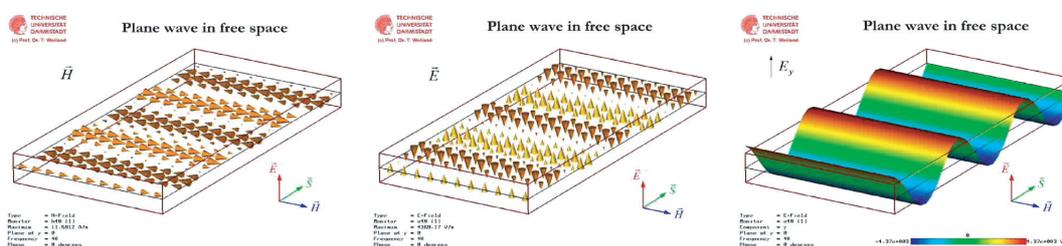


FIGURA 52 Una onda electromagnética monocromática plana y linealmente polarizada, mostrando la evolución del campo eléctrico, el campo magnético, y nuevamente el campo eléctrico, en una visualización adicional (Mpg films © Thomas Weiland).

una solución. Sabemos por tanto que las ondas electromagnéticas deben presentar *interferencias*, como ocurre en todas las ondas lineales.

La linealidad también implica que dos ondas pueden *cruzarse* entre sí sin perturbarse mutuamente, y que las ondas electromagnéticas pueden viajar sin perturbación a través de campos electromagnéticos estáticos.

La linealidad también significa que cualquier onda electromagnética puede ser descrita como una superposición de armónicos, u ondas sinusoidales puras, cada una de las cuales representadas por la expresión (63), con sus propias frecuencias, amplitud y fase. Por lo que tiene sentido hablar el *espectro* de ondas electromagnéticas, es decir, sobre el rango de frecuencias y sus propiedades.

La onda electromagnética más sencilla, la onda armónica plana con *polarización lineal*, se ilustra en la **Figura 51**. Observe que para este tipo de ondas más sencillas, los campos eléctricos y magnéticos están *en fase*. (¿Puede probar esto de manera experimental y mediante cálculo?) Las superficies formadas por todos los puntos de máxima intensidad de campo forman planos paralelos, separados por (la mitad de la) longitud de onda; estos planos se mueven a lo largo de la dirección de propagación con la velocidad de fase.

Página 120



FIGURA 53 Heinrich Hertz (1857–1894).

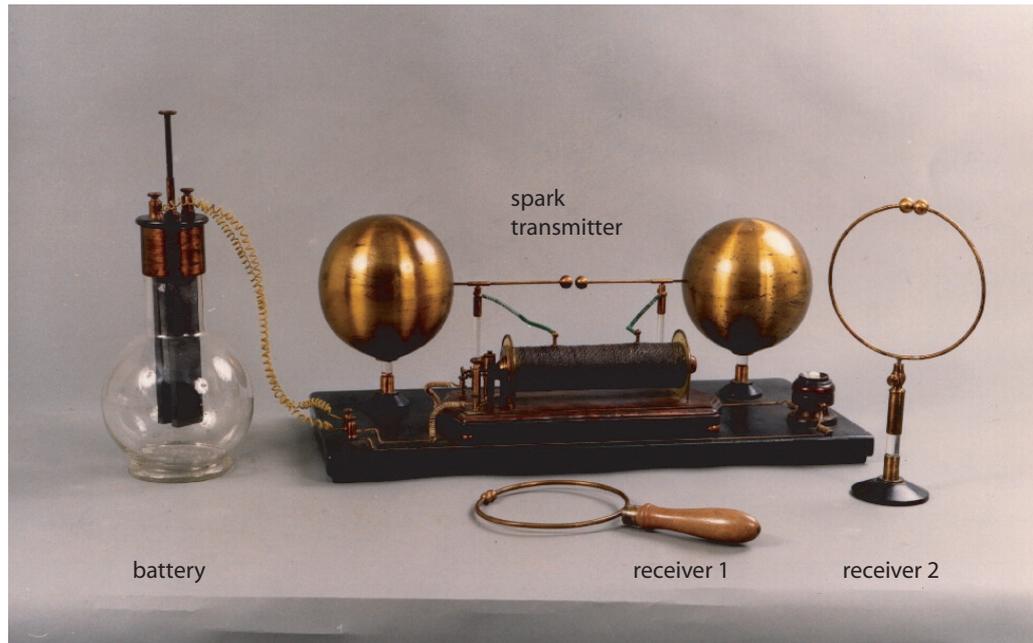


FIGURA 54 Reconstrucción del primer transmisor y receptor de ondas electromagnéticas de Heinrich Hertz (© Fondazione Guglielmo Marconi).

EXPERIMENTOS CON ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Después que Riemann y Maxwell predijeran la existencia de las ondas electromagnéticas, en el período entre los años 1885 y 1889, Heinrich Hertz* las descubrió y las estudió. Fabricó un transmisor y receptor muy sencillo para ondas de 2 GHz, mostrado en la Figura 54. A día de hoy todavía se utilizan tales ondas; los teléfonos sin cables y la última generación de móviles trabajan con esa frecuencia – aunque presenten un aspecto algo distinto en la actualidad. Tales ondas son llamadas ahora *ondas de radio*, ya que los físicos tienden a llamar a todos los campos de fuerza en movimiento *radiación*, reciclando, algo incorrectamente, un término griego que originalmente significaba 'emisión de luz'.

* Heinrich Rudolf Hertz (b. 1857 Hamburg, d. 1894 Bonn), importante físico teórico y experimental. La unidad de frecuencia lleva su nombre. A pesar de su temprana muerte, Hertz fue una figura fundamental para el desarrollo del electromagnetismo, en la explicación de la teoría de Maxwell y en el desarrollo de la tecnología para la comunicación por radio. Más información sobre él en la [página 251](#) del volumen I.

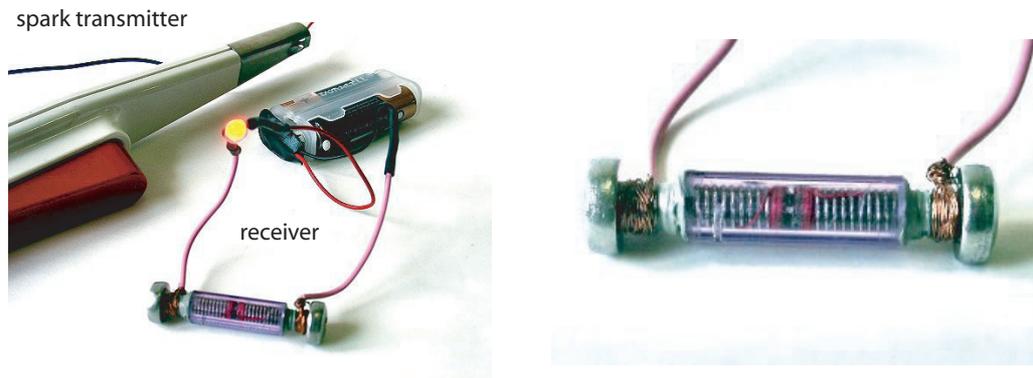


FIGURA 55 El radio transmisor más simple posible, un encendedor de gas y un cable, junto con el radio receptor más simple posible, hecho con un paquete de baterías, un diodo emisor de luz y un sencillo *cohesor* hecho con la carcasa de un bolígrafo, dos tornillos y un poco de polvo de metal. (© Guido Pegna).

Hoy día, los experimentos de Hertz se pueden repetir de forma mucho más sencilla. Como muestra la [Figura 55](#), un presupuesto de unos cuantos euros es suficiente para conmutar de manera remota un diodo emisor de luz con un encendedor de gas. (Tras cada activación, el cohesor debe ser suavemente golpeado, con objeto de tenerlo dispuesto para la siguiente activación.) La unión de largos cable como antena y toma de tierra, permite conseguir distancias de transmisión de hasta 30 m.

Hertz también midió la *velocidad* de las ondas que produjo. De hecho, usted también puede medir la velocidad en su casa, con una barra de chocolate y un (viejo) horno microondas de cocina. Un microondas emite ondas de radio de 2,5 GHz – no lejos de los valores de Hertz. En el interior del horno, estas ondas forman ondas estacionarias. Solamente tiene que colocar la barra de chocolate (o un trozo de queso) en el horno y apagarlo tan pronto como comience a fundir. Notará que la barra se derrite en puntos regularmente espaciados. Estos puntos forman media longitud de onda. A partir del valor de la longitud de onda medida y de la frecuencia, la velocidad de la luz y la de las ondas de radio, simplemente obtenga el producto de los dos.

Si esto no le convence, puede medir la velocidad directamente, con sólo telefonar a un amigo de otro continente, siempre que pueda estar seguro de utilizar una línea por satélite (elija un proveedor que sea barato). Comparado con una conversación normal, habrá alrededor de medio segundo de retraso adicional entre el final de una frase y la respuesta de su amigo. Durante ese medio segundo, la señal sube hasta el satélite geostacionario, baja otra vez y vuelve a hacer el mismo recorrido. Este medio segundo da una velocidad de $c \approx 4 \cdot 36\,000 \text{ km} / 0,5 \text{ s} \approx 3 \cdot 10^5 \text{ km/s}$, lo que se acerca mucho al valor exacto. Los radio-aficionados reflejando sus señales en la Luna pueden llevar a cabo un experimento similar y conseguir una mayor precisión.

En resumen: las ondas electromagnéticas existen y se mueven a la velocidad de la luz.

LA LUZ COMO ONDA

La ecuación de la onda electromagnética no está limitada a las ondas de radio; todavía hay más historias interesantes que contar. Sobre todo, la ecuación de onda confirmó las

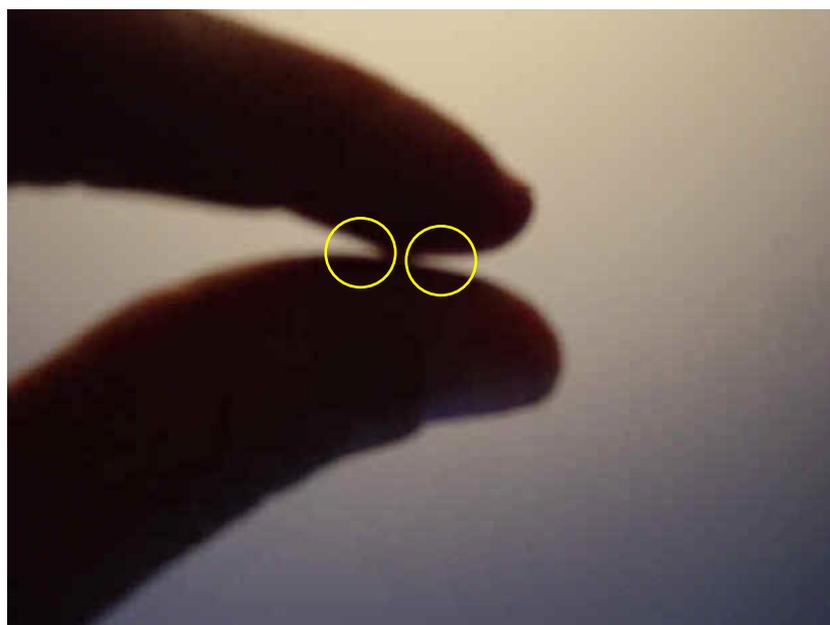


FIGURA 56 Se pueden observar las líneas de difracción entre los dedos si se mira con suficiente cuidado. (© Chuck Bueter)

predicciones anteriores de que la *luz* en sí misma es una onda electromagnética, aunque con una frecuencia mucho más alta que las ondas de radio. Esto se puede comprobar en dos pasos: Primero demostraremos que la luz es una onda y luego demostraremos que es electromagnética.

El primero en sugerir que la luz era una (clase de) *onda* fue, hacia el año 1678, el importante físico Christiaan Huygens.* Usted puede confirmar que la luz es una onda con sus propios dedos. Simplemente coloque su mano uno o dos centímetros en frente de uno de sus ojos, mire al cielo a través del hueco entre los dedos pulgar e índice que deberán estar casi tocándose. Observará un número de líneas oscuras cruzando el hueco. Estas líneas son los patrones de interferencia formados por la luz detrás de la ranura creada por los dedos. La **Figura 56** muestra un ejemplo. *Interferencia* es el nombre que recibe este efecto y los patrones de amplitud que aparecen cuando se superponen varias ondas.** Los patrones de interferencia dependen del espacio entre los dedos. Por tanto este experimento le permitirá estimar la longitud de onda de la luz y, en consecuencia, si conoce su velocidad, su frecuencia. ¿Puede hacerlo?

Desafío 108 s

Históricamente, otro efecto resultó fundamental para convencer a los investigadores que la luz era una onda: los arcoíris adicionales, los arcos adicionales debajo del arcoíris principal o primario. Si observamos con cuidado un arcoíris, bajo el arco principal

* Christiaan Huygens (b. 1629 's Gravenhage, d. 1695 Hofwyck) fue uno de los grandes físicos y matemáticos de su tiempo. Huygens clarificó los conceptos de la mecánica; también fue uno de los primeros en demostrar que la luz era una onda. Escribió libros influyentes sobre las probabilidades, el mecanismo de los relojes, óptica y astronomía. Entre otros logros, Huygens demostró que la Nebulosa de Orión estaba formada por estrellas, descubrió Titán, la luna de Saturno, y demostró que los anillos de Saturno estaban formados por rocas. (Esto contrasta con Saturno mismo, cuya densidad es más baja que la del agua.)

Desafío 107 s

** ¿Dónde va la energía en un patrón de interferencia?



FIGURA 57 Arcoíris primario y secundario, y el arco adicional bajo el primer arco (© Antonio Martos y Wolfgang Hinz).

rojo–amarillo–verde–azul–violeta, se observan más débilmente arcos adicionales verde, azul y violeta. Se podrán observar varios de estos arcoíris adicionales, dependiendo de la intensidad del arcoíris principal. Los adicionales se deben a las interferencias de luz producidas por las gotas de agua, como demostró Thomas Young en 1803.* En realidad, la distancia de repetición de los arcos adicionales dependen del radio y de la distribución de la forma del promedio de las gotas de agua que lo forman. (Más adelante se darán más detalles sobre los arcoíris normales.) Ambos, los arcoíris adicionales y Thomas Young fueron fundamentales para convencer a la gente de que la luz es una onda. Parece que en esa época los científicos no confiaban en sus propios ojos y dedos, o no tenían ninguno de los dos.

Ref. 59

Página 140

Ref. 60

Página 134

Hay otras muchas maneras de poner de manifiesto el carácter de onda de la luz. Quizás la más bella es la que realizó un equipo de físicos holandeses en 1990. Simplemente midieron la luz transmitida a través de una *ranura* en una placa de metal. Resultó que la intensidad transmitida dependía de la anchura de la ranura. El sorprendente resultado se muestra en la **Figura 58**. ¿Podría explicar el origen de los inesperados niveles de intensidad en la curva?

Ref. 61

Desafío 109 ny

La interferencia de la luz es un efecto corriente. Se observa fácilmente cuando se usan láseres. En la **Figura 59** se muestran unos cuantos ejemplos. Tanto la interferencia de la luz blanca como la del láser son utilizadas para medir; actualmente, toda una industria completa hace uso de los efectos de las interferencias.

Dado un patrón de interferencia como el verde de la **Figura 59**, quizá quiera calcular la distancia entre las líneas, conociendo la distancia a la rendija s , el color y la distancia

* Thomas Young (b. 1773 Milverton, d. 1829 London), leía la biblia a los dos años y hablaba en latín a los cuatro; doctor en medicina, llegó a ser profesor de física. Dió a conocer el concepto de *interferencia* en la óptica, explicando los anillos Newtonianos y los arcoíris adicionales; fue la primera persona que determinó la *longitud de onda* de la luz, concepto que también presentó, así como su dependencia del color. Fue el primero en explicar la visión tri-color del ojo y, tras la lectura del descubrimiento de la polarización, explicó el comportamiento de la luz como una onda transversal. En resumen, Young descubrió lo que la mayoría de la gente aprende sobre la luz en la escuela secundaria. Fue un talento universal: también trabajó sobre el descifrado de geroglíficos, estudió idiomas y acuñó el término 'indo-europeo', exploró la construcción naval y muchos problemas de ingeniería. Young colaboró con Fraunhofer y Fresnel. En Inglaterra sus ideas sobre la luz no fueron aceptadas, ya que los seguidores de Newton rechazaban todos los puntos de vista opuestos. Hacia el final de su vida, sus resultados fueron finalmente dados a conocer a la comunidad de físicos por Fresnel y Helmholtz.

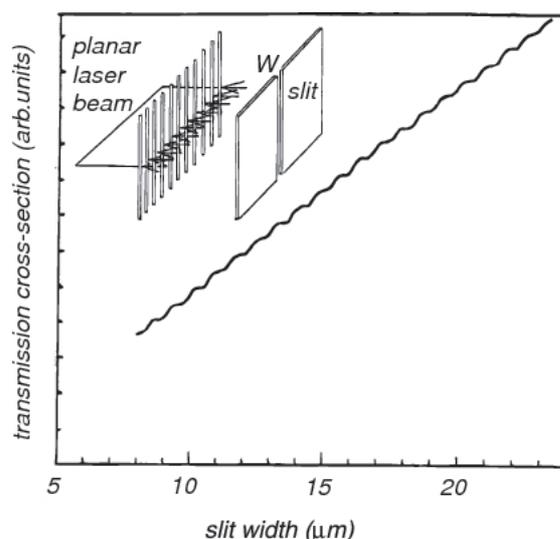


FIGURA 58 La potencia de luz transmitida a través de una rendija en función de su anchura (© Nature).

Desafío 110 s

d a la pantalla. (Este experimento se utilizó para determinar por primera vez la longitud de onda de la luz.)

Desafío 111 s

Otra prueba de que la luz es una onda fue el descubrimiento de la polarización de la luz. Lo exploraremos en breve. En el período entre los siglos XVII al XX se han llevado a cabo muchos más experimentos sobre la creación, detección y medida de las ondas de luz. Por ejemplo, en 1800, William Herschel descubrió la *luz infrarroja* usando un prisma y un termómetro. (¿Puede adivinar cómo?) En 1801, Johann Wilhelm Ritter (b. 1776 Samitz, d. 1810 Munich) una más que colorida figura del Romanticismo natural, descubrió la *luz ultravioleta* utilizando cloruro de plata, AgCl , y nuevamente un prisma. Las cámaras modernas pueden tomar imágenes con luz infrarroja, tal como muestra la bonita Figura 60.

Ref. 62

A finales del siglo XX se hizo posible una bonita confirmación de las oscilaciones de las ondas de luz. Mediante experimentos bastante sofisticados, los investigadores midieron *directamente* la frecuencia de oscilación de la luz visible. ¡Realmente consiguieron contar cuantas veces oscilaba en un segundo la onda de luz! El valor de la frecuencia, entre 375 y 750 THz, es exactamente lo que habían predicho. La frecuencia era tan alta que su detección fue imposible durante mucho tiempo. Pero con estos modernos experimentos la relación de dispersión de la luz, $\omega = ck$, ha sido confirmada en todos sus detalles, y hasta extremos de una alta precisión.

Ref. 63

Página 116

El resultado de todos estos experimentos es: las ondas de luz, como el resto de las ondas, se pueden diferenciar por sus longitudes de ondas y los valores de sus frecuencias. Las categorías más importantes se encuentran en la Tabla 14. Para la luz visible, la longitud de onda se mueve entre $0,4 \mu\text{m}$, correspondiente al violeta y $0,8 \mu\text{m}$, que corresponde al rojo. La longitud de onda de una onda armónica de luz visible condiciona su *color*.

La luz es una onda. Con esta afirmación también se finaliza una discusión que produjo un intenso debate durante la Edad Media: ¿Cuán estrecho puede ser un rayo de luz? Un rayo de luz *no puede* ser arbitrariamente estrecho. Las propiedades de la onda de luz implican que cualquier intento de producir un rayo de luz extremadamente estrecho,

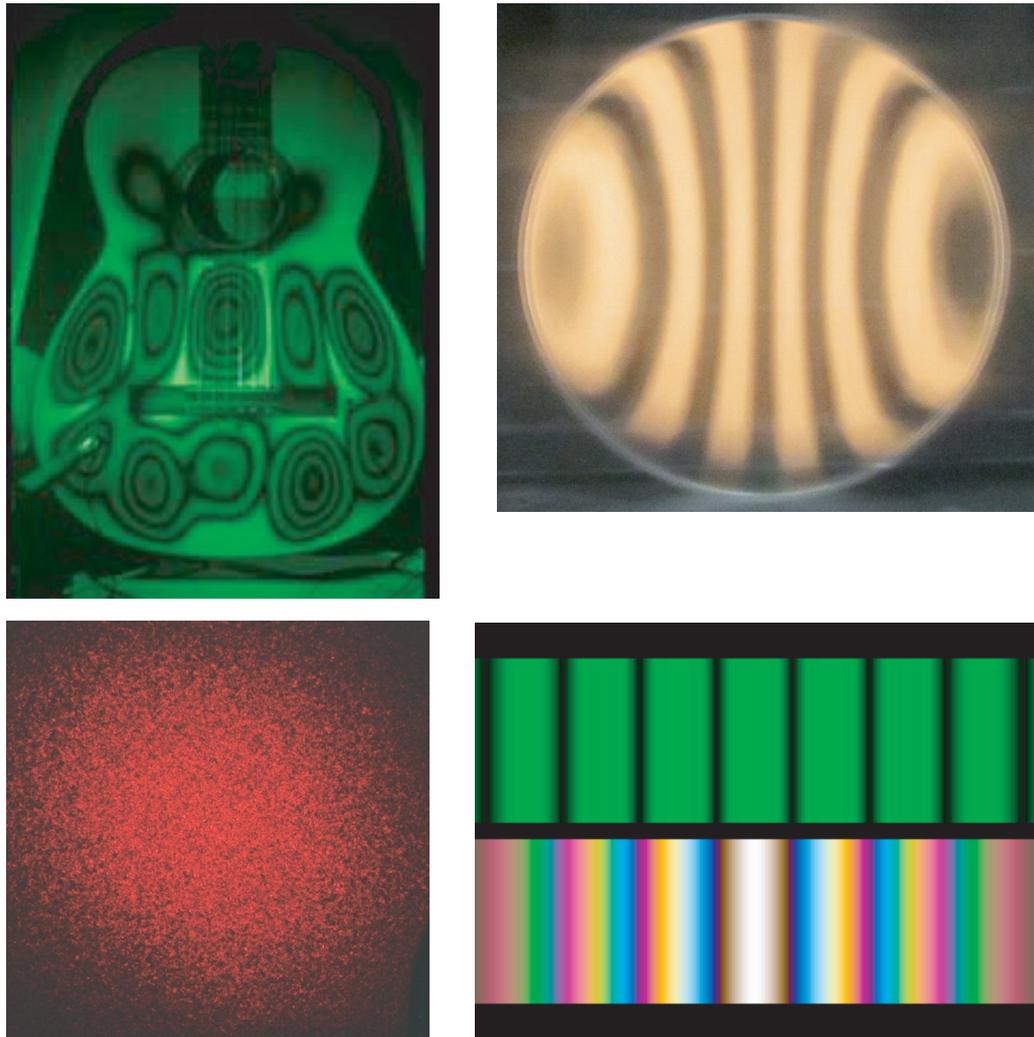


FIGURA 59 Algunos patrones de interferencia: La interferencia, en holografía láser, que produce una guitarra sonando, muestra cómo vibra el cuerpo de la misma; la interferencia producida por un buen espejo de telescopio parabólico de 27 cm diámetro; un patrón láser moteado en una superficie rugosa y el patrón de difracción producido por dos rendijas estrechas paralelas iluminadas con luz verde y con luz blanca respectivamente (© Bernard Richardson, Cardiff University, Mel Bartels, Epzcaw y Dietrich Zawischa).

digamos que mediante una luz brillante a través de un minúsculo agujero en una pared, produciría un rayo fuertemente divergente. Además un rayo de luz no puede presentar un borde afilado. Además cualquier intento de concentrar luz de una única longitud de onda en un punto minúsculo tiene sus límites, como muestra la [Figura 61](#): con un factor de orden 1, el producto de dos cantidades transversas wd es igual a las dos cantidades longitudinales λf . Resumiendo,

- ▷ Los rayos de luz no pueden ser líneas arbitrariamente estrechas.

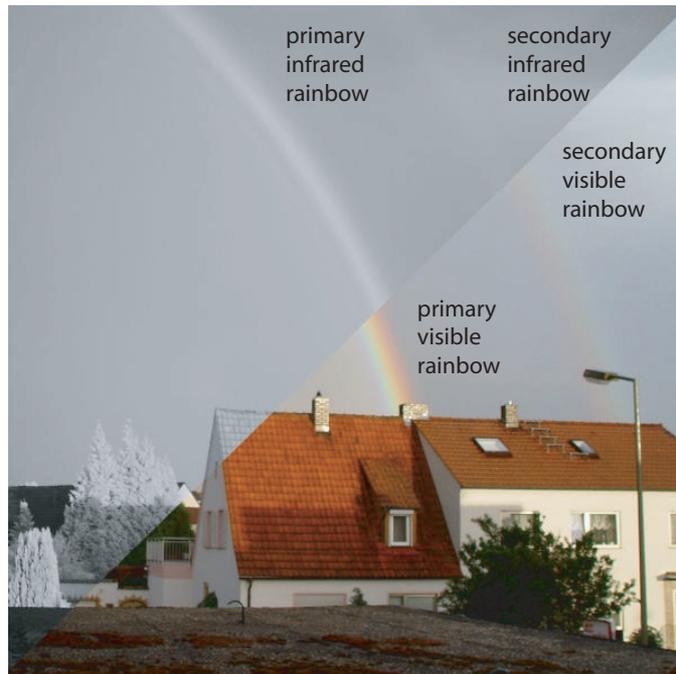


FIGURA 60 El mismo arcoíris con luz visible y con infrarrojos, mostrando cómo el infrarrojo se produce antes que el rojo (© Stefan Zeiger).

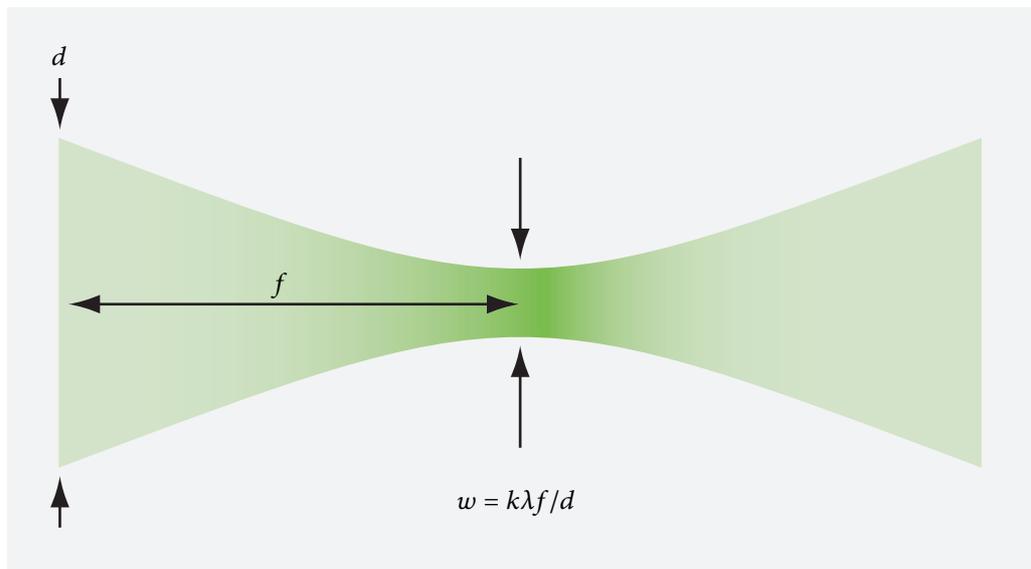


FIGURA 61 El foco de un rayo de luz convergente tiene un tamaño mínimo, el radio de la cintura w , viene dado por la longitud de onda y la geometría. el radio de su parte más estrecha también depende de un número k , de orden 1, el cual describe cómo cambia la intensidad transversalmente al rayo. Obsérvese que la transición entre el rayo verde y el fondo nunca es brusca, en contraposición con el dibujo.

El diámetro de un rayo de luz viene determinado y está limitado por la longitud de onda

y la distribución geométrica que lo produce.

LA LUZ Y OTRAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Página 108 Los experimentos mostrados hasta ahora demuestran que las ondas electromagnéticas existen, que se mueven a la misma velocidad de la luz, y que la luz es una onda. Confirmar que las ondas de luz son verdaderamente *electromagnéticas* resulta más difícil. La prueba más convincente consistiría en repetir los experimentos de Hertz para la luz. En el experimento de Hertz mostrado en la [Figura 54](#), el receptor es un simple círculo de metal abierto; cuando la onda – de manera más precisa, su campo magnético – llega, se genera una chispa y por tanto, se detecta la onda.

Ref. 64 En una hazaña increíble de miniaturización, en 2009, el grupo de investigación de Kobus Kuipers consiguió hacer anillos de metal de tamaño menor que un micrómetro, y repetir el experimento de Hertz para la luz. Una impresión de su experimento se muestra en la [Figura 62](#). Ellos pudieron distinguir claramente los máximos y los mínimos de las ondas, así como sus polarizaciones. Por tanto demostraron que la luz es una onda electromagnética exactamente de la misma manera que lo hizo Hertz para las ondas de radio.

Desafío 112 e Por supuesto, la gente en el siglo XIX tenía menos tecnología a su disposición y no se la convencía fácilmente. Se debían buscar otras formas de demostrar que la luz era electromagnética por naturaleza. Ahora, puesto que las ecuaciones de evolución del campo electrodinámico son lineales, los campos eléctricos o magnéticos adicionales por sí solos, no influyen en el movimiento de la luz. Por otro lado, sabemos que las ondas electromagnéticas son emitidas solamente por cargas aceleradas, y también, que toda la luz es emitida por la materia. Por consiguiente, la materia está llena de campos electromagnéticos y de cargas eléctricas aceleradas. Esto a su vez implica que la influencia de la materia en la luz puede entenderse desde sus campos electromagnéticos internos y, en particular, que sometiendo la materia a un campo electromagnético *externo* debería cambiar la luz que emite, la manera en la que la materia interactúa con la luz, o en general, las propiedades materiales como un todo.

Página 94 La investigación de los efectos que la electricidad y el magnetismo producen sobre la materia, ha sido el principal esfuerzo de los físicos durante un centenar de años. Por ejemplo, los campos eléctricos influyen en la transmisión de la luz en el petróleo, un efecto descubierto por John Kerr in 1875.* También el descubrimiento de que ciertos gases cambian de color cuando están sometidos a un campo, ha proporcionado varios Premios Nobel de Física. Con el tiempo, fueron encontrados muchas más propiedades relacionadas con la luz mediante el sometimiento a ciertos campo de la materia. Algo más adelante presentaremos una lista extensiva [página 248](#). Sucede que, aparte de unas pocas excepciones, *todos* los efectos se pueden describir mediante el Lagrangiano electromagnético (48), o equivalentemente, por las ecuaciones de Maxwell (52). En resumen, la electrodinámica clásica unifica verdaderamente la descripción de la electricidad, el magnetismo y la óptica; todos los fenómenos en esos campos, desde el arcoíris a la radio y desde el rayo a los motores eléctricos, han resultado ser diferentes aspectos de la evolución del campo electromagnético.

* John Kerr (b. 1824 Ardrrossan, d. 1907 Glasgow), fue matemático y físico, así como amigo y colaborador de William Thomson.

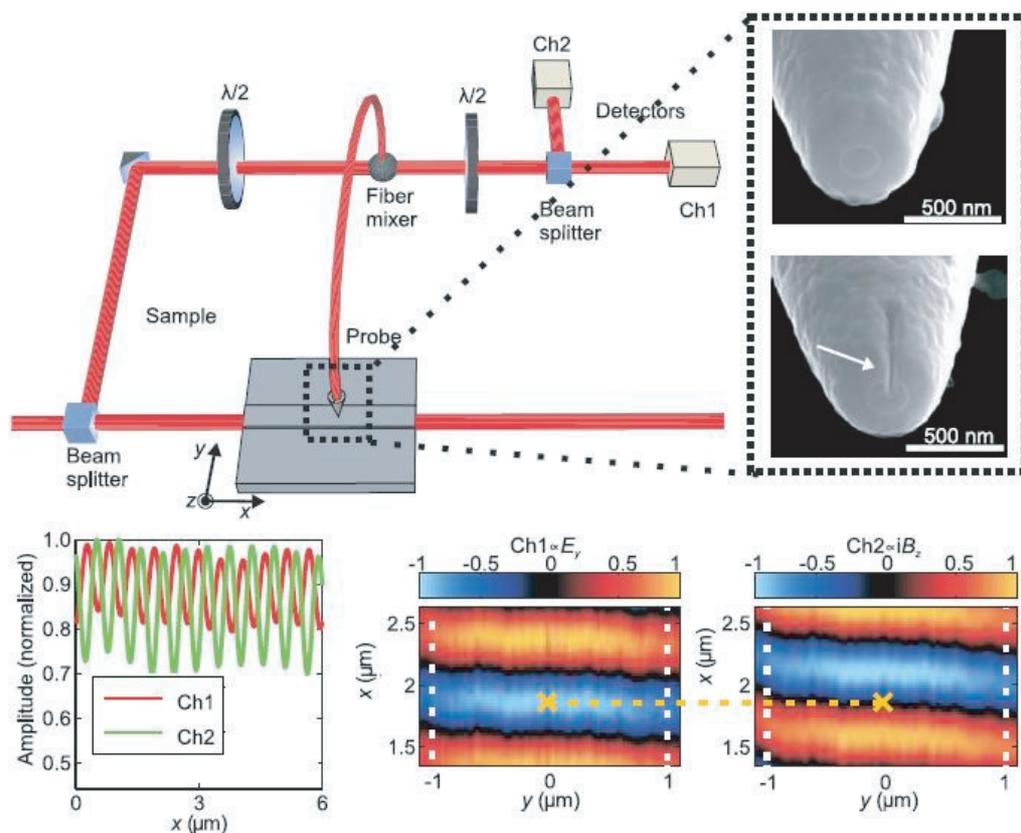


FIGURA 62 Experimento que mide los campos eléctrico y magnético de la luz. Arriba a la izquierda: el planteamiento general; arriba a la derecha: la antena, indicada por una flecha; abajo: los datos de la medición (© Kobus Kuipers).

Tras dos siglos de investigación, parece claro que la luz y las ondas de radio constituyen solamente una pequeña sección del completo *espectro de las ondas electromagnéticas*, que abarca desde las ondas más pequeñas posibles hasta las de mayores longitudes de onda. El espectro completo se muestra en la siguiente Tabla.

TABLA 14 El espectro electromagnético.

FRECUENCIA	LONGITUD DE ONDA	NOMBRES	PRINCIPALES PROPIEDADES	APARIENCIA	USO
$3 \cdot 10^{-18}$ Hz	10^{26} m	Límite inferior de frecuencia	consultar	sección sobre cosmología	
< 10 Hz	> 30 Mm	Campos cuasiestáticos		campos intergaláctico, galáctico, estelar y planetario, cerebro, peces eléctricos	transmisión de potencia, radiación cósmica acelerada y desviada

FRECUENCIA	LONGITUD DE ONDA	NOMBRES	PRINCIPALES PROPIEDADES	APARIENCIA	USO
Ondas de radio					
10 Hz–50 kHz	30 Mm–6 km	ELW	viajan alrededor del globo, penetran el agua, penetran los metales	dispositivos electrónicos células nerviosas, dispositivos electromecánicos	transmisión de potencia, comunicación a través de muros metálicos, comunicación con los submarinos www.vlf.it
50 – 500 kHz	6 km–0,6 km	LW	siguen la curvatura de la Tierra, los nervios las sienten ('nervios de mal tiempo')	son emitidas por las tormentas	comunicaciones de radio, telegrafía, calentamiento inductivo
500 – 1500 kHz	600 m–200 m	MW	reflejadas por el cielo nocturno		radio
1,5 – 30 MHz	200 m–10 m	SW	circundan el mundo si se reflejan en la ionosfera, destruyen los globos de aire caliente	emitidas por las estrellas	transmisiones de radio, radio aficionados, espionaje
15 – 150 MHz	20 m–2 m	VHF	transmisores operados por baterías	emitidas por Júpiter	controles remotos, circuitos cerrados, tv, radio aficionados, navegación por radio, militar, policía, taxi
150 – 1500 MHz	2 m–0,2 m	UHF	<i>ídem</i> , propagación de línea de visión		radio, walkie-talkies, tv, teléfonos móviles, Internet vía cable, comunicación or satélite, medidores de velocidad de bicicletas
Microondas					
1,5 – 15 GHz	20 cm–2 cm	SHF	<i>ídem</i> , absorbidas por el agua	cielo nocturno, emitidas por los átomos de hidrógeno	radio astronomía, usadas para cocinar (2,45 GHz), telecomunicaciones, radar

FRECUENCIA	LONGITUD DE ONDA	NOMBRE	PRINCIPALES PROPIEDADES	APARIENCIA	USO
15 – 150 GHz	20 mm– 2 mm	EHF Infrarrojos	<i>idem</i> , absorbidas por el agua permiten la visión nocturna	emitidos por todos los objetos calientes	fotografía por satélite de la Tierra, astronomía
0,3 – 100 THz	1000 – 3 μm	IRC o infrarrojo lejano		luz solar, seres vivos	visión a través de los tejidos, sobres y dientes
100 – 210 THz	3 μm– 1,4 μm	IRB o infrarrojo medio		luz solar	utilizados para comunicaciones por fibra óptica para telefonía y televisión por cable
210 – 384 THz	1400– 780 nm	IRA o casi infrarrojo	penetra varios cm la piel humana	luz solar, radiación de cuerpos calientes	curación de heridas, reumatismo, fisioterapia en deportes, iluminación oculta
375 – 750 THz	800– 400 nm	Luz	(poco) absorbida por el aire, detectada por el ojo (hasta más de 900 nm a suficiente potencia)	calor ('luz caliente'), láseres & reacciones químicas e.g. oxidación del fósforo, luciérnagas ('luz fría')	definición de linealidad, mejorar la fotosíntesis en agricultura, terapia fotodinámica, tratamiento de la hiperbilirrubinemia
384 – 484 THz	780– 620 nm	Rojo	penetra la carne	sangre	señal de alarma, utilizada para mamografías Ref. 65
	700 nm	Laboratorio rojo primario		lámparas de tungsteno filtrado	referencias de color para la impresión, pintura, iluminación y pantallas
484 – 511 THz	620– 587 nm	Naranja		varias frutas	atrae a los pájaros y a los insectos
511 – 525 THz	587– 571 nm	Amarillo		Mayoría de la flores	<i>idem</i> ; el mejor fondo para resaltar texto en negro
525 – 614 THz	571–488 nm	Verde	sensibilidad máxima del ojo	algas y plantas	respuesta de mayor eficiencia luminosa ('se siente el brillo') por energía lumínica para el ojo humano

FRECUENCIA	LONGITUD DE ONDA	NOMBRES	PRINCIPALES PROPIEDADES	APARIENCIA	USO
	546,1 nm	Laboratorio verde primario		lámpara de mercurio	referencia de color
614 – 692 THz	488– 433 nm	Azul		cielo, gemas, agua	
	435,8 nm	Laboratorio azul primario		lámpara de mercurio	referencia de color
692 – 789 THz	433– 380 nm	Indigo, violeta		flores, gemas	
Ultravioleta					
789 – 952 THz	380– 315 nm	UVA	penetra 1 mm en la piel, la oscurece, produce vitamina D, suprime el sistema inmunitario, produce cáncer de piel, destruye las lentes oculares	emitidas por el Sol, estrellas, láseres y llamas	varias aves puede verlos, fabricación de circuitos integrados.
0,95 – 1,07 PHz	315–280 nm	UVB	<i>idem</i> , destruyen el ADN, producen cáncer de piel	<i>idem</i>	<i>idem</i>
1,07 – 3,0 PHz	280– 100 nm	UVC, VUV	forman radicales de oxígeno a partir del aire, eliminan bacterias, penetran 10 µm en la piel	emitidas por el Sol, estrellas, láseres y arcos de soldadura	desinfección, purificación de agua, depósitos de basura, fabricación de circuitos integrados
3 –24 PHz	100–13 nm	EUV			mapas estelares, litografía de silicio
		X-rays	penetra los materiales	emitidas por las estrellas, plasmas y agujeros negros	imágenes de tejido humano
24 – 240 PHz	13–1,3 nm	Rayos-X suaves	<i>idem</i>	radiación sicrotrónica	<i>idem</i>
> 240 PHz or > 1 keV	< 1,2 nm	Rayos-X fuertes	<i>idem</i>	emitidos cuando los electrones rápidos golpean la materia	crystalografía, determinación de la estructura



FIGURA 63 Antenas para ondas electromagnéticas polarizadas horizontal y verticalmente (© Martin Abegglen, K. Krallis).

FRE - CUEN - CIA	LONGITUD DE ONDA	NOM - BRE	PRINCIPALES PROPIEDADES	APARIENCIA	USO
> 12 EHz or > 50 keV	< 24 pm	rayos- γ	<i>ídem</i>	radiactividad, rayos cósmicos	análisis químico, desinfección, astronomía
$2 \cdot 10^{43}$ Hz	$\approx 10^{-35}$ m	límite de Planck		consultar el último volumen de esta serie	

POLARIZACIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

El campo eléctrico de la luz o el de una onda electromagnética se asemeja a la amplitud de una onda de agua, generalizada a tres dimensiones, como se muestra en la [Figura 51](#) y la [Figura 52](#). Lo mismo es válido para los campos magnéticos, siendo los dos campos perpendiculares entre sí.

Aflora una pregunta sobre la luz y el resto de ondas electromagnéticas: ¿En qué dirección espacial ocurren las oscilaciones? La respuesta se oculta en el parámetro A_0 de la expresión (63), pero se muestra en la [Figura 51](#) y la [Figura 52](#). Hablando en general, los campos de las ondas electromagnéticas oscilan en direcciones *perpendiculares* a su movimientos. Por tanto, se desprende que:

- ▷ Aún para idéntica frecuencia y fase, las ondas pueden todavía diferir entre ellas: pueden tener diferentes direcciones de *polarización*.

Por ejemplo, la polarización de los transmisores de radio determina si las antenas deben colocarse de manera horizontal o vertical, como muestra la [Figura 63](#). Para todas las ondas electromagnéticas, la polarización está definida, por convención, por la orientación del vector de campo *eléctrico*, ya que prácticamente todos los efectos de las ondas electromagnéticas son debidos al campo eléctrico.

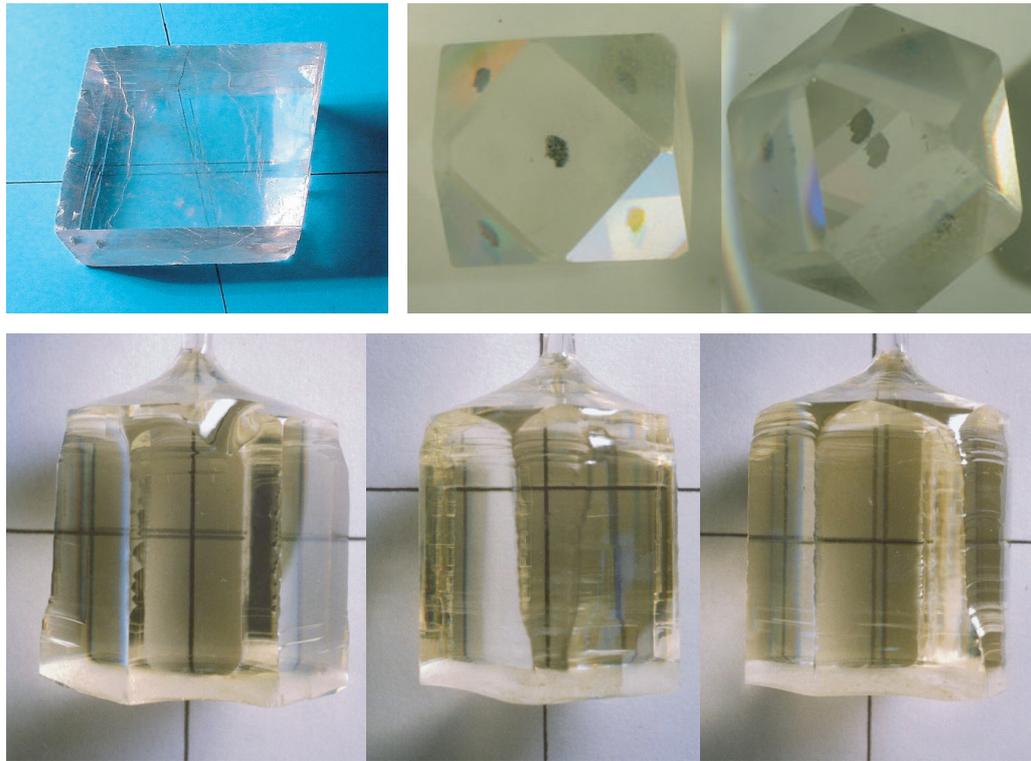


FIGURA 64 Birrefringencia en cristales: *calcita* sobre líneas que se cruzan (arriba a la izquierda, cristal de unos 4 cm), *rutilo* sobre una mancha de tinta, fotografiado a lo largo del eje óptico (medio) y haciendo un ángulo con él (arriba a la derecha, cristal de aproximadamente 1 cm), y un cristal octogonal de vanadato de sodio dopado con manganeso, mostrando *tres* comportamientos diferentes (abajo, cristal de 1.9 cm de diámetro) (© Roger Weller/Cochise College, Brad Amos, Martin Pietralla).

La polarización se consigue fácilmente también para la luz, p.ej., haciéndola brillar a través de una película estirada de plástico, llamada polarizador, o usando un cristal, agua o algunas piedras especiales. La polarización fue descubierta en 1808 por Louis Malus (b. 1775 Paris, d. 1812 Paris). Malus descubrió la polarización cuando observaba las extrañas dobles imágenes producidas en la calcita, un cristal transparente que se encuentra en muchos minerales. La **Figura 64** muestra algunos ejemplos. La Calcita (CaCO_3) divide los rayos de luz en dos – es *birrefringente* – y los polariza de diferente manera. Esta es la razón de que la calcita – o el feldespato, (KAlSi_3O_8), que muestran el mismo efecto – formen parte de todas las colecciones de cristales. Si en alguna ocasión consigue un trozo de calcita o feldespato transparente, mire a través de él a algo escrito en un papel, y rote el cristal sobre la vertical. Sus propiedades son intrigantes. (¿Puede demostrar que la *trirrefringencia*, si ésta se define como la apariencia de tres imágenes, no existe?)

Cuando Malus descubrió la polarización de la luz, no sabía todavía que la luz era electromagnética. Pero su descubrimiento estableció definitivamente la naturaleza de la luz.

La luz del cielo – no la del Sol – está parcialmente polarizada. La polarización ocurre cuando la luz es dispersada por las moléculas del aire. La polarización es perpendicular

Desafío 113 e

Desafío 114 d

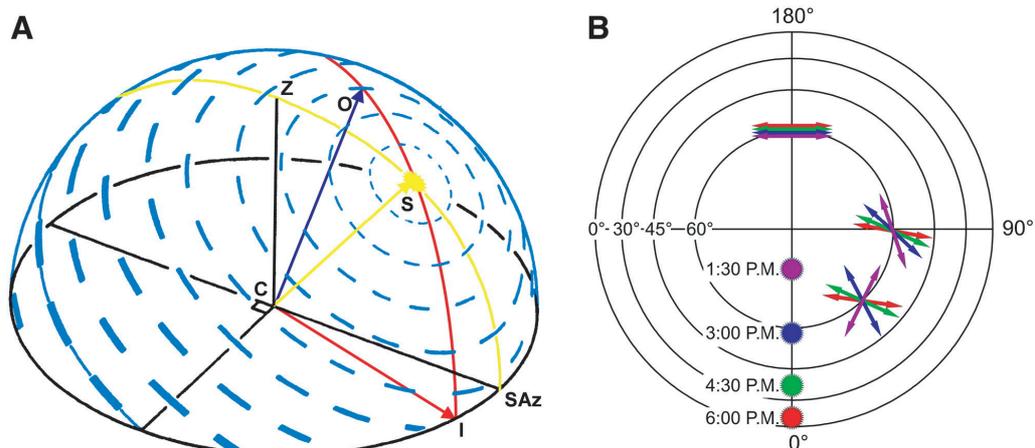


FIGURA 65 Izquierda: la polarización de la luz del día en un cielo claro como el de una elevación solar de 53°. La orientación y el grosor de las barras azules ilustran la orientación y el grado de polarización del campo eléctrico tal como lo vería un observador en el centro C de una esfera. La orientación sería siempre perpendicular a un gran círculo (rojo) que se forma conectando un punto dado de observación en el cielo O con la posición del Sol S. SAz indica el acimut solar del Sol. Derecha: la proyección cenital de la elevación solar y la orientación del campo eléctrico para diferentes colores a cuatro horas distintas del 1 de Agosto, en 23.4° N, 5.2° E. Los círculos representan la elevación y las líneas rectas representan el acimut. El patrón de polarización circular del cielo es usado por los fotógrafos para modificar las fotografías del cielo y por los insectos y los pájaros para navegar. (© Keram Pfeiffer/Elsevier).

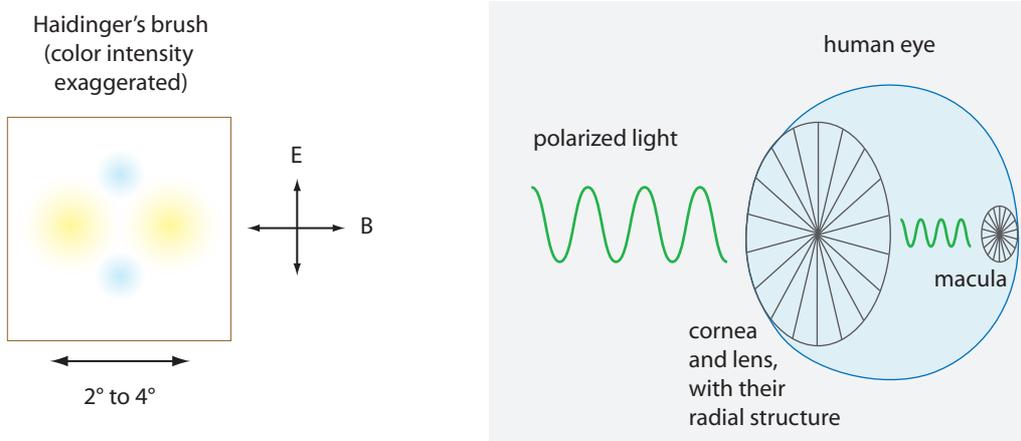


FIGURA 66 Cepillo de Haidinger y su origen en el ojo humano.

Ref. 66 a la dirección hacia el Sol, como se ilustra en la **Figura 65**. La forma es fácil de recordar con la siguiente conexión: *Un arcoíris es polarizado en cualquier sitio en dirección tangencial*. Los fotógrafos saben que cuando el Sol está en ascenso o descenso, el cielo está principalmente polarizado en dirección norte-sur. Este hecho puede hacer que un lago o un reloj digital parezca negro cuando se observa por la tarde en dirección norte o sur – para ciertos ángulos de observación. También la luz solar bajo el agua se encuentra parcialmente polarizada.

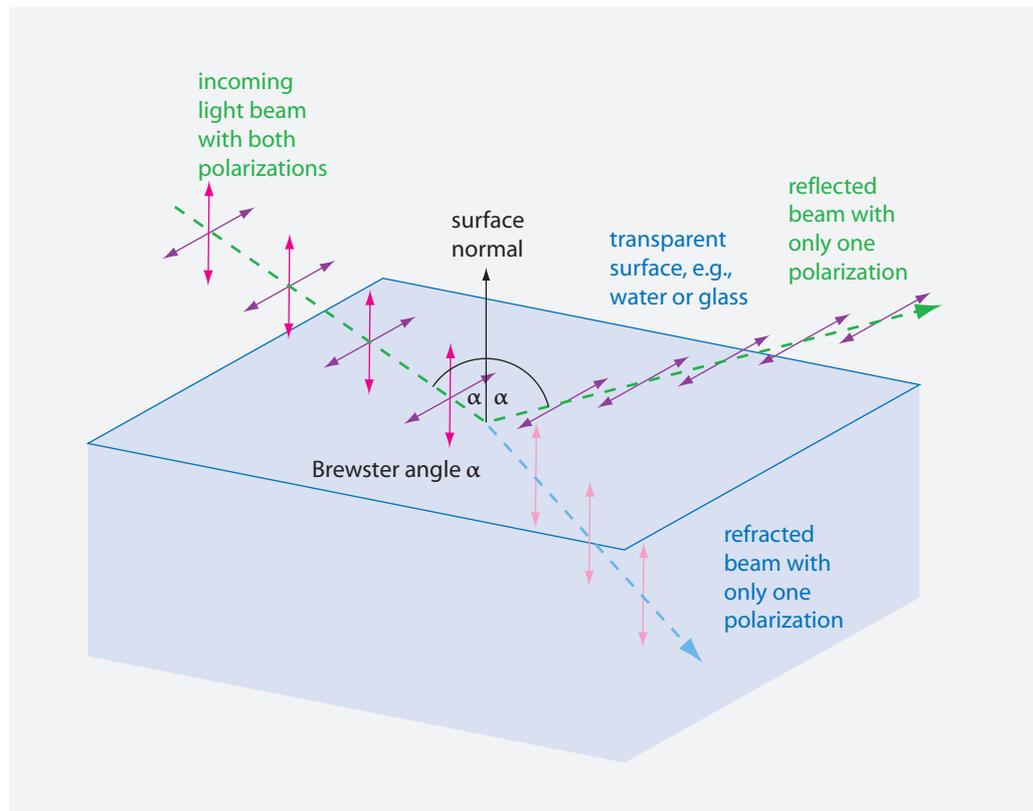


FIGURA 67 Para cada material transparente, en el llamado *ángulo de Brewster*, solamente se refleja la luz polarizada horizontalmente; la luz polarizada verticalmente se refleja completamente. El ángulo de Brewster es una cantidad que depende del material. El valor para el agua es, para la mayoría de las longitudes de onda, de 53° y para el cristal de $56(1)^\circ$, medidos desde la línea que es normal a la superficie.

Muchos insectos, arañas, determinados pájaros y algunas gambas pueden detectar la polarización con sus ojos. Las abejas melíferas y muchos otros insectos utilizan la polarización para calcular la posición del Sol, aún cuando se encuentre escondido detrás de las nubes, y usan este efecto para la navegación. Algunos escarabajos del género *Scarabeus* incluso utilizan la polarización de la luz de la Luna para la navegación, y muchos insectos usan la polarización de la luz solar para distinguir las superficies reales de agua de los espejismos. (¿Puede encontrar cómo?)

Ref. 67

Desafío 115 s

Ref. 68

En 1844, el mineralogista Wilhelm Haidinger (b. 1795 Viena, d. 1871 Dornbach) descubrió que hay una forma de observar la polarización de la luz a simple vista con el ojo humano. La mejor forma de observar este efecto es mirar a una distancia de aproximadamente la longitud de un brazo sobre una pantallas blanca de LCD e inclinar ligeramente la cabeza. Observará un patrón *extremadamente desvanecido* de color amarillo o amarillo-azul, de unos dos dedos de anchura, que se superponen sobre el fondo blanco. Este patrón se llama *cepillo de polarización* o *cepillo de Haidinger*. La **Figura 66** presenta una ilustración aproximada. Este débil efecto desaparece en unos segundos si la cabeza deja de rotar a lo largo de la línea de visión. El cepillo de Haidinger se debe a la birrefrinc-

Ref. 69 gencia de la córnea y las lentes del ojo humano, junto a la morfología de la mácula lútea del interior del ojo. La córnea actúa como un polarizador dependiente del color, orientado radialmente, mientras que la mancha amarilla actúa como un analizador orientado radialmente. En resumen, el ojo humano es realmente capaz de ver las direcciones en la que están oscilando los campos eléctrico y magnético de la luz.

Siendo amarillo el cepillo de Haidinger, es también visible en el cielo azul, siempre que el aire sea claro. (En realidad, desaparece fácilmente por la dispersión múltiple, por lo que resulta ser una prueba de la transparencia atmosférica.) En el cielo, el cepillo de Haidinger es apenas del tamaño de una uña a la distancia de un brazo. (El tamaño angular es el tamaño angular de la mácula.) El brazo amarillo de los puntos en cruz hacia el Sol, si miramos a unos 90° alejándonos de él, hacia arriba en el cielo. Para verlo realmente de forma clara, sostenga un polarizador (o unas gafas polarizadas) hacia arriba y mire a través de él, luego rótelos respecto a la línea de visión.

Cuando la luz polarizada se dirige a un medio transparente, la razón entre la intensidad de luz reflejada y la transmitida depende de la polarización. La intensidad transmitida puede ser cero o casi cero para determinadas combinaciones críticas de ángulos y polarizaciones. El olvido de este hecho, por parte de los ingenieros de la compañía de coches Mercedes Benz, le costó a la compañía millones de Euros. Tras el parabrisas, uno de sus modelos tenía un sensor que detectaba si era de día o de noche. El sensor fotodiodo funcionó bien, excepto cuando el tiempo era extremadamente bueno, con cielo azul y sin nubes; en ese caso, el sensor marcaba “noche” como señal. El misterio fue resuelto cuando se descubrió que la geometría del diseño estaba próxima al ángulo Brewster, en el que con tal tiempo, la luz del cielo se polariza y tiene una pequeña cantidad de luz infrarroja, a la que el – erróneamente elegido – fotodiodo se mostraba mucho más sensible. Como resultado decenas de miles de coches tuvieron que ser reparados.

Obsérvese que todas las polarizaciones posibles de la luz forman un conjunto continuo. No obstante, una onda plana general puede ser vista como la superposición de dos ondas ortogonales polarizadas linealmente con diferentes amplitudes y diferentes fases. Matemáticamente, todas las ondas electromagnéticas polarizadas linealmente con la misma frecuencia y dirección, por un espacio vector bidimensional.

La luz puede también ser *no polarizada*. La luz no polarizada es una mezcla de luz de varias polarizaciones. La luz del Sol y la de otras fuentes es generalmente no polarizada, debido al movimiento Browniano de las fuentes emisoras. La luz *parcialmente* polarizada es una mezcla de luz polarizada y no polarizada.

En resumen, para una onda en el espacio tridimensional, hay dos tipos básicos de polarización. Frecuentemente se clasifican como polarización horizontal y vertical, o, en otras palabras, en polarización paralela y perpendicular. Una onda polarizada generalmente es una superposición de estos dos estados básicos. Son los llamados estados *lineales* de polarización.

De manera interesante, una onda plana polarizada generalmente puede también ser vista como la superposición de *ondas polarizadas circularmente* a derecha e izquierda. En la [Figura 68](#) se ofrece una ilustración de onda polarizada circularmente. En la Naturaleza, la polarización es extremadamente rara. Las larvas de las luciérnagas emiten luz polarizada circularmente. La luz reflejada por muchas especies de escarabajos es polarizada circularmente, como es el caso de varios crustáceos estomatópodos, tales como el camarón mantis. El último – y probablemente el anterior – son también capaces de

Ref. 70

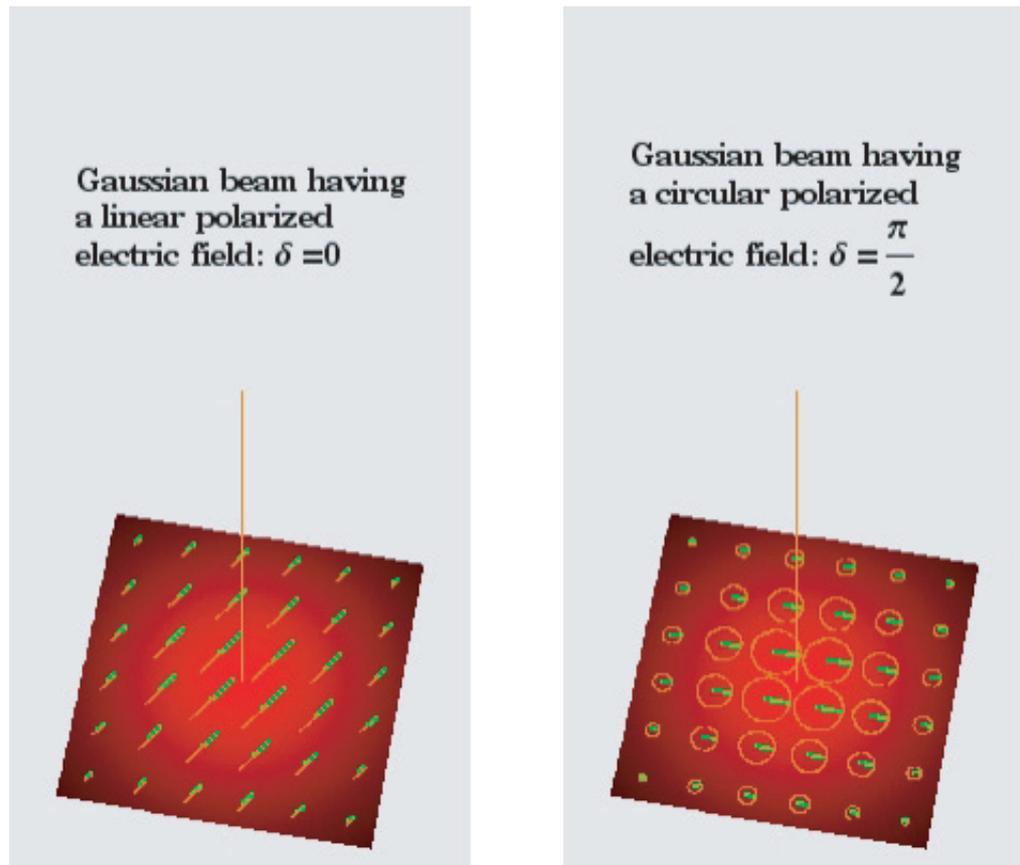


FIGURA 68 Izquierda: el campo eléctrico de una onda (un rayo) electromagnética Gaussiana linealmente polarizada; derecha: un rayo Gaussiano polarizado circularmente (QuickTime film © José Antonio Díaz Navas).

detectar luz polarizada circularmente.

ALCANCE DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Las ondas electromagnéticas de baja frecuencia, u ondas de radio, se utilizan normalmente para transmitir señales de teléfonos móviles, así como las de la televisión, programas de radio y programas por satélite. Como la luz, las ondas de radio se originan por el movimiento de electrones. En la vida cotidiana, la luz se produce (generalmente) por electrones acelerados en el interior de los átomos y las moléculas. Las ondas de radio, que tiene una frecuencia más baja y por tanto una mayor longitud de onda, son generadas más fácilmente por los electrones que las que se aceleran en los metales con longitud de onda aproximadamente del mismo tamaño; tales piezas de metal se llaman *antenas*.

Las ondas de radio emitidas por un dispositivo portátil pueden transportar señales alrededor de la Tierra. En otras palabras, las ondas de radio tienen un gran alcance. ¿Cómo es esto posible? Después de todo, un campo eléctrico generalmente no es medible a una docena de metros de distancia. Sucede que la fortaleza del campo de las ondas de radio

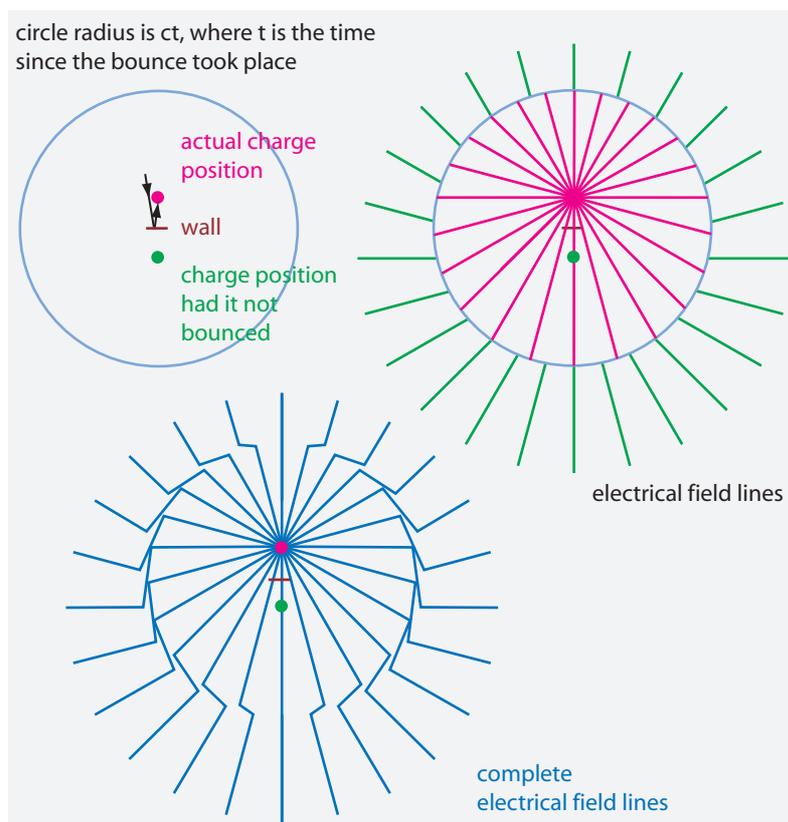


FIGURA 69
Construcción, en tres pasos, del campo eléctrico alrededor de una partícula cargada que rebota en una pared.

decrece a razón de $1/r$, donde r es la distancia desde la fuente. La fortaleza del campo por tanto, decrece mucho más lentamente que para los campos estáticos, los cuales los hacen como $1/r^2$. ¿Por qué es éste el caso?

Ref. 71

La lenta $1/r$ dependencia de las ondas de radio puede entenderse cualitativamente a partir del dibujo mostrado en la **Figura 69**. Ahí se muestra el campo eléctrico alrededor de una partícula cargada, la cual experimenta el movimiento acelerado más simple posible: un rebote en una pared. En realidad, el último, diagrama de abajo es suficiente para mostrar que el campo transversal, representado por la *vuelta* en las líneas del campo eléctrico, decrece como $1/r$. ¿Puede calcular la dependencia?

Desafío 116 d

Si realizamos la construcción de las líneas de campo para una carga que sufre *repetidos* rebotes, obtendremos líneas de campo con vueltas regularmente espaciadas que se alejan de sus fuentes. Para una carga sometida a un movimiento *armónico*, se obtendrán las líneas de campo mostradas en la **Figura 70**. La figura muestra el mecanismo de la antena más sencilla (o fuente de luz) que uno pueda imaginar.

La magnitud del campo eléctrico transversal se puede utilizar también para calcular la relación entre la aceleración a de la carga q y la potencia electromagnética radiada P . Primero, el campo eléctrico transversal (calculado en el último desafío) tiene que ser multiplicado por sí mismo, para obtener la densidad de energía eléctrica local. Luego tiene que ser duplicado, para incluir la energía magnética. Finalmente, lo tenemos que

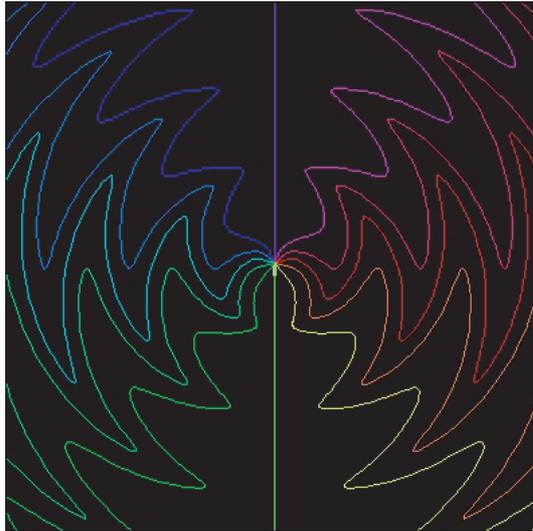


FIGURA 70 Campo eléctrico alrededor de una partícula que oscila en dirección vertical (QuickTime film © Daniel Schroeder).

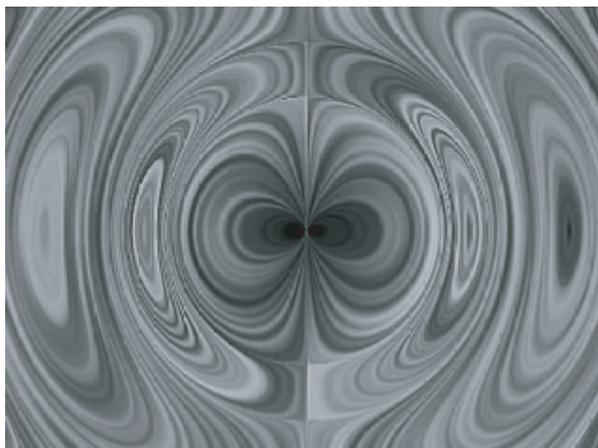


FIGURA 71 Campo eléctrico alrededor de un *dipolo* oscilante (QuickTime film © Daniel Weiskopf).

integrar sobre todos los ángulos; esto da como resultado un factor igual a $2/3$. En total tenemos

$$P = \frac{q^2 a^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} . \quad (65)$$

Por tanto, la potencia total radiada P depende del cuadrado de la aceleración y del cuadrado de la carga que está siendo acelerada. A esto se le llama *fórmula de Larmor*. Esto muestra por qué los radiotransmisores necesitan suministradores de potencia y permite calcular qué cantidad de potencia deben tener. Obsérvese que la [Figura 69](#) y la [Figura 70](#) y también las antenas en el transmisor tienen una dirección *preferida* de emisión de potencia.

Generalmente, la fuente de radiación electromagnética, es descrita con más precisión como una oscilación dipolar. Una visualización del campo eléctrico en este caso se presenta en la [Figura 71](#). Para distancias largas, una sección de onda aproximadamente puede ser como una onda plana.

En todos los casos, encontramos que la intensidad de las ondas de radio decrecen más despacio con la distancia y que las comunicaciones de radio son posibles.

LA LENTITUD EN EL PROGRESO DE LA FÍSICA – Y EN LA RELATIVIDAD

La expresión de Gustav Kirchhoff y Bernhard Riemann desde la década de 1850 para la velocidad de la luz y todas las otras ondas electromagnéticas

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (66)$$

es tan extraña que nos intriga cada vez que la vemos. Falta alguna cosa esencial. La expresión establece que la velocidad c es *independiente* del propio movimiento del observador que mide el campo electromagnético e *independiente* de la velocidad de la fuente que lo emite. En otras palabras, se predice que la velocidad de la luz es independiente de la velocidad del foco de luz e independiente de la velocidad del observador. Realmente esto está confirmado por todos los experimentos, como se explicó en el volumen sobre relatividad.

Vol. II, página 23

Además, la expresión (66) implica que ningún observador puede ir más rápido que la luz. En otras palabras, la luz *no* se comporta como una ráfaga de balas: la velocidad de las balas dependen de la velocidad de la pistola y del objetivo. Un objetivo puede siempre ir más rápido que una bala, si se mueve con la suficiente rapidez. La velocidad de la luz es una *velocidad límite*.

Los experimentos confirman que también la velocidad de las ondas de radio, de los Rayos-X y de los Rayos- γ es independiente del transmisor y del receptor. Los experimentos confirman que esas velocidades tienen el mismo valor que la velocidad de la luz. Todo esto está contenido en la expresión (66). En resumen,

- ▷ La expresión $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ muestra que la velocidad c es *invariante* y es el *límite de la velocidad de la energía* en la Naturaleza.

Increíblemente, *nadie* exploró las consecuencias de esta invariancia hasta Lorentz y otros que comenzaron a hacerlo en la década de 1890, hasta que Einstein resolvió los problemas en 1905. ¡La teoría de la relatividad permaneció sin ser descubierta por dos generaciones! Como en tantos otros casos, los progresos de la física han ido mucho más lentos de lo necesario.

La invariancia de la velocidad de la luz c es el punto fundamental que distingue la relatividad especial de la física Galileana. Ya que todo dispositivo electromagnético – tal como cualquier motor eléctrico – hace uso de la expresión (66), cualquier dispositivo electromagnético resulta ser una prueba de trabajo de la relatividad especial.

¿CÓMO SE VE EL MUNDO CUANDO SE VIAJA EN UN RAYO DE LUZ?

Ref. 72 A finales del siglo XIX, el adolescente Albert Einstein leyó una serie de libros de Aaron Bernstein que trataban de la velocidad de la luz. El libro planteaba la pregunta de qué pasaría si el observador se movía a la misma velocidad de la luz. Einstein pensó mucho sobre este asunto, y en particular, se preguntó a sí mismo, qué clase de campo electromagnético observaría en tal caso. Posteriormente, Einstein explicó que este experimento mental le convenció a esa temprana edad de que *nada* podría viajar a la velocidad de la luz, ya que el campo observado debería tener una propiedad no encontrada en la Naturaleza. ¿Puede encontrar a cual se estaba refiriendo?

Desafío 117 s

Viajar sobre un haz de luz podría tener extrañas consecuencias:

- No se tendría imagen especular, al igual que un vampiro.
- La luz no sería una oscilación, sino que sería un acampo estático.
- Nada se movería, como en el cuento de la bella durmiente.

Pero también a velocidades *cercanas* a la velocidad de la luz se producirían observaciones interesantes. Se podría:

- ver mucha luz acercándose al observador y casi ninguna a los lados o por detrás de él; el cielo sería azul/blanco por delante y rojo/negro por detrás;
- observar que todo a nuestro alrededor sucedería muy muy despacio;
- experimentar que la más pequeña partícula de polvo se convertiría en un mortífero proyectil.

Desafío 118 s

¿Puede pensar en otras extrañas consecuencias? Resulta bastante tranquilizador que nuestro planeta se mueva, a través de su entorno, con bastante lentitud, cuando se compara con la velocidad de la luz.

¿SE PUEDE TOCAR LA LUZ?

Ref. 73 Si se colocara una pequeña cuenta de vidrio encima de un potente láser, la cuenta permanecería suspendida en el aire, como se muestra en la [Figura 72](#).^{*} Este ejemplo de levitación óptica prueba que la luz posee cantidad de movimiento. Por tanto, en contra de lo que dijimos al principio de nuestro ascenso, ¡las imágenes *se pueden* tocar! De hecho, la facilidad con la que los objetos pueden ser empujados, reciben un nombre especial. Para los plantas y los planetoides, se llama *albedo*, y para los objetos en general, recibe el nombre de *reflectividad*, abreviado como *r*.

Vol. I, página 105

Desafío 119 e

Como todo tipo de campo electromagnético y como cualquier clase de onda, la luz porta energía; el flujo de energía T por superficie y tiempo es

$$\mathbf{T} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \times \mathbf{B} \quad \text{dando un promedio de} \quad \langle T \rangle = \frac{1}{2\mu_0} E_{\max} B_{\max} . \quad (67)$$

Obviamente, la luz también tiene una cantidad de movimiento P . Está relacionado con

^{*} El objeto más pesado que ha levitado con un láser tenía una masa de 20 g; el láser utilizado tenía el tamaño de un edificio, y el método también hizo uso de unos cuantos efectos adicionales, tal como el choque de ondas internas, para mantener el objeto en el aire.

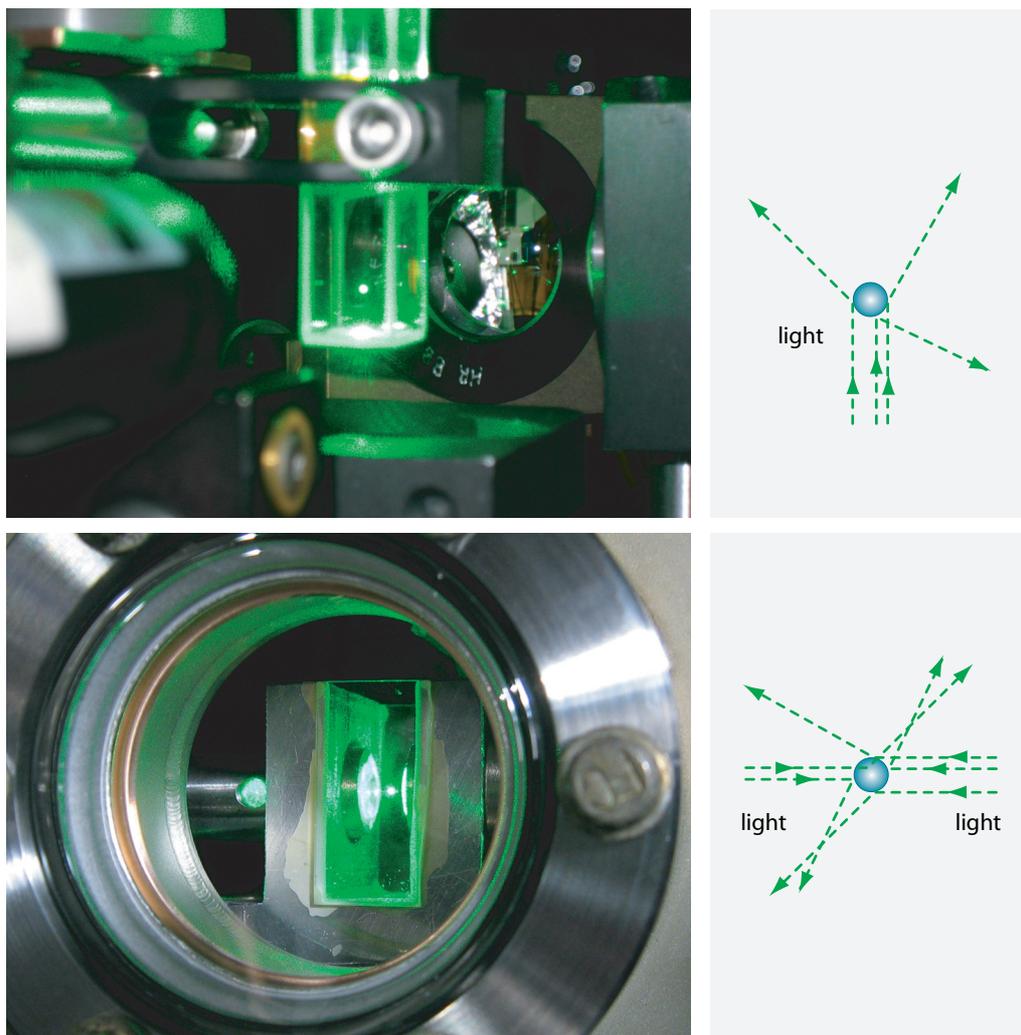


FIGURA 72 Levitando una pequeña cuenta de cristal con un láser por debajo y dos rayos láser opuestos horizontalmente (© Mark Raizen, Tongcang Li).

la energía E por

$$P = \frac{E}{c} . \quad (68)$$

Desafío 120 e Como resultado, la presión p ejercida por la luz sobre un cuerpo viene dada por

$$p = \frac{T}{c}(1 + r) \quad (69)$$

donde para cuerpos negros se obtiene una reflectividad $r = 0$ y para los espejos $r = 1$; los otros cuerpos presentan valores intermedios. ¿Cuál supone que es la cantidad de presión debida a la luz solar sobre una superficie negra de un metro cuadrado? ¿Es esa la razón

Desafío 121 s



FIGURA 73 La cola del cometa McNaught, fotografiada en Australia en 2007 (© Flagstaffotos).

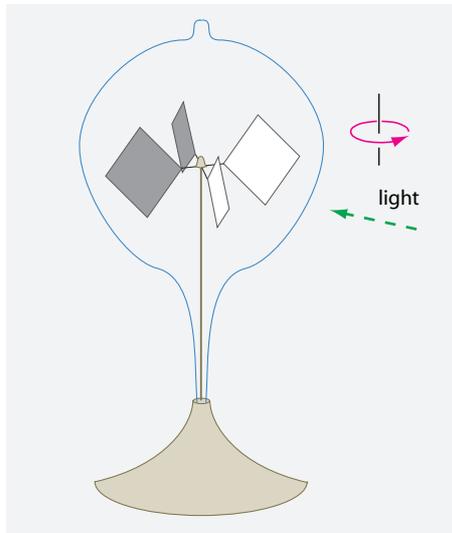


FIGURA 74 Un molino de luz comercial gira *en contra* de la luz (Wikimedia).

por la que sentimos más presión durante el día que por la noche?

En caso de no disponer de láseres, se necesita un equipo bastante delicado para la detección de la cantidad de movimiento o la presión de la luz. Ya en 1619, Johannes Kepler había sugerido en *De cometis* que las colas de los cometas existen sólo porque la luz del Sol golpea las pequeñas partículas de polvo que arrastran detrás de ellos. Por esta

razón, la cola siempre apunta *alejándose* del Sol, como podrá comprobar en la próxima oportunidad. Hoy, sabemos que Kepler estaba en lo cierto; pero probar la hipótesis no resulta fácil.

Desafío 122 e Con objeto de detectar la presión de la radiación de la luz, en 1873, William Crookes* inventó el *molino de luz radiómetro*. El molino de luz consta de cuatro finas placas, negras por un lado y claras por el otro, que se montan sobre un eje vertical, como se muestra en la **Figura 74**. No obstante, cuando Crookes terminó de construirlo – era similar a los que se encuentran en las tienda hoy – encontró, como puede ver cualquier persona, que giraba en la dirección equivocada, es decir, ¡con el lado claro hacia la luz! (¿Por qué es equivocado?) Usted mismo puede comprobarlo si apunta con rayo láser sobre ello. Este comportamiento ha sido un rompecabezas durante bastante tiempo. Su explicación involucra a la minúscula cantidad de gas sobre el globo de cristal y nos aleja mucho de nuestra aventura. No fue hasta 1901, con la llegada de globos mucho mejores, que el físico ruso Pyotr Lebedew consiguió crear un vacío suficientemente bueno para permitir la medición de la presión de la luz con un mejorado y verdadero radiómetro. Lebedew también confirmó el valor predicho de la presión de la luz y probó la exactitud de la hipótesis de Kepler sobre la cola de los cometas. Hoy es aún posible construir pequeños propulsores que comienzan a girar cuando la luz billa sobre ellos, de la misma manera que el viento hace mover los molinos.

Desafío 123 s Pero la luz no solamente puede tocar y ser tocada, puede también *atraparse*. En la década de 1980, Arthur Ashkin y su grupo de investigadores desarrollaron unas verdaderas *pinzas ópticas* que permitían atrapar, suspender y mover pequeñas esferas transparentes de 1 a 20 μm de diámetro utilizando rayos láser. Es posible hacer esto a través de un microscopio, de tal manera que se pueda observar al mismo tiempo lo que está sucediendo. Esta técnica es ahora de uso rutinario en la investigación biológica por todo el mundo, y ha sido utilizada, por ejemplo, para medir la fuerza de fibras musculares independientes mediante la fijación de sus extremos a un cristal o a esferas de teflón y estirarlas por separado con tales pinzas ópticas.

Ref. 74
Ref. 75
Ref. 76
Ref. 77 Pero eso no es todo. En la última década del siglo XX, varios grupos consiguieron *rotar* objetos, realizando por tanto *llaves ópticas* reales. Son capaces de rotar partículas a voluntad en una u otra dirección, mediante el cambio de las propiedades ópticas del rayo láser usado para atrapar la partícula.

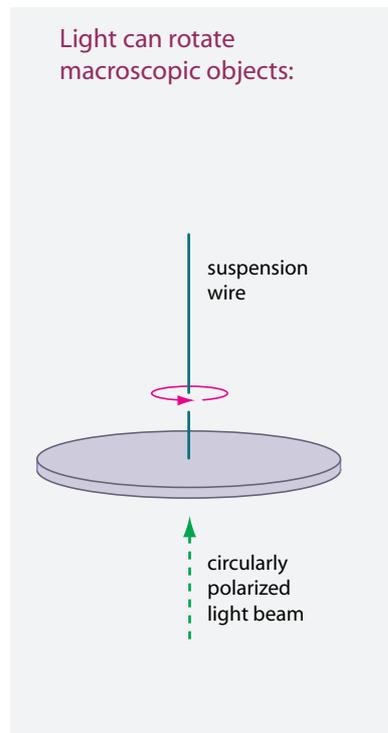
En realidad, no se tarda mucho en darnos cuenta de que si la luz posee momento lineal, la luz polarizada circularmente también tendrá un momento *angular*. De hecho, para tal onda el momento angular L viene dado por

$$L = \frac{E}{\omega}, \quad (70)$$

Desafío 124 e donde E representa la energía. Equivalentemente, el momento angular de una onda es $\lambda/2\pi$ multiplicada por su momento lineal p . Para la luz, este resultado ya fue confirmado

Ref. 78

* William Crookes (b. 1832 London, d. 1919 London), químico y físico, descubridor del talio, descubridor erróneo de otros 'elementos', creyente convencido del espiritismo y presidente de la Society for Psychological Research. Por esta extraña mezcla de reconocimientos fue elegido para la Royal Society y recibió numerosos premios y otros honores.



Light can rotate tiny objects, such as carbon nanotubes:

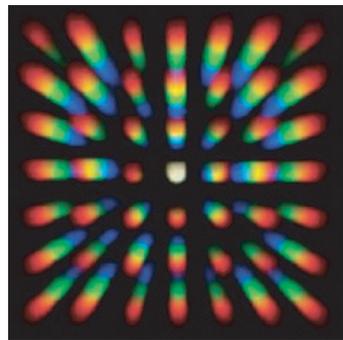
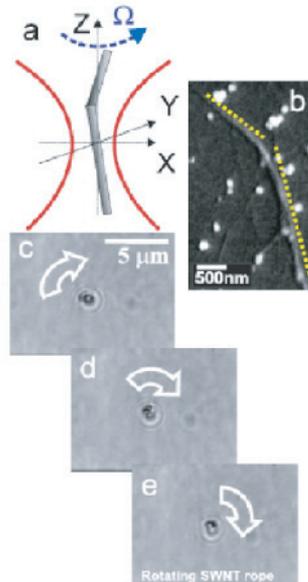


FIGURA 76 Los paraguas descomponen la luz blanca: mire una pequeña lámpara a través de un paraguas negro por la noche (© Wikimedia).

Desafío 125 ny
Ref. 79

a principios del siglo XX: un haz de luz puede poner ciertos materiales (¿cuales?) en rotación; en los líquidos, esto es ahora una práctica estándar de laboratorio. En la [Figura 75](#) se muestran dos ejemplos. Por supuesto, el efecto es aún más fuerte con un rayo láser. Pero ya en la década de 1960, se llevó a cabo una bonita demostración con microondas. Un haz de microondas polarizado circularmente desde un máser – el microondas equivalente a un láser – puede poner una pieza de metal en rotación absorbiéndola. En realidad, para un haz con simetría cilíndrica, dependiendo del sentido de rotación, el momento angular es o bien paralelo o antiparalelo a la dirección de propagación. Todos estos experimentos confirman que la luz también transporta momento angular, un efecto que jugará un papel importante en la parte cuántica de nuestro ascenso a la montaña.

Obsérvese que no para todas las ondas de la Naturaleza el momento angular viene dado por el producto de la energía por la frecuencia angular. Ésto es solamente válido para el caso de las ondas que en teoría cuántica se conocen como partículas de espín 1. Por ejemplo, para las ondas de gravedad el momento angular es el *doble* de este valor, y por tanto se espera que estén hechas de partículas de espín 2.

Ref. 80

¿Que tiene ésto que ver con las colas de los cometas mencionadas anteriormente? El asunto quedó claro definitivamente en 1986. Para liberar una nube de bario, se disparó un satélite a un altitud de 110 000 km. La nube era visible desde la Tierra, y al momento desarrolló una cola que pudo verse desde la Tierra: este fue el primer cometa artificial. Resulta que las formas de las colas de los cometas son parcialmente debidas a las colisiones de protones, pero en parte al viento solar y aún a los campos magnéticos.

Desafío 126 s

Resumiendo, la luz puede afectar, la luz puede rotar y la luz se puede tocar. Obviamente, si la luz puede rotar cuerpos, puede también *rotarse* a sí misma. ¿Podría imaginar de qué manera podría conseguirse esto?

GUERRA, LUZ Y MENTIRAS

De los pequeñísimos efectos de la ecuación (69) para la presión de la luz, se deduce que la luz no es una herramienta eficiente para golpear objetos. Por otro lado, la luz es capaz de *calentar* objetos, como podemos sentir con el Sol o cuando nuestra piel es tocada por un rayo láser de unos 100 mW o más. Por esta razón aunque los punteros láser resulten baratos son peligrosos para los ojos.

En la década de 1980, y posteriormente otra vez en 2001, un grupo de gente que habían leído demasiada ciencia ficción consiguieron influir sobre los militares – quienes también participaban de este hábito – haciéndoles pensar que los láseres se podrían usar para derribar misiles, y que una parte importante de los impuestos debería ser dedicada al desarrollo de tales láseres. Utilizando la definición del vector de Poynting y un tiempo de impacto de aproximadamente 0,1 s, ¿podría estimar el peso y el tamaño de la batería necesaria para que tal dispositivo funcionara? ¿Qué ocurriría si el tiempo fuera lluvioso o estuviera nublado?

Desafío 127 e

Otra gente trató de influir NASA para estudiar la posibilidad de lanzar un cohete utilizando emisiones de luz en lugar del lanzamiento de gases. ¿Puede estimar por qué esto no es fiable?

¿QUÉ ES EL COLOR?

Desafío 128 s

Hemos visto que las ondas de radio a ciertas frecuencias son visibles. Dentro de ese rango, las diferentes frecuencias corresponden a diferentes colores. (¿Sería capaz de convencer a un amigo de ésto?) Pero la historia no termina aquí. Numerosos colores pueden ser producidos bien por una simple longitud de onda, i.e., por luz *monocromática*, o por una *mezcla* de varios colores diferentes. Por ejemplo, el amarillo estándar puede ser, si es puro, un rayo electromagnético de longitud de onda 575 nm o puede ser una mezcla de un verde estándar de 546,1 nm y un rojo estándar de 700 nm. El ojo no es capaz de distinguir entre estos dos casos; Sólo los espectrómetros pueden. En la vida cotidiana, todos los colores suelen ser mixtos, con las excepciones de las lámparas de luz amarilla para iluminar las calles y de los rayos láser y los espectros de laboratorio. Puede comprobarlo por sí mismo, utilizando un paraguas o un compact disc: ellos descomponen

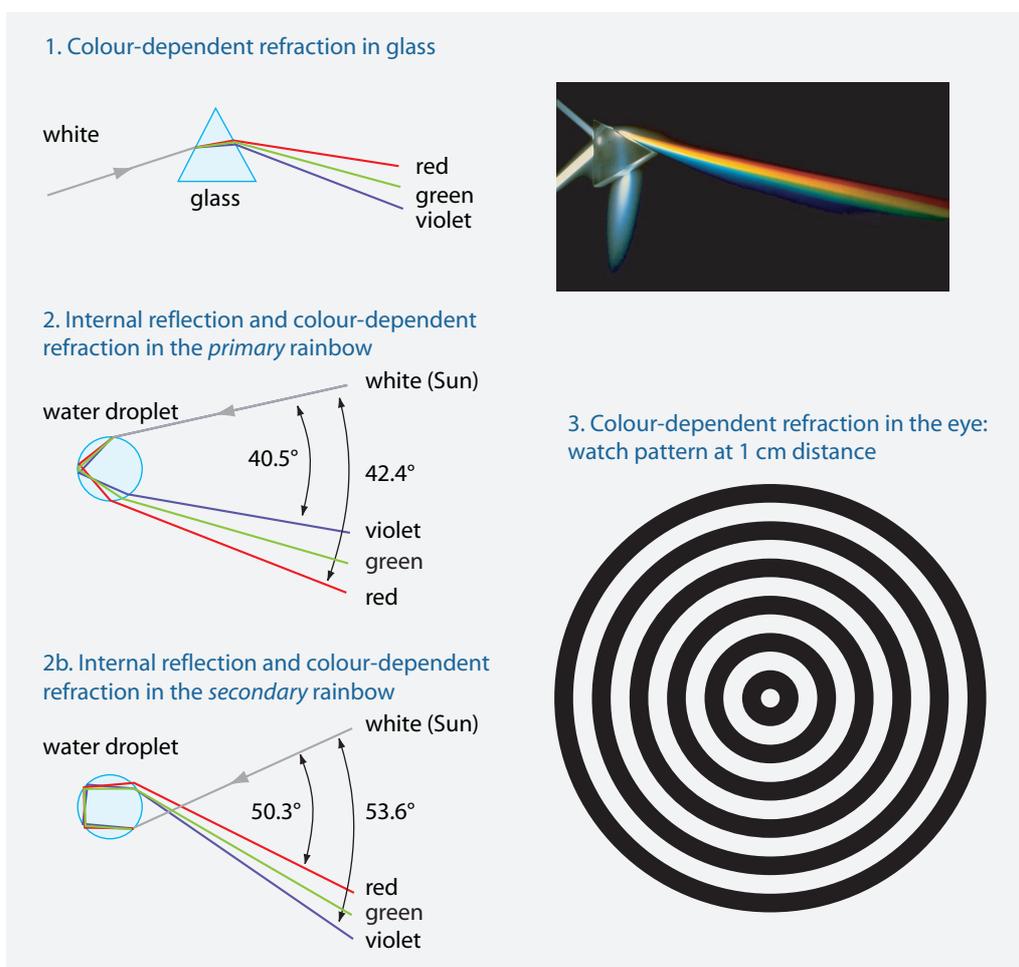


FIGURA 77 Tres pruebas de que la luz *blanca* es una mezcla de colores (con una diferencia angular exagerada): descomposición en un prisma, formación de un arcoíris (simplificado, como se explica en el texto) y los bordes coloreados vistos sobre un patrón circular blanco y negro (fotografía de Susan Schwartzberg, © Exploratorium www.exploratorium.edu).

Desafío 129 e

las mezclas de luz, pero no descomponen los colores puros, tales como los procedentes de un puntero de láser o una pantalla LED. Aún los colores del arcoíris son impuros, porque están mezclados con la luz blanca del fondo del cielo y porque el diámetro del Sol mancha el espectro.

En particular, la *luz blanca* es una mezcla de un rango continuo de colores con una determinada intensidad por longitud de onda. Si quiere comprobar que la luz blanca es una mezcla de colores sin una fuente de luz, simplemente mantenga el lado inferior derecho de la **Figura 77** tan cerca del ojo de tal manera que no pueda enfocar las barras. Las fronteras si filo de los barras blancas presentan una sombra rosa o verde. Estos colores que se deben a las imperfecciones del ojo humano, se conocen con el nombre de *aberraciones cromáticas*. Las aberraciones cromáticas son la consecuencia de que no todas las frecuencias de luz siguen el mismo camino a través de la lente del ojo, y por tanto

golpean la retina en diferentes puntos. Es el mismo efecto que ocurre en el prisma o en las gotas de agua que forman un arcoíris.

La parte izquierda de la [Figura 77](#) explica cómo se forman los arcoíris. Sobre todo, el reflejo interno dentro de las gotas de agua en el cielo es el responsable de devolver la luz que viene del Sol, mientras que la refracción dependiente de la longitud de onda en la superficie aire-agua es la responsable de los diferentes caminos de cada color. Las dos primeras personas que verificaron esta explicación fueron Theodoricus Teutonicus de Vriberg (c. 1240 to c. 1318), entre los años 1304 y 1310 y, al mismo tiempo, el matemático persa Kamal al-Din al-Farisi. Para comprobar la explicación, hicieron algo inteligente y simple que cualquiera puede repetir en casa. Construyeron una gota de agua alargada llenando un fino tubo de cristal esférico (o cilíndrico) con agua; luego hicieron brillar un rayo de luz blanca a través de él. Theodoricus y al-Farisi encontraron exactamente lo que se muestra en la [Figura 77](#). Con este experimento, cada uno de ellos fue capaz de reproducir el ángulo de apertura del arcoíris principal o *primario*, su secuencia de colores, así como la existencia de un arcoíris *secundario*, su ángulo observado y su secuencia de colores invertida.* Todos estos arcoíris se encuentran en la [Figura 57](#). Al bonito experimento de Theodoricus a veces se lo considera como la contribución más importante de la ciencia natural de la Edad Media.

Ref. 81

Desafío 130 e

Página 111

Por cierto, la forma del arcoíris nos dice algo sobre la forma de las gotas de agua. ¿Puede encontrar la conexión?

Desafío 132 s

A propósito, La explicación del arcoíris dada en la [Figura 77](#) no es completa. En ella se asume que el rayo de luz golpea la gota de agua sobre su superficie. Si el rayo de luz golpea la gota de agua en otros puntos - técnicamente, con otros parámetros de impacto -, el arcoíris aparece con otros ángulos; no obstante, todos esos otros arcoíris se desvanecen. Solamente el arcoíris visible permanece, porque sus ángulos de desviación son extremos. El arcoíris primario es, de hecho, el borde coloreado de un disco blanco. Y en realidad, la región sobre el arco primario es siempre más oscura que la región debajo de ella.

Las gotas de agua no son los únicos prismas que se encuentran en la Naturaleza. Durante la puesta de Sol, la misma atmósfera también actúa como un prisma, o más precisamente, como una lente cilíndrica afectada por esferocromatismo. Por tanto, especialmente a la puesta de Sol, el Sol se divide en dos imágenes diferentes, una de cada color, que están ligeramente desplazadas entre sí; el desplazamiento total es de aproximadamente 1 % del diámetro. Como resultado, el borde del Sol a la caída de la tarde está coloreado. Si el tiempo es favorable, si el aire es claro hasta más allá del horizonte, y si el perfil de temperatura en la atmósfera es el correcto, aparecerá un espejismo dependiente del color: durante aproximadamente un segundo después, será posible ver imágenes de la puesta de Sol, cerca del rojo, anaranjado y amarillo, la imagen verde-azul, algunas veces separada. Este es el famoso *fogonazo verde* descrito por Jules Verne en su novela *Le Rayon-vert*. El fogonazo verde se ve con frecuencia en las playas tropicales, por ejemplo en Hawaii, y por la popa de los barcos en aguas calientes.

Ref. 84

Ref. 83

Ref. 84, Ref. 85

Desafío 131 s

Ref. 82

* ¿Puede imaginar dónde pueden ser vistos los arcoíris ternario y cuaternario? Hay raras visiones reportadas de ellos; existen solamente dos o tres fotografías en todo el mundo. La cacería para observar el arcoíris de quinto orden todavía está abierta. (En el laboratorio, se han observado arcos alrededor de gotas de agua hasta de orden 13.) Para más detalles, consulte el bonito sitio web www.atoptics.co.uk. Hay varias fórmulas para los ángulos de los distintos órdenes de arcoíris; ellos siguen directamente sencillas consideraciones geométricas, pero son demasiado complicadas para darlas aquí.

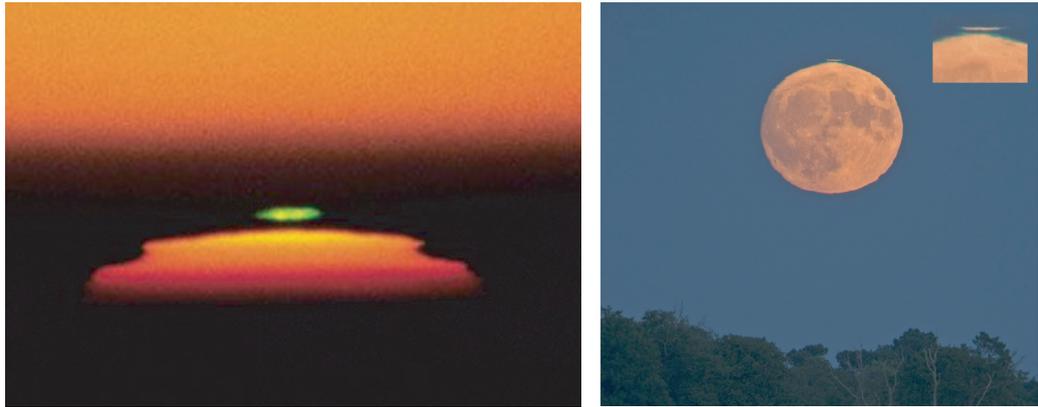


FIGURA 78 Un fognazo verde sobre la puesta de Sol y otro sobre la Luna, mostrando también el cambio de color del borde de la Luna (© Andrew Young y Laurent Laveder/PixHeaven.net).



FIGURA 79 Leche y agua simulan el cielo vespertino (© Antonio Martos).

Incluso el aire puro separa la luz blanca. No obstante, este efecto no se debe a la dispersión refractiva, sino a la dispersión por partículas (scattering). La dispersión por partículas es dependiente de la longitud de onda, principalmente la *dispersión por partículas de Rayleigh* (Rayleigh scattering), esta es la razón por la que el cielo y las montañas distantes presenten un color azul y de que el Sol parezca rojo al amanecer y al atardecer. (El cielo parece negro desde la Luna aún durante el día.) Usted puede repetir este efecto mirando, a través del agua, una superficie negra o una bombilla. Como se muestra en la **Figura 79**, si se añaden unas cuantas gotas de leche al agua hace que la luz de la lámpara parezca amarilla y luego roja, y la superficie negra se hace azul (como el cielo visto desde la Tierra en comparación del cielo visto desde la Luna). Más cantidad de leche incrementa este efecto. Por la misma razón, las puestas de Sol son especialmente rojas tras las erupciones volcánicas.

Al atardecer, no obstante, el cielo se muestra azul por otra razón, mucho menos conocida: en las horas del atardecer, el cielo es azul principalmente por causa de la capa de

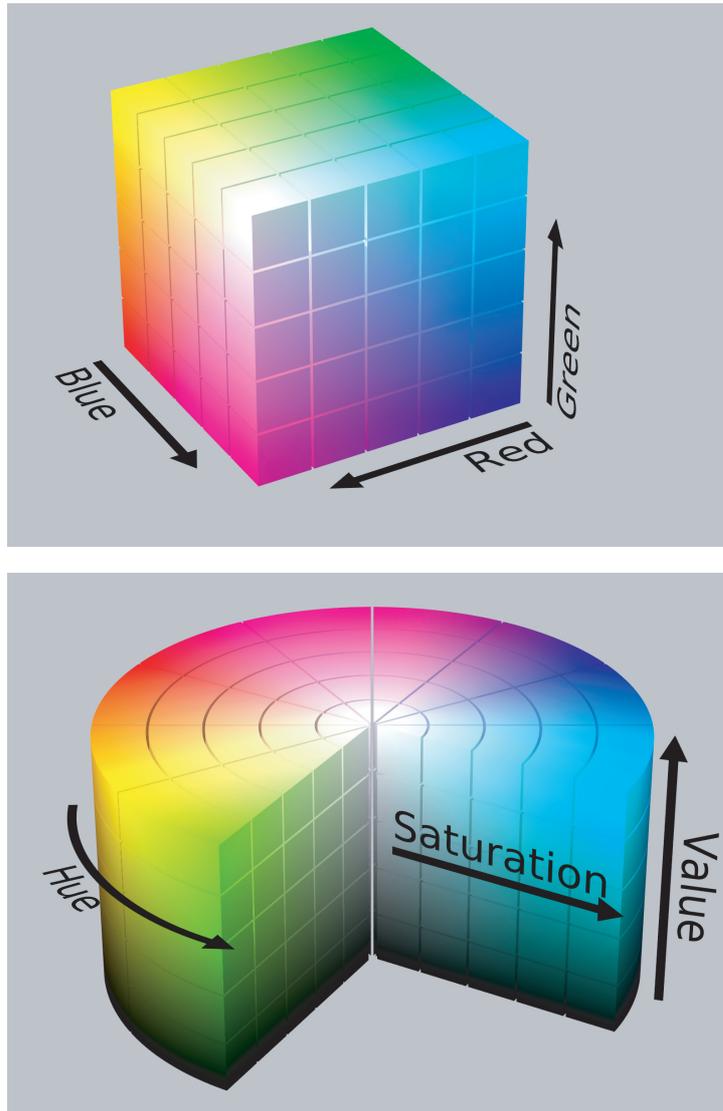


FIGURA 80 Dos de las muchas maneras de ilustrar el conjunto de colores de todos los colores humanos posibles: (arriba) una mezcla de valores rojo, verde y azul que se incrementa a lo largo de los tres ejes de coordenadas, y (abajo) utilizando tonalidades, coordenadas del valor de saturación y brillo (© SharkD).

Ref. 86 ozono. El ozono es un gas azul. Sin ozono, el cielo se mostraría amarillento en las puestas de Sol.

En resumen, la luz es, en general, una mezcla de longitudes de ondas. Como resultado, la longitud de onda de la luz o la frecuencia *no* son suficientes para describir el color. Los expertos en el color llaman *tonalidad o matiz* a esos aspectos del color que se combinan con más proximidad al cambio de su longitud de onda. Pero cada color posee dos características adicionales. Por ejemplo, cualquier color dado puede ser brillante o mate; la *brillantez* es una segunda propiedad independiente del color. Una tercera propiedad del color es su *saturación*; ésta expresa cuán fuertemente difiere del blanco este color. Un color fuertemente saturado es lo opuesto a un color pálido, o color débilmente saturado.

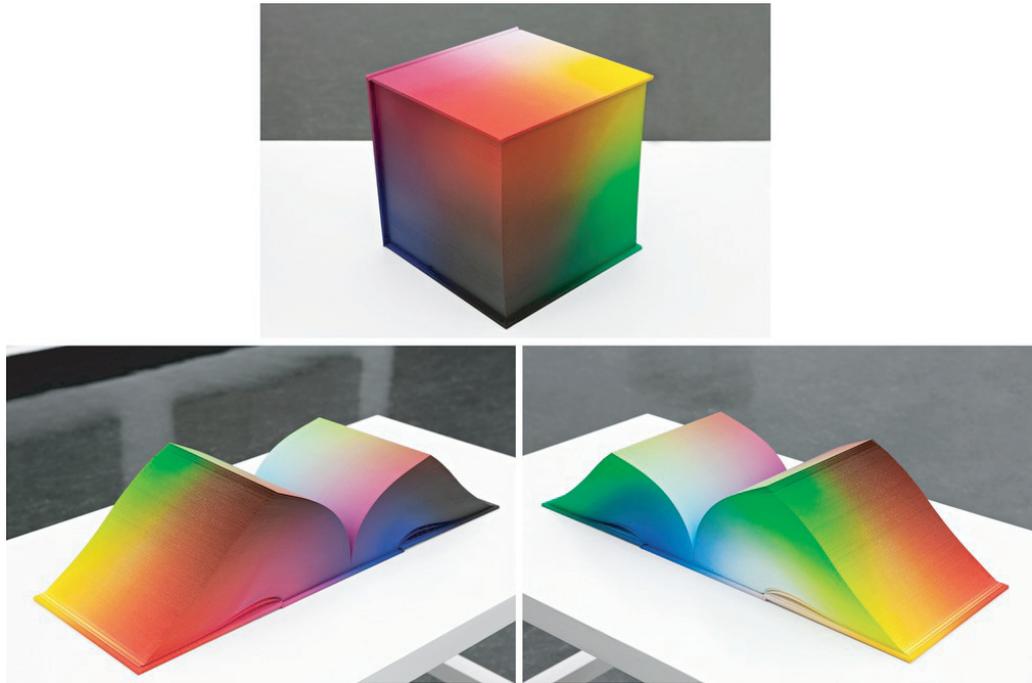


FIGURA 81 Singular libro de colores que ilustra, en cada página y en todas sus superficies exteriores, el espacio tridimensional de los humanos (© Tauba Auerbach).

El espacio del color humano es tridimensional. Los humanos somos tricromáticos. La [Figura 80](#) ilustra este punto. Cada uno de los colores que observamos queda definido por *tres* parámetros independientes, porque el ojo humano tiene tres tipos de conos, esto es, tres tipos de células sensibles al color. Esta es la razón de que cualquier esquema de selección de color, por ejemplo en un ordenador, tenga – al menos – tres parámetros que puedan ser combinados. Un artista moderno, Tauba Auerbach, incluso produjo una hermosa versión en libro sobre el espacio del color, mostrado en la [Figura 81](#). El número tres es también la razón de que todas las pantallas tengan al menos tres tipos diferentes de pixels. Estos tres parámetros no necesitan ser valores de matiz, saturación y brillo. Pueden ser tomados también de la intensidad del rojo, el verde y el azul. Otras muchas propiedades del color pueden ser utilizadas para describir el color, tales como ligereza, croma, puridad, luma y otros. También se usan descripciones con cuatro y más parámetros – que entonces no son independientes unos de otros –, especialmente en la industria de la pintura.

Ref. 87

Muchos pájaros, reptiles, peces y varios insectos poseen espacios del color tetra-dimensionales que incluyen el ultravioleta; las mariposas y las palomas tienen espacios del color penta-dimensional, y otras especies de aves tienen espacios del color incluso mayores. Las gambas Mantis, probablemente tienen los ojos más complejos del reino animal, con hasta espacios del color de doce dimensiones. (Una especie de gamba mantis, la *Gonodactylus smithii*, puede también detectar con completo detalle la luz polarizada circular y linealmente.) A diferencia de los humanos y los monos, la mayoría de los animales tienen solamente un espacio del color bidimensional. También las personas ciegas



FIGURA 82 De manera excepcional, muchos arcoiris adicionales (© Denis Betsch).

al color pueden tener un espacio del color con menores dimensiones. En otras palabras, el número de dimensiones del espacio del color percibido no es una propiedad de la luz, ni una propiedad de la Naturaleza, sino una propiedad específica de nuestros ojos humanos *Los colores de la Naturaleza y los colores percibidos por los humanos difieren*. No existe un espacio del color en la Naturaleza.

Los colores de la Naturaleza y los colores de la percepción de los humanos difieren de una forma adicional, descubierta por los lingüistas. En lenguaje humano, los colores tienen un *orden* natural. Toda la gente del mundo, ya vengan del mar, del desierto o de las montañas, ordenan los colores con la siguiente secuencia: 1. negro y blanco, 2. rojo, 3. verde y amarillo, 4. azul, 5. marrón, 6. malva, rosa, naranja, gris y a veces hasta doce términos que difieren de idioma en idioma (Los colores que se refieren a objetos, tales como el berengena o el sepia, o los colores que no son aplicables de manera generalizada, tal como el rubio, quedan excluidos en esta discusión.) El preciso descubrimiento es como sigue: si un idioma tiene una palabra para cualquiera de esos colores, entonces también tiene una palabra para designar a los precedentes. El resultado también implica que la gente utiliza estas clases de colores básicos aún si en su idioma *no* existe una palabra para cada uno de ellos. Estas fuertes afirmaciones han sido confirmadas con más de 100 idiomas.

Ref. 88



FIGURA 83 Cinco tipos raros de arcoíris: un arcoíris de niebla (arriba a la izquierda), uno irregular, arcoíris dividido en una situación ventosa debido a gotas de lluvia no esféricas, (arriba a la derecha, mostrado con saturación de color incrementada), un arcoíris de seis hojas (en medio a la izquierda), un arcoíris rojo al atardecer (en medio a la derecha), y un arcoíris lunar, creado por la Luna, no por el Sol, y aclarado digitalmente (© Michel Tournay, Eva Seidenfaden, Terje Nordvik, Zhu XiaoJin y Laurent Laveder).

DIVERSIÓN CON LOS ARCOÍRIS

La anchura habitual de un arcoíris primario es de $2,25^\circ$, para el arcoíris secundario es de aproximadamente el doble de ese valor (que es la razón por la que su brillo es menor). La anchura es mayor que la diferencia del ángulo de dispersión dada en la [Figura 77](#) porque el tamaño angular del Sol, unos $0,5^\circ$, tiene que (de manera aproximada) ser agregada encima de la diferencia del ángulo.

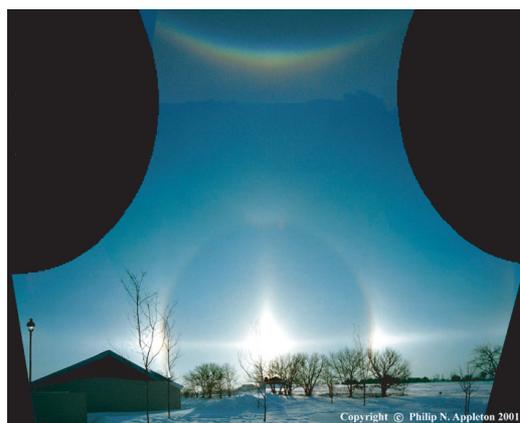


FIGURA 84 Una fotografía compuesta que muestra los parhelios, los pilares de luz, el halo y el arco tangente superior formado por los cristales de hielo en el aire, si todos están orientados en la misma dirección (© Philip Appleton).

Página 110

El tamaño finito de las gotas produce, vía interferencia, el arcoíris adicional, tal como se mencionó anteriormente. Si las gotas fueran pequeñas y todas del mismo tamaño, el número de arcoíris adicionales aumentaría, como sorprendentemente muestra la **Figura 82**.

Ref. 60

Si las gotas son finas en extremo, el arcoíris sería blanco; ese caso recibe el nombre de *arcoíris de niebla*. Tales arcoíris son visto con frecuencia desde los aeroplanos. Si las gotas no son redondas, por ejemplo debidas a un fuerte viento, se puede convertir en el conocido como *irregular* o *arcoíris hermanados*. En la **Figura 83** se muestra un ejemplo.

Desafío 133 e

La luz de un arcoíris está polarizada tangencialmente. Puede comprobarlo fácilmente con unas gafas polarizadas. Durante la reflexión interna de las gotas de agua, como el ángulo de reflexión está muy cerca del ángulo en el que se establece la reflexión total, la luz se polariza. (¿Por qué conduce ésto a la polarización?)

Desafío 134 ny

Si el aire estuviera lleno de cristales de hielo en lugar de gotas de agua, la situación cambiaría otra vez. Entonces se podrían obtener imágenes adicionales del Sol en la dirección del Sol. Se conocen como *parhelios*, a veces también como Perros solares. Esto ocurriría con más claridad si no hubiera viento, y si todos los cristales estuvieran orientados en la misma dirección. En ese caso se podrían tomar fotografías como la mostrada en la **Figura 84**.

Arcos extraños y otros efectos atmosféricos increíbles son mejor explorados en el sitio web que ofrece la 'imagen óptica del día' en www.atoptics.co.uk/opod.htm. Allí se pueden encontrar arcoíris de tercer y cuarto orden, arcoíris de niebla que incluyen arcoíris adicionales, arcoíris de niebla lunares, arcoíris cuyo arco secundario tiene arcos adicionales, arcoíris irregulares, monoarcos, arcos cicuncenitales, halos solares, pilares solares, fognazos verdes, y mucho más. La website ofrece la belleza de la luz en la Naturaleza – y todos los efectos son explicados en detalle.

¿CUAL ES LA VELOCIDAD DE LA LUZ? ¿QUÉ ES LA VELOCIDAD DE SEÑAL?

La física habla del movimiento. Hablar consiste en intercambiar sonidos; y el sonido es un ejemplo de señal.



FIGURA 85 Un extraño arco circuncenital formado por cristales de hielo hexagonales en las regiones superiores de la atmósfera (© Paul Gitto).

- ▷ Una *señal (física)* es el transporte de información utilizando el transporte de energía.

Vol. I, página 354

No hay señales sin un movimiento de energía. En realidad, no hay forma de almacenar información sin almacenar energía. A cualquier señal podemos así, asignar una velocidad de propagación. A esto lo llamamos *velocidad de señal*. La velocidad de señal más alta posible es también la velocidad máxima de influencias generales, o, por utilizar un lenguaje descuidado, la velocidad máxima con la que los efectos propagan causas.

Si la señal es transportada por la materia, tal como el texto escrito en una carta, la velocidad de la señal es la velocidad del portador material. Los experimentos demuestran que esta velocidad está limitada por la velocidad de la luz.

Para una onda portadora, como las ondas de agua, el sonido, la luz o las ondas de radio, la situación es menos evidente. ¿Cuál es la velocidad de una onda? La primera respuesta que acude a nuestra mente es la velocidad con la que se mueven las crestas de onda de una onda sinusoidal. Esta *velocidad de fase*, de la que hemos hablado anteriormente, viene dada por la razón entre la frecuencia y la longitud de onda de una onda monocromática. es decir, por

$$v_{\text{ph}} = \frac{\omega}{k}. \quad (71)$$

Por ejemplo, la velocidad de fase condiciona los fenómenos de interferencia. La luz en el vacío tiene la misma velocidad de fase $v_{\text{ph}} = c$ para todas las frecuencias. ¿Es capaz de imaginar un experimento que lo pruebe con gran precisión?

Desafío 135 s

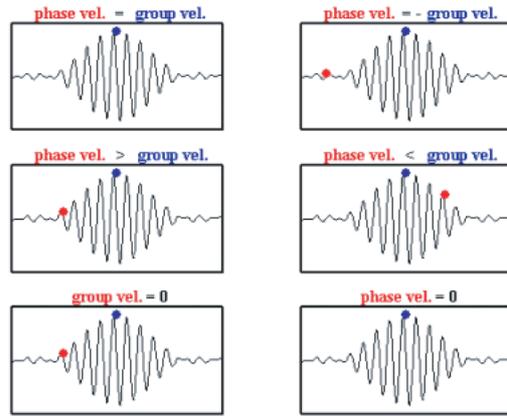


FIGURA 86 Visualización de velocidad de grupo (azul oscuro) y velocidad de fase (rojo brillante) para diferentes tipos de ondas (QuickTime film © ISVR, University of Southampton).

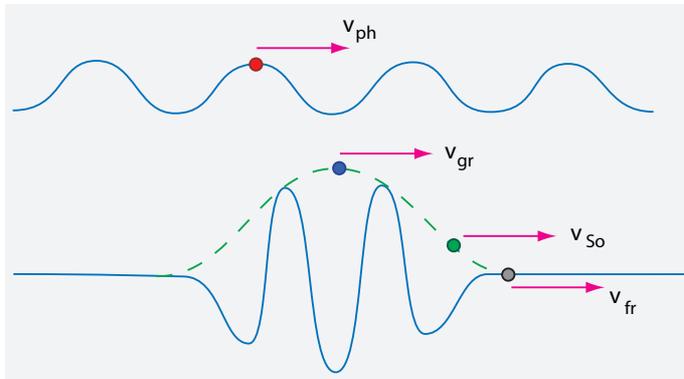


FIGURA 87 Definición de las velocidades importantes en los fenómenos de ondas: La velocidad de fase, la velocidad de grupo, la velocidad del frente de Sommerfeld y la velocidad más adelantada (o del primero).

Ref. 89 Por otro lado, hay casos en los que la velocidad de fase es *mayor* que c , más notablemente cuando la luz viaja a través de una sustancia absorbente, y cuando al mismo tiempo la frecuencia es próxima a un máximo de absorción. En estos casos no obstante, los experimentos muestran que la velocidad de fase *no* es la velocidad de señal. En tales situaciones, la mejor aproximación a la velocidad de señal es la *velocidad de grupo*, es decir, la velocidad máxima a la que viajará un grupo. Esta velocidad viene dada por

$$v_{gr} = \left. \frac{d\omega}{dk} \right|_{k_0}, \tag{72}$$

donde k_0 es la longitud de onda principal del paquete de ondas del que se toma la derivada. Observemos que $\omega = c(k)k = 2\pi\nu_{ph}/\lambda$ implica la relación

$$v_{gr} = \left. \frac{d\omega}{dk} \right|_{k_0} = v_{ph} - \lambda \frac{dv_{ph}}{d\lambda}. \tag{73}$$

Esto quiere decir que el signo del último término determina si la velocidad de grupo es

mayor o menor que la velocidad de fase. Para un grupo que se mueve, como muestra la línea rayada de la [Figura 87](#), esto quiere decir que aparecerán nuevos máximos bien al final o bien al frente del grupo. Los experimentos demuestran que éste sería el caso sólo para una luz que pase *a través de la materia*; para la luz *en el vacío*, la velocidad de grupo tendría el mismo valor $v_{\text{gr}} = c$ para todos los valores que la magnitud del vector de onda k .

Debe tener presente que en muchas publicaciones todavía se difunde la afirmación incorrecta de que la velocidad de grupo *en un medio material* nunca es mayor que c , la velocidad de la luz en el vacío. Realmente, la velocidad de grupo en un medio material puede ser cero, infinito o aún negativa; esto sucede cuando el pulso de luz es muy estrecho, es decir, cuando incluye un amplio rango de frecuencias o, nuevamente, cuando la frecuencia es próxima a una transición de absorción. En muchos casos (pero no en todos) el grupo se encuentra sustancialmente extendido o incluso dividido, haciendo muy difícil definir el máximo del grupo y por tanto su velocidad. Estas predicciones han sido confirmadas por muchos experimentos. Por ejemplo, la velocidad de grupo medida en ciertos materiales ha resultado ser *diez veces* la de la luz. Entonces, el índice refractivo es menor que 1. No obstante, en todos estos casos la velocidad de grupo *no* coincide con la velocidad de señal.*

Desafío 136 ny

Ref. 90

Entonces, ¿cuál es la mejor velocidad para calcular la propagación de la señal? Arnold Sommerfeld** casi resolvió el principal problema principios del siglo XX. Definió la velocidad de señal como la velocidad v_{so} de la *pendiente frontal* del pulso. La definición se ilustra en la [Figura 87](#). La definición no se puede resumir en una fórmula, pero tiene la propiedad de que describe la propagación de señal para casi todos los experimentos, en particular aquellos en los que la velocidad de grupo y la de fase son mayores que la velocidad de la luz. Cuando se estudiaron sus propiedades, se encontró que para ningún material la velocidad de señal de Sommerfeld es mayor que la velocidad de la luz en el vacío.

Ref. 89

A veces resulta más fácil conceptualmente describir la propagación de señal con la ayuda de la velocidad de energía. Como se mencionó anteriormente, toda señal transporta energía. La *velocidad de energía* v_{en} se define como la razón entre la densidad de flujo de energía \mathbf{S} , i.e., el vector de Poynting, y la densidad de energía W , ambos tomados en la dirección de propagación. Para campos electromagnéticos – los únicos suficientemente rápidos para resultar interesantes como señales superluminales eventuales – esta razón es

$$\mathbf{v}_{\text{en}} = \frac{\langle \mathbf{P} \rangle}{\langle W \rangle} . \quad (74)$$

No obstante, como en el caso de la velocidad del frente, en el caso de la velocidad de energía tenemos que especificar el procedimiento de promedio subyacente, indicado por

* En mecánica cuántica, Erwin Schrödinger probó que la velocidad de un electrón viene dada por la velocidad de grupo de su función de onda. Por tanto la misma discusión reaparece en la teoría cuántica, como encontraremos en el siguiente volumen de nuestro ascenso a la montaña.

** Arnold Sommerfeld (b. 1868 Königsberg, d. 1951 Munich) fue una figura principal en el desarrollo de la relatividad especial y la general, de la teoría cuántica y de sus aplicaciones. Profesor en Munich, un excelente maestro y autor de libros de texto, trabajó sobre la teoría atómica, la teoría de los metales y sobre la electrodinámica, y fue el primero en comprender la importancia y el misterio sobre 'la famosa constante de estructura fina de Sommerfeld.'

$\langle \rangle$, es decir, si nos referimos a la energía transportada por el pulso principal o por el frente de ella. En el vacío, ninguna de las velocidades es mayor que la velocidad de la luz.* (En general, la velocidad de la energía en la materia tiene un valor ligeramente diferente de velocidad de señal de Sommerfeld.)

Ref. 89

En los años recientes, el progreso en la tecnología de detectores de luz, que permite la detección de las energías más pequeñas, ha forzado a los científicos a tomar la más rápida de todas estas velocidades de energía para describir la velocidad de señal. Utilizando detectores de sensibilidad lo más alta posible, se puede usar como señal el primer punto del tren de ondas cuya amplitud sea diferente de cero, i.e., la primera cantidad (mínima) de energía que llega. La velocidad de este punto, conceptualmente similar a la señal de velocidad de Sommerfeld, es conocido comúnmente como *velocidad del frente* o, para distinguirlo aún más del caso de Sommerfeld, la *velocidad del primero* (forerunner velocity). Simplemente viene dada por

Desafío 137 s

$$v_{fr} = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \frac{\omega}{k}. \quad (75)$$

La velocidad del primero *nunca* es mayor que la velocidad de la luz en el vacío, incluso en materiales. De hecho es precisamente c porque, para frecuencias extremadamente altas, la razón ω/k es independiente del material, y se asumen las propiedades del vacío.

- ▷ La velocidad del primero es la velocidad de señal verdadera o la *verdadera velocidad de la luz*.

Utilizando la velocidad del primero, todas las discusiones sobre la velocidad de la luz se hacen claras e inequívocas.

Desafío 138 s

Para terminar esta sección, he aquí dos desafíos para usted. ¿Cuál de todas las velocidades de la luz es medida en los experimentos para determinar la velocidad de la luz, es decir, cuando la luz se envía a la Luna y se recibe una vez reflejada? Y ahora uno más difícil: ¿por qué la velocidad de señal de la luz dentro de la materia es menor que en el vacío, tal como muestran los experimentos?

Desafío 139 s

SEÑALES Y PREDICCIONES

Cuando una persona lee un texto por teléfono a un vecino que lo escucha y que quizás lo repite, estamos hablando de comunicación. Para una tercera persona, la velocidad de comunicación es siempre menor que la velocidad de la luz. Pero si el vecino ya conoce el texto, lo puede recitar sin haber escuchado la voz de su vecino. Para el tercer observador tal situación parece implicar un movimiento que es más rápido que la luz. La predicción puede por tanto *imitar* la comunicación y, en particular, puede imitar la comunicación más-rápidamente-que-la-luz (superluminal). Tal situación fue demostrada de la manera más espectacular en en 1994 por Günter Nimtz, quien de manera similar transportó

Ref. 91

* Las señales no sólo transportan energía, también llevan entropía negativa ('información'). La entropía de un transmisor se incrementa durante la transmisión. El receptor decrece en entropía (pero menos que el incremento del transmisor, por supuesto).

Ref. 92

Ref. 93

Obsérvese que la velocidad de grupo negativa implica transporte de energía en contra de la velocidad de propagación de la luz. Esto es solamente posible para los materiales *cargados de energía*.

TABLA 15 Propiedades experimentales del vacío *plano*, y el clásico, sin tener en cuenta por tanto todos los efectos cuánticos y todos los efectos de la relatividad general.

PROPIEDAD FÍSICA	VALOR EXPERIMENTAL
Permeabilidad	$\mu_0 = 1,3 \mu\text{H/m}$
Permitividad	$\epsilon_0 = 8,9 \text{ pF/m}$
Impedancia de onda/resistencia	$Z_0 = 376,7 \Omega$
Invariancia conforme	es aplicable
Dimensionalidad espacial	3
Topología	\mathbb{R}^3
Fricción sobre cuerpos en movimiento	ninguno
Componentes	ninguno
Masa y contenido energético	ninguno
Movimiento	ninguno

música – toda la música es predecible para escalas de corta duración – a través de un sistema 'más-rápido-que-la-luz'. Para distinguir entre las dos situaciones, observemos que en el caso de la predicción, no tiene lugar ningún transporte de energía, a diferencia de lo que ocurre en el caso de la comunicación. En otras palabras, la definición de señal como un transporte de información, no resulta tan útil e inequívoco como si la definimos como un *transportador de energía*. En el experimento mencionado anteriormente, ninguna energía era transportada a más velocidad que la de la luz. La misma distinción entre predicción, por una parte, y señal o propagación de energía, por la otra, se utilizará más adelante para clarificar algunos experimentos famosos en mecánica cuántica.

“ Si se incrementa el ritmo al que los documentos de física están siendo publicados, los periódicos sobre física pronto ocuparán las baldas de las bibliotecas con más rapidez que la velocidad de la luz. Esto no viola la relatividad ya que ninguna información útil está siendo transmitida. ”

David Mermin

ADIOS, ÉTER

Los rayos Gamma, los rayos-X, la luz y las ondas de radio son ondas electromagnéticas que se mueven. Todo existe en el espacio vacío. ¿Qué está oscilando cuando viaja la luz? El mismo Maxwell llamó al 'medio' de oscilación *éter*. Las propiedades del medio de oscilación que se miden en los experimentos están contenidos en la [Tabla 15](#). Los valores numéricos extraños son debidos a la definición de las unidades henrio y faradio.

Página 382

Ref. 94

La última entrada de la [Tabla 15](#) es la más importante: a pesar de intensivos esfuerzos, nadie ha sido capaz de detectar ningún *movimiento* del llamado éter. En particular, no hay ningún movimiento del éter relativo al vacío. En otras palabras, aún en el caso de que supuestamente el éter oscilara, no se movería. Unido al resto de datos, todos estos resultados se pueden resumir en una frase: No hay manera de distinguir el éter del vacío.

Desafío 140 e

A veces se oye que determinados experimentos o incluso la teoría de la relatividad demuestran que el éter no existe. Hay una gran cantidad de verdad en esta frase; de hecho, los experimentos demuestran algo todavía más importante:

▷ El éter es *indistinguible* del vacío.

Esta afirmación es verdadera en todos los casos. Por ejemplo, en la sección de la relatividad general, nos damos cuenta de que un vacío curvo *se puede* mover; pero el éter todavía permanecerá indistinguible con respecto a él.* También la teoría del campo cuántico confirma la identidad del éter y el vacío.

Entonces, ¿qué oscila en el caso de las ondas electromagnéticas? Ahora podemos responder de forma sencilla a esta vieja pregunta: el vacío. El vacío es el portador, o el medio portador, de las ondas electromagnéticas. El vacío plano invariante de Lorentz transporta ondas, incluso aunque no pueda moverse y no proporcione un sistema favorito coordinado. El vacío plano es por tanto algo especial, y es también aceptable para evitar los términos 'portador' o 'medio' de manera conjunta. En algunos clubes extraños es incluso obligatorio hacerlo. No obstante, esta evasión es imposible en la relatividad general, como hemos visto, e igualmente imposible en la teoría del campo cuántico, como tendremos ocasión de ver.**

En resumen, los experimentos en el dominio de la relatividad especial, han *abolido* el éter: es un concepto superfluo; el vacío físico tiene muchas de las propiedades que una vez se le adscribieron al éter. De ahora en adelante, abandonaremos el concepto de éter de nuestro vocabulario. Por otro lado, todavía no hemos concluido el estudio del vacío; el vacío nos mantendrá ocupados durante el resto de nuestro paseo, comenzando con la parte siguiente de nuestra aventura, la parte sobre la física cuántica. En realidad, la física cuántica demuestra que todos los valores experimentales de la [Tabla 15](#) requieren enmiendas.

Ref. 95

Desafío 141 d

DESAFÍOS Y CURIOSIDADES DIVERTIDAS SOBRE LA LUZ, LA POLARIZACIÓN Y LA FASE GEOMÉTRICA

Desafío 142 s Ya que la luz es una onda, algo debería suceder si es dirigida a un agujero con un diámetro inferior a su longitud de onda. ¿Qué pasa exactamente?

* *

En un día soleado en latitudes moderadas de la Tierra, la luz solar tiene una densidad de potencia de 1 kW/m^2 . ¿cuál es la densidad de energía correspondiente y cuales son los

Ref. 95

* Historicamente, el término 'éter' ha sido utilizado como expresión de varias ideas diferentes, dependiendo del autor. Ante todo fue usado para expresar la idea de que el vacío no está deshabitado, sino *lleno*; en segundo lugar, que esta plenitud puede ser descrita por *modelos mecánicos*, tales como engranajes, pequeñas esferas, vórtices, etc.; en tercer lugar, se imaginaba que el éter era una *substancia*, parecida a la materia. Todas estas ideas se están tomando un descanso a causa de la relatividad. Sin embargo, estos asuntos reaparecerán en la última parte de nuestra escalada a la montaña, cuando se explore la descripción del vacío en sí mismo.
** En 2013, la German Physical Society publicó una experta opinión oficial estableciendo que "las ondas electromagnéticas no necesitan al vacío como portador." La sociedad también desea que todos los profesores de física les digan a sus alumnos esta falsa afirmación. Los físicos de todo el mundo todavía se están riendo.

Desafío 143 s campos eléctricos y magnéticos promedios?

* *

Desafío 144 s A la luz espectralmente pura se la conoce como 'monocromática'. ¿Por que no es un nombre adecuado?

* *

Desafío 145 e La electrodinámica demuestra que los rayos de luz siempre empujan; nunca tiran. ¿Puede confirmar que los 'rayos tractores' son imposibles en la Naturaleza?

* *

Es bien conocido que el material brillante de una bombilla es un alambre de tungsteno en un gas inerte. Este fue el resultado de una serie de experimentos que comenzaron con la abuela de todas las bombillas, llamada pepino. Las anteriores generaciones sabían que los pepinos en vinagre, cuando se conectaban a una toma de 230 V, brillaban con una luz verde clara. (Tenga cuidado; el experimento es sucio y peligroso.)

* *

Ref. 96 Los rayos de luz poseen una temperatura efectiva y una entropía. Aunque actualmente no se discute mucho sobre ello, la termodinámica de la luz fue explorada con mucho detalle por Max von Laue (b. 1879 Koblenz, d. 1960 Berlin) entre los años 1900 y 1906. Von Laue demostró que la propagación de luz corriente en el espacio vacío es un proceso reversible y que la entropía de un rayo, ciertamente permanece constante en este caso. Cuando la luz es difractada, dispersada por partículas o reflejada difusivamente, la temperatura efectiva decrece y la entropía se incrementa. El caso más interesante es la interferencia, donde en general se aumenta la entropía, aunque algunas veces disminuya.

* *

Hemos visto que la luz tiene energía, momento lineal, momento angular, entropía, temperatura, presión, potencial químico y, como veremos en el próximo volumen, está formada por cuantos. Por tanto tiene sentido afirmar que:

▷ La luz es una sustancia.

Desafío 146 s Disfrute explorando esta conclusión.

* *

La impedancia de onda del vacío de $376,7 \Omega$ tiene consecuencias prácticas. Si una onda electromagnética choca contra una película grande, delgada y resistente a lo largo de la dirección perpendicular, el valor numérico de la resistencia de la película condicionará el resultado de lo que ocurra. Si la resistencia de la película es muy *superior* a $376,7 \Omega$ por cuadrado, la película será esencialmente transparente, y la onda será *transmitida*. Si la resistencia de la película fuera mucho menor de $376,7 \Omega$ por cuadrado, la película sería esencialmente un corto circuito para la onda, y la onda sería *reflejada*. Finalmente, si la resistencia de la película fuera *comparable* a $376,7 \Omega$ por cuadrado, la película sería coincidente con la impedancia y la onda sería *absorbida*.

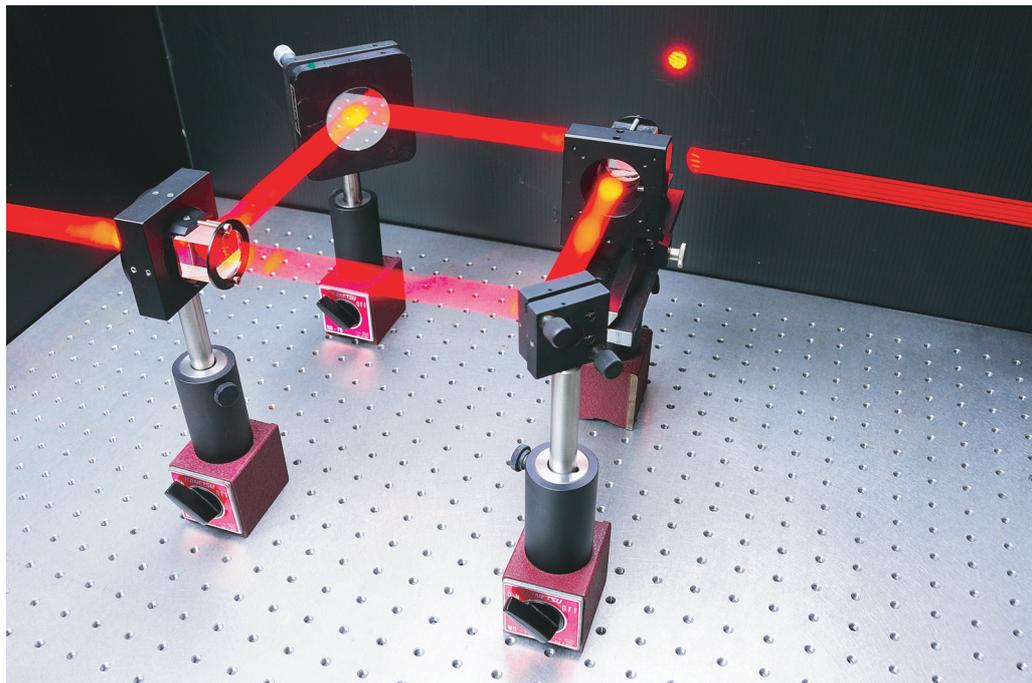
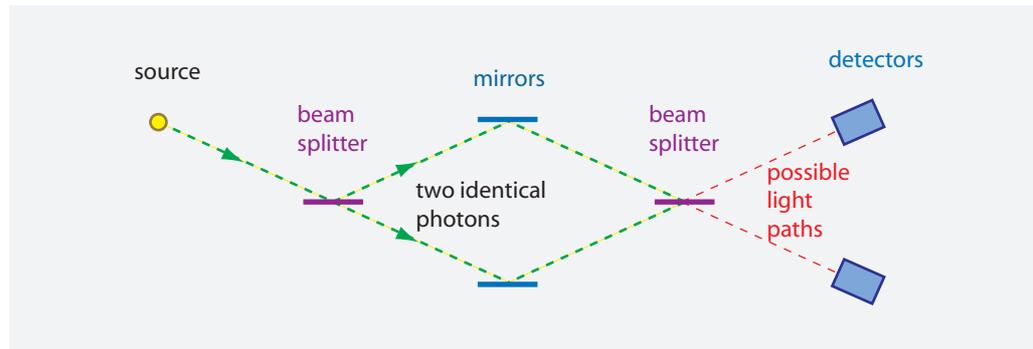


FIGURA 88 Un interferómetro convencional (Mach-Zehnder) bidimensional, con lados de igual longitud, y sus salidas A y B. La luz sale en dirección A, la dirección forzada de la interferencia (foto © Félix Dieu y Gaël Osowiecki).

* *

Si las luces emitidas por los faros delanteros de los coches fueran polarizadas desde la parte inferior izquierda hacia la parte superior derecha (tal como se ven desde la parte del conductor) se podría mejorar enormemente la calidad de la conducción nocturna: se podría añadir un polarizador al parabrisas orientado en la misma dirección. Como resultado, un conductor vería la reflexión de sus propias luces, pero las luces de los coches en contra se reduciría considerablemente. ¿Por qué no se hace esto en los coches modernos?

Desafío 147 s

* *

¿Podría la luz tener una masa minúscula, y moverse con una velocidad justamente por

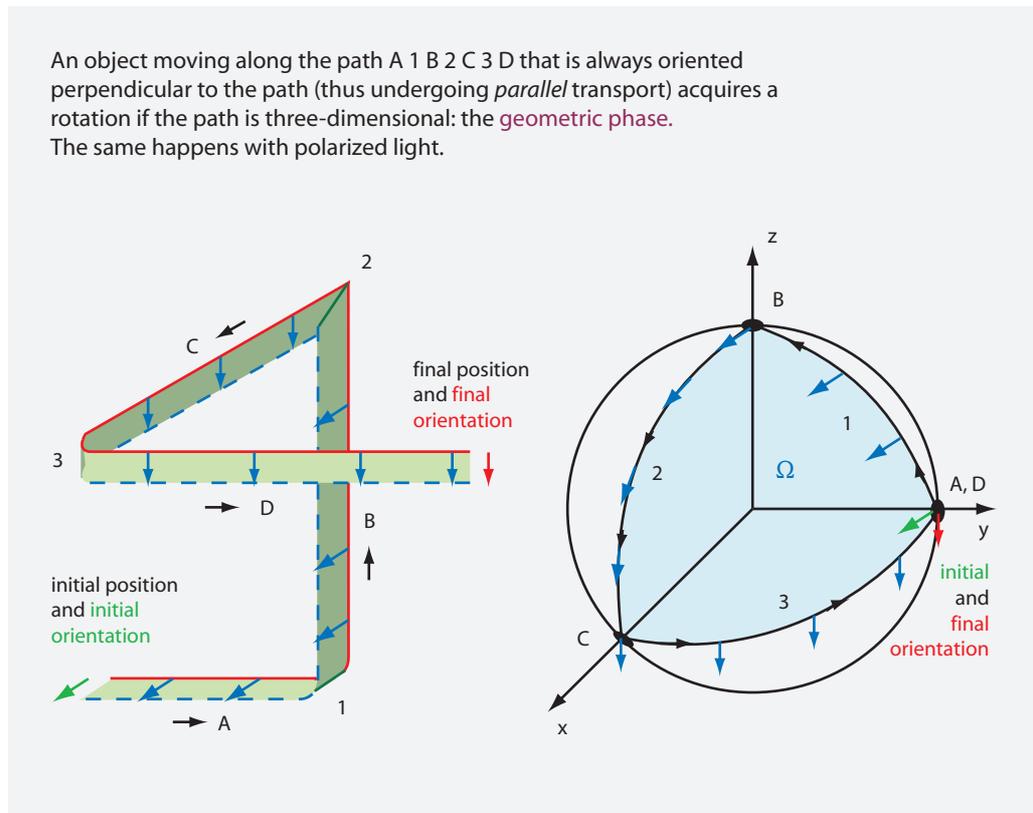


FIGURA 89 izquierda: un camino tridimensional trazado por un objeto puntiagudo que se comporta como la polarización de la luz. las curvas 1, 2 y 3 podrían ser producidas por espejos. Derecha: el ángulo de rotación de la polarización viene dado por el ángulo sólido Ω , la fase geométrica, encerrada por el camino.

Ref. 97

debajo de la máxima velocidad posible en la Naturaleza? La cuestión ha sido estudiada concienzudamente. Si la luz tuviera masa, las ecuaciones de Maxwell tendrían que ser modificadas, la velocidad de la luz dependería de la frecuencia y de la fuente y el detector de la luz, y existiría la radiación electromagnética longitudinal. A pesar de la promesa de conseguir fama eterna, tal efecto nunca ha sido observado

* *

Un rayo de luz puede ser polarizado. La dirección de polarización se puede modificar enviando la luz a través de materiales que sean birrefringentes, tales como cristales líquidos, calcita o polímeros estirados. Pero la polarización también puede ser modificada con la ayuda de espejos. Para conseguir un cambio de polarización de esta manera, el camino tiene que ser genuinamente tridimensional; el camino no debe permanecer en un plano.

Para comprender la rotación de la polarización mediante espejos, la mejor herramienta es la llamada *fase geométrica*. La fase geométrica es un ángulo que se da en el camino tridimensional de cualquier onda polarizada. La fase geométrica es un fenómeno general que aparece en la onda de luz, la función de onda, y aún en las oscilaciones mecánicas

transversales. Para visualizar la fase geométrica, mire la [Figura 89](#).

Ref. 98 La imagen izquierda de la [Figura 89](#) puede verse como una tira de papel o como un cinturón de cuero doblado en el espacio, con un lado coloreado en blanco y el otro en oscuro. No es ninguna sorpresa que la orientación de la banda del final difiera de la del principio. Imagine que sigue el camino de la banda con la palma de su mano, a lo largo de las tres dimensiones. Al final del camino, su brazo se habrá retorcido. Este ángulo de torsión es la *fase geométrica* producida por el camino.

En lugar de una mano que sigue la tira de papel, imagine que es un rayo de luz polarizada la que lo hace por el centro de la tira. En las curvas, unos espejos cambian el movimiento de la luz, pero para cada minúsculo avance, la polarización permanece paralela a la polarización inmediatamente anterior. Se puede hablar de *transporte paralelo*. El resultado para la luz es el mismo que para el cinturón: al final del camino, la polarización del rayo de luz ha sido rotada. En resumen, *el transporte paralelo en tres dimensiones tiene como resultado una fase geométrica*. En particular, es por lo tanto posible rotar la polarización de un rayo de luz solamente con la ayuda de espejos.

Vol. I, página 150 También las oscilaciones mecánicas transversales funcionan de esta manera. Cuando oscila un péndulo de Foucault, su camino – como segmento de un círculo debido a la rotación de la Tierra – es tridimensional. La dirección de oscilación – similar a la polarización de la luz o a la orientación de la tira de papel – cambia a lo largo del camino.

Vol. IV, página ?? Como las funciones de onda de la mecánica cuántica vienen descritas también por una fase transversal, mostrarán efectos similares cuando se siga el pasillo tridimensional. El efecto de Aharonov-Bohm es un ejemplo de una situación donde un camino tridimensional conduce a un cambio de fase.

Desafío 148 ny El otro dibujo abajo a la derecha en la [Figura 89](#), ilustra la llamada *esfera de direcciones*, que muestra cómo calcular el ángulo de rotación para un camino específico. *La fase geométrica resulta ser el ángulo sólido encerrado por el camino*. En resumen, el ángulo de fase geométrica viene dado por ángulo sólido encerrado. Con este resultado, la fase geométrica dejará de ser un misterio para siempre. (Para caminos que no estén cerrados en la esfera de direcciones, el cálculo aún puede ser llevado a cabo cerrando adecuadamente el camino en la esfera.) Un bonito caso es el experimento en el cual la luz polarizada es alimentada en una fibra óptica helicoidal. En este caso, la fase geométrica viene fijada por la longitud de la fibra y el cabeceo de la hélice. Los efectos de la fase geométrica también han sido observados en las moléculas, en los núcleos, en los rayos de neutrones, en interferómetros de todas clases, en aceleradores de partículas, en giróscopos, en la relatividad general y en muchos otros escenarios.

Ref. 99

Históricamente, la fase geométrica ha sido descubierta por mucha gente en diferentes campos de la física. El investigador que se dio cuenta de su importancia general en la física cuántica fue Michael Berry in 1983, pero la fase ya era conocida en física cuántica, óptica y mecánica mucho tiempo antes, mediante, entre otros, los trabajos en física nuclear de Christopher Longuet-Higgins en la década de 1950, por el trabajo sobre la luz llevado a cabo por el joven genio Shivaramakrishnan Pancharatnam también en la década de 1950, por el trabajo sobre las moléculas de Alden Mead en la década de 1970, y, naturalmente, a través del mencionado péndulo de Foucault de 1851. Pero también los errores del carro que apunta al sur, mencionado con anterioridad, son debidos a la fase geométrica. Siguiendo a Michael Berry, el fenómeno es ahora llamado *fase geométrica*. Antiguas expresiones, tales como fase adiabática, fase topológica, fase cuántica, fase de

Vol. I, página 260

Vol. I, página 206

Berry y otros términos distintos, ya no son utilizados.

Tras esta excursión, he aquí un desafío del mundo real. ¿Cual es el menor número de espejos que necesita un dispositivo para cambiar la polarización de un rayo de luz que abandona el dispositivo en la misma dirección con la que entra?

Desafío 149 s

* *

En muchos sistemas ópticos – incluyendo sistemas láser y cámaras – la polarización de la luz está controlada con la ayuda de *placas de onda*. Estas placas, están construidas con materiales birrefringentes. Un placa de onda de *media onda* permite rotar la polarización de un rayo polarizado linealmente. Si la placa de onda es rotada en un ángulo de α , la polarización del rayo rota un ángulo de 2α . Una placa de onda de *un cuarto de onda* transforma la polarización lineal en una polarización circular – y viceversa.

* *

Los vikingos no disponían de brújulas ni de relojes. Sin embargo, fueron capaces de navegar con precisión a través del Océano Atlántico durante muchas veces y largas distancias. Parece ser que ellos utilizaban 'piedras solares' como dispositivo de navegación, que con mucha probabilidad se trataba de cristales birrefringentes, tal como la calcita, la cordierita o la turmalina. Probablemente los vikingos tenían un cristal orientable en sus barcos. Con el cristal, un navegante podía determinar la posición del Sol y manejar su barco en consecuencia. El método utilizado es todavía un asunto en disputa; podría haber sido un método similar al utilizado por las abejas o determinadas arañas, que permiten determinar la posición del Sol aún con el tiempo nublado o durante el crepúsculo. Esto permitía navegar a lo largo de una latitud constante con suficiente precisión, aún para travesías de tres semanas. Las incertidumbres resultantes han sido simuladas numéricamente; pero el método todavía tiene que ser probado sobre un barco real.

Página 122

Ref. 100

* *

Un interferómetro es un dispositivo que utiliza la interferencia de la luz para estudiar las propiedades de un rayo de luz. Un interferómetro corriente, interferómetro de Mach-Zehnder, se muestra en la [Figura 88](#). Si todos los lados son de la misma longitud, la luz interfiere constructivamente en la dirección de salida A y destructivamente en la otra dirección de salida B. Por consiguiente, la luz sale en dirección A.

Ref. 101

Solamente hasta la década de 1990 la gente no comenzó a preguntarse que pasaría en los inteferómetros *tridimensionales*, tal como el mostrado en la [Figura 90](#). Con objeto de clarificar la situación, son necesarias algunas puntualizaciones. Primero, se necesita especificar la polarización de la luz utilizada, y recordar que sólo una luz con la misma polarización puede interferir. En segundo lugar, para simplificar la discusión, asumimos que los espejos son de un tipo especial (llamados cubos de esquina basados en la refracción total.) de tal manera que, a diferencia de los espejos normales, *conservan* la polarización. En tercer lugar, se asume que todos los lados tienen la misma longitud. ¿Podría deducir qué salidas son las brillantes en los dos casos de la [Figura 90](#)?

Desafío 150 s

* *

Resulta imposible construir un dispositivo de cristal que permita llevar a cabo una analogía óptica del experimento de Stern-Gerlach. El llamado *triprisma de Fresnel* separa

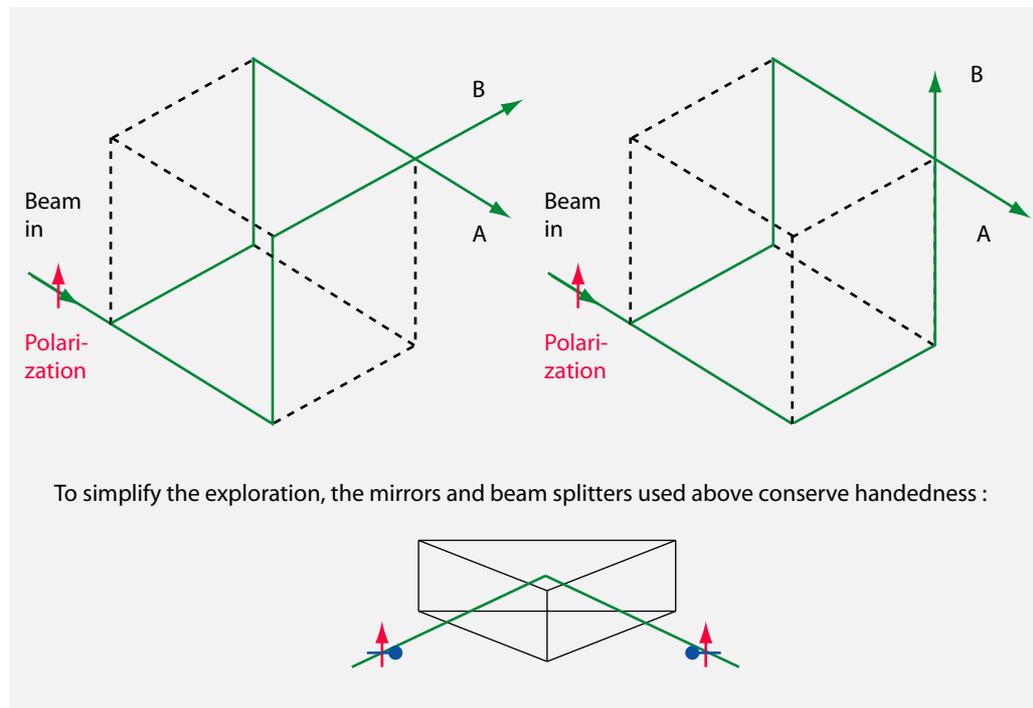


FIGURA 90 Dos interferómetros tridimensionales diferentes, con todos los bordes de igual longitud, los espejos/rayos divididos utilizados, y sus salidas A y B. ¿Por dónde sale la luz?

un rayo de luz en sus componentes polarizados a izquierda y derecha. Para conseguir esto, tres dobles prismas de refracción a diferente mano están pegados en una disposición geométrica adecuada.

Ref. 103

* *

En regiones de interferencia destructiva se encuentran las llamadas *singularidades de fase*. Si la luz que interfiere es blanca, tales regiones no son negras pero muestran, si se amplifica la intensidad, unos patrones de colores fascinantes. Estos colores, ya predichos en la década de 1970, fueron encontrados experimentalmente varias décadas después. Siguen un patrón universal azul-naranja.

Ref. 102

* *

Las ecuaciones de Maxwell sobre los campos electromagnéticos tienen 150 años de antigüedad. ¿Se conoce todo acerca de ellas? Probablemente no. Por ejemplo, hasta la década de 1990 Antonio Rañada no descubrió que las ecuaciones tienen solución para líneas de campos *anudadas*. Las soluciones más espectaculares hasta ahora han sido publicadas por Arrayás y Trueba. Probablemente están esperando a ser encontrados muchos más resultados sorprendentes.

Ref. 104

RESUMEN SOBRE LA LUZ

Las ondas de radio, la luz infrarroja, la luz visible, la luz ultravioleta, los Rayos-X y los Rayos Gamma son ondas electromagnéticas. Sus relaciones de dispersión en el vacío es $\omega = ck$, donde la velocidad de fase $c = 299\,792\,458$ m/s, es una constante universal, un invariante. Las ondas electromagnéticas transportan energía, momento lineal y momento angular. En el vacío, la velocidad de fase es también la velocidad de grupo y la velocidad de señal. Además, la velocidad de las ondas electromagnéticas c es la velocidad (local) límite de energía en la Naturaleza: Las ondas electromagnéticas en el vacío se mueven con más rapidez que en cualquier objeto material.



LAS IMÁGENES Y EL OJO – LA ÓPTICA

Ref. 105

La óptica es el campo que explora la producción de imágenes. En particular, la óptica es el estudio y la utilización de la *generación* de la luz, del *transporte de la luz*, y de la *detección* de la luz y de la imagen. Con esta definición de la óptica, observamos inmediatamente que la electrodinámica clásica solamente puede describir el transporte de la luz. La generación y la detección de la luz son siempre efectos cuánticos. Cada lámpara es un dispositivo sometido a la física cuántica. Cada detector de luz, incluyendo el ojo, está condicionado por en la física cuántica. Por tanto, en este capítulo exploraremos principalmente el movimiento de la luz y la manera en la que se forman imágenes, y sólo daremos una pequeña introducción sobre las fuentes de luz y del ojo. La generación de la luz la exploraremos con más detalle en el volumen sobre física cuántica.

FORMAS DE CAPTAR IMÁGENES

La captación de imágenes es una parte importante de la sociedad moderna. La calidad de las imágenes dependen del uso inteligente de la óptica, la electrónica y de los materiales científicos. A pesar de la larga historia de la óptica, todavía surgen nuevos resultados en este campo. Las imágenes, es decir, la reproducciones en dos o tres dimensiones de una situación física, se pueden realizar, al menos, por seis grupos de técnicas:

Ref. 106

- *La fotografía* utiliza una fuente de luz, lentes y película – o cualquier otro detector de un área extensa en el interior de la cámara. La fotografía se puede utilizar con la reflexión, con la transmisión, con dependencia de fase, con distintas iluminaciones, y con fuentes de luz y detectores de distintas longitudes de onda.
- *La microscopía óptica* utiliza fuentes de luz, sistemas de lentes de ampliación y película (o cualquier otro detector de un área extensa). Si la iluminación en la transmisión se realiza a través de la muestra, se habla de *microscopía de campo brillante*. (Hay variaciones que utilizan filtros coloreados o polarizados.) Si la iluminación es lateral, se habla de *microscopía oblicua*. Si la iluminación se limita a un anillo exterior de luz, se habla de *microscopía de campo oscuro*. Un sistema de iluminación todavía más elaborado, que utiliza ondas planas, permite *microscopía de contraste de fase*. (Fue inventada por Frits Zernike en la década de 1930 y le hizo ganar el Premio Nobel de Física en 1953.) Si se divide un haz de iluminación polarizada en dos componentes que pasan la muestra a ubicaciones próximas (pero no idénticas), y luego las recombina, se habla de *microscopía de contraste de interferencia diferencial*. Si se trata una muestra con un tinte fluorescente, la luz que ilumina se filtra de manera que solamente se observe la fluorescencia, se habla de *microscopía fluorescente*. La calidad de imagen de



FIGURA 91 Imagen fotográfica por rayos-X de un niño de diez años con polidactilidad (© Drgnu23).

Página 176

- los microscopios caros se puede mejorar todavía más con la ayuda de un ordenador, usando técnicas de desconvolución.
- *La telescopía* se utiliza sobre todo en geodesia y astronomía. Desde hace más de ciento veinte años, los telescopios son tan potentes que, con grandes aumentos, se pueden observar las estrellas durante el día. Exploraremos los telescopios más adelante. Los telescopios astronómicos más avanzados pueden compensar los efectos de las turbulencias de la atmósfera en las imágenes de las estrellas; también pueden captar imágenes a varias longitudes de ondas, que pueden ser desde frecuencias de radio, infrarrojos, luz visible, ultravioleta a rayos-X. Los telescopios sencillos se fabrican mediante de lentes; los telescopios de alto rendimiento se fabrican generalmente mediante espejos. También existen telescopios para longitudes de ondas no visibles. Los telescopios infrarrojos pueden estar instalados en el suelo, instalados en globos, en aviones o en satélites. Los telescopios UV y los de rayos-X tienen que ser operados desde fuera de la atmósfera para evitar la absorción del aire, por ejemplo desde cohetes, satélites o globos de gran altura. Todos están construidos con espejos.
 - *Las técnicas de digitalización* adquieren las imágenes punto a punto a través del movimiento de un detector, de la fuente de luz o de ambos. Existen numerosas técnicas de digitalización por microscopio: *microscopía de escaneo láser confocal*, el *microscopio óptico de escaneo de campo cercano*, que utiliza una sonda de fibra óptica, y las combinaciones de ellos con técnicas de fluorescencia o con distintas técnicas de desconvolución. Muchas de estas técnicas de microscopía de digitalización permiten resoluciones mucho más bajas que la longitud de onda de la luz, un logro que es imposible con técnicas de microscopía convencional. Las técnicas de barrido también se utilizan en campos especiales de la fotografía.
 - *La tomografía*, generalmente realizada en la transmisión, utiliza una fuente y un detector que son rotados de manera conjunta alrededor del objeto. Esta técnica, efectivamente una técnica de escaneo especializada, permite obtener imágenes de secciones transversales de cuerpos físicos. Por ejemplo, la tomografía ligera es una técnica prometedora para la detección del cáncer de mama, sin ningún riesgo para la salud.

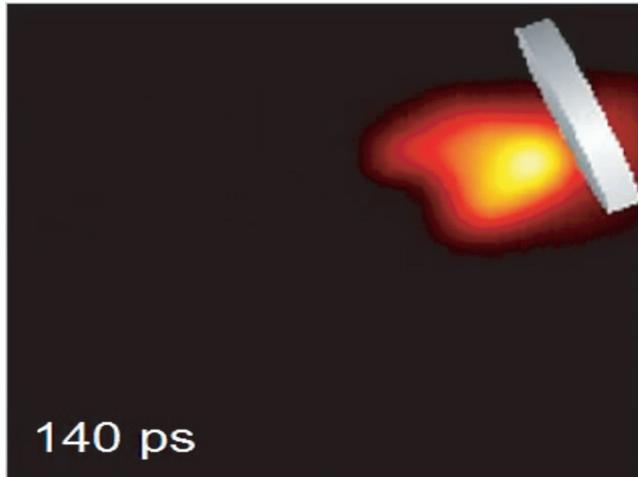


FIGURA 92 Película tomada con una cámara especial ultrarrápida mostrando un pulso corto de luz que rebota en un espejo (QuickTime film © Wang Lihong y Washington University de St. Louis).

- *La holografía* utiliza láseres y detectores de áreas extensas que permite captar imágenes tridimensionales de los objetos. Tales imágenes parecen flotar en el espacio. La holografía se puede utilizar para la reflexión o para la transmisión.

Todos los métodos de captación de imágenes se pueden utilizar con ondas de radio, luz ultravioleta, rayos-X o con rayos gamma. De hecho, estas técnicas pueden ser utilizadas incluso con haces de electrones; se habla entonces de óptica electrónica. En todos los métodos para la captación de imágenes, la carrera es doble: el objetivo del progreso es obtener imágenes con la mayor resolución posible y con el menor tiempo de obturación posible. Cuanto menor sea el tiempo de obturación, más información contendrá la película resultante. Un ejemplo que impresiona es el de la película del pulso de luz que se mueve, mostrado en la [Figura 92](#). Comencemos nuestra reseña sobre las técnicas de captación de imágenes con la herramienta más importante: las fuentes de luz.

FUENTES DE LUZ

Sin fuentes de radiación, no habría imágenes. Todas las técnicas de captación de imágenes necesitan fuentes de radiación. En el dominio de la óptica de luz visible, las fuentes de luz más comunes para la luz visible y la luz infrarroja, son los objetos *calientes*, tales como las velas, el Sol o las lámparas del flash. Físicamente hablando, estas fuentes de luz son aproximaciones a los cuerpos negros. Veamos por qué se usan. Las fuentes de luz *fría*, tales como los diodos semiconductores emisores de luz, luciérnagas o los láseres, se explorarán más adelante.

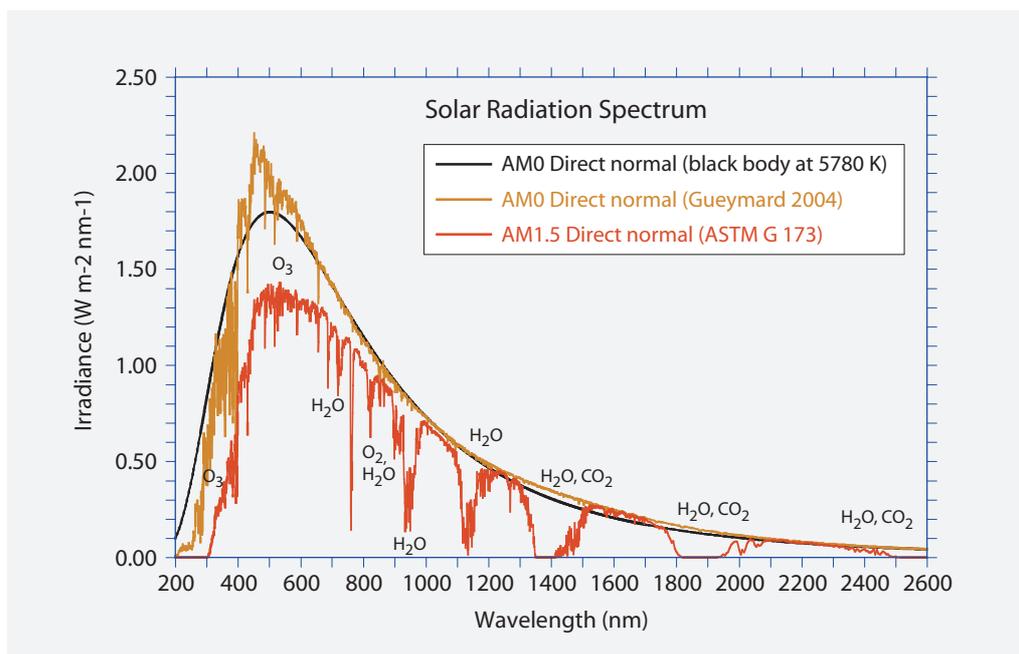


FIGURA 93 Espectro de un cuerpo negro a 5780 K, el espectro solar *sobre* la atmósfera en dirección al Sol, con 1350 W/m^2 , y el espectro con 1.5 masas de aire, o grosor de la atmósfera, entre los dos, con 844 W/m^2 . El último, presenta más o menos el espectro de un día soleado normal al nivel del mar. Se muestran también los gases responsables de las bandas de absorción (© Chris Gueymard).

¿POR QUÉ PODEMOS VERNOS LOS UNOS A LOS OTROS? CUERPOS NEGROS Y LA TEMPERATURA DE LA LUZ

Los físicos hacen un uso extraño del término 'negro'. A un cuerpo que resplandece perfectamente se le llama *cuerpo negro*. En este contexto, 'perfecto' quiere decir que la superficie del cuerpo *no* afecta a su color.

- ▷ Un *cuerpo negro* es un cuerpo que absorbe todas las radiaciones que impactan sobre él.

En otras palabras, un cuerpo negro es un cuerpo sin reflexión ni transmisión de radiación. Los cuerpos negros son una idealización; sobre todo, solamente son negros a bajas temperaturas. Con incrementos de la temperatura, los cuerpos negros resplandecen o brillan en negro, marrón, rojo, naranja, amarillo, blanco o azul claro.

La esencia de los cuerpos negros consiste en que el color que presentan, es decir, la luz que irradian, es independiente de su superficie. Los cuerpos negros son por consiguiente *ideales* en este sentido. Los cuerpos verdaderos, los que muestran efectos en su superficie, se pueden clasificar por su *emisividad*. La emisividad proporciona el grado de proximidad que presenta un cuerpo respecto a un cuerpo negro. Los espejos tienen una emisividad de alrededor de 0.02, mientras que el hollín puede alcanzar valores tan altos como 0.95. En la práctica a temperatura cotidiana ningún cuerpo es un cuerpo negro: Su color no viene determinado por la emisión, sino mayormente por la absorción y la

reflexión de la luz en sus superficie.

Los cuerpos negros, como se verá en la sección sobre teoría cuántica, presentan unos espectros de emisión de luz *delicados*. En la [Figura 93](#) se muestra un ejemplo del espectro de un cuerpo negro y el de un cuerpo real – en este caso, el del Sol.

Los cuerpos negros también se usan para definir el color *blanco*. Lo que comúnmente llamamos *blanco puro* es el color emitido por el Sol. El Sol no es un buen cuerpo negro, como muestra la [Figura 93](#) (su temperatura efectiva es de 5780 K). A pesar de estos problemas, el blanco puro se define ahora como el color de un cuerpo negro a 6500 K, p.ej. por la Commission Internationale d’Eclairage. Como hemos mencionado, los cuerpos negros más calientes son azulados, y más fríos son amarillo, naranja, rojo, marrón o negro. Las estrellas del cielo se clasifican de esta manera.

Ref. 107

Vol. I, página 279

Los cuerpos negros son por tanto cuerpos que brillan perfectamente. Los cuerpos más reales son solamente aproximaciones groseras de los cuerpos negros, aún a temperaturas a las que brillen con color amarillo claro. Por ejemplo, el tungsteno de una bombilla incandescente, a unos 2000 K, tiene una emisión de alrededor de 0.4 para la mayoría de las longitudes de onda, de tal manera que su espectro es una fracción correspondiente del tal cuerpo negro. (No obstante, el cristal de la bombilla absorbe muchos de los componentes ultravioletas e infrarrojos, de ahí que el espectro final no resulte el de un cuerpo negro.)

La radiación del cuerpo negro tiene dos propiedades importantes: primera, la potencia de la luz emitida se aumenta con la cuarta potencia de la temperatura. Solo con esta relación se puede comprobar la temperatura del Sol, mencionada anteriormente, simplemente comparando la anchura del Sol con la de su dedo pulgar cuando su brazo esté estirado. ¿Puede hacerlo? (Pista: utilice la excelente aproximación de que la temperatura media de la Tierra, de unos 14,0°C, se debe a la radiación del Sol.)

Desafío 151 d

Ref. 108

La expresión exacta para la densidad de energía u , con una frecuencia ν emitida a una temperatura T se puede calcular a partir de la ‘ley’ de radiación para los cuerpos negros descubierta por Max Planck*

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1} . \quad (76)$$

Realizó este importante descubrimiento, que discutiremos con mayor detalle en la parte cuántica de nuestro ascenso, simplemente comparando esta curva con los experimentos. La nueva constante h es llamada *cuánto de acción* o *constante de Planck*, resultó tener el valor de $6,6 \cdot 10^{-34}$ Js y es fundamental para toda la teoría cuántica como podremos comprobar. La otra constante introducida por Planck, la constante de Boltzmann k , apa-

Vol. IV, página ??

* Max Planck (b. 1858 Kile, d. 1947 Göttingen), profesor de física en Berlín, fue una figura fundamental en termodinámica. Descubrió y dio nombre a la *constante de Boltzmann* k y al *cuánto de acción* h , frecuentemente llamado constante de Planck. Su introducción a la hipótesis cuántica fue el origen de la teoría cuántica. También dio a conocer los trabajos de Einstein en la comunidad física, y posteriormente consiguió un trabajo para él en Berlín. Obtuvo el Premio Nobel de Física en 1918. Fue una figura importante para las instituciones de física de Alemania; fue uno de los muy pocos que tuvo el valor de decirle a Adolf Hitler *cara a cara* que era una mala idea la expulsión de los profesores judíos. (Obtuvo un estallido de ira como respuesta.) Famosamente modesto, con muchas tragedias en su vida personal, fue estimado por todos los que lo conocieron.

Ref. 109

rece como un prefactor de temperatura en toda la termodinámica, que actúa como una unidad para la conversión de la temperatura en energía.

Desafío 152 e La 'ley' de la radiación ofrece la expresión siguiente para la densidad total de energía emitida

$$u(T) = T^4 \frac{8\pi^5 k^4}{15c^3 h^3}. \quad (77)$$

Desafío 153 e Más adelante, a partir de ella, se deducirá la expresión para la intensidad I de radiación termal. Esa expresión, la ecuación (85), es deducida usando $I = uc/4$. (¿Por qué?)

Desafío 154 ny La segunda propiedad de la radiación del cuerpo negro es el valor del pico de la longitud de onda, i.e., la longitud de onda emitida con la intensidad más alta. Esta longitud de onda determina el color de un cuerpo negro; se calcula a partir de la ecuación (76)

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{T} \frac{hc}{4,956 k} = \frac{2,90 \text{ mm K}}{T} \quad \text{pero} \quad \hbar\nu_{\max} = T \cdot 2,82 k/h = T \cdot 5,9 \cdot 10^{10} \text{ Hz/K}. \quad (78)$$

Desafío 155 s Tras su descubrimiento, a cualquiera de esas dos expresiones se las conoce como *regla del desplazamiento de Wien para el color*.* El cambio de color con la temperatura es utilizado en los termómetros ópticos; ésta es también la forma en la que es medida la temperatura de las estrellas. Para 37°C, temperatura del cuerpo humano, se obtiene un pico de longitud de onda de 9,3 μm or 115 THz, que es por tanto el color de la mayor parte de la radiación emitida por cada ser humano. (La longitud de onda máxima no corresponde al pico de frecuencia. ¿Por qué?) Por otro lado, siguiendo las leyes de telecomunicación de muchos países, cualquier emisor de radiación, necesita una licencia para operar; de aquí se desprende que estrictamente en Alemania solamente los muertos son legales, y solamente si sus cuerpos están a una temperatura del cero absoluto.

Desafío 156 e Hemos visto que un cuerpo negro – o una estrella – puede ser azul, blanco, amarillo, naranja, rojo o marrón. Un cuerpo negro nunca es verde. ¿Puede explicar por qué?

Desafío 157 ny Anteriormente, habíamos predicho que cualquier material que contenga cargas, emite radiación. ¿Es capaz de encontrar un sencillo argumento que confirme si la radiación de calor cumple o no cumple esta radiación tradicionalmente predicha?

Pero volvamos a la pregunta del título de esta sección. La existencia de radiación térmica implica que cualquier cuerpo caliente se enfriará, aún si se mantiene en el medio de mayor aislamiento posible, conocido como el vacío. Con más precisión, aunque el vacío estuviera rodeado por un muro, la temperatura de un cuerpo iría aproximándose gradualmente a la temperatura del muro.

Ref. 110 Interesante de resaltar es que, en el momento en que la temperatura del muro y la del cuerpo alcanzaran la igualdad, sucedería algo raro. El efecto es difícil de comprobar en casa, pero se pueden encontrar fotografías impresionantes en la literatura.

Una situación en la que las paredes y los objetos en su interior tienen la misma temperatura puede ser un *horno*. Resulta que es *imposible* ver objetos en un horno usando la luz procedente de la radiación termal. Por ejemplo, aunque un horno y todo lo que hay

* Wilhelm Wien (b. 1864 Gaffken, d. 1928 Munich) obtuvo el Premio Noble de Física en 1911 por el descubrimiento de esta relación. El valor de la constante que aparece en la regla de Wien solamente puede ser calculada a partir de la ecuación (76), pero no puede ser expresada como una fórmula. Ciertamente, la constante de Wien contiene la solución de la ecuación $x = 5(1 - e^{-x})$.

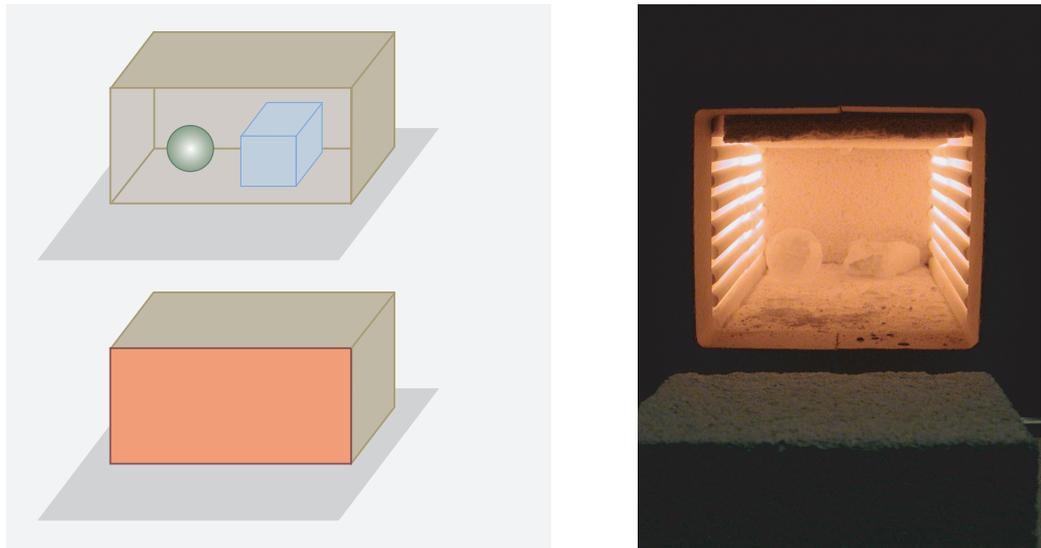


FIGURA 94 Los cuerpos en el interior de un horno a temperatura ambiente difieren en el color en contraste con los cuerpos sometidos a temperaturas altas (foto © Wolfgang Rueckner).



FIGURA 95 El último espejo del horno solar en Odeillo, en los Pirineos Franceses (© Gerhard Weinrebe).

Desafío 158 s

dentro estuviera al rojo vivo, una fotografía de su interior (¡sin flash!) no revelaría nada; no hay ningún cambio de contraste ni de brillo que permita distinguir los objetos de las paredes que los rodean. ¿Puede explicar este hallazgo?

En resumen, somos capaces de vernos los unos a los otros solamente porque las fuentes de luz que usamos están a una temperatura *diferente* que la nuestra. Podemos vernos solamente porque *no* vivimos en equilibrio termal con nuestro entorno.

LÍMITES A LA CONCENTRACIÓN DE LA LUZ

Las fuentes de luz deberían ser tan brillantes como fuera posible. ¿Hay algún límite? Resulta interesante que, para la radiación del cuerpo negro existe una importante e instructiva limitación.

Si construimos una gran lente o un gran espejo curvo, podremos reunir la luz solar y concentrarla en un pequeño punto. Todo el mundo ha usado en la niñez una lente convergente para hacer quemaduras o manchas negras en un periódico – o a las hormigas

– de esta forma. En Odeillo, en España, ricos investigadores han construido un gran espejo curvo tan grande como una casa, con el fin de estudiar el uso de la energía solar y el comportamiento de materiales a altas temperaturas. En esencia, el espejo proporciona una forma barata de encender un horno en su foco. (Y 'focus' es la palabra latina para 'corazón'.)

Los niños se dan cuenta con mucha rapidez de que las grandes lentes o espejos les permiten quemar cosas o papel con más facilidad que las lentes pequeñas. El lugar de Odeillo mostrado en la [Figura 95](#) es el que tiene el récord en el área de coleccionar cosas grandes. Es interesante saber que la construcción de espejos más grandes no tiene mucho sentido. Cualquiera que sea su tamaño, la temperatura en tal construcción es *limitada*:

Ref. 111

- ▷ La temperatura efectiva de la luz en un foco *no puede* sobrepasar la temperatura de la fuente original de la luz.

En todas las situaciones prácticas, la temperatura de la fuente de luz es mucho más alta que la del foco. La temperatura en la superficie del Sol es de unos 5780 K; la temperatura más alta conseguida hasta ahora en Odeillo es aproximadamente 4000 K. ¿Puede demostrar que esta limitación es equivalente al segundo principio de termodinámica, como Hemholtz, Clausius y Airy demostraron?

Desafío 159 s

Resumiendo, la Naturaleza proporciona un *límite* para la concentración de energía de la luz. De manera más precisa, podemos decir: la termodinámica limita lo que se puede conseguir mediante fuentes de luz termal.

El límite termodinámico para calentar con luz no impide que la gente pueda usar la concentración de luz para recolectar energía solar. Plantas de energía experimentales como la mostrada en la [Figura 96](#) son una promesa para el suministro de energía a los hogares cuando el precio de los combustibles fósiles suban demasiado.

Como acabamos de ver, un rayo de luz termal tiene entropía. Por el contrario, un rayo láser tiene una entropía muy pequeña. Podemos asignar también un valor de temperatura a cada rayo: la temperatura de un rayo termal es la temperatura de la fuente de luz; la temperatura del rayo láser es un número 'negativo'. De manera intuitiva, esto tiene sentido ya que un rayo láser puede enfriar gases; en concreto, un rayo láser es una situación de desequilibrio, y la temperatura no está definida para esos casos.

En varios países, el dinero de los contribuyentes es malgastado en los llamados centros de *fusión por confinamiento inercial*. En estos centros, varios potentes láseres están enfocados sobre una pequeña esfera de material, generalmente de 1 mm de tamaño; se han conseguido un objetivo de temperatura de unos 3 MK (o, equivalentemente, 300 eV). ¿Por qué es esto posible?

Desafío 160 s

MEDICIÓN DE LA INTENSIDAD DE LUZ

Las fuentes de luz difieren en el brillo. La medida de lo que llamamos 'oscuridad' y 'brillo' están involucrados de alguna manera, porque la luz puede ser dispersada o dirigida. Para conseguir mediciones adecuadas, el SI, el sistema internacional de unidades, define una base específica, la candela:

Página 381

- La *candela* es la intensidad luminosa, en una dirección dada, de una fuente que emite radiación monocromática de frecuencia $540 \cdot 10^{12}$ hertz y tiene una intensidad



FIGURA 96 Planta de energía solar en Sanlúcar la Mayor, cerca de Sevilla, en España (© Wikimedia).

radiante en esa dirección de $(1/683)$ watt por estereorradián.’

Por tanto la candela es una unidad de potencia de luz por ángulo (sólido), generalmente llamado *intensidad luminosa*, excepto que es corregida por la sensibilidad del ojo: la candela mide solamente la potencia *visible* por ángulo. La definición de la candela dice simplemente que $683 \text{ cd} = 683 \text{ lm/sr}$ corresponde a 1 W/sr . Por ejemplo, un gusano de luz produce $0,01 \text{ cd}$, una candela en realidad produce alrededor de 1 cd , las luces de un coche sobre los 100 cd , y un faro alrededor de 2 Mcd . Otra forma de ver a la candela es la siguiente: observando una fuente con 1 cd desde una distancia de 1 m resulta ser sólo un poquito más brillante que la luna llena.

La potencia total de luz, sin tener en cuenta su dirección, se mide en lumen. Por tanto, $683 \text{ lm} = 683 \text{ cd sr}$ corresponde a 1 W . En otras palabras, ambos, el lumen y el Vatio miden la potencia, o el flujo de energía, pero el lumen mide solamente la parte *visible* de la potencia o del flujo de energía. Esta diferencia es expresada añadiendo ‘luminosa’ o ‘radiante’: por tanto, el lumen mide el flujo *luminoso*, mientras que el Vatio mide el flujo *radiante*.

El factor 683 que aparece en las definiciones es histórico. Un vela ordinaria emite una luminosidad de alrededor de una candela. Poniendo esto en perspectiva: por la noche, una vela se puede ser vista a una distancia de 10 ó 20 kilómetros. Una bombilla de luz incandescente de 100 W produce 1700 lm , y el brillo de las luces comerciales emitidas por diodos unos 20 lm , aunque los dispositivos de laboratorio exceden los 1000 lm . Los pro-

TABLA 16 Algunos valores medidos de iluminancia (cantidad de flujo luminoso).

OBSERVACIÓN	ILUMINANCIA
Brillo del cuerpo humano	1 plx
Estrella débil	0,1 nlx
Sirius	10 μ lx
phot (antigua unidad de iluminación)	10 μ lx
Júpiter	20 μ lx
Luna nueva, noche sin luz	1 mlx
Luna llena	0.01 to 0,24 lx
Calle por la noche, poco tráfico, luz pobre	0.1 a 3 lx
Calle por la noche, mucho tráfico	10 a 30 lx
Para leer	50 a 100 lx
pantalla de cine	100 lx
Lugar de trabajo	0.2 a 5 klx
Día nublado	1 klx
Lámparas brillantes, usadas en cirugía	120 klx
Día soleado	120 klx
Proyector de películas de cine	5 Mlx
Doloroso para la vista	100 Mlx

ectores de cine alrededor de 2 Mlm, y el brillo de los flashes, como los rayos, 100 Mlm.

La *irradiancia* de la luz solar es de unos 1300 W/m^2 para un día soleado; por otro lado, la *iluminancia* es solamente $120 \text{ klm/m}^2 = 120 \text{ klx}$ o 170 W/m^2 . Un día de verano nublado o un día claro de invierno proporciona unos 10 klx. Estos números muestran que la mayor parte de la energía del Sol que llega a la Tierra queda fuera del espectro visible.

La iluminancia es esencialmente lo que llamamos 'brillo' en la vida cotidiana. Sobre un glaciar, cerca de la orilla del mar, sobre la cumbre de una montaña o en determinadas condiciones del clima, el brillo puede alcanzar los 150 klx. Los museos con frecuencia resultan algo oscuros porque las pinturas al agua se degradan con una luz por encima de 200 lx. Los ojos pierden su habilidad para distinguir los colores en algún lugar entre 0,1 lx y 0,01 lx; el ojo deja de cumplir su función por debajo de 1 nlx. Los dispositivos técnicos para producir imágenes en la oscuridad, tales como las gafas de visión nocturna, empiezan a funcionar a 1 μ lx. Por cierto, el cuerpo humano mismo *brilla* con cerca de 1 plx, un valor demasiado pequeño para ser detectado por los ojos, pero fácilmente medible con aparatos especializados. El origen de esta emisión es todavía un asunto de investigación.

Las intensidades de luz más altas conseguidas, producida con láseres de alto voltaje, exceden los 10^{18} W/m^2 , más de 15 veces que la magnitud más alta de la intensidad de la luz solar. (Cuánto es esto en lux?) Tales intensidades son producidas por un fuerte enfoque de rayos láser pulsado. El campo eléctrico de tales pulsos de luz es del mismo

Ref. 112

Desafío 162 e



FIGURA 97 Un moderno láser de un picosegundo de pulso y una fuente industrial de rayos-X, ambos de un tamaño de unos 700 mm (© Time-Bandwidth, SPECS).

Ref. 113

orden que el campo dentro de los átomos; tal rayo láser por lo tanto ioniza toda la materia que encuentra, incluyendo el aire.

La *densidad luminosa* es una cantidad frecuentemente utilizada por los técnicos en la luz. Su unidad es 1 cd/m^2 , de manera no oficial, llamado 1 Nit y abreviado como 1 nt. Los ojos humanos ven usando solamente *bastoncillos* de $0,1 \mu\text{cd/m}^2$ a 1 mcd/m^2 ; ven solamente con *conos* por encima de 5 cd/m^2 . Cuando mejor ven los ojos es entre 100 and $50\,000 \text{ cd/m}^2$, y están completamente sobrecargados por encima de 10 Mcd/m^2 : un rango total de 15 órdenes de magnitud. Muy pocos detectores técnicos alcanzan este rango.

OTRAS FUENTES DE LUZ Y DE RADIACIÓN

Aparte de los cuerpos negros, existen otros muchos tipos de fuentes de luz. El rango para las fuentes frías de luz se extiende desde los peces luminosos hasta los láseres de alto voltaje. En tamaño varían desde el de un átomo hasta el de un edificio, en coste desde una fracción de Euro hasta cientos de millones de Euros y en duración, desde una fracción de segundo hasta cientos de años.

Los láseres son fuentes de luz importantes para la industria, la medicina y la investigación. Los láseres pueden emitir luz visible, infrarroja y ultravioleta, de manera continua o como luz pulsada, con varias intensidades, polarizaciones y formas de los haces; serán

Vol. V, página ?? explorados posteriormente en nuestra aventura. En el dominio de la imagen, los láseres son utilizados con muchas técnicas de microscopía, en sistemas de escaneo de imágenes, en tomografía y en holografía.

Vol. V, página ??
Vol. II, página 211

Las fuentes de ondas de radio son corrientes en la vida cotidiana: teléfonos móviles, radio-transmisores, transmisores de tv y walkie-talkies son todas las fuentes de las ondas de radio. Se utilizan para la captación de imágenes en las resonancias magnéticas, las cuales permiten conseguir imágenes del interior del cuerpo humano, y en astronomía: Ya que las estrellas son radio-emisores, podemos imaginar el cielo con longitudes de ondas de radio. Hoy día, la radio-astronomía es una parte importante de la astronomía moderna y ha sido causa de muchos descubrimientos. La radio-astronomía se ha convertido también en una importante herramienta para la comprobación de manera precisa y la confirmación de la relatividad general.

En el otro extremo del espectro electromagnético, son también corrientes las fuentes de luz que emiten rayos-X y rayos gamma. Se usan de manera rutinaria en medicina y en la ciencia de los materiales, y también para varias técnicas de imagen

Todas las fuentes de radiación electromagnéticas son potencialmente peligrosas para los humanos, por lo que hay que tener un especial cuidados al trabajar con ellas. Esto también ha llevado a diversos desarrollos desafortunados.

LA RADIACIÓN COMO ARMA

La radiación electromagnética de alta intensidad es peligrosa. En muchos países, se destina más dinero al estudio de armas de asalto que a aumentar la formación y la salud de los ciudadanos. Se están investigando varios tipos de armas de asalto que utilizan la radiación electromagnética. Dos de ellos están particularmente avanzados.

La primera de las armas que utiliza la radiación electromagnética consiste en un camión con una antena parabólica móvil sobre su techo, de un tamaño aproximado de 1 m, que emite rayos de microondas de alta potencia – unos cuantos kW – a 95 GHz. El rayo, como todos los rayos de microondas, es invisible; dependiendo de la potencia y de la forma del rayo, es doloroso o mortal, hasta una distancia de 100 m y más. Este terrible dispositivo, llamado de manera oficial *sistema de rechazo activo*, con el que el operador puede causar muchas víctimas incluso por error, estaba disponible en 2006. Algunos políticos extremistas querían ponerlos a disposición de la policía. (¿Quién espera que una antena parabólica sea dañina?) Los esfuerzos por expandirlo por todo el mundo está tomando impulso lentamente.

La segunda arma en desarrollo es el llamado *láser mortal de impulso pulsado*. La idea es tomar un láser que emita radiación que no sea absorbida por el aire, el vapor u obstáculos similares. Un ejemplo es un láser de fluoruro de deuterio pulsado que emite a 3,5 μm . Este láser achicharra cualquier material que toca; además, la evaporación del plasma producido por la quemadura produce un fuerte golpe, de tal manera que la gente que es alcanzada por semejante láser es dañada y golpeada al mismo tiempo. Por fortuna, resulta difícil hacer tal dispositivo lo suficientemente resistente para un uso móvil práctico. No obstante, los expertos esperan que se obtengan pronto láseres de batalla, montados en camiones – tras una serie de las versiones de Potemkin.

En resumen, es probable que las armas de radiación surjan en los años venideros. Sin embargo, lo que los hombres que trabajan en semejantes desarrollos les cuenten a sus



FIGURA 98 El pez fantasma *Dolichopteryx longipes* posee espejos naranja que le ayudan a tener imágenes nítidas también de la tenue luz que sube desde las formas de vida bioluminescente que se encuentran por debajo de él (© Tamara Frank).

hijos al llegar a casa por la noche no está claro.

IMÁGENES – QUE TRANSPORTAN LUZ

Toda imagen se forma transportando luz de una manera útil a lo largo de caminos conocidos. El camino más sencillo posible es la línea recta.

FABRICANDO IMÁGENES CON ESPEJOS

Puesto que la luz se mueve en línea recta, un espejo plano producirá una imagen del mismo tamaño que el original. Los espejos curvos se pueden utilizar para alargar, reducir y distorsionar imágenes. Por ejemplo, los espejos de las habitaciones caras, frecuentemente están ligeramente curvados para hacer que la gente se vea más delgada.

La mayoría de los espejos hechos por los humanos son de metal, generalmente evaporado sobre un sustrato de vidrio; por el contrario, los sistemas vivos no pueden producir metales puros. Por otro lado, en los sistemas vivos abundan los espejos: se pueden encontrar como en el *tapetum* de los ojos, sobre las escamas de los peces, en los insectos, etc. ¿Cómo produce espejos la Naturaleza, a pesar de no tener la habilidad para utilizar metales puros? Resulta que 'sandwiches' de diferentes materiales en capas finas y transparentes – una de las cuales normalmente es la guanina cristalina – puede producir espejos que resultan casi tan buenos como los espejos de metal. Dichos espejos se basan en efectos de interferencia y son llamados *espejos dieléctricos*. Los espejos dieléctricos se utilizan también para fabricar espejos láser.

Los espejos formadores de imagen se utilizan en los grandes telescopios, en sistemas de rayos-X, y en dispositivos médicos utilizados por los físicos. Resulta interesante saber que también algunos seres vivos utilizan espejos para formar imágenes. El ejemplo más famoso es el pez fantasma mostrado en la [Figura 98](#). Es capaz de mirar arriba y abajo al mismo tiempo, y lo hace usando espejos agregados a sus ojos.

Por cierto, ¿por qué los espejos se utilizan con frecuencia en los telescopios, pero no

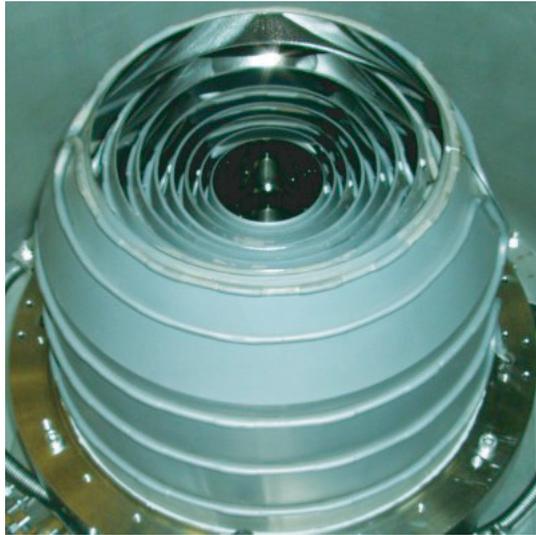


FIGURA 99 Un colector de incidencia de pastoreo tipo Wolter para radiación de 13,5 nm construido con la ayuda de espejos concéntricos (© Media Lario Technologies).

Desafío 163 s en los microscopios?

En los sistemas de iluminación, se utilizan los espejos para la formación de los haces de luz de los coches, en las linternas de bolsillo y en las lámparas de LED. Podría ser que algunas criaturas de las aguas profundas utilizaran espejos para usos similares – pero el autor no conoce ningún ejemplo.

La mayor parte de los sistemas de espejo involucrados hasta la fecha se usan en sistemas de litografía ultravioleta extrema que se utilizarán en la futura producción de circuitos integrados. Estos sistemas usan una longitud de onda de 13,5 nm, para la que no hay lentes disponibles. La colimación y la expansión de rayos requiere por tanto muchos espejos concéntricos, como se muestra en la **Figura 99**. Estos sistemas ópticos son lo mejor que la moderna tecnología puede ofrecer; por ejemplo, los espejos tienen una rugosidad superficial por debajo de 0,4 nm. En los telescopios satelitales de rayos-X, también son utilizados sistemas de espejos ópticos similares.

¿SIEMPRE VIAJA LA LUZ EN LÍNEA RECTA? – REFRACCIÓN

Generalmente la luz se mueve en líneas rectas. Un láser en una noche neblinosa lo muestra con mayor claridad, como lo ilustra la **Figura 100**. Pero cualquier puntero láser en la niebla resulta igualmente fascinante. En realidad, utilizamos la luz para *definir* la 'rectitud', tal como fue expuesto en la exploración de la relatividad. No obstante, hay un aserie de situaciones en las que la luz no viaja en línea recta, y cualquier experto en movimiento debería conocerlas.

Página 16

Ref. 114

En el jarabe con azúcar diluida, los rayos de luz se curvan, como se muestra en la **Figura 101**. La razón es que en tal experimento, la concentración de azúcar cambia con la profundidad. ¿Puede explicar el efecto del jarabe?

Desafío 164 s

Observaciones más detalladas muestran que un rayo de luz se dobla en cada cambio de material que encuentra en su camino. Este efecto, llamado *refracción*, es bastante común. La refracción cambia la forma de nuestros pies cuando estamos en la bañera;



FIGURA 100 Generalmente la luz viaja en línea recta. En la figura, un rayo láser de frecuencia del sodio es usado como estrella guía láser que proporciona una señal para la óptica adaptable de los grandes telescopios. El láser ilumina un estrato de sodio que se encuentra en la atmósfera a unos 90 km de altura, proporcionando por tanto una estrella artificial. La estrella artificial se utiliza para mejorar la calidad de la imagen del telescopio a través de óptica adaptable. En la fotografía, las imágenes de las estrellas reales se presentan borrosas debido a un largo tiempo de exposición de 3 min (foto por Paul Hirst).

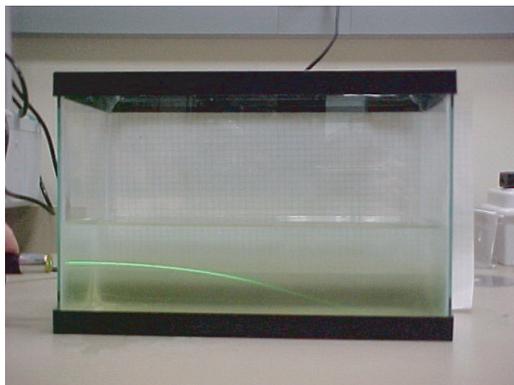
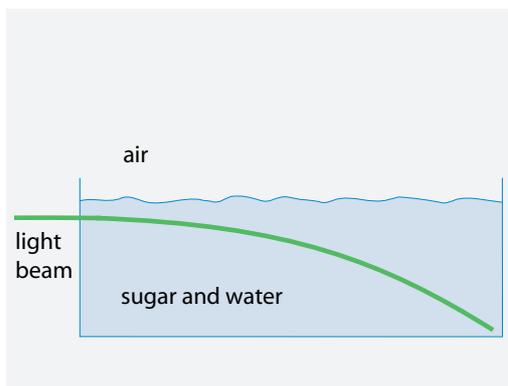


FIGURA 101 El jarabe de azúcar diluida curvan la luz (© Jennifer Nierer).

Vol. I, página 281

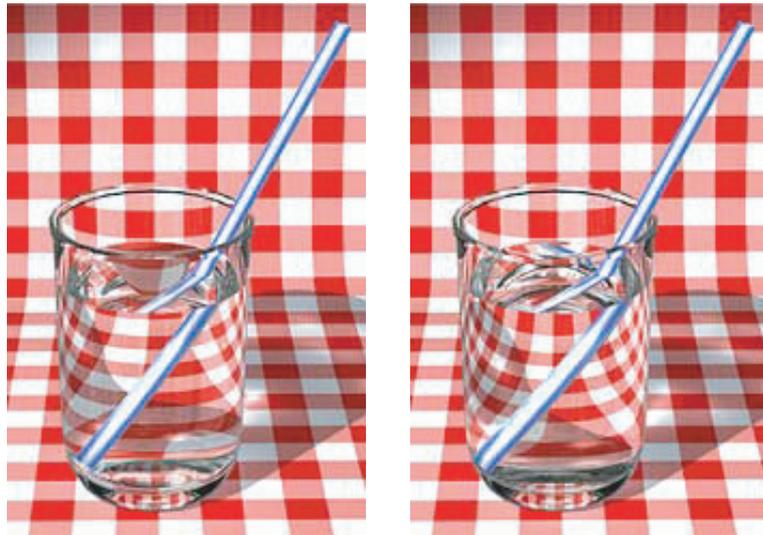
la refracción también hace que la profundidad de los acuarios parezca menor de lo que son en realidad y produce efectos tales como se muestran en las [Figura 102](#) y [Figura 103](#). La refracción es una consecuencia de la velocidad del cambio de fase de la luz al pasar de un material a otro; todos los efectos de la refracción son por tanto explicados en la [Figura 104](#).

También puede observarse que la refracción sigue el principio de minimizar el movimiento de la luz:

- ▷ La luz siempre toma el camino que requiere el *menor* tiempo de viaje.

Por ejemplo, la luz siempre se mueve más lentamente en el agua que en el aire; esta es la razón para los dobleces ilustrados en la [Figura 105](#).

La razón de velocidades entre el aire y el agua se llama *índice refractivo* del agua. El índice refractivo, generalmente abreviado como n , es dependiente del material. El valor



Desafío 165 e **FIGURA 102** Realistas gráficos por ordenador mostrando la refracción en el agua y en el jarabe con azúcar diluida (gráficos © Robin Wood). ¿Puede identificar cuál es cuál?



FIGURA 103 Un bonito efecto de refracción en la interfaz agua-aire que puede repetir en casa (© Maric Vladimir).

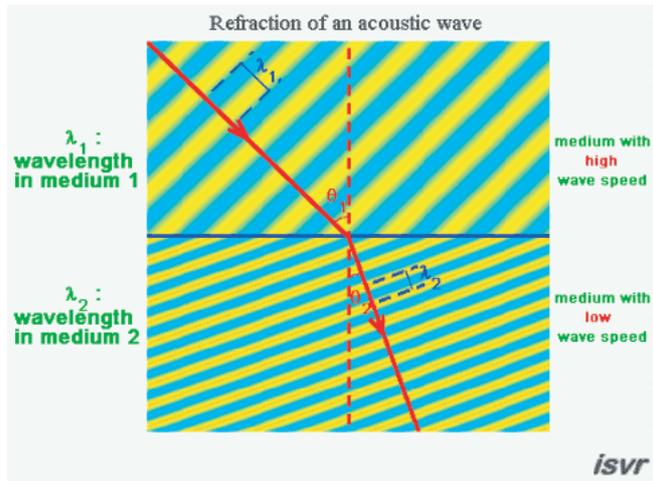


FIGURA 104 Visualización de una refracción (QuickTime film © ISVR, University of Southampton).

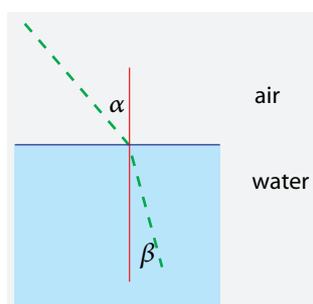


FIGURA 105 La refracción de la luz se debe a la optimización del tiempo de viaje.

Desafío 166 s

para el agua es aproximadamente de 1.3. Esta relación de velocidad, junto al principio de tiempo mínimo, nos lleva a la 'ley' de la refracción, una simple relación entre los senos de los dos ángulos mostrados en la **Figura 105**, relación de Snell. ¿Puede calcular esta relación?. De hecho, la definición exacta del índice refractivo de un material es con respecto al vacío, no al aire. Pero la diferencia resulta despreciable, ya que los gases contienen principalmente vacío y sus índices de refracción son muy próximos a uno.

Página 142

Para muchos fluidos y sólidos, las señales de luz se mueven con más lentitud que en vacío; también las (diferentes) velocidades de fase y de grupo de la luz dentro de los materiales son regularmente *más bajas* que c , la velocidad de la luz en el vacío. Anteriormente se ha discutido sobre la diferencia de esos dos tipos de velocidades. Para tales materiales 'normales', el índice de refracción n , la razón entre c con la velocidad de fase en el interior del material, es mayor que 1. El índice refractivo es una propiedad importante del material para la descripción de los efectos ópticos. Por ejemplo, el valor de la luz visible en el agua es sobre 1.3, para el vidrio es sobre 1.5, y para el diamante 2.4. El alto valor es una razón del centelleo del corte de diamantes con las 57 facetas del corte del *brillante*.

El índice de refracción también depende de la longitud de onda; este efecto, llamado *dispersión*, aparece en la mayoría de los materiales. Los prismas hacen uso de la dispersión en los cristales para separar la luz blanca u otras luces en sus colores constituyentes. También el diamante, y en particular el corte en brillante, funciona como un prisma, y esta es la segunda razón de su centelleo.

Ref. 115

Al contrario que los materiales 'normales', otros materiales presentan índice de refracción menores que 1, y por tanto sus velocidades de fase son mayores que c . Por ejemplo, el oro tiene un índice de refracción sobre el 0.2 para la luz visible, y por tanto una velocidad de fase de unas $5c$ para tales ondas. De hecho, casi todos los materiales tienen índices de refracción por debajo de 1 para *algunas* longitudes de onda, incluyendo la sal de mesa.

Resumiendo, la refracción de la luz, cambio de la dirección del movimiento de la luz, se debe a las diferentes velocidades de fase de la luz en los diferentes materiales. *Los cambios de material desvían la trayectoria de la luz*. La refracción es tan común porque resulta verdaderamente extraño juntar materiales adyacentes con el mismo índice de refracción.

Los gases tienen índices de refracción cercanos a los del valor 1 para el vacío. No obstante, también los gases producen refracción – incluyendo el aire que nos rodea.

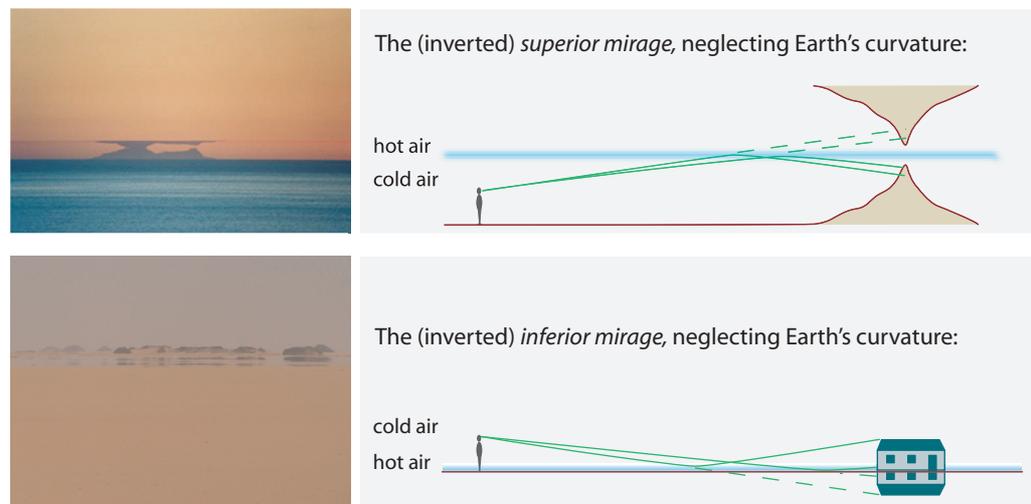


FIGURA 106 La base de los espejismos es una reflexión efectiva debida a la refracción en una capa de aire caliente; puede conseguir efectos espectaculares, tal como el espejismo invertido superior (arriba izquierda y derecha) y la imagen inferior (abajo izquierda y derecha) (fotografías © Thomas Hogan y Andy Barson).

DE LA REFRACCIÓN ATMOSFÉRICA A LOS ESPEJISMOS

Si la luz recorre una gran distancia a través del aire, la refracción puede ser considerable. Por ejemplo, si se mira a las montañas distantes, la luz no siguen una línea recta; hay una desviación de varios minutos de arco. Esta *refracción terrestre* constituye un gran problema para la geodesia.

La luz que se recibe desde las estrellas también tiene un refracción cuando entra en la atmósfera. Esta *refracción astronómica* es de aproximadamente un minuto de arco a una elevación de 45 grados y generalmente 30 minutos de arco en el horizonte. Por tanto podemos decir que cuando se ve el Sol tocando el horizonte, en realidad ¡ya está oculto! El valor exacto de la curvatura depende de los gradientes de temperatura; son con frecuencia particularmente fuertes en latitudes altas. A veces la curvatura llega a alcanzar 2 grados; en estos casos excepcionales, el Sol podría ser visible aún cuando ya no debería estar; esto se conoce ahora como el *efecto Novaya Zemlya*.

Página 221

El índice de refracción de todos los gases depende de la temperatura; el gradiente de temperatura es generalmente proporcional al gradiente de densidad. En aire de temperatura variable, la refracción terrestre lleva a trayectorias curvas de luz y produce muchos efectos.

Vol. I, página 95

El parpadeo de las estrellas se debe a la refracción variable inducida por las turbulencias del aire. Fue presentada en el primer volumen.

La refracción por la atmósfera puede hacer que los objetos del horizonte floten en el aire – un efecto llamado *aparición* – o desaparecer por debajo del horizonte – un efecto llamado *hundimiento*. Si en lugar de eso, las imágenes están estiradas o comprimidas, los efectos se llaman *elevación e inclinación*.

Con mucho, el efecto mejor conocido debido a la refracción es el *espejismo*. Los espejismos son – a pesar de su nombre – debidos a la refracción de rayos de luz en una capa

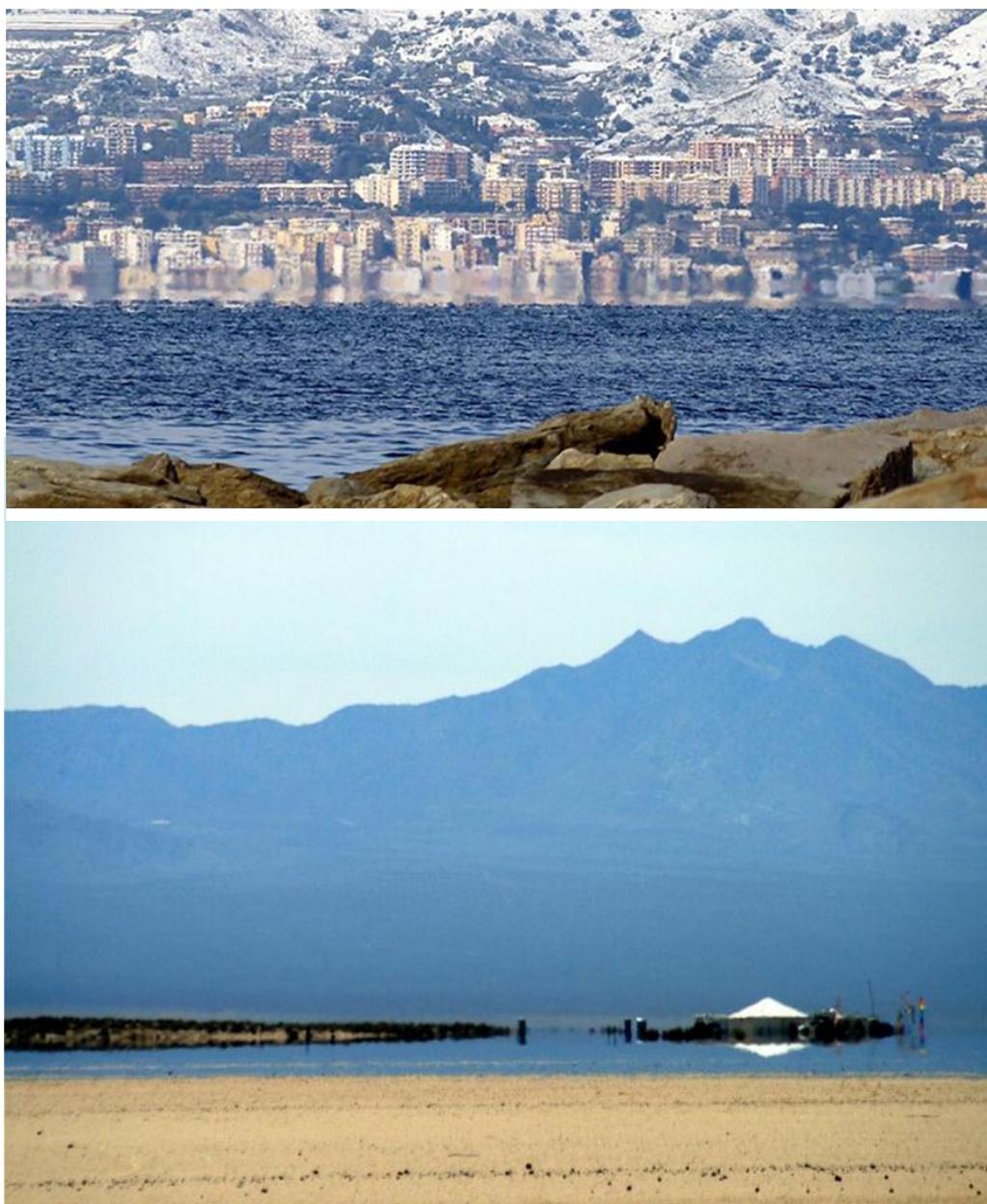


FIGURA 107 Dos espejismos inferiores: uno en el lugar desde donde parece que viene el término 'fata morgana', el Estrecho de Mesina (arriba) y el otro en el desierto (fotografías de © Nicola Petrolino y Mila Zinkova).

Ref. 116 horizontal de aire más caliente que los estratos adyacentes, como se muestra en la **Figura 106**. Los espejismos siempre aparecen cerca del horizonte, en una franja más estrecha que la anchura de un dedo a la longitud de un brazo.

Si la capa esta por debajo del observador, por ejemplo sobre el terreno, puede aparecer un *espejismo inferior*, en el que se presenta una imagen adicional invertida *debajo* de



FIGURA 108 Dos espejismos inferiores produciendo apariciones (fotografías de © Olaf Schneider y Gerold Prenger).

la imagen directa. Los espejismos inferiores se observan regularmente en las autopistas calientes. Pero también aparecen en los desiertos, como muestra la [Figura 107](#), o sobre la nieve y el hielo.

Si la capa más caliente del aire está arriba, se habla de una *capa de inversión*. Si el observador se encuentra por debajo de la capa de inversión, pueden aparecer muchas clases de espejismos: el espejismo superior, al cual se añade una imagen de espejo invertido *sobre* la imagen directa, o espejismos más complejos, en los que aparecen varias imágenes adicionales. Este último espejismos, y también otras clases de espejismos, son llamados *fata morgana*. Todos los tipos de espejismos son debidos a la refracción; su apariencia

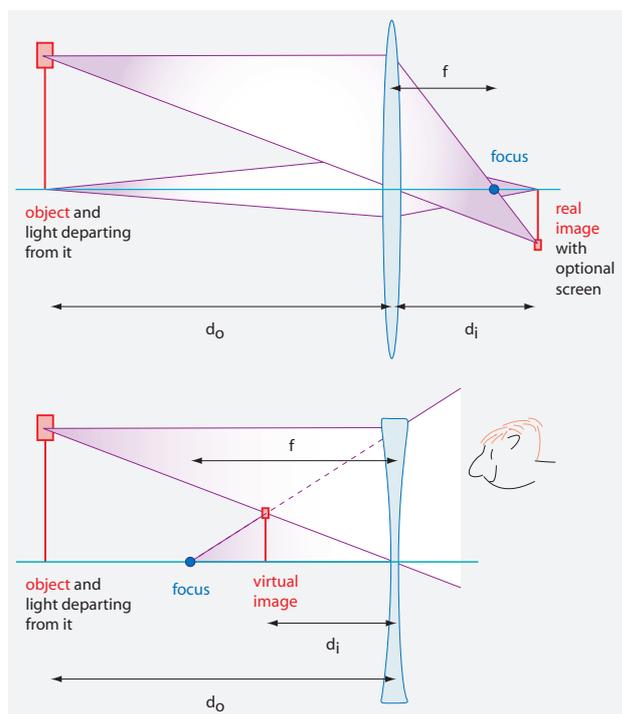


FIGURA 109 Imagen real producida por una lente convergente (si es usada de la forma mostrada) y la imagen virtual producida por una lente divergente.

detallada depende de las características de la temperatura del aire, y de las alturas relativas del observador, las capas de inversión y el objeto observado. Con frecuencia, la curvatura de la Tierra también interpreta su papel.

DE LA REFRACCIÓN A LAS LENTES

Por encima de todo, la refracción se utiliza en el diseño de *lentes*. Con vidrio se pueden fabricar con precisión superficies curvas que permiten *concentrar* la luz. Todos los dispositivos que sirven para enfocar, tales como las lentes, se pueden utilizar para producir imágenes. Los dos tipos principales de lentes, con sus puntos focales y las imágenes que producen, son mostrados en la [Figura 109](#); Se les llaman *lentes convergentes* y *lentes divergentes*. Cuando un objeto está situado a más distancia de una lente simple convergente que su foco, la lente produce una imagen *real*, i.e., una imagen que se puede proyectar en una pantalla. En cualquier otro caso las lentes simples, ya sean convergentes o divergentes, producirán *imágenes virtuales*: Tales imágenes se pueden ver con los ojos pero no pueden ser proyectadas en una pantalla. Por ejemplo, cuando se coloca un objeto entre una lente convergente y su foco, la lente se comporta como un *crystal de aumento*. La [Figura 109](#) también permite calcular la *fórmula de lente fina* la cual relaciona d_o , d_i y f .
¿Cual es?

Desafío 167 s

Ref. 117

Aunque los espejos y las lentes ya eran conocidos en la antigüedad, tuvo que transcurrir toda la Edad Media antes de que se combinaron dos lentes para realizar instrumentos ópticos más elaborados. Los diferentes efectos que pueden ser observados con una o dos lentes se muestran en la [Figura 110](#). El *telescopio* fue inventado – tras un éxi-

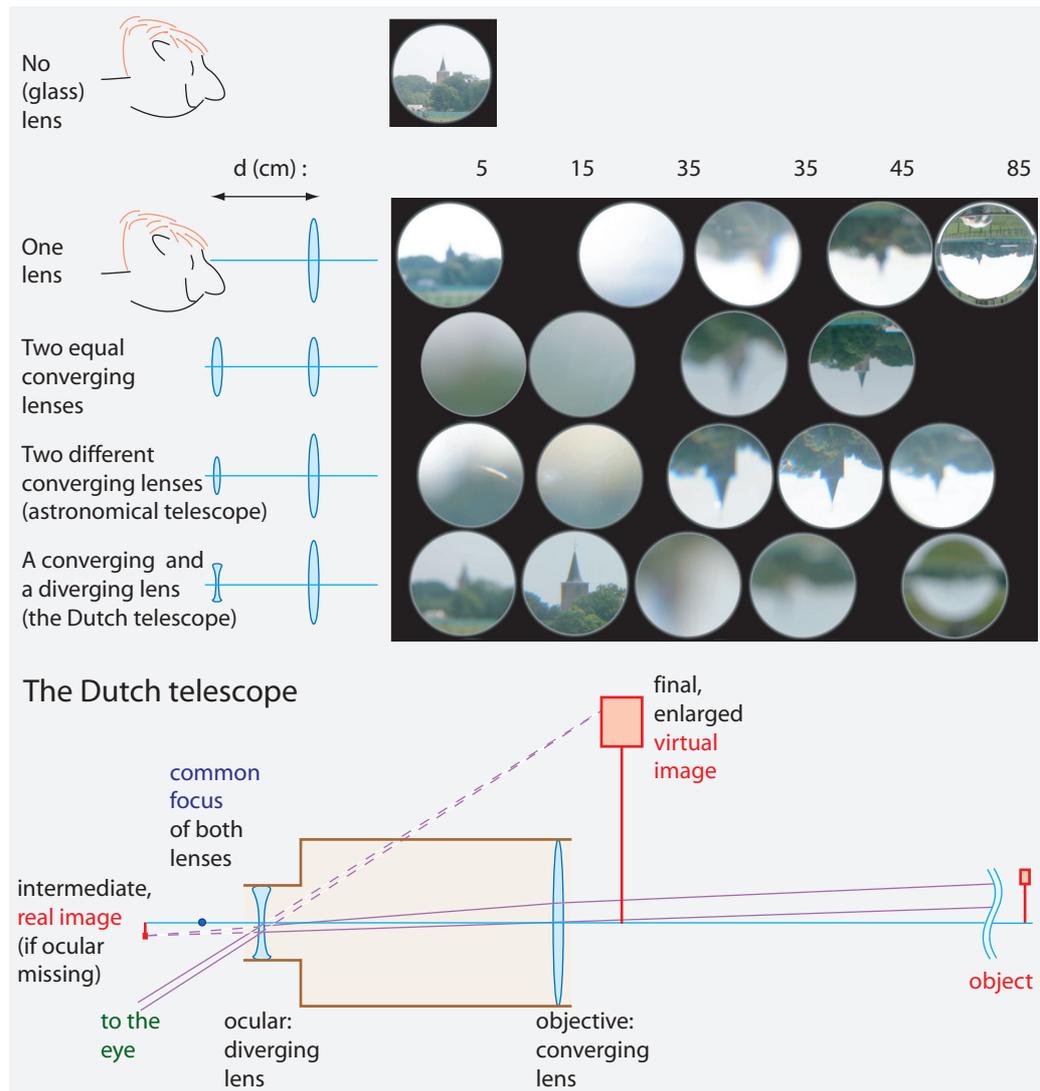


FIGURA 110 La refracción de la lente es la base del telescopio: arriba, experimentos con lentes que condujeron al desarrollo del telescopio: el objeto a observar comparado con la imagen producida por una simple lente convergente, por dos lentes iguales convergentes, por dos lentes convergentes distintas en el telescopio astronómico, y por una lente divergente y una convergente en el Telescopio Abierto Holandés (DOT), a distintas distancias del ojo; abajo, la explicación del DOT (fotografías © Eric Kirchner).

to parcial en Italia de Giambattista della Porta – justamente antes de 1608 en Holanda. El más conocido, de al menos tres inventores simultáneos, fue el fabricante de lentes Johannes Lipperhey (b. c. 1570 Wesel, d. 1619 Middelburg) quien hizo una fortuna con la venta de telescopios al ejército holandés. Cuando Galileo tuvo noticias del descubrimiento, rápidamente lo tomó y lo mejoró. Ya en 1609, Galileo llevó a cabo las primeras observaciones astronómicas; ellas lo hicieron mundialmente famoso. El diseño del *Telescopio abierto holandés* consiste en un tubo corto que produce una imagen brillante y



FIGURA 111
Resplendor
producido
por las gotas
de una nube
(© Brocken
Inaglory).

Desafío 168 e

vertical, y su aumento es la relación entre las distancias focales de las dos lentes. Todavía se utilizan en los binoculares para la ópera. A través de los años, se han desarrollado otros muchos telescopios; hoy día, los telescopios de alto rendimiento utilizan espejos en lugar de lentes; no son tan pesados y permiten el uso de una óptica adaptable.

Ref. 118

Por cierto, los telescopios también existen en los seres vivos. La mayoría de las arañas tiene distintos tipos de ojos, y algunas de ellas llegan a tener hasta 6 pares diferentes. En particular, las arañas saltadoras del género *Portia* (*Salticidae*) posee dos ojos especialmente grandes, capaces de ver objetos distantes, los cuales tienen dos lentes, una detrás de la otra; la segunda lente y la retina pueden ser movidas por músculos, de tal manera que tales arañas pueden enfocar sus telescopios en direcciones diferentes sin mover la cabeza. Para procesar las señales que reciben todos sus ojos, las arañas saltadoras necesitan un gran cerebro. De hecho, alrededor del 50 % de la masa del cuerpo de las arañas saltadoras es masa cerebral.

Desafío 169 s

Otra forma distinta de combinar las dos lentes, nos llevan al *microscopio*. ¿Puede explicar a un no-físico cómo funciona un microscopio? Werner Heisenberg casi suspendió su examen de doctorado porque no pudo hacerlo. Sin embargo, el problema no es difícil. En realidad el inventor del microscopio fue un autodidacta del siglo XVII: el técnico Antoni van Leeuwenhoek (b. 1632 Delft, d. 1723 Delft) se ganó la vida con la venta de más de quinientos de sus microscopios a sus contemporáneos. (Este es un comentario algo desagradable: Van Leeuwenhoek solamente utilizó una lente, no dos, como en los modernos microscopios.)

Desafío 170 ny

Ningún diagrama de trazado de rayos, ya sea el de una simple lente, de un microscopio o de un telescopio, está verdaderamente completo sin la intervención del ojo, con su lente y la retina. ¿Puede agregarlos y convencerse de que estos dispositivos verdaderamente funcionan?

Como se ha mencionado anteriormente, la refracción es casi siempre dependiente del



FIGURA 112 La observación este gráfico con bastante ampliación muestra la dispersión del ojo humano: las letras se posicionan a diferentes profundidades.

color; muestra la dispersión. A causa de la dispersión, las lentes producen aberraciones cromáticas; éstas se muestran como imágenes con los bordes coloreados. Para evitarlas, los microscopios o las cámaras fotográficas poseen *varias* lentes hechas con *diferentes* tipos de vidrios. (También contienen varias lentes del mismo tipo de cristal para compensar los errores de la geometría de la imagen de la lente llamados *aberraciones de Seidel* que son independientes del color.) Los tipos diferentes de cristal compensan la dispersión y por tanto evitan los bordes coloreados de las imágenes. La dependencia del color de la refracción en las gotas de agua es también el fundamento del arcoíris, como se mostrará más adelante; Se puede imaginar el arcoíris como el borde coloreado de un disco blanco producido por las gotas de agua que actúan como lentes. La refracción en los cristales de hielo – unas veces con dispersión y otras si ella – de la atmósfera es el origen de los halos, los pilares solares y muchos otros patrones de luz que se ven frecuentemente alrededor del Sol o de la Luna cuando tenemos un clima frío.

Página 134

Ref. 119

También el ojo humano presenta una refracción dependiente del color, es decir, dispersión. Por fortuna, el efecto es pequeño. En realidad, para el funcionamiento del ojo, la curvatura de la *forma de la cornea* es más importante que la potencia refractiva de la lente, ya que la lente está sumergida en un medio con casi el mismo índice de refracción, y que, por lo tanto, limita los efectos de la refracción. Los pequeños efectos de la dependencia del color de la refracción no se corrigen en el ojo, sino en el cerebro. Por tanto, la dispersión de la lente ocular puede ser notada si se evita la corrección producida por el cerebro, por ejemplo cuando las letras rojas o azules se imprimen sobre un fondo negro, tal como se muestra en la **Figura 112**. Tenemos la impresión que las letras rojas se posicionan delante de las letras azules. ¿Puede explicar cómo la dispersión produce este efecto de movilidad?

Desafío 171 s

DOBLANDO LA LUZ CON TUBOS – FIBRA ÓPTICA

Otra forma de doblar la luz, también basada en la refracción, es la utilizada por muchos animales y por gran cantidad de dispositivos técnicos: la *fibra óptica*. Las fibras ópticas están fundamentadas en la reflexión interna completa ; en la **Figura 113** se muestra un resumen de sus usos.

Página 210

En la Naturaleza, aparecen fibras ópticas en al menos tres sistemas. En los ojos de los insectos, tales como los ojos de las moscas domésticas o los ojos de las abejas melíferas, la luz de cada pixel de imagen se transporta a lo largo de una estructura que funciona co-

Light in a multimode fibre



Light in a monomode fibre

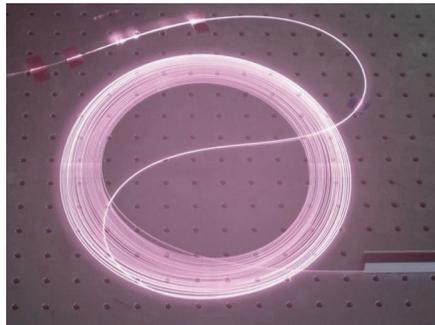


FIGURA 113 Fibras ópticas: el principio de funcionamiento de los dos extremos de los tipos de fibra, la asombrosa esponja marina *Euplectella aspergillum* (altura de unos 30 cm) que contiene fibras ópticas de sílice con lentes en el extremo y que en combinación con la temperatura del agua para ayudar a las algas simbióticas, un moderno láser de fibra utilizado en el proceso de materiales y en medicina, y, pegados en grandes cantidades, conos de fibra para cambiar el tamaño de las imágenes (diámetro máximo de unos 20 cm) (© NOAA, Hochschule Mittweida, Schott).

mo una fibra óptica cónica. En determinados animales marinos, tales como las esponjas de vidrio *Euplectella aspergillum* y otras muchas esponjas, se utilizan verdaderas fibras de sílice para proporcionar una estabilidad estructural y transportar señales luminosas a fotodetectores. Finalmente, todos los ojos de los vertebrados, incluido el ojo humano, contiene un gran número de fibras ópticas encima de su retina, para evitar ciertos problemas de imagen que podrían ser causados por los vasos sanguíneos, las cuales yacen *sobre* la retina de los ojos de todos los vertebrados. Por cierto, la afirmación frecuentemente oída de que el pelo blanco de los osos polares funciona como una fibra óptica para la luz UV es *falsa*.

Ref. 120

Ref. 121

Ref. 122

En aplicaciones técnicas, las fibras ópticas resultan fundamentales para los trabajos en circuitos de telefonía y de Internet, para la distribución de señales en el interior de los aviones y de los coches, para el transporte de la luz láser para usos médicos, para los láseres de alta intensidad y en muchas otras aplicaciones. Las fibras de vidrio huecas se utilizan con éxito para la guía de rayos-X en los sistemas de imágenes de rayos-X.

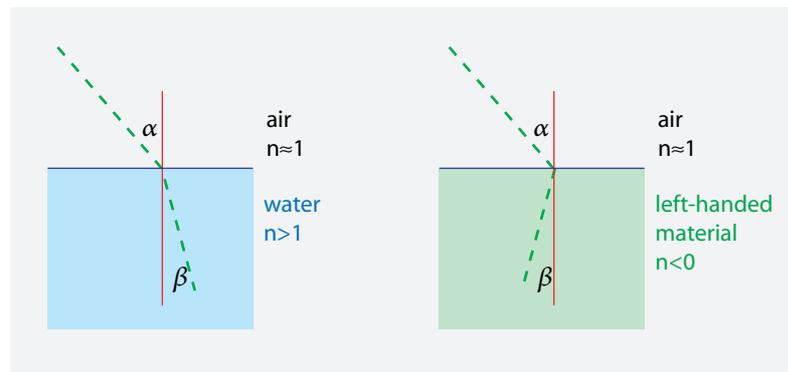


FIGURA 114 Índices de refracción n , positivo y negativo.

200 AÑOS TARDE – ÍNDICES DE REFRACCIÓN NEGATIVA

En 1967 el físico soviético Victor Veselago hizo una extraña predicción: el índice de refracción podría tener valores *negativos* sin invalidar ninguna 'ley' conocida de la física. Un índice negativo quiere decir que un rayo es refractado hacia el mismo lado de la vertical, tal como se muestra en la Figura 114. Como resultado, a diferencia de lo que ocurre con los materiales habituales, las lentes cóncavas hechas con tales materiales concentrarán los rayos paralelos y las lentes convexas los dispersarán.

En 1996, John Pendry y su grupo sugirió algunas formas de fabricar tales materiales. En 2000, se publicó una primera confirmación experimental para la refracción de microondas, pero chocó con una fuerte incredulidad. En 2002 el debate se convirtió en un constante bamboleo. Se argumentaba que los índices de refracción negativa implicaban velocidades superiores a las de la luz y que eso era solamente posible para la velocidad de fase o la velocidad de grupo, pero no para la energía o la verdadera velocidad de señal. Los problemas conceptuales surgían sólo porque en algunos sistemas físicos el ángulo de refracción para el movimiento de fase y para el movimiento de energía diferían.

Mientras tanto, el debate ha terminado. Se han observado con frecuencia índices negativos de refracción; se han explorado de manera exhaustiva los sistemas correspondientes en todo el mundo. Los sistemas con índice de refracción negativa existen. Siguiendo a Veselago, los materiales que muestran esta propiedad son conocidos como *zurdos*. La razón es que los vectores del campo eléctrico, el campo magnético y el vector de onda forman un triplete para zurdos, en oposición a lo que ocurre con el vacío y los materiales habituales, donde el triplete sigue la regla de la mano derecha. Todos los materiales zurdos tienen permeabilidad magnética *negativa* μ_r y coeficiente dieléctrico *negativo*, es decir, permitividad negativa ϵ_r . No obstante, en sistemas reales, estas propiedades se presentan solamente para un estrecho rango de frecuencias, generalmente para el rango de las microondas.

Aparte de las propiedades no usuales de la refracción, los materiales zurdos presentan una velocidad de fase negativa, es decir, una velocidad de fase opuesta a la velocidad de energía y muestran un efecto Doppler opuesto. Estas propiedades han sido confirmadas experimentalmente. Los materiales zurdos deberían producir también ángulos obtusos en el efecto Vavilov-Čerenkov, por tanto, emitiendo radiación Vavilov-Čerenkov en dirección hacia atrás en lugar de hacia adelante. Ellos han predicho tener un *efecto Goos-*

Ref. 123

Ref. 124

Ref. 125

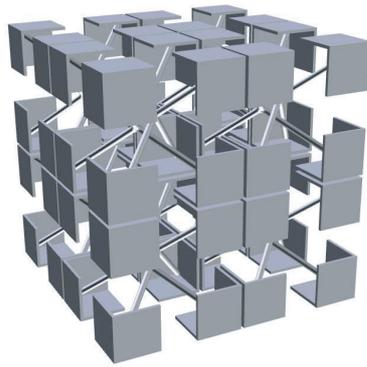


FIGURA 115 Ejemplo de un metamaterial isotrópico (M. Zedler et al., © 2007 IEEE).

Hänchen inverso y mostrar un efecto Casimir repulsivo. No obstante, estas predicciones no han sido verificadas todavía.

Ref. 126 Resulta más interesante saber que los materiales con índice negativo predicen la construcción de lentes completamente planas. Además, en el año 2000, John Pendry obtuvo la atención de toda la comunidad de físicos del mundo con la predicción de que las lentes fabricadas con tales materiales, en particular con un índice de refracción $n = -1$, serían *perfectas*, de tal manera que eliminaría el límite de difracción normal. Esto podría ser así, ya que tal lente perfecta también podría captar las partes *evanescentes* de las ondas – esto es, las que se amortiguan de manera exponencial – mediante una amplificación adecuada al caso. Ref. 125 Los primeros experimentos parecen confirmar esta predicción. La exploración del asunto es todavía un completo vaivén.

Hasta ahora, los materiales zurdos han sido obtenidos con microondas y frecuencias de terahertz. Se han publicado las primeras declaraciones para un dominio visible, pero deben ser tratadas con cuidado. Debería ser mencionado aquí que desde hacía mucho tiempo ya era conocido un sistema de refracción negativa: las rejillas de difracción. Podríamos argüir que los materiales zurdos son rejillas que intentan funcionar en todas las direcciones espaciales. Y la realidad es que todos los materiales zurdos realizados hasta ahora son disposiciones periódicas de circuitos electromagnéticos.

METAMATERIALES

La realización más sencilla de un sistema zurdo la constituyen los metamateriales. Los *metamateriales* son estructuras aisladas de metal construidas con una periodicidad por debajo de la longitud de onda de radiación para la que han sido diseñadas, de tal manera que la estructura se comporta como un material homogéneo. Los metamateriales tienen una permitividad negativa o de alguna manera inusual, o propiedades de permeabilidad en un rango determinado de longitud de onda, generalmente en el dominio de las microondas; algunos metamateriales son zurdos.

Ref. 127 Actualmente, hay dos enfoques básicos para fabricar metamateriales. El primero es construir un metamaterial a partir de una gran variedad de estructuras resonantes compactas, tales como circuitos condensador-inductor (LC-) o esferas dieléctricas. Ref. 128 El segundo enfoque consiste en construir un metamaterial a partir de líneas de transmisión. El último enfoque tiene menos pérdidas y un rango espectral más amplio; en la [Figura 115](#)

se muestra ejemplo de este tipo. La comparación y exploración de las diferentes realizaciones es objeto de una intensa investigación.

La mayoría de los metamateriales están concebidos para microondas u ondas de terahertz. Las aplicaciones industriales de los metamateriales están dirigidas al diseño de antenas; por ejemplo, una antena dipolar podría ser colocada sobre un metamaterial para permitir la construcción de una antena direccional plana. En la tecnología de los terahertz, podrían surgir algunas aplicaciones.

Los trabajadores menos serios en este campo dicen que se pueden conseguir *capas de invisibilidad* con los metamateriales. Si bien esto en un buen reclamo para atraer fondos y salir en la prensa, el sueño no es realista, debido a la inevitable pérdida de señal de los materiales, la dispersión, la refracción, el tamaño finito de las células, la necesidad de ventanas para observar el exterior desde el interior y la imposibilidad de conseguir la invisibilidad para todas las longitudes de ondas. Hasta ahora todos los aviones que dicen ser invisibles aunque sea solamente para frecuencias específicas del radar han resultado ser visibles para el radar después de todo. Pero es conocido que las fuentes militares de financiación mantienen una relación distante con la realidad.

Los metamateriales para el sonido y para las ondas de frecuencias más bajas son también objeto de investigación. Semejantes metamateriales acústicos o mecánicos no han encontrado todavía una aplicación técnica.

LUZ ALREDEDOR DE LAS ESQUINAS – DIFRACCIÓN

Ref. 129 La luz dobla las esquinas. Este efecto fue llamado *difracción* por Francesco Grimaldi, en su obra *Physico-mathesis de lumine*, publicada en 1665. Grimaldi estudió las sombras con mucho cuidado. Encontró lo que ahora aprende todo el mundo en la escuela secundaria: la luz dobla las esquinas de la misma forma que lo hace el sonido, y que la difracción de la luz se debe a la naturaleza de las ondas de luz. (Newton mostró interés por la óptica tras leer a Grimaldi; posteriormente Newton desmintió erróneamente las conclusiones de Grimaldi.)

Ref. 130 Debido a la difracción, es *imposible* producir de manera estricta rayos de luz paralelos. Por ejemplo, cualquier rayo láser diverge una mínima cantidad, conocida como *límite de difracción*. Probablemente usted sabe que los Ojos-de-Gato más caros del mundo se encuentran en la Luna, donde fueron depositados por el Lunokhod y las misiones del Apolo. ¿Puede calcular la anchura que un rayo láser con una divergencia mínima llega a tener cuando alcanza la Luna y retorna a la Tierra, asumiendo que tenía 1 m de ancho cuando dejó la Tierra? ¿Qué anchura tendría en su retorno si hubiera tenido 1 mm de ancho en su partida? En resumen, tanto la difracción como la imposibilidad de rayos no divergentes confirman que la luz es una onda.

Desafío 172 s La difracción implica que no hay imágenes perfectamente definidas; existe un *límite de resolución*. Esto es verdad para todos los instrumentos ópticos, incluyendo el ojo. La resolución del ojo está entre uno y dos minutos de arco, es decir, entre 0.3 y 0,6 mrad. El límite es parcialmente debido al tamaño finito de la pupila. (Esa es la causa de que entrecerrar los ojos ayuda a ver más claramente.) En la práctica, la resolución del ojo está frecuentemente limitada por las aberraciones cromáticas y las imperfecciones de la forma de la cornea y de la lente. (¿Puede comprobar los resultados y su interpretación mediante cálculo? ¿Es cierto que el número de bastoncillos del ojo se ajusta exactamen-

Desafío 173 d

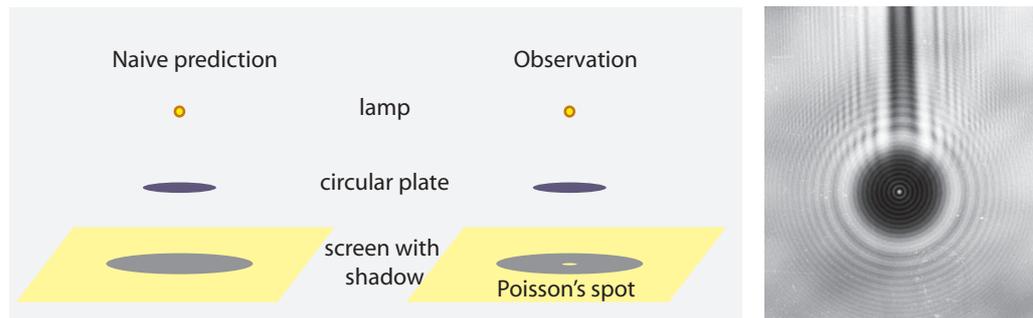


FIGURA 116 Las sombras demuestran que la luz es una onda: la ingenua expectativa (izquierda), descuidando la idea de onda, y la observación real (centro y derecha) de la sombra de un objeto circular (fotografía © Christopher Jones).

Desafío 174 s

te a su resolución?) Así, por ejemplo, hay una distancia máxima a la cual los humanos pueden distinguir las dos luces delanteras de un coche. ¿Puede estimarla?

Ref. 131

Desafío 175 ny

Los límites de la resolución también hacen imposible ver la Gran Muralla en el norte de China desde la Luna, en contra de los que frecuentemente se dice. En las pocas partes que no están todavía en ruinas, la muralla tiene unos 6 metros de anchura, y aunque proyectara una amplia sombra por la mañana o por la tarde, el ángulo que la delimita es inferior a un segundo de arco, por tanto es completamente invisible para el ojo humano. De hecho, tres cosmonautas diferentes que viajaron a la Luna realizaron búsquedas cuidadosas y confirmaron que lo que se decía era absurdo. La historia es una de las leyendas urbanas más obstinadas. (¿Es posible ver la Muralla desde la lanzadera espacial?) Los objetos mayores hechos por la mano del hombre son los pólders de las tierras recuperadas en los Países Bajos; *son* visibles desde el espacio exterior. Así como la mayoría de las grandes ciudades y también las autopistas de Bélgica durante la noche; sus brillantes iluminaciones las hacen destacar claramente del lado oscuro de la Tierra.

La difracción tiene extrañas consecuencias. La sombra de una bolita de un cojinete de bolas iluminada, muestra, contra toda expectativa, una mancha brillante en su centro. En la **Figura 116** se ilustra el efecto. Este 'agujero' en la sombra fue predicho en 1819 por Denis Poisson (b. 1781 Pithiviers, d. 1840 Paris) con objeto de mostrar a qué absurdas consecuencias llevaría la teoría de la luz como una onda. Él acababa de leer la descripción matemática de la difracción desarrollada por Augustin Fresnel* sobre la base de la descripción de onda para la luz. Pero poco tiempo después, François Arago observó realmente el punto de Poisson, convirtiendo a Poisson, haciendo famoso a Fresnel y acelerando la aceptación general de las propiedades de las ondas de luz.

La difracción también puede ser utilizada en aplicaciones especiales determinadas, para producir imágenes. La **Figura 117** muestra unos cuantos ejemplos del uso de la difracción en la óptica. De estos, los moduladores acústico-ópticos son utilizados en muchos sistemas de láseres, por ejemplo en los espectáculos con láser. También los hologra-

* Augustin Jean Fresnel (b. 1788 Broglie, d. 1827 Ville d'Avray), ingeniero y físico a tiempo parcial. La 's' de su apellido no se pronuncia. En 1818, publicó su gran trabajo sobre la teoría de ondas por el que obtuvo el premio de la French Academy of Sciences en 1819. Para mejorar sus finanzas, trabajó en la comisión responsable de los faros, para lo cual desarrolló la bien conocida lente de Fresnel. Murió prematuramente, en parte debido a la tuberculosis y en parte por el agotamiento del exceso de trabajo.

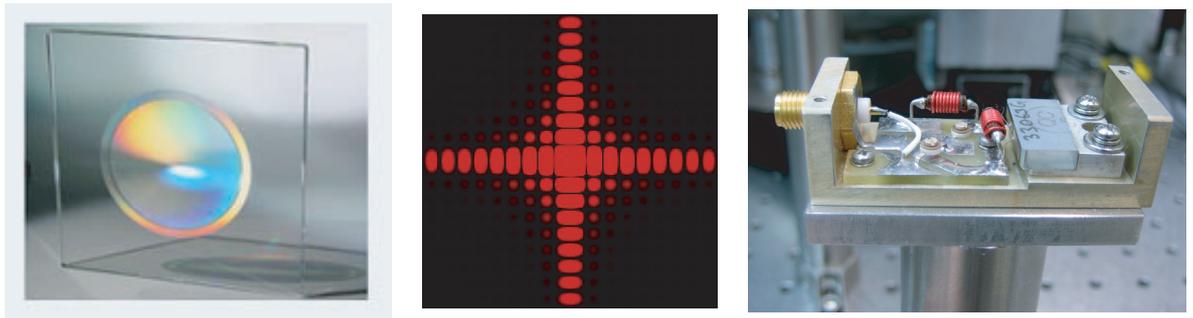


FIGURA 117 Ejemplos de óptica difractiva: lente esférica difractiva, el resultado de un láser rojo a través de una lámina de plástico con un generador difractivo transversal, y un modulador óptico-acústico utilizado para modular los rayos láser transmitidos a través de un cristal incorporado (© Jenoptik, Wikimedia, Jeff Sherman).

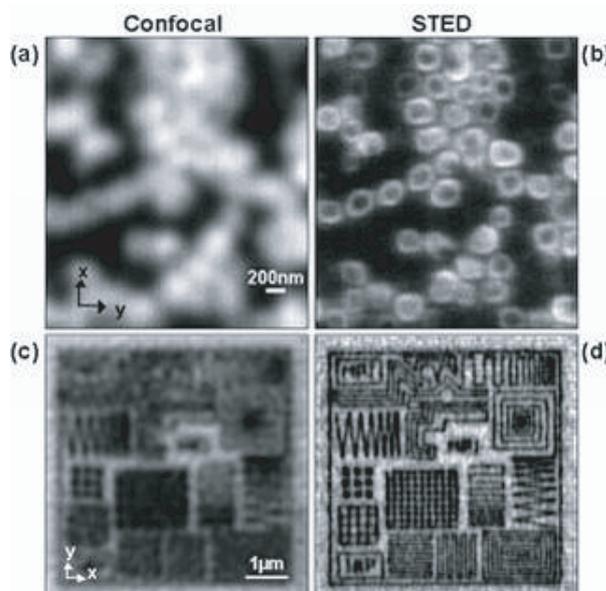


FIGURA 118 Microscopia óptica usando disminución en la emisión estimulada de una sub-longitud de onda (derecha) comparada con un microscopio confocal convencional (izquierda) (© MPI für biophysikalische Chemie/Stefan Hell).

Página 189 mas, que serán discutidos más adelante, pueden ser considerados una clase especial de imágenes difractivas.

Resumiendo, la difracción a veces se usa para formar o para modificar imágenes; pero sobre todo, en todas las imágenes, la difracción determina la resolución, es decir, la calidad de la imagen.

SUPERANDO EL LÍMITE DE LA DIFRACCIÓN

Página 181

Para todos los métodos de creación de imágenes, la carrera es para conseguir las imágenes con la mayor resolución posible. Las mencionadas lentes perfectas no han sido fabricadas para la luz visible. No obstante, en los recientes años, con otras técnicas de producción de imágenes con resoluciones *menores* que la longitud de onda de la luz, se

han conseguido grandes progresos.

A día de hoy, se pueden producir extraordinarias imágenes con microscopios de luz modificados que se pueden encontrar en el comercio. El límite de la difracción convencional para los microscopios es

$$d \geq \frac{\lambda}{2n \sin \alpha}, \quad (79)$$

donde λ es la longitud de onda, n el índice de refracción y α es el ángulo de observación. Hay tres formas principales de evitar este límite. La primera es trabajar en el 'campo-cercano', donde no interviene el límite de la difracción, la segunda forma consiste en observar y medir los efectos de la difracción y luego utilizar ordenadores para reducir los efectos vía proceso de imagen, la tercera forma consiste en utilizar los efectos que produce la emisión de luz de una muestra cuya longitud de onda es más pequeña que la de la luz, y la cuarta es usar la resolución a tiempo para incrementar la resolución en el tiempo.

Una técnica conocida de campo-cercano es la exploración óptica del campo cercano con un microscopio óptico. La luz se envía a través de una fibra de vidrio cónica con un agujero transparente en su extremo, por debajo de 15 nm; la punta se escanea sobre la muestra, de tal manera que se tome la imagen punto por punto. Estos microscopios consiguen la resolución más alta de todos los microscopios ópticos. No obstante, resulta difícil conseguir una cantidad práctica de luz a través del pequeño agujero al final de la punta.

Muchas técnicas de ordenador pueden conseguir imágenes con resoluciones inferiores al límite de refracción. Los tipos más sencillos de estas técnicas de microscopía de deconvolución ya están comercialmente disponibles.

Una de las primeras técnicas que superaron el límite de la difracción en una cantidad sustancial utilizando un microscopio convencional es la *microscopía de reducción de emisión estimulada* (STED). Utilizando un sistema inteligente de iluminación basado en dos rayos láser, la técnica permite tamaños puntuales de casi el tamaño molecular. La nueva técnica, un tipo especial de microscopía fluorescente desarrollados por Stefan Hell, utiliza la iluminación de un rayo láser con un punto circular y un segundo láser con una forma parecida a un anillo. Como resultado de esta combinación, las técnicas modifican el límite de la refracción hasta

$$d \geq \frac{\lambda}{2n \sin \alpha \sqrt{I/I_{\text{sat}}}}, \quad (80)$$

Ref. 132

de tal manera que una elección adecuada de la intensidad de saturación I_{sat} permite la reducción del límite de la difracción hasta valores arbitrariamente bajos. Hasta ahora, se han llevado a cabo microscopías de luz con una resolución de 16 nm. La **Figura 118** muestra una imagen ejemplo. Ésta y otras técnicas similares han impulsado el campo de la microscopía; ahora ocupan un lugar común en la ciencia de materiales, la medicina y la biología. En 2014, Stefan Hell recibió el Premio Nobel de Química por sus logros.

La búsqueda de nuevas técnicas de microscopía están todavía en curso, así como en los numerosos intentos de transferir la resolución del tiempo en la resolución del espacio. Otro importante dominio de investigación es el desarrollo de microscopios que



FIGURA 119 En algunos materiales, los rayos de luz pueden comportarse como tirabuzones entrelazados.

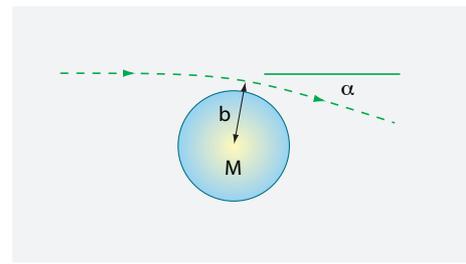


FIGURA 120 Las masas doblan la luz.

puedan ser incluidos en los endoscopios, de tal manera que los médicos puedan explorar el cuerpo humano sin necesidad de grandes operaciones. La microscopía sigue siendo un campo en plena marcha.

OTRAS FORMAS DE DOBLAR LA LUZ.

La tecnología óptica se puede definir como la ciencia de doblar la luz. La reflexión, la refracción y la difracción son los métodos más importantes para conseguirlo. Pero tiene sentido explorar el asunto de manera más general: ¿qué otras formas se pueden utilizar para doblar rayos de luz?

Vol. I, página 214
Vol. II, página 157

Una forma más de doblar la luz es la gravedad, ya tratada con anterioridad en los capítulos sobre gravedad universal y en aquellos sobre la relatividad general. Puesto que el efecto de la gravedad es débil, sólo tiene importancia para la astronomía. La lente gravitacional se utiliza en varios proyectos para medir el tamaño, la masa y la distancia de las galaxias y de los grupos de galaxias. El efecto generalmente despreciable de la gravedad entre dos rayos de luz fue también tratado anteriormente.

Vol. II, página 263

En la práctica, no existen otros métodos a escala de laboratorio para doblar rayos de luz aparte de la reflexión, la refracción y la difracción. Todos los métodos conocidos son casos especiales de estas tres opciones.

Página 184

Una manera importante en la que se puede usar materiales para doblar la luz son los *deflectores acústico-ópticos*. Éstos trabajan como moduladores acústico-ópticos, esto es, una onda sonora que viaja a través de un cristal genera una rejilla de difracción que se usa para desviar un rayo láser. Tales moduladores por tanto, utilizan la difracción para doblar la luz.

Ref. 133

Los campos electromagnéticos adicionales generalmente no influyen en la luz directamente, ya que la luz no tiene carga y que las ecuaciones de Maxwell son lineales. Pero resulta que para algunos materiales las cargas efectivas no son lineales y la cosa cambia. Por ejemplo, en ciertos materiales foto-refractivos, dos rayos de luz próximos pueden sin embargo *entrelazarse* uno alrededor del otro, como fue demostrado por Segev y sus colaboradores en 1997. La **Figura 119** lo ilustra. Este efecto es por tanto una forma de refracción.

Otra forma corriente de desviar la luz es usar su polarización. Muchos materiales, por ejemplo los cristales líquidos o los materiales electro-ópticos, doblan los rayos de luz dependiendo de su polarización. Estos materiales se pueden utilizar para dirigir o

incluso bloquear los rayos láser. Los moduladores de cristal líquido y los moduladores electro-ópticos, por tanto se basan en la refracción.

Vol. IV, página ?? La luz dispersa también cambia la dirección. Es debatible si es apropiado proponer este proceso como ejemplo del doblado de la luz. En cualquier caso, la dispersión por partículas es importante: sin ella, no veríamos casi nada a nuestro alrededor. Después de todo, lo que hacemos todos los días es detectar luz dispersa. Y por supuesto, la dispersión es un caso de difracción.

La pregunta siguiente es: ¿qué métodos existen para *mover* los rayos de luz? Incluso aunque los fotones tengan masa cero y los electrones tengan masa, el barrido de rayos de electrones se consigue con facilidad a una frecuencia superior a 1 GHz, mientras que el barrido de rayos potentes de luz resulta difícil por encima de 10 kHz.

Página 157 El movimiento de los rayos de luz –y de los *rayos láser* en particular – es importante: las soluciones son la base de una industria considerable. Los rayos láser con movilidad se utilizan en los tratamientos para los ojos mediante el láser, en el marcado con láser, en los espectáculos con rayos láser, para el corte con láser, en la lectura del código de barras en los supermercados, para la creación rápida de prototipos, para la sinterización de piezas en tres dimensiones, para los medidores de distancias por láser, para el lidar (Laser Imaging Detection and Ranging), para las mencionadas técnicas de microscopía, y para distintos procesos industriales en la producción de circuitos electrónicos impresos, de productos semiconductores, y de pantallas de teléfonos móviles. La mayoría de los escáneres láser están hechos de espejos móviles, prismas o lentes, aunque los escáneres acústico-ópticos y los escáneres electro-ópticos, que consiguen un ratio de escaneo de varios MHz con rayos de baja potencia, se utilizan también en aplicaciones especiales. Muchas aplicaciones esperan con ansiedad inventos que permitan un escaneo láser más rápido.

En resumen, el movimiento de los rayos de luz requiere que se mueva materia, generalmente en la forma de espejos y lentes. La luz se mueve en línea recta solamente si viaja *lejos de la materia*. En la vida cotidiana, 'lejos' significa simplemente más de unos cuantos milímetros, ya que los efectos electromagnéticos son despreciables a esas distancias, principalmente debido a la verdaderamente velocidad supersónica de la luz. No obstante, como hemos visto, en algunos casos en los que está involucrada la gravitación, es necesaria distancias más separadas de la materia para asegurar el movimiento de la luz sin perturbaciones.

UTILIZANDO LAS INTERFERENCIAS PARA LA CREACIÓN DE IMÁGENES

Página 113 Como vimos anteriormente para el caso de la guitarra, las imágenes producen interferencias que pueden resultar de utilidad. Sobre todo, los efectos de las interferencias se pueden usar para medir la deformación y el movimiento de los objetos.

Ref. 134 Se pueden usar las interferencias para la mejora de las imágenes. La [Figura 121](#) muestra la mejora que es posible conseguir cuando se utiliza un caso especial de interferómetro, el llamado *interferómetro Talbot-Lau*, con los rayos-X. En particular, la técnica aumenta la sensibilidad de los rayos-X para los tejidos blandos.

La interferencia es también el fundamento de la holografía, una técnica importante para la producción de imágenes tridimensionales.

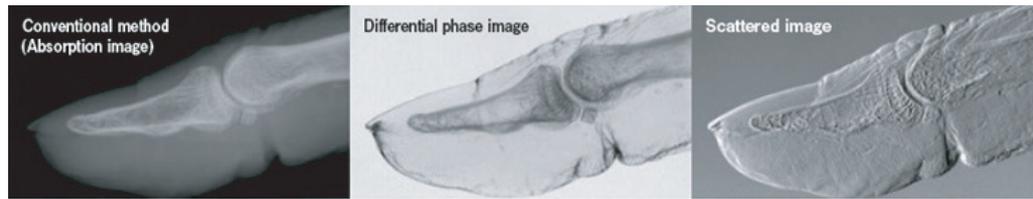


FIGURA 121 Tres tipos de imágenes de rayos-X de un pulgar: una imagen convencional (izquierda) y dos imágenes tomadas usando los efectos de las interferencias (© Momose Atsushi).

¿CÓMO SE HACEN LOS HOLOGRAMAS Y OTRAS IMÁGENES TRIDIMENSIONALES?

Nuestro sentido de la vista nos proporciona una imagen del mundo que nos rodea que incluye la impresión de profundidad. De manera constante sentimos nuestro entorno en *tres* dimensiones. La esteriopsis, la sensación de profundidad, es causado por tres efectos principales. Primero, los dos ojos ven *diferentes imágenes*. Segundo, las imágenes formadas en cada ojo son *dependientes de la posición*: cuando movemos la cabeza, observamos efectos de paralaje entre los cuerpos cercanos y los alejados de nosotros. Tercero, para diferentes distancias, nuestros ojos necesitan *enfocar de manera diferente y converger* más o menos fuertemente, dependiendo de la posición del objeto.

Una fotografía corriente en papel no capta ninguno de esos tres efectos tridimensionales: una fotografía en papel corresponde a una imagen tomada por un ojo, desde un punto determinado y con un determinado enfoque. De hecho, todas las cámaras fotográficas son fundamentalmente copias de un simple ojo estático con un foco fijo.

Cualquier sistema que trate de proporcionar la percepción de la profundidad en un observador debe incluir al menos uno de los tres efectos tridimensionales que se acaban de mencionar. En realidad, el tercer efecto, la variación del foco con la distancia, es el más débil, de tal manera que la mayoría de los sistemas se concentran en los otros dos efectos, diferentes imágenes para los dos ojos y una imagen que dependa de la posición de la cabeza.

Las fotografías en estéreo y por extensión las películas en estéreo utilizan el primer efecto, enviando imágenes diferentes a los diferentes ojos, mediante trucos técnicos variados. Un truco corriente consiste en la utilización de gafas de colores. Algunos tipos de postales, así como pantallas de ordenador está cubiertas por una delgada lente cilíndrica que permite el envío de imágenes diferentes a cada uno de los ojos, por lo que generan la impresión de profundidad. Es bien conocido que a grandes distancias de los objetos, las dos imágenes de los ojos de los humanos no difieren en absoluto. Esta distancia límite es conocida como *radio estereoscópico* y se encuentra entre 200 m y 500 m.

Pero efectivamente el efecto de profundidad más espectacular es el segundo, obtenido siempre que se puedan obtener imágenes dependientes de la posición de la cabeza. Los modernos *sistemas de realidad virtual* toman películas utilizando una cierta cantidad de cámaras en todas direcciones. El uso de hasta 12 cámaras, por ejemplo con dos cámaras a distancia visual apuntando a lo largo de cada eje de coordenadas. De esta manera también se incluye el primer efecto de profundidad. Usando una máscara con sensores de dirección unidos a la cabeza, estos sistemas interpolan la película tomada en la dirección real de la cabeza del que lo visualiza o genera una película calculada por ordenador en



FIGURA 122 Los hologramas con la mayor calidad disponible en el mundo hasta el presente son los producidos por Yves Gentet y se pueden consultar en su sitio web www.ultimate-holography.com. Son hologramas Denisjuk. El visitante es obligado a pensar que hay mariposas reales detrás del panel de vidrio. (© Yves Gentet).

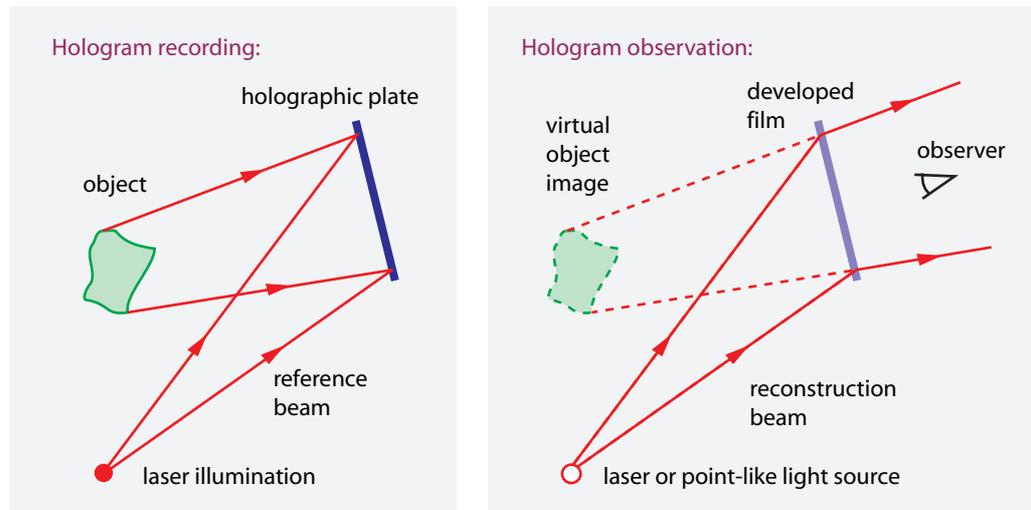


FIGURA 123 El registro (izquierda) y la observación (derecha) de un holograma monocromático (en este caso, en transmisión). Los verdaderos hologramas en color utilizan tres láseres, para el rojo, el verde y el azul.

función de la orientación de la cabeza. Tales sistemas de realidad virtual permiten a cualquier persona experimentar de una manera sorprendentemente realista el cabalgar sobre la espalda de un águila en pleno vuelo a través de las montañas o bucear entre tiburones en la profundidad del océano.

Hasta ahora, el único método de conseguir los tres efectos de la profundidad es la *holografía*. Las imágenes resultantes se llaman *hologramas*. La Figura 122 muestra un ejemplo de holograma. Aún cuando un holograma es solamente un película con un grosor de una fracción de milímetro, el observador tiene la impresión de que hay objetos detrás de él. Dependiendo de los detalles de la geometría, puede parecer que los objetos flotan por delante de la película.

Un holograma reproduce todos los datos que se ven desde cualquier punto de una región del espacio. Un *holograma* consiste por lo tanto en un conjunto almacenado de imágenes de un objeto dependientes de la posición que ocupe. Como primer paso, un holograma se captura almacenando la amplitud y la fase de la luz emitida o dispersada por un objeto, tal como se muestra en las Figura 123 y Figura 125. Para conseguir este almacenamiento de la totalidad del campo de luz, el objeto se ilumina con una luz *coherente*,* tal como se almacena la luz de un láser, y el patrón de interferencia entre la iluminación y la luz dispersa; generalmente se almacena en una película fotográfica. La Figura 123 muestra esquemáticamente el procedimiento. En un segundo paso, iluminando la película realizada con luz coherente – procedente de un láser o de una lámpara que sea tan fina como fuera posible – permite ver una imagen tridimensional. En particular, debido a la reproducción de la situación, la imagen parece flotar en el espacio libre

* Hablando de manera general, dos rayos de luz o dos partes de un rayo de luz – o de otras ondas – son llamados *coherentes* si presentan una diferencia de fase y frecuencia constantes. En particular, debido a las perturbaciones ubicuas sólo ocurre en un cierto volumen finito, el cual se conoce como *volumen de coherencia*. La coherencia permite y es requerida para la interferencia.

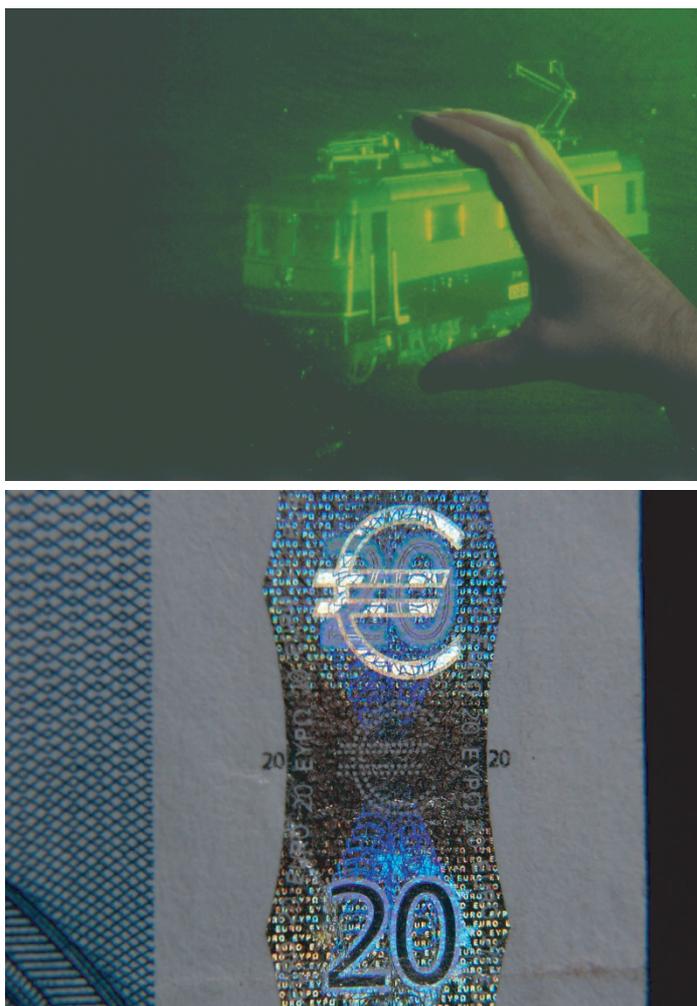


FIGURA 124 Holograma de un tren y el holograma de reflexión sobre un billete de 20 Euros (© Anónimo, Hans-Ulrich Pötsch).

La **Figura 124** muestra unos cuantos ejemplos de hologramas. Los hologramas fueron desarrollados en 1947 por el famoso físico Dennis Gabor (b. 1900 Budapest, d. 1979 London), quien recibió en 1971 el Premio Noble de Física por su trabajo. La belleza del invento de Gabor consiste en que es principalmente teórica, ya que los láser no estaban todavía disponibles en esa época.

Los hologramas pueden ser *transmisiones* de hologramas, como los que se pueden ver en los museos, o *imágenes* de hologramas, como los de una tarjeta de crédito o los de un billete. Los hologramas pueden ser hologramas de láser o de luz blanca. La mayoría de los hologramas de colores son hologramas arcoíris, mostrando colores falsos que no están relacionados con los objetos originales. Los hologramas de color real, hechos y reproducidos con tres láseres diferentes, son posibles pero caros.

Los hologramas se fundamentan en la interferencia. Las imágenes de las interferencias se pueden utilizar de otras formas. Mediante una doble iluminación en dos momentos

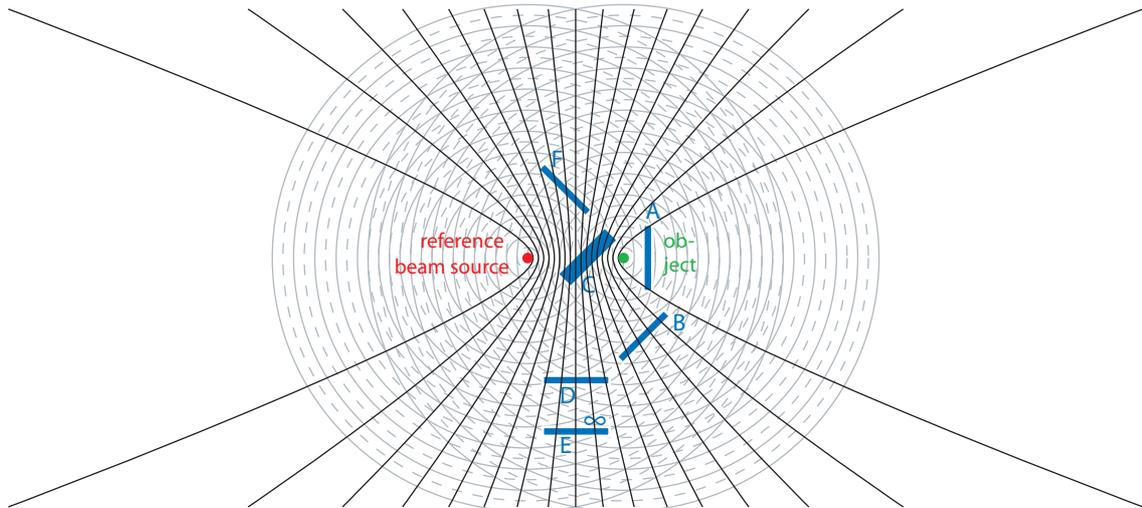


FIGURA 125 Según sean las diferentes posiciones del objeto (verde), la placa holográfica (azul) y el rayo de referencia (rojo), surgirán diferentes tipos de hologramas. La situación A indica el holograma de una transmisión fina controlada como el que propuso Gabor, B un holograma de una transmisión fina sin control, siguiendo a Leith y Upatnieks, C un holograma de reflexión gruesa, o un holograma de luz blanca, siguiendo a Denisyuk, D un holograma de Fourier a gran distancia, E un holograma de Fraunhofer a distancia infinita y un holograma bidimensional con un tren de ondas invertido (© DGH).

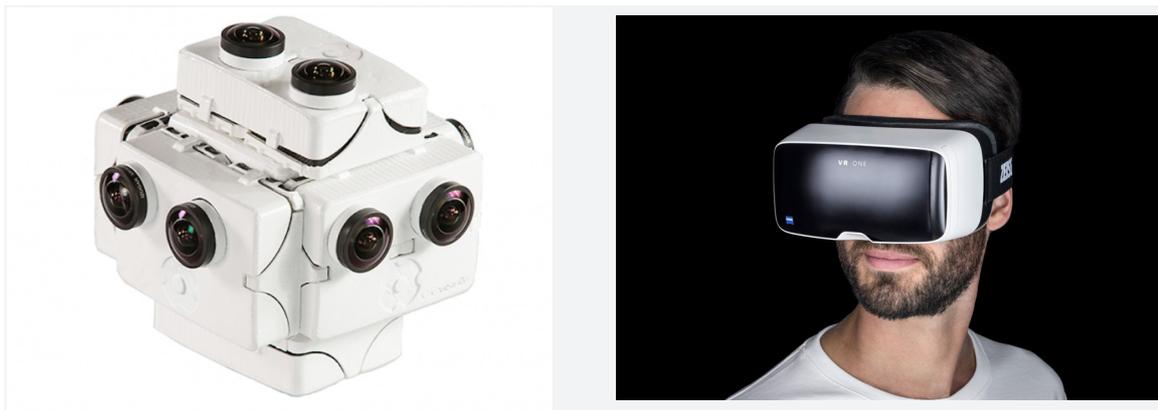


FIGURA 126 Cámara de realidad virtual recomendada para un viaje a la Estación Espacial Internacional y unos cascos para revivir los vídeos resultantes (© SpaceVR y Zeiss)

distintos, se obtienen los llamados *interferogramas*, los cuales permiten la visualización y la medida de la deformación de un objeto. Los interferogramas se usan para observar y medir los efectos de la deformación, de la oscilación y de la temperatura.

¿Es posible hacer hologramas *en movimiento*? Sí; no obstante, los preparativos técnicos todavía están sujetos a investigación. Hasta ahora, tales sistemas solamente existen en unos cuantos laboratorios (por ejemplo, www.optics.arizona.edu/pstg/index.html) y son caros. Por cierto, ¿puede describir cómo podría distinguir un holograma en movimiento de gran calidad de un cuerpo real sin tocarlo?

Desafío 177 s

Al comienzo de la industria de los ordenadores, el objetivo de los fabricantes de panta-

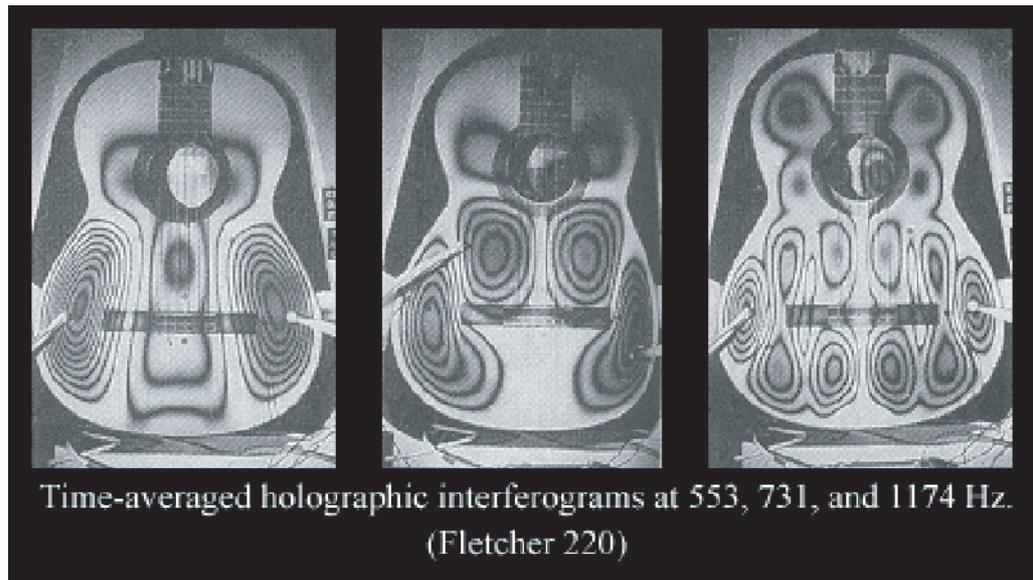


FIGURA 127 Interferogramas de un guitarra (© Wikimedia).

llas era conseguir pantallas *con calidad fotográfica*, es decir, pantallas con imágenes que no pudieran ser distinguidas de una fotografía. Este objetivo se ha hecho realidad. En 2012, un visionario tecnológico propuso que el siguiente objetivo de la industria debería ser la producción de pantallas con *calidad de ventana*, o sea, pantallas cuyas imágenes que no pudieran distinguirse de lo que se ve por una ventana. Esto debería incluir la tridimensionalidad de todo lo mostrado dentro de tal pantalla. ¿Serán posibles tales pantallas alguna vez?

Desafío 178 d

No todas las imágenes tridimensionales son hologramas. Usando monitores giratorios, espejos giratorios o pantallas giratorias, es posible producir imágenes tridimensionales asombrosas. En la [Figura 128](#) se presenta un ejemplo impresionante de tal demostración tecnológica. ¿Puede explicar por qué no es un éxito comercial?

Desafío 179 e

En la [Figura 129](#) se muestra un conocido juguete que produce imágenes flotantes con dos espejos parabólicos apilados. A veces se le llama 'mirascopio', pero este horrible término mezcla el latín y el griego y como todos los términos horribles, incluyendo 'automóvil', nunca deberían utilizarse. ¿Puede encontrar cómo los espejos parabólicos producen este asombroso efecto?

Desafío 180 e

IMÁGENES A TRAVÉS DEL ESCANEEO

Cuando se producen las imágenes utilizando lentes o espejos, todos los píxeles de una imagen se producen en paralelo. Por el contrario, en las técnicas de escaneo, las imágenes se construyen serialmente, pixel a pixel. Aún cuando el barrido de imágenes resulta intrínsecamente más lento que cualquier técnica paralela, tiene sus propias ventajas: el escaneo permite imágenes en tres dimensiones y conseguir resoluciones superiores al límite de refracción. Las técnicas de escaneo se usan principalmente en microscopía.

La técnica más famosa de barrido no utiliza rayos de luz, sino electrones: *el microscopio*

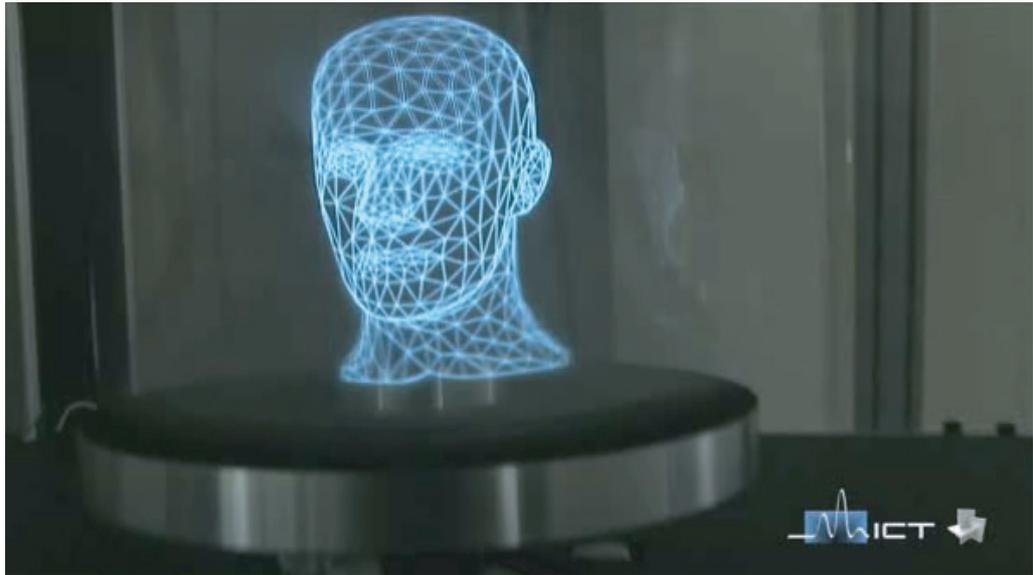


FIGURA 128 Un sistema de imagen tridimensional fundamentado en un espejo giratorio, desde la University of Southern California, en gl.ict.usc.edu/Research/3DDisplay (© USC Stevens Institute for Innovation).



FIGURA 129 Una pieza de Lego flotante exhibido por dos espejos parabólicos apilados, el superior con un agujero. La imagen de la derecha muestra a ambos, la pieza yacente al fondo y la image flotante. (© Christoph Schiller).

electrónico de escaneo. Como muestra la [Figura 131](#), tales microscopios pueden producir imágenes asombrosas. No obstante, las imágenes producidas son bidimensionales. En casos especiales, también se utilizan *microscopios iónicos*. Todos los microscopios que usan partículas cargadas existen tanto como microscopios de escaneo o como microscopios de transmisión.

Un ejemplo típico de una moderna técnica de captación de imagen tridimensional basada en la luz es la *microscopía confocal de barrido con láser*. La técnica se basa en la eliminación de todas las señales luminosas que quedan fuera del foco del microscopio. La técnica permite tomar imágenes de un espécimen más o menos transparente a una

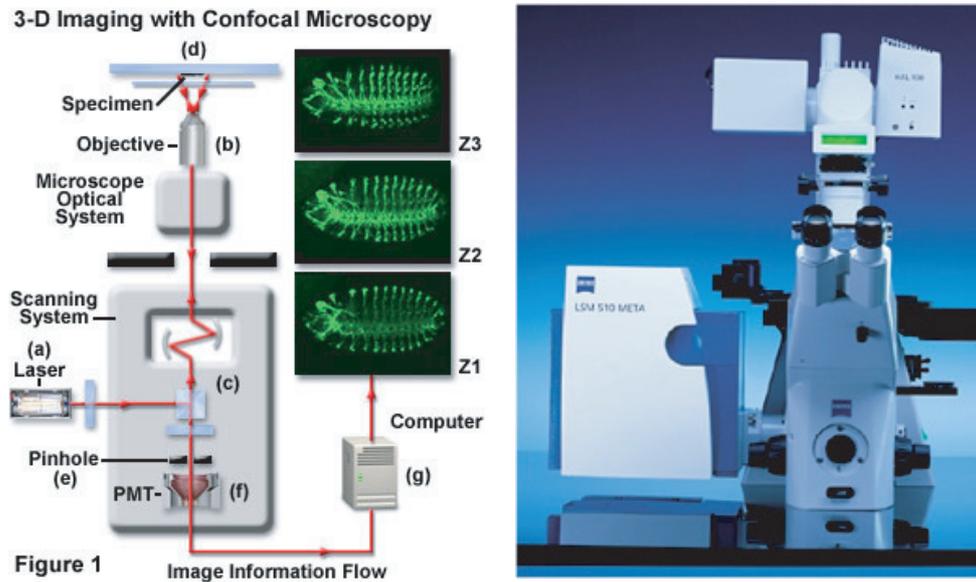


FIGURA 130 Dos técnicas de escaneo de imágenes: microscopía de escaneo con láser confocal y microscopía multifotónica (© Nikon, Carl Zeiss).

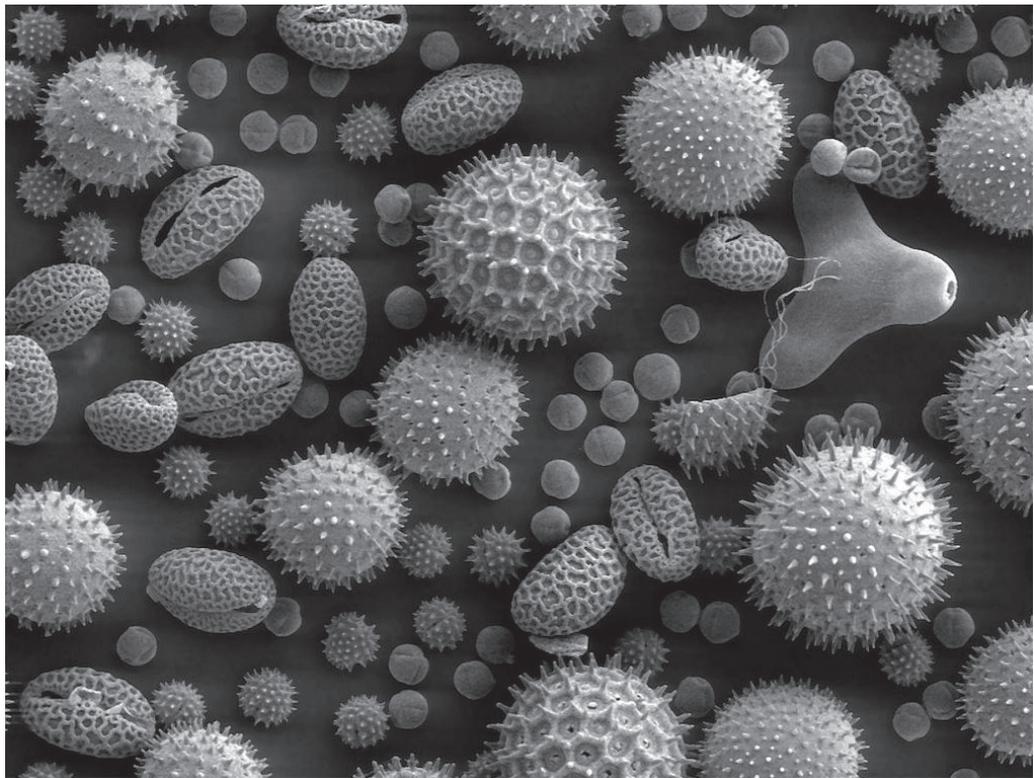


FIGURA 131 Un moderno microscopio electrónico de escaneo, y una imagen de polen – tamaño del campo de unos 0.3 mm – mostrando la resolución y la profundidad del campo alcanzable con esta técnica (© Zeiss, Wikimedia).

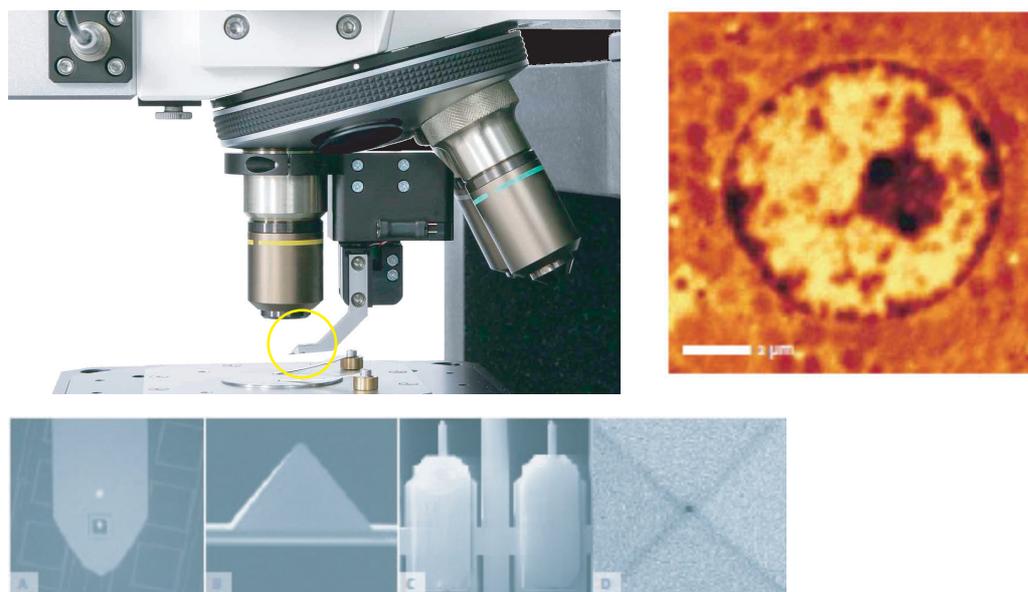


FIGURA 132 Microscopio óptico de barrido de campo cercano (SNOM) combinado con un microscopio óptico, los detalles de la sonda de escaneo, y una imagen del núcleo de una célula del hígado tomada con él. (© WITec).

determinada profundidad por debajo de su superficie, hasta un máximo de unos 500 μm . Los microscopios confocales están ahora disponibles a través de varios fabricantes.

Un ejemplo de una técnica de alta resolución es la *microscopía multifotón*. En esta técnica, la fluorescencia de un espécimen se excita usando dos o tres fotones de grandes longitudes de onda. Al igual que todas las técnicas de fluorescencia, la imagen se produce por la luz fluorescente emitida por ciertas sustancias químicas encontradas en organismos vivos. Por el contrario a lo que ocurre con un microscopio de fluorescencia normal, la producción de imágenes por multifotón está basada en un efecto no-lineal, de tal manera que la región de emisión es extremadamente estrecha y por tanto se puede conseguir una alta resolución.

Para una resolución óptica lo más alta posible, la *microscopía óptica de barrido de campo cercano* es insuperable. Generalmente, una diminuta sonda óptica es barrida por la superficie, como se muestra en la **Figura 132**. Trabajando en el campo cercano, se evita el límite de difracción, y se hace posible la resolución en el rango del nanómetro.

Otros tipos de microscopios de barrido también utilizan el electromagnetismo para la producción de imágenes con alta resolución, aunque no usan la luz. Los ejemplos más famosos son el *microscopios de efecto túnel* o STM, el *microscopio de fuerza atómica* o AFM y el *microscopio de fuerza magnética* o MFM. Estos instrumentos, aunque pequeños y fáciles de construir, han revolucionado el material científico en las últimas décadas, porque permiten conseguir una resolución atómica en el aire y en una mesa de laboratorio.

Resumiendo, los avances tecnológicos actuales permiten lograr sistemas de captación de imágenes sofisticadas basadas en el escaneo, en particular en el campo de la microscopía. Como este campo está todavía en vías de desarrollo, se espera encontrar en los años venideros otras técnicas de barrido, que produzcan resultados aún más impresionantes.

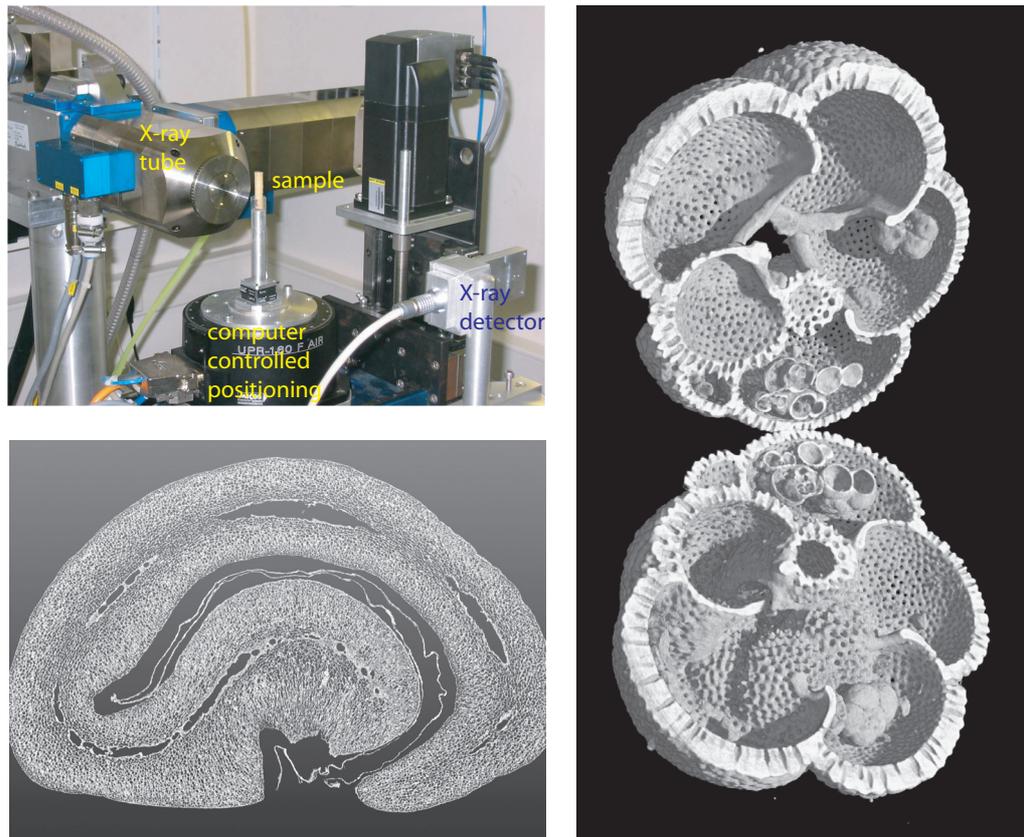


FIGURA 133 Construcción para tomografía de rayos-X de alta resolución, y dos ejemplos de imágenes producidas con ella: una sección transversal de un grano de café (abajo a la izquierda) de un tamaño de 8 mm, y una reconstrucción tridimensional de un exoesqueleto de un foraminífero, con un diámetro de sólo 0.5 mm (© Manuel Dierick).

Este progreso en las técnicas de escaneo recuerda los progresos llevados a cabo anteriormente en otro tipo de captación de imágenes mediante un principio de reconstrucción de las mismas de una manera todavía más complicada: la tomografía.

TOMOGRAFÍA

Después de que los ordenadores de alta velocidad se convirtieron en un producto barato, ha sido posible conseguir un tipo espectacular de imágenes: la *tomografía*. En la tomografía, una fuente de radiación gira alrededor de un objeto para ser convertido en imagen; la radiación que es difundida y/o transmitida es detectada, y con una programación sofisticada de ordenador, se reconstruye una sección transversal del objeto. También son posibles las reconstrucciones tridimensionales. La Tomografía también puede ser llevada a cabo con cualquier tipo de radiación que pueda ser emitida con rayos suficientemente bien definidos, tales como los rayos gamma, rayos-X, luz, ondas de radio, rayos de electrones, rayos de neutrones, sonido y aún terremotos. La tomografía de rayos-X es un método estándar en la medicina; la tomografía de luz visible, la cual no tiene efectos

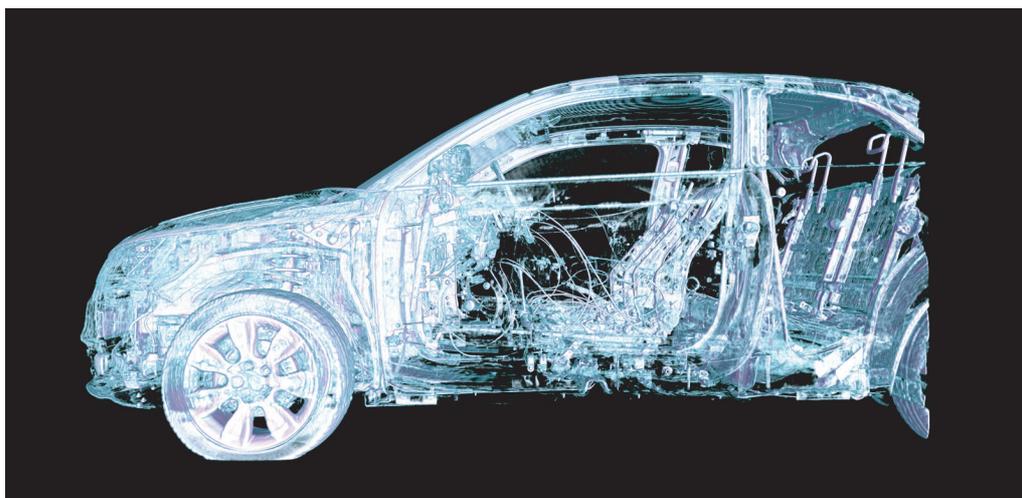


FIGURA 134 Imagen de rayos-X CT de un coche de pasajeros moderno, con una resolución de menos de 1 mm (© Fraunhofer IIS).

colaterales para los humanos, está siendo desarrollada para la detección del cáncer de mama. Otras técnicas especializadas adicionales son la tomografía de resistividad eléctrica, la tomografía de inducción magnética y la tomografía crio-electrónica.

En varios tipos de tomografía, la resolución conseguida es impresionante. La **Figura 133** muestra un ejemplo de alta resolución de una *tomografía de rayos-X* moderna de objetos verdaderamente pequeños. En la **Figura 134** se muestra un ejemplo de tomografía de rayos-X para un gran objeto. Construir una configuración que produce tales efectos constituye un gran proyecto y resulta una hazaña impresionante. También la resonancia magnética, muy utilizada en medicina para escanear el interior del cuerpo humano, es un tipo de tomografía, basada en ondas de radio; hablaremos de ellas más adelante. Distintos tipos de sistemas de tomografía – incluyendo la *tomografía opto-acústica* basada en el sonido producido por la luz pulsada, la tomografía de emisión de positrones, tomografía de coherencia óptica y la sonografía corriente – también permiten la producción de secuencias de películas.

La *tomografía de coherencia óptica* es un ejemplo de una técnica que permite tanto la toma de imágenes tridimensional como la alta resolución. Esta técnica que no implica ningún riesgo para el paciente o el espécimen, permite alcanzar una profundidad de unos cuantos milímetros en el animal o en la piel del cuerpo humano y unas resoluciones por debajo de 500 nm. Los sistemas modernos permiten imágenes de 10 GVoxel/s y más, por lo que las películas de procesos biológicos se pueden producir 'in vivo', tal como la sangre que fluye por un dedo humano. Haciendo uso del efecto Doppler, se puede determinar la dirección del flujo de la sangre. La figura **Figura 135** proporciona otro ejemplo fascinante. La OCT se usa con frecuencia en oftalmología; también la OCT está siendo investigada para aplicaciones en dermatología. La OCT *endoscópica*, es decir, la realización de OCT a través de un pequeño catéter insertado en el interior del cuerpo humano, se convertirá en una herramienta importante en oncología y en cardiología en un futuro cercano. La OCT se está utilizando también como material de investigación de

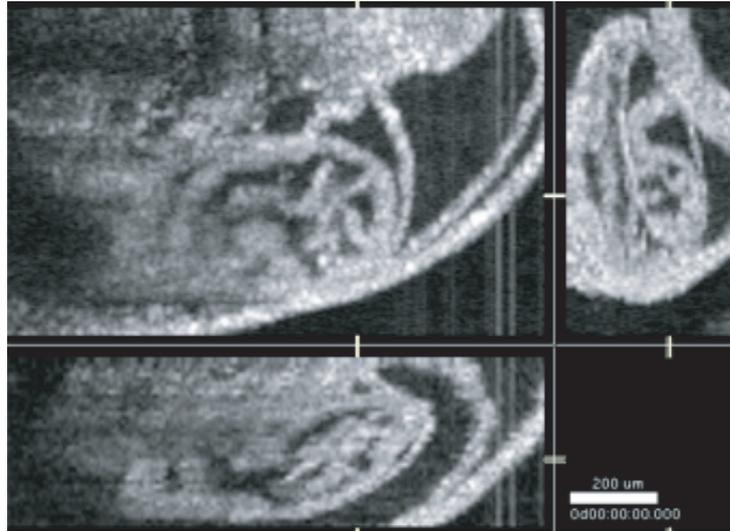


FIGURA 135 Una película OCT del latido del corazón del embrión de un ratón tomada por Kyrill Larin. Las tres vistas corresponden a los tres ejes de coordenadas. (QuickTime film © Kyrill Larin).

medios turbios o para producir perfiles topográficos.

Un método poco usual de captación de imagen es la *tomografía por muones*, un método de captación que utiliza los muones de los rayos cósmicos para detectar metales pesados en cajas, equipajes y camiones. Este método es especialmente interesante para la búsqueda de metales pesados escondidos, tales como el plutonio, los cuales esparcen muones con mucha más fuerza que otros materiales como pudiera ser el hierro.

EL OJO Y EL CEREBRO: ADQUISICIÓN Y PROCESO DE IMÁGENES BIOLÓGICAS.

Los sistemas para procesar imágenes toman las imágenes y luego extraen información de ellas. En los sistemas técnicos para procesar imágenes, la adquisición de las imágenes se hace a través de una cámara y la extracción la lleva a cabo el software que corre en un ordenador. Un sistema de proceso de imágenes interesante es el construido en nuestro interior: la combinación del ojo y el cerebro. El ojo y el cerebro son los dispositivos involucrados. Comenzaremos por explorar la construcción y el rendimiento de nuestros ojos.

¿VEMOS LO QUE EXISTE?

A veces vemos *menos* de lo que hay. Cierre su ojo izquierdo, mire la mancha blanca de la [Figura 136](#), lleve la página lentamente hacia su ojo derecho, y preste atención a las líneas de en medio. A una distancia de entre 15 y 20 cm la línea de en medio parecerá ininterrumpida. ¿Por qué?

Desafío 181 s

Ref. 135

Mire con un ojo la pantalla completa de un ordenador que esté parpadeando en azul y negro a razón de una o dos veces por segundo. Ahora mire la misma pantalla a través



FIGURA 136 Limitación del ojo (ver el texto).

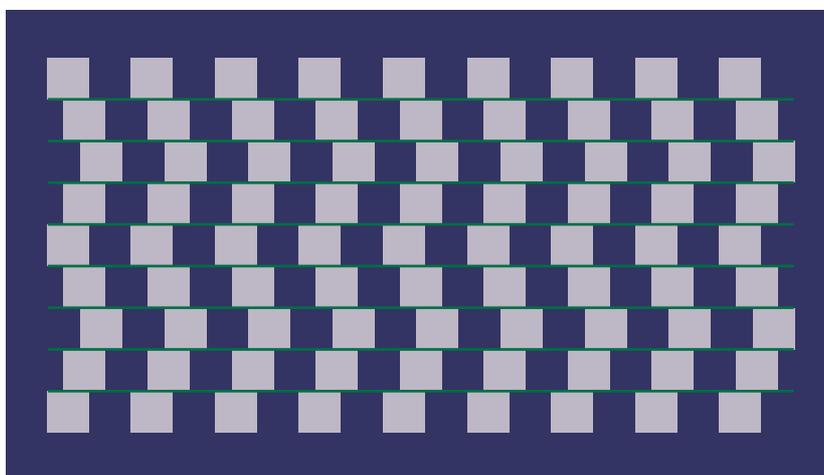


FIGURA 137 ¿Cual es el ángulo entre las finas líneas entre dos cuadrados?

Desafío 182 s

de un filtro azul (un filtro Balzers K45 o un filtro Kodak BG12). Verá una mancha. ¿Por qué?

Ref. 136

A veces vemos *más* de lo que hay, como muestran las Figuras 137 y 138. La primera muestra que líneas paralelas pueden parecer desviadas, y la segunda muestra la llamada *celosía de Hermann*, así nominada por su descubridor.* La celosía de Hermann de la Figura 138, descubierta por Elke Lingelbach in 1995, es especialmente llamativa. Ahora se usan variaciones de estos enrejados para comprender el mecanismo de las bases de la visión humana. Por ejemplo, pueden utilizarse para determinar cuantas células sensibles a la luz están unidas en la retina a una vía de señal hacia el cerebro. Las ilusiones son ángulo-dependientes porque este número es también dependiente del ángulo.

* Ludimar Hermann (b. 1838 Berlin, d. 1914 Königsberg) fue un importante fisiólogo. Las celosías son con frecuencia y falsamente llamadas ‘celosís de Hering’ haciendo mención al hombre que hizo famoso el descubrimiento de Hermann.

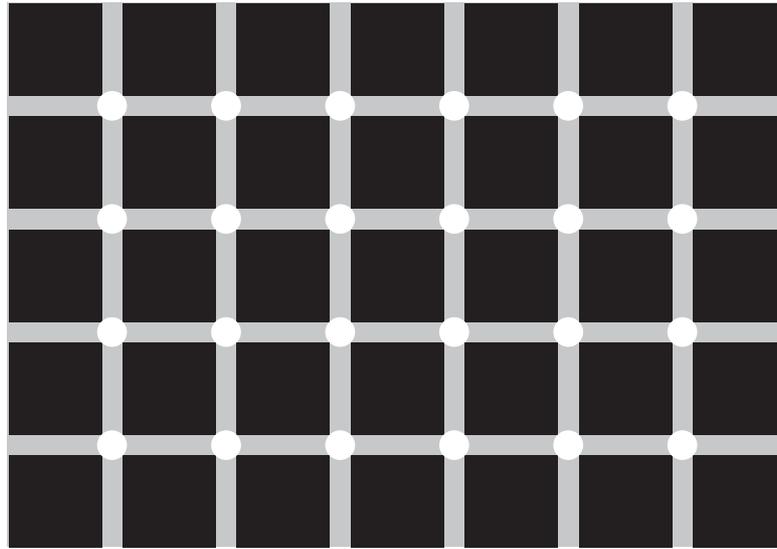


FIGURA 138 La celosía de Lingelbach: ¿ve usted manchas blancas, grises o negras en los cruces?

Nuestros ojos también 'ven' cosas *de manera diferente*: la retina ve una imagen *invertida* del mundo. Hay un método simple de mostrarlo que se debe a Helmholtz.* Usted solamente necesita una aguja y una hoja de papel, por ejemplo una página de este texto. Utilice la aguja para hacer dos agujeros en el centro de dos letras 'oo'.

Luego ponga la página tan cerca del ojo como pueda, mire a la pared a través de los dos agujeros, poniendo la aguja verticalmente unos cuantos centímetros por detrás del papel. Verá dos imágenes de la aguja. Si cubre el agujero de la *izquierda* con el dedo, la aguja de la *derecha* desaparecerá, y viceversa. ¿Puede completar la prueba?

Desafío 183 ny

Una leyenda urbana, difundida por muchos médicos y matronas hasta ahora, dice que los recién nacidos ven todo al revés (lo de arriba, hacia abajo y al contrario). ¿Puede explicar por qué esta idea es errónea?

Desafío 184 s

Dos experimentos adicionales puede demostrar que las retinas reciben imágenes invertidas. Si presiona muy ligeramente sobre el *interior* de su ojo (¡cuidado!), verá que aparece una mancha oscura en el *exterior* de su campo visual. Y si permanece en una habitación oscura y le pide a un amigo que mire a una vela encendida, explore su ojo: verá tres reflexiones: dos hacia arriba, reflejadas por la cornea y por la lente, y una tercera borrosa, *boca abajo* reflejada por la retina.

Nuestros ojos no proporcionan una imagen fiable de la Naturaleza: tienen una sensibilidad de longitud de onda limitada. Esta sensibilidad alcanza su punto máximo a unos 560 nm; fuera del rojo y el ultravioleta, nuestros ojos no detectan radiación. Por lo tanto

* Véase HERMANN VON HELMHOLTZ, *Handbuch der physiologischen Optik*, 1867. Este famoso clásico está disponible en inglés como *Handbook of Physiological Optics*, Dover, 1962. Médico, físico y político de ciencias, nació como Hermann Helmholtz (b. 1821 Potsdam, d. 1894 Charlottenburg), se hizo famoso por sus trabajos en óptica, acústica, electrodinámica, epistemología y geometría. Fundó varias instituciones de física en Alemania. Fue uno de los primeros en propagar la idea de la conservación de la energía. Otro importante libro suyo, *Die Lehre von den Tonempfindungen*, publicado en 1863, describe las bases de la acústica y, como el Manual, todavía merece la pena leerlo.



FIGURA 139 Ejemplo de fotografía infrarroja, ligeramente mezclada con una imagen en color. (© Serge Augustin).



FIGURA 140 Cómo cambia la apariencia de un girasol con la longitud de onda: cómo le parece a un ojo humano, qué aspecto tendría para un pájaro y cómo se observa con luz ultravioleta (© Andrew Davidhazy).

Ref. 137

vemos solamente parte de la Naturaleza. Como resultado, las fotografías infrarrojas de la Naturaleza, tal como que muestra la **Figura 139**, son interesantes porque enseñan algo diferente de lo que vemos generalmente. Lo mismo ocurre con las fotografías ultravioletas de la **Figura 140**. También las imágenes del cielo difieren con la longitud de onda; la website www.chromoscope.net lo muestra en detalle.

El ojo ve más nítidamente en la región de la fóvea. Pero la mayor sensibilidad a la luz no está en esa región. Como resultado, no vemos estrellas tenues por la noche si las miramos directamente, sino que las vemos si las miramos en su *proximidad*. Este efecto se debe a la distribución particular de los bastoncillos, los cuales tienen una densidad máxima de 20° desviados de la visión más nítida.

A lo largo de este texto encontraremos algunas otras ilusiones ópticas. En resumen, tenemos que ser cuidadosos en cualquier ocasión que mantengamos que ver significa observar. Nuestro sentido de la visión es limitado. ¿Hay limitaciones de nuestros sentidos

que son menos evidentes? Nuestra aventura descubrirá varios de ellos. Pero permítasenos volver ahora a lo que el ojo *puede* hacer.

EL OJO HUMANO

El ojo es la parte que se mueve con más frecuencia en el cuerpo humano – más que el corazón. Se estima que el ojo realiza 200 millones de movimientos sacádicos cada año. Por consiguiente el movimiento y los mecanismos de lubricación del ojo están especialmente relacionados. Los movimientos del ojo son de varias formas: aparte de los sacádicos, el ojo muestra movimientos de búsqueda, movimientos que compensan la rotación de la cabeza, llamados reflejos vestibulo-oculares, y temblores oculares (microtremor ocular, OTM).

El ojo humano es llamado *ojo-cámara*. Como una cámara fotográfica, y al contrario que los ojos de los insectos y otros ojos compuestos, los objetivos oculares de los vertebrados funcionan produciendo la imagen del mundo exterior en una superficie compuesta por sensores de luz, la *retina*. La retina ocupa más de la mitad del interior del globo ocular, el diámetro medio en un adulto es de unos 16,7 mm. La pupila tiene un diámetro entre 2 mm – por debajo de lo cual se producen problemas con la difracción – y 7 mm – para los cuales las aberraciones de las lentes son aceptables. La imagen sobre la retina presenta una distorsión baja de la imagen, bajas aberraciones cromáticas (alrededor de 1 dioptría entre el rojo y el azul) y una baja aberración cromática (coma); el ojo logra este rendimiento usando una lente deformable con un índice de gradiente esférico y una cornea cuya forma está siempre cerca de la forma ideal de hasta 30 μm – un valor extremadamente bueno para un cuerpo deformable. El ojo, junto con el cerebro, también posee un potente sistema de autoenfoque – todavía no comprendido suficientemente – y un excelente sistema de compensación de movimiento y de estabilización de imagen incorporado. La **Figura 141** muestra una sección de este sorprendente dispositivo.

La retina es un vástago del cerebro. Contiene 120 millones de *bastoncillos*, o píxeles blancos y negros, y 6 millones de *conos*, o píxeles de color. Cada píxel puede detectar entre 300 y 500 niveles de intensidad (9 bits). El ojo trabaja sobre un rango de intensidad de órdenes de magnitud de 8 a 10; el mecanismo involucrado es increíblemente complejo, ya que tiene lugar en el interior de los receptores, implica a los iones de calcio, y es conocido de manera completa desde hace pocos años. La región de resolución más alta es la *fóvea*, que tiene un tamaño de 1° aproximadamente. La resolución del ojo es de $1'$ aproximadamente. El tiempo de asimilación de la retina es de unos 100 ms – a pesar de este valor, no se nota ningún artefacto durante las sácadas. La propia retina tiene un espesor de 200 μm y es transparente: esto significa que todos los 'cables' que llevan los receptores también son transparentes.

La retina tiene un consumo de energía muy bajo y utiliza un tipo diferente de neuronas a las de los nervios en general: las neuronas de la retina usan *potenciales electrónicos*, no los potenciales de acción o picos utilizados en la mayoría de los otros nervios, los cuales podrían producir interferencias que podrían hacer imposible la visión. En la fóvea, cada píxel tiene una conexión con el cerebro. En el borde de la retina, alrededor de 10 000 píxeles están combinados a un mismo conducto. (si todos los píxeles estuvieran conectados 1 a 1 al cerebro, éste necesitaría tener el tamaño de un aula común.) Como resultado, las señales de la fóvea, cuyo área es tan sólo de un 0.3 % aproximadamente de el

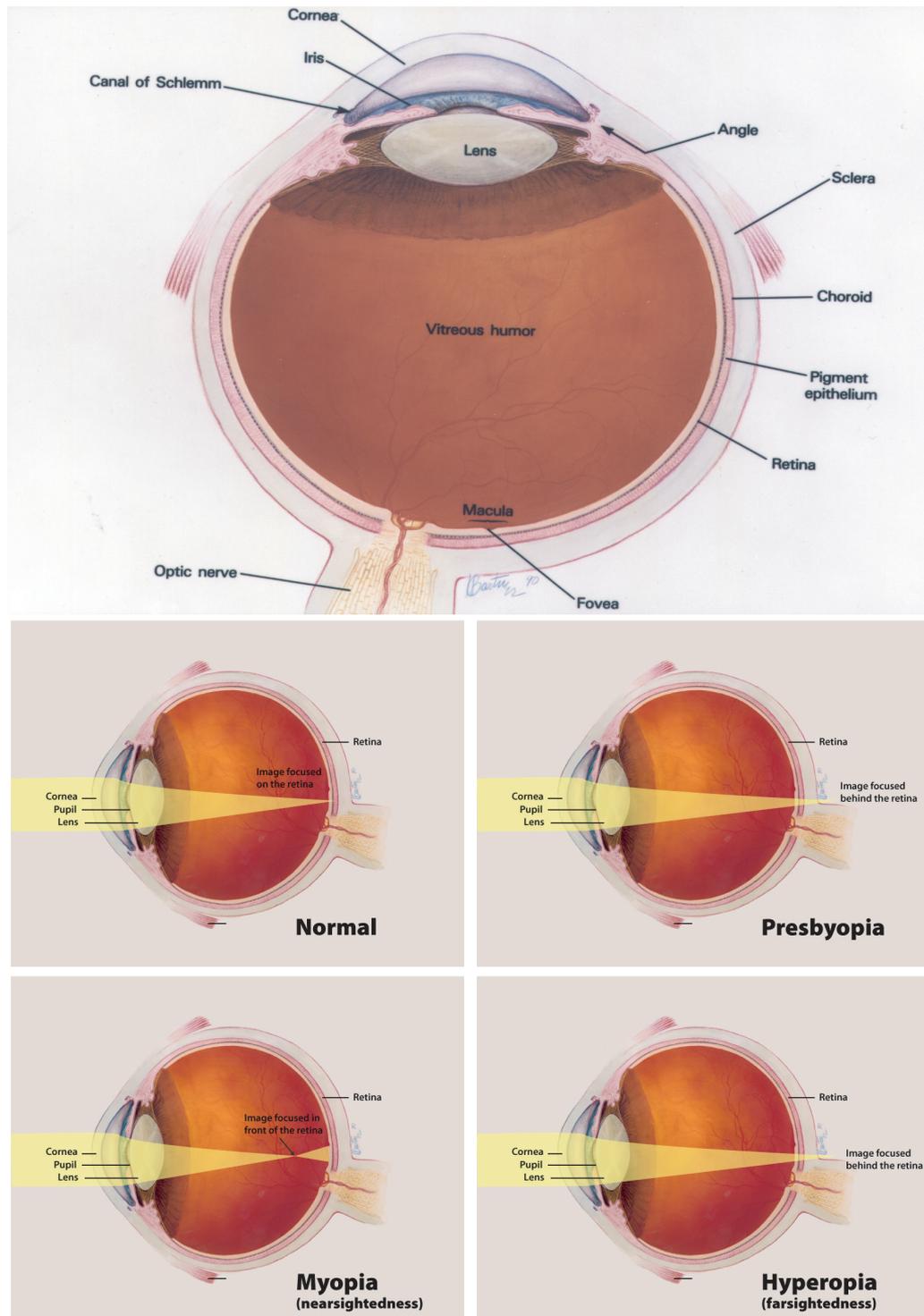


FIGURA 141 Arriba: sección transversal simplificada del ojo humano; abajo: comparación de imagen óptica de un ojo sano y los problemas más comunes, miopía, hipermetropía y presbicia (© NEI at NIH).

del tamaño de la retina, usa alrededor del 50 % del proceso en el cortex del cerebro. Para evitar aberraciones cromáticas, la fovea no posee receptores azules. La retina es también un procesador gráfico: contiene tres capas neuronales que terminan como 1.3 millones de canales en el cortex, donde alimentan a 5 millones de axones que a su vez conectan a 500 millones de neuronas.

Ref. 138 Los métodos de compresión entre los 125 millones de píxeles de la retina y los 1.3 millones de canales en el cortex todavía está sujetos a investigación. Es sabido que las señales no transportan datos de píxeles, pero los flujos de datos son procesados en alrededor de una docena de formas diferentes. Las corrientes no llevan valores sobre el brillo, sino sólo de los contrastes, y no transmiten valores RGB (rojo, verde, azul), sino diferencias de colores. Las corrientes llevan señales de movimiento de una forma comprimida y los datos de la frecuencia espacial está simplificada. Las investigaciones han demostrado que los ganglios de la retina proporcionan un horizonte de navegación, cómo detectan objetos en movimiento contra el fondo del campo visual, y cómo reducen el movimiento de la cabeza. Los años y décadas venideras proporcionarán muchos resultados adicionales; todavía se desconocen varios de los canales de datos entre el ojo y el cerebro.

Ref. 139 Además de los bastoncillos y los conos, el ojo humano también posee un tercer tipo de receptor. Este tipo de receptor, la *célula ganglionar fotosensible* o *célula ganglionar de la retina intrínsecamente fotosensible*, no ha sido descubierta sino hasta los primeros años de la década de 1990, provocando un nuevo campo de investigación. Las células ganglionares fotosensibles son sensibles principalmente a la luz azul, utilizando la melanopsina como pigmento y resultando ser extremadamente lentas. Están conectadas al núcleo supraquiasmático del cerebro, una pequeña estructura del tamaño de un grano de arroz que controla nuestro ciclo hormonal circadiano. Por esta razón, para poder restablecer el reloj corporal y zafarse del jet-lag, no se debería caminar mucho tiempo por un entorno con mucha luz azul. Las células ganglionares fotosensibles también producen las señales que controlan el diámetro de la pupila.

Merece la pena recordar que los dibujos como el de la [Figura 141](#) están *simplificados*. No muestran las estructuras de la parte transparente del ojo, el humor vítreo, tal como el conducto hialoideo, el cual juega un importante papel durante el crecimiento del ojo en la etapa embrionaria. De hecho, el crecimiento del ojo dentro del útero es aún más sorprendente que su función real – pero esa historia queda fuera del alcance de este texto.

OJOS HUMANOS VERSUS OTROS OJOS

El ojo humano y los ojos de otros muchos animales son dispositivos mucho mejores que las más modernas cámaras de fotografía y de vídeo. No solamente tienen muchos más píxeles que la mayoría de las cámaras sino que también son insensibles a los errores de los píxeles, a los vasos sanguíneos frente a los sensores. Ninguna cámara cubre el mismo rango en la variación de la intensidad. Ninguna cámara hecha por el hombre tiene un sistema de lentes de calidad o capacidades comparable; el amplio ángulo de visión, las bajas distorsiones del campo – también debido a la forma esférica de la retina – y las bajas aberraciones cromáticas. Ningún sistema técnico de autoenfoque, estabilizador de imagen o sistema de compensación de movimiento puede igualar al del ojo.

Una limitación del ojo es su velocidad. El ojo humano produce un número efectivo desde 30 imágenes por segundo hasta 120 imágenes por segundo en las condiciones más

ideales; los perros y los pájaros consiguen el doble del promedio básico y los insectos alrededor de diez veces más. Las modernas vídeo-cámaras pueden producir más de 10 000 imágenes por segundo. Al desarrollar el ojo, la evolución ha cambiado la velocidad por la resolución. Para conseguir una alta resolución, el ojo ejecuta pequeños movimientos de manera continua, llamados *micronistagmos*. En detalle, el ojo oscila continuamente alrededor de la dirección de la visión con unos 40 a 50 Hz; constantemente promedia una imagen pixelada sobre 30 a 50 receptores, pero el mecanismo preciso de afinamiento no está claro todavía. Este movimiento incrementa el número efectivo de píxeles, evita problemas con los píxeles muertos y permite también la recarga de los bastoncillos y de los conos.

Los ojos de todos los vertebrados poseen *bastoncillos*, tipos de píxel que producen imágenes blancas y negras por la noche. Adicionalmente, la retina del ojo humano contiene tres tipos de conos, para los colores rojo, verde y azul. Como ya hemos mencionado, ojos mucho mejores se encuentran en los pájaros los reptiles y los peces: los cuales poseen cuatro o más tipos de conos, filtros de color incorporados y una lente transparente ultravioleta. El cuarto tipo de cono y la lente especial hace a los ojos de los pájaros y de los reptiles sensibles a la luz cercana al ultravioleta; los pájaros utilizan su sentido ultravioleta para encontrar comida y distinguir a los machos de las hembras. En verdad, la mayoría de los pájaros cuyos machos y hembras aparecen iguales a los ojos de los humanos se muestran marcadamente diferentes en el ultravioleta.

Los pájaros y los reptiles también tienen gotas coloreadas de aceite incorporadas al extremo de sus conos, con cada tipo de cono conteniendo un color de aceite diferente. Estas gotas actúan como filtros de color. De esta manera, la resolución espectral de sus conos resulta mucho más aguda que en los mamíferos. El sentido del color en los pájaros está mucho más evolucionada que en los humanos – sería fascinante observar el mundo con los ojos de un pájaro. Los pájaros en general son los mejores videntes del color. Poseen conos receptores para el rojo, el azul, el verde, el ultravioleta y, dependiendo de la especie, hasta tres conjuntos más de colores.

Las águilas y otras aves (pero no muchas) también poseen una mejor resolución ocular mejor que la de los humanos. Lo consiguen de dos formas. Primero, sus fotorreceptores son pequeños; en otras palabras, el tamaño de sus píxeles son los más pequeños que se conocen en comparación con el tamaño del diámetro del ojo, con sólo 1,6 μm . Segundo, el ojo incluye huesos. Estos huesos fijan la posición relativa de la lente y la retina, como en un cuerpo de cámara rígida. Con estas soluciones técnicas, el ojo del águila resulta claramente mejor que el de los humanos.

En el transcurso de la evolución, el ojo de los mamíferos perdió dos tipos de conos que formaban parte de la herencia de los vertebrados, y se quedaron con sólo dos tipos de conos. Los primates (Viejo-Mundo) volvieron a ganar un tipo, con objeto de distinguir con más claridad la fruta de los árboles, la cual constituye la comida más importante para el cerebro de los primates, de las hojas que la rodean. Pero a pesar de este cambio, los primates nunca alcanzaron la capacidad de los ojos de las mejores aves. Por lo tanto, de todos los mamíferos, solamente los primates pueden ver completamente los *colores* como lo hacen los humanos. Los toros, por ejemplo, no; ellos no pueden distinguir el rojo del azul.

Los humanos en general son *tricromáticos*: poseen tres tipos de conos que detectan el rojo, el verde y el azul. No obstante, alrededor del 1 % de las mujeres son (de alguna

manera) *tetracromáticos*. Esto es posible porque los humanos pueden tener dos pigmentos rojos diferentes. Los detalles del pigmento rojo están codificados en el cromosoma X. Ahora bien, en algunas mujeres, los códigos del pigmento rojo de los dos cromosomas X son diferentes. En una parte de esas mujeres, se pueden encontrar ambos pigmentos en los conos de sus ojos. Estas mujeres por tanto parecen tener algo parecido a ojos RR'GB (rojo rojo ' verde azul).

Ref. 141

Cualquier experto en el movimiento debería saber también que la sensibilidad más alta del ojo humano *no* corresponde a la parte más brillante de la luz solar. Este mito ha sido divulgado por todo el mundo por los numerosos libros de texto que se han limitado a copiar los unos de los otros. Dependiendo de si se utiliza la frecuencia o la longitud de onda o el logaritmo de la longitud de onda, el espectro solar alcanza un máximo de 500 nm, 880 nm o 720 nm. La sensibilidad espectral del ojo humano, así como la sensibilidad completamente diferente de las aves o las ranas, es debida a la química utilizada para su detección. Resumiendo, el ojo humano solamente puede ser comprendido a través de un cuidadoso análisis de su historia evolutiva particular.

Todos los vertebrados poseen cámaras oculares. Los mamíferos tienen ojos similares a los nuestros, con una lente flexible; por el contrario, las serpientes tienen ojos con lentes rígidas que se mueven con respecto a la retina para poder situar las imágenes en el foco. Los ojos-cámara evolucionaron varias veces de manera independiente en los otros grupos de animales. Los más conocidos son los cefalópodos, tales como los pulpos, y en verdad, los mayores ojos conocidos, de hasta 30 cm de diámetro, son de animales pertenecientes a este grupo. Los ojos-cámara también pueden ser encontradas en algunas arañas, en caracoles y en varios otros grupos.

Por cierto, el sistema ojo-cerebro humano procesa los colores principalmente alrededor de la dirección de la mirada. Esto permite un truco divertido: si un sistema de visión sigue la dirección de la mirada, puede ordenar a la pantalla de un ordenador que muestre colores solamente en la región a la que se mira, y dejar el resto de la imagen en blanco y negro. Si el sistema de órdenes es bastante rápido, usted tiene la impresión e que la imagen completa está coloreada, mientras que el resto de los espectadores verán la imagen mayormente en blanco y negro, excepto en algunas zonas que están en constante movimiento.

Los ojos más comunes en la Naturaleza no son ojos-cámara, sino los *ojos compuestos*, como son los de las abejas, las libélulas o las moscas domésticas. Los ojos compuestos poseen una lente para cada axón. Estas unidades son generalmente de forma exagonal y reciben el nombre de *omatidios* y normalmente contiene un manojo de fotoprotectores que están conectados al axón saliente. Un omatidio es un ojo minúsculo; dependiendo de las especies, un ojo compuesto consta de al menos un centenar y hasta más de 30 000 omatidios (para las libélulas). Muchos ojos compuestos son también tetra- o penta-cromáticos. Los ojos compuestos tienen baja resolución – se supone que ningún insecto puede ver las estrellas – pero tales ojos tienen ciertas ventajas. Los ojos compuestos no necesitan mecanismos de enfoque, pueden abarcar un gran campo de visión y, sobre todo, son extremadamente rápidos. Estas ventajas son tan interesantes que las cámaras electrónicas estilo-ojo-compuesto también están siendo exploradas como alternativa a las cámaras una-lente-un-sensor usuales.

La utilización de ideas sacadas de los ojos de los insectos resulta también interesante para otros usos. Por ejemplo, la moderna tecnología proporciona las posibilidades de

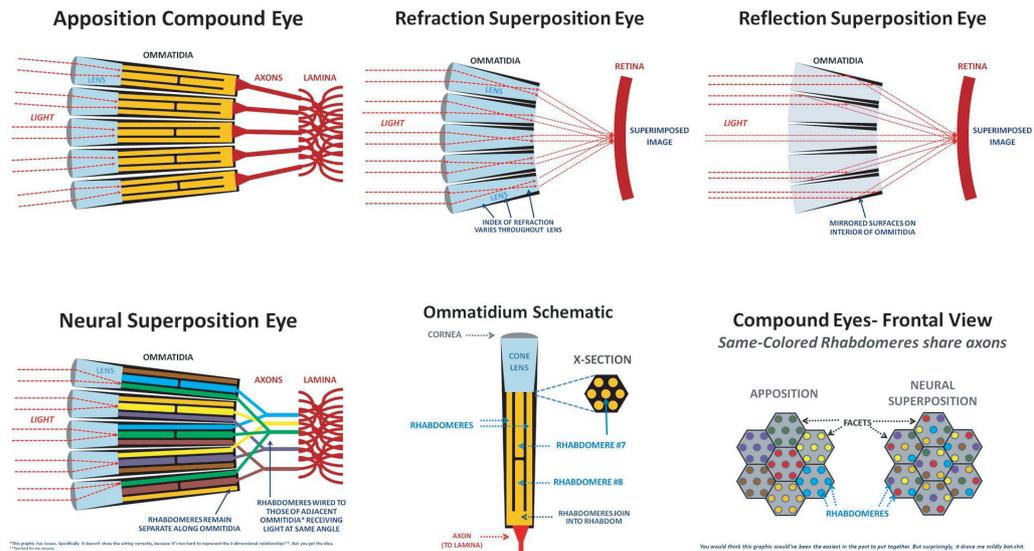


FIGURA 142 Ojos compuestos: el ojo compuesto de aposición encontrado en las abejas y las libélulas, el ojo de superposición de refracción de las polillas, el ojo de superposición de refracción de las langostas, (no mostrado: el ojo de superposición parabólica de ciertos cangrejos) y el ojo de superposición neuronal de la mosca doméstica (© Watcher, de la watchingtheworldwakeup.blogspot.com).

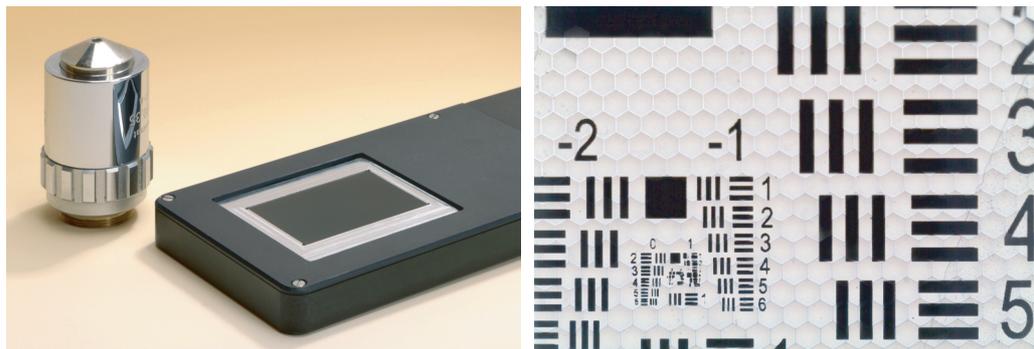


FIGURA 143 Un microscopio plano basado en un conjunto de lentes apiladas – en frente un objetivo convencional – y una imagen que él produce (© Frank Wippermann).

Ref. 142

pensar de nuevo qué otro aspecto podría presentar un microscopio. La **Figura 143** muestra un microscopio que es en realidad un conjunto de miles de minúsculos microscopios. Las lentes producen imágenes sobre un chip de imagen CMOS de 16 megapíxel.

En resumen, las estructuras microscópicas interiores del ojo son importantes. Pero aquí nos enfrentamos a otra pregunta.

¿CÓMO PODEMOS TOMAR IMÁGENES DEL INTERIOR DEL OJO?

Cuando miramos a través de un pequeño agujero hacia una superficie brillante, podemos ver los vasos sanguíneos de nuestro ojo. En particular podemos ver que la fovea no tiene

vasos sanguíneos en absoluto. Pero, ¿cómo podemos observar la estructura microscópica de ojo de otra persona?

Tomar imágenes del interior de un ojo vivo no es fácil. La retina se encuentra alejada de la superficie del ojo, por tanto no se puede utilizar un microscopio normal. Además, los movimientos continuos de la lente y del ojo mismo desacomoda al sistema de imagen. Finalmente, dos desarrollos por separado han cambiado la situación en la década de 1990.

Página 200 El primer logro en la toma de imágenes del ojo fue la técnica, mencionada anteriormente, de *tomografía de coherencia óptica*. Este método de imagen utiliza un rayo láser de baja potencia para el barrido y permite medios de dispersión del barrido con una profundidad de hasta varios milímetros y con una resolución del orden de μm . Esta técnica de microscopía desarrollada en la década de 1990, permite observar con detalle la retina del ojo humano y la región por debajo de ella; también permite realizar secciones transversales de la cornea y de la lente. A través de las detalladas imágenes que proporcionan en pocos milisegundos, como se muestra en la [Figura 144](#), la tomografía de coherencia óptica permite la obtención de diagnósticos extremadamente precisos; la oftalmología moderna ha cambiado profundamente. La [Figura 145](#) muestra imágenes fascinantes obtenidas por el grupo de investigación sobre la tomografía de coherencia óptica de la University of Vienna.

La tomografía de coherencia óptica también permite obtener imágenes de la piel a una profundidad de alrededor de 8 mm; Esto ya está mejorando la diagnosis del cáncer de piel. En el futuro, la técnica simplificará también la diagnosis del cáncer para los ginecólogos y los otorrinolaringólogos. Están siendo desarrollados también sistemas endoscópicos. La tomografía de coherencia óptica se está convirtiendo así en un estándar de varias aplicaciones industriales.

Ref. 143 El segundo logro en la toma de imagen del ojo fue la técnica de la *óptica adaptativa*, una técnica también utilizada en astronomía, que cambia continua y rápidamente la forma de la lente de imagen. Las imágenes más bellas hasta ahora de una retina humana *viva*, tal como las de la [Figura 146](#), fueron realizadas por el grupo de David Williams y Austin Roorda en la University at Rochester in New York usando esta moderna técnica. Ellos usaron óptica adaptativa con el fin de compensar las variaciones de la forma de la lente del ojo del paciente.

Página 134 El ojo humano produce la sensación de un color promediando la intensidad que llega a los conos sensibles al rojo, el azul y el verde. Esto explica la posibilidad, mencionada anteriormente, de obtener la misma impresión de color, por ejemplo, amarillo, ya sea de un rayo láser amarillo puro, o por una mezcla adecuada de luz roja y verde.

Pero si la luz se enfoca sobre un solo cono, el ojo comete errores. Usando óptica adaptativa es posible enfocar un rayo láser rojo de tal manera que incida en un solo cono verde. En este caso, a veces sucede algo extraño: aún siendo la luz *roja*, ¡el ojo lo ve de color *verde*!

Desafío 185 s A propósito, la [Figura 146](#) es bastante desconcertante. En el ojo humano, como en todos los vertebrados, los vasos sanguíneos están localizados *enfrente* de los conos. ¿Por qué no aparecen en las imágenes? ¿Y por qué no perturban la vida cotidiana? (La imagen no muestra el otro tipo de células sensibles a la luz, los *bastoncillos*, porque el objeto estaba a la luz del día; los bastoncillos se colocan enfrente de la retina solamente en la oscuridad, y por tanto producen imágenes en blanco y negro.)

Ref. 144 En resumen, la evolución nos ha proporcionado un sistema para la observación con

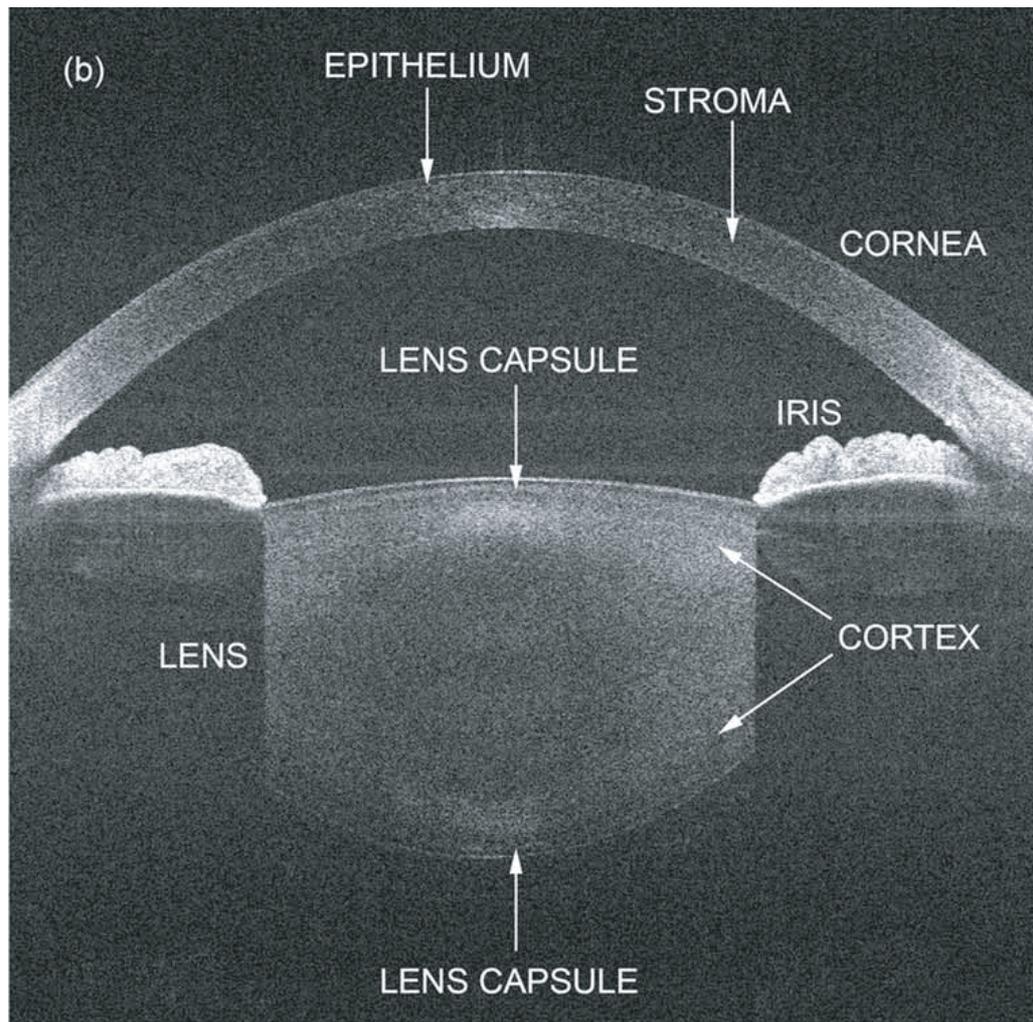


FIGURA 144 arriba: una imagen frontal del ojo humano tomada por tomografía de coherencia óptica, mostrando la cornea, el iris y la lente. Abajo: aparato común utilizado por los oftalmólogos. (© www.zmpbmt.meduniwien.ac.at/forschung/optical-imaging/advanced-imaging-technologies/, Heidelberg Engineering)

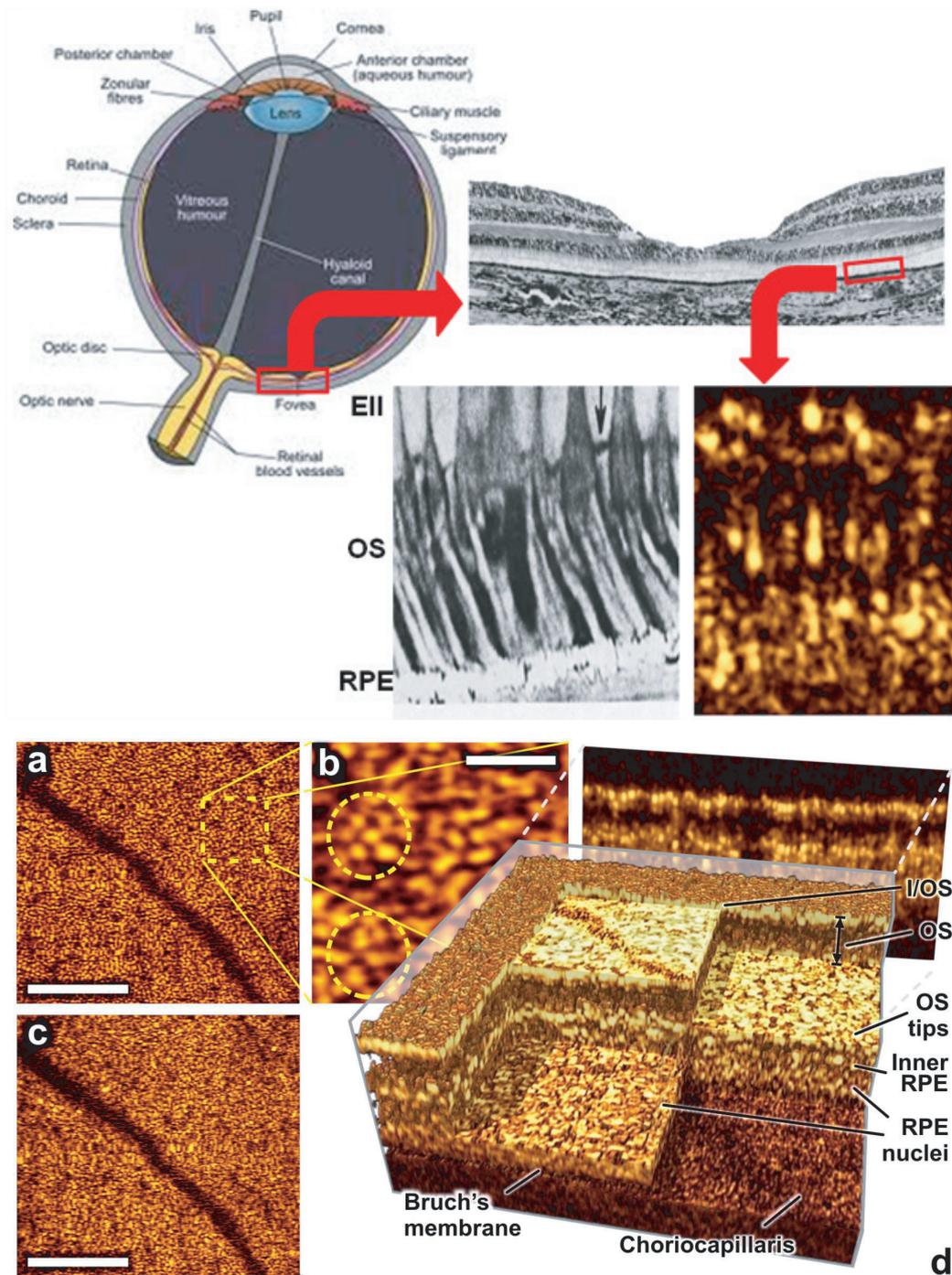


FIGURA 145 Imágenes de la retina humana viva tomadas con tomografía de coherencia óptica con óptica adaptativa. Arriba: Sección transversal del ojo humano indicando una región especial de la retina, la fovea, y la parte posterior del ojo; histología de esta zona indicando el segmento externo (OS) de las células fotorreceptoras; histología ampliada del OS; resolución celular OCT 'in vivo' de células fotorreceptoras vivas; EII indica los fotorreceptores elipsoidales; RPE el epitelio de pigmento retinal. Abajo: tomogramas OCT de la unión interna/externa de fotorreceptores humanos (a), puntas del segmento externo (c) con campo ampliado de la vista (b). Los puntos brillantes en el círculo punteado indican células fotorreceptoras individuales. A resolución celular, la representación (d) revela microestructuras intrarretinales a diferentes profundidades. (© www.zmpbmt.meduniwien.ac.at/forschung/optical-imaging/advanced-imaging-technologies/)

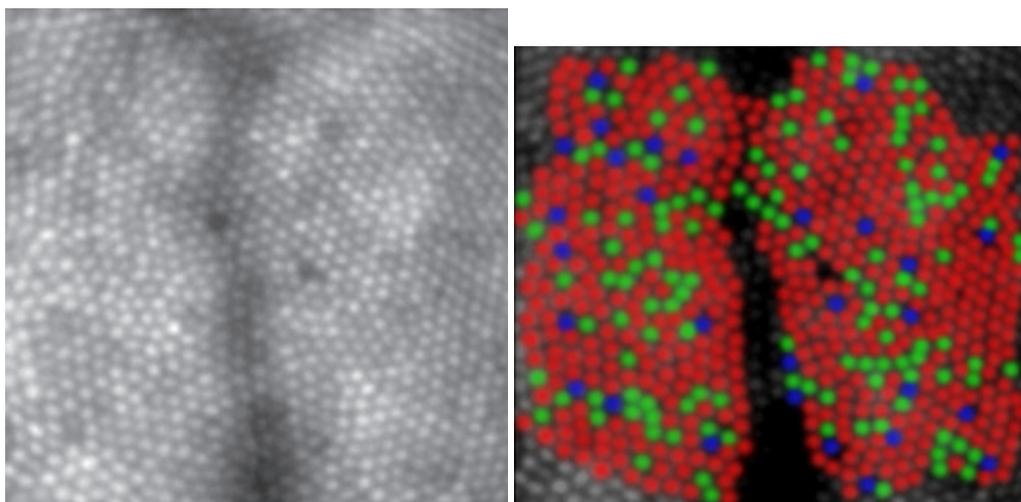


FIGURA 146 izquierda; fotografía de alta calidad de una retina humana viva tomada con óptica adaptativa; derecha: la misma imagen con una indicación superpuesta de la medida de la sensibilidad de cada célula de cono (© Austin Roorda).

propiedades sorprendentes. Cuide mucho sus ojos.

¿CÓMO DEMOSTRAR QUE ERES UN SANTO?

La reflexión de la luz y la refracción son los responsables de muchos efectos desconcertantes. El símbolo de origen indio para señalar a una persona santa, ahora utilizado en todo el mundo, es la *aureola*, también llamado *halo* o *Heiligenschein*: un anillo de luz que rodea la cabeza. Usted puede fácilmente observarlo sobre su propia cabeza. Tan sólo necesita levantarse temprano y mirar hacia la hierba mojada mientras da la espalda al Sol. Verá una aureola sobre su sombra. El efecto se debe al rocío de la mañana sobre la hierba, que refleja la luz hacia atrás predominantemente en dirección a la fuente de luz, como se muestra en la [Figura 147](#). La parte divertida es que si usted hace esto en grupo, verá la aureola solamente alrededor de *su propia* cabeza.

Ref. 145

La pintura retrorreflexiva funciona de la misma manera: se trata de minúsculas bolas de cristal que juegan el papel del rocío. Una superficie grande de pintura retrorreflexiva, por ejemplo una señal de tráfico, también puede mostrar su halo si la fuente de luz se encuentra lo suficientemente alejada. También el llamado 'brillo' de los ojos de un gato por la noche se debe al mismo efecto; Solamente es visible si mira al gato con una fuente de luz por detrás de usted. Por cierto, ¿funcionan los Ojos-de-Gato como los ojos de los gatos?

Ref. 146

Desafío 186 s

MOSTRAR IMÁGENES

Los sistemas que muestran imágenes en los dispositivos técnicos son importantes y, a pequeña escala, también lo son en la Naturaleza. En la Naturaleza, estas pantallas son de dos tipos: El primero es el utilizado por los calamares de las aguas poco profundas:

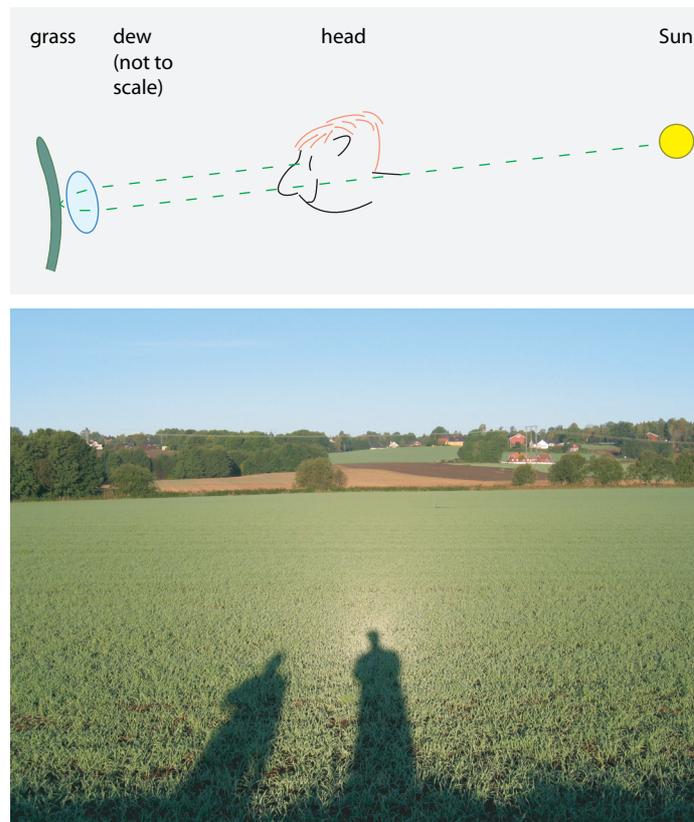


FIGURA 147 La trayectoria de la luz por el rocío sobre la hierba que es la responsable del halo o Heiligenschein, y una foto mostrando que se ve solamente sobre una de las cabezas(© Bernt Rostad).

ellos son capaces de producir patrones de colores cambiantes en su piel, y utilizar esos estampados para confundir a sus presas. El segundo tipo se encuentra en el mar profundo, donde no hay luz ambiental: allí, muchos seres vivos producen pantallas de luz en movimiento para atraer a sus presas o confundir a sus depredadores.

En resumen, las imágenes pueden ser generadas por superficies que cambian de color – pantallas pasivas – o por la emisión de luz. También los sistemas fabricados por los humanos pueden ser clasificados en estas dos clases.

En el presente, las pantallas pasivas más comunes son las de cristal líquido – o LCD – y las pantallas de tinta electrónica. Las primeras son las utilizadas en los relojes y los teléfonos móviles, las otras, en los libros electrónicos.

Las pantallas de emisión de luz más corrientes son los anticuados tubos de rayos catódicos, las pantallas de plasma, las pantallas de diodos emisores de luz y las pantallas de proyección. Estas pantallas se utilizan mayormente en dispositivos de entretenimiento.

ELECTRONES SALTARINES Y LA MAYOR DECEPCIÓN DE LA INDUSTRIA DE LA TELEVISIÓN

Es bien conocido que cuando un campo eléctrico en un vacío apunta a una superficie de cristal, los electrones pueden *saltar* a lo largo de la superficie. La [Figura 149](#) muestra el efecto general; generalmente, el efecto resulta molesto. Entre otras cosas, el efecto de



FIGURA 148 Un tubo de rayos catódicos de las televisiones antiguas: la primera forma – ahora obsoleta – usaba señales eléctricas para producir los cambios de color en las imágenes. Los tubos de las televisiones emitían un rayo de electrones, lo desviaban y generaban luz por electroluminiscencia sobre una pantalla coloreada cubierta con un estampado de fósforo.

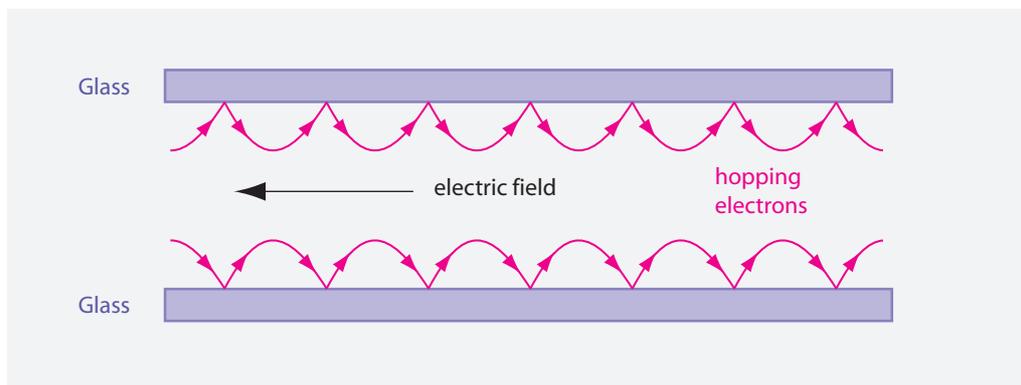


FIGURA 149 Los electrones libres pueden saltar sobre una pared de cristal.

los saltos es el responsable de las chispas en los sistemas de vacío con alto voltaje. Para evitar el efecto, los aisladores de cristal de las líneas de alta tensión muestran unas formas complejas.

Cuando se estudió con más detalle este efecto, resultó que campos eléctricos razonablemente bajos, son suficiente para crear grandes corrientes de salto eléctrico en unos tubos de vidrio huecos con un diámetro interno de alrededor de un milímetro. El campo eléctrico bajo también puede conducir electrones a través de curvas y esquinas. Más aún, se pueden construir conmutadores eléctricos que cambien la dirección del salto. Resumiendo, el efecto de salto se puede utilizar para la fabricación de pantallas planas de televisión extremadamente baratas y de gran calidad de imagen. La idea consiste en poner una matriz de fuentes de electrones – fundamentalmente puntas de metal afiladas – al comienzo de muchos canales de vidrio próximos. Cada canal transporta los electrones emitidos a lo largo de una línea de la pantalla. Haciendo uso de conmutadores ajustables para cada píxel, se logra que los electrones golpeen emisores de color fosforescente. Es-

tos son los mismos píxeles que fueron usados en los – voluminosos y pesados – tubos de televisión corrientes y que son utilizados en las pantallas planas de plasma. Puesto que el efecto de salto funciona también para las curvas y las esquinas y, puesto que solamente se necesita vidrio y un poco de metal, el sistema completo puede resultar extremadamente fino y de un peso muy ligero; más aún, las máquinas serían baratas, el rendimiento sería alto y el coste de producción resultaría bajo. Ya en la década de 1990, las pruebas de laboratorio de las pantallas de salto de electrones resultaron espectacularmente buenas: las pequeñas pantallas resultaron más brillantes, con más definición y más baratas que las de cristal líquido, y las pantallas grandes, más brillantes, con más definición y más baratas que las pantallas de plasma. La televisión plana asequible estaba a la vista en el horizonte.

Luego llegó la decepción. El tiempo de vida de las pantallas se limitaba a tan sólo unos cientos de horas. La limitación era consecuencia de la necesaria utilización de helio en el interior de las pantallas, el cual no es posible almacenar en el interior de un sistema de vacío durante mucho tiempo. A pesar de la investigación material más intensa, lograr la extensión de la vida útil resultó ser un imposible. Todos los trucos que fueron utilizados no ayudaron. A pesar de sus fantásticas propiedades, a pesar de las grandes inversiones en tecnología, a pesar del trabajo de los mejores investigadores sobre la materia, las pantallas de salto de electrones no pudieron salir al mercado. No se vendió ni una sola pantalla.

DESAFÍOS Y CURIOSIDADES DIVERTIDAS SOBRE LAS IMÁGENES Y LA VISTA

Un sensor de imagen no necesita ninguna lente. La sien de un víbora (o fosa de Wagler de la víbora) posee dos sensores infrarrojos – la figura [Figura 150](#) muestra uno – con una resolución de 40 x 40 píxeles cada uno, y solamente hay una cavidad en lugar de una lente. La fosa de la víbora – también conocida como 'foseta loreal' – usa estos sensores para cazar ratones aún en la oscuridad. El funcionamiento de estos sensores ha sido explorado y simulado por varios grupos de investigación. Ahora se conoce de qué manera adquieren los datos los sensores, cómo el cerebro de la serpiente reconstruye la imagen y cómo consigue la alta resolución.

Ref. 148

* *

El sistema más sencillo de creación de imagen son los anteojos. Un niño que no tiene lentes apropiadas se pierde una experiencia importante: ver las estrellas. Ese niño no entenderá la famosa frase de Immanuel Kant: 'Dos cosas llenan la mente con siempre nueva y creciente admiración y asombro, el pensamiento más frecuente y persistente los considera: el cielo estrellado sobre mí y la ley moral dentro de mí.' Asegúrese siempre de que los niños puedan ver las estrellas.

Dos lentes de 40 céntimos cada una son suficientes para cambiar la vida de un niño o tal vez la de un adulto. Vea el sitio web www.onedollarglasses.org para hacerlo de forma efectiva por todo el mundo.

* *

Entre las fotografías más impresionantes que se pueden encontrar sobre la Naturaleza están las de www.microsculpture.net; en ellas se muestran escarabajos con una resolución extrema. Cada fotografía de escarabajo es una composición de miles de fotografías

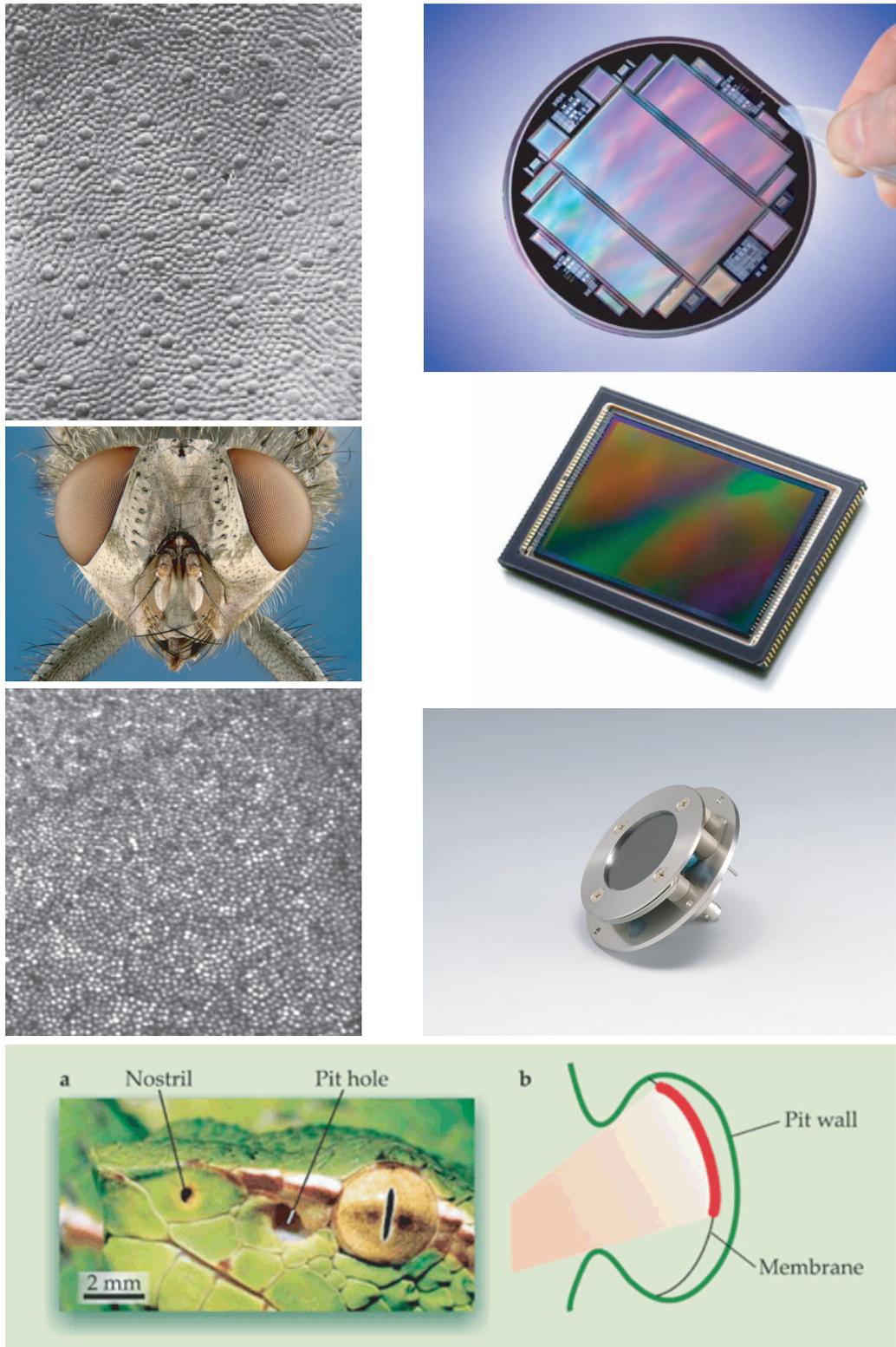


FIGURA 150 Colección de sensores de imagen – por tanto, de sistemas de píxeles: Una retina de gato, un sensor CCD sobre una oblea, el ojo de una mosca doméstica, un sensor CMOS, una retina humana, una placa multicanal, y la fosa infrarroja en a sien de una víbora (© Wikimedia, Austin Roorda, Hamamatsu Photonics, Guido Westhoff/Leo van Hemmen).

Desafío 187 e normales de alta resolución. Proporcionan una vista deslumbrante – disfrútela.

* *

Desafío 188 ny ¿Cómo corrige el ojo los fallos de pixelado (fotorreceptor)? ¿Cuántos píxeles son defectuosos en un ojo normal?

* *

La luz infrarroja puede ser vista, si tiene la suficiente intensidad. (¡Nunca lo intente por sí mismo!) La gente que observó tales fuentes de luz – láseres semiconductores, por ejemplo – lo vio como una mancha blanca con algo de rojo en los bordes. En otros casos, también es posible ver pulsos corto infrarrojos a través de la absorción de un doble fotón en la retina; de esta manera, el infrarrojo de 1000 nm produce un destello verde dentro del ojo.

* *

Entre los vertebrados, el ojo de mayor tamaño es el de la ballena azul; tiene un tamaño de 150 mm. (Solamente los clamares tienen ojos mayores.) Los ojos más pequeños de los vertebrados parecen ser los de los *Brookesia micra* jóvenes, un pequeño camaleón cuya cabeza es la mitad del tamaño de la cabeza de una cerilla y cuyos ojos son de alrededor de 0,3 mm de diámetro. El ojo es un órgano maravilloso. Para aprender más sobre él, lea el bonito libro SIMON INGS, *The Eye – A Natural History*, Bloomsbury, 2007.

* *

Para muchas aplicaciones, es importante evitar las reflexiones. En los escaparates de las tiendas se usan revestimientos antirreflectantes y también en aquellos sistemas de lentes que necesitan funcionar en condiciones sombrías, cuando la luz es escasa. Tales protectores consisten generalmente en varias capas de materiales transparentes depositados sobre la superficie. También los seres vivos tienen revestimientos antirreflectantes; los ojos de las polillas son famosos por aparecer negros incluso a la luz brillante del día. Son negros porque no reflejan ninguna luz, y por consiguiente, protegen a las polillas de sus depredadores. No obstante, los ojos de las polillas utilizan un efecto diferente para evitar las reflexiones: su superficie está cubierta con un patrón hexagonal de pilares de una altura aproximada de 200 nm. Un efecto similar lo consigue la mariposa de alas transparentes, *Greta oto*, cuyas alas son transparentes como el cristal, pero sin mostrar ningún reflejo. Varias compañías están tratando de reproducir el llamado *efecto del ojo de polilla* para aplicaciones comerciales, por ejemplo para mejorar las células fotovoltaicas.

* *

Ref. 149 La tecnología moderna produce microscopios a bajo coste. Como ejemplo fascinante, véase el microscopio de 1 euro que puede ser recortado de una hoja de papel, integrado con algunos dispositivos adicionales, y mostrado en la [Figura 151](#). El dispositivo se usa sosteniéndolo delante del ojo o manteniéndolo delante de una bombilla y observando la imagen proyectada sobre una pantalla.

* *

Si se dispone de un número suficiente de imágenes, es posible identificar la cámara que

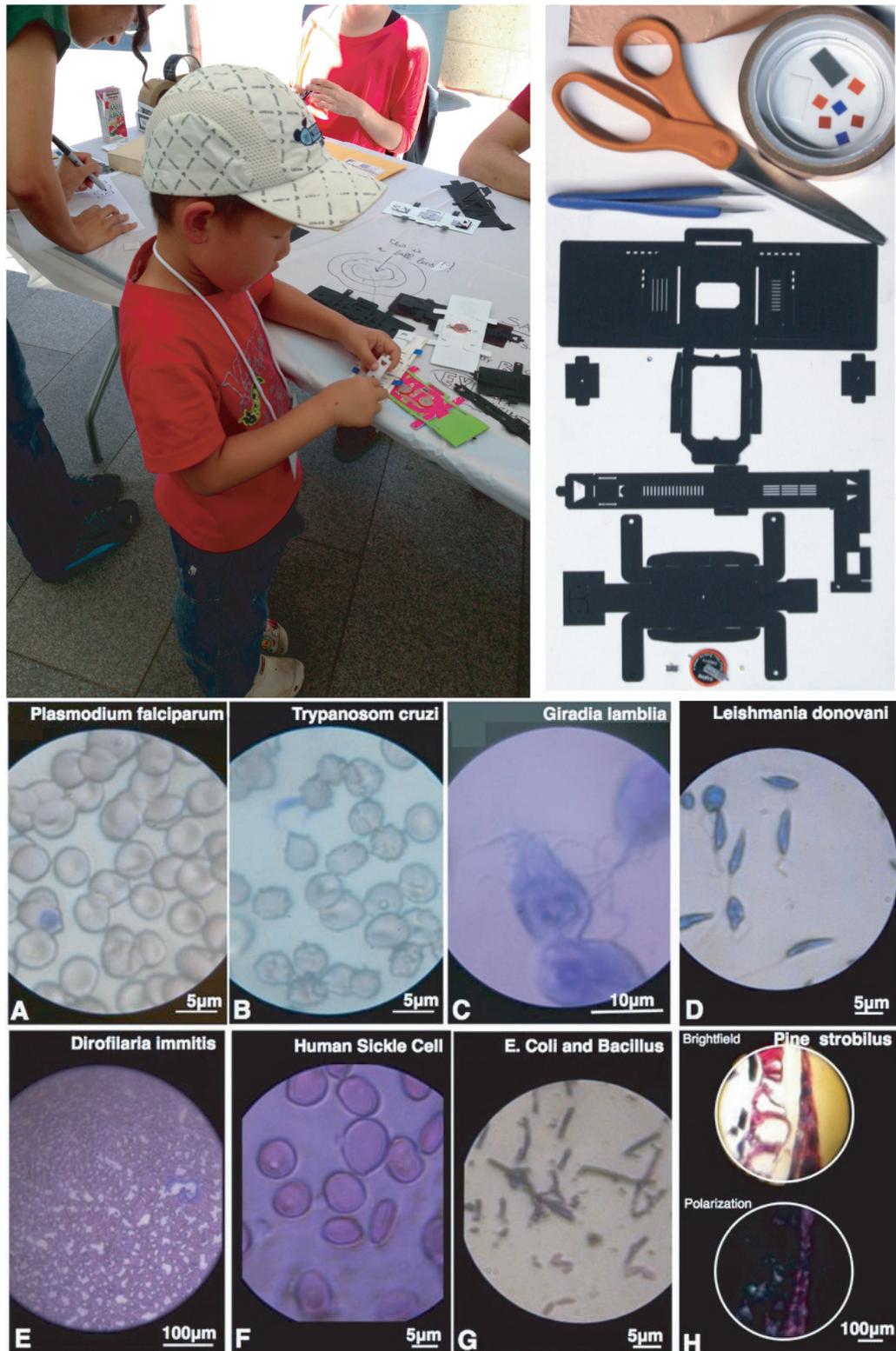


FIGURA 151 Arriba: producción y partes de un microscopio plano para usos médicos en países desarrollados fabricado con hojas de papel; abajo: las imágenes que produce (© Foldscope team en www.foldscope.com).

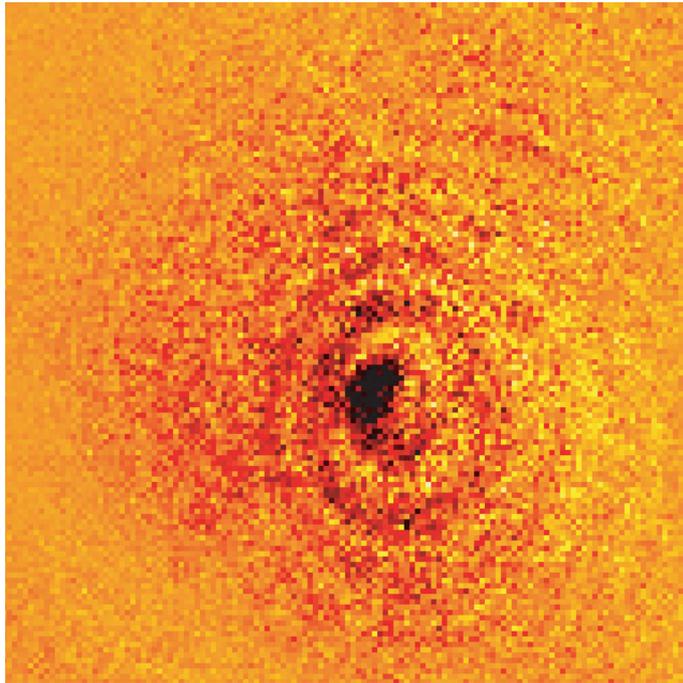


FIGURA 152 Sombra de un ion de Yterbio aislado levitando en una trampa de iones e iluminado con un láser; el tamaño del cuadro es de unos $16\ \mu\text{m}$ en ambas direcciones (© Dave Kielpinski).

las ha producido. Todas las cámaras tienen un patrón de ruido de imagen específico; extrayéndolo mediante un promedio inteligente, un software de ordenador que procese imágenes de una cámara es capaz de dar soporte a una investigación policial.

* *

Ref. 150 Los espejismos con frecuencia tienen efectos sorprendentes. En 1597, un grupo de marineros quedaron encallados en Novaya Zemlya durante el invierno. El 24 de Enero vieron el Sol – aproximadamente dos semanas antes de pudiera ser visto allí. Tal inusual visión del Sol es conocida ahora con el nombre de *efecto Novaya Zemlya*.

* *

Desafío 189 s Es posible medir la anchura de un pelo con un puntero láser. ¿Cómo?

* *

Ref. 151 Las técnicas de captación de imágenes modernas permiten una alta sensibilidad y una alta resolución espacial. Como muestra la **Figura 152**, usando una lente de Fresnel, un sensor CCD enfriado y un láser como fuente de luz, es aún posible fotografiar la sombra de un ion aislado flotando.

* *

Un dispositivo importante en medicina es el *endoscopio*. La **Figura 153** muestra un endoscopio que permite mirar el interior de una cavidad corporal a través de un agujero muy pequeño. Consiste en un tubo de metal, generalmente de un diámetro de unos 5 mm y

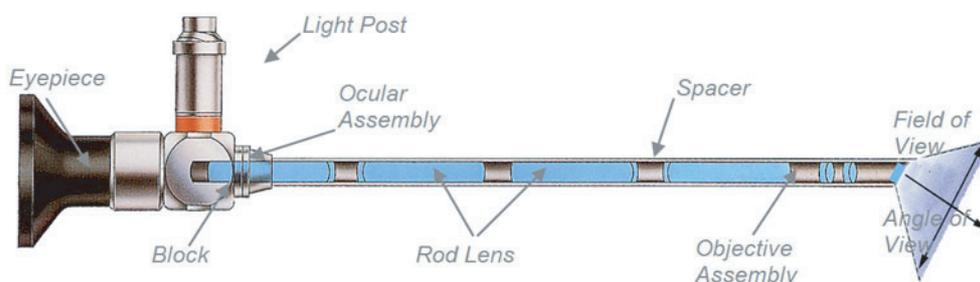


FIGURA 153 El endoscopio inventado por Hopkins, en el cual las lentes cilíndricas permiten grandes campos de visión y alto brillo - cuanto más lentes mayor es la relación vidrio/aire (© Karl Storz).

Desafío 190 e

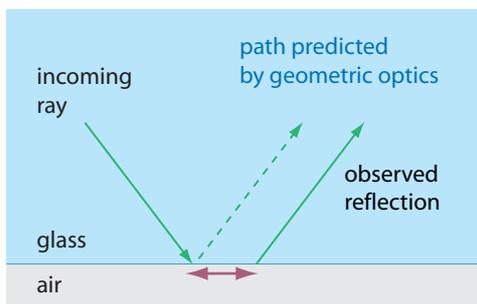
una longitud de 300 mm. ¿Cómo podría construir uno? (El dispositivo debe resistir al menos 150 ciclos de desinfección en un autoclave; esto implica que cada ciclo debe realizarse a 134°C y 3 bar durante tres horas.) Hecho de una secuencia de lentes cilíndricas cuidadosamente diseñadas, los endoscopios permiten a los cirujanos la observación del interior del cuerpo humano a través de un pequeño agujero, evitando por lo tanto grandes incisiones y peligrosas operaciones. Los endoscopios han salvado muchas vidas, y su producción y desarrollo emplea una gran industria.

* *

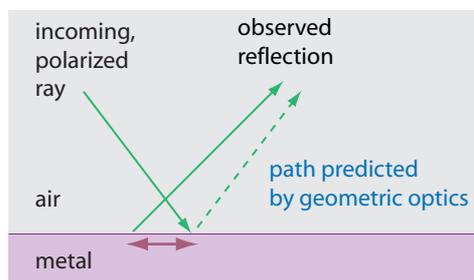
Desafío 191 s

El Sol es visible a simple vista hasta una distancia de 50 año luz solamente. ¿Es verdad?

The Goos-Hänchen shift



The Goos-Hänchen shift and angular deviation in metallic reflection



The Imbert-Fedorov shift

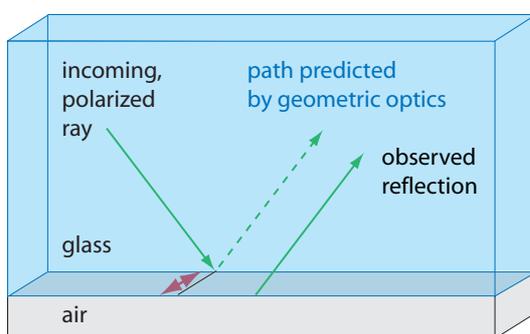


FIGURA 154 El salto Goos-Hänchen y otras desviaciones de la reflexión geométrica: En una reflexión total, el rayo de luz reflejada está ligeramente desplazada de su posición ingenuamente esperada; en la reflexión metálica, se observan todavía más desviaciones.

* *

Ref. 152 Desafío 192 s Generalmente la hierba es más verde al otro lado de la valla. ¿Podría dar una explicación basada en observaciones para esta afirmación?

* *

Desafío 193 s Se dice que los astrónomos tienen telescopios tan potentes que podrían ver si alguien estuviera encendiendo una cerilla en la Luna. ¿Puede ser verdad?.

* *

La refracción total es un interesante fenómeno en sí mismo; pero sus detalles son aun más fascinantes. En 1943 Fritz Goos y Hilda Hänchen demostraron que el rayo reflejado está ligeramente desviado; en otras palabras, el rayo reflejado es reflejado efectivamente por un plano que se encuentra ligeramente *por detrás* de la interfaz material. Este llamado *salto Goos-Hänchen* puede ser tan grande como varias longitudes de onda y se debe a ondas evanescentes que viajan en un medio más fino.

Ref. 153 De hecho, una reciente investigación en este asunto descubrió algo aún más interesante. Cuando se explora la reflexión con una alta precisión, se descubre que ningún rayo de luz reflejada está exactamente en la posición que se espera: hay también un desplazamiento lateral, el *salto Imbert-Fedorov*, y aún el ángulo del rayo reflejado puede desviarse



FIGURA 155 Cómo cambian los colores naturales (arriba) para los tres tipos de daltonismo: deután, protán y tritán (© Michael Douma).

del esperado. Los fascinantes detalles dependen de la polarización del rayo, de la divergencia del rayo y de las propiedades del material de la capa reflectante. Estos efectos pueden ser vistos como efectos de orden superior de la teoría de campo cuántico; sus detalles todavía son un asunto de investigación.

* *

Los materiales que absorben la luz fuertemente también la emiten fuertemente. ¿Por qué entonces una puerta con pintura oscura en el sol se calienta más que una puerta que está pintada con pintura blanca? La razón es que la emisión tiene lugar a una longitud de onda mucho más baja que la de la luz visible; para situaciones y temperaturas cotidianas, la emisión es de unos $10\ \mu\text{m}$. Y a esa longitud de onda, casi todas las pinturas son efectivamente negras, con emisividades del orden de 0.9, independientemente de su color. Y por la misma razón, cuando usted pinta el radiador de su casa, el color no es importante.

* *

Ref. 154 Cuando se cruzan dos rayos láser con un pequeño ángulo, pueden formar pulsos de luz que parece que se mueven más rápidos que la luz. ¿Contradice esto la relatividad especial?
Desafío 194 s

* *

Desafío 195 s El daltonismo fue descubierto por el gran científico John Dalton (b. 1766 Eaglesfield, d. 1844 Manchester) – sobre sí mismo. ¿Puede imaginar cómo lo descubrió? Esto afecta, en todas sus formas, a uno de cada 20 hombres. En muchos idiomas, a un hombre que es ciego a los colores se le llama *daltónico*. Las mujeres casi nunca son daltónicas o ciegas a los colores, ya que la propiedad está ligada a defectos en el cromosoma X. Si usted es daltónico puede comprobar a qué tipo pertenece con la ayuda de la **Figura 155**. (El cromosoma X es también el origen del raro tetra-cromatismo de la mujer mencionado
Ref. 155

anteriormente.)

* *

Ciertos tipos de iluminación pueden inducir una ceguera al color de manera artificial. Por ejemplo, la luz violeta es utilizada para reducir el consumo de droga intravenosa, porque la luz violeta no permite encontrar las venas bajo la piel.

La mejora del contraste artificial con la iluminación es también de utilidad. La luz rosa es usada por los esteticistas para resaltar imperfecciones, de tal manera que se pueda limpiar la piel de la mejor manera posible. En 2007, el oficial de policía Mike Powis de Nottingham descubrió que esta 'luz de acné' podía ser utilizada para reducir la tasa de delincuencia; puesto que el acné no es popular, la luz rosa disuade a los jóvenes de reunirse en grupos, y por tanto calma el ambiente donde está instalada.

Desafío 196 e

La luz amarillenta es usada en los supermercados para incrementar las ventas de fruta y verduras. Con luz amarilla, los tomates parecen más rojos y la ensalada parece más verde. Compruébelo usted mismo: no encontrará ningún supermercado sin esas luces instaladas sobre la fruta y las verduras.

* *

Los rayos de luz, como los emitidos por los láseres, generalmente se imaginan como líneas delgadas. No obstante, los rayos de luz también pueden ser *tubos*, con una intensidad mas baja en el centro que en los bordes. Los láseres tubulares, esto es, los rayos Bessel de orden superior, son utilizados en los experimentos de investigación para guiar los canales de plasma y las chispas.

* *

Desafío 197 s

¿Es posible observar las estrellas desde el fondo de un profundo foso o desde un pozo, aún durante el día, como se afirma con frecuencia?

* *

Ref. 156

Los humanos son *solamente* primates que tienen ojos *claros*. Todos los simios tienen los ojos *marrones*, de tal manera que es imposible ver en qué dirección están mirando. Los simios hacen un uso extensivo de esta imposibilidad: con frecuencia giran su cabeza en una dirección, simulando mirar en esa dirección, pero vuelven sus ojos hacia otra. En otras palabras, los ojos marrones son útiles para el engaño. El mismo efecto lo consiguen los humanos llevando unas oscuras gafas de sol. Por tanto si se encuentra con alguien con gafas de sol en una situación donde no hay sol, usted sabrá que él o ella se está comportando como un simio.

Los simios utilizan este tipo de engaño para coquetear con el sexo opuesto sin que su pareja estable se de cuenta. Las gafas de sol son herramientas para la infidelidad.

* *

Desafío 198 s

¿Cómo se puede medir la potencia del Sol con los ojos cerrados?

* *

Aún en la oscuridad, en una noche sin Luna y sin estrellas, un bosque no está oscuro. Usted puede ver setas luminescentes (de las que hay más de 70 especies diferentes), mohos



FIGURA 156 Habitaciones de Ames en París Y San Francisco (© Sergio Davini, David Darling).

luminescentes, puede ver chispas cuando se quite el jersey o cuando su amigo muerda un bombón de menta o cuando desenrolle un rollo de cinta adhesiva o abra una carta.

* *

Desafío 199 d ¿Cómo puede producir rayos-X con un rollo de cinta adhesiva?

* *

El número de ilusiones ópticas es enorme, y hay muchos sitios web que pierden el tiempo dedicados al tema. Las películas con frecuencia utilizan las llamadas *habitaciones de Ames* para transformar actores en enanos. Se muestra en la Figura 156.

* *

El cerebro es importante en muchos aspectos de la visión. Sucede que el cerebro, junto con el ojo, hacen *desaparecer* los colores, tal como muestra la Figura 157. (El efecto solo funciona con una versión de figuras de colores.) El ejemplo está tomado de una bonita colección de ilusiones visuales en la www.psy.ritsumei.ac.jp/~akitaoka/color9e.html. Varia ilusiones relacionadas, basada en ésta, utilizan puntos coloreados que se mueven.

El cerebro es también capaz de corregir, en cuestión de minutos, *deformaciones* del campo visual, tal como la generadas por las gafas, por ejemplo. Aún más impresionante resulta la habilidad del cerebro para compensar la *ciclotorsión*; la *ciclotorsión* es la rotación de los ojos sobre el eje antero-posterior; cuando nos acostamos, esta rotación tiene un valor de entre 2 y 14 grados, comparada con la orientación mientras permanecemos de pié. El valor del ángulos depende de la edad y del estrés; la *ciclotorsión* hace que cada ojo rote en direcciones opuestas.

* *

Si desea experimentar cuán esencial es el cerebro para la esteriopsis, construya y luego mire a través de un *pseudoscopio*. Éste utiliza 4 espejos o dos prismas para cambiar las imágenes entre los ojos izquierdo y derecho. La Figura 158 muestra un ejemplo. Las cosas cóncavas se verán como convexas, y su sentido de la profundidad quedará completamente confundido. Disfrútelo.

Desafío 200 e

* *

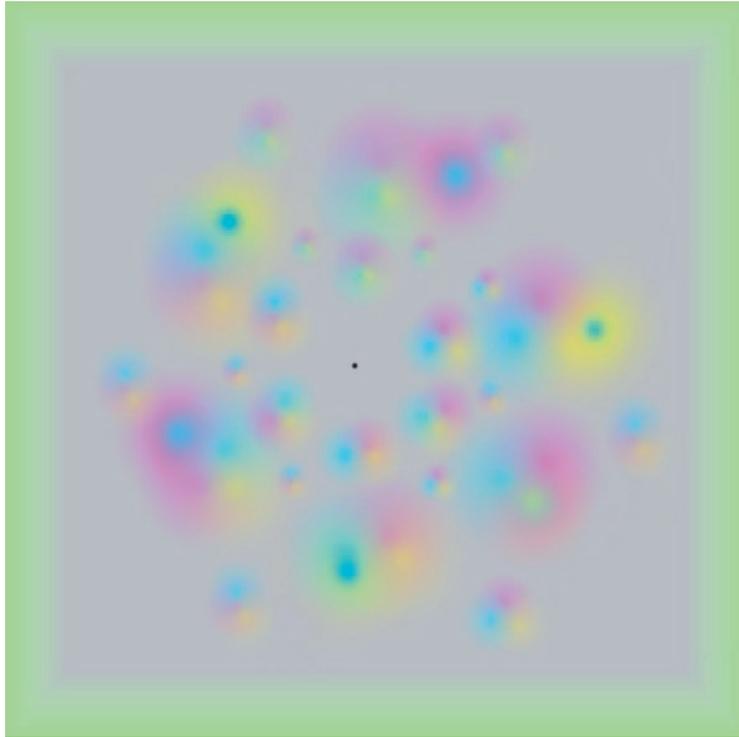


FIGURA 157 Mire el punto central durante veinte segundos: los colores desaparecerán (© Kitaoka Akiyoshi).

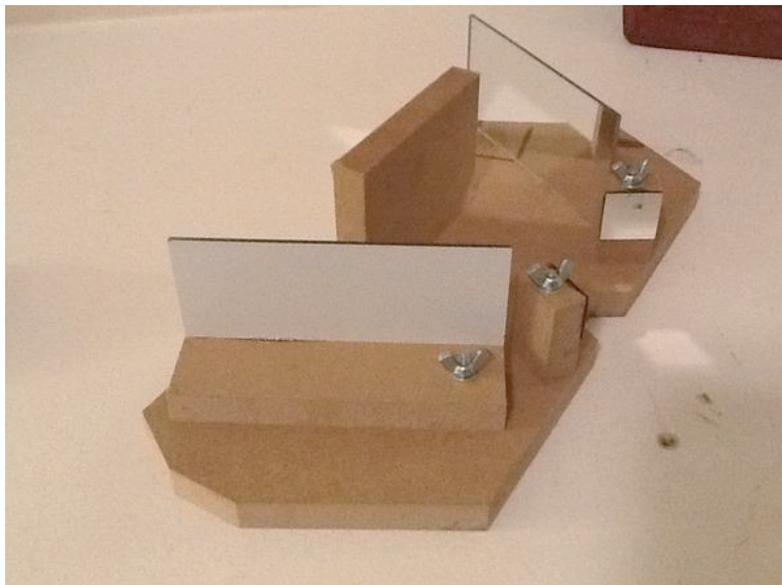


FIGURA 158 Mirando a través de un pseudoscopio se cambia nuestra percepción de la profundidad (© Joshua Foer).

Todavía más deslumbrantes son los dispositivos que al mirar cambian lo de arriba por lo de abajo. Se pueden construir con espejos o con dos prismas de Dove. Resulta interesante que, tras usarlos durante un rato, el cerebro transforman las imágenes a su orientación

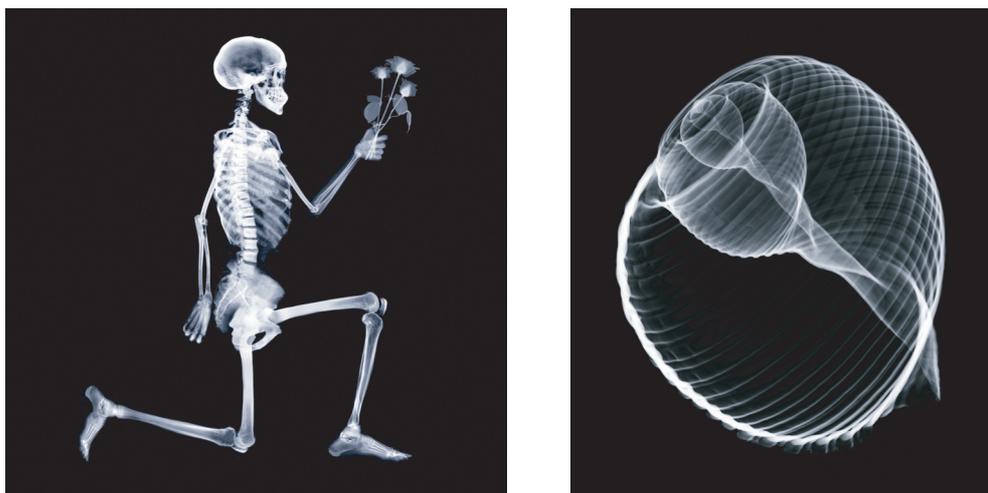


FIGURA 159 La belleza de los rayos-X: imágenes por rayos-X de una persona (tomadas con un cadáver) y de una concha marina (© Nick Veasey).

correcta.

* *

Las imágenes de rayos-X son tan impresionantes que incluso se pueden convertir en una forma de arte. Uno de los artistas pioneros con rayos-X es Nick Veasey, y dos de sus trabajos se muestran en la [Figura 159](#). Entre muchos ejemplos, aún ha tomado imágenes de autobuses completos y de aviones.

* *

Las lentes son componentes importantes de la mayoría de los sistemas ópticos. Con bastante aproximación, la distancia del foco de la lente f , la distancia del objeto del que va a tomar la imagen o , y la distancia de su imagen i están relacionadas por la *fórmula de la lente fina*

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{o} + \frac{1}{i} . \quad (81)$$

Desafío 201 e No es difícil deducirla con la ayuda del trazado del rayo.

Si en alguna ocasión se encuentra en la situación de tener que diseñar una lente, necesitará conocer la relación entre la forma de la lente y su distancia focal. Resulta que hay dos tipos de lentes: El primer tipo lo forman las lentes *esféricas* que son fáciles y baratas de hacer, pero cuyas imágenes no son perfectas. El segundo tipo de lente son las lentes *asféricas*, las cuales son difíciles de fabricar y más caras, pero proporcionan mucha mejor calidad de imagen. Los sistemas ópticos de calidad alta siempre llevan lentes esféricas.

Desafío 202 e Por razones históricas, la mayoría de los libros de óptica enseñan a los lectores la relación aproximada entre los radios de las lentes finas, su índice de refracción n y su distancia focal:

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) . \quad (82)$$

Esta es la llamada *fórmula del fabricante de lentes*. La mayoría de las lentes esféricas son aproximadamente esféricas, así que la fórmula ayuda como una primera estimación también en estos casos.

* *

Las imágenes son una parte importante de la industria moderna. Sin impresoras láser, máquinas fotocopadoras, reproductores CD, reproductores DVD, microscopios, cámaras fotográficas digitales, cámaras de películas y de vídeo, máquinas de litografía para la producción de circuitos integrados, telescopios, proyectores de películas, nuestro mundo sería mucho más aburrido. Hoy día, el diseño de sistemas ópticos se hace con la ayuda de paquetes de software especializado. Ellos permiten calcular la calidad de la imagen, los efectos de la temperatura y las tolerancias mecánicas con una gran precisión. A pesar de la belleza del diseño óptico, hay escasez de expertos por todo el mundo en este fascinante campo.

Ref. 111

* *

Aún están siendo desarrolladas otros tipos adicionales de vídeo-cámaras. Ejemplo de ello son las cámaras de tiempo-de-vuelo, cámaras de escaneo láser, cámaras de vídeo ultravioleta, cámaras de vídeo que miden la polarización y cámaras de vídeo infrarrojo. Las últimas cámaras aparecerán pronto en los coches, al objeto de servir de ayuda en la prevención de accidentes, para reconocer a la gente y a los animales a través de la radiación de calor que ellos emiten.

* *

¿Cuales son las mejores imágenes en color que se pueden producir hoy día? Actualmente, las imágenes asequibles en papel tienen unos 400 puntos/mm, o puntos de unos 2,5 μm . ¿Cual es el máximo teórico? Podrá encontrar varios grupos de investigación poco serios que afirman haber producido imágenes en color con una resolución que es mayor que el máximo teórico.

Desafío 203 e

* *

Las imágenes por ultrasonido se utilizan regularmente en aplicaciones médicas. Como se ha mencionado con anterioridad, por desgracia no resulta seguro la toma de imágenes a las embarazadas. ¿Es la *imagen por ultrasonido*, aunque no un método de imagen óptica, un tipo de tomografía?

Vol. I, página 331

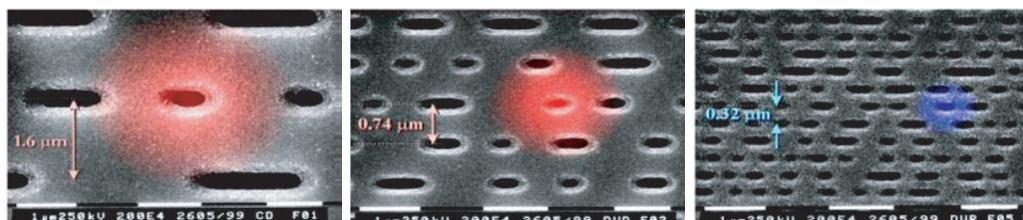
Desafío 204 e

* *

Cámaras CMOS, baterías y transmisores de radio se han hecho tan pequeños que se pueden meter en un paquete del tamaño de una píldora. Tal cámara puede tragarse, y con unos electrodos unidos al estómago de una persona, se pueden grabar películas del intestino mientras la persona desarrolla sus actividades diarias.

* *

Los sistemas ópticos más *corrientes* se encuentran en el interior de los reproductores de CD y DVD. Si alguna vez tiene la oportunidad de desarmar alguno, hágalo. Son piezas fascinantes de la tecnología, en la que cada milímetro cúbico ha sido optimizado por



CD
track pitch 1.6 μm
minimum pit length 0.8 μm

DVD
track pitch 0.74 μm
minimum pit length 0.4 μm

Blue Ray Disk
track pitch 0.32 μm
minimum pit length 0.15 μm

FIGURA 160 imagen compuesta de las pistas y el punto del láser en un reproductor de CD, un DVD y un disco 'blue ray' (© Wikimedia).

cientos de ingenieros. Partiendo de las fotografías de la [Figura 160](#), ¿puede imaginar cómo funciona un reproductor de CD o DVD?

* *

Los sistemas ópticos más *caros* no son los que se encuentran en los satélites espía – que pueden leer las cabeceras de un periódico desde el espacio – sino los que hay en las obleas paso a paso (wafer steppers). Las obleas paso a paso, son máquinas que se usan para la producción de los circuitos integrados. En tales 'steppers', se captura una máscara de metal, usando la luz de un láser UV de 193 nm, en una oblea de silicio cubierta con resistencia fotográfica. Los sistemas ópticos utilizados tienen el tamaño de un humano medio, son precisos en el orden de los nanómetros, y cuestan más de seis millones de euros por pieza. Los objetivos para el UV extremo serán al menos diez veces más caros. Los steppers EUV son probablemente los sistemas industriales más atrevidos jamás concebidos.

* *

Es posible comprar paneles de ventana transparentes que se pueden convertir en paneles translúcidos a voluntad – por tanto, pasar de un cristal claro a un cristal lechoso y al contrario – con sólo accionar un conmutador. ¿Cómo funciona?

Desafío 205 e

* *

Una rueda giratoria coloreada en modelo específico blanco y negro, tal como la *rueda de Benham*, producirá en el ojo efectos falsos de color. Por desgracia, un vídeo de esos efectos no funciona en un fichero pdf tal como el de este libro; en su lugar, échelo un vistazo al sitio web de Kenneth Brecher en lite.bu.edu/vision/applets/Color/Benham/Benham.html o lite.bu.edu/vision-flash10/applets/Color/Benham/Benham.html. También se pueden inducir colores falsos haciendo parpadear imágenes monocromáticas en la pantalla de un ordenador. Todos esos colores falsos son debidos principalmente a los diferentes tiempos de respuesta de los conos rojo, verdes o azules.

* *



FIGURA 161 Una de las muchas clases de las ruedas de Benham. Haciéndolo girar con una peonza, un reproductor de CD o un taladro es la manera más fácil de producir colores Fechner, es decir, colores falsos que aparecen intermitentemente con patrones blancos y negros.

Ref. 157 El tamaño del ojo en los mamíferos depende de su velocidad máxima de carrera. Esta dependencia ha sido verificada con más de 50 especies diferentes. Curiosamente, la correlación no se mantiene para la velocidad de vuelo de las aves.

* *

Los niños que nadan mucho bajo el agua pueden aprender a ver con *nitidez* en unas diez sesiones – a diferencia de los adultos. Los niños del pueblo de Moken en Tailandia fueron sometidos a estudio por esta hazaña. El estudio confirmó que todos los niños poseían esta habilidad, pero la mayoría de ellos no estaban el tiempo suficiente en el mar.

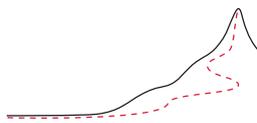
* *

Desafío 206 e ¿Ha visto alguna vez una sombra en un espejo o en una superficie plana de agua? ¿Por qué no?

RESUMEN SOBRE ÓPTICA APLICADA

El arte y la ciencia de realizar imágenes es esencial para el cuidado moderno de la salud, la industria, la ciencia, el entretenimiento y las telecomunicaciones. La obtención de imágenes es en gran parte el resultado de doblar rayos de luz de manera predeterminada y luego poderlos detectar. Todos los sistemas de obtención de imágenes, biológicos o fabricados por los humanos, están basados en la reflexión, la refracción o la difracción, combinados con detectores de píxeles. Todos los sistemas que obtienen o muestran imágenes de gran calidad – biológicas o de fabricación humana – utilizan combinaciones inteligentes de materiales científicos, sensores, activadores y procesadores de señal. Este campo fascinante aún está evolucionando con rapidez.





Ref. 158

Observándola con cuidado, nos daremos cuenta que la atmósfera está llena de fenómenos eléctricos. El más impresionante de ellos, el rayo, resulta ser ahora bastante bien conocido. No obstante, ha llevado décadas y la dedicación de un gran número de investigadores, poder descubrir y juntar todas las partes del puzzle. También bajo de nuestros pies algo importante está ocurriendo: el magma caliente bajo la corteza continental produce el campo magnético de la Tierra, al igual que ocurre en otros planetas. Los campos magnéticos fuertes son fascinantes además por una tercera razón: Se pueden utilizar para la levitación. En este capítulo, exploraremos en primer lugar estos tres asuntos y posteriormente daremos una visión general de los muchos efectos que producen los campos electromagnéticos, para concluir con algunas curiosidades y desafíos relacionados con la carga eléctrica.

¿ES UN RAYO UNA DESCARGA? – LA ELECTRICIDAD EN LA ATMÓSFERA

Ref. 160

Página 21

Ref. 161

En el interior de las nubes tormentosas, especialmente en el interior de las nubes altas conocidas como *cumulonimbos*,** las cargas son separadas por las colisiones entre los 'graupel' – (granizo o pedrisco) –, grandes cristales de hielo que caen debido a su peso y los 'hail', pequeños cristallitos de hielo que se elevan debido a las corrientes térmicas. Al producirse esta colisión en un campo eléctrico, las cargas son separadas de forma similar a lo que ocurre en un generador Kelvin. La descarga que tiene lugar cuando el campo eléctrico ha alcanzado un valor suficientemente alto, avanza tomado un extraño camino que viene influido por los iones creados en el aire por los rayos cósmicos. (No obstante hay, al menos otras diez explicaciones competentes para la separación de las cargas en las nubes.) Parece que los rayos cósmicos son al menos parcialmente responsables de la forma de zigzag del rayo. Para observar un sorprendente ejemplo, véase la [Figura 162](#).

Ref. 159

** En inglés, las nubes tienen nombres latinos; al ser el español un idioma de origen latino, han adquirido su propia denominación en nuestra lengua. Fueron introducidos en 1802 por el explorador Luke Howard (b. 1772 London, d. 1864 Tottenham), quien se dio cuenta de que las nubes podían presentarse con variaciones de tres tipos, a los que llamó *cirros*, *cúmulos* y *estratos*. A la combinación de las tres, la nube de la lluvia, le puso en nombre de *nimbo* (del latín 'nube grande'). El sistema acordado internacionalmente hoy ha sido ligeramente ajustado y la distinción de las nubes se hace de acuerdo a la altura de su borde inferior. Las nubes que comienzan por encima de una altura de 6 km son los cirros, los cirrocúmulos y los cirroestratos; los que comienzan a una altura entre los 2 y los 4 km son los altocúmulos, los altoestratos y los nimboestratos; las nubes por debajo de una altura de 2 km son los estratocúmulos, los estratos y los cúmulos. A las nubes de lluvia o de tormenta, que cruzan todas las alturas, se las llama hoy día *cumulonimbos*. Para vistas bonitas de nubes, consulte las direcciones www.goes.noaa.gov y www.osei.noaa.gov.



FIGURA 162 Fotografía excepcional de un rayo alcanzando un árbol (© Niklas Montonen).



FIGURA 163 Nubes del tipo Cúmulo-nimbo vistas desde el suelo y desde el espacio (NASA).

Un rayo normalmente transporta de 20 a 30 C de carga, con un pico de corriente de hasta 20 kA. Pero los rayos también tienen propiedades raras. Primero, los rayos surgen en campos de unos 200 kV/m (a baja altitud) en lugar de los 2 MV/m para unas chispas

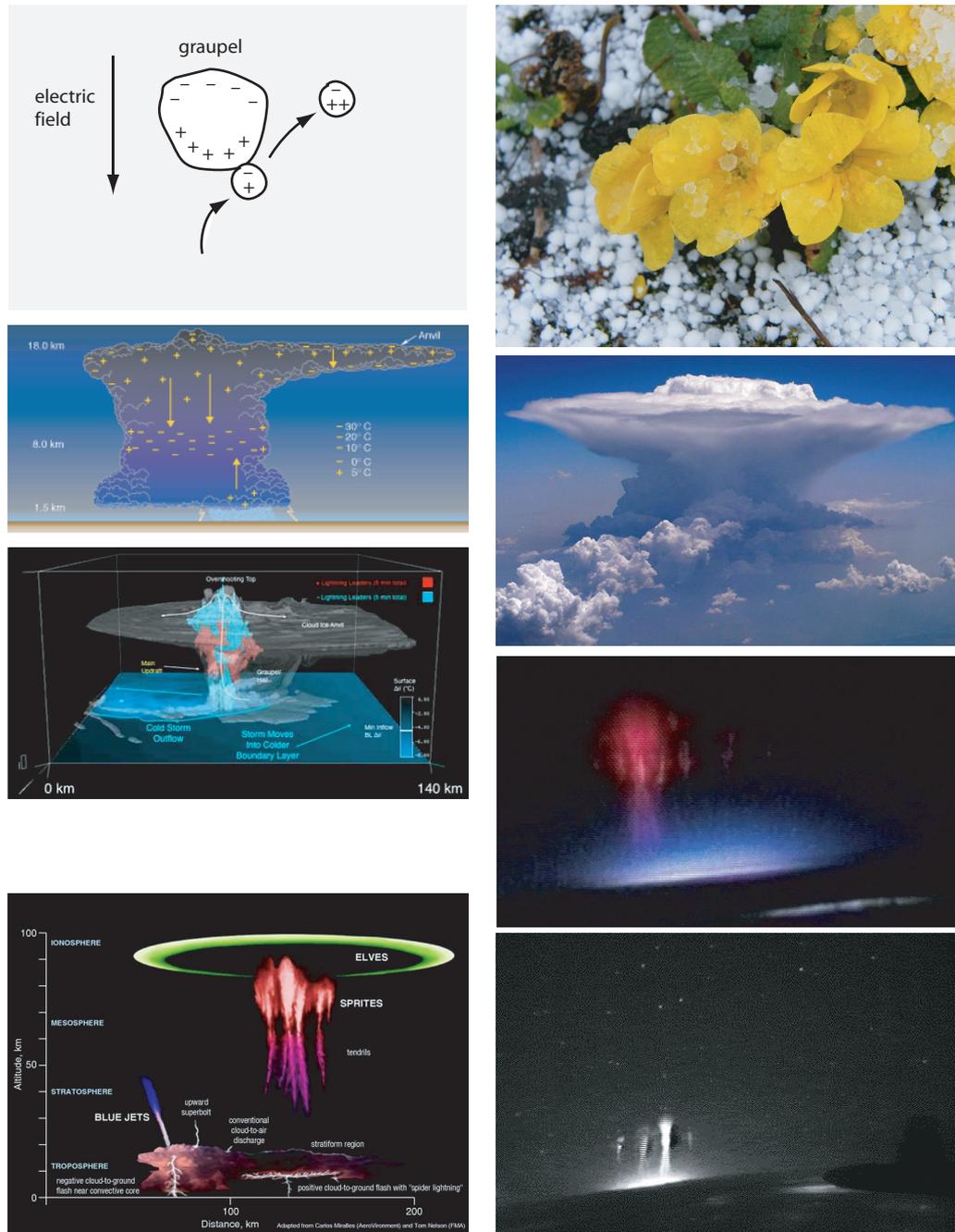


FIGURA 164 Carga y descarga de las nubes: el mecanismo microscópico más probable, llamado carga de partículas graupel por colisión con partículas de hielo, la distribución de carga en la nube, la estructura tridimensional y los procesos a gran escala descubiertos en las últimas décadas desde los aviones (© nordique, NASA, NOAA).

Ref. 162 normales. Segundo, los rayos emiten pulsos de radio. Tercero, los rayos emiten rayos-X y rayos gamma. A partir de 1992, unos investigadores rusos, mediante el descubrimiento de un novedoso mecanismo de descarga, fueron capaces de explicar los tres efectos. A escalas de longitud de 50 m y superiores, los rayos cósmicos pueden desencadenar la aparición de rayos; La energía relativista de estos rayos permite un mecanismo de descarga que no existe para los electrones de baja energía. En energía relativista, la llamada descomposición fuera de control produce descargas en campos mucho más bajos que los producidos por las chispas habituales en el laboratorio. La multiplicación de estos electrones relativistas también producen las emisiones observadas de rayos gamma y los pulsos de radio.

En la década de 1990 se pudieron documentar muchos más detalles sobre las tormentas. A veces los pilotos de líneas aéreas e incluso los pasajeros veían débiles emisiones de luz coloreada extendiéndose desde la cima de las nubes de tormenta. Existen varios tipos de tales emisiones: los jets azules y principalmente los sprites y los elfos rojos, los cuales son debidos, de alguna manera, a los campos eléctricos entre la cima de la nube y la ionosfera. Los detalles todavía están bajo investigación, y los mecanismos aún no resultan suficientemente claros.*

Ref. 165 La emisión de rayos-X producida por los rayos fue observada a principios del siglo XX. Aunque su confirmación experimental no resultó fácil, ya que era necesario colocar un detector adecuado cerca del rayo. Para conseguirlo, el rayo debía ser dirigido a una región determinada donde se encontrara el detector. Esto fue posible usando un proyectil que tirara de un cable de metal, con el otro extremo unido al suelo. Estos resultados experimentales están siendo ahora recopilados en una nueva descripción del rayo que también explica los sprites rojo-azules sobre las nubes causantes de las tormentas. En particular, los procesos también implican que dentro de las nubes, los electrones también pueden acelerarse alcanzando energías de hasta varios MeV. Las nubes de tormentas son aceleradores de electrones.

Ref. 166

A propósito, usted tiene una oportunidad del 75 % de sobrevivir tras ser alcanzado por un rayo, especialmente si está completamente mojado, así como en el caso de que la corriente fluya principalmente por el exterior de su piel. Generalmente, la gente que es alcanzada pierde toda su ropa, como si el agua evaporada la arrancara. Una rápida reanimación es fundamental para ayudar a la recuperación de alguien alcanzado por un rayo. Si alguna vez es alcanzado por un rayo y sobrevive, ¡vaya a un hospital! Mucha gente murió tres días después de no haberlo hecho. Un rayo, a menudo tiene efectos de coagulación de la sangre. Estas sustancias bloquean los riñones, y uno puede morir a los tres días a causa de un fallo renal. Un remedio simple consiste en someterse a un tratamiento de diálisis.

A modo de curiosidad, usted puede conocer como medir la distancia a la que se encuentra un rayo contando el número de segundos entre el relámpago y el trueno y multiplicándolo por la velocidad del sonido, 340 m/s; resulta menos conocido que también se puede estimar la longitud del rayo midiendo la duración del trueno y multiplicándolo por el mismo factor.

El rayo es parte del circuito eléctrico alrededor de la Tierra. Esta parte fascinante de la

* Para imágenes, consulte las interesantes páginas elf.gi.alaska.edu/, www.fma-research.com/spriteres.htm y pasko.ee.psu.edu/Nature.

Desafío 207 s

geofísica nos alejaría mucho del propósito de nuestra aventura. Pero todo físico debería saber que hay un campo eléctrico vertical entre 100 y 300 V/m en un día claro, como ya se descubrió en 1752. (¿Puede imaginar por qué no es notorio en la vida cotidiana?. ¿Y por qué, a pesar de su valor no es posible utilizarlo para extraer grandes cantidades de energía?) El campo está dirigido hacia abajo desde la ionosfera hasta el suelo; en realidad la Tierra está cargada negativamente de manera permanente, y con tiempo despejado la corriente fluye hacia abajo (los electrones fluyen hacia arriba) a través de una atmósfera limpia, tratando de *descargar* nuestro planeta. La corriente de entre 1 y 2 kA es difundida por todo el planeta; debiéndose posiblemente a los iones formados por la radiación cósmica. (La resistencia entre el suelo y la ionosfera es de unos 200 Ω , por lo que la caída de potencial es de unos 200 kV.) Al mismo tiempo, la Tierra está siendo cargada constantemente por varios efectos: hay un efecto dinamo debido a las corrientes de la atmósfera y hay corrientes inducidas por la magnetosfera. Pero el efecto de carga más importante se debe a los rayos.

Ref. 163
Desafío 208 s

En otras palabras, contrariamente a lo que se puede pensar, el rayo no se descarga en el terreno, en realidad, ¡la carga va hacia arriba! Verdaderamente, la Tierra está cargada aproximadamente a -1 MC. ¿Lo puede confirmar? Por supuesto, el rayo descarga la diferencia de potencial desde la nube al suelo, pero al hacerlo, en realidad envía (por lo general) una carga negativa a la Tierra en su conjunto. Las nubes de tormenta son baterías; la energía de las baterías procede de las subidas térmicas mencionadas anteriormente, las cuales transportan cargas *contra* el campo eléctrico ambiental global.

Ref. 164

Utilizando unas cuantas estaciones de mediciones eléctricas que registren las variaciones del campo eléctrico de la Tierra es posible localizar la posición de todos los rayos que bajan hacia la Tierra en un momento determinado. Distribuidos por todo el mundo, se producen *unos cien fogonazos por segundo*. La investigación actual también tiene como objetivo la medición de la actividad eléctrica de los sprites y de los elfos relacionados de esta manera.

Los iones del aire juegan un papel en la carga de las nubes de tormenta vía la carga de los cristales de hielo y las gotas de lluvia. En general todas las pequeñas partículas del aire están cargadas de electricidad. Cuando los aviones y los helicópteros vuelan, generalmente golpean más partículas de un tipo de carga que del otro. Como resultado, los aviones y los helicópteros quedan cargados durante el vuelo. Cuando se utiliza un helicóptero para el rescate de las personas de una balsa en alta mar, el cable que debe subir a las mismas tiene que ser descargado en primer lugar derivándolo a tierra – en este caso sumergiéndolo en el agua –; de no hacerlo, las personas de la lancha podrían morir a causa de una conmoción eléctrica al tocar el cable, como ya sucedió varias veces en el pasado.

¿Por qué las chispas y los rayos son azules? Los colores resultan ser una propiedad del material: el color proviene del material que va a ser excitado por la energía de la descarga, generalmente el aire. Esta excitación se debe a la temperatura de 30 kK en el interior del canal de un típico relámpago. Para las chispas cotidianas la temperatura es mucho más baja. Dependiendo de la situación, el color puede surgir del gas entre los dos electrodos, tal como el oxígeno o el nitrógeno, o puede deberse al material evaporado desde los electrodos en la descarga. Para una explicación de tales colores, así como para una explicación de todos los colores debidos a los materiales, necesitaremos esperar a la parte siguiente de nuestro paseo, sobre la teoría cuántica.

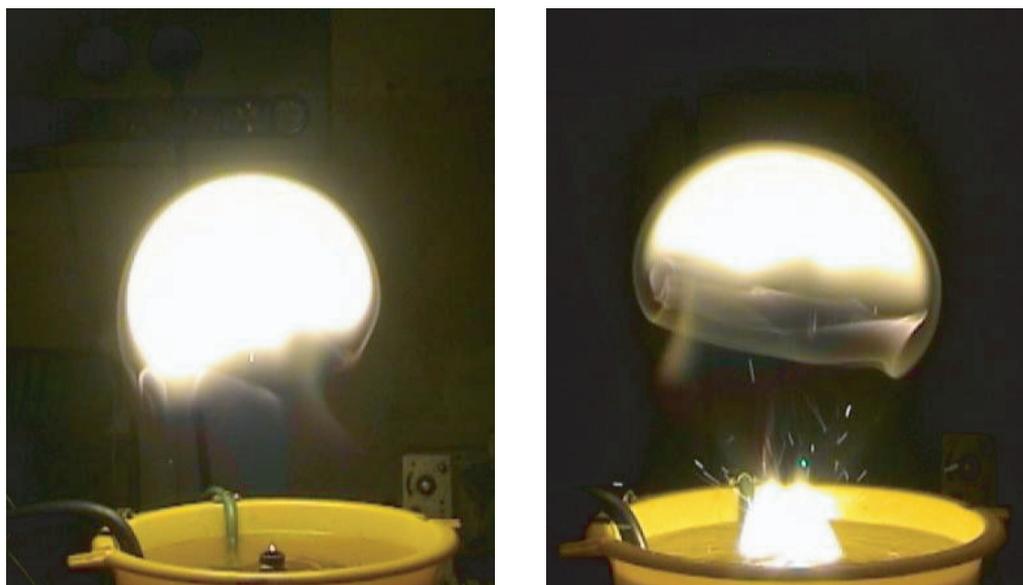


FIGURA 165 Nube de plasma flotante producida en el laboratorio (© Sergei Emelin y Alexei Pirozerski).

¿EXISTE EL RAYO GLOBULAR?

Ref. 167 Durante cientos de años, la gente ha puesto de manifiesto el haber observado los llamados *rayos globulares* – conocidos también en español con el nombre de 'centellas' o 'esferas luminosas' –. Los avistamientos son raros, pero recurrentes. En general la observación de estos rayos globulares han sido reportada mientras se producía una tormenta, con frecuencia tras la caída de un rayo común. Con algunas raras excepciones, nadie tomó en serio estas declaraciones, entre otras cosas porque no existían datos reproducibles.

Cuando los hornos microondas se volvieron populares, se hicieron conocidos varios métodos para producir rayos globulares. Para observar uno, solamente tiene que clavar un palillo de dientes en una vela, encienda el palillo de dientes, y póngalo dentro del horno microondas (preferiblemente el de alguna otra persona) a la máxima potencia. Este conjunto producirá una bonita descarga parecida a una bola. Sin embargo, los humanos no vivimos en un horno microondas; por tanto, este mecanismo no está relacionado con las esferas luminosas.

Ref. 168 La situación experimental cambió por completo entre los años 1999 y 2001. Durante esos años, los físicos rusos Anton Egorov y Gennady Shabanov descubrieron una forma para producir nubes de plasma, o *plasmoides*, flotando en el aire, utilizando tres ingredientes principales: agua, metal y alto voltaje. Aplicando alto voltaje a unos electrodos metálicos con forma y construcción adecuadas y sumergidos, aparecerán nubes de plasma desde el agua, de unos 10 a 20 cm de tamaño, flotando por encima de la superficie, que desaparecerán después de medio segundo aproximadamente. En la [Figura 165](#), se pueden ver dos ejemplos. El fenómeno de los plasmoides flotantes está siendo investigado todavía. Hay variaciones en la forma, color, tamaño y duración. El espectro de observaciones y tecnologías seguramente evolucionará en los años venideros.

Un efecto todavía más increíble fue publicado en 2007. Un equipo de investigación

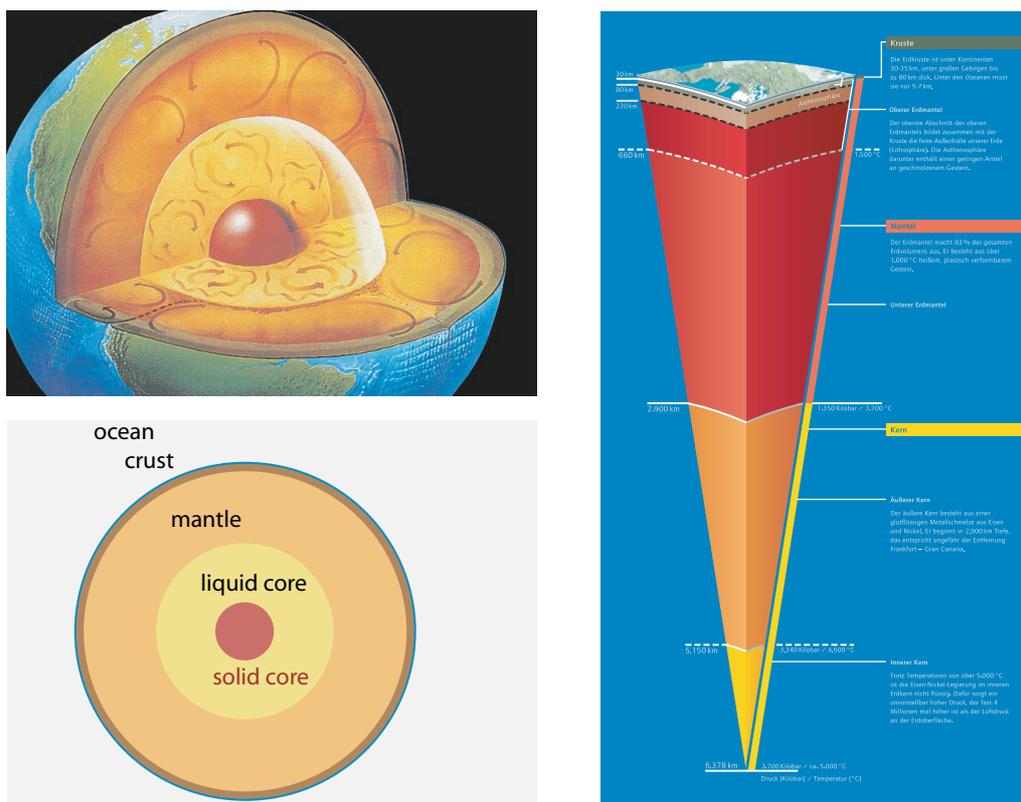


FIGURA 166 Estructura de nuestro planeta (© MPI-Chemie, Mainz/GEO).

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–01 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Ref. 169 brasileño encontró una forma de producir descargas del tamaño de pelotas de golf que parecían rodar por el suelo durante un tiempo de 8 s. Su método era maravillosamente simple: con la ayuda de una fuente de potencia de 25 V, hicieron pasar una corriente de 140 A a través de un arco en la superficie de una oblea de silicio. Descubrieron que se desprendían pequeñas partículas de silicio y se alejaban, mientras las rodeaba un resplandor luminoso. Estas nubes luminosas deambulaban por la mesa y el suelo del laboratorio hasta que se extinguían.

Parece que estos fenómenos de nubes podrían explicar una serie de las observaciones de los rayos globulares. Pero es igualmente probable que se descubran otros efectos adicionales en el futuro.

CAMPOS MAGNÉTICOS PLANETARIOS

La descripción clásica de la electrodinámica es consistente y completa; sin embargo, todavía hay muchos temas por investigar. Un ejemplo fascinante es el origen de los campos magnéticos de la Tierra, de los otros planetas, del Sol y de las galaxias.

El campo magnético de la Tierra, el que determina la dirección de una brújula, proviene de ocho fuentes:

1. La componente *principal* del campo magnético es la geodinamo del núcleo fluido de

- la Tierra.
2. Una componente adicional, el campo *litosférico*, se debe a la magnetización de las rocas.
 3. Los campos de las *mareas* se deben a la inducción de los campos principales vía el movimiento de las corrientes oceánicas conductoras de electricidad.
 4. Los campos *Sq* son debidos a la irradiación solar de la ionosfera.
 5. Los campos magnetosféricos se deben a la distribución y deriva de las partículas cargadas que contiene.
 6. Los electrojets polares y ecuatoriales provocados por distribuciones específicas de conductividad ionosférica.
 7. Las tormentas magnéticas provocadas por el viento solar.
 8. Fuentes humanas de todas clases.

El campo magnético principal se debe a la convección del líquido exterior del núcleo en lo más profundo de la Tierra, que principalmente está formado por hierro fundido. La convección se debe principalmente al gradiente radial de composición del núcleo exterior – pero también al gradiente de temperatura – y conduce los movimientos del hierro líquido con velocidades de hasta 30 km/a. La fuerza de Coriolis influye fuertemente en estos movimientos. El movimiento del hierro conductor en el ya existente campo magnético genera a su vez, como una dinamo, un campo magnético adicional. El mecanismo en la base de la geodinamo no es fácil de imaginar, ya que es intrínsecamente tridimensional. La [Figura 167](#) nos da una idea de lo que ocurre. Las influencias de la turbulencia, las no linealidades y el caos hace de este un fenómeno sorprendentemente complejo. En el interior de los otros planetas y las estrellas suceden procesos similares.

Ref. 33 Los detalles de la generación del campo magnético de la Tierra, generalmente llamado *geodinamo*, no comenzó a aparecer hasta la segunda mitad del siglo XX, cuando los conocimientos del interior de la Tierra alcanzaron un nivel suficiente. El interior de la Tierra comienza debajo de la corteza terrestre. La *corteza* normalmente tiene un grosor de 30 a 40 km (por debajo de los continentes), aunque es más gruesa bajo las montañas y más fina cerca de los volcanes o bajo los océanos. Como ya ha sido mencionado, la corteza está compuesta de grandes segmentos, las *capas*, que flotan sobre el magma y se mueven unas con respecto a las otras. El interior de la Tierra está dividido en el *manto* – los primeros 2900 km desde la superficie – y el *núcleo*. El núcleo está formado por un *núcleo exterior líquido*, con 2210 km de espesor, y un *núcleo interior sólido* con un radio de 1280 km. (No se conoce bien la temperatura del núcleo; se cree que puede estar en torno a los 6 ± 1 kK. ¿Se le ocurre alguna forma para calcularlo? La temperatura podría haber bajado incluso unos cuantos cientos de grados durante los últimos 3000 millones de años.)

Desafío 209 d

El núcleo de la Tierra está formado principalmente de hierro que ha sido obtenido de los asteroides que colisionaron con la Tierra durante su juventud. El núcleo externo líquido y conductor de electricidad actúa como una dinamo que mantiene funcionando el campo magnético. Esto es posible porque el núcleo magnético no gira solamente, sino que también *convecciona* desde el interior profundo de la Tierra a profundidades más superficiales. Como ya se ha mencionado, la convección es impulsada por el gradiente radial de su composición y, probablemente un poco menos, por el gradiente de temperatura entre el núcleo interior caliente y el manto más fresco. Debido a la convec-

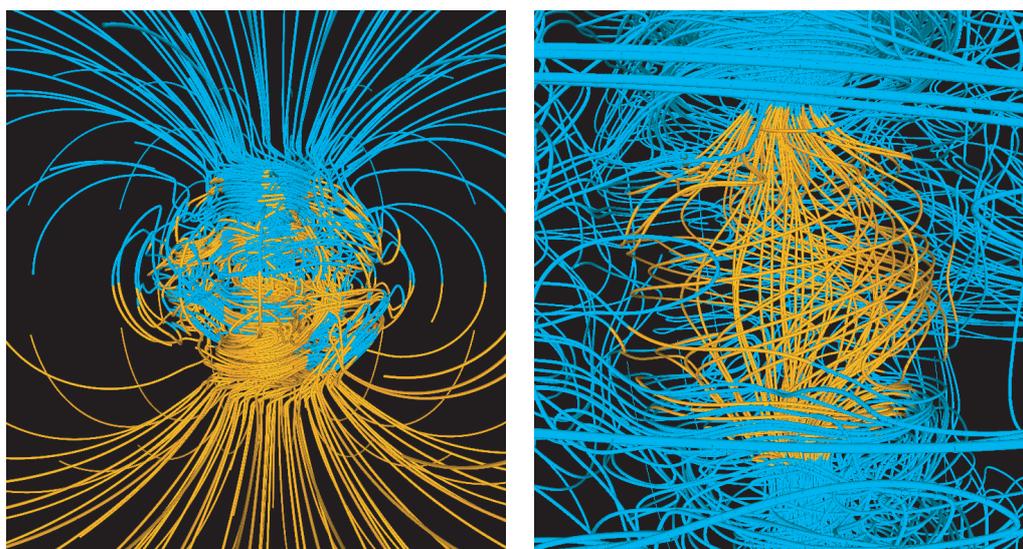


FIGURA 167 *Izquierda:* impresión de líneas del campo magnético dentro y fuera de la Tierra en rotación, a una distancia de hasta dos veces el radio de la Tierra, calculadas con una simulación por ordenador. El Norte está arriba, el Sur está abajo. Las líneas de campo dirigidas hacia dentro son azules, las dirigidas hacia fuera son amarillas. Dentro del núcleo fluido, el campo es complejo y fuerte. Fuera del núcleo de la Tierra, resulta ser un campo mucho más débil, suave y principalmente dipolar. *Derecha:* las líneas de campo dentro del núcleo interno sólido de la Tierra (amarillos) y el núcleo externo líquido (azul); la rotación relativa entre los dos es fundamental para la geodinamo. El modelo por ordenador fue desarrollado y ejecutado por Gary A. Glatzmaier (University of California, Santa Cruz) y Paul H. Roberts (University of California, Los Angeles) (© Gary Glatzmaier)

ción, la rotación y el efecto Coriolis, el movimiento promedio del fluido cerca del núcleo interno es helicoidal. Enormes corrientes eléctricas fluyen de formas complejas a través del líquido. El movimiento líquido, mantenido por la fricción, crea el campo magnético. Actualmente, dependiendo de su localización, el campo magnético superficial presenta una intensidad entre 20 y 70 μT ; dentro del núcleo, los valores son unas cincuenta veces más altos.

La energía magnética de la Tierra tiene su origen por tanto en la energía cinética del núcleo exterior líquido, que a su vez se debe a la flotabilidad. La convección tiene su origen en lo que sucede en el núcleo, que finalmente se debe a las desintegraciones radioactivas que mantienen caliente el núcleo. (Los procesos radioactivos serán explicados más adelante.) La historia detallada es fascinante. El líquido del núcleo exterior gira con respecto a la superficie de la Tierra; pero su movimiento no puede ser medido. Las simulaciones de la geodinamo realizadas por Gary Glatzmaier y su equipo predijeron en 1995 que como consecuencia, el núcleo interno sólido de la Tierra sería arrastrado por el núcleo exterior líquido y por tanto debería también rotar más rápido que la corteza terrestre. La evidencia experimental de este efecto apareció a partir de 1996. En 2005, ha sido definitivamente informado que el núcleo interno de la Tierra gira más rápidamente que la corteza terrestre hasta medio grado por año.

El campo magnético de la Tierra cambia su orientación a intervalos irregulares de entre unas decenas de miles a varios millones de años. La comprensión de este proceso es

un tema fundamental de investigación. No es fácil; los experimentos no son todavía posibles, 150 años de medidas es un tiempo corto comparado con la última transición – hace unos 730 000 años – y las simulaciones por ordenador son extremadamente complejas. En realidad, desde que comenzaron las medidas, el momento dipolar del campo magnético ha disminuido constantemente, actualmente un 5 % al año, y el momento cuadrupolar ha aumentado constantemente. Tal vez nos dirigimos hacia una gran sorpresa.

También en las estrellas el campo magnético se debe a la convección. El fluido en movimiento es el plasma. A causa de su baja viscosidad y a la falta de material sólido, los procesos y los movimientos en la dinamo solar difieren de los de la geodinamo. Por ejemplo, el período de rotación de la superficie solar depende de la latitud; es de 24.5 días en el ecuador y 38 días en los polos. A causa de la baja viscosidad del plasma, los campos magnéticos solares cambian de polaridad rápida y regularmente, cada 11 años. El cambio tiene importantes efectos en el número de manchas solares y en la intensidad del viento solar que llega a la Tierra. El campo magnético normal de la superficie solar es de 0.1 a 0,2 mT, varias veces el de la Tierra; en las manchas solares puede llegar hasta 0,3 T.

El estudio de los campos magnéticos *galácticos* son todavía más complejos, y aún se encuentran en su infancia. Están disponibles muchas medidas, que muestran intensidades normales de varias nT. El origen de los campos galácticos no se comprende todavía.

LEVITACIÓN

Hemos visto que es posible mover ciertos objetos sin necesidad de tocarlos, usando campos magnéticos o eléctricos o, naturalmente, utilizando la gravedad. ¿Es posible también, sin tocar un objeto, mantenerlo fijo flotando en el aire? ¿Existe este tipo de reposo?

Ref. 173 Resulta que hay varios métodos para levitar objetos. Normalmente se dividen en dos grupos: métodos de levitación que *consumen energía* y los que *no*. Entre los métodos que consumen energía está la flotación de objetos sobre corrientes de aire o de agua, la flotación de objetos a través de ondas sonoras, por ejemplo, por encima de una sirena, a con un rayo láser proyectado desde abajo, y la flotación de materiales conductores, aún de líquidos, en campos fuertes de radio-frecuencia. En la actualidad, la levitación de líquidos o sólidos mediante ondas fuertes de ultrasonido se está haciendo muy popular en los laboratorios de investigación. Todos estos métodos producen una *estacionaria*. (Objetos auto-propulsados como los drones no cuenta como ejemplos de levitación.)

Ref. 174 Otro grupo de método de levitación que consume energía detecta la forma en la que está cayendo un cuerpo y lo empuja hacia arriba nuevamente en el camino correcto a través de un ciclo de retroalimentación; estos métodos son *no estacionarios* y generalmente utilizan campos magnéticos para conseguir que los objetos no caigan. El tren magnético construido en Shanghai por un consorcio alemán levita de esta manera. El tren completo, incluido los pasajeros, es levitado y luego se mueve utilizando electroimanes. Es por lo tanto posible utilizar imanes para levitar muchas decenas de toneladas de material.

Ref. 175 Para los métodos de levitación que *no* consumen energía – todos estos métodos son necesariamente estacionarios – una bien conocida limitación puede encontrarse mediante el estudio de la 'ley' de Coulomb para la electrostática:

- ▷ Ninguna disposición estática de campos eléctricos puede hacer levitar un objeto *cargado* en el espacio libre o en el aire.

El mismo resultado es válido para los campos gravitacionales y para objetos *masivos*.*

▷ Ninguna disposición de masas puede hacer levitar un objeto *masivo*.

Ref. 176

En otras palabras, no se puede producir un mínimo local de energía potencial en medio de una caja usando campos gravitacionales o eléctricos. A esta imposibilidad se la conoce como *teorema de Earnshaw*. Matemáticamente hablando, las soluciones de la ecuación de Laplace $\Delta\phi = 0$, las llamadas *funciones armónicas*, tienen mínimos y máximos solamente en los bordes, y nunca dentro del dominio de definición. (Usted mismo lo probó en [página 201](#) del volumen I.) El teorema de Earnshaw también se puede probar observando que dado un potencial mínimo en el espacio libre, el teorema de Gauss para una esfera que rodee ese mínimo, requiere que en el interior se encuentre una fuente del campo, lo cual está en contradicción con el supuesto original.

También se puede deducir que es asimismo imposible utilizar campos eléctricos para hacer levitar un cuerpo eléctricamente *neutro* en el aire: la energía potencial U de ese cuerpo, con un volumen V y constante dieléctrica ϵ , en un entorno de constante dieléctrica ϵ_0 , viene dada por

$$\frac{U}{V} = -\frac{1}{2}(\epsilon - \epsilon_0)E^2 . \quad (83)$$

Desafío 210 ny

Puesto que el campo eléctrico E nunca alcanzará un máximo en ausencia de un espacio de cargas, y ya que para todos los materiales $\epsilon > \epsilon_0$, no puede haber un mínimo de energía potencial en el espacio libre para un cuerpo neutro.**

Para resumir, usando campos *eléctricamente estáticos* o *gravitacionalmente estáticos* es imposible evitar que un objeto caiga; ni la mecánica cuántica, que incorpora fenómenos tales como la antimateria, ni la relatividad general, que incluye fenómenos como los agujeros negros, cambiarán este resultado.

Desafío 212 ny

En relación con los campos *magnéticamente estáticos*, la discusión es análoga a la de los campos eléctricos: la energía potencial U para un cuerpo magnetizable de volumen V y permeabilidad μ en un medio con permeabilidad μ_0 en el que no hay corriente, viene dada por

$$\frac{U}{V} = -\frac{1}{2}\left(\frac{1}{\mu} - \frac{1}{\mu_0}\right)B^2 . \quad (84)$$

Desafío 213 e

Debido a la desigualdad $\Delta B^2 \geq 0$ para el campo magnético, no son posibles máximos aislados para un campo magnético estático B , solamente mínimos aislados. Por tanto, resulta imposible hacer levitar materiales paramagnéticos ($\mu > \mu_0$) o ferromagnéticos ($\mu \gg \mu_0$) tales como el acero, incluyendo las barras imantadas, que son todos atraídos y no repelidos hacia un campo magnético máximo.

Vol. I, página 114

Ref. 177

Desafío 211 ny

* Para desilusión de muchos adictos a la ciencia ficción, esto aún podría ser verdad si existiera una masa negativa. Y a pesar de que la gravedad no se debe realmente a un campo, sino a la curvatura espacio-tiempo, todavía se mantiene el resultado en la relatividad general.

** Es posible, no obstante, 'levitar' burbujas de gas en los líquidos – 'atraparlas' para evitar que se eleven, sería una expresión mejor – porque en tales casos la constante dieléctrica del entorno sería mayor que la del gas. ¿Se podría encontrar una combinación líquido-gas donde las burbujas cayeran en lugar de subir?

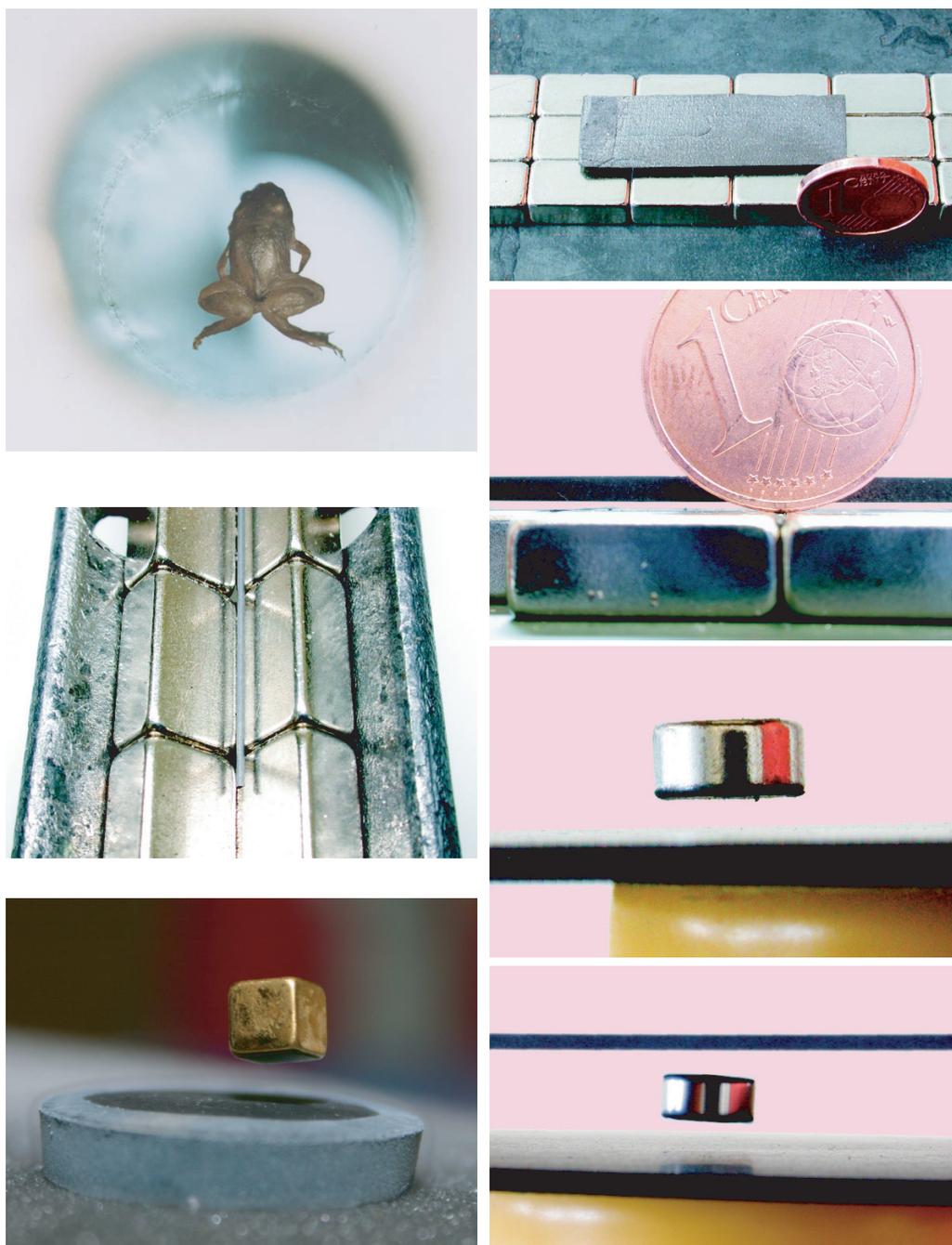


FIGURA 168 Levitación diamagnética estable. Izquierda: una rana viva en un imán de 16 T, una barra de grafito sobre un imán permanente rectangular, y un imán de latón sobre un anillo superconductor. Derecha: dos placas de grafito levitando, una vista desde arriba y la otra desde un lado; abajo, levitación de un imán permanente de NdFeB de 4 mm de diámetro, sobre una placa de grafito y entre dos placas de grafito, cerca de un gran anillo de imán que no es mostrado (© Lijnis Nelemans, Peter Nussbaumer, y Joachim Schlichting Ref. 178).

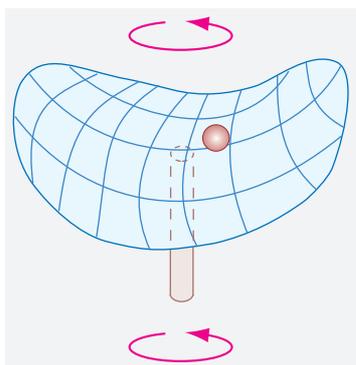


FIGURA 169 Atrapando una esfera de metal utilizando un taladro de velocidad variable y una montura de plástico.

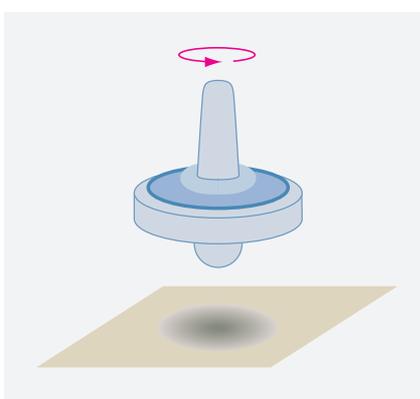


FIGURA 170 'Magia' flotante disponible hoy día en las tiendas de juguetes, izquierda, con un trompo y, derecha, con una esfera giratoria magnética levitando sobre un imán de anillo (© Kay Kublenz).

Para realizar la levitación magnética hay dos formas posibles: *levitando un material diamagnético* o utilizando un *campo magnético tiempo-dependiente*.

Página 43

Los materiales diamagnéticos ($\mu < \mu_0$, o $\mu_r = \mu/\mu_0 < 1$) fueron descubiertos poco tiempo después de que Earnshaw publicase su teorema, y permiten eludirlo. En realidad, los materiales diamagnéticos, tales como el grafito o el agua, pueden ser levitados por campos diamagnéticos estáticos porque son atraídos a campos magnéticos mínimos. De hecho, es posible levitar imanes si se usa una combinación que contenga diamagnetos. En la [Figura 168](#) se muestran varios casos que pueden ser replicados fácilmente en una mesa de cocina – junto a otras varios –.

Ref. 179

Ref. 178

Otro ejemplo bien conocido de levitación diamagnética es la levitación de los superconductores. En realidad, los superconductores, al menos los del tipo I, son diamagnetos perfectos ($\mu = 0$). En algunos casos, los superconductores, aún pueden quedar *suspendidos* en el aire, por debajo de un imán. También los átomos individuales con momento magnético son diamagnetos; rutinariamente levitan de esta manera y también han sido fotografiados en este estado. Los neutrones individuales, que tienen un momento dipolar magnético, se han mantenido en botellas magnéticas, hasta que se descomponen.

Ref. 180

Los diamagnetos levitan si $\nabla B^2 > 2\mu_0\rho g/\chi$, donde ρ es la densidad de masa del objeto y $\chi = 1 - \mu/\mu_0$ su susceptibilidad magnética. Como χ es generalmente de unos 10^{-5}

Desafío 214 ny

y ρ del orden de 1000 kg/m^3 , se necesitan unos gradientes de campo de alrededor de $1000 \text{ T}^2/\text{m}$. En otras palabras, la levitación requiere cambios de campos de 10 T sobre 10 cm, lo que hoy día es corriente para imanes de laboratorio de alto campo.

Recientemente, los científicos han hecho levitar trozos de madera y de plástico, fresas, gotas de agua, gotas de helio líquido con un tamaño de 2 cm, saltamontes, peces y ranas (todos vivos y sin causarles ningún daño), usando la levitación magnética. En realidad, Ref. 181 los animales, al igual que los humanos, están todos hechos de material diamagnético.

Los propios humanos no han sido levitados todavía, pero este logro, que se espera que requiera 40 T y una gran cantidad de energía eléctrica, está siendo planeado y se está trabajando en ello. De hecho, un logro parecido ya ha sido conseguido: la levitación diamagnética está siendo explorada para la levitación de trenes de pasajeros, principalmente Ref. 175 en Japón, aunque con escaso éxito comercial.

Los campos eléctricos o magnéticos *tiempo-dependientes*, por ejemplo, los campos Ref. 173 periódicos, pueden producir levitación de muchas maneras diferentes sin ningún consumo de energía. Este es uno de los métodos utilizados en los cojinetes magnéticos de las bombas de vacío turbomoleculares. También las partículas individuales cargadas, tales como los iones y los electrones, son ahora levitados regularmente con trampas de Paul y trampas de Penning. La Figura 169 muestra la analogía mecánica. Ref. 173

La Figura 170 muestra un juguete que permite levitar una peonza o una esfera magnética giratoria en el aire sobre un imán de anillo, una demostración bastante impresionante para cualquiera que la observe. La foto muestra que no es tan difícil fabricar por Ref. 182 un mismo tal dispositivo. Ref. 183

Aún los electrones libres pueden ser levitados, dejándolos flotar sobre una superficie de helio fluido. En el giro más reciente de la ciencia de la levitación, en 1995 Stephen Ref. 184 Haley predijo que podría cuantificarse la altura de suspensión de pequeñas partículas magnéticas sobre un anillo superconductor. No obstante, la predicción no ha podido ser verificada experimentalmente todavía.

En aras de la exhaustividad mencionaremos que las fuerzas nucleares no se pueden usar para la levitación en la vida cotidiana, ya que su rango está limitado a unos cuantos femtómetros. No obstante, veremos más adelante que estas interacciones impiden que la materia superficial del Sol caiga hacia su interior; por tanto podríamos decir que verdaderamente están levitando por interacciones nucleares.

¿HACE LA GRAVEDAD QUE LAS CARGAS IRRADIEN?

En la sección sobre relatividad general hemos aprendido que la gravitación produce los mismos efectos que la aceleración. Esto significa que una carga mantenida fija a una cierta altura es equivalente a una carga acelerada a $9,8 \text{ m/s}^2$, lo que implica que irradiaría electromagnéticamente, ya que todas las cargas aceleradas irradian. No obstante, el mundo a nuestro alrededor está lleno de cargas a alturas fijas, y no se produce tal radiación. ¿Cómo es posible esto?

Ref. 170 La pregunta ha sido un tema favorito durante muchos años. Hablando en general, el concepto de radiación no es invariante para el observador: Si un observador detecta radiación, un segundo observador no tiene por qué detectarla necesariamente también. La forma exacta por la que un campo de radiación cambia de un observador a otro depende del tipo de movimiento relativo y del campo en sí mismo.

Ref. 171 Una exploración detallada del problema muestra que para una carga uniformemente acelerada, un observador que experimente la misma aceleración solo detectará un campo electrostático. Por el contrario, un observador inercial detectará un campo de radiación. Como la gravedad es (con una precisión alta) equivalente a una aceleración uniforme, obtenemos un sencillo resultado: la gravedad no hace que las cargas eléctricas irradian para un observador en reposo con respecto a la carga – como de hecho es observado. Los resultados también son válidos para la descripción de la teoría cuántica.

MATERIA, LEVITACIÓN Y EFECTOS ELECTROMAGNÉTICOS

Desafío 215 s La levitación utilizada por los magos cae dentro de otra clase. Cuando David Copperfield, un mago que actuaba para chicas jóvenes a finales del siglo XX, 'volaba' durante sus actuaciones, lo hacía estando suspendido por finos hilos de pescar que se volvían invisibles mediante inteligentes trucos de iluminación. (¿Cómo se puede comprobar esto?) En realidad, si queremos ser precisos, deberíamos contar los hilos de pescar, las bolsas de plástico, así como cada mesa y cada silla como dispositivos de levitación. (El periodismo sensacionalista los llama dispositivos 'anti-gravedad'.) Contrariamente a nuestra impresión, un objeto colgante o yacente no está realmente en contacto con la suspensión, si miramos los puntos críticos con un microscopio. La prueba sobre la falta de contacto aparecerá en la parte cuántica de nuestro paseo.*

Vol. V, página ?? Pero si un objeto yacente no está en contacto con su soporte, por qué no caemos a través de una mesa o a través del suelo? Comenzamos el estudio de la mecánica estableciendo que una propiedad clave de la materia era su *solidez*, es decir, la imposibilidad de tener más de un cuerpo en el mismo lugar al mismo tiempo. Pero, ¿cuál es el origen de la solidez? La solidez se debe a la electricidad en el interior de la materia. Lo diremos de nuevo, solamente descubriremos los detalles en la siguiente parte cuántica de nuestra aventura, pero en este momento, podemos obtener ya las primeras pistas.

Ref. 185 La solidez no sólo se debe a la electricidad. Otros muchos experimentos – en realidad, todos – muestran que la materia está formada por partículas cargadas. Verdaderamente la materia puede ser movida o influenciada por campos electromagnéticos de muchas maneras. A través de los años, los científicos de la materia han elaborado una larga lista de tales efectos, todos los cuales tienen su origen en la existencia de los componentes cargados de la materia. En la [Tabla 17](#) se ofrece una visión general. ¿Puede encontrar o imaginar un nuevo efecto? Por ejemplo, ¿podría la carga eléctrica cambiar el color de los objetos?

Desafío 217 r

Desafío 216 ny

* El problema está lejos de ser simple: ¿cuál de los métodos de levitación descrito anteriormente es el utilizado por mesas o sillas?

TABLA 17 Propiedades seleccionadas de la materia relacionadas con el electromagnetismo, que muestran, entre otras cosas, el papel que juega en la constitución de la misma; al mismo tiempo, una breve descripción de la física atómica, la del estado sólido, la de los fluidos y la de los negocios relacionados con ellas.

PROPIEDAD	EJEMPLO	DEFINICIÓN
radiación térmica, radiación calorífica o incandescencia	todos los objetos	radiación dependiente de la temperatura emitida por cualquier cantidad macroscópica de materia
emisividad	todos los cuerpos	capacidad para emitir luz térmica
Interacciones con cargas y corrientes (efectos relacionados con el transporte)		
electrificación	separando los metales de los aislantes	carga espontánea
triboelectricidad	piel de gato frotada con un vidrio	carga a través del frotamiento
luz barométrica	mercurio deslizándose por un cristal	descarga gaseosa debida a la triboelectricidad Ref. 186
aislamiento	aire	no hay flujo de corriente por debajo de la caída del voltaje crítico
semiconductividad	diamante, silicio o arseniuro de galio	la corriente circula sólo cuando el material es impuro ('dopado')
conductividad	cobre, metales	la corriente circula fácilmente
superconductividad	niobio por debajo de 9 K	la corriente circula indefinidamente
ionización	fuego llamas	la corriente circula fácilmente
localización (débil, Anderson)	sólidos desordenados	resistencia de los sólidos desordenados
resistividad, efecto Joule	grafito, W	calentamiento debido al flujo de corriente
efectos termoeléctricos en los contactos: efecto Seebeck, efecto Peltier	ZnSb, PbTe, PbSe, BiSeTe, Bi ₂ Te ₃ , etc.	flujo de corriente debido a la diferencia de temperatura, enfriamiento debido al flujo de corriente
efecto termoeléctrico a granel: efecto Thomson	Fe, Bi, Co, Sb, Cu, Ag, etc.	enfriamiento debido a los gradientes de temperatura
efecto acústico-eléctrico	CdS	generación de sonido por las corrientes, y viceversa
magnetorresistencia (varios efectos diferentes)	permalloy, perovskita, metal multicapas	cambios de la resistencia eléctrica según los campos magnéticos aplicados Ref. 187
recombinación	detector de humo	los portadores de carga se combinan para formar átomos neutros o moléculas
aniquilación	tomografía de positrón	partícula y anti-partícula, e.g. electrón y positrón, desaparecen en los fotones
efecto Penning	H, Ne, Ar	los átomos metaestables neutros excitados ionizan a otros átomos mediante colisiones

TABLA 17 (Continuación) Propiedades seleccionadas de la materia relacionadas con el electromagnetismo.

PROPIEDAD	EJEMPLO	DEFINICIÓN
efecto Richardson, emisión térmica	BaO ₂ , W, Mo, utilizado en tv y en microscopios electrónicos	emisión de electrones por metales calientes
efecto piel	Cu, todos los conductores	alta densidad de corriente en el exterior de un cable de alta frecuencia
efecto pellizco	InSb, plasmas	alta densidad de corriente en el interior de un cable
efecto Josephson	Nb-Oxide-Nb	la corriente túnel atraviesa al aislante entre dos superconductores
efecto Sasaki-Shibuya	n-Ge, n-Si	anisotropía de la conductividad por la aplicación de un campo eléctrico
magnetismo conmutable	InAs:Mn	magnetización por voltaje conmutable Ref. 188
efecto Hall	silicio y otros semiconductores; usado para la medida de campos magnéticos	voltaje perpendicular al flujo de corriente en los campos magnéticos aplicados
efecto Etingshausen-Nernst	Bi	aparición de un campo eléctrico en materiales con gradientes de temperatura en campos magnéticos
efecto optogalvánico	plasmas	cambio de corriente de descarga debida a la irradiación de luz
Interacciones con los campos magnéticos		
ferromagnetismo	Fe, Ni, Co, Gd	magnetización espontanea; material fuertemente atraído por campos magnéticos
paramagnetismo	Fe, Al, Mg, Mn, Cr	magnetización paralela inducida a los campos aplicados; atracción por campos magnéticos
diamagnetismo	agua, Au, grafito, NaCl	magnetización inducida opuesta a los campos aplicados; repelidos por los campos magnéticos
magnetostricción (y el efecto Joule relacionado, efecto Villar, efecto Wiedemann, efecto Matteucci, efecto Barret y efecto Nagaoka-Honda)	CeB ₆ , CePd ₂ Al ₃ , TbDyFe	cambio de forma o volumen por campo magnético aplicado
efecto magnetoelástico	Fe, Ni	cambio de magnetización por tensión o presión

TABLA 17 (Continuación) Propiedades seleccionadas de la materia relacionadas con el electromagnetismo.

PROPIEDAD	EJEMPLO	DEFINICIÓN
efecto acusto-magnético	aleaciones de metales, pegatinas anti-robo	excitación de oscilaciones mecánicas por campos magnéticos
efecto de válvula de giro	metal multicapas	la resistencia eléctrica depende de la dirección de giro de los electrones con respecto al campo magnético aplicado
efecto Zeeman	átomos, e.g., Cd	cambio de la frecuencia de emisión con el campo magnético
orientación óptica	gases paramagnéticos	la luz polarizada circularmente y el campo magnético alinean los giros atómicos debidos al efecto Zeeman
efecto Hanle	Hg, gases paramagnéticos	cambio de polarización de la fluorescencia con el campo magnético
efecto Paschen-Back, efecto Back-Goudsmit,	gases atómicos	cambio de la emisión de frecuencia en los campos magnéticos fuertes
actividad magneto-óptica o efecto Faraday o rotación de Faraday	vidrio de pedernal	el ángulo de polarización rota con el campo magnético; índice de refracción diferente para la luz polarizada circularmente hacia la derecha y hacia la izquierda, como en la grabación magneto-óptica (MO)
dicroísmo circular magnético	gases	absorción diferente para la luz circularmente polarizada hacia la derecha que hacia la izquierda; esencialmente igual que el caso anterior
efecto Majorana	coloides	efecto magneto-óptico específico
efecto fotoelectromagnético	InSb	flujo de corriente debido a la irradiación de luz de una semiconductor en un campo magnético
efecto Faraday inverso	GdFeCo	cambio en la magnetización por un pulso láser de un femtosegundo
efecto Voigt	vapores	birrefringencia inducida por campo magnético
efecto Cotton-Mouton	líquidos	birrefringencia inducida por campos magnéticos aplicados
efecto Shubnikov-de Haas	Bi	cambio periódico de la resistencia con un campo magnético aplicado
efectos termomagnéticos: efecto Ettingshausen, efecto Righi-Leduc, efecto Nernst, efecto magneto-Seebeck	aleaciones de BiSb	relación entre la temperatura, campos aplicados y corriente eléctrica
efecto fotónico Hall	CeF ₃	la intensidad transversal de la luz depende del campo magnético aplicado Ref. 189

TABLA 17 (Continuación) Propiedades seleccionadas de la materia relacionadas con el electromagnetismo.

PROPIEDAD	EJEMPLO	DEFINICIÓN
efecto magnetocalórico	gadolinio, aleaciones de GdSiGe	el material se enfría cuando el campo magnético se cierra Ref. 190
resonancia del ciclotrón	semiconductores, metales	absorción selectiva de ondas de radio en los campos magnéticos
efecto magnetoacústico	semiconductores, metales	absorción selectiva de ondas sonoras en los campos magnéticos
resonancia magnética (muchos tipos)	la mayoría de materiales, utilizado para creación de imágenes en medicina para la determinación de la estructura de las moléculas	selectiva absorción de ondas de radio en campos magnéticos; incluye NMR, EPR, etc.
efecto magnetorreológico	líquidos, utilizados en las suspensiones avanzadas de coches	cambia la viscosidad con la aplicación de campos magnéticos
efecto Meissner	tipo I superconductores, usados para la levitación	expulsión del campo magnético en los superconductores
Interacciones con los campos eléctricos		
polarizabilidad	toda la materia	cambios de polarización con la aplicación de campos eléctricos
ionización, emisión de campo, efecto Schottky	toda la materia, tv	cargas extraídas a campos altos
paraelectricidad	BaTiO ₃	aplicada a campos permite la polarización en la misma dirección
dielectricidad	agua desionizada, aisladores	en dirección opuesta
ferroelectricidad	BaTiO ₃	polarización espontánea por debajo de la temperatura crítica
piezoelectricidad	el encendedor de cuarzo que se usa en la cocina, huesos humanos, LiNbO ₃	la polarización aparece con la tensión, el estrés o la presión
electrostricción	esponjas de platino en ácidos	Cambio de forma con el voltaje aplicado Ref. 191
piezoelectricidad	CsNO ₃ , turmalina, cristales con polarización axial; usados para la detección de infrarrojo	La variación de la temperatura produce la separación de cargas

TABLA 17 (Continuación) Propiedades seleccionadas de la materia relacionadas con el electromagnetismo.

PROPIEDAD	EJEMPLO	DEFINICIÓN
electro-ósmosis o efecto electrocinético	muchos líquidos iónicos	los líquidos se mueven bajo la aplicación de campos eléctricos Ref. 192
electrohumedecimiento	soluciones de sal en el oro	el humedecimiento de la superficie depende del voltaje aplicado
actividad electrolítica	ácido sulfúrico	transporte de carga a través de un líquido
efecto de cristal líquido	pantallas de relojes	las moléculas giran con los campos eléctrico aplicados
actividad electro-óptica: efecto Pockels, efecto Kerr	sólidos cristalinos (LiNbO_3), líquidos (e.g. aceite)	el campo eléctrico rota la polarización de la luz, i.e., produce birrefringencia
efecto Freederichsz, efecto Schadt–Helfrichs	cristales líquidos nemáticos	birrefringencia inducida eléctricamente
efecto Stark	hidrógeno, mercurio	cambio de color de la luz emitida en un campo eléctrico
ionización de campo	el helio cerca de puntas de tungsteno en un microscopio de campo de iones	ionización de átomos de gas con fuertes campos eléctricos
efecto Zener	Si	transferencia de electrones libre de energía en una banda de conducción con campos elevados
evaporación de campo	W	evaporación bajo la aplicación de campos eléctrico fuertes
interacciones lineales con la luz		
absorción	carbón, grafito	transformación de la luz en calor u otras formas de energía (¿cuáles?) Desafío 218 s
oscuridad	carbón, grafito	absorción completa en el rango visible
color	rubí	absorción dependiendo de la frecuencia de la luz
brillo metálico	metal, cristales dopados	capacidad para actuar como un 'buen' espejo
dispersión cromática	todos los materiales	la velocidad de fase de la luz depende de la longitud de onda
fotoestricción	PbLaZrTi	piezoelectricidad inducida por la luz
fotografía	AgBr, AgI	la luz precipita plata metalizada
fotoelectricidad, efecto fotoeléctrico	Cs	la corriente fluye en el vacío debido a la irradiación de la luz
efecto fotoeléctrico interno	cruces Si p–n, células solares	generación de voltaje y flujo de corriente debido a la irradiación de la luz
efecto de arrastre del fotón	p-Ge	corriente inducida por la cantidad de movimiento del fotón

TABLA 17 (Continuación) Propiedades seleccionadas de la materia relacionadas con el electromagnetismo.

PROPIEDAD	EJEMPLO	DEFINICIÓN
transparencia	vidrio, cuarzo, diamante	baja reflexión, baja absorción, baja dispersión por partículas
reflectividad	metales	la luz rebota en la superficie
polarización	nanopartículas de plata alargadas en el vidrio	la transmisión de la luz depende del ángulo de polarización
actividad óptica	azúcar disuelta en agua, cuarzo	rotación de la polarización
birrefringencia, dicroísmo lineal	calcita, cornea, hojas de polímeros delgadas	refracción el índice depende de la dirección de la polarización lineal, los rayos de luz se dividen en dos
circular dicroísmo	aminoácidos, andalusita	la absorción depende de la polarización circular
anisotropía inducida ópticamente, efecto Weigert	AgCl	birrefringencia inducida ópticamente y dicroísmo
efecto Compton	medidas de la cantidad de movimiento	cambio de la longitud de onda de rayos-X y radiación gamma colisionando con electrones
electrocromaticidad	wolframatos	cambio de color con los campos eléctricos aplicados
dispersión por partículas	gases, líquidos	la dirección de la luz cambia
difusión de Mie	polvo en gases	la luz cambia de dirección
dispersión de Raleigh	cielo	la luz cambia de dirección, el cielo es azul
efecto Raman o efecto Smekal–Raman	gases moleculares	la luz dispersa cambia la frecuencia
espejo conmutable	LaH	el voltaje controla el cambio desde la reflexión hasta la transparencia Ref. 193
efecto radiómetro	aspas bicolors de un molino	la irradiación hace girar las aspas (véase página 132)
presión luminosa	<i>idem</i>	la irradiación hace girar el molino directamente
efecto navegación solar	satélites futuros	movimiento debido al viento solar
efecto acústico-óptico	TeO ₂ , LiNbO ₃	difracción de la luz por el sonido en los materiales transparentes
materiales fotorefractivos	Bi ₁₂ SiO ₂₀ , LiNbO ₃ , GaAs, InP	la irradiación de luz cambia el índice refractivo
efecto Auger	espectroscopía electrónica Auger	emisión de electrones debida a la reorganización atómica tras la ionización por rayos-X
reflexión de Bragg	determinación de la estructura cristalina	difracción de rayos-X por planos atómicos

TABLA 17 (Continuación) Propiedades seleccionadas de la materia relacionadas con el electromagnetismo.

PROPIEDAD	EJEMPLO	DEFINICIÓN
efecto de Mößbauer	^{57}Fe , utilizado en espectroscopia	absorción resonante sin retroceso de radiación gamma
creación de pareja	Pb	transformación de un fotón en una pareja partícula-antipartícula cargada
fotocnductividad	Se, CdS	cambio de la resistividad con la irradiación de luz
efecto optoacústico, efecto fotoacústico	gases, sólidos	creación de sonido debido a la absorción de luz pulsada; utilizado par la toma de imágenes del tejido de los animales y de los humanos
emisión de luz		
luminescencia: término general para designar lo opuesto a la incandescencia	GaAs, tv	emisión de luz por materia fría
fluorescencia	CaF_2 , producción de rayos-X, tubos de luz, tubos de rayos catódicos, tubos de televisión, pigmentos, polímeros coloreados, cristales dopados	emisión de luz durante y después de la absorción de luz o de otro aporte de energía.
fosforescencia	TbCl_3 , cristales dopados con metales pesados	emisión de luz debida a un aporte de entrada de energía luminosa, eléctrica o química, continuando la estimulación <i>mucho después</i>
luminescencia de semiconductores	diodos emisores de luz (LEDs), punteros láser	emisión de luz debida a la recombinación de huecos de electrones en cruces p-n
electroluminescencia	ZnS polvo	emisión de luz debida al campo eléctrico alternante
fotoluminescencia	ZnS : Cu, SrAlO_4 : Eu, Dy, hiamina	emisión de luz en destellos por luz UV, utilizado en señales de seguridad
quimioluminescencia	H_2O_2 , éster de oxalato de fenilo, soluciones de teñido	emisión de luz fría excitada químicamente, utilizada para las barras de los submarinistas y como diversión
bioluminescencia	luciérnaga, peces del mar profundo	emisión de luz fría de los animales, tipo especial de quimioluminescencia
triboluminescencia	azúcar	emisión de luz durante una fricción o un choque, sin utilidad para la iluminación

TABLA 17 (Continuación) Propiedades seleccionadas de la materia relacionadas con el electromagnetismo.

PROPIEDAD	EJEMPLO	DEFINICIÓN
termoluminescencia	cuarzo, feldespato, ion metaestable dopante en los cristales	emisión de luz mientras se calientan, a menudo muestra memoria de la irradiación, usado por ejemplo en arqueología para calcular la fecha de las cerámicas Ref. 194
sonoluminescencia	aire en el agua	emisión de luz durante la cavitación
gravitoluminescencia	no existe; Desafío 219 s ¿por qué?	
bremsstrahlung	generación de rayos-X	emisión de radiación mediante una rápida desaceleración de electrones (también se conoce como 'radiación de frenado')
efecto Čerenkov	agua, polímero detectores de partículas	emisiones de luz en un medio debido a las partículas, e.g. emitidos por procesos radiactivos, moviéndose más rápido que la velocidad de la luz en el medio
radiación de transmisión	cualquier material	emisión de luz debida al movimiento rápido de partículas de un medio a un segundo con diferente índice refractivo
Interacciones no-lineales con la luz		
actividad láser, superradiación	cerveza, rubí, He-Ne, etc.	emisión de radiación estimulada
láser de cascada cuántica	semiconductores multicapas	emisión de radiación infrarroja estimulada a través de transiciones entre sub-bandas
segunda, tercera, n -sima generación de armónicos	LiNbO ₃ , KH ₂ PO ₄	luz parcialmente transformada al doble de frecuencia, al triple, a n -veces la frecuencia
actividad de espejo de fase conjugada	gaseoso CS ₂ , sólido Bi ₁₂ SiO ₂₀	reflexión de la luz con fase opuesta localmente
efectos ópticos no-lineales adicionales: amplificación paramétrica, mezcla de frecuencias, absorción saturable, n -sima generación de armónicos, efecto óptico de Kerr, amplificación de Raman, dispersión de Brillouin, etc.		
Interacciones en el vacío		
efecto Casimir	metales	atracción de cuerpos conductores sin carga
Propiedades generales de material mecánico y térmico		
solidez, impenetrabilidad	suelos, columnas, cuerdas, cubos	como mucho un objeto en un lugar en un momento dado
plasticidad	metales	deformación permanente bajo presión
elasticidad	sólidos	deformación reversible bajo presión
ferroelasticidad	aleaciones de Ni-Ti	tensión espontanea
viscosidad	líquidos, sólidos	deformación bajo presión debida a movimiento componente

TABLA 17 (Continuación) Propiedades seleccionadas de la materia relacionadas con el electromagnetismo.

PROPIEDAD	EJEMPLO	DEFINICIÓN
capacidad calorífica y conductividad calorífica	plata, mármol, aire	habilidad para almacenar y transportar movimientos atómicos desordenados
Cualquier otra propiedad material cotidiana	todos los materiales	

Todas las propiedades de la materia enumeradas en la lista pueden estar influidas por los campos electromagnéticos o directamente dependen de ellos. Ésto muestra el detalle:

- ▷ La naturaleza de todas las propiedades cotidianas de los materiales es el electromagnetismo.

En otras palabras, las cargas eléctricas y sus interacciones forman la parte esencial y fundamental de la estructura de los objetos. La tabla muestra tantas propiedades electromagnéticas diferentes que el movimiento de cargas en el interior de cada material debe resultar realmente complejo. La mayoría de los efectos son el objeto de la física del estado sólido,* la física de fluidos o la física de plasma.

La física del estado sólido constituye, con mucho, la parte más importante de la física, cuando lo medimos según el impacto que tiene sobre la sociedad. Casi todos sus efectos tienen aplicaciones en los productos técnicos, y proporcionan empleo a mucha gente. ¿Puede nombrar un producto o una aplicación comercial para cualquier efecto de la tabla elegido al azar?

Desafío 220 e

No obstante en el ascenso de nuestra montaña, nos fijaremos solamente en uno de los ejemplos de la lista anterior: la radiación térmica, la emisión de luz por los cuerpos calientes.

TODOS LOS CUERPOS EMITEN RADIACIÓN

El teorema de Earnshaw sobre la imposibilidad de un equilibrio estable para partículas cargadas en reposo implica que las cargas en el interior de la materia deben estar *moviéndose*. Para cualquier partícula cargada en movimiento, las ecuaciones de Maxwell para el campo electromagnético muestran que éste radia energía por la emisión de ondas electromagnéticas. En resumen, predecimos que toda materia debe radiar energía electromagnética.

Curiosamente, sabemos por experiencia que realmente éste es el caso. Los cuerpos calientes emiten luz dependiendo de su temperatura; el funcionamiento de las bombillas prueba por tanto que los metales están hechos de partículas cargadas. La *incandescencia*, como así se llama, requiere cargas. Realmente, *todo* cuerpo emite radiación, aún a temperatura ambiente. Esta radiación es conocida como *radiación térmica*; a temperatura ambiente se encuentra en el infrarrojo. Su intensidad es bastante débil en la vida

* Probablemente el mejor libro en inglés y seguramente la introducción más entretenida sobre este asunto es el de NEIL ASHCROFT & DAVID MERMIN, *Solid State Physics*, Holt Rinehart & Winston, 1976.

Ref. 195 cotidiana; viene dada por la expresión

$$I(T) = fT^4 \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} \quad \text{o} \quad I(T) = f\sigma T^4 \quad \text{con} \quad \sigma = 56,7 \text{ nW/K}^4 \text{m}^2, \quad (85)$$

donde f es un factor material, dependiente de la forma y de la temperatura, con un valor entre cero y uno, y que es llamado *emisividad*. A la constante σ se le llama *constante de radiación de Stefan–Boltzmann para el cuerpo negro* o *constante de radiación del cuerpo negro*. Un cuerpo cuya emisividad viene dada por el caso ideal de $f = 1$ recibe el nombre *cuerpo negro*, porque a temperatura ambiente tal cuerpo también tiene un coeficiente de absorción ideal y por tanto se muestra negro. (¿Puede ver por qué?) La radiación de calor que emite semejante cuerpo recibe el nombre de *radiación del cuerpo negro*. En la expresión, h es la constante de Planck; h es el cuánto de acción de la Naturaleza. La emisión de radiación térmica es por consiguiente un efecto cuántico.

Desafío 221 s

Ref. 196 Por cierto, ¿qué objeto radia más energía: un cuerpo humano o un pedazo promedio
Desafío 222 s del Sol con la misma masa? ¡Adivínelo primero!

DESAFÍOS Y CURIOSIDADES SOBRE LOS EFECTOS ELECTROMAGNÉTICOS

‘En el interior de un conductor no hay campo eléctrico.’ Con frecuencia encontramos esta afirmación. De hecho, la verdad no es tan sencilla. En realidad, un campo *estático* o una carga *estática* sobre la superficie metálica de un cuerpo no influye en los campos o las cargas de su interior. Una superficie metálica cerrada constituye por tanto una escudo contra un campo eléctrico. ¿Puede explicarlo? En realidad, para conseguir este efecto no se requiere una envoltura completa y apretada, basta con una jaula. Se habla entonces de una *jaula de Faraday*.

Desafío 223 s

El mecanismo detallado le permitirá responder a la siguiente pregunta: ¿existen jaulas de Faraday para la gravedad? ¿Por qué?

Para campos o cargas externas *en movimiento*, el asunto resulta más complejo. Los campos causados por cargas externas aceleradas – campos de radiación – se descomponen exponencialmente a través de un escudo. Los campos causados por cargas externas en movimiento a velocidad constante se reducen fuertemente, pero no desaparecen. La reducción depende del grosor y de la resistividad de la carcasa metálica utilizada. Para una chapa, la supresión del campo es muy alta; para un plástico rociado con metal no lo es necesariamente. Los protectores de plástico no protegen bien a un dispositivo si es alcanzado por un rayo.

Ref. 197

En la práctica, no hay peligro de que un avión o un coche sea alcanzado por un rayo, mientras estén contruidos de metal. (Hay una película en Internet de un coche alcanzado por un rayo, hasta ahora no hay noticias del conductor.) No obstante, si su coche fuera alcanzado por un rayo en tiempo seco, debería esperar unos minutos antes de salir de él. ¿Se imagina por qué?

Las jaulas de Faraday también funcionan al revés. Cambiando (lentamente) los campos eléctricos que están dentro de una jaula de Faraday, no se notan en el exterior. Por esta razón, las radios, los teléfonos móviles y los ordenadores están rodeados por cajas hechas de metal o de plástico rociados de metal. El metal conserva la llamada *bruma electromagnética* al mínimo.

Por tanto, existen tres razones para rodear los objetos eléctricos con una protección a tierra: proteger los objetos de campos eléctricos exteriores, proteger a las personas y a las otras máquinas de la bruma electromagnética y proteger a las personas de la tensión de la red que los alimenta si accidentalmente se transmitiera a la caja (por ejemplo, cuando el aislamiento de la instalación falla). En los experimentos de alta precisión, estas tres funciones se llevan a cabo mediante tres jaulas separadas.

Para los campos puramente magnéticos, la situación es más compleja. Es muy difícil proteger el interior de una máquina de los campos magnéticos exteriores. ¿Cómo lo haría usted? En la práctica se usan con frecuencia capas de los llamados *mu-metal*; ¿puede imaginar qué es lo que hace este material?

Desafío 224 s

* *

No solamente los campos eléctricos son peligrosos. También los campos electromagnéticos tiempo-variables pueden serlo. En 1997, con un precioso tiempo en calma, un globo de aire caliente holandés, se acercó a un potente radiotransmisor en Hilversum. Tras viajar durante unos minutos cerca de la antena, la góndola se desprendió repentinamente del globo, matando a todos los pasajeros.

Unas semanas más tarde, un equipo de investigación reconstruyó los hechos. En los modernos globos de gas las góndolas se hallan suspendidas por cuerdas de nylon de alta calidad. Así se previenen daños por rayos y, para evitar problemas con las cargas electrostáticas, todas esas cuerdas de nylon contienen finos cables de metal, los cuales forman una gran superficie equipotencial alrededor del globo. Por desgracia, en la parte que estaba de cara al radiotransmisor, estos finos cables de metal absorbieron la radioenergía del transmisor, se calentaron al rojo vivo, y fundieron los cables de nylon. Fue la primera vez que se había observado.

* *

Ref. 199 Algunos investigadores están tratando de detectar el deterioro dental con la ayuda de las corrientes, usando la observación de que los dientes sanos son malos conductores, al contrario que los dientes con caries. ¿De qué manera usaría este efecto en este caso? (Por cierto, podría ocurrir que la totalidad de las técnicas ajenas de toma de imágenes por ondas de terahertz o por tomografía de coherencia óptica podría conseguir resultados similares.)

Desafío 225 ny

* *

Ocurren cosas interesantes cuando el alto voltaje, digamos de unos 25 kV, es aplicado a dos vidrios juntos en contacto con agua pura y se intenta separarlos. Aparece un puente flotante de agua. La [Figura 171](#) muestra ejemplos. El alto voltaje – es peligroso, por lo que no debe hacer esto en casa – hace que el agua fluya de un cristal a otro por un tubo que cuelga en el aire. Para una introducción completa a este efecto electrohidrodinámico consulte la bonita página web ecfuchs.com/?page=waterbridge.

Ref. 198

* *

Ref. 200 Los huesos humanos son piezoeléctricos: producen señales eléctricas cuando son sometidos a esfuerzos. Cuando nos movemos y crecemos, las señales eléctricas son usadas por el cuerpo para reforzar los huesos en las regiones en las que fuera necesario. La piezoelec-

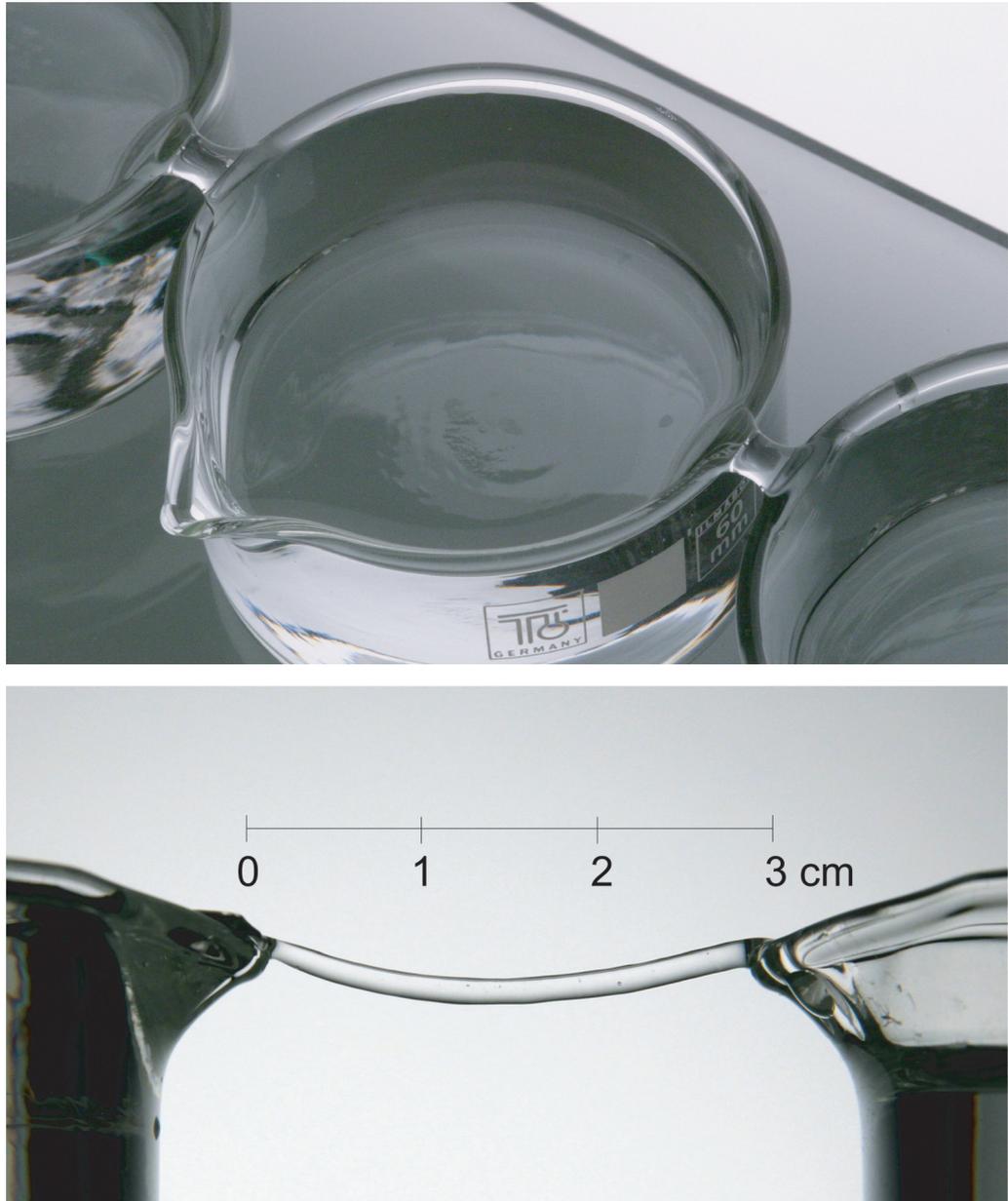


FIGURA 171 Puentes flotantes de agua sostenidos por alto voltaje entre contenedores de agua y ejemplo de la longitud que se puede conseguir de esta manera (© Elmar Fuchs).

tricidad de los huesos por tanto, controla y guía su crecimiento. Esta conexión también se utiliza para que los huesos fracturados sanen más rápidamente: mediante la aplicación de campos magnéticos *pulsados* a un hueso roto, se estimula y acelera su sanación. (Obviamente los campos magnéticos estáticos no funcionan para este propósito.) También los dientes son piezoeléctricos, y el efecto representa un determinado papel en su crecimiento.

* *

Desafío 226 e En las tiendas, se pueden comprar dispositivos piezoeléctricos – parecidos a un encendedor de gas – que se aplican a las picaduras de los mosquitos y reducen el picor y además la hinchazón. ¿Puede ocurrir ésto de verdad?

* *

Desafío 227 s Un equipo de camarógrafos en medio del Sahara estaba usando equipamiento eléctrico alimentado por baterías para realizar grabaciones de sonido. Cada vez que usaban cable con unas decenas de metros de longitud, también oían el ruido de una fuente de potencia de 50 Hz, aunque la fuente más cercana se encontrara a cientos de kilómetros de distancia. Una investigación reveló que las líneas de alto voltaje en Europa perdían una considerable potencia por irradiación; estas ondas de 50 Hz se reflejaban en la ionosfera alrededor de la Tierra y llegaban a perturbar la grabación en medio del desierto. ¿Puede estimar si esta observación implica que es peligroso vivir cerca de las líneas de alto voltaje?

* *

Quando se observan tormentas de plasma en el Sol, lo primero que hacen los astrónomos es telefonar a las compañías de electricidad. Éstos saben que hacia las 24 ó 48 horas siguientes, las partículas cargadas eyectadas por las tormentas alcanzarán la Tierra, provocando que el campo magnético de su superficie fluctúe. Dado que las redes eléctricas a menudo tienen bucles cerrados de varios miles de kilómetros, serán inducidas corrientes eléctricas adicionales, las cuales pueden provocar un sobrecalentamiento en los transformadores de la red y cortocircuitar. Por tanto, otros transformadores tienen que hacerse cargo de la potencia adicional, lo que puede llevar también a su sobrecalentamiento, etc. En varias ocasiones del pasado, millones de personas se han quedado sin potencia eléctrica por las tormentas solares. Hoy día, las compañías eléctricas evitan estos problemas desconectando las distintas secciones de una red, evitando grandes bucles, reduciendo el suministro de voltaje para evitar la saturación de los transformadores y no permitiendo la transferencia de carga desde los circuitos estropeados a otros.

* *

Ref. 201 Si se describe al campo eléctrico como una suma de componentes de distintas frecuencias, sus llamados *componentes de Fourier*, las amplitudes viene dadas por

$$\hat{\mathbf{E}}(k, t) = \frac{1}{(2\pi)^3/2} \int \mathbf{E}(x, t) e^{-ikx} d^3x \quad (86)$$

y de manera similar para los campos magnéticos. Sucede entonces que una cantidad invariante de Lorentz N , describiendo la energía por frecuencia circular ω , puede ser definida:

$$N = \frac{1}{8\pi} \int \frac{|\mathbf{E}(k, t)|^2 + |\mathbf{B}(k, t)|^2}{c|\mathbf{k}|} d^3k. \quad (87)$$

Desafío 228 s ¿Puede imaginar qué es N físicamente? (Pista: piense en la teoría cuántica.)

* *

Página 52 Como se ha dicho anteriormente, Faraday descubrió la manera de transformar el magnetismo en electricidad, sabiendo que la electricidad se podía transformar en magnetismo. El asunto es bastante sutil. La ley de Faraday no es la dual de la de Ampère, ya que eso implicaría el uso de monopolos magnéticos; tampoco sería la recíproca, ya que implicaría la corriente de desplazamiento. Él estaba buscando un enlace y entonces encontró una manera de relacionar las dos observaciones en forma novelada, que fue en lo que finalmente se convirtió.

Faraday también descubrió cómo transformar la electricidad en luz y en química. Luego también intentó transformar la gravitación en electricidad. Pero no tuvo éxito. ¿Por qué no?

Desafío 229 s

* *

Vol. I, página 390 A grandes altitudes (60 km a 1000 km) sobre la Tierra, los gases están parcial o completamente ionizados; ningún átomo es neutro. Hablamos de la *ionosfera*, como un espacio lleno de iones positivos y de electrones libres. Aún cuando ambas cargas se presentan en la misma cantidad, un satélite que se mueva por la ionosfera adquirirá una carga negativa. ¿Por qué? ¿Cómo se para la carga?

Desafío 230 s

* *

Un condensador de capacidad C está cargado con una energía U . La energía electrostática almacenada es $E = CU^2/2$. Luego, el condensador se desconecta de la fuente de potencia y se conecta a otro condensador vacío de la misma capacidad. Después de un rato, la potencia, obviamente, cae a $U/2$. No obstante, la energía almacenada es ahora $C(U/2)^2$, que resulta ser la mitad del valor original. ¿Dónde ha ido la energía?

Desafío 231 s

* *

¿Cómo puede darle a alguien un calambrazo utilizando una batería de 4,5 V y algo de cable?

Desafío 232 s

* *

De la equivalencia entre masa y energía existe un viejo rompecabezas sobre la electricidad. Es conocido a través de experimentos que el tamaño d de los electrones es probablemente más pequeño que 10^{-22} m. Esto quiere decir que el campo eléctrico a su alrededor, contiene una energía E dada por al menos

Ref. 202
Desafío 233 e

$$\begin{aligned}
 E_{\text{energy}} &= \frac{1}{2} \epsilon_0 \int E_{\text{electric field}}^2 dV = \frac{1}{2} \epsilon_0 \int_d^{\infty} \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \right)^2 4\pi r^2 dr \\
 &= \frac{q^2}{8\pi\epsilon_0} \frac{1}{d} > 1,2 \mu\text{J} .
 \end{aligned}
 \tag{88}$$

Por otro lado, la *masa* de un electrón, generalmente dada como $511 \text{ keV}/c^2$, corresponde a una energía de sólo 82 fJ, diez millones de veces *menos* que el valor calculado. Dicho de otra manera, la electrodinámica clásica tiene una considerable dificultad para describir a los electrones.

Ref. 203 En realidad, resulta imposible ofrecer una descripción consistente sobre partículas puntuales cargadas dentro de la electrodinámica clásica. Hoy día, este asunto recibe un escaso – aunque frecuentemente apasionado – interés, porque el puzzle queda resuelto de una manera diferente en las partes cuánticas de nuestra aventura.

* *

Página 248 Aunque hayan pasado los días dorados de la ciencia de los materiales, hay distintas propiedades electromagnéticas de la materia y sus aplicaciones en los dispositivos que no parecen estar exploradas todavía. Por lo menos una vez al año más o menos, se descubre un nuevo efecto que merece su inclusión en la lista de propiedades de la materia de la Tabla 17. Entre otros, algunas tecnologías de semiconductores recientes tendrán todavía su impacto en la electrónica, como la reciente introducción de la tecnología de bajo coste para detectar la luz con circuitos integrados construido en CMOS (complementary metal oxide silicon / semiconductor complementario de óxido metálico (de silicio)).

* *

La construcción de fuentes de luz de alta calidad ha sido un reto durante siglos y continuará siéndolo en el futuro. Las fuentes de luz que sean intensas, sintonizables y con gran longitud de coherencia o las fuentes que emitan longitudes de onda extremas, son fundamentales para muchas búsquedas en la investigación. Como ejemplo, entre otros muchos, el primer láser de rayos-X ha sido construido recientemente; no obstante, tiene un tamaño de varios centenares de metros y utiliza aceleradores de partículas modificados. La construcción de láseres de rayos-X compactos está todavía a muchos años vista – si resulta posible llevarlo a cabo

* *

En muchos materiales, la luz polarizada circularmente a izquierda y derecha se absorbe de manera diferente. El efecto, llamado *dicroísmo circular*, fue descubierto por Aimé Cotton en 1896. Puesto que el dicroísmo circular aparece en moléculas quirales ópticamente activas, la medida de los espectros de dicroísmo circular resulta ser un método sencillo e importante para la determinación de la estructura de las moléculas biológicas.

* *

Los efectos de la electricidad atmosférica se pueden observar también en las cataratas. Distintos estudios han demostrado que las grandes cataratas producen gotas de agua en el aire que las rodea cargadas negativamente. Incluso parece ser que respirar esas gotas es saludable, especialmente para las personas con asma.

* *

Desafío 234 r Pero quizás el mayor desafío imaginable para la electrodinámica clásica sea decodificar las corrientes en el interior del cerebro. ¿Será posible leer nuestros pensamientos con un aparato colocado fuera de nuestras cabezas?

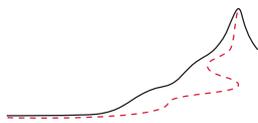
Se podría comenzar con un sencillo desafío: ¿Sería posible distinguir el pensamiento 'sí' del pensamiento 'no' midiendo los campos eléctrico y magnético que rodean la cabeza? En otras palabras, ¿es posible la lectura de un pensamiento sencillo? La respuesta es sí, ya que el logro ha sido conseguido. Más aún, utilizando imagen cerebral, ya es posible

Ref. 204 distinguir entre los conceptos simples que una persona tiene en su mente.
Página 102 Como hemos visto anteriormente, también es posible ya la lectura mental para tareas relacionadas con el movimiento, incluidos algunos vídeo-juegos.

Desafío 235 s De hecho, ahora es posible usar un casco con contactos eléctricos y utilizar contraseñas en las que simplemente piensa para proteger sistemas informáticos. La ventaja de tales contraseñas es que son difíciles de robar. (¿Es seguro este sistema?)

Probablemente el siglo XXI traerá nuevos resultados también para la lectura de la mente sobre materias cognitivas. El equipo que consiga primero esta hazaña se hará mundialmente famoso.





CAPÍTULO 6

RESUMEN Y LÍMITES DE LA ELECTRODINÁMICA CLÁSICA

Toda la electrodinámica clásica puede ser resumida en tres principios. Todo aventurero debería conocerlos, porque nos ayudará más adelante, cuando nos aproximemos a la cumbre de la montaña, el objetivo de nuestra aventura. Descubriremos que podremos alcanzar la cumbre solamente si describimos las cosas de la forma más simple que sea posible. Los tres principios de la electrodinámica clásica son:

- ▷ *Definición:* Las cargas eléctricas ejercen fuerzas sobre las otras cargas; para las cargas en reposo, las fuerzas decaen a razón del cuadrado inverso de la distancia. De manera equivalente, las cargas están rodeadas por un *campo electromagnético*.
- ▷ *Conservación:* Las cargas eléctricas se conservan.
- ▷ *Invariancia de c:* Las cargas se mueven más lentamente que la luz. De manera equivalente, todas las partículas cargadas tienen masa.

Ref. 39 A partir de estos tres principios, se puede deducir toda la electrodinámica. En particular, se pueden deducir las siguientes *afirmaciones básicas*:

- El campo electromagnético es un observable físico, como muestra, por ejemplo, la aguja de una brújula.
- Las fuentes del campo electromagnético son las cargas (en movimiento), como lo muestra el ámbar, la piedra imán o los teléfonos móviles.
- El campo electromagnético cambia el movimiento de los objetos cargados eléctricamente a través de la expresión de Lorentz como lo demuestran, por ejemplo, los motores eléctricos.
- El campo electromagnético puede existir en el espacio vacío y moverse en él como una onda, como lo muestra, por ejemplo, la luz procedente de las estrellas.
- El campo electromagnético se comporta como una cantidad continua y es descrito por las ecuaciones de evolución de Maxwell, como muestra, por ejemplo, la radio, Internet y los cepillos eléctricos para los dientes.

De forma más precisa, el movimiento del campo eléctrico \mathbf{E} y del campo magnético \mathbf{B} es descrito por la densidad Lagrangiana

$$\mathcal{L} = \frac{\epsilon_0}{2} E^2 - \frac{1}{2\mu_0} B^2 . \quad (89)$$

Como para cualquier movimiento descrito por un Lagrangiano, el movimiento del campo electromagnético es reversible, continuo, se conserva y es determinista. No obstante, hay bastante diversión a la vista; aunque la descripción es correcta para la vida cotidiana, durante el resto de nuestro ascenso, nos daremos cuenta de que la última de las afirmaciones podría estar equivocada: los campos no siempre siguen las ecuaciones de Maxwell. Un sencillo ejemplo lo demuestra.

A una temperatura de cero grados kelvin, cuando la materia no irradia térmicamente, nos encontramos con la situación paradójica de que las cargas internas de la materia no pueden ser movidas, ya que no se observa ninguna radiación emitida, pero que tampoco pueden encontrarse en reposo, por causa del teorema de Earnshaw. En resumen, la simple existencia de la materia – con sus componentes cargados – muestra que la electrodinámica clásica está equivocada.

Página 248 De hecho, el repaso de las numerosas propiedades materiales y de los efectos electromagnéticos dados en la [Tabla 17](#) llevan a la misma conclusión, incluso con más fuerza; la electrodinámica clásica puede describir muchos de los efectos de la lista, *pero no puede explicar el origen de los valores numéricos de ninguno de ellos*. Aunque varios de los efectos serán estudiados en nuestro paseo – no son esenciales para nuestra aventura – los conceptos generales para sus descripciones serán el objeto de la siguiente parte del ascenso a la montaña, la física cuántica.

En realidad, la electrodinámica clásica falla en *dos* dominios.

EL ESPACIO ES CURVO, NO PLANO

Ante todo, la electrodinámica clásica falla en las regiones con *campos extremadamente fuertes*. Cuando los campos son extremadamente fuertes, su densidad de energía *curvará* el espacio-tiempo. La electrodinámica clásica, que asume el espacio-tiempo plano, no resulta válida ante tales situaciones.

Página 28 El fallo de la electrodinámica clásica es más evidente en el caso más extremo de todos: cuando los campos son extremadamente fuertes, llevarán a la formación de agujeros negros. La existencia de agujeros negros, junto a la discrecionalidad de carga, implica valores *máximos* de campos eléctrico y magnético. Estos límites superiores fueron ya mencionados en la [Tabla 3](#), donde se encuentran valores de campos eléctricos hallados en la Naturaleza y en la [Tabla 8](#), en la que se listan posibles valores de campos magnéticos.

Página 40
Desafío 236 s ¿Puede calcular los valores de los llamados *campos de Planck*? El argumento exacto que limita los valores de los campos eléctricos y magnéticos en la Naturaleza, no es sencillo; y hay todavía muchos físicos que – erróneamente – niegan esos límites.

Vol. II, página 96
Desafío 237 ny La interacción entre la curvatura del espacio y la electrodinámica presenta muchos aspectos. Por ejemplo, la fuerza máxima de la Naturaleza limita la carga máxima que puede soportar un agujero negro. ¿Puede encontrar la relación? Otro ejemplo; parece ser que los campos magnéticos efectivamente incrementan la rigidez del espacio vacío, es decir, incrementan la dificultad para doblar el espacio vacío. No todas las interacciones entre la gravedad y la electrodinámica han sido estudiadas hasta ahora; en el futuro deberían surgir más ejemplos

Ref. 205

En resumen, la electrodinámica clásica no funciona para valores de campo extremadamente altos, donde la relatividad general juega su papel.

LOS VALORES DE CARGA SON DISCRETOS, NO CONTINUOS

La electrodinámica clásica falla también al describir correctamente la naturaleza de los *campos extremadamente débiles*. Esto sucede también en el espacio-tiempo plano y se debe a las razones mencionadas ya en muchas ocasiones: *las cargas eléctricas son discretas*. Las cargas eléctricas no varían continuamente, sino que cambian en niveles fijos. No solamente la Naturaleza muestra el valor mínimo de entropía – como vimos cuando explorábamos el calor, – y las cantidades mínimas de materia; La Naturaleza también muestra la carga mínima.

Vol. I, página 427

Vol. I, página 429

- ▷ Los valores de carga eléctricas son cuantizados.

En los metales, la cuantización de carga se pone de manifiesto en el flujo de electrones. En los electrolitos, i.e., líquidos conductores de la electricidad, la cuantización de la carga aparece en el flujo de los átomos cargados, generalmente llamados *iones*. Todas las baterías tienen electrolitos en su interior; también el agua es un electrolito, aunque es un conductor pobre. En los plasmas, como el fuego o las lámparas fluorescentes, ambos, iones y electrones se mueven y muestran una discreción en la carga. También para todos los tipos conocidos de partículas, las cargas de radiación – desde los rayos de electrones dentro de los tubos de rayos catódicos en la televisión, el canal de rayos formado en tubos especiales de vidrio de baja presión, la radiación cósmica que nos golpea constantemente, hasta la omnipresente radiactividad – están cuantizadas.

En todos los experimentos conocidos, ha sido encontrado el *mismo* valor mínimo e para el electrón. El resultado más exacto es

$$e = 0,160\,217\,656\,5(35) \text{ aC} , \quad (90)$$

Alrededor de un sexto de un attocoulomb. Todas las cargas eléctricas observadas en la Naturaleza son múltiplos de esta llamada *carga elemental*.

Resumiendo, como todos los flujos de la Naturaleza, el flujo de la electricidad también se debe al flujo de partículas discretas. En realidad, la naturaleza de las partículas cargadas difieren de una situación a otra: pueden ser electrones, iones, muones u otras varias clases de partículas. No obstante, los escalones de carga son siempre exactamente los mismos. De hecho, hasta el momento, no ha sido explicada la igualdad de la carga elemental para todas las partículas materiales. Descubriremos la razón muy al final de nuestra aventura.

Sobre todo, un cambio de carga mínimo tiene una implicación simple:

- ▷ La electrodinámica clásica está *equivocada*.

La electrodinámica clásica es solamente una buena aproximación para valores de campo de *tamaño medio*. De hecho, una carga mínima implica que no existen cargas de prueba infinitamente pequeñas. Pero tales cargas de prueba infinitamente pequeñas son necesarias para *definir* los campos eléctricos y magnéticos. Para una carga de prueba *finita*, la perturbación del campo introducida por la propia carga de prueba hace imposible una medición de campo precisa – y por tanto una definición precisa. Como consecuencia, los

Página 27

valores de campos eléctricos y magnéticos medidos con cargas de prueba finitas siempre son algo confusos. Esta confusión es más aparente para campos con valores bajos. Por ejemplo, para intensidades bajas de luz, se detectan experimentalmente los *fotones*, partículas discretas de luz. Todas las intensidades bajas de luz son promedios temporales de un número bajo de fotones; no son campos continuos.

Vol. IV, página ??

El límite inferior de la magnitud de carga también implica que no hay una forma completamente correcta de definir una corriente eléctrica instantánea en electrodinámica clásica. En realidad, la posición y la cantidad de movimiento de una carga es siempre de alguna manera confusa, como tendremos ocasión de ver.

En resumen,

- ▷ Las ecuaciones de evolución de Maxwell son solamente *aproximadas*.

La electrodinámica clásica no funciona para los valores de campo extremadamente *bajos*, cuando los efectos cuánticos entran en juego, y no funcionan tampoco para valores de campo extremadamente *altos*, donde la gravedad juega su papel. Exploraremos estos dos casos extremos en las partes restantes de nuestra aventura, las que tratan sobre la teoría cuántica y sobre la unificación. Tan sólo algunos efectos de la discreción de cargas pueden ser tratados en la física clásica; a continuación se presentan algunos ejemplos instructivos.

¿CON QUÉ RAPIDEZ SE MUEVEN LAS CARGAS?

Desafío 238 s

En un vacío, como el del interior de un tubo de televisión en color o en el interior de un microscopio electrónico, las partículas cargadas aceleradas por un voltaje de 30 kV se mueven a un tercio de la velocidad de la luz. Para voltajes más altos, la velocidad es aún mayor. En los modernos aceleradores de partículas las cargas se mueven tan rápidamente que sus velocidades son, a todos los efectos prácticos, indistinguibles de la de la luz.

En el interior de los metales, las señales eléctricas se mueven a velocidades del orden de la velocidad de la luz. Los valores exactos dependen de la capacidad y la impedancia del cable y está en un rango de $0,3c$ a $0,5c$. Esta alta velocidad se debe a la capacidad que tienen los metales para tomar fácilmente las cargas que les llegan mientras se desprenden de otras. La aptitud para una reacción rápida es consecuencia de la alta movilidad de las cargas en el interior de los metales, que a su vez se debe a las propiedades de los enlaces metálicos y a los valores pequeños para la masa y el tamaño de las cargas involucradas, los electrones.

La alta señal en los metales parece que contradice otra resolución. La *velocidad de deriva* v de los electrones en un cable metálico, i.e., la velocidad media de sus cargas, obviamente obedece a la ecuación

$$v = \frac{I}{Ane}, \quad (91)$$

donde I es la corriente, A la sección transversal del cable, e la carga de un electrón aislado y n la densidad numérica de electrones. La densidad de electrones del cobre es $8,5 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$. Utilizando una corriente común de 0,5 A y una sección típica de un milímetro cuadrado, obtenemos una velocidad de deriva de $0,37 \mu\text{m/s}$. En otras palabras, los electrones se mueven mil veces más lentos que el ketchup dentro de su botella. Aún

peor, si la bombilla de una habitación utilizara corriente continua en lugar de corriente alterna, ¡los electrones podrían tardar varios días en llegar desde el interruptor hasta la bombilla! No obstante, la bombilla se encendería o apagaría de manera casi inmediata al activar el interruptor. Similarmente, los electrones de un correo electrónico transportado por corriente continua podrían llegar mucho después que si se enviara una carta de papel al mismo tiempo; no obstante, el email llegará más rápidamente. ¿Por qué?

Las tuberías de agua muestran un efecto similar. Una larga manguera proporciona agua casi en el mismo instante en el que se abre el grifo, aún si el agua tardara bastante desde el grifo al final de la manguera. La velocidad a la que reacciona el agua, la velocidad de señal, viene dada por la velocidad de las ondas de presión, o las ondas de sonido en el agua. En las mangueras, la velocidad de señal es mucho más alta que la velocidad del flujo del agua, mucho mayor que la velocidad de las moléculas.

La vida cotidiana también nos proporciona efectos similares. Imagine una larga cola de coches (que representan electrones) esperando enfrente de un semáforo en rojo. En un mundo ideal, todos los conductores mirarían al semáforo. Tan pronto como la luz cambiara a verde, todos comenzarían a conducir. Aún en el caso de que la velocidad de conducción fuera de solo 10 m/s, la velocidad del flujo de tráfico sería al arranque de la luz. Es esta última señal la que es la velocidad de señal. La velocidad de señal es mucho mayor que la velocidad de los coches.

En resumen, en el interior de un metal, los electrones se mueven despacio; la velocidad de las señales eléctricas no viene dada por la velocidad de los electrones, sino por la velocidad de las ondas de densidad de electrones, las cuales, a su vez, se deben al campo electromagnético. De hecho, una casa común tiene sólo el suministro de corriente alterna. En este típico caso, los electrones dentro de los cables de cobre solamente vibran una distancia mínima hacia atrás y hacia adelante, como usted mismo puede comprobar.

Desafío 239 e

En el interior de los líquidos, las cargas se mueven a una velocidad diferente que lo de los metales, y su carga en relación a la masa es también diferente. Por experiencia propia todos sabemos esto. Nuestros *nervios* funcionan utilizando señales eléctricas y tomándoles pocos milisegundos responder a un estímulo, aún cuando se produzcan (sólo) a metros distancia. Una velocidad similar se observa en el interior de las baterías. En todos estos sistemas, la carga móvil, es transportada por iones. Los *iones* son átomos cargados. Los iones, como átomos, son entidades grandes, compuestos y pesados, en comparación con los diminutos electrones de la luz. Como resultado, los iones se mueven mucho más lentamente que los electrones. Nuestro tiempo limitado de reacción es consecuencia del movimiento de los iones.

En otros sistemas materiales, las cargas se mueven tanto como electrones o como iones. Ejemplos de ello pueden ser las lámparas de neón, el fuego, los plasmas y el Sol. Lo que no conduce a la pregunta:

¿QUÉ MOVIMIENTO OCURRE EN EL INTERIOR DE LOS ÁTOMOS?

En el interior de los átomos, los electrones se comportan de manera extraña. Tendemos a imaginar que los electrones orbitan el núcleo (como veremos posteriormente) a una velocidad bastante alta, ya que el radio orbital es muy pequeño. No obstante, resulta que en la mayoría de los átomos muchos electrones no orbitan el núcleo en absoluto: muchos electrones no tienen momento angular orbital alrededor del núcleo. ¿Cómo puede ser

esto?

Aún peor, algunos electrones realmente tienen momento orbital. Pero si estos electrones estuvieran orbitando el núcleo atómico como planetas orbitando el Sol, se moverían con una aceleración constante. Por tanto emitirían radiación electromagnética hasta que se precipitaran dentro del núcleo. Pero este no es el caso: ¡los átomos son estables! ¿Cómo puede ser esto?

Y, ¿por qué todos los átomos son del mismo tamaño? El tamaño del átomo debe depender del momento angular de los electrones en su interior. Pero, ¿qué determina el momento orbital de los electrones alrededor del núcleo?

Pronto descubriremos que en la Naturaleza hay un valor mínimo para el momento angular. Este valor es el que fija el tamaño de los átomos. Y descubriremos que los movimientos de los electrones, al contrario que los objetos cotidianos, *no* vienen descritos por trayectorias en el espacio, lo que permite que los átomos sean estables. La extraña historia de los átomos y su estructura se contará en la parte cuántica de nuestra aventura, en el volumen siguiente a éste.

Vol. IV, página ??

DESAFÍOS Y CURIOSIDADES SOBRE LAS CARGAS DISCRETAS

Desafío 240 s

¿Cómo mostraría experimentalmente que la carga eléctrica proviene de trozos mínimos?

* *

Desafío 241 ny

La discreción de la carga implica que podemos estimar el tamaño de los átomos por observación de la sedimentación galvánica de los metales. ¿Cómo?

* *

Desafío 242 s

La electrodinámica clásica implica que las cargas *puntuales* no pueden existir. ¿Puede explicar esta alegación? Entonces, ¿puede responder si el razonamiento es aplicable también a la Naturaleza?

* *

Vol. V, página ??

Ref. 206

La radiación cósmica consiste en partículas cargadas golpeando la Tierra. (Más adelante discutiremos esto con más detalle.) Los astrofísicos explican que estas partículas están aceleradas por los campos magnéticos alrededor de la Galaxia. No obstante, la expresión de la aceleración de Lorentz muestra que los campos magnéticos solamente pueden cambiar la dirección de la velocidad de una carga, no su magnitud. Sin embargo, ¿cómo puede conseguir aceleración la Naturaleza?

Desafío 243 ny

* *

Desafío 244 s

¿Cuál sería el potencial de la Tierra en voltios si se pudieran alejar bastante todos los electrones de una gota de agua?

* *

Cuando se aplica un voltaje a un reostato, ¿cuánto tiempo se tarda hasta conseguir el valor final de la corriente, dado por la 'ley' de Ohm? El primero que dió respuesta a esta

pregunta fue Paul Drude* en los años alrededor de 1900. Razonó que cuando se conecta la corriente, la velocidad v de un electrón se incrementa como $v = (eE/m)t$, siendo E el campo eléctrico, e la carga y m la masa del electrón. El modelo de Drude asume que el incremento de la velocidad del electrón se anula cuando el electrón golpea un átomo, pierde su energía y comienza a acelerarse otra vez. Drude dedujo que el tiempo medio τ hasta la colisión está relacionado con la resistencia específica mediante la ecuación

$$\rho = \frac{E}{j} = \frac{E}{env} = \frac{2m}{\tau e^2 n}, \quad (92)$$

siendo n la densidad numérica del electrón. El lado derecho de la ecuación ya no depende de E ; es una constante. Por tanto Drude había explicado la 'ley' de Ohm $U = RI$ (o $E = j\rho$) a partir de las propiedades de los materiales, asumiendo que la resistencia se debe a los electrones en movimiento que continuamente chocan y se aceleran de nuevo. Tomando las cifras del cobre ($n = 8,5 \cdot 10^{28} / \text{m}^{-3}$ y $\rho = 0,16 \cdot 10^{-7} \Omega \text{m}$), obtenemos un tiempo $\tau = 51$ ps. Este tiempo resulta tan corto que el proceso de conexión puede resultar generalmente despreciable.

* *

¿Tiene sentido escribir las ecuaciones de Maxwell para *el vacío*? Ambos campos, el eléctrico y el magnético, requieren cargas para que puedan ser medidos. Pero en el vacío no hay cargas en absoluto. Y los campos tendrían que ser definidos mediante la utilización de cargas de prueba infinitesimalmente pequeñas. Pero, como ya hemos mencionado, las cargas infinitesimalmente pequeñas no existen. En realidad, sólo la teoría cuántica resolverá este asunto. ¿Se siente capaz de imaginar cómo?

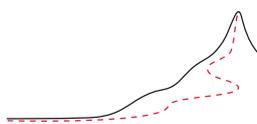
Desafío 245 d

* *

Hemos visto que para los casos de campos con valores medios, la electrodinámica clásica es una buena aproximación, a pesar de la discreción de cargas. Un sistema útil hace uso de las cargas discretas, pero nunca puede ser descrito en muchos de sus aspectos por la electrodinámica clásica. Ésto merece una discusión separada: nuestro cerebro.



* Paul Karl Ludwig Drude (b. 1863 Braunschweig, d. 1906 Berlin), físico, predijo con su modelo de metales de electrones libres – que la relación entre la conductividad térmica y la conductividad eléctrica a una determinada temperatura, debería ser la misma para todos los metales; esto es aproximadamente correcto. Drude también concibió la elipsometría e introdujo c como símbolo para la velocidad de la luz.



CAPÍTULO 7

LA HISTORIA DEL CEREBRO

“Alles was überhaupt gedacht werden kann,
kann klar gedacht werden.**”
Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 4.116

En nuestro objetivo de incrementar la precisión en la descripción de todo movimiento a nuestro alrededor, es hora de hacer una pausa, sentarnos y mirar atrás. Hasta ahora en nuestro paseo, el cual nos ha permitido investigar la mecánica, la relatividad general y la electrodinámica, hemos utilizado algunos conceptos sin haberlos definido. Ejemplos de ello pueden ser, la ‘información’, la ‘memoria’, la ‘medida’, el ‘conjunto’, el ‘número’, la ‘infinitud’, la ‘existencia’, el ‘universo’ y la ‘explicación’. Cada uno de ellos es un término corriente e importante. En este intermedio, echaremos un vistazo a estos conceptos y trataremos de dar algunas definiciones sencillas pero suficientemente precisas, presentándolas en la manera más estimulante y entretenida que fuera posible. Por ejemplo, ¿podría explicar a sus padres lo que es un concepto?

Desafío 246 e

Necesitaremos estudiar las definiciones de los conceptos para alcanzar la cima de la Montaña del Movimiento, es decir, la descripción completa del movimiento. En el pasado, muchos se han perdido por el camino por la falta de claridad en los conceptos. Con el fin de evitar esas dificultades, la física representará un papel especial como guía. Todas las ciencias comparten un resultado: *cualquier tipo de cambio observado en la Naturaleza representa un forma de movimiento*. En este sentido, pero *solamente* en este sentido, la física, poniendo el foco en el movimiento mismo, constituye la base para todas las ciencias restantes. En otras palabras, la búsqueda de la afamada ‘teoría del todo’ es una expresión arrogante y engañosa para la búsqueda de una *teoría final del movimiento*. Aunque el conocimiento del movimiento es básico, su descripción exacta no implica una descripción de ‘todo’: basta con que trate de resolver un problema de espejismo usando la ecuación de Schrödinger para darse cuenta de la diferencia.

Dada la importancia básica del movimiento, se hace necesario en física que todas las declaraciones sobre las observaciones se hicieran de la manera más *precisa* posible. Es por esta razón, por la que muchos pensadores han investigado las observaciones físicas con un cuidado tan especial, haciendo uso de todos los criterios imaginables. *La física*

** ‘Todo lo que se puede pensar en lo más mínimo, se puede pensar con claridad.’ Traducción al español de Jesús Padilla Gálvez. Ésta y otras citas de Ludwig Wittgenstein provienen del igualmente corto y famoso *Tractatus logico-philosophicus*, escrito en 1918, y publicado por primera vez en 1921; ahora ha sido traducido a otros muchos idiomas. N. del T.: En este Vol. 3, al igual que hicimos en el Vol. 1, usaremos la traducción del Prof. Padilla Gálvez.



FIGURA 172 Ludwig Wittgenstein (1889–1951).

es un parloteo preciso entre la gente que muestran curiosidad sobre el movimiento de las cosas. ¿Qué significa precisión? El significado aparece una vez que nos planteemos: ¿qué capacidades requiere ese parloteo? Quizá querría hacer su propia lista antes de continuar leyendo.

Desafío 247 e

Las capacidades necesarias para poder hablar resultan ser, aún hoy día, una tema de investigación. La forma en la que la especie humana adquiere la capacidad de charlar sobre el movimiento es estudiada por los biólogos evolutivos. Los psicólogos infantiles estudian cómo se desarrollaría esta habilidad en un solo ser humano. Los fisiólogos, los neurólogos y los informáticos están preocupados por la forma en la que el cerebro y los sentidos hacen ésto posible; los lingüistas se centran en las propiedades del idioma que usamos, mientras que los lógicos, los matemáticos y los filósofos de la ciencia estudian las propiedades generales de las correctas declaraciones sobre la Naturaleza. Todos estos campos investigan herramientas que son fundamentales para el desarrollo de la física, el conocimiento del movimiento y la especificación de los conceptos indefinidos enumerados anteriormente. Los campos incorporan la exploración siguiente.

EVOLUCIÓN

“Una gallina es sólo la forma en la que un huevo puede hacer otro huevo.”
Samuel Butler, *Life and Habit*.

Ref. 207
Vol. II, página 231

La evolución de la especie humana es el resultado de una larga historia que ha sido contada en muchos libros excelentes. Cuando exploramos la relatividad general presentamos una tabla que resumía la historia del Universo en la que se incluía la evolución. La casi increíble cadena de eventos que nos ha llevado a nuestra propia existencia incluye la formación de los núcleos, los átomos, las galaxias, las estrellas, los planetas, la Luna, la atmósfera, los océanos, las primeras células, los animales acuáticos, los animales terrestres, los mamíferos, los homínidos, los antepasados, la familia y finalmente, uno mismo.

Ref. 208

La manera en la que los átomos de los que estamos hechos se movieron durante esta secuencia, siendo esparcidos por del espacio, siendo depositados en la Tierra, llevando a cabo su organización hasta formar materia orgánica y posteriormente personas, es uno de los ejemplos más impresionantes de movimiento. El recuerdo y la meditación sobre esta secuencia cósmica de movimiento será en cualquier momento una experiencia enriquecedora.

Desafío 248 e

En particular, sin la evolución biológica, no hubiéramos sido capaces en absoluto de hablar sobre el movimiento; sólo los cuerpos que se mueven pueden estudiar el movi-

miento de los cuerpos. Sin evolución, no tendríamos músculos, ni sentidos, ni nervios y tampoco cerebro. Y sin cerebro, no podríamos pensar o hablar. La evolución fue también la fuente de la niñez y de la curiosidad. De hecho, tanto en este capítulo como en los siguientes, descubriremos que la mayoría de los conceptos de la física clásica ya son conocidos por todos los niños pequeños a través de las experiencias adquiridas mientras crecían.

NIÑOS, LEYES Y FÍSICA

“ Los físicos también tienen una realidad compartida. Aparte de eso, no hay realmente mucha diferencia entre ser físico y ser esquizofrénico. ”
Richard Bandler

Ref. 209

Ref. 210

Durante la niñez, todos somos físicos. Cuando rememoramos nuestros recuerdos tan lejanos como pudiéramos ser capaces de hacerlo, alcanzaríamos una cierta etapa, situada antes del nacimiento, que constituye el punto de partida de la experiencia humana. En ese momento mágico, sentimos de alguna manera que aparte de nosotros mismos, hay algo más. La primera observación que hacemos sobre el mundo, mientras permanecemos en el útero, es por tanto el reconocimiento de que podemos distinguir dos partes: nosotros mismos y el resto del mundo. Esta diferenciación es un ejemplo – quizás el primero – de un gran número de ‘leyes’ de la Naturaleza con las que nos toparemos a lo largo de nuestra vida. Ser un físico comenzó en ese entonces. Y todavía continúa. Mediante el descubrimiento de muchas más diferencias formaremos la estructura del caos de la experiencia. Rápidamente nos daremos cuenta de que el mundo está formado por *partes relacionadas*, tales como mamá, papá, leche, tierra, juguetes, etc. Dividiremos las partes en objetos e imágenes.

Vol. I, página 29

Más tarde, aprenderemos a hablar, nos divertiremos utilizando palabras más difíciles y llamaremos a lo que nos rodea *entorno*. Dependiendo del contexto, nos referiremos al todo formado por uno mismo y el entorno juntos, llamándolo *mundo* (físico), *universo* (físico), *naturaleza*, o *cosmos*. Estos conceptos no se distinguirán entre sí en nuestro paseo;* Todos han sido tomados para designar la suma de todas las partes y sus relaciones. Simplemente han sido tomados para designar el todo.

Desafío 249 s

Con el descubrimiento de la primera distinción en la Naturaleza dará comienzo una cadena de descubrimientos similares que continuará a lo largo de nuestra vida. Extraeremos las numerosas diferencias que son posibles en el entorno, en nuestro cuerpo y en los diferentes tipos de interacciones entre ellos. La capacidad para poder distinguir, es la habilidad fundamental que nos permite cambiar nuestra percepción del mundo como un *caos*, es decir, como un gran embrollo, y verlo como un sistema, es decir, un conjunto estructurado, en el cual las partes están relacionadas de una manera específica. (Si le gusta la precisión, puede ponderar si las dos elecciones de ‘caos’ y ‘sistema’ son las dos

* Las diferencias de sus usos se pueden deducir a través de sus orígenes lingüísticos. ‘Mundo’ se deriva del alemán antiguo ‘wer’ – persona – y ‘ald’ – viejo – y originalmente quiere decir ‘tiempo de vida’. ‘Universo’ viene del latín, y designa lo único – ‘unum’ – que se ve girando – ‘vertere’, y se refiere al cielo estrellado que gira en torno a la estrella polar. ‘Naturaleza’ viene también del latín, y quiere decir ‘lo que ha nacido’. ‘Cosmos’ es del griego κόσμος y originalmente significa ‘orden’.

únicas posibles.)

Concretamente, la observación de las diferencias entre uno mismo y el entorno van de la mano con el reconocimiento de que no solamente no somos independientes del entorno, sino que estamos firmemente atados a él de varias maneras ineludibles: nos caemos, nos hacemos daño, sentimos calor, frío, etc. A tales sensaciones se las conoce con el nombre de *interacciones*. Las interacciones expresan la observación de que aunque las partes de la Naturaleza pueden distinguirse, no pueden aislarse. Dicho de otra forma,

Página 348

- ▷ Las interacciones describen la diferencia entre el todo y la suma de sus partes.

Desafío 250 e Ninguna parte puede ser definida sin relacionarla con su entorno. (¿Está de acuerdo?)

Las interacciones no son arbitrarias; fijémonos solamente como ejemplos en tocar, oler o ver. Difieren en su alcance, su fuerza y sus consecuencias. Los llamamos aspectos característicos de las interacciones *patrones de la Naturaleza*, o *propiedades de la Naturaleza*, o *reglas de la Naturaleza* o, de manera equivalente, con su histórico pero desafortunado nombre, *'leyes' de la Naturaleza*. El término 'ley' acentúa su validez general; por desgracia, también implica proyecto, intención, coerción y castigo por su infracción. No obstante, ningún proyecto, intención o coerción está implícito en las propiedades de la Naturaleza, ni tampoco es posible su infracción. El ambiguo término de 'ley de la naturaleza' fue popularizado por René Descartes (b. 1596 La Haye en Touraine, d. 1650 Stockholm) y ha sido adoptado entusiásticamente porque dota de más peso a las leyes del Estado –las cuales distaban mucho de ser perfectas en esa época– y a las de otras organizaciones – que rara vez lo son. La expresión es un antropomorfismo acuñado por una visión autoritaria del mundo, sugiriendo que la Naturaleza está 'gobernada'. Por lo tanto utilizaremos el término lo menos posible en nuestro paseo y estará, si lo hacemos, en un 'irónico' entrecomillado. No se puede forzar a la Naturaleza de ninguna manera. Las 'leyes' de la Naturaleza no son obligaciones para la Naturaleza o sus partes, son obligaciones solamente para los físicos y el resto de la gente: los patrones de la Naturaleza nos obligan a usar ciertas descripciones y a descartar las otras. Siempre que se diga que las 'leyes gobiernan la Naturaleza' se están diciendo tonterías (o se está pidiendo dinero); La expresión correcta es *las reglas que describen la Naturaleza*.

Durante la niñez aprendemos la distinción entre las interacciones y el entorno, o *percepciones*: algunas son compartidas con otros y las llamamos *observaciones*, otras son únicamente personales y las llamamos *sensaciones*.^{*} Un criterio todavía más estricto de 'compartición' se utiliza al dividir el mundo entre 'realidad' e 'imaginación' (o 'sueños'). Nuestro paseo nos enseñará – muy al final – que esta distinción no es fundamental, siempre que nos mantengamos fieles a la búsqueda de una precisión cada vez mayor: encontraremos, sorprendentemente, que la descripción del movimiento que estamos buscando no depende de si el mundo es 'real' o 'imaginario', 'privado' o 'público'. Los principios fundamentales del movimiento tanto en la realidad como en los sueños son los mismos. Sin embargo, estos mismos principios nos permiten distinguir los dos.

Vol. VI, página ??

Ref. 211

^{*} Un niño que es incapaz de hacer esta distinción entre las percepciones – y que por tanto es incapaz de mentir – muy probablemente desarrolla o ya padece de *autismo*, como han demostrado recientes investigaciones psicológicas.

Ref. 212 Los humanos disfrutan de su capacidad para distinguir las partes, las cuales en otros contextos también las llaman *detalles*, *aspectos* o *entidades*, y disfrutan de su capacidad para asociarlas o para observar las *relaciones* entre ellas. Los humanos llaman a esta actividad *clasificación*. Colores, formas, objetos, madre, lugares, gente e ideas son algunas de las entidades que los humanos descubren en primer lugar.

Nuestra anatomía nos proporciona una herramienta útil para realizar un uso eficiente de esos descubrimientos: la *memoria*. Ella almacena una gran cantidad de datos que posteriormente son llamados *experiencia*. La memoria es una herramienta utilizada por los niños pequeños y los mayores para organizar su mundo y lograr cierta seguridad en el caos de su vida.

Las clasificaciones memorizadas se llaman *conceptos*. Jean Piaget fue el primer investigador en describir la influencia del entorno sobre los conceptos que cualquier niño forma. Paso a paso, los niños aprenden que los objetos están localizados en el espacio, que el espacio tiene tres dimensiones, que los objetos caen, que las colisiones producen ruido, etc. En particular, Piaget demostró que el espacio y el tiempo no son conceptos a priori, sino el resultado de las interacciones de cada niño con su entorno.*

Ref. 214 Por la época en la que el niño va a la escuela, comienza a comprender la idea de *permanencia de las substancias*, y el concepto de *contrario*. Solamente en esa etapa su experiencia subjetiva se convierte en *objetiva*, con comprensión de lo abstracto. Será más tarde, cuando la descripción del mundo del niño dejará de ser animista: antes de esa etapa, el

* Una visión general de la psicología del desarrollo es dada por J. H. FLAVELL, *The Developmental Psychology of Jean Piaget*, 1963. Este libro resume las observaciones de Jean Piaget (b. 1896 Neuchâtel, d. 1980 Geneva), figura fundamental en este campo. Fue uno de los primeros investigadores en mirar el desarrollo de un niño de la misma forma que un físico observa la Naturaleza: observación cuidadosa, anotaciones, realización de experimentos, extraer hipótesis, prueba de las mismas y deducción de teorías. Sus sorprendentes y numerosas publicaciones, basadas en su extensas observaciones, cubren casi todas las etapas del desarrollo de un niño. Su contribución fundamental consiste en la detallada descripción de las etapas del desarrollo de las capacidades cognitivas de los humanos. Demostró que todas las capacidades cognitivas de los niños, la formación básica de los conceptos sus formas de pensar, su capacidad para comunicarse, etc., son el resultado de la continua interacción entre el niño y el entorno.

Concretamente, Piaget describió la forma en la que los niños aprenden en primer lugar que ellos son diferentes del entorno externo, y cómo después adquieren conocimientos sobre las propiedades físicas del mundo. De sus muchos libros relacionados con conceptos físicos, dos especialmente relacionados con los asuntos de este paseo son J. PIAGET, *Les notions de mouvement et de vitesse chez l'enfant*, Presses Universitaires de France, 1972 y *Le développement de la notion de temps chez l'enfant*, Presses Universitaires de France, 1981, habiendo nacido este último libro por una sugerencia de Albert Einstein. Estos textos deberían formar parte de las lecturas de todo físico y filósofo de la ciencia interesado en estas cuestiones.

Piaget también describe cómo en los niños la inteligencia matemática y la verbal derivan de la sensoriomotricidad, inteligencia práctica, que se deriva a sí mismo de los hábitos y las asociaciones adquiridas para construir nuevos conceptos. La inteligencia práctica requiere el sistema de reflejos proporcionado por la anatomía y estructura morfológica de nuestro organismo. Por tanto sus trabajos muestran en detalle que nuestra facultad para la descripción matemática del mundo se basa, aunque indirectamente, en la interacción física de nuestro organismo con el mundo.

Ref. 213 Algunas de sus opiniones sobre la importancia del lenguaje en el desarrollo están siendo ahora revisadas, principalmente por el del redescubrimiento del trabajo de Lev Vigotsky, quien argumenta que todas las capacidades mentales superiores, la emociones, la memoria colectiva, el pensamiento racional, la atención voluntaria y el conocimiento de uno mismo, no son innatos, sino aprendidos. Este aprendizaje tiene lugar a través del lenguaje y la cultura, y en particular a través del proceso de comunicarse los unos con los otros.

En www.piaget.org puede encontrar el sitio web mantenido por la Jean Piaget Society.

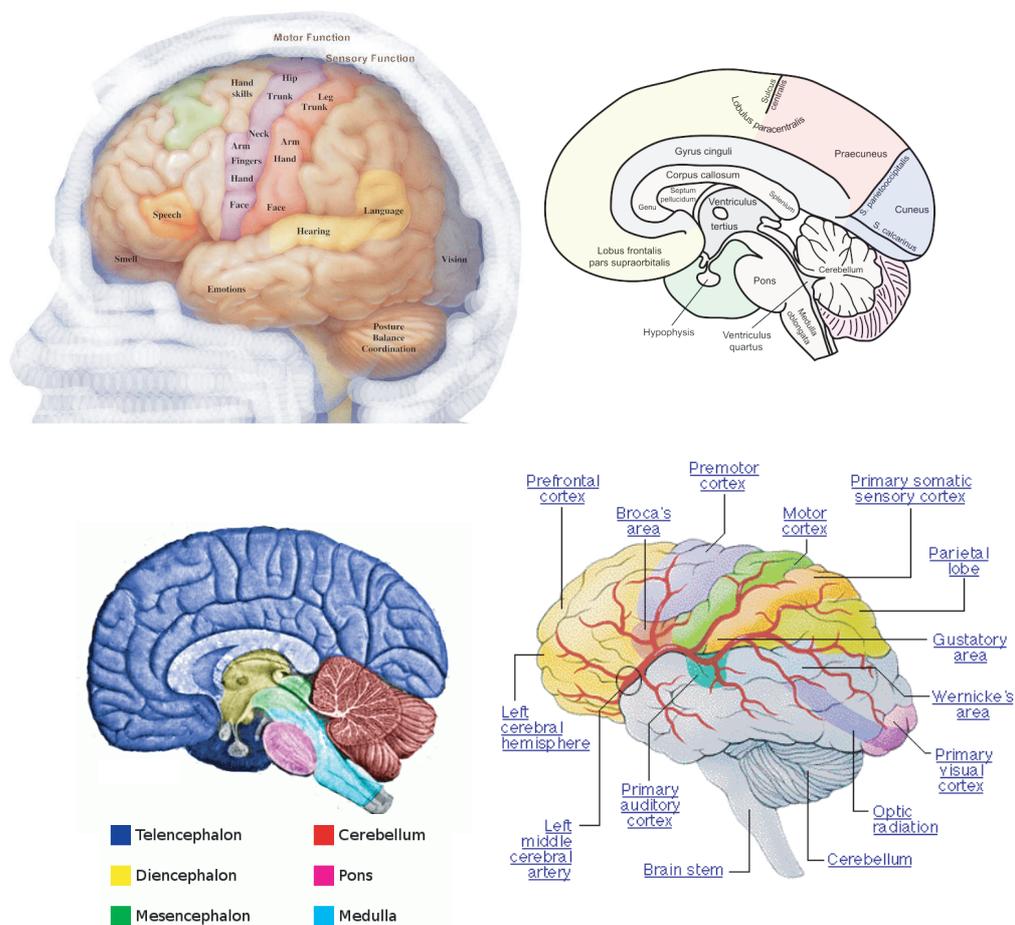


FIGURA 173 Secciones y vista lateral del cerebro humano, todo en colores falsos (imágenes de WikiCommons).

Sol, un arroyo o una nube están *vivos*. En resumen, solamente después de la pubertad un humano está preparado para la física, la ciencia del movimiento.

Aunque todo el mundo en su juventud ha sido un físico, la mayoría de la gente se queda en la física *Galileana*, donde la materia resulta aproximadamente ser continua y el espacio es plano. En la presente aventura iremos mucho más allá, mediante el uso de todas las posibilidades de un juguete que nos proporciona la Naturaleza: el cerebro.

“La experiencia es el nombre que cada uno da a sus errores.”
Oscar Wilde, *El abanico de Lady Windermere*.

ELECTRÓNICA DE POLÍMEROS

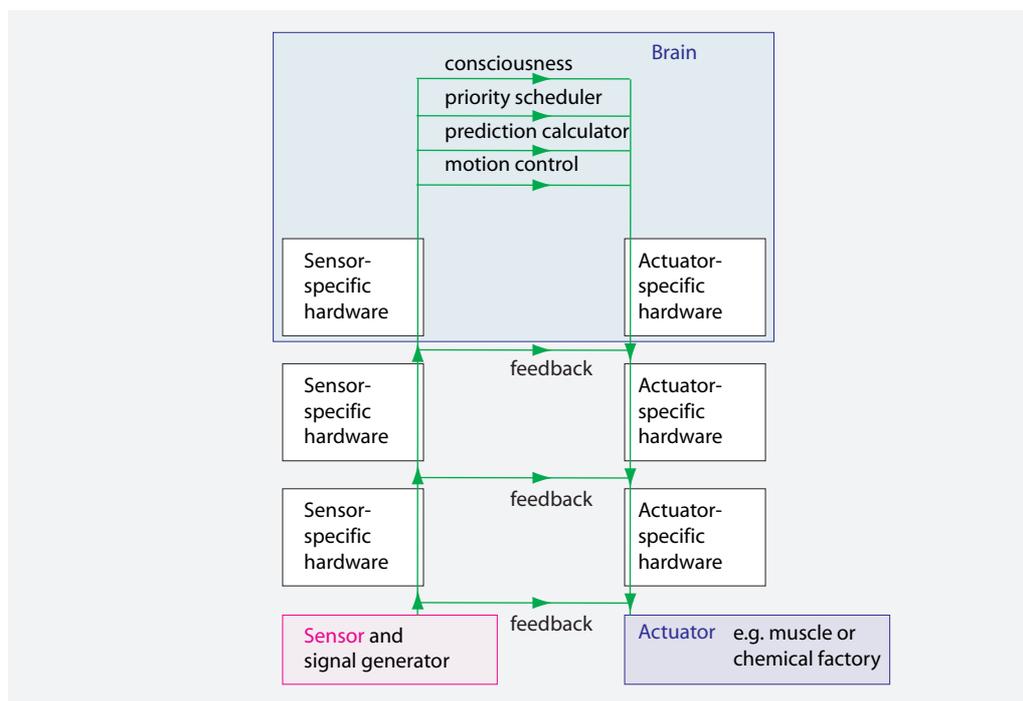


FIGURA 174 Estructura general del sistema nervioso, con algunos de los típicos bucles de retroalimentación que contiene y ejemplo de su 'hardware' específico sensorial.

TABLA 18 Algunos aspectos del cerebro humano.

ASPECTO	DETALLES	EQUIVALENTE EN UN ORDENADOR
Hardware		
Memoria a plazo ultra-corto	5 a 9 conceptos	caché
Hipocampo	detector de novedades, memoria espacial, aprendizaje	RAM y Memoria Flash
Amígdala	emociones, aprendizaje	planificador de prioridades del sistema operativo
Cuerpo estriado ventral, dopamina y proveedor de opioides	sistema de recompensa	planificador de prioridades del sistema operativo
Núcleo Supraquiasmático	control día-noche	controlador del sueño
Neuronas en el cerebro humano	$86(8) \cdot 10^9$	almacenamiento y electrónica de acceso
Neuronas en el cortex	mujeres $c. 19(2) \cdot 10^9$, hombre $22(2) \cdot 10^9$	disco duro y procesador

TABLA 18 (Continuación) Algunos aspectos del cerebro humano.

ASPECTO	DETALLES	EQUIVALENTE EN UN ORDENADOR
Células gliales del cerebro	aproximadamente tantas como neuronas	fuentes de potencia, estructura
Decadencia del número de neuronas	mujeres: $e^{3,05-0,00145 \cdot \text{edad}/a} \cdot 10^9$, hombres: $e^{3,2-0,00145 \cdot \text{edad}/a} \cdot 10^9$	arañazos del disco duro
Pulsos intercambiados entre ambas mitades (cerebro)	$4 \cdot 10^9/s$	velocidad interna del bus
Sinapsis por neurona	10^4	
Conexiones por sinapsis total	$c. 2 \cdot 10^{14}$	celdas de memoria
Vías de entrada desde el ojo	$c. 2 \cdot 10^6$	cable de la cámara
Vías de entrada desde el oído	$c. 2 \cdot 3000$	línea del micrófono, línea del sensor de inclinación
Vías de entrada por la piel, boca y nariz	$c. 0,5 \cdot 10^6$	interfaces de sensores
Capacidad de señal de entrada (total, 300 pulsos/s por vía)	$c. 100 \text{ MB/s}$	ancho de banda de entrada
Vías de salida (músculos, órganos)	$c. 1,5 \cdot 10^6$	interfaz del actuador y del motor
capacidad de señal de salida (total, 300 pulsos/s por vía)	$c. 50 \text{ MB/s}$	ancho de banda de salida
Estimación poco precisa – probablemente demasiado baja – de la capacidad de proceso	10 PFlop	varias docenas de superordenadores
Masa típica (cerebro de Einstein)	1,230 kg; varía entre 0.7 y 2,0 kg	0.001 a 5000 kg
Consumo de energía (promedio)	1600 a 2200 kJ/d o 18 a 25 W (con 750 ml/min aporte de sangre)	1 W a 20 kW
Tiempo de vida	130 años	2 años o más
Tamaño	0,14 m 0,17 m 0,09 m	desde pocos cm^3 hasta 1 m^3
Software y proceso		
Aprendizaje	modificación de la fuerza de las sinapsis a través de la potenciación a largo plazo	activar, clasificar, almacenar
Sueño profundo y almacenamiento de lo aprendido	escritura estructurada desde el hipocampo al cortex	limpieza y back-up al disco duro
Sueño REM (rapid eye movement) o sueño intenso	proceso sin conexión (offline)	compresión de datos en procesos por lotes (batch)



FIGURA 175 Un electroencefalograma moderno, tomado en una serie de posiciones de la cabeza. Los voltajes medidos están alrededor de 0,1 mV (© Wikimedia).

El cerebro es un dispositivo eléctrico. Esto fue definitivamente demostrado en 1924, cuando el neurólogo Hans Berger (b. 1873 Neuses, d. 1941 Jena) registró y puso nombre al primer *electroencefalograma*. La [Figura 175](#) muestra un electroencefalograma moderno.* Por los detalles, el cerebro es un dispositivo electrónico de polímeros, ya que es flexible, libre de metales, de corta duración, sensible y poco fiable. Da la casualidad de que todas esas propiedades son compartidas por todos los dispositivos electrónicos de polímeros, sean vivos o no. Una mayor fiabilidad es la razón principal por la que la electrónica comercial está basada generalmente en el silicio en lugar de en los polímeros.

Ref. 215 Los polímeros electrónicos que forman el cerebro están organizados como un ordenador. En la [Tabla 18](#), y las [Figura 173](#) y [Figura 174](#), se muestran algunos detalles de su organización. Aunque los bloques funcionales del cerebro y los de un ordenador son sorprendentemente similares, los mecanismos específicos que utilizan cada uno de ellos son en general, completamente diferentes.

Ref. 216 Al igual que en un ordenador, un cerebro se compone de numerosas partes *dedicadas* a tareas específicas y de una parte de ordenación *general*, la materia gris. El reparto entre

* En las señales eléctricas generadas por el cerebro se pueden distinguir, *ondas beta*, durante la atención principalmente, con una frecuencia entre 14 y 30 Hz, *ondas alfa*, durante la relajación, con una frecuencia entre 8 y 13 Hz, *ondas theta*, durante el sueño ligero y el 'movimiento rápido de los ojos' o sueño REM, con una frecuencia entre 3 y 7 Hz, y *ondas delta*, durante el sueño profundo, con una frecuencia entre 0.5 y 2 Hz.

las dos partes, la dedicada y la específica, es casi al cincuenta–cincuenta. También la potencia de computación en los ordenadores modernos, están divididos de esta manera; por ejemplo, en los potentes ordenadores, las tarjetas gráficas son con frecuencia tan potentes como la unidad central de proceso

En una generación o dos, esta sección podría ser titulada ‘como construir un cerebro’. Por desgracia, no hay conocimiento todavía para alcanzar este objetivo. ¿Podría usted, quizás, ayudar a conseguirlo?

¿POR QUÉ UN CEREBRO?

Ref. 217

“Denken ist bereits Plastik.*”
Joseph Beuys.

El cerebro existe para controlar el movimiento de un organismo. Cuanto más complejos sean los movimientos de un organismo, más tamaño tendrá el cerebro. Los seres vivos que no se mueven, como los árboles o el diente de león, no poseen cerebro. Los seres vivos que dejan de moverse, tales como los chorritos de agua de mar o ascidias (*Ascidia* o *Ascidacea*) digieren su propio cerebro cuando se afianzan en una roca en el mar.

Ref. 218

El cerebro – junto a otras partes del sistema nervioso central – controla el movimiento procesando las entradas proporcionadas por los distintos sentidos y enviando los resultados de este proceso a los distintos músculos del cuerpo. Numerosas observaciones muestran que esa señal de entrada es procesada, o sea, clasificada, almacenada y recuperada, en el cerebro. Es importante señalar que una lesión en el cerebro puede llevar a la pérdida de estas funciones. El pensamiento y el lenguaje son, entre otras, consecuencias destacables de estas capacidades básicas del cerebro. Todas las capacidades del cerebro resultan de su construcción, o sea, del ‘hardware’ del cerebro.

Ref. 219

Ref. 220

Los sistemas con la capacidad de llevar a cabo una tarea de clasificación de los datos que reciben, son llamados *clasificadores*, y se dice que son capaces de *aprender*. Nuestro cerebro comparte esta propiedad con muchos otros sistemas complejos; no sólo el cerebro de muchos animales, sino también algunos algoritmos en los ordenadores, como los llamados ‘circuitos neuronales’, son ejemplos de clasificadores. Los clasificadores son estudiados en varios campos, desde la biología a la neurología, las matemáticas o la informática. Todos los clasificadores tienen la doble capacidad de discriminar y asociar; y ambas capacidades resultan esenciales para el pensamiento.

Ref. 221

Ref. 222

Las máquinas clasificadoras tiene mucho en común con el cerebro. Sirva como ejemplo que, siguiendo una reciente e importante hipótesis sobre la biología evolutiva, la necesidad de enfriar el cerebro de manera efectiva es una razón para el andar erguido y bípedo de los humanos. El cerebro, que utiliza alrededor de un cuarto de toda la energía que consume el cuerpo humano, necesita un potente sistema de refrigeración para trabajar bien. En esto, los cerebros se parecen a los modernos ordenadores, los cuales poseen en su interior, por lo general, potentes ventiladores o incluso un sistema de enfriamiento por agua. Resulta que la especie humana tiene el sistema de refrigeración más potente de todos los mamíferos. La posición erguida permitía al aire refrigerar el cuerpo de una manera más efectiva en el entorno tropical donde se produjo el desarrollo esta especie.

* ‘El pensamiento ya es escultura.’ Joseph Beuys (b. 1920 Krefeld, d. 1986 Düsseldorf) fue un famoso escultor.

Para obtener una mejor refrigeración, los humanos casi no tienen pelos en el cuerpo, con excepción de en su cabeza, donde le sirve de protección para que el cerebro no reciba directamente el calor del Sol. Además la posición erguida permite a los humanos respirar de manera independiente a su caminar, una tarea que muchos animales no puede llevar a cabo. Esta capacidad incrementa su capacidad de refrigeración, y por tanto les permite desarrollar la capacidad para hablar. Al mismo tiempo la facultad de hablar, permite un mayor desarrollo del cerebro.

Ref. 223 Todos los clasificadores están contruidos por *unidades de clasificación* muy pequeñas, a veces por un gran número de ellas. Generalmente, las unidades más pequeñas solamente pueden clasificar las entradas en *dos* grupos diferentes. Cuanto mayor es el número de esas unidades, frecuentemente llamadas 'neuronas' por analogía con el cerebro, más sofisticadas pueden ser las clasificaciones que se pueden llevar a cabo por las clasificadoras. Las clasificadoras trabajan por tanto aplicando combinaciones más o menos sofisticadas de 'igual' y 'diferente'. La distinción por un niño entre rojo y azul es ese tipo de clasificación; la distinción de compacto y no-compacto en simetría de grupos gauge en la teoría cuántica es una clasificación más elaborada, pero depende de la misma capacidad básica.

NEURONAS Y REDES

En el cerebro, las unidades de clasificación son las *neuronas*. Las neuronas son células especializadas que procesan, producen y transportan señales eléctricas. En el cerebro, las principales unidades de clasificación son las neuronas *multipolares*. Como cualquier unidad de clasificación, tienen canales de entrada y de salida. Y como cualquier unidad de clasificación, tales neuronas producen sólo dos señales de salida diferentes: un pico eléctrico de altura y duración determinadas o ningún pico.

En todas las clasificadoras, las unidades de clasificación más pequeñas *interactúan* con cada una de las otras. Generalmente, pero no siempre, estas interacciones se canalizan a través de conexiones. Para las neuronas, las conexiones son las dendritas y los axiones. La configuración completa de las clasificadoras forman de este modo una *red*. En estas conexiones, las señales se intercambian a través de objetos en movimiento, como los electrones o los fotones. Así llegamos a la conclusión de que la capacidad del cerebro para clasificar el mundo físico – por ejemplo para distinguir objetos en movimiento que interactúan unos con otros – surge porque el cerebro en sí mismo está formado por objetos en movimiento que interactúan unos con otros. Los humanos no podríamos habernos convertido en una especie animal tan exitosa sin haber incorporado nuestra potente clasificadora. Y solamente el movimiento en el interior de nuestro cerebro es el que nos permite hablar del movimiento en general.

Vol. V, página ?? Un gran número de investigadores han identificado qué partes del cerebro se utilizan cuando se llevan a cabo tareas intelectuales diferentes. Tales experimentos son posibles mediante las imágenes por resonancia magnética y otras técnicas similares para la obtención de imágenes. Otros investigadores están estudiando de qué manera los procesos del pensamiento pueden ser modelados a partir de la estructura del cerebro. La neurología moderna continúa progresando de manera regular. Así, los neurólogos han destruido la creencia de que el pensamiento es *más* que un proceso físico. Esta falsa creencia es el resultado de distintos temores personales, que quizás usted quiera comprobar mediante la introspección. Los temores y las creencias desaparecen con el paso del tiempo. ¿Cómo

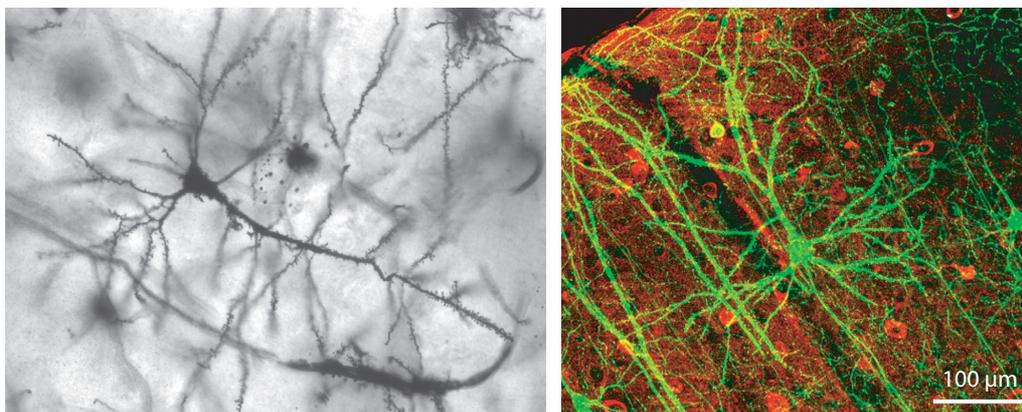
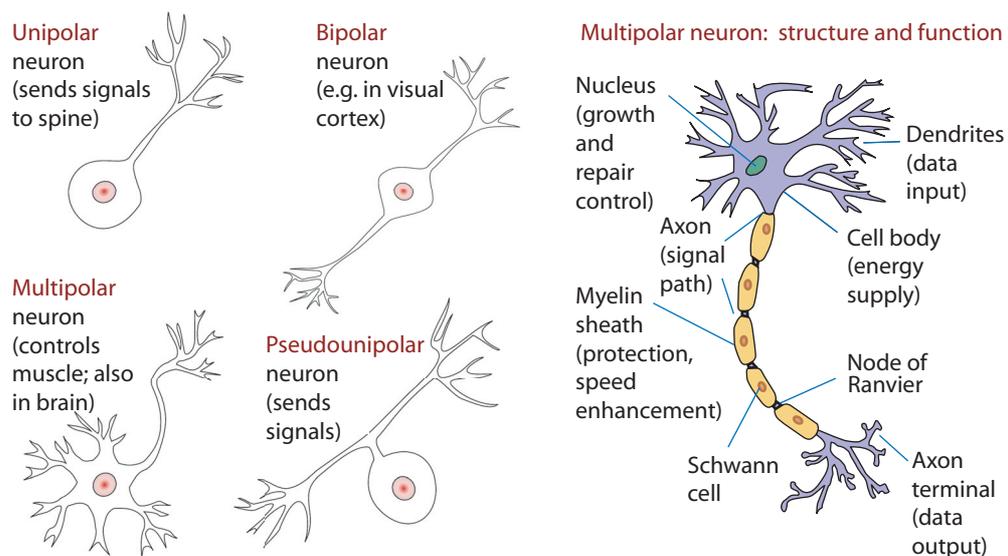


FIGURA 176 Visión general de los cuatro tipos principales de neuronas, diagrama esquemático de una neurona multipolar, y dos fotografías del tejido cerebral teñido (© Wikimedia, Wikimedia, MethoxyRoxy, Wei-Chung Allen Lee & al.)

Desafío 251 s defendería que el pensamiento es solamente un proceso físico?

La evolución desarrolló el cerebro, con todas sus capacidades, como una herramienta que ayuda a cada persona para encontrar su camino a través de los desafíos que plantea la vida. El cerebro humano es tan grande por dos razones: la entrada sensorial es enorme y el procesamiento es complejo. De manera más concreta, el cerebro es tan grande para poder procesar lo que vemos. La cantidad de información proporcionada por nuestros ojos al cerebro es realmente enorme.

¿QUÉ ES LA INFORMACIÓN?

Ref. 224

“Estos pensamientos no llegaron en ninguna formulación verbal. Yo raramente pienso en palabras en absoluto. Un pensamiento viene, y luego puedo tratar de expresarlo con palabras.”
Albert Einstein

Comenzamos nuestra aventura estableciendo que el estudio de la física significa hablar sobre el movimiento. *Hablar* consiste en transmitir información. ¿Se puede medir la información? ¿Puede ser medido el progreso de la física de esta manera? ¿Está hecho el Universo de información? Para responder a estas preguntas, comencemos por la definición.

- ▷ La información es el resultado de la clasificación.

Una clasificación es la respuesta a una o varias preguntas de sí-no. Tales preguntas de sí-no son las clasificaciones más sencillas posibles; proporcionan las *unidades* básicas de la clasificación, sobre las que se pueden construir todas las demás. Por tanto,

- ▷ La información se mide contando los síes y noes implícitos a las preguntas, el número de *bits*, llevan a ello.

La **Tabla 19** ofrece algunos ejemplos sobre valores de información.

¿Podría decir cuántos bits serían necesarios para describir el lugar donde usted vive? Obviamente, el número de bits depende del conjunto de preguntas con las se empieza; éstas podrían referirse a los nombres de las calles de la ciudad, el conjunto de todas las coordenadas de la superficie de la Tierra, el nombre de todas las galaxias del Universo, el conjunto de todas las combinaciones de las letras de las direcciones. ¿Cual sería el método más eficiente que se le ocurre? Una variante del método de combinación es el que se usa en los ordenadores. Por ejemplo, la historia de la presente aventura requiere unos nueve mil millones de bits de información. Pero como la cantidad de información de una historia depende del conjunto de preguntas con las que queremos comenzar, es imposible, de esta manera, calcular con precisión una medida para la información.

Desafío 252 s

TABLA 19 Algunas medidas de información.

CLASE DE INFORMACIÓN	CANTIDAD
Palabras habladas de promedio en un día por un hombre	c. 5000
Palabras habladas de promedio por una mujer	c. 7000
Bits procesados por el oído	1 a 10 Mbit/s
Células sensibles a la luz por la retina (120 millones de bastoncillos y 6 millones de conos)	$126 \cdot 10^6$
Bits procesados por los ojos	1 a 10 Gbit/s
Palabras habladas durante la vida (2/3 del tiempo despierto, 30 palabras por minuto)	$3 \cdot 10^8$
Palabras oídas y leídas durante la vida	10^9

TABLA 19 (Continuación) Algunas medidas de información.

CLASE DE INFORMACIÓN	CANTIDAD
Letras (pares de bases) en humanos haploides ADN	$3 \cdot 10^9$
Pulsos intercambiados entre ambas mitades del cerebro cada segundo	$4 \cdot 10^9$
Bits en un compact disc	$6,1 \cdot 10^9$
Neuronas en el cerebro humano	$86(8) \cdot 10^9$
Palabras impresas (diferentes) disponibles en los libros de todo el mundo (c. $100 \cdot 10^6$ libros conteniendo 50 000 palabras)	$c. 5 \cdot 10^{12}$
Bits de memorias del cerebro humano	$> 10^{16}$
Píxeles de imagen vistos durante la vida: $3 \cdot 10^9$ s (vida) $\cdot 2/3$ (despierto) $\cdot 10^6$ (conexiones con el cerebro) / 15 ms (velocidad del ojo) Ref. 256	10^{17}
Bits de información procesados durante la vida (el número de veces de arriba multiplicado por c. 32)	10^{19}

Vol. I, página 423

Desafío 253 s

La única manera de medir con precisión la información es tomar el conjunto mayor posible de preguntas que se pueden hacer sobre un sistema, y compararlo con lo que conocemos sobre ese sistema. En este caso, a la cantidad de información desconocida se le llama entropía, un concepto con el que ya nos hemos encontrado. Con este concepto debería usted mismo llegar a una conclusión de si verdaderamente es posible medir el avance de la física.

Dado que las clasificaciones o las categorizaciones son una actividad del cerebro, y de otras clasificatorias parecidas, la información tal como la definimos aquí es un concepto que se aplica tanto a los resultados de las actividades de las personas como a las de las otras clasificatorias. En resumen, la información se produce cuando se habla del Universo.

La información resulta de la clasificación. Esto implica que el Universo en sí mismo *no es lo mismo* que la información. Hay un número creciente de publicaciones opuestas a este punto de vista; no obstante, esto es un cortocircuito conceptual. Cualquier transmisión de información implica una interacción; físicamente hablando, esto quiere decir que cualquier información necesita *energía* para la transmisión y *materia* para su almacenamiento. Sin cualquiera de las dos, no hay información. Dicho de otra manera, el Universo, con su materia y su energía, tendría que existir *antes* de que la transmisión de la información fuera posible. Decir que el Universo *está hecho de* información, o que *es* información, tiene tanto sentido y es tan correcto como decir que el Universo está hecho de pasta de dientes.

Desafío 254 s

El objetivo de la física es dar una clasificación *completa* de todos los tipos y ejemplos del movimiento, en otras palabras, conocer todo sobre el movimiento. ¿Es esto posible? ¿O puede encontrar algún argumento en contra de este empeño?

¿QUÉ ES LA MEMORIA?

“ El cerebro es mi segundo órgano favorito. ”
Woody Allen

La memoria es la colección de registros de las percepciones. La producción de tales registros es el aspecto fundamental de la observación. Las grabaciones se pueden almacenar

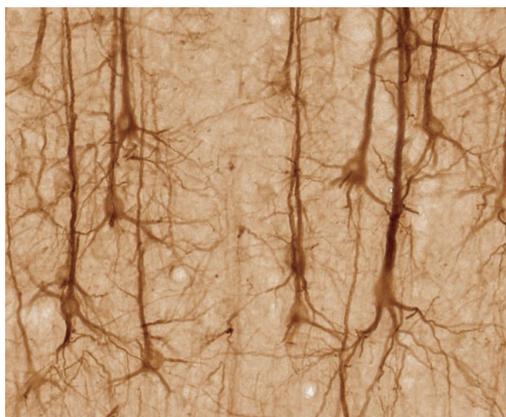


FIGURA 177 Fotografías de neuronas piramidales teñidas en el cortex cerebral de un cortex humano, mostrando sus interconexiones (© Medlat).

Ref. 218

en la memoria humana, esto es, en el cerebro, o en la memoria de máquinas, como en los ordenadores, o en la memoria de los objetos, como en las notas sobre un papel. Sin memoria, no hay ciencia, ni vida – puesto que la vida surge a partir de las grabaciones que se encuentran en el ADN – y especialmente, tampoco diversión, como lo prueban la triste vida de los que pierden la memoria.

Muchos animales y las personas tienen recuerdos, porque un recuerdo ayuda a moverse de tal manera que se maximiza la reproducción y la supervivencia. La memoria no sólo se encuentra en todos los mamíferos, sino también en los insectos y en los caracoles. El bien conocido caracol marino *Aplysia californica* tiene memoria – da muestras de estar condicionados, como los perros de Paulov – aún cuando solamente poseen 20 000 neuronas. Los experimentos confirman que la memoria individual a *largo plazo* se almacena en las conexiones neuronales fuertes, las *sinapsis*. Esta afirmación fue realizada en 1949 por el psicólogo canadiense Donald Hebb. En ese año, Hebb realizó la materialización física de las observaciones que los psicólogos Sigmund Freud y William James habían hecho en la década de 1890, quienes habían llegado a la conclusión de que la memoria dependía de la fuerza o la debilidad de las conexiones en el interior del cerebro. En resumen, las observaciones y el aprendizaje, de todo lo que llamamos *recuerdos*, están registrados en las *sinapsis*.*

Obviamente cada registro es un objeto. Pero, ¿bajo qué condiciones un objeto puede

* El cerebro tiene varios modos de aprendizaje, es decir, de almacenar en la memoria a largo plazo, que dependen de su hardware. El aprendizaje a largo plazo siempre depende de la modificación de la fortaleza de las sinapsis o en el desarrollo de nuevas sinapsis. En un evento traumático, el cerebro aprende en unos segundos para el resto de su vida cómo evitar situaciones similares. Por el contrario, el aprendizaje de una idea sencilla en la escuela puede tomar muchos meses. De hecho, todo el mundo puede influir en la velocidad y en la facilidad del aprendizaje; adjuntando mentalmente imágenes, voces, emociones, fantasías o recuerdos a un asunto o a una situación, se puede acelerar el aprendizaje y reducir su esfuerzo considerablemente.

Ref. 225

La investigación ha demostrado que en la amígdala, donde las emociones y los recuerdos están combinados, la enzima calcineurina y el gen regulador *Zif268* son importantes para los recuerdos traumáticos: los niveles bajos de calcineurina llevan a un incremento de la expresión del regulador genético y del tiempo de permanencia de la memoria traumática, los niveles altos reducen el efecto traumático.

Para el aprendizaje habitual a largo plazo, la proteína CPEB y en particular la *Orb2A*, parecen decidir qué sinapsis deben incrementar su fortaleza.

ser calificado como un registro? Una firma puede ser el registro del acuerdo de una transacción comercial. Una simple mancha de tinta no es un registro, porque puede haberse producido por error, por ejemplo por un borrón accidental. Por el contrario, resulta improbable que la tinta pudiera caer sobre un papel con la forma exacta de una firma. (Las firmas de los médicos son obviamente excepciones.) Hablando llanamente, un *registro* es cualquier objeto, que para ser copiado, tenga que ser falsificado. De manera más precisa, un registro es un objeto o una situación que no puede surgir ni desaparecer por error o por casualidad. Nuestros recuerdos personales, sean imágenes o voces, tienen la misma propiedad; generalmente podemos confiar en ellos, porque son tan detallados que no pueden haber surgido por casualidad o por procesos incontrolados de nuestro cerebro.

¿Se puede estimar la probabilidad para que un registro aparezca o desaparezca por casualidad? Sí, se puede. Cualquier registro está hecho de un número N de caracteres de pequeñas entidades, por ejemplo, el número de posibles puntos de tinta sobre el papel, el número de cristales de hierro de una cassette, los electrones de un bit de memoria de ordenador, los granos de yoduro de plata en el negativo de una fotografía, etc. Las perturbaciones casuales en cualquier memoria se deben a las fluctuaciones internas, también llamadas *ruido*. El ruido hace que el registro no se pueda leer; podría ser una mancha en una firma, cambio térmicos en la magnetización de los cristales de hierro, ruido electromagnéticos dentro de una memoria de estado sólido, etc. En todos los clasificadores hay ruido, ya que éste es inherente a todas las interacciones y, por tanto, a todos los procesos de la información.

Resulta ser una propiedad general que todas las fluctuaciones internas debidas al ruido decrezcan cuando se incrementa el tamaño, es decir, el número de componentes de los registros. De hecho, la probabilidad p_{err} para los errores de lectura o de escritura cambian conforme a la ecuación

$$p_{\text{err}} \sim 1/\sqrt{N}, \quad (93)$$

donde N corresponde al número de partículas o subsistemas utilizados para almacenarlas. Esta relación aparece porque, para un número elevado, la llamada *distribución normal* es una buena aproximación para casi todos los procesos. Así, la anchura de la distribución normal, que determina la probabilidad de registros erróneos, crece menos rápidamente que su integral cuando se incrementa el número de entidades; para grandes números, tales declaraciones se vuelven cada vez más precisas.

Debemos concluir que cualquier buen registro debe realizarse a partir de un *gran* número de entidades. Cuanto mayor sea el número, menor sensibilidad a las fluctuaciones presentará la memoria. Actualmente, un sistema de gran tamaño con pequeñas fluctuaciones se llama *bañera (física)*. Solamente las bañeras hacen posible los recuerdos. En otras palabras, cada registro contiene una bañera. Concluiremos diciendo que toda *observación* de un sistema es la interacción de ese sistema con una bañera. Esta conexión será utilizada varias veces en lo que sigue, en particular en la teoría cuántica. Cuando un registro está producido por una máquina, la 'observación' es llamada generalmente *medida (generalizada)*. ¿Es capaz de especificar la bañera en el caso de una persona que observa un paisaje?

De la discusión precedente se puede extraer una potente conclusión: puesto que te-

Desafío 255 ny

Desafío 256 s

nemos a nuestra disposición una memoria tan buena, podemos deducir que estaremos formados por muchas partes pequeñas. Y puesto que los registros existen, el mundo también debe estar formado por un gran número de partes pequeñas. No se necesita un microscopio de ninguna clase para confirmar la existencia de las moléculas o de pequeñas entidades similares; semejante herramienta solamente es necesaria para determinar el *tamaño* de esas partículas. Su existencia se deduce simplemente por la observación de que tenemos memoria. (Por supuesto, otro argumento que indica que la materia está hecha de pequeñas partes es la ubicuidad del ruido.)

Vol. I, página 364

Leo Szilard popularizó una segunda conclusión en la década de 1920. Escribir un recuerdo no produce entropía; es posible almacenar información en una memoria sin incrementar la entropía. Sin embargo, sí hay producción de entropía en cada *borrado* de memoria. Resulta que la entropía (mínima) generada producida por el borrado de un bit viene dada por

Desafío 257 e

$$S_{\text{por bit borrado}} = k \ln 2, \quad (94)$$

y que el número $\ln 2 \approx 0,69$ es el logaritmo natural de 2. Por lo que la operación de borrado, por un lado reduce el desorden de los datos – la entropía local –, pero por otro, incrementa la entropía total. Como es bien sabido, se necesita energía para reducir la entropía de un sistema local. En resumen, cualquier sistema que borre memoria requiere energía. Por ejemplo, una puerta lógica Y efectivamente borra un bit por operación. El pensamiento lógico por tanto requiere energía.

Es conocido también que el *soñar* está conectado con el borrado y la reorganización de la información. ¿Podría ser ésta la razón de que, cuando estamos muy cansados, desprovistos de toda energía, no soñamos como lo hacemos normalmente? Durante el sueño, el cerebro reorganiza las experiencias del pasado. Los sueños nos dicen lo que guarda nuestro ocupado inconsciente. Cada persona debe decidir por sí misma qué hacer con los sueños que recordemos. En resumen, los sueños no tienen significado – nosotros les damos un significado. En cualquier caso, los sueños son una de las vías del cerebro para usar la memoria de una manera eficiente.

Desafío 258 s

Por consiguiente, necesariamente se crea entropía cuando olvidamos. Esto resulta evidente cuando nos planteamos que olvidar es similar al deterioro de un manuscrito antiguo. La entropía se incrementa cuando el manuscrito ya no resulta legible puesto que el proceso es irreversible y disipativo.* Otra forma de ver esto es reconocer que para borrar una memoria, por ejemplo, una cinta magnética, tenemos que emplear cierta energía en ello y, por lo tanto incrementar su entropía. Contrariamente, *escribir* en una memoria con frecuencia *reduce* la entropía; recordemos que las señales, las entidades que escriben memorias, llevan energía negativa. Por ejemplo, la grabación de cintas magné-

Ref. 226

Ref. 227

* Como explica claramente Wojciech Zurek, la entropía creada dentro de la memoria es la principal razón de que ni siquiera el demonio de Maxwell pueda reducir la entropía de los dos volúmenes de gases mediante la apertura de una puerta entre ellos, de tal manera que la moléculas rápidas se acumulen en un lado y las moléculas lentas se queden en el otro. (Maxwell había presentado el ‘demonio’ en 1871, para aclarar los límites que la Naturaleza planteaba a los dioses) Esta no es más que otra forma de renombrar el viejo resultado de Leo Szilard, quien demostró que las medidas llevadas a cabo por el demonio crean más entropía que las que ellas pueden acumular. Y que cada aparato de medida tiene memoria.

Ref. 228

Para jugar a ser un demonio de Maxwell, busque alguno de los muchos juegos por ordenador implantados por Internet.

ticas por lo general reduce su entropía.

LA CAPACIDAD DEL CEREBRO

“ Los ordenadores son aburridos. Solamente pueden dar respuestas.
(Erróneamente) atribuido a Pablo Picasso ”

Ref. 229, Ref. 230

El cerebro humano está hecho de tal manera que sus fluctuaciones no puedan destruir su contenido. El cerebro está protegido también por el cráneo exactamente por esta misma razón. Además, el cerebro literalmente aumenta las conexiones, llamadas *sinapsis*, entre sus distintas *neuronas*, que son las células que procesan las señales. La neurona es el elemento fundamental de proceso en el cerebro, llevando a cabo una clasificación básica. Solamente puede hacer dos cosas: activarse y no activarse. (Es posible que una neurona al mismo tiempo que se activa también porte información; todavía no ha sido posible resolver este asunto.) La activación de las neuronas dependen de sus señales de entrada, las cuales las reciben a través de las sinapsis de cientos de otras neuronas. Una neurona es por tanto un elemento que puede distinguir las entradas que reciben en los dos casos: el que las llevan a activarse y el que no. Consecuentemente, las neuronas son unos clasificadores del tipo más sencillo, capaces solamente de distinguir entre dos situaciones.

Cada vez que se almacena algo en la memoria a largo plazo, tal como un número de teléfono, la fuerza de conexión de las sinapsis existentes cambian o se crean nuevas sinapsis. Las conexiones entre las neuronas son mucho más fuertes que las fluctuaciones del cerebro. Sólo las fuertes perturbaciones, tales como un trombo en una vena o una lesión cerebral, puede destruir las neuronas y producir una pérdida de memoria.

Como un todo, el cerebro proporciona una memoria extremadamente eficiente. A pesar de los intensos esfuerzos realizados, los ingenieros no han sido capaces de construir una memoria con la capacidad del cerebro en un volumen similar. Estimemos esta capacidad de la memoria. Multiplicando el número de neuronas, sobre los 10^{11} ,* por el número medio de sinapsis por persona, unas 100, y el también estimado número medio de bits almacenados en cada sinapsis, sobre los 10^{**} , llegamos a una estimación conservadora de una capacidad de almacenamiento para el cerebro de aproximadamente

$$M_{\text{reescribible}} \approx 10^{14} \text{ bit} \approx 10^4 \text{ GB} . \quad (95)$$

(Un *byte*, abreviado B, es el nombre usual para ocho bits de información.) Nótese que la evolución ha conseguido poner tantas neuronas en el cerebro como estrellas hay en la galaxia, y que si sumáramos las longitudes de las dendritas, obtendríamos una longitud total de unos 10^{11} m, que se corresponde con la distancia entre la Tierra y el Sol. Verdaderamente nuestro cerebro es *astronómicamente* complejo.

No obstante, ¡la estimación estándar de 10^{14} bits no es completamente correcta! Asume que el único componente que almacena información en el cerebro es la sinapsis fuer-

* El número de neuronas parece ser constante y fijo en el nacimiento. El aumento de las interconexiones se eleva entre uno y tres años de edad, cuando se dice que se alcanzan hasta 10^7 conexiones nuevas por segundo.

** Esto es un promedio. Algunos tipos de sinapsis del cerebro, en el hipocampo, se sabe que almacenan solamente un bit.

Desafío 259 e

te. Por tanto sólo mide la capacidad de almacenamiento *regrabable* del cerebro. De hecho, la información también se almacena en la estructura del cerebro, esto es, en la configuración exacta en la que cada célula se conecta con otras células. La mayoría de esta estructura es fija a la edad de dos años aproximadamente, pero continúa su desarrollo a un nivel inferior durante el resto de la vida humana. Asumiendo que para cada una de las N células con n conexiones hay $f n$ conexiones posibles, esta capacidad de *escritura única* del cerebro puede ser estimada de manera aproximada como $N\sqrt{fn} fn \log fn$ bits. Para $N = 10^{11}$, $n = 10^2$, $f = 6$, ésto resulta

$$M_{\text{escritura única}} \approx 10^{16} \text{ bit} \approx 10^6 \text{ GB} . \quad (96)$$

Ref. 231 Los cambios estructurales del cerebro se pueden medir. Medidas recientes confirmaron que las personas bilingües, especialmente los bilingües a edad temprana, poseen una mayor densidad de materia gris en el pequeño cortex parietal del hemisferio izquierdo del cerebro. Esta es la región principalmente interesada en el proceso de aprendizaje de los idiomas. Por consiguiente el cerebro también hace uso de cambios estructurales para la optimización del almacenamiento y del proceso. También son conocidos cambios estructurales en otras poblaciones, tales como austistas, homófilos y niños hiperactivos. Experiencias intensas y prolongadas durante el embarazo o la niñez parecen inducir a tales cambios estructurales.

A veces se dice que la gente sólo utiliza entre el 5 % y el 10 % de su capacidad cerebral. Este mito, que nos retrotrae al siglo XIX, implicaría que sería posible medir los datos reales almacenados en el cerebro y poderlo comparar con su máximo disponible. De manera alternativa, el mito implicaría que la capacidad de proceso se puede medir y comparar con una capacidad máxima disponible. El mito también implica que la Naturaleza podría desarrollar y mantener un órgano con un 90 % de sobrecapacidad, malgastando toda la energía y el material para construirlo, repararlo y mantenerlo. El mito está equivocado. En el presente, la capacidad de almacenamiento, la capacidad de almacenamiento y la capacidad de proceso de un cerebro no puede ser medida, sino sólo estimada.

La gran capacidad de almacenamiento del cerebro también muestra que la memoria humana se provee del entorno y que no es innata: un óvulo humano junto con un espermatozoide tienen una masa aproximada de 1 mg, lo que corresponde a unos $3 \cdot 10^{16}$ átomos. Obviamente, las fluctuaciones hacen imposible almacenar 10^{16} bits en estos sistemas. De hecho, la Naturaleza almacena solamente alrededor de $6 \cdot 10^9$ pares base de ADN o $12 \cdot 10^9$ bits en los genes de un óvulo fecundado, tomando $3 \cdot 10^6$ átomos por bit. Por el contrario, un cerebro normal tiene una masa entre 1.5 y 2 kg y contiene de 5 a $7 \cdot 10^{25}$ átomos, lo que lo hace una memoria tan eficiente como un óvulo. La diferencia entre el número de bits del ADN humano y la del cerebro muestra claramente que casi toda la información almacenada en el cerebro proviene del entorno; no puede ser de un origen genético, incluso permitiendo una descompresión inteligente de la información almacenada.

En total, todos los trucos utilizados por la Naturaleza tienen como resultado el clasificador más potente conocido hasta ahora.* ¿Hay algún límite a la capacidad del cerebro

* También es importante el consumo de energía del cerebro: aún cuando contiene solamente alrededor del 2 % de la masa corporal, utiliza el 25 % de la energía proveniente de la comida. El cerebro es la razón por

para memorizar y clasificar? Con las herramientas que los humanos han desarrollado para expandir las posibilidades del cerebro, tal como el papel, la escritura y la impresión, como soporte de la memoria, y las numerosas herramientas disponibles para simplificar y para abreviar las clasificaciones exploradas por los matemáticos, la clasificación del cerebro está solamente limitada por el tiempo empleado para su práctica. Sin herramientas, por supuesto, sí hay límites estrictos. Los dos milímetros de grosor del cortex cerebral de los humanos tiene una superficie semejante al cuatro hojas de papel A4, la de un chimpancé es de una hoja, y la de un mono es del tamaño de una postal. Se estima que el total de la memoria intelectualmente accesible es del orden de

$$M_{\text{intelectual}} \approx 1 \text{ GB} , \quad (97)$$

aunque con un gran error experimental.

El cerebro resulta también inigualable en su capacidad de proceso. Esto se muestra con más claridad mediante la consecuencia más importante derivada de la memoria y la clasificación: el pensamiento y el lenguaje. Verdaderamente, los diferentes tipos de pensamiento y lenguajes que utilizamos, tales como la comparación, la distinción, el recuerdo, el reconocimiento, la conexión, la descripción, la deducción, la explicación, la imaginación, etc., todos describen formas diferentes de clasificar recuerdos o percepciones. Al final, cualquier tipo de pensamiento o conversación directa o indirectamente clasifica observaciones. ¡Pero qué lejos están los ordenadores de lograr esto! El primer intento, en 1966, fue una broma de programación realizada por Joseph Weizenbaum: el famoso programa de bot conversacional Eliza (pruébelo en www.manifestation.com/neurotoys/eliza.php3), se trata de una parodia de un psicoanalista. Aún hoy día, más de 40 años después, las conversaciones con un programa de ordenador, como el Friendbot (que se puede encontrar en www.friendbot.co.uk), sigue siendo una experiencia decepcionante. La enorme capacidad del cerebro es la razón principal para esa decepción.

A propósito, aún cuando los cerebros de los cachalotes y de los elefantes pueden ser cinco o seis veces más pesados que el de los humanos, el número de neuronas y de conexiones, y por tanto su capacidad, es más baja que la de los humanos. Los caracoles, las hormigas, los peces pequeños, tienen un número de neuronas del orden de los 10 000; el bien conocido nemátodo *Caenorhabditis elegans* tiene sólo 302, aunque otros animales poseen todavía menos.

CURIOSIDADES SOBRE EL CEREBRO Y LA MEMORIA

Todos los profesores y alumnos deberían ser expertos en el cerebro. El cerebro aprende mejor cuando tiene un *objetivo*. Sin querer conseguir una meta, tanto la preparación de una clase como el desarrollo de la misma perderá la mayor parte de sus posible efectos. ¿Cuántos profesores se marcan el objetivo de su clase al principio de la misma? ¿Cuántos alumnos se formulan el objetivo de su aprendizaje?

El cerebro también aprende mejor cuando está *motivado*. Estudiantes diferentes necesitan motivaciones distintas: aplicaciones potenciales, curiosidades, competiciones, activación de los conocimientos ya aprendidos, impresionar al sexo opuesto o explorar lo

la que a los humanos les gusta comer fruta.

desconocido. Además, los estudiantes necesitan motivaciones con diferentes niveles de dificultad. ¿Qué profesor proporciona esta mezcla?

Finalmente, los cerebros de los estudiantes y aprendices tienen formas diferentes de *crear conceptos*: utilizando palabras, sonidos, imágenes, emociones, sensaciones corporales, etc. ¿Qué maestro los aborda todos en sus lecciones?

* *

El cerebro practica juegos extraños con la gente que lo lleva. Por ejemplo, el cerebro siempre está buscando algo que hacer. Muchos hábitos y muchas adicciones se forman de esta manera.

* *

Ref. 233 Normalmente el cerebro da órdenes a la persona que lo lleva. Modernas investigaciones han demostrado que los escolares se pueden encuadrar en cinco grupos separados.

1. Estudiante inteligentes
2. Estudiantes desinteresados
3. Estudiantes que se sobreestiman a sí mismos (con frecuencia, pero no siempre, chicos)
4. Estudiantes que se infraestiman a sí mismos (con frecuencia, pero no siempre, chicas)
5. Estudiantes con dificultades/débiles

Esto hay que tenerlo en cuenta cuando se enseña en una clase. ¿A qué grupo pertenece usted?

* *

Muchas actividades cognitivas del cerebro están localizadas en regiones específicas del *cortex cerebral*, también conocido como *materia gris* (véase la [Figura 173](#)). Es sabido que toda la materia gris está formada por un gran número de estructuras paralelas, pero en gran medida independientes, son las llamadas *columnas neocorticales*; son similares a los microprocesadores. Cada columna neocortical tiene entradas y salidas, pero trabajan independientemente unas de otras; tienen una altura aproximada de 2 mm y un diámetro de 0,5 mm, y contiene alrededor de 1000 neuronas de distintos tipos. (Consultar neurolex.org/wiki/Category:Neuron para obtener una lista.) El cortex humano contiene varios millones de estas columnas, distribuidas en seis niveles. En el presente, los investigadores pueden simular una columna neocortical con un superordenador. Para más detalles, consultar la bluebrain.epfl.ch. En resumen, su cerebro se corresponde con varios millones de superordenadores. ¡Cuidelo bien!

* *

Ref. 234 Se puede consultar un bonito atlas del cerebro en la bigbrain.loris.ca. En este sitio web, investigadores de todo el mundo cuelgan las mejores imágenes del cerebro que la investigación moderna proporciona.

* *

El cerebro tiene muchas facetas interesantes. La técnica del *neurofeedback* es un ejemplo. Con unos cuantos electrodos sujetos a la piel de la cabeza y la ayuda de una pantalla de

visualización se crea un circuito de retroalimentación. Tal visualización lleva a uno mismo a ponerse en un estado theta alto – el que corresponde a una profunda relajación –, o a un estado SMR (Ritmo Sensoriomotor) – el que corresponde al descanso y la concentración –, o a estados alfa-dominado – que se corresponden con la relajación con los ojos cerrados. El aprendizaje del paso de unos estados a otros está ayudando a atletas, cirujanos, bailarines, músicos, cantantes y niños con síndrome de déficit de atención. Tras unas cuantas sesiones, los efectos permanecen durante muchos años. Respecto al

Ref. 235 síndrome de déficit de atención, los resultados son tan buenos como la medicación.

* *

Una faceta interesante del cerebro es el amplio rango de *emociones* que proporciona. Por ejemplo, hay personas cuyo pasión les lleva a dedicar toda su vida a cantar. Hay personas cuya pasión de toda la vida es inventar idiomas; John Ronald Tolkien es el ejemplo más famoso. Para otras personas su máximo deseo consiste en ayudar a asesinos a encontrar la paz mental. Algunos dedican su vida a criar niños discapacitados no queridos por sus padres. Otros dedican sus vidas a implantar soluciones rápidas a problemas de infraestructura – suministro de agua, gas y electricidad – en las ciudades en guerra. Los ejemplos que se pueden encontrar son fascinantes.

* *

Muchas funciones de cerebro no son desarrolladas por la parte programable del mismo, el cortex, sino por un 'hardware' especializado. La lista de estas herramientas especializadas del cerebro se hace más extensa a medida que se van realizando descubrimientos.

Ref. 236 La [Figura 173](#) muestra solamente las regiones básicas. Los investigadores han descubierto neuronas dedicadas al control del proceso para caminar de cada pierna, neuronas dedicadas – las llamadas *neuronas espejo* – que recrean lo que las personas vemos, sentimos o fingimos, y neuronas dedicadas desde el ojo hasta el cerebro que controlan el ciclo día-noche. Estos recientes descubrimientos complementan los ya conocidas que existen para cada uno de los sentidos en el sistema neuronal, desde el tacto al olfato o a la propiocepción. En pocas palabras, muchas de las funciones básicas del sistema neuronal están conectadas y muchas funciones avanzadas lo están también. La lista completa de los sistemas conectados no se conoce todavía. Por ejemplo, solamente las investigaciones futuras nos ayudarán a comprender cuánto de nuestro subconsciente se debe al 'hardware', y cuánto se debe al 'software' del cortex.

* *

Los gatos son animales listos, y todo el mundo que se relaciona con ellos sabe cómo elabora sus comportamientos y cual es el espectro de sus actividades. Todo esto está organizado en un cerebro del tamaño de una nuez, con unos 300 millones de neuronas.

Curiosamente, los humanos tienen aproximadamente el mismo número de neuronas que se encuentran en el cerebro de un gato en un lugar fuera del cerebro: el vientre. Este grupo de neuronas es llamado sistema nervioso entérico. Esta gran colección de neuronas, más de 100 millones de ellas, controla el comportamiento de las células intestinales – en particular, la primera capa de células intestinales que entra en contacto con la comida y controla la producción de muchas enzimas y neurotransmisores, que a su vez influye en nuestro humor. El 95 % de la serotonina producida en el cuerpo está producida en

Vol. V, página ??
 Ref. 237 el intestino. Puede muy bien ser posible que el tratamiento de la depresión requiera ser tratada primero en los intestinos. El sistema nervioso entérico también determina si el vómito es necesario o no, produce el estreñimiento o la diarrea, influye en los niveles de estrés, regula nuestro sistema inmunológico y controla otros muchos procesos. En resumen, el sistema nervioso entérico es la base anatómica para nuestras ‘corazonadas’ y probablemente para nuestro bienestar general. Todavía está en marcha la investigación sobre este asunto.

* *

Aprenderemos mejor si *recordamos* lo que hemos aprendido. Los experimentos muestran que recordar fortalece las sinapsis, y por tanto fortalece nuestra memoria. Aprendemos mejor si conocemos las *razones* de las cosas que hemos aprendido. Los experimentos muestran que la causalidad fortalece las sinapsis.

* *

Aprendemos, mientras dormimos. El cerebro almacena la mayoría de las cosas que experimentamos durante el día en una región llamada *hipocampo*. Durante el sueño profundo, esto es, en el tiempo de sueño sin sueños, el cerebro selecciona cuales de esas experiencias necesitan ser almacenadas en su memoria a largo plazo, el *neocortex*. La selección está basada en las emociones unidas a la memoria, especialmente inquietud, miedo o enfado. Pero también la esperanza de obtener una recompensa – tal como un regalo o la posibilidad de causar una buena impresión cuando se es preguntado sobre un asunto – es extremadamente efectivo en la transferencia de contenido al neocortex, como demostró Jan Born en sus investigaciones. Si se sigue esta regla, dormir justamente después de aprender, en particular, dormir profundamente, es la mejor manera de estudiar. La forma más efectiva de aprender un idioma, aprender un nuevo tema o memorizar una presentación es dormir inmediatamente después de estudiar o de ensayar.

El sueño profundo ayuda a aprender. El sueño profundo se puede inducir de muchas maneras. El esfuerzo, el deporte e incluso la estimulación electrónica incrementa el sueño profundo. La industria farmacéutica está tratando ahora de desarrollar píldoras que incrementen el sueño profundo. El alcohol, la mayoría de las pastillas para dormir, la televisión, Internet y los eventos traumáticos, decrecen el sueño profundo. Jan Born afirma que lo más probable es que el sueño exista para permitir que podamos aprender; ninguna otra explicación para la pérdida de consciencia durante el sueño es convincente.

¿Cómo dormimos? Cuando estamos despiertos, todas las señales de entradas se envían al *hipotálamo*, el cual las filtra y las envía al neocortex. Durante el sueño el neocortex efectivamente desconecta gran parte del tálamo, de tal manera que apenas llega alguna señal de entrada al neocortex. La modelación de estos procesos permite entender cómo comienza el sueño y también reproducir las ondas cerebrales durante el comienzo del sueño.

Ref. 238

* *

En el sitio web www.brain-map.org, se pueden encontrar resultados de muchas investigaciones modernas sobre el cerebro de los animales y de los humanos.

* *

Los cerebros y los ordenadores defieren marcadamente en la forma en la que ellos trabajan. Los cerebros son analógicos, los ordenadores son digitales. ¿Cómo funciona exactamente un ordenador? La respuesta general es : los ordenadores son una colección organizada e inteligente de interruptores eléctricos. Para la realización de tareas de la manera más fácilmente posible, la unidad de cálculo dentro del ordenador – la llamada *unidad central de proceso*, el corazón del ordenador – calcula utilizando números binarios. El estado de ‘on’ y ‘off’ de un interruptor, está asociado a los dígitos ‘1’ y ‘0’. ¿Puede diseñar una sencilla colección de interruptores que permita sumar dos números binarios de un dígito? ¿De muchos dígitos? ¿Y multiplicar dos números? Inténtelo – resulta un ejercicio interesante.

Los ordenadores son llamados *digitales* porque se basan en los interruptores. En realidad, todos los circuitos integrados en el interior de una calculadora de bolsillo o dentro de un portátil son una colección de conmutadores eléctricos; los más modernos pueden contener varios millones de ellos y cada conmutador es para una función específica.

* *

Durante el embarazo, el cerebro del embrión crece a razón de 250 000 neuronas por minuto. Este rango muestra cuán fascinante es el proceso de la vida.

* *

La señal de comunicación entre el cerebro y los brazos es diferente a la señal de comunicación entre el cerebro y las piernas. Cuando el cerebro envía a la columna vertebral una orden de movimiento para algún brazo o una pierna, la columna a su vez la envía a los brazos o a las piernas. Para los brazos (y las manos) – pero *no* para las piernas – la columna envía un copia de la orden de vuelta al cerebro. Este ‘acuse de recibo’ parece que permite al cerebro especificar con más precisión su siguiente orden de movimiento. Por tanto el cuerpo y el cerebro son el ‘cableado’ para nuestras sutiles habilidades motoras que nos ayuda a usar nuestros dedos y manos de la manera más precisa posible. La importancia de estas delicadas habilidades motrices eran ya conocidas por los antiguos griegos; Anaxágoras dijo que los humanos son los seres vivientes más listos porque tienen manos.

* *

La epilepsia es un grupo de trastornos del cerebro que afecta a un gran porcentaje de la población humana. La epilepsia es un mal funcionamiento eléctrico del cerebro. Produce oscilaciones eléctricas regulares dentro del cerebro, durante el cual la persona pierde la consciencia o incluso tiene convulsiones. La epilepsia es también una de las razones para una conducta autista. Puede ser producida por defectos genéticos, por lesiones y por otras causas. La investigación sobre la epilepsia es un vasto campo.

Muchos tipos genéticos de epilepsia se deben a mutaciones en genes que codifican los canales iónicos. Cuando los canales iónicos no funcionan adecuadamente, la concentración de cationes, como puede ser el sodio, no se comportan de forma adecuada, produciendo un mal funcionamiento eléctrico. La investigación sobre el origen de la epilepsia ha demostrado que algunas mutaciones genéticas no son heredadas de los padres, sino que son *de novo*: solamente aparecen en la niñez.

* *

Los investigadores han vinculado tentativamente los defectos genéticos a la propensión de olvidar cosas de la vida cotidiana. no obstante, uno puede preguntarse si un error en el gen DRD2 es verdaderamente la causa de olvidar dónde están las llaves del automóvil.

* *

Desafío 260 s Muchos conmutadores tiene tres estados; podemos llamarlos ‘-1’, ‘0’, ‘1’. Por tanto, la fabricación de ordenadores basados en ‘trits’ en lugar de ‘bits’ es una opción realista. ¿Por qué no hay un ordenador de 27-trit?

* *

Desafío 261 e ¿Tiene memoria el agua? Algunas personas se ganan la vida con esta afirmación. No obstante, las moléculas del agua tienen una velocidad media de 590 m/s a temperatura ambiente. El estado líquido, unido a esta alta velocidad, evita la formación de agregados estables más allá de una escala de un puñado de moléculas. Los experimentos que han tratado de buscar efectos de memoria han resultado todos negativos, dejando aparte los de los ladrones. El agua no tiene memoria.

Ref. 239

* *

Los neurotransmisores que influyen en los estados de ánimo continúan siendo un tema de intensa investigación. Dicha investigación ha demostrado que un péptido específico llamado *hipocretina* o también *orexina* conduce a un alto estado de alerta, a incrementar el apetito y sobre todo al buen humor. Si esto es verdaderamente la ‘hormona de la felicidad’, como se ha afirmado a veces, tiene que ser comprobado todavía.

* *

Ref. 240 En 2015, por primera vez, se han descubierto vasos linfáticos en el cerebro: existen tanto una entrada como una salida de líquido linfático. Este sorprendente descubrimiento de Antoine Louveau y sus colaboradores podía muy bien cambiar la forma en la que los investigadores abordan la enfermedad de Alzheimer, el autismo, la esclerosis múltiple y muchas otras enfermedades neuro-inmunes.

* *

Ref. 241 En 2015, se han descubierto dentro del cerebro ‘células rápidas’. Estas células forman parte del sistema de navegación del cerebro, y se activan con una frecuencia que es proporcional a la velocidad propia del organismo. Estas células, por tanto, tienen la misma función que el velocímetro de un coche. Completar la comprensión del sistema de navegación del cerebro es uno de los desafíos actuales de las neurociencias.

* *

Un aspecto fascinante del cerebro es la forma en la que controla los movimientos. Muchos grupos de investigación están explorando cómo es aprendido, estructurado, almacenado y controlado el movimiento de brazos, piernas y cuerpo por el cerebro. El cerebro controla el movimiento construyendo sus órdenes a los músculos a partir de un pequeño conjunto de *movimientos primitivos*.

Otros grupos de investigación están explorando cómo coordina el cerebro el movi-

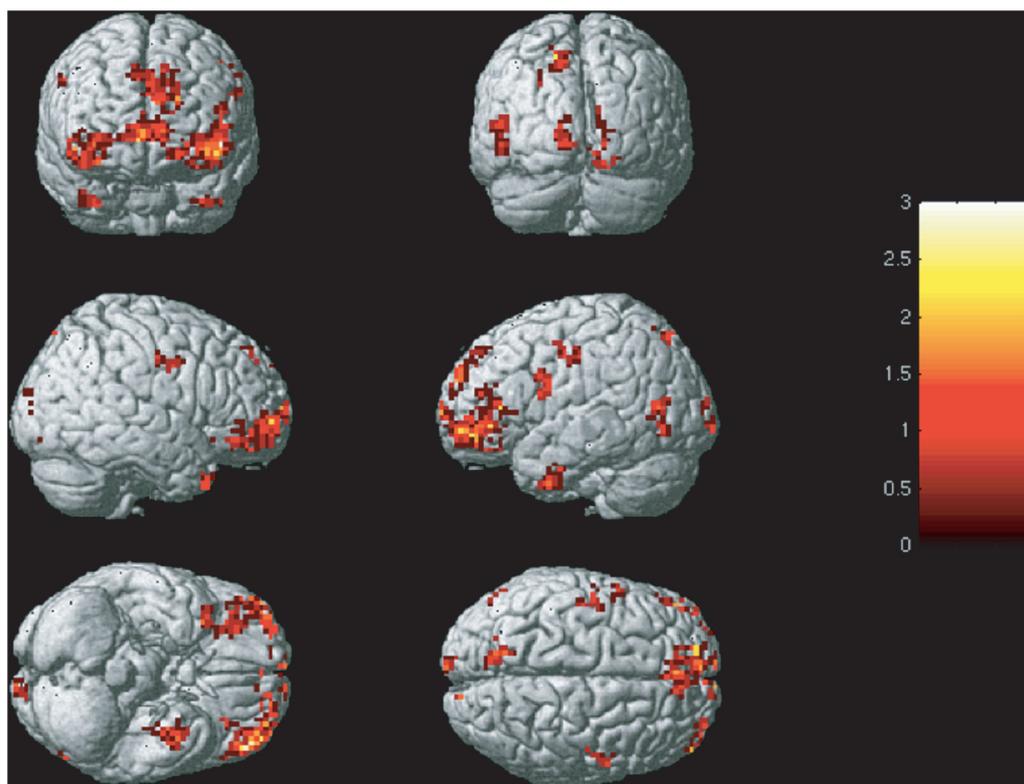


FIGURA 178 Los escaneos cerebrales con resonancias magnéticas superpuestas sobre una imagen del cerebro permiten determinar la emoción sentida, si las ubicaciones mostradas están adecuadamente ponderadas (© Karim S. Kassan).

miento de los labios, la lengua, las mandíbulas y la laringe durante el habla. También en este caso parece que el movimiento en la expresión está controlado por una secuencia de primitivos movimientos aprendidos; estos parecen muy similares o al menos relacionados muy de cerca a las sílabas.

* *

Vol. V, página ??

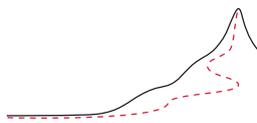
Ref. 242

El reto de leer los pensamientos de alguien está todavía distante. Pero la lectura de las emociones de las personas ya es posible con máquinas de resonancia magnética. Un vistazo a este enfoque se muestra en la [Figura 178](#). Ponderando adecuadamente la actividad neuronal de ciertas áreas del cerebro resulta posible distinguir enfado, disgusto, envidia, miedo, felicidad, lujuria, orgullo, tristeza y vergüenza – aunque con una certeza de 85 %.

* *

Recientes investigaciones han mostrado que, con mucho, la mejor manera de conservar la salud del cerebro es el movimiento regular. Por ejemplo, el movimiento regular es más efectivo que cualquier medicina conocida para prevenir la arteriosclerosis y la enfermedad de Alzheimer.





CAPÍTULO 8

LENGUAJE Y CONCEPTOS

“Protege tu derecho a pensar, porque aún pensar equivocadamente es mejor que no pensar en absoluto.”

Hypatia de Alejandría

Posiblemente el lenguaje es el regalo más maravilloso de la naturaleza humana. Lo hemos aprendido todo a través de alguien que se ha preocupado por nosotros. No obstante, los orígenes del lenguaje permanecen escondidos en un pasado distante de la humanidad. El lenguaje se produce y se transmite de un cerebro a otro. Ya que hemos establecido repetidamente que la física es hablar sobre el movimiento, también tendremos que explorar el lenguaje en nuestra aventura. La física es un lenguaje preciso y especializado para la descripción del movimiento. En nuestro paseo descubriremos que esta definición específica del lenguaje no es restrictiva, ya que todo en el mundo es movimiento. Por tanto, la física es un lenguaje preciso para todas las cosas. Y nuestro objetivo de precisión exige que exploremos el significado, uso y límites del lenguaje.

¿QUÉ ES EL LENGUAJE?

“Ein Satz kann nur sagen, *wie* ein Ding ist, nicht *was* es ist.**”

Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 3.221

Utilizando la capacidad para producir sonidos y poner tinta sobre un papel, las personas juntan determinados *símbolos*,*** también llamadas *palabras* o *términos* en este contexto, a las muchas particiones que especifican con la ayuda de sus pensamientos. Se dice entonces que tal categorización define un *concepto* o *noción*, y se resaltarán en *tipografía itálica* en este texto. *Un conjunto estándar de conceptos forman un lenguaje*.**** Dicho de otra forma, tenemos:

Ref. 243

** 'Una proposición sólo puede decir *cómo* es una cosa, no lo *qué* es.' Traducción al español de Jesús Padilla Gálvez.'

*** Un símbolo es un tipo de *signo*, esto es, una entidad asociada por algún tipo de convenio al objeto que se refiere. Siguiendo a Charles Peirce (b. 1839 Cambridge, d. 1914 Milford) – véase www.peirce.org – el filósofo más original nacido en los Estados Unidos, un símbolo difiere de un *icono* (o *imagen*) y de un *índice*, que también esté asociados a un objeto por convención, en que no se parece al objeto, como el icono, y que no tiene contacto con el objeto, como es el caso para el índice.

**** El reconocimiento de que el lenguaje está basado en una parcelación de las ideas, usando las distintas diferencias entre ellas para distinguirlas unas de otras, se remonta a Ferdinand de Saussure (b. 1857 Geneva, d. 1913 Vufflens), que es considerado como el fundador de la lingüística. Su libro de texto *Cours de linguistique*

TABLA 20 Language basics.

A S P E C T O	V A L O R
Fonemas humanos	c. 70
Fonemas en Inglés	44
Fonemas en Alemán	40
Fonemas en Italiano	30
Palabras del idioma Inglés (más que todas los otros idiomas, con la posible excepción del Alemán)	c. 350 000
Número de idiomas sobre la Tierra en el año 2000	c. 6000

- ▷ Un (*lenguaje humano* es una forma estándar de interacción simbólica entre las personas.

Hay lenguajes humanos basados en expresiones, en gestos, en palabras habladas, en silbidos, en palabras escritas, y en otras cosas. El uso del *lenguaje hablado* es considerablemente más joven que la especie humana; parece que apareció hace solamente unos cien mil años. El *lenguaje escrito* es todavía más joven, teniendo solamente unos seis mil años. El conjunto de conceptos usados en el lenguaje, el *vocabulario*, todavía está en expansión. Para los humanos, la comprensión del lenguaje comienza inmediatamente después del nacimiento (quizás incluso antes), el uso activo comienza cuando se tiene alrededor de un año, la capacidad de leer puede empezar recién cumplidos los dos años, y el vocabulario personal continúa su crecimiento mientras se mantenga viva la curiosidad.

A los biólogos evolutivos les gusta enfatizar un punto adicional que es necesario para la definición del lenguaje:

- ▷ Sólo un sistema de interacción simbólico que permita la comunicación sobre lo que *no está presente* – no aquí y no ahora – forma un *lenguaje*.

Apuntar hacia un objeto o hacia un lugar es un signo que es comprendido y utilizado por muchos animales. Pero se requiere la capacidad de usar signos para hablar sobre el pasado, sobre el futuro y sobre diferentes sitios para transformar una colección de símbolos en un lenguaje. No está claro si existe una especie animal con esta capacidad; los grandes simios son obviamente los candidatos.

Siendo la física una forma perezosa de hablar sobre el movimiento, necesita un lenguaje como herramienta fundamental. De los muchos aspectos para el lenguaje, desde la literatura a la poesía, desde las bromas a las órdenes militares, desde las expresiones de apoyo, los sueños, el amor y las emociones, la física sólo utiliza un segmento pequeño y bastante especial. Este segmento está definido por la restricción inherente para hablar

générale, Editions Payot, 1985, ha sido el trabajo de referencia del campo durante más de medio siglo. Nótese que Saussure, al contrario que Peirce, prefiere el término 'signo' a 'símbolo', y que su definición del término 'signo' incluye también al objeto al cual se refiere.

sobre el movimiento. Puesto que el movimiento es una observación, es decir, una interacción con el entorno que varias personas la sienten de la misma manera, esta elección pone un número de restricciones en el contexto – el vocabulario – y en la forma – la gramática – de las discusiones.

Por ejemplo, de la definición de que las observaciones son compartidas por otros, tenemos el requerimiento:

- ▷ Las declaraciones que describen observaciones deben ser traducibles a todos los idiomas.

Pero, ¿cuándo se puede traducir una declaración? Sobre esta pregunta son posibles dos puntos de vista extremos: el primero mantiene que *todas* las declaraciones se pueden traducir, ya que se desprende de las propiedades de los lenguajes humanos que cada uno de ellos pueden expresar todas las posibles declaraciones. Desde este punto de vista se puede decir:

- ▷ Sólo los sistemas de signos que permitan expresar el espectro completo de mensajes humanos forman un *lenguaje humano*.

Esta definición de lenguaje distingue el hablado por los humanos del lenguaje de signos de los animales, tal como el utilizado por los simios, los pájaros o las abejas melíferas, y también del lenguaje de los ordenadores, tales como el Pascal o el C. Con este significado del lenguaje, todas las declaraciones pueden ser traducidas por definición.

Para una discusión es más desafiante seguir el punto de vista opuesto, que sostiene que solamente es posible la traducción precisa para aquellas declaraciones que utilizan términos, tipos de palabras y estructuras gramaticales encontradas en *todos* los otros idiomas. La investigación lingüística ha invertido considerables esfuerzos en la destilación de los *universales* fonológicos, gramaticales y semánticos, como así son llamados, de los 6000 más o menos idiomas que existen a día de hoy.*

COMPONENTES DE UN IDIOMA Y SUS JERARQUÍAS

«Jedes Wort ist ein Vorurteil.
Friedrich Nietzsche**»

* En ehl.santafe.edu/intro1.htm, se puede encontrar una base de datos profesional del lingüista Merritt Ruhlen con 5700 idiomas y muchos detalles de cada uno de ellos. En www.ethnologue.com, se puede encontrar una lista grande pero poco profesional de 6900 idiomas (y con 39 000 nombre de idiomas y dialectos). Tenga cuidado, está editado por un grupo religioso marginal que tiene como objetivo aumentar el número de idiomas tanto como sea posible.

Se estima que $15\,000 \pm 5\,000$ idiomas han existido en el pasado.

No obstante, en el mundo actual, y seguramente para las ciencias, con frecuencia resulta suficiente con conocer el idioma propio y el Inglés. Puesto que el Inglés es el idioma con mayor número de palabras, aprenderlo bien resulta un reto de aprendizaje mucho mayor que para la mayoría de las otras lenguas.

Ref. 244

** ‘Cada palabra es un prejuicio.’ Friedrich Nietzsche (b. 1844 Röcken, d. 1900 Weimar) fue un influyente filólogo y filósofo.

TABLA 21 Primitivos semánticos universales, siguiendo a Anna Wierzbicka.

Yo, tu, alguno, algo, gente	[substantivos]
este, el mismo, uno, dos, todo, mucho/muchos	[determinantes y cuantificadores]
conocer, querer, pensar, sentir, decir	[predicados mentales]
hacer, suceder	[agente, paciente]
bueno, malo	[evaluativo]
grande, pequeño	[descriptores]
muy	[intensificador]
poder, si (pudiera)	[modalidad, irrealis]
porque	[causalidad]
no (ni)	[negación]
cuando, donde, después (entes), bajo (sobre)	[tiempo y lugar]
clase de, parte de	[taxonomía, paronomía]
como	[límite/prototipo]

Las investigaciones sobre los aspectos *fonológicos* del lenguaje mostraron por ejemplo que cada lenguaje humano tenían al menos dos consonantes y dos vocales y que el número de fonemas del mundo es limitado. No obstante, tales estudios no proporcionan ningún material para la discusión sobre la traducción.*

Los estudios de los aspectos *gramaticales* (o *sintácticos*) demostraron que todos los idiomas utilizan elementos más pequeños, llamados ‘palabras’, las cuales se agrupan en frases. Todas ellas tiene pronombres para la primera y segunda persona, ‘yo’ y ‘tu’, y también contienen nombres y verbos. Todos los idiomas utilizan *sujetos y predicados* o, como se les llama generalmente, a las tres entidades *sujeto, verbo y objeto*, aunque no siempre en ese orden. Compruébelo en los idiomas que usted conoce.

Desafío 262 e

Explorando los aspectos *semánticos* del idioma, a la larga lista de léxicos universales, es decir, a las palabras que aparecen en todos los idiomas, tales como ‘madre’ o ‘Sol’, les han sido proporcionadas recientemente una estructura. La lingüista Anna Wierzbicka realizó una búsqueda de los pilares mediante los cuales se pueden construir todos los conceptos. Buscó la definición de cada concepto con la ayuda de los más simples, y continuó haciéndolo hasta que alcanzó un nivel fundamental que no podía reducirse más. El conjunto de los conceptos que restaban, forman los primitivos semánticos. Repitiendo este ejercicio con muchos idiomas, Wierzbicka observó que la lista resultaba ser la misma en todos los casos. Por lo tanto, había descubierto los *primitivos semánticos universales*. En 1992, la lista contenía los términos que se ofrecen en la [Tabla 21](#).

Tras toda una vida dedicada a la investigación, Anna Wierzbicka y su escuela de investigadores, encontraron que todos estos conceptos existían en todos los idiomas del mundo estudiados hasta la fecha.** Ellos habían definido en detalle el significado de

* Los estudios fonológicos también exploran asuntos tales como la observación de que en muchos idiomas la palabra para designar ‘little’ contiene el sonido de ‘i’ (o una ‘e’ aguda): petit, piccolo, klein, tiny, pequeño, chiisai; son excepciones: small, parvus. Otros investigadores han demostrado que en las regiones que son templadas y que tienen muchos árboles, los idiomas poseen muchas vocales y pocas consonantes.

** Es fácil imaginar que esta investigación no agrade a muchas personas. Una lista que mantiene que tan sólo

Ref. 245 cada primitivo, realizando comprobaciones consistentes y eliminando enfoques alternativos. Habían comprobado esta lista en idiomas de todos los grupos, en idiomas de todos los continentes, demostrando por tanto, que el resultado era válido en todas partes. En todos los idiomas, los demás conceptos se pueden definir con la ayuda de los primitivos semánticos.

Diciéndolo con sencillez, aprender a hablar significa aprender estos términos básicos, aprender cómo combinarlos y aprender los nombres de esos compuestos. La definición de idioma dada más arriba, es decir, definirlo como un medio de comunicación que permite expresar todo lo que se quiere decir, y también referirse a otros lugares y otros tiempos, se puede redefinir así:

- ▷ Sólo un conjunto de conceptos que incluya los primitivos semánticos universales forman un *idioma humano*.

Desafío 263 e Para los físicos – cuyo objetivo es hablar con el menor número de palabras posible – la lista de primitivos semánticos presentan tres facetas. Primero, el enfoque es similar al propio propósito de la física: la idea de los primitivos proporciona un resumen estructurado de *todo lo que se quiere decir*, de la misma manera que los elementos atómicos estructuran a todos los objetos materiales que se pueden tocar. Segundo, la lista de los primitivos se puede dividir en *dos grupos*: un grupo que contenga todos los términos que describen el movimiento (hacer, suceder, cuándo, dónde, sentir, pequeño, etc.– probablemente se podría añadir un término del campo semántico sobre la luz o el color) y otro grupo que contuviera todos los términos necesarios para hablar sobre conjuntos abstractos y las relaciones (este, todo, clase de, no, si, etc.). Aún para los lingüistas, los aspectos del movimiento y los conceptos lógicos son las entidades básicas de la experiencia humana y del pensamiento humano. Para centrar el tema,

- ▷ Los primitivos semánticos contienen los elementos básicos de la física y los elementos básicos de las matemáticas.

Por lo tanto todos los humanos son físicos y matemáticos.

Desafío 264 d La tercera faceta sobre la lista de primitivos semánticos de Wierzbicka es la que resulta *demasiado larga* para un físico. La división de la lista en dos grupos sugiere directamente lista más cortas; sólo tenemos que preguntarles a los físicos y a los matemáticos por conceptos sumarios en sus respectivos campos. Para apreciar este objetivo, intente definir lo que significa ‘sí’, o lo que es un ‘no’ o un ‘opuesto’ – y explore sus propias formas de reducir la lista.

Reducir la lista de los primitivos es también un objetivo de esta aventura. En efecto, exploraremos el grupo matemático de primitivos en este capítulo. El grupo físico nos mantendrá ocupados en el resto de nuestra aventura. No obstante, una lista más corta de primitivos no es suficiente:

tenemos alrededor de treinta conceptos en nuestra cabeza puede ser tomado como una ofensa por muchas mentes pequeñas. Además, una lista que mantiene que ‘verdad’, ‘creación’, ‘vida’, ‘madre’ y ‘dios’, son compuestos, provocarán intensas reacciones. Tampoco los términos ‘luz’ y ‘movimiento’ figuran en ella. En realidad, algunos de esos términos fueron añadidos en un versión posterior de la lista.

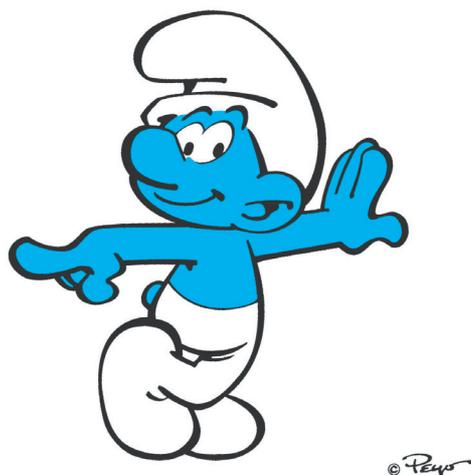


FIGURA 179 Una meta de la física consiste en poder describir toda la Naturaleza en la forma que lo haría un pitufo (smurf): utilizando solamente un único concepto. (© Peyo 2016, licencia a través de I.M.P.S., Brussels, www.smurf.com)

- ▷ La meta de la física (y el nuestro) es llegar a una descripción de la Naturaleza fundándolo solamente en *un* concepto básico.

Los físicos quieren hablar como los *pitufos*: utilizando solamente un único término. Aunque, alcanzar esta meta no es una tarea fácil. Por un lado, necesitamos comprobar si el conjunto de los conceptos físicos clásicos que hemos visto hasta ahora es *completo*. Por ejemplo, ¿pueden los conceptos de la física clásica describir *todas* las observaciones – con precisión? El volumen sobre física cuántica está dedicado a esta cuestión. Por otro lado, necesitamos *reducir* la lista. Esta tarea no es sencilla; ya hemos visto que la física se basa en una definición circular: en la física Galileana, el espacio y el tiempo es definido usando la materia, y para definir la materia se utiliza el espacio y el tiempo. Necesitaremos un verdadero esfuerzo para vencer este obstáculo. La parte final de este texto nos contará la historia precisa de cómo reducir la lista. Tras distintas aventuras descubriremos al fin un concepto básico sobre el cual se basa todo el resto de los otros conceptos.

Podemos resumir todos los resultados de lingüística mencionados anteriormente de la siguiente manera. Si construimos una declaración que conste de nombres, verbos y unos cuantos de los otros conceptos construidos con primitivos semánticos, estaremos seguros que podrá ser traducido a cualquier otro idioma. Esto podría explicar por qué los textos de física son con frecuencia tan *aburridos*: a menudo los autores tienen demasiado miedo de apartarse de este esquema básico de contar las cosas. Por otro lado, la investigación ha demostrado que tales declaraciones simples y directas no son restrictivas. Exagerando un poco: *Con unos cuantos nombres y verbos podemos decir todo lo que pueda ser dicho*.

“Cada palabra fue una vez un poema.
Ralph Waldo Emerson*”

* Ralph Waldo Emerson (b. 1803 Boston, d. 1882 Concord) fue ensayista y un influyente filósofo.

Vol. IV, página ??

Vol. I, página 469

Vol. VI, página ??

¿SON LAS MATEMÁTICAS UN IDIOMA?

«Die Sätze der Mathematik sind Gleichungen, also Scheinsätze. Der Satz der Mathematik drückt keinen Gedanken aus.*
Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 6.2, 6.21»

Hay un grupo de personas que han adoptado una posición extremadamente estricta sobre la traducción y la precisión. Construyen todos los conceptos a partir de un conjunto de primitivos aún más pequeño, reduciéndolo solamente a dos: ‘conjunto’ y ‘relación’, explorando las distintas combinaciones posibles de esos dos conceptos y estudiando sus variadas clasificaciones. Paso a paso, este grupo radical, comúnmente conocidos como *matemáticos*, llegan a definir con una precisión completa conceptos tales como números, puntos, curvas, ecuaciones, grupo de simetrías y muchos más. La construcción de estos conceptos queda resumida parcialmente en lo que sigue y en parte en el próximo volumen de esta aventura.

Vol. IV, página ??

Las matemáticas forman un *vocabulario* que nos ayudan a hablar con precisión. Las matemáticas se pueden ver como la exploración de *todos* los conceptos posibles que se pueden construir a partir de dos pilares fundamentales, ‘conjunto’ y ‘relación’ (o alguna alternativa, pero siendo un par equivalente).

▷ Las *matemáticas* son una ciencia de necesidades simbólicas.

Reformulando nuevamente, podemos decir que las matemáticas son la exploración de todos los tipos posibles de clasificaciones. O, de manera menos humorística: las matemáticas son la exploración de las tautologías. Estos aspectos explican la utilidad de las matemáticas en todas las situaciones donde sean necesarias unas clasificaciones complejas, aunque precisas, de las observaciones, como en el caso de la física.

Sin embargo, las matemáticas no expresan todo lo que los humanos desean comunicar, tal como los deseos, las ideas o los sentimientos. Sólo trate de expresar la diversión que supone el hecho de nadar usando las matemáticas. En verdad, las matemáticas es la ciencia de las *necesidades* simbólicas; Por lo tanto, las matemáticas no son un idioma, ni contienen ninguno. Los conceptos matemáticos, estando fundamentados en conjuntos *abstractos* y relaciones no pertenecen a la Naturaleza. A pesar de su belleza, las matemáticas no nos permiten hablar sobre la Naturaleza o la observación del movimiento. Las matemáticas no expresan *qué* decir sobre la Naturaleza; nos dicen *cómo* contarlos.

En resumen, la precisión de las matemáticas, en particular, su estructura axiomática, tienen una consecuencia no deseada: ningún concepto matemático habla sobre la Naturaleza o sobre las observaciones.**

* ‘Las proposiciones de las matemáticas son ecuaciones, es decir pseudo-proposiciones. Las proposición de las matemáticas no expresan pensamientos.’ Traducción al español de Jesús Padilla Gálvez.

** En la medida en que podamos decir que las matemáticas se fundamentan en los conceptos de ‘conjunto’ y ‘relación’, los cuales están basados en la experiencia, podemos afirmar que las matemáticas exploran una sección de la realidad, y que sus conceptos son *derivados* de la experiencia. Este y otros puntos de vista parecidos de las matemáticas son conocidos como *platonismo*. Más concretamente, el platonismo es la visión de que los conceptos matemáticos existen *independientemente* de las personas, y que han sido

▷ Las matemáticas no son un idioma.

Por tanto, el estudio del movimiento necesita de otros conceptos más útiles.

En su famosa conferencia de París en 1900, el importante matemático David Hilbert* ofreció una lista de 23 grandes desafíos a los que se enfrentan las matemáticas. El sexto de los problemas de Hilbert era encontrar un tratamiento matemático para los axiomas de la física. Hasta ahora nuestra aventura ha demostrado que la física comenzó con una *definición circular* que todavía, tras de 2500 años de investigación, no ha sido eliminada: el espacio-tiempo se define con la ayuda de objetos y los objetos están definidos con la ayuda del espacio y el tiempo. Al estar basada en una definición circular, la física por tanto *no* se tienen como modelo a las matemáticas, aún cuando a muchos físicos y matemáticos, incluyendo a Hilbert, le hubiera gustado que fuera así. Los físicos deben convivir con problemas lógicos y tienen que moverse sobre terrenos inseguros para lograr el progreso. De hecho, lo llevan haciendo desde hace 2500 años.

Vol. I, página 469

Ref. 260

En resumen, las matemáticas no son un lenguaje; la física, sí. Las matemáticas son un sistema axiomático. La física, no lo es. Si la física fuera un sistema axiomático, no contendría definiciones circulares; en ese caso, dejaría de ser un lenguaje y dejaría de describir a la Naturaleza.

▷ La física es un idioma porque no es un sistema axiomático.

Vol. VI, página ??

Volveremos a este fundamental asunto en la última parte de nuestra aventura. Debemos resaltar que los conceptos que se necesitan para una descripción precisa del movimiento deben ser físicos, puesto que los conceptos matemáticos no son suficientes.

“ Insofern sich die Sätze der Mathematik auf die Wirklichkeit beziehen, sind sie nicht sicher, und sofern sie sicher sind, beziehen sie sich nicht auf die Wirklichkeit.** ”

Albert Einstein

descubiertos, que no creados, por los matemáticos.

De hecho, puesto que las matemáticas hacen uso del cerebro, el cual es un sistema físico, en realidad *las matemáticas son física aplicada*.

Vol. VI, página ??

No obstante, descubriremos que el concepto de ‘conjunto’ *no* se aplica a la Naturaleza; esto cambia la discusión por completo.

* David Hilbert (b. 1862 Königsberg, d. 1943 Göttingen) fue profesor de matemáticas en Göttingen y el mayor matemático de su tiempo. Fue una figura fundamental en muchas áreas de las matemáticas, y también desarrolló un importante papel en el nacimiento de la relatividad general y la teoría cuántica. Sus libros de texto todavía se imprimen. Su famoso credo personal era: ‘Wir müssen wissen, wir werden wissen.’ (Debemos conocer, conoceremos.) Su famosa conferencia de París está publicada por ejemplo en *Die Hilbertschen Probleme*, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, 1983. La conferencia galvanizó todas las matemáticas. (A pesar de los esfuerzos y promesas de una fama similar, *nadie* en el mundo había tenido una visión semejante de la matemáticas que le haya permitido (a él o a ella) repetir la hazaña en el año 2000.) Durante su última década fue perseguido por el régimen nazi; la persecución eliminó a Göttingen de la lista de las universidades de ciencias importantes, sin haber podido recuperar su lugar hasta nuestros días.

** ‘En tanto que las declaraciones matemáticas describan la realidad, no son ciertas, y en la medida que en que sean ciertas, no son una descripción de la realidad.’

¿QUÉ ES UN CONCEPTO?

“ Los conceptos son simplemente los resultados, que se vuelven permanentes por el lenguaje, de un proceso previo de comparación. ”
William Hamilton

¿Qué propiedades debe tener un concepto útil? Por ejemplo, ¿qué es la ‘pasión’ y qué es un ‘bastoncillo de algodón’? Obviamente, un concepto útil implica una lista de sus partes, sus aspectos y sus relaciones internas, así como sus relaciones con el mundo exterior. Por lo tanto los pensadores de todos los campos, desde las matemáticas hasta la física, aún desde la filosofía hasta la política, están de acuerdo en que la definición es:

- ▷ Un *concepto* tiene
 1. un *contenido* explícito y fijo,
 2. unos *límites* explícitos y fijos,
 3. un *dominio de aplicación* explícito y fijo.

La incapacidad de establecer estas propiedades o mantenerlas fijas es, a menudo, la manera más fácil de distinguir a los *excéntricos* de los pensadores más fiables. Términos poco definidos, que por tanto no califican como conceptos, aparecen regularmente en los mitos, por ejemplo, ‘dragón’ o ‘esfinge’, o en las ideologías, por ejemplo, ‘trabajador’, ‘alma’ o ‘paradigma’. Aún la física no es inmune. Por ejemplo, descubriremos más adelante que ni el ‘universo’ ni la ‘creación’ son conceptos. ¿Es capaz de discutir el caso?

Desafío 265 s

Pero las tres propiedades definitorias de cualquier concepto son interesantes en sí mismas. Contenido explícito significa que los conceptos están contruidos unos sobre otros. En particular, los conceptos más fundamentales parecen ser aquellos que no tiene partes ni relaciones externas, sino solamente relaciones internas. ¿Puede pensar en uno?

Desafío 266 s

Los requerimientos de límites explícitos y contenidos explícitos también implican que todos los conceptos que describen la Naturaleza son *conjuntos* o *relaciones* o ambos – ya que los conjuntos y las relaciones obedecen los requerimientos de los conceptos.* Puesto que las matemáticas se basan en los conceptos de ‘conjunto’ y de ‘relación’, consideramos que las matemáticas directamente pueden proporcionar la *forma* de cualquier concepto, especialmente siempre que sea requerida una alta precisión, como en el estudio del movimiento. Obviamente, el *contenido* de la descripción solamente es proporcionado por el estudio de la misma Naturaleza; únicamente en ese caso los conceptos se vuelven útiles.

La física es la descripción exacta del movimiento. En física, la búsqueda de conceptos suficientemente precisos pueden verse como el tema único que estructura la larga historia del campo. De manera regular, han sido propuestos nuevos conceptos, explorados en todas sus propiedades y comprobados. Finalmente, los conceptos son rechazados o aceptados, de la misma manera que los niños aceptan o rechazan un nuevo juguete. Los

* Observamos que todo concepto físico es un ejemplo de una *categoría* (matemática), es decir, una combinación de objetos y aplicaciones/relaciones. Para más detalles sobre categorías, con una definición precisa del término, véase la [página 312](#).

niños lo hacen de manera inconsciente, los científicos lo hacen conscientemente, usando el lenguaje.* Por esta razón, los conceptos físicos, y por tanto todos los conceptos, son inteligibles universalmente.

Nótese que el concepto ‘*concepto*’ en sí mismo no es definible independientemente de la experiencia; un concepto es algo que nos ayuda a actuar y reaccionar ante el mundo en que vivimos. Más aún, los conceptos no habitan en un mundo separados del mundo físico; todo concepto necesita de la memoria de su usuario, ya que el usuario tiene que recordar la forma en la que se produjo; por lo que todo concepto necesita de un soporte material para su uso y aplicación. Por tanto todo pensamiento y toda la ciencia se basa fundamentalmente en la experiencia.

En conclusión, todos los conceptos están concebidos sobre la idea de que la Naturaleza está hecha de partes relacionadas. Esta idea conduce a parejas complementarias tales como ‘nombre-verbo’ en lingüística, ‘conjunto-relación’ o ‘definición-teorema’ en matemáticas, y ‘aspecto de la Naturaleza-patrón de la Naturaleza’ en física. Estas parejas guían de manera constante al pensamiento humano, desde la niñez en adelante, como la psicología del desarrollo puede testificar. Ahora exploremos algunos conceptos específicos de importancia para nuestra aventura.

¿QUÉ SON LOS CONJUNTOS? ¿QUÉ SON LAS RELACIONES?

“Alles, was wir sehen, könnte auch anders sein.
Alles, was wir überhaupt beschreiben können,
könnte auch anders sein. Es gibt keine Ordnung
der Dinge a priori.**”
Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 5.634

La definición de los conjuntos y la definición de las relaciones constituyen los dos actos fundamentales de nuestro pensamiento. Esto podría ser visto con mayor claridad en cualquier libro de matemáticas; tales libros, generalmente estarán divididos en apartados etiquetados como ‘definición’ por una parte, y ‘teorema’, ‘lema’ y ‘corolario’ de otra. El primer tipo de párrafo introduce al conjunto, y los otros párrafos expresan las relaciones, es decir, las conexiones entre estos conjuntos o los otros elementos. Las *matemáticas* consisten por tanto en la exploración de los posibles conceptos simbólicos y sus relaciones. Como se ha dicho anteriormente, las matemáticas son la ciencia de las necesidades simbólicas.

Conjuntos y relaciones son las herramientas para la clasificación; esto es el por qué ellas son también las herramientas de cualquier burócrata. (Véase la [Figura 180](#).) Esta clase de humanos se caracteriza por la utilización incesante de clips para el papel, ficheros, armarios metálicos, archivos – los cuales definen distintos tipos de conjuntos – y por el

* Los conceptos formados de manera inconsciente en nuestra temprana juventud son los más difíciles de definir con precisión, es decir, mediante el lenguaje. Alguien que no fuera capaz de definirlos, como le ocurrió con alguno de ellos al influyente filósofo Immanuel Kant (b. 1724 Königsberg, d. 1804 Königsberg), solía llamarlos conceptos ‘a priori’ (tales como el ‘espacio’ y el ‘tiempo’) en contraste con los definidos más claramente a los que llamaba conceptos ‘a posteriori’. Hoy, esta distinción se ha demostrado que es infundada tanto por el estudio de la psicología infantil (véase la nota al pie de la [página 275](#)) como por la física misma, por lo que estas calificaciones no serán utilizadas en nuestro paseo.

** ‘Todo lo que vemos podría ser diferente. Todo lo que generalmente podemos describir podría ser también diferente. No hay orden de las cosas a priori.’ Traducción al español de Jesús Padilla Gálvez.

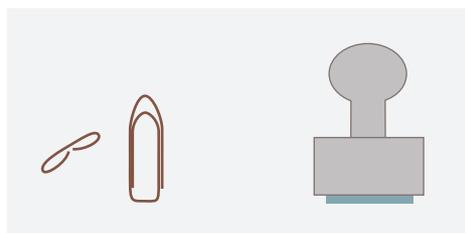


FIGURA 180 Dispositivos para la definición de los conjuntos (izquierda) y las relaciones (derecha).

TABLA 22 Propiedades que definen a un conjunto – los axiomas ZFC.

LOS AXIOMAS DE ZERMELO-FRAENKEL-C PARA LA TEORÍA DE CONJUNTOS

- Dos conjuntos son iguales si y sólo si tienen los mismos elementos. (Axioma de extensionalidad)
- El conjunto vacío es un conjunto. (Axioma del conjunto nulo)
- Si x e y son conjuntos, entonces el par desordenado $\{x, y\}$ es un conjunto. (Axioma de los pares desordenados)
- Si x es un conjunto de conjuntos, la unión de todos sus miembros es un conjunto. (axioma del conjunto unión o suma)
- La entidad $\{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\{\emptyset\}\}, \{\{\{\emptyset\}\}\}, \dots\}$ es un conjunto^a – en otras palabras, las colecciones infinitas, tales como los números naturales, son conjuntos. (Axioma de infinitud)
- Una entidad definida por todos los elementos que poseen una determinada propiedad es un conjunto, siempre que esta propiedad sea razonable; son importantes algunos tecnicismos para definir ‘razonable’. (Axioma de separación)
- Si el dominio de un conjunto es un conjunto, también lo es su rango. (Axioma de sustitución)
- La entidad y de todos los subconjuntos de x es también un conjunto, llamado conjunto de potencia. (Axioma del conjunto de potencia)
- Un conjunto no es un elemento de sí mismo – con algunos tecnicismos. (Axioma de regularidad)
- El producto de una familia de conjuntos no vacíos no está vacío. De manera equivalente, la extracción de elementos de una lista de conjuntos permite la formación de un nuevo conjunto – además de algunos tecnicismos. (Axioma de elección, C)

a. La formulación más común (aunque equivalente a la de arriba) es ésta: La entidad $\{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}\}, \{\emptyset, \{\{\emptyset\}\}\}, \dots\}$ es un conjunto.

uso extensivo de números, tales como referencias numéricas, números de cliente, números de pasaporte, números de cuenta, números de artículos de la ley – los cuales definen distintos tipos de relaciones entre las cosas o apartados, es decir, entre los elementos de los conjuntos.

En resumen, las matemáticas, en el peor de los casos, es la burocracia de la física. Las matemáticas, en el mejor de los casos, guía nuestros pensamientos hacia un nuevo conocimiento.

Ambos conceptos de conjunto y relación expresan, de diferente manera, el hecho de que la Naturaleza pueda ser *descrita*, es decir, que puede ser *clasificada* como partes que forman un todo. El acto de agrupar aspectos de la experiencia, o sea, el acto de clasificarlos, se expresa en lenguaje formal diciendo que un conjunto está definido. En otras

palabras, un *conjunto* es una colección de *elementos* de nuestro pensamiento. En cada conjunto se distinguen los elementos unos de otros, así como del conjunto mismo. Esta definición de ‘conjunto’ es conocida como definición *ingenua*. Para los físicos, la definición es suficiente, pero no encontrará a muchos que lo admitan. De hecho, los matemáticos han redefinido la definición del concepto de ‘conjunto’ varias veces, porque la definición ingenua no funciona bien con los conjuntos infinitos. Un ejemplo famoso es la historia sobre los conjuntos que no se contienen a sí mismos. Obviamente, cualquier conjunto es de dos formas: o se contiene así mismo o no se contiene. Si tomamos el conjunto de todos los conjuntos que *no* se contienen a sí mismo, ¿a qué clase pertenece?

Desafío 267 s

Para evitar problemas con el concepto de ‘conjunto’, los matemáticos requieren una definición exacta. La primera de tales definiciones fue proporcionada por los matemáticos Ernst Zermelo (b. 1871 Berlin, d. 1951 Freiburg i.B.) y Adolf/Abraham Fraenkel (b. 1891 München, d. 1965 Jerusalem). Posteriormente, fue añadido el llamado *axioma de elección*, con objeto de hacer posible la manipulación de una clase más amplia de conjuntos infinitos. El resultado de esos esfuerzos es conocido como la *definición de conjunto ZFC*, que queda reflejada en la [Tabla 22](#).^{*} A partir de esta definición básica se pueden construir todos los conceptos matemáticos utilizados en la física. Desde un punto de vista práctico, es suficiente con tener en cuenta que para la totalidad de la física, la definición ingenua de un conjunto es equivalente a la definición exacta ZFC, en realidad, también a la definición más sencilla de ZF. Las sutilezas aparecen sólo para algunos tipos especiales de conjuntos infinitos, pero éstos no se utilizan en física. En resumen, a partir de la definición básica, ingenua, de un conjunto, se pueden construir todos los conceptos utilizados en la física.

Ref. 247

La definición ingenua de conjunto, dista mucho de ser aburrida. Para satisfacer a dos personas cuando se parte un pastel, se sigue la regla: yo corto y tu eliges. El método presenta dos propiedades: es *justo*, ya que cada uno piensa que tiene la parte que desea, y es *completamente satisfactorio*, ya que ambos sienten que tienen al menos, tanto como el otro. ¿Cual sería la regla para tres personas? ¿Y para cuatro?

Desafío 269 d

Además de definir conjuntos, cada niño y cada cerebro crea vínculos entre los diferentes aspectos de la experiencia. Por ejemplo, cuando se oye una voz, automáticamente se establece la conexión de que un humano está presente. En lenguaje formal, las conexiones de este tipo, reciben el nombre de *relaciones*. Las relaciones conectan y diferencian elementos por otras líneas distintas a la de los conjuntos: las dos forman una pareja complementaria. La definición de un conjunto unifica a muchos objetos pero al mismo

^{*} Una visión global de la teoría de conjuntos axiomáticos es la dada por PAUL J. COHEN & REUBEN HERSCH, *Non-Cantorian set theory*, Scientific American 217, pp. 104–116, 1967. Aquellos eran los tiempos en los que la Scientific American era una revista de calidad.

Para una buena introducción al axioma de elección, consultar el sitio web www.math.vanderbilt.edu/~schectex/ccc/choice.html.

Ref. 246

También se pueden definir otros tipos de entidades, más generales que la de los conjuntos estándar, que obedezcan otras propiedades, y que son objeto de investigación matemática, aunque comparativamente resulte pequeña. Como ejemplo, consulte la sección sobre cardinales más adelante. Esas entidades más generales reciben el nombre de clases siempre que contengan al menos un conjunto. ¿Puede darnos un ejemplo? En la parte final del ascenso a la montaña nos encontraremos con conceptos físicos que no son descritos como conjuntos ni como clases, y que no contienen ningún conjunto en absoluto. Ahí es donde comienza la verdadera diversión.

Página 311

Desafío 268 s

tiempo los divide en dos: aquellos que pertenecen al conjunto y aquellos que no pertenecen; definir una relación (binaria) unifica los elementos dos a dos y los divide en muchos, es decir, en las muchas parejas que define.

Desafío 270 s

Conjuntos y relaciones son conceptos íntimamente interconectados. De hecho, uno puede definir relaciones (matemáticas) con la ayuda de los conjuntos. Una *relación (binaria)* entre dos conjuntos X e Y es un subconjunto del conjunto producto, donde el *conjunto producto* o *producto Cartesiano* $X \times Y$ es el conjunto de todos los pares ordenados (x, y) con $x \in X$ e $y \in Y$. Un *par ordenado* (x, y) puede ser definido con facilidad con la ayuda de los conjuntos. ¿Puede encontrar cómo? Por ejemplo, en el caso de la relación, ‘es esposa de’, el conjunto X es el conjunto de todas las mujeres y el conjunto Y es el de todos los hombres; la relación viene dada por la lista de los pares ordenados adecuadamente, que resulta mucho más pequeña que el conjunto producto, es decir, el conjunto de todas las combinaciones posibles de mujer-hombre.

Cabría señalar que la definición que se acaba de dar no es verdaderamente completa, ya que toda construcción del concepto ‘conjunto’ ya contiene ciertas relaciones, tales como la relación ‘es elemento de’ (o ‘pertenece a’). No parece ser posible reducir cualquiera de los conceptos ‘conjunto’ o ‘relación’ completamente al otro. Esta situación es reflejada en los casos físicos de conjuntos y relaciones, tal como el espacio (como conjunto de puntos) y la distancia, los cuales también parece imposible de separar el uno del otro. En otras palabras, aunque las matemáticas no forman parte de la Naturaleza, sus dos conceptos básicos, conjuntos y relaciones, están tomados de la Naturaleza. Además, los dos conceptos, como el espacio-tiempo y las partículas, vienen definidos basándose el uno en el otro.

EL INFINITO – Y SUS PROPIEDADES

Los matemáticos descubrieron pronto que el concepto de ‘conjunto’ solamente resultaba útil si también se podía llamar ‘conjunto’ a todas las agrupaciones de elementos del tipo $\{0, 1, 2, 3, \dots\}$, es decir, del número 0 y de todos sus sucesores. Para conseguirlo, una propiedad de la lista de Zermelo–Fraenkel para definir el término ‘conjunto’ – dada en la [Tabla 22](#) – explicita específicamente que esta colección infinita puede ser llamada conjunto. (De hecho, también el axioma de sustitución establece que los conjuntos pueden ser infinitos.) Por tanto el infinito se introduce en las matemáticas y fue añadido a la herramientas de nuestro pensamiento desde el principio, en la definición del término ‘conjunto’. Cuando se describa la Naturaleza, con o sin matemáticas, nunca se debería olvidar este hecho. Sobre el infinito deberían ser de general conocimiento para cualquier experto en el movimiento varios puntos adicionales.

Un conjunto es infinito si hay una función de sí mismo que es *inyectiva* (es decir, que diferentes elementos se aplican a diferentes resultados) pero no *sobre* (es decir, que algunos elementos no aparecen como imágenes de la correspondencia); por ejemplo, la aplicación $n \mapsto 2n$ muestra que el conjunto de enteros es infinito. El infinito también se puede comprobar de otra manera: un conjunto es infinito si no sufre variación tras eliminar un elemento, incluso repitiendo la operación. Sólo necesitamos recordar que el conjunto vacío es *finito*.

Solamente los *conjuntos* pueden ser infinitos. Y los conjuntos tiene partes, que son llamadas elementos. Cuando una cosa o un concepto es llamado ‘infinito’ *siempre* po-

dremos preguntarnos cuales son sus partes específicas: para el espacio las partes son los puntos, para el tiempo son los instantes, para el conjunto de los enteros son los enteros, etc. Una entidad indivisible o divisible de manera finita no podrá ser denominada infinita.*

Hay *muchos tipos* de infinitos, todos de diferentes tamaños.** Este importante resultado fue descubierto por el importante matemático Georg Cantor (b. 1845 Saint Petersburg, d. 1918 Halle an der Saale). Demostró que partiendo del conjunto contable de los números naturales se pueden construir infinitos conjuntos que no son contables. Lo hizo mostrando que el *conjunto potencia* $P(\omega)$, concretamente el conjunto de todos los subconjuntos, de un conjunto infinitamente contable es infinito, pero *no* contablemente infinito. Coloquialmente hablando, el conjunto potencia es ‘más infinito’ que su conjunto original. Para definirlo brevemente, los números reales \mathbb{R} , son un ejemplo de conjunto incontablemente infinito; hay muchos más de ellos que números naturales. (¿Podría demostrarlo?) No obstante, *cualquier* tipo de conjunto infinito contiene al menos un subconjunto que es infinito contablemente.

Incluso para un conjunto infinito se puede definir el tamaño como el número de sus elementos. Cantor llamó a este concepto de tamaño la *cardinalidad* de un conjunto. La cardinalidad de un conjunto finito viene dada simplemente por el número de sus elementos. La cardinalidad de un conjunto potencia resulta ser 2 elevado a la cardinalidad del conjunto. La cardinalidad del conjunto de los enteros es llamada \aleph_0 , pronunciada ‘aleph cero’, después de la primera letra del alfabeto Hebreo. El cardinal *incontable* más pequeño es llamado \aleph_1 . El cardinal siguiente es \aleph_2 etc. Una rama completa de las matemáticas se interesa por la manipulación de estos ‘números’ infinitos; la suma, el producto, la potenciación son definidos fácilmente. Para algunos de ellos, tienen sentido incluso los logaritmos y otras funciones.

Los cardinales definidos utilizando los conjuntos de potencia, incluyendo \aleph_n , \aleph_ω y \aleph_{\aleph_n} , son llamados *accesibles*, porque a partir de Cantor, la gente ha definido tipos de infinitos aún mayores, llamados *inaccesibles*. Estos números (cardinales inaccesibles, cardinales mensurables, cardinales supercompactos, etc.), necesitan axiomas de conjunto adicionales, extendiendo el sistema ZFC. Como los ordinales y los cardinales, forman ejemplos de lo que se conocen como números *transfinitos*.

Los números reales tienen la cardinalidad del conjunto de potencia de los enteros, a saber 2^{\aleph_0} . ¿Puede demostrarlo? El resultado nos lleva a la famosa pregunta: ¿Es el $\aleph_1 = 2^{\aleph_0}$ o no? La declaración de que esto es así es llamada *hipótesis del continuo* y no pudo ser probada durante varias generaciones. La sorprendente respuesta llegó en 1963: la definición usual para el concepto de conjunto no era suficientemente específica para llegar a la respuesta. Mediante la especificación del concepto de conjunto con más detalles, con axiomas adicionales – hay que recordar que los axiomas son las propiedades definitorias – se puede conseguir que la hipótesis del continuo aparezca como correcta o como equivocada, como se prefiera.

* Por lo tanto, la mayoría de los dioses, en tanto que conceptos y en consecuencia conjuntos, son o bien finitos o, en el caso de que sean infinitos, son divisibles. Tal parece que solamente el punto de vista de los mundos panteísta o politeísta no son perturbados por esta conclusión.

** En realidad, hay un número tan grande de tipos de infinitos que ninguno de esos infinitos por sí mismo describe verdaderamente este número. Técnicamente hablando, hay tantos infinitos como ordinales.

Ref. 248

Es importante otro resultado en la investigación de los transinfinitos: para cada definición de un tipo de infinito cardinal, parece que es posible encontrar uno mayor. En la vida cotidiana, la idea de infinito se utiliza con frecuencia para zanjar las discusiones sobre el tamaño: ‘Mi hermano mayor es más fuerte que el tuyo.’ ‘¡Pero el mío es infinitamente más fuerte que el tuyo!’ Sin embargo las matemáticas han demostrado que las cuestiones de tamaño continuarán después de todo: ‘La fortaleza de mi hermano es la del conjunto de potencia de la del tuyo!’ Rucker informa que los matemáticos conjeturan que no hay posibilidad ni es concebible terminar con estas discusiones.

Desafío 273 e

Para los físicos, surge directamente una pregunta simple. ¿Existen las cantidades infinitas en la Naturaleza? O mejor, ¿es necesario utilizar cantidades infinitas para describir la Naturaleza? Es posible que usted quisiera clarificar su propia opinión sobre este asunto. La pregunta se resolverá en lo que queda de nuestra aventura.

FUNCIONES Y ESTRUCTURAS

¿Qué relaciones son útiles para describir los patrones en la Naturaleza? Un ejemplo típico es ‘piedras mayores y más pesadas’. Semejante relación es la de un tipo específico que relaciona un valor específico de un ‘volumen’ observable con valor específico de un ‘peso’ observable. A tal relación uno-a-uno se la conoce como *función (matemática)* o *aplicación*. Las funciones son los tipos más específicos de relaciones; así transmiten un máximo de información. De la misma manera en la que los números son usados como observables, las funciones permiten una comunicación fácil y precisa de las relaciones entre las observaciones. Todas las reglas y las ‘leyes’ físicas son expresadas por tanto con la ayuda de las funciones y, ya que las ‘leyes’ físicas tratan sobre las medidas, las funciones y los números son sus pilares principales.

Una *función* f , o *aplicación*, es por tanto una relación binaria, es decir, un conjunto $f = \{(x, y)\}$ de pares ordenados, donde para cada valor del primer elemento x , llamado *argumento*, existe sólo *un* par (x, y) . Al segundo elemento y , se lo conoce como *valor* de la función para el argumento x . El conjunto X de todos los argumentos x , es llamado *dominio de definición* y al conjunto Y de todos los segundos argumentos y , se le conoce con el nombre de *rango* de la función. En lugar de $f = \{(x, y)\}$ se escribe

$$f: X \rightarrow Y \quad \text{y} \quad f: x \mapsto y \quad \text{o} \quad y = f(x), \quad (98)$$

donde el tipo de flecha – con barra inicial o no – muestra si estamos hablando de conjuntos o de elementos.

Debemos resaltar que también es posible el uso de la pareja ‘conjunto’ y ‘aplicación’ para definir conceptos matemáticos; en este caso una relación viene definida con la ayuda de las aplicaciones. Una escuela moderna de pensamiento matemático formalizó este enfoque con el uso de *categorías* (matemáticas), un concepto que incluye a los conjuntos y las relaciones en igualdad de condiciones en su definición.*

Ref. 250

Página 354

* Una *categoría* (matemática) viene definida por una colección de objetos y una colección de ‘morfismos’, o aplicaciones. Los morfismos pueden ser compuestos; la composición es asociativa y existe un morfismo identidad. Se pueden encontrar más detalles sobre esto en la literatura.

Obsérvese que todas las categorías contienen un conjunto; ya que no está claro si la Naturaleza contiene conjuntos, como discutiremos posteriormente, es cuestionable si las categorías resultarán útiles para la

Para poder pensar y hablar con más claridad sobre la Naturaleza, es necesario definir conceptos más especializados que los conjuntos, las relaciones y las funciones, ya que estos términos básicos resultan demasiado generales. Los conceptos más importantes derivados de ellos son las operaciones, las estructuras algebraicas y los números.

Una *operación (binaria)* es una función que aplica el producto cartesiano de dos copias de un conjunto X sobre sí mismo. En otras palabras, una operación w toma una pareja ordenada de argumentos $x \in X$ y le asigna un valor $y \in X$:

$$w : X \times X \rightarrow X \quad \text{y} \quad w : (x, x) \mapsto y . \quad (99)$$

Desafío 274 s ¿Es la división de los números una operación en el sentido que la acabamos de definir?

Ahora estamos en condiciones de definir los tres conceptos básicos de las matemáticas. Una *estructura algebraica*, también llamada *sistema algebraico*, es (en el sentido más restrictivo) un conjunto con determinadas operaciones. Las estructuras algebraicas más importantes que aparecen en la física son los grupos, los vectores espaciales, y las álgebras.

Además de en las estructuras algebraicas, las matemáticas se basan en *estructuras de orden* y en *estructuras topológicas*. Las estructuras de orden son los pilares de los números y son necesarios para determinar las comparaciones de cualquier clase. Las estructuras topológicas se construyen vía subconjuntos sobre el concepto de vecindad. Son necesarias para definir la continuidad, los límites, la dimensionalidad, los espacios topológicos y múltiples.

Obviamente, la mayoría de las estructuras matemáticas son combinaciones de varios ejemplos de estas tres tipos de estructuras básicas. Por ejemplo, el *sistema* de los números reales viene dado por el *conjunto* de los números reales con las *operaciones* de adición y multiplicación, la *relación de orden* ‘es mayor que’ y una propiedad de *continuidad*. Están contruidos por lo tanto por combinaciones de una estructura algebraica, una estructura de orden y una estructura topológica. Profundicemos un poco en los detalles.

Ref. 251

NÚMEROS

Desafío 275 s

“¿Qué números están multiplicados por seis cuando su último dígito es eliminado y transferido al principio?”

Los números son los conceptos matemáticos más antiguos y se encuentran en todas las culturas. La noción de número, en Griego ἀριθμός, ha sido modificada varias veces. Siempre el objetivo ha consistido en incluir una mayor clase de objetos, pero siempre manteniendo la idea general de que los números son entidades que pueden ser sumadas, restadas, multiplicadas y divididas. La forma moderna de escribir números, como por ejemplo en $12\,345\,679 \cdot 54 = 666\,666\,666$, resulta fundamental para la ciencia.* Se puede argumentar que la falta de un buen sistema para escribir y calcular números retrasó

unificación de la física, a pesar de su intenso y abstracto encanto.

* No obstante, no hay necesidad de números escritos para hacer matemáticas, tal como demuestra el interesante libro de MARCIA ASCHER, *Ethnomathematics – A Multicultural View of Mathematical Ideas*, Brooks/Cole, 1991.

el progreso de la ciencia durante varios siglos. Por cierto, se puede reclamar el mismo retraso por la falta de una asequible reproducción en masa de textos escritos.

Desafío 276 s

Los números más sencillos, 0, 1, 2, 3, 4, ..., generalmente son vistos como tomados de la propia experiencia. No obstante, también pueden ser contruidos a través de las nociones de 'relación' y 'conjunto'. Una de las muchas posibles formas de hacerlo (¿podría encontrar otra?) es mediante la identificación de un número natural con el conjunto de sus predecesores. Con la relación 'siguiente de', abreviado como S , esta definición se puede escribir como

$$\begin{aligned} 0 &:= \emptyset, & 1 &:= S 0 = \{0\} = \{\emptyset\}, \\ 2 &:= S 1 = \{0, 1\} = \{\emptyset, \{\emptyset\}\} & \text{y} & \quad n + 1 := S n = \{0, \dots, n\}. \end{aligned} \quad (100)$$

Este conjunto, unido a las operaciones binarias 'adición' y 'multiplicación,' constituyen el sistema algebraico $N = (N, +, \cdot, 1)$ de los *números naturales*. Para todos los sistemas numéricos el sistema algebraico y el conjunto se designan de manera descuidada con el mismo signo. El sistema algebraico N es los que los matemáticos llaman un semi-anillo. (Algunos autores prefieren no incluir al número cero como un número natural.) Los números naturales son bastante útiles.

Vol. IV, página ??

TABLA 23 Algunos grandes números.

NÚMERO	EJEMPLO EN LA NATURALEZA
A nuestro alrededor	
1	número de ángeles que pueden estar en un lugar al mismo tiempo, siguiendo a Tomás de Aquino Ref. 253
8	número de veces que se puede plegar un periódico en direcciones perpendiculares alternativas
12	mayor número de veces que una tira de papel puede ser doblada en la misma dirección Ref. 254
20	número de dígitos en mediciones de precisión que probablemente nunca se conseguirán
21, 34, 55, 89	pétalos de los tipos comunes de margaritas y girasoles Ref. 255
57	facetas de un diamante con talla en brillante
2000 a 6000	estrellas visibles en el cielo por la noche
15 000	número medio de objetos en un hogar europeo
10^5	hojas en un árbol (haya de 10 m)
$6 \text{ a } 7 \cdot 10^9$	humanos en el año 2000
10^{17}	hormigas en el mundo
$c. 10^{20}$	número de copos de nieve que caen sobre la Tierra al año
$c. 10^{24}$	granos de arena en el desierto de Sahara
10^{22}	estrellas en el universo
$10^{25 \pm 1}$	células en la Tierra
$1,1 \cdot 10^{50}$	átomos que componen la Tierra ($6370^3 \text{ km}^3 \cdot 4 \cdot 3,14/3 \cdot 5500 \text{ kg/m}^3 \cdot 30 \text{ mol/kg} \cdot 6 \cdot 10^{23} \text{ /mol}$)

NÚMERO	EJEMPLO EN LA NATURALEZA
10^{81}	átomos en el universo visible
10^{90}	fotones en el universo visible
10^{169}	número de átomos que componen el universo visible
10^{244}	número de puntos del espacio-tiempo dentro del universo visible
Información	
51	número récord de idiomas hablados por una persona
c. 5000	palabras habladas como promedio diario por un hombre
c. 7000	palabras habladas como promedio diario por una mujer
c. 2 000 000	número de científicos sobre la Tierra alrededor del año 2000
$3 \cdot 10^8$	palabras habladas durante la vida (2/3 del tiempo despierto, 30 palabras por minuto)
10^9	palabras oídas y leídas durante la vida
$4 \cdot 10^9$	pulsos intercambiados entre ambas mitades del cerebro cada segundo
$3 \cdot 10^{12}$	número de árboles de la Tierra
10^{17}	píxeles de imagen vistos durante la vida ($3 \cdot 10^9$ s · (1/15 ms) · 2/3 (despierto) · 10^6 (nervios al cerebro) Ref. 256)
10^{19}	bits de información procesados durante la vida (lo de arriba multiplicado por 32)
c. $5 \cdot 10^{12}$	palabras impresas disponibles en (diferentes) libros alrededor del mundo (c. $100 \cdot 10^6$ libros que contengan 50 000 palabras)
$2^{10} \cdot 3^7 \cdot 8! \cdot 12!$ $= 4,3 \cdot 10^{19}$	posiciones posibles del Cubo de Rubik de $3 \times 3 \times 3$
Ref. 257	
$5,8 \cdot 10^{78}$	posiciones posibles de un cubo parecido al de Rubik de $4 \times 4 \times 4$
$5,6 \cdot 10^{117}$	posiciones posibles de un cubo parecido al de Rubik de $5 \times 5 \times 5$
c. 10^{200}	jugadas posibles del ajedrez
c. 10^{800}	jugadas posibles del Go
c. 10^{10^7}	estados posibles en un ordenador personal
Nuestras partes	
600	números de músculos del cuerpo humano, de los cuales hacia la mitad están en la cara
150 000 ± 50 000	pelos en una cabeza saludable
900 000	neuronas en el cerebro de un saltamontes
$126 \cdot 10^6$	células sensibles a la luz por retina (120 millones de bastoncillos y 6 millones de conos)
$86(8) \cdot 10^9$	neuronas en el cerebro humano
$500 \cdot 10^6$	parpadeos del ojo durante la vida (aproximadamente una vez cada cuatro segundos cuando se está despierto)
$300 \cdot 10^6$	respiraciones realizadas durante la vida humana
$3 \cdot 10^9$	latidos del corazón durante la vida humana
$3 \cdot 10^9$	letras (pares de bases) en el haploide humano human DNA
$10^{15 \pm 1}$	células en el cuerpo humano

NÚMERO	EJEMPLO EN LA NATURALEZA
$10^{16\pm 1}$	bacterias transportadas en el cuerpo humano

Vol. IV, página ??

Ref. 258

El sistema de *enteros* $Z = (\dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, +, \cdot, 0, 1)$ es el anillo mínimo que es una extensión de los números naturales. El sistema de los *números racionales* $Q = (Q, +, \cdot, 0, 1)$ es el campo mínimo que es una extensión del anillo de los enteros. (Los términos ‘anillo’ y ‘campo’ están definidos con todo detalle en el siguiente volumen.) El sistema de los *números reales* $R = (R, +, \cdot, 0, 1, >)$ de la extensión mínima de los racionales que son continuos y totalmente ordenados. (Para la definición de continuidad, véase el volumen IV, página ??, y el volumen V, página ??.) De manera equivalente, los reales son la extensión mínima de los racionales que forman un campo ordenado completo, total y estrictamente Arquimediano. Esta es la construcción histórica – o definición – de los números enteros, racionales y reales a partir de los números naturales. No obstante, no es la única construcción posible. La definición más hermosa de todos estos tipos de números es la descubierta en 1969 por John Conway, y que fue popularizada por él mismo, Donald Knuth y Martin Kruskal.

▷ Un *número* es una secuencia de bits.

Los dos bits son llamados generalmente ‘arriba’ y ‘abajo’. En la [Figura 181](#) se muestran ejemplo de números y de cómo escribirlos.

La secuencia vacía es el número cero. Una secuencia finita de n ‘arribas’ es el número entero n , y una secuencia finita de n ‘abajos’ es el entero $-n$. Las secuencias finitas de mezcla de arribas y abajos dan los *números racionales diádicos*. Son ejemplos 1, 2, 3, -7 , $19/4$, $37/256$, etc. Todos ellos tiene denominadores con una potencia de 2. Los otros *números racionales* son aquellos que finalizan en una serie repetida infinita de arribas y abajos, tales como los *reales*, los *infinitesimales* los números infinitos simples. Las series contables infinitas dan número todavía más locos.

A la clase completa de números que está definida por una secuencia de bits de le llama clase de números *surreales*.*

Hay una segunda forma de escribir los números surreales. La primera es la ya mencionada secuencia de bits. Pero para poder definir la adición y la multiplicación, generalmente se usa otra notación, extraída de la [Figura 181](#). Un α surreal es define como el primer número de todos aquellos entre dos series surreales anteriores, las series de la izquierda y de la derecha:

$$\alpha = \{a, b, c, \dots | A, B, C, \dots\} \quad \text{con} \quad a, b, c, < \alpha < A, B, C. \quad (101)$$

* Los números surreales *no* forman un conjunto ya que contienen todos los *números ordinales*, que por si mismos no forman un conjunto, a pesar de que por supuesto *contienen* conjuntos. En resumen, ordinales y surreales son clases que son *mayores* que los conjuntos.

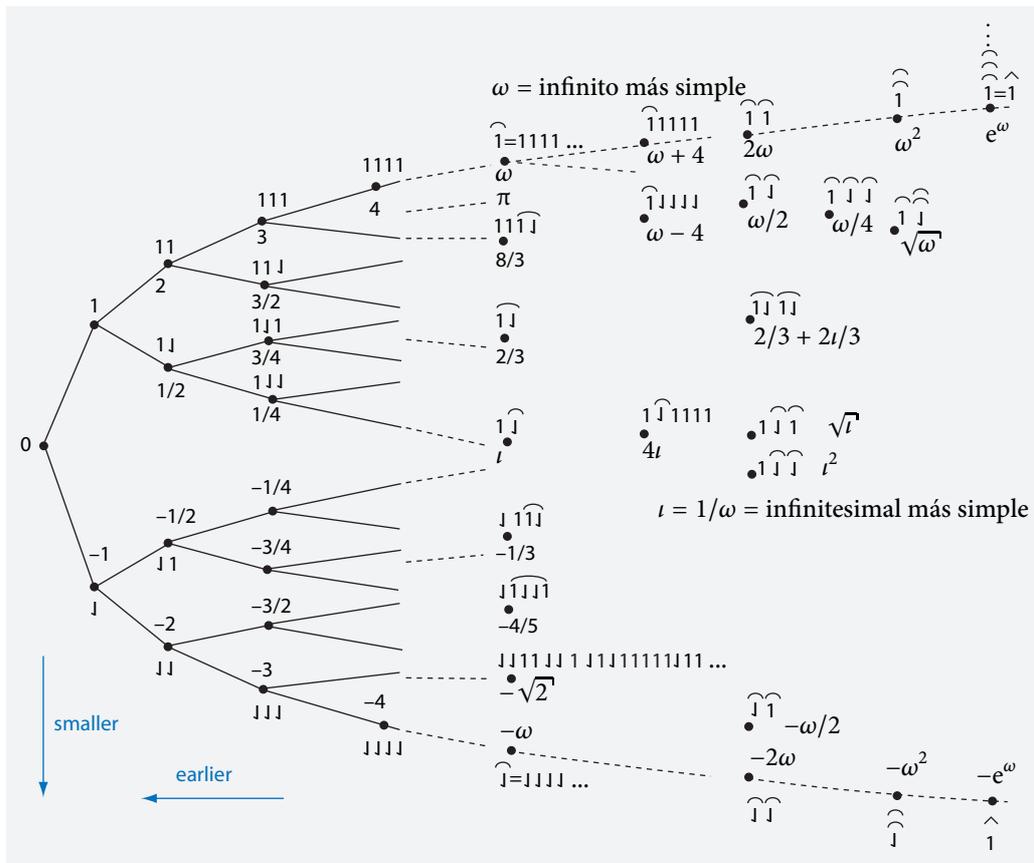


FIGURA 181 Los números surreales en notación convencional y en notación bit.

Por ejemplo, sean

$$\{0\} = 1, \{0, 1\} = 2, \{0\} = -1, \{-1, 0\} = -2, \{0|1\} = 1/2, \\ \{0|1/2, 1/4\} = 1, \{0, 1, 3/2, 25/16|41/16, 13/8, 7/4, 2\} = 1 + 37/64, \quad (102)$$

que muestran que los surreales finitos son los números diádicos $m/2^n$ (siendo enteros n y m). Dados dos surreales $\alpha = \{..., a, ...|..., A, ...\}$ con $a < \alpha < A$ y $\beta = \{..., b, ...|..., B, ...\}$ con $b < \beta < B$, la adición se define de forma recurrente, usando números anteriores ya definidos, como

$$\alpha + \beta = \{..., a + \beta, ..., \alpha + b, ...|..., A + \beta, ..., \alpha + B, ...\}. \quad (103)$$

Esta definición se utiliza simplemente porque da los mismos resultados que la suma usual para los enteros y los reales. ¿Puede confirmarlo? Por cierto, la suma no es siempre conmutativa. ¿Es capaz de encontrar las excepciones, y encontrar la definición para la resta? La multiplicación también se define de manera recurrente, específicamente por la expres-

Desafío 277 s

sión

$$\alpha\beta = \{ \dots, a\beta + \alpha b - ab, \dots, A\beta + \alpha B - AB, \dots | \dots, a\beta + \alpha B - aB, \dots, A\beta + \alpha b - Ab, \dots \} . \quad (104)$$

Estas definiciones nos permiten escribir $\iota = 1/\omega$, y hablar sobre números tales como $\sqrt{\omega}$, la raíz cuadrada de infinito, sobre $\omega + 4$, $\omega - 1$, 2ω , e^ω y sobre otros números extraños mostrados en la [Figura 181](#). No obstante, los números surreales no se usan comúnmente. Resulta más común uno de sus subconjuntos.

Ref. 258

Los *números reales* son aquellos surreales cuya expansión decimal no es mayor que infinito y además equiparan números como 0,999999... y 1,000000..., así como todos los casos similares. En otras palabras, los surreales distinguen el número 0,999999... del número 1, mientras que los reales, no lo hacen. En realidad, entre esos dos números surreales hay infinitamente otros surreales. ¿Puede señalar algunos?

Desafío 278 s

Los reales son mucho más útiles para describir la Naturaleza que los surreales, primero porque forman un *conjunto* – que los surreales, no – y en segundo lugar porque permiten la definición de la *integración*. Otros números definidos con la ayuda de los reales, como por ejemplo, los números complejos \mathbb{C} , los cuaterniones \mathbb{H} y unos cuantos sistemas numéricos más elaborados, serán presentados en el siguiente volumen.

Vol. IV, página ??

Para concluir, en física es corriente llamar *números* a los elementos de cualquier conjunto que sea un semi-anillo (por ejemplo \mathbb{N}), un anillo (por ejemplo \mathbb{Z}) o un campo (\mathbb{Q} , \mathbb{R} , \mathbb{C} o \mathbb{H}). Puesto que los números nos permiten comparar magnitudes y por tanto *medir*, estos números juegan un papel fundamental en la descripción de las observaciones.

Ref. 259

“Una serie de bolas iguales es empaquetada de tal manera que la superficie de papel que se necesita para envolverlas es mínima. Para un número pequeño de bolas, el empaquetado lineal, con todas las bolas en fila, es la mas eficiente. ¿Para qué número de bolas el empaquetado lineal ya no es un mínimo?”

Desafío 279 s

¿SON SIEMPRE ÚTILES LAS MATEMÁTICAS?

“Die Forderung der Möglichkeit der einfachen Zeichen ist die Forderung der Bestimmtheit des Sinnes.*”

Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 3.23

Los números, así como la mayoría de los otros conceptos matemáticos, fueron desarrollados precisamente con el objetivo de describir la Naturaleza.

- ▷ Desde el principio, los números y los conceptos matemáticos se desarrollaron para proporcionar una descripción lo más breve posible.

* ‘La exigencia de la posibilidad de los signos simples es la exigencia de la determinación del sentido.’ Traducción al español de Jesús Padilla Gálvez.

Esta propiedad es una consecuencia de que las matemáticas sean la ciencia de las necesidades *simbólicas*. Los conceptos matemáticos son *herramientas* que ayudan a nuestro pensamiento. Esta es la razón de que las matemáticas se utilicen en física, la ciencia del movimiento.

Ref. 261 Varios físicos bien conocidos se han preguntado repetidamente *por qué* las matemáticas son tan útiles. Por ejemplo, se le atribuye a Niels Bohr haber dicho: ‘No sabemos por qué el lenguaje de las matemáticas ha resultado tan efectivo en la formulación de esas leyes en su forma más sucinta.’ Eugene Wigner escribió un documento, frecuentemente citado, titulado ‘The unreasonable effectiveness of mathematics’ (La irrazonable eficacia de las matemáticas). Al principio de la ciencia, muchos siglos atrás, Pitágoras y sus contemporáneos estaban tan abrumados por la utilidad de los números para describir la Naturaleza que Pitágoras pudo organizar una secta basada en esta conexión. A los miembros de este círculo interno se les llamaba ‘gente erudita,’ en Griego ‘*matemáticos*’, del Griego μάθημα ‘docente’. El título de esta secta se convirtió en el nombre de la moderna profesión. Pero preguntarse sobre la efectividad de las matemáticas, es similar a preguntarse por la efectividad de las herramientas de un carpintero.

Ref. 262

Tal vez estamos siendo demasiado desdenosos. Quizás los pensadores mencionados querían expresar principalmente su sentimiento de asombro al experimentar que el lenguaje funciona, que el pensamiento y nuestro cerebro funcionan, y que la vida y la Naturaleza son tan bellas. Esto pondría el acento más cerca de la bien conocida frase de Albert Einstein: ‘La realidad más incomprensible del universo es que es comprensible.’ Comprensión es otra palabra para designar la descripción, es decir, para la clasificación. Obviamente, cualquier sistema separable es comprensible, y no hay nada extraño al respecto. Pero, ¿es separable el Universo?

La suposición básica que hicimos en nuestro comienzo fue la separabilidad de la Naturaleza y el Universo. Esta es la idea fundamental que la secta de Pitágoras expresó en su creencia central.

▷ En la Naturaleza todo son números.

En tanto que el Universo se describe como que está hecho de partículas y vacío, la creencia es correcta. Pero Pitágoras y su secta estaban equivocados. Como para tantas creencias, la observación demostrará lo contrario. Los números son verdaderamente útiles para la vida diaria; pero los números no son la base de la Naturaleza. Llegaremos a esta conclusión en la última parte de nuestra aventura. En realidad, la suposición de que en la Naturaleza las observaciones se pueden separar es una aproximación. En resumen:

▷ Contar es siempre una aproximación.

Aún el contar manzanas es una aproximación; solamente es válido para bajas energías y bajas curvaturas. La física está construida sobre arena. Se necesitan mejores cimientos. En realidad, las matemáticas no son útiles para conseguir una descripción unificada de la Naturaleza. Con la mejor base, la citada ‘incomprensibilidad’ de la Naturaleza se convierte en el asombro de la precisión de la aproximación del conteo. Esta experiencia será la cumbre de nuestra aventura.

“Die Physik ist für Physiker viel zu schwer.*”
David Hilbert

CURIOSIDADES Y DESAFÍOS DIVERTIDOS SOBRE LAS MATEMÁTICAS

Desafío 280 s ¿Cuál es el mayor número que se puede escribir con cuatro dígitos de 2 y ningún otro signo? ¿Y con cuatro 4s?

* *

Desafío 281 e Los tripletes Pitagóricos son enteros que obedecen a $a^2 + b^2 = c^2$. Dar al menos diez ejemplos. Luego demostrar las tres propiedades siguientes: al menos un número de un triplete es un múltiplo de 3; al menos un número del triplete es múltiplo de 4; al menos un número del triplete es un múltiplo de 5.

* *

He aquí cómo multiplicar números entre 5 y 10 usando las manos, sin tabla de multiplicar. Tome 8 y 7 como ejemplo, extienda tantos dedos como el exceso sobre 5. En el ejemplo que nos ocupa, extender 3 dedos en una mano y 2 en la otra. La *suma* de los dedos extendidos son las decenas, el *producto* de los dedos que permanecen doblados, las unidades. En el ejemplo, 5 decenas y 6 unidades, por tanto 56.

* *

Desafío 282 e ¿Cuántos ceros hay al final de $1000!$?

* *

Desafío 283 s Una madre tiene 21 años más que su hijo, y en 6 años el hijo será 5 veces más joven que la madre. ¿Dónde está el padre. Este es el *puzzle de la madre joven*.

* *

Desafío 284 d El número $1/n$, cuando se escribe en notación decimal, tiene una secuencia periódica de dígitos. El período es al menos de $n-1$ dígitos, como para $1/7 = 0,142857\ 142857\ 1428\dots$ ¿Qué otros números $1/n$ tienen períodos de longitud $n-1$?

* *

Desafío 285 s Felix Klein fue un famoso profesor de matemáticas de la Göttingen University. Había dos tipos de matemáticos en su departamento: los que investigaron lo que ellos querían y los que investigaron sobre el tema que les propuso Klein. ¿A que tipo pertenecía Klein?

Desafío 286 s Obviamente esto es una variación de otro rompecabezas famoso. Un barbero afeita a todos aquellos que no se afeitan a sí mismos. Se afeita a sí mismo el barbero?

* *

Desafío 287 s Todo el mundo sabe que un *cuadrado mágico* es: un conjunto cuadrado de números, en el caso más simple del 1 al 9, que está distribuido de tal manera que la suma de todas las filas, columnas (y posiblemente las diagonales) dan el mismo resultado. ¿Puede escribir el *cubo mágico* más simple de $3 \times 3 \times 3$?

* ‘La física resulta mucho más difícil para los físicos.’

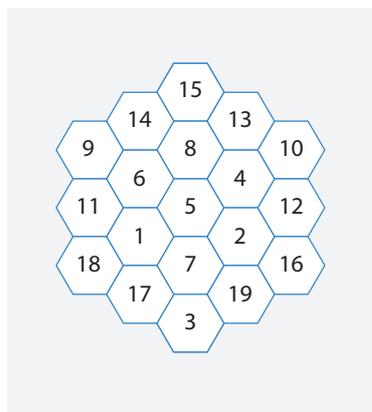


FIGURA 182 El único hexágono mágico que comienza con el número 1 (hasta reflexiones y rotaciones).

* *

En la historia de las matemáticas recreativas, varias personas han encontrado de manera independiente el bien conocido hexágono mágico mostrado en la [Figura 182](#). El descubridor fue, en 1887, Ernst von Hasselberg. El hexágono se llama mágico porque todas las líneas suman el mismo número, 38. Hasselberg también probó el casi increíble resultado de que no existe ningún otro hexágono mágico. ¿Lo puede confirmar?

Desafío 288 d

* *

Los dígitos del 0 al 9 se encuentran en los teclados de dos formas diferentes. Las calculadoras y los teclados tiene el 7 en la parte superior izquierda, mientras que los teléfonos y los cajeros automáticos tienen el dígito 1 arriba a la izquierda. Los dos estándares, respectivamente de la International Standards Organization (ISO) y de la International Telecommunication Union (ITU, anteriormente CCITT), evolucionaron separadamente y nunca consiguieron converger.

Ref. 263

* *

Desafío 289 e ¿Podría idear una máquina que contara los pelos de la cabeza de una persona?

* *

Leonhard Euler a veces anotó en sus cuadernos ecuaciones como

$$1 + 2^2 + 2^4 + 2^6 + 2^8 + \dots = -\frac{1}{3}. \quad (105)$$

Desafío 290 d ¿Tienen sentido?

* *

En muchas flores, aparecen los números de la *serie de Fibonacci* 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21 etc. La [Figura 190](#) proporciona algunos ejemplos. Es frecuente sugerir que esto es el resultado de algún profundo sentido de belleza de la Naturaleza. Este *no* es el caso, como lo demuestra la [Figura 183](#). Marque un punto sobre una superficie, y coloque a mano arandelas a su alrededor en forma de espiral; encontrará las mismas espirales que encontrará en las

Vol. I, página 262

Ref. 255

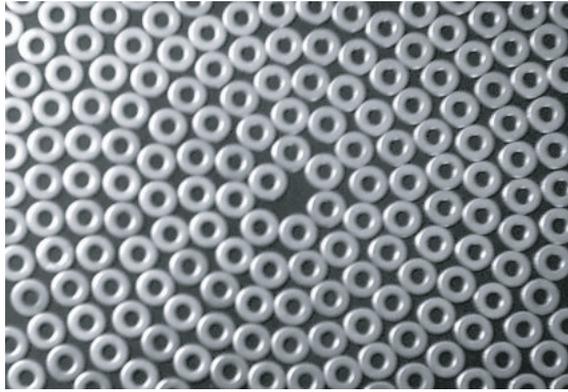


FIGURA 183 Números de Fibonacci y espirales de arandelas (© Donald Simanek).

flores, y por tanto, en su borde, los mismos números de Fibonacci. Este argumento de Donald Simanek muestra que no hay nada profundo, complicado o aún misterioso en la aparición de los números de Fibonacci en las plantas. Para un punto de vista opuesto, consultar la referencia [Ref. 255](#) y muchas publicaciones sobre los patrones en los girasoles.

* *

Los números primos son un terreno de juego favorito para los matemáticos. Un resultado famoso sobre todos los números primos p_i establece que

$$\prod_{i=1}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{p_i^2}\right) = \frac{6}{\pi^2} \quad (106)$$

Desafío 291 s ¿Puede imaginar cómo se prueba este resultado?

* *

Los dígitos deben su nombre a la palabra latina ‘digitum’ o dedo. En la época de cuando la escritura en papel era cara, ya era posible contar hasta 9999 usando las dos manos, mediante un sistema desarrollado por Beda el Venerable y popularizado, por ejemplo, por Luca Pacioli. ¿Podría desarrollar algún sistema similar?

Desafío 292 e



OBSERVACIONES, MENTIRAS Y PATRONES DE LA NATURALEZA

“Die Grenzen meiner Sprache bedeuten die Grenzen meiner Welt.”
Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 5.6

“Der Satz ist ein Bild der Wirklichkeit. Der Satz ist ein Modell der Wirklichkeit, so wie wir sie uns denken.”
Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 4.01

Ref. 264

Al contrario que las matemáticas, la física apunta a ser un lenguaje. Pero es ambiciosa: ella apunta a expresar *todo*, con una precisión *total*, y, particularmente, con todos los ejemplos y posibilidades de cambio. Todas las observaciones giran alrededor del cambio. Ahora bien, la física es el estudio del movimiento. Pero como todo cambio se debe al movimiento, podemos decir también que la física es el estudio del cambio.

La física es el lenguaje del cambio. Como cualquier lenguaje, la física se compone de conceptos y frases. Para poder expresar todo, debe aspirar a utilizar pocas palabras para relatar muchos hechos.**** Los físicos son fundamentalmente gente *perezosa*: Tratan de minimizar el esfuerzo en todo lo que hacen. Los conceptos que están en uso hoy día han sido optimizados por el esfuerzo combinado de muchas personas para resultar tan prácticos, esto es, lo más poderosos posible. Un concepto se califica como *poderoso* cuando permite expresar en forma compacta una gran cantidad de información, lo que significa que puede transmitir una gran cantidad de detalles sobre las observaciones.

A las declaraciones generales sobre muchos ejemplos de movimiento se les llama *reglas* o *patrones*. En el pasado, se hablaba con frecuencia de las ‘leyes que gobiernan la Naturaleza’, utilizando una vieja e inapropiada ideología. Una ‘ley’ física solamente es una forma de decir lo máximo posible en tan pocas palabras como sea posible. Cuando

** ‘Los límites de mi lenguaje significan los límites de mi mundo.’ Traducción al español de Jesús Padilla Gálvez.

*** ‘La proposición es una imagen de la realidad. La proposición es un modelo de la realidad tal como lo pensamos.’ Traducción al español de Jesús Padilla Gálvez.

**** Una observación particular y específica, es decir, un ejemplo específico de contribución compartida por otros, es llamada *hecho*, o en otros contextos, *evento*. Un hecho llamativo y particularmente observado es conocido como *fenómeno*, y una observación general realizada en muchas situaciones diferentes, es llamado *principio (físico)*. (A menudo, cuando se introduce un concepto que se utiliza con otro significado en otros campos, en este paseo estará señalado con el calificativo de ‘físico’ o ‘matemático’ entre paréntesis.) A las acciones llevadas a cabo con el objetivo de recoger observaciones, se les llaman *experimentos*. El concepto de experimento se estableció en el siglo XVI; en la evolución de un niño, la mejor comparación que se puede hacer con esta actividad destinada a recolectar experiencias es: *jugar*.

decimos que las ‘leyes gobiernan la Naturaleza’ realmente lo que queremos decir es que ‘siendo perezosos, describimos las observaciones mediante patrones’. Las leyes son el epítome de la pereza. La formulación de leyes es pura vaguería. En realidad, la expresión correcta sería

▷ Los patrones describen la Naturaleza.

Página 327

Los físicos han escrito con mucho detalles sobre la pereza necesaria para encontrar patrones. Con objeto de convertirse en maestros de la pereza, se necesita distinguir los patrones de pereza de los que no lo son, tales como las mentiras, creencias, y otras declaraciones que no son observaciones o movimiento en absoluto. Haremos esto a continuación. La búsqueda de la pereza es el origen, entre otros, del uso de los números en la física. Los observables son con frecuencia mejor descritos con la ayuda de los números, porque los números permiten una comunicación y clasificación fácil y precisa. Longitud, velocidad, ángulos, temperatura, voltaje o potencia de campo son de este tipo. La noción de ‘número’, utilizada en la medición cotidiana, se construye, con frecuencia de manera inconsciente, a partir de las nociones de ‘conjunto’ y ‘relación’, como demostramos anteriormente. Además de la noción de número, se definen regularmente otros conceptos para permitir una comunicación rápida y compacta de las ‘leyes’ de la Naturaleza; todas son ‘herramientas de reducción.’ En este sentido, la declaración ‘el nivel del álgebra de Kac–Moody del Lagrangiano del modelo de la supercuerda heterótica es igual a uno’ contiene información precisa, explicable a todo el mundo; no obstante, tomaría docenas de páginas para expresarlo utilizando solamente los términos ‘conjunto’ y ‘relación.’ En resumen, la *precisión* común en física resulta de su misma *búsqueda de la pereza*.

“Es ist besser, daß die Leute nicht wissen, wie Gesetze und Wurst zustande kommen. Sonst könnten sie nachts nicht ruhig schlafen.*”
Bismarck, Otto von

LOS CONCEPTOS FÍSICOS, ¿SON DESCUBIERTOS O CREADOS?

“Das logische Bild der Tatsachen ist der Gedanke.**”
Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 3

La pregunta del título, a menudo se reformula como: ¿están los conceptos físicos libres de creencias, gusto o elecciones personales? La pregunta se ha discutido tanto que incluso aparece en las películas de Hollywood. Damos un pequeño resumen que puede ayudarle a distinguir entre los profesores honestos y los deshonestos.

Si los conceptos fueran creados, en lugar de descubiertos, implicaría que hay libertad de elección entre muchas alternativas posibles. La alternativa elegida para la definición de un concepto se debería a las creencias o gustos utilizados. Pero en la física (en obvio contraste con otros campos más ideológicos de consulta), sabemos que diferentes descripciones físicas de las observaciones son, o bien equivalentes o, en el caso opuesto,

* ‘Es mejor que la gente no sepa cómo están hechas las leyes y las salchichas. De otra manera no podrían dormir bien por la noche.’ Otto von Bismarck (b. 1815 Schönhausen, d. 1898 Friedrichsruh) fue Canciller de Prusia.

** ‘La imagen lógica de hechos es el pensamiento.’ Traducción al español de Jesús Padilla Gálvez.

imprecisas o erróneas. Una descripción física de las observaciones es por lo tanto fundamentalmente única: cualquier elección de conceptos es sólo aparente. *No existe una libertad verdadera en la definición de los conceptos físicos*. En esta propiedad, la física se encuentra en fuerte contraste con la actividad artística.

Si se pudieran utilizar dos conceptos físicos diferentes para describir el mismo aspecto de las observaciones, éstos deberían ser equivalentes, aún en el caso de que la relación que condujera a esa equivalencia no se manifestase claramente de manera inmediata. De hecho, el requisito de que personas con diferentes puntos de vista que observando el mismo evento deduzcan descripciones equivalentes se encuentra en la esencia misma de la física. Ello expresa el requerimiento de que las observaciones son dependientes del observador. En resumen, el fuerte requisito de independencia del punto de vista hace de la libre elección de conceptos una imposibilidad lógica.

La conclusión de que los conceptos que describen las observaciones son descubiertos más que creados también se alcanza independientemente en el campo de la lingüística por la ya mencionada búsqueda de los primitivos semánticos,* en el campo de la psicología por las observaciones sobre la formación de los conceptos en el desarrollo de los niños pequeños, y en el campo de la etnología por las observaciones del desarrollo animal, especialmente en el caso de los mamíferos. En los tres campos, han sido llevadas a cabo observaciones detalladas de cómo las interacciones entre un individuo y su entorno, llevan a los conceptos, de los que los más básicos, tales como espacio, tiempo, objeto o interacción, son comunes para todos los sexos, culturas, razas y para las muchas especies animales que pueblan el mundo. La curiosidad y la forma en la que trabaja la Naturaleza conducen a los mismos conceptos a todas las personas e incluso a todos los animales. El mundo ofrece solamente una posibilidad sin espacio para la imaginación. Imaginar que se pueden crear conceptos físicos en el tiempo libre es una creencia errónea – o un ejercicio útil – pero nunca exitosa.

Los conceptos físicos son clasificaciones de las observaciones, La misma actividad de la clasificación sigue los patrones de la Naturaleza; es un proceso matemático que también pueden llevar a cabo las máquinas. Esto quiere decir que cualquier distinción, es decir, cualquier declaración de que A es diferente a B, es una declaración libre de teorías. No se necesita ningún sistema de creencias para distinguir las diferentes entidades de la Naturaleza. Los gatos y los cerdos también pueden hacerlo. Los físicos *pueden* ser reemplazados por animales, incluso por máquinas. Nuestro ascenso a la montaña confirmará repetidamente este punto.

Como ya se ha mencionado, los conceptos físicos más populares nos permiten describir la observaciones en la manera más sucinta y segura que es posible. Están formadas con el objetivo de obtener la mayor cantidad posible de conocimiento con la menor cantidad de esfuerzo posible. Tanto en lo conocido como la navaja de Occam – el requerimiento de no introducir conceptos innecesarios – como en el impulso por la unificación, reducen automáticamente el número y el tipo de conceptos utilizados en física. En otras palabras, el progreso en la ciencia física estuvo y está basado en un programa que reduce la posible elección de conceptos de manera tan drástica como fuera posible.

* Anna Wierzbicka concluye que su investigación indica claramente que los primitivos semánticos son *descubiertos*, en particular, que se desprenden de los fundamentos de la experiencia humana, y que no son inventados.

En resumen, nos damos cuenta que los conceptos físicos son los mismos para todos y están despojados de creencias y elecciones personales: son, ante todo, *tediosos*: son correctos y seguros. Más aún, como podrían provenir de máquinas en lugar de personas, los conceptos *nacen de la pereza*: son lo más eficientes que se puede ser. Estas analogías humanas – no deben ser tomadas muy en serio – confirman que los conceptos físicos *no* son creados; son descubiertos. Si un profesor le dice lo contrario, está mintiendo. Por desgracia, hay muchos embusteros de esta clase

Habiendo manejado el caso de los conceptos físicos, pasemos ahora a las declaraciones físicas. La situación es de alguna manera similar: las declaraciones físicas deben ser *correctas, tediosas, perezosas y arrogantes*. Veamos por qué.

“Wo der Glaube anfängt, hört die Wissenschaft auf.*
Ernst Haeckel, *Natürliche Schöpfungsgeschichte*,
1879.”

¿CÓMO ENCONTRAMOS LOS CONCEPTOS FÍSICOS, LOS PATRONES Y LAS REGLAS?

“Grau, theurer Freund, ist alle Theorie,
Und grün des Lebens goldner Baum.**
J.W. v. Goethe, *Fausto*.”

“Generalmente la física se presenta como una ciencia objetiva, pero me he dado cuenta de que la física cambia y el mundo permanece igual, por lo tanto debe haber algo subjetivo relacionado con la física.
Richard Bandler”

Progresar valiéndose de la exploración del movimiento refleja la actitud ante la vida de un niño pequeño: un niño se guía por la curiosidad. El progreso sigue el sencillo programa presentado a la izquierda de la [Tabla 24](#). Los científicos adultos hacen lo mismo, excepto que ellos utilizan los términos más de moda, escritos en la parte derecha de la tabla. Los adultos también tienen profesiones especializadas en hacer dinero mediante su curiosidad. Los expertos del paso 7, que solicitan más dinero, son indiferentemente conocidos como *cabilderos* o *recaudadores de fondos*; en lugar de llamar a este programa *curiosidad*, ellos lo llaman *método científico*.

Siendo la física la conversación sobre el movimiento,^{***} y siendo el movimiento un

* ‘Donde comienza la creencia, finaliza la ciencia.’

** ‘Grey, querido amigo, todo es teoría, y es verde el dorado árbol de la vida.’ Johann Wolfgang von Goethe (b. 1749 Frankfurt am Main, d. 1832 Weimar), influyente poeta alemán.

*** Algunas ciencias incluyen el término ‘hablar’ (en el sentido de ‘tratar sobre alguna cosa’) como parte de su nombre, concretamente todas aquellas ciencias cuyo nombre termina en ‘-logía’, así por ejemplo como en biología. La terminación proviene del Griego antiguo y es extraído de λήγειν significando ‘tratar, hablar de’. La física como ciencia del movimiento podría llamarse por tanto ‘kinesiología’ puesto que κίνησις, significa ‘movimiento’; pero por razones históricas a este término se le da un significado diferente, específicamente, el estudio de la actividad muscular humana – y también, por desgracia, a un montón de tonterías esotéricas. El término ‘física’ se deriva o bien del griego φύσις (τέχνη es comprendido) que quiere decir ‘(arte de) la naturaleza’, o del título de los documentos de Aristóteles τὰ φυσικά que significa ‘cosas naturales’. Ambas expresiones provienen de φύσις, que significa ‘naturaleza’.

TABLA 24 El 'método científico'.

Descripción normal Curiosidad	Descripción de los cabilderos Método científico
1. mirar mucho a tu alrededor	1. relacionarse con el mundo
2. no creer nada de lo dicho	2. olvidar declaraciones no probadas
3. elegir algo interesante y explorarlo uno mismo	3. observar y medir
4. tomar una decisión y describir exactamente lo que se vio	4. utilizar la razón, construir una hipótesis
5. comprobar si también se pueden describir situaciones similares de la misma forma	5. analizar hipótesis
6. aumentar la precisión de la observación hasta que las comprobaciones fallen o estén completas	6. llevar a cabo experimentos para comprobar la hipótesis
7. dependiendo del caso, continuar con el paso 4 o el 1	7. pedir autorización para obtener más dinero

tema tan amplio, mucho puede ser explorado y dicho. Los expertos en el paso 6, esos que comprueban las hipótesis, son los conocidos como *físicos experimentales* o simplemente *experimentalistas*, un término derivado del Latín 'experiri', que significa 'probar'. La mayor parte de ellos son parte de la categoría 'estudiantes graduados'. Los expertos en los pasos 5 y 4, son los que construyen y analizan las hipótesis, y son los llamados *físicos teóricos* o simplemente *teóricos*.^{*} Este es un término bastante moderno; los primeros profesores de física teórica fueron designados a principios del siglo XX. El término 'teoría' se deriva del Griego θεωρία y significa 'observación, contemplación'. Finalmente, están las personas que se centran en los pasos 1 a 4, y que inducen a los otros a trabajar sobre los pasos 5 y 6; a éstos se les llama *genios*. Los genios son esas personas que introducen los conceptos que mejor ayudan a describir la Naturaleza.

Obviamente en el paso 6 hay escondido un punto importante: ¿De qué manera toda esa gente puede comprobar los fallos? ¿Cómo saben si un concepto o una declaración se aplica a la Naturaleza? ¿Cómo reconocen la verdad?

“Todas las profesiones son conspiraciones contra los laicos.”
George Bernard Shaw

¿QUÉ ES UNA MENTIRA?

“Aclare sus hechos, y luego podrá distorsionarlos cuando lo desee.”
Mark Twain

En la mayoría de los países, todas las personas deben saber lo que es la 'verdad', puesto que en un tribunal por ejemplo, decir lo que no es verdadero lleva a una pena de prisión.

* Si le gusta la física teórica, consulte la informal y refrescante página web del Premio Nobel Gerard 't Hooft con el título *How to become a good theoretical physicist*. Puede encontrarse en la dirección www.phys.uu.nl/~thoof/theorist.html.

Y los tribunales están llenos de expertos en la detección de mentiras. *

En un juicio, una *mentira* es una declaración que a sabiendas se opone a las observaciones.** Lo verdadero de una declaración se comprueba por tanto mediante la observación. A la propia comprobación se le llama a veces *prueba* de la declaración. Tanto para los tribunales como para la física, tenemos que

- ▷ *La verdad* es la correspondencia con los hechos.
- ▷ *Los hechos* son las observaciones compartidas con otras personas o con las máquinas.

Por lo tanto, también en la ciencia, tenemos que

- ▷ Una *mentira* es una declaración que no se corresponde con los hechos.

Excepto en los juicios, las mentiras son declaraciones ocurrentes, porque podemos sacar *cualquier conclusión imaginable* de ellas. Una conocida discusión entre dos profesores de Cambridge a principios del siglo XX sirve de ejemplo. McTaggart preguntó: ‘Si $2 + 2 = 5$, ¿cómo puede demostrar que yo soy el Papa?’ Godfrey Hardy: ‘Si $2 + 2 = 5$, entonces $4 = 5$; si restamos 3; tenemos que $1 = 2$; pero McTaggart y el Papa son dos; por tanto McTaggart y el Papa son uno.’ Como ya se sabía desde hacía mucho tiempo, *ex falso quodlibet*; a partir de lo que es falso, nada imaginable se puede deducir. Por lo tanto, en nuestra ascensión a la montaña necesitamos edificar sobre resultados previamente comprobados y nuestro viaje no estaría completo si en alguna parte se introdujera una declaración falsa en nuestra cadena de argumentos.

Sin embargo, mentir es una actividad tan importante que uno debería aprenderla bien – para así aprender a descubrirlo en los otros. El arte de la mentira tiene tres etapas: la etapa animal, la etapa infantil y la etapa adulta. Se ha demostrado que muchos animales engañan a sus parientes. Los niños empiezan a mentir antes de su tercer cumpleaños, escondiendo experiencias. La investigación psicológica ha demostrado incluso que los niños que carecen de la capacidad de la mentira no pueden completar su desarrollo personal hacia un ser humano sano.

Ref. 211

Los adultos son habitualmente embusteros. Muchos adultos mienten sobre los impuestos. Otros mienten para ocultar sus actos erróneos. Los peores ejemplos de mentirosos son esos violentos contemporáneos – a menudo políticos e intelectuales – que afirman esa verdad que “no existe”. Si alguna vez miente en un juicio, es mejor que lo haga bien; en efecto, la experiencia demuestra que usted podría salir indemne de muchas actividades criminales.

* Algunos académicos han gastado la mayoría de su carrera de investigación en mentiras y embustes. Un ejemplo bien conocido es el de Paul Ekman, cuyo fascinante sitio web en www.paulekman.com dice cómo detectar mentiras según el comportamiento de la persona que las cuenta.

** Las declaraciones que no están comprobadas todavía con las observaciones reciben nombres variados tales como *especulaciones*, *conjeturas*, *hipótesis*, o – equivocadamente – sencillamente *tesis*. Las declaraciones que están en correspondencia con las observaciones son llamadas *correctas* o *verdades*; las declaraciones que no se corresponden con las observaciones son llamadas *equivocaciones* o *falsedades*.

¿QUÉ ES UNA BUENA MENTIRA?

“La verdad pura es siempre una mentira.”
Bert Hellinger

Puesto que una mentira es una declaración que se opone a los hechos – o a las observaciones compartidas – una *buena* mentira es una mentira cuya oposición a los hechos es difícil de descubrir. Por el contrario, una mentira *exitosa* es una declaración que nos permite ganar dinero. No exploraremos este tipo de mentiras aquí; sólo exploraremos el arte de las buenas mentiras.

La primera forma de mentir es poner énfasis solamente en lo compartido. Los populistas y los polemistas hacen esto de manera regular. (‘Todos los extranjeros son un peligro para los valores de nuestro país.’) Ya que casi cualquier opinión imaginable, aunque descabellada, que pueda ser sostenida por un grupo – y por tanto compartida – siempre se podrá reclamar como que es cierta.* Desafortunadamente, no es un secreto que también se comparten ideas porque se ponen de moda, impuestas u opuestas sobre alguien que generalmente no gusta. Con frecuencia un hermano de la familia tiene este rol – recuerde a Casandra.** Por lo tanto para una buena mentira se necesita algo más que compartir, algo más que solamente la *intersubjetividad*.

Una buena mentira debería ser, al igual que una declaración verdadera, realmente independiente del que la escucha y del observador, en particular, ser independiente de sus edades, sus sexos, sus educaciones, sus civilizaciones o del grupo al cual pertenecen. Por ejemplo, es especialmente difícil – pero no imposible – mentir con las matemáticas. la razón es que los conceptos básicos de las matemáticas, que son ‘conjunto’, ‘relación’ o ‘número’, están tomados de la observación y son intersubjetivos, por lo que las declaraciones sobre ellos son fácilmente comprobables. Por lo tanto, las buenas mentiras evitan las matemáticas***

En tercer lugar, una ‘buena’ mentira debería evitar declaraciones sobre las observaciones y utilizar las *interpretaciones* en su lugar. Por ejemplo, hay personas a las que les gustan hablar de otros universos, lo cual implica estar hablando de fantasías, no de observaciones. No obstante, una mentira verdaderamente buena tiene que evitar hacer declaraciones sin sentido; el comentario más destructivo que se puede hacer sobre una declaración es el que fue utilizado por el gran físico Wolfgang Pauli: ‘Eso todavía no está equivocado.’

En cuarto lugar, una buena mentira evitará hablar sobre las observaciones, pero se

* El trabajo del sociólogo Gabriel Tarde (b. 1843 Sarlat, d. 1903 París), y especialmente sus conceptos de *imitación* y de opinión grupal, ya conecta con este hecho.

** Las implicaciones del orden de nacimiento sobre la creatividad en la ciencia y sobre la aceptación de nuevas ideas ha sido estudiada en el fascinante libro de FRANK J. SULLOWAY, *Born to Rebel – Birth Order, Family Dynamics and Creative Lives*, Panthon Books, 1996. Este excepcional libro presenta el resultado del estudio de toda una vida que relaciona las situaciones familiares personales de miles de personas y su repercusión en unas veinte revoluciones de la historia reciente. El libro también incluye un test donde el lector puede darse cuenta de su propia propensión a la rebeldía, en una escala del 0 al 100 %. Darwin alcanzó un 96 % en esta escala.

*** En matemáticas, la ‘verdad’ es especificada generalmente como ‘deducible’ o ‘probable’; este es, de hecho, un caso especial de la definición usual para la verdad, concretamente la ‘correspondencia con los hechos’, si recordamos que las matemáticas estudia las propiedades de las clasificaciones.

centrará en la imaginación. Solamente la verdad necesita ser *empírica*; las declaraciones *especulativas* difieren de la verdad por no preocuparse por las observaciones. Si quiere mentir ‘bien’ aún con declaraciones empíricas, necesita prestar atención. Hay dos tipos de declaraciones empíricas: declaraciones *específicas* y declaraciones *universales*. Por ejemplo, ‘El 2 de Junio de 1960 vi un cisne verde nadando en la orilla norte del lago de Varese’ es específica, mientras que ‘Todos los cuervos son negros’ es universal, puesto que contiene el término ‘todos’. Hay una conocida diferencia entre los dos, que es importante para mentir bien:

- ▷ Las declaraciones específicas no pueden ser desmentidas, son solamente verificables.
- ▷ Las declaraciones universales no pueden ser verificadas, son solamente desmentibles.

Ref. 265 Exploremos la razón.

Las declaraciones universales, como ‘la velocidad de la luz es constante’, no pueden ser comprobadas para *todos* los casos posibles. (Nótese que si se pudiera, no serían declaraciones universales, sino sólo una lista de casos específicos.) No obstante, ellas pueden ser invalidadas con un contra-ejemplo. Otro ejemplo del tipo universal es: Las ‘manzanas caen hacia arriba.’ Ya que fue desmentido por una observación realizada por Newton hace varios siglos, o por la experiencia cotidiana, esto se cualifica como una mentira (fácilmente detectable). Por tanto en general, mentir declarando lo opuesto a una teoría, generalmente no tiene éxito. Si alguien insiste en hacerlo, la mentira se convierte en un *superstición*, una *creencia*, un *prejuicio* o una *doctrina*. Estos son los puntos flacos del arte de la mentira. Un caso famoso de insistencia sobre una mentira es la de los colegas de Galileo, que se dice que se negaron a mirar a través de su telescopio para convencerse de que Júpiter tenía lunas, una observación que habría sacudido sus creencias de que todo giraba alrededor de la Tierra. Obviamente estos astrónomos eran unos aficionados en el arte de la mentira. Una buena mentira universal es aquella cuyo contra-ejemplo no se ve tan fácilmente.

No debería haber insistencia en las mentiras de la física. Por desgracia, la física clásica está llena de mentiras. Las disiparemos durante el resto de nuestra caminata.

Mentir para realizar declaraciones específicas en lugar de declaraciones universales es mucho más fácil. (‘No puedo recordar.’) Aún una declaración específica tal como ‘ayer la Luna era verde, cúbica y olía a queso’ no puede ser completamente desmentida: no hay manera de demostrar con absoluta certeza que esto es equivocado. La única cosa que podemos hacer es comprobar si la declaración es compatible con otras observaciones, cómo si la forma diferente afectó a las mareas como debiera haberse esperado, o si el olor podría ser observado en el aire recogido ese día, etc. Una *buena* mentira específica no está por tanto en contradicción evidente con otras observaciones.*

* Frecuentemente es difícil o tedioso verificar declaraciones concernientes al pasado, y la dificultad se incrementa con el paso del tiempo. Ese es el por qué la gente insiste en lo que se supone que son excepciones a los patrones de la Naturaleza (‘milagros’). Con el advenimiento de los rápidos medios de comunicación, estos controles se están haciendo cada vez más fáciles, y ya no quedan milagros. Esto se puede observar en Lourdes (Francia), donde aunque hoy día el número de visitantes es todavía mucho mayor que en el

A propósito, las declaraciones universales y las específicas están conectadas: lo *opuesto* a una declaración universal es siempre una declaración específica, y viceversa. Por ejemplo, la opuesta a la declaración universal ‘las manzanas caen hacia arriba’, a saber ‘algunas manzanas caen hacia abajo’, es específica. De manera similar, la declaración específica ‘la Luna es de queso verde’ está en oposición a la declaración universal ‘la Luna ha sido sólida durante millones de años y casi no tiene olor ni atmósfera.’

En otras palabras, los tribunales de justicia y los filósofos no están de acuerdo. Los tribunales de justicia no tienen problemas en calificar a las teorías como verdad y a llamar mentiras a las declaraciones específicas. Muchos filósofos evitan esto. Por ejemplo, la declaración ‘los vertebrados malhumorados no existen’ es una declaración del tipo universal. Si una declaración universal concuerda con las observaciones, y si esto es desmentible, los tribunales de justicia los calificarán como *verdad*. Lo opuesto, a saber la declaración: ‘los vertebrados gaseosos malhumorados existen’, es del tipo *específico*, puesto que esto quiere decir que ‘La persona X ha observado un vertebrado gaseoso malhumorado en algún lugar Y en el tiempo Z’. Para verificarlo, se necesitará un registro del evento. Si tal registro, por ejemplo una fotografía o un testimonio no existe, y si la declaración *podría* ser desmentida por otras observaciones, los tribunales de justicia calificarían como una *mentira* a esta declaración específica. Aunque estas son las reglas para la vida cotidiana y para la ley, no existe acuerdo entre los filósofos y los científicos en que ello sea aceptable. ¿Por qué? Los intelectuales muestran un gran cuidado, ya que muchos de ellos han perdido la vida por la exposición de mentiras demasiado abiertamente.

En resumen, las mentiras específicas, como todas las declaraciones específicas, nunca pueden ser desmentidas con rotundidad. Esto es lo que las hace más popular. Los niños aprenden a mentir específicamente primero. (‘No me he comido la mermelada.’) Las mentiras generales, al igual que las declaraciones generales, siempre pueden ser corroboradas con ejemplos. Esta es la razón del éxito de las ideologías. Pero los criterios para reconocer mentiras, incluso las mentiras generales, se han vuelto tan comunes que las creencias y las mentiras tratan de mantenerse al día con ellas. Se puso de moda usar expresiones tales como ‘hecho científico’ – no existen los hechos no científicos –, o ‘científicamente probado’ – las observaciones no se pueden probar de otra manera – y frases vacías similares. Estas no son ‘buenas’ mentiras; siempre que encontremos una frase que empiece por ‘la ciencia dice ...’ o ‘ciencia y religión hace ...’ solamente tenemos que reemplazar ‘ciencia’ por ‘conocimiento’ o ‘experiencia’ para comprobar si esa declaración debe ser tomada en serio o no.*

pasado, no se ha vuelto a producir ningún milagro en décadas. (En realidad, hay una excepción que tiene varios testigos. En 1998, un hombre en silla de ruedas fue introducido en agua bendita. Cuando salió, milagrosamente, su silla de ruedas tenía nuevos neumáticos.)

Ref. 266

De hecho, todos los llamados ‘milagros’ modernos se mantienen vivos porque conscientemente se evitan las comprobaciones, así la supuesta anual licuefacción de la sangre en Nápoles, la leche supuestamente bebida por estatuas en los templos, los supuestos sanadores en la televisión evangélica, etc. La mayoría de los milagros solamente permanecen porque muchas organizaciones obtienen dinero por la dificultad de desmentir las declaraciones específicas. Por ejemplo, cuando la princesa británica Diana murió en un accidente de coche en 1997, aunque el asunto fue investigado con todo detalle, la prensa sensacionalista pudo continuar, casi indefinidamente, hablando sobre los ‘misterios’ del accidente.

* Para clarificar el uso del vocabulario en este texto: La *religión* es la espiritualidad más un grado variable de creencias y abuso de poder. La mezcla depende de la historia de cada persona, su experiencia y su entorno. La *espiritualidad* es la participación abierta de la Naturaleza en su conjunto. La mayoría de las personas,

Las mentiras difieren de las declaraciones verdaderas en su aspecto emocional. Las declaraciones específicas generalmente son tediosas y frágiles, mientras que las mentiras específicas son con frecuencia sensacionales y vehementes. Por el contrario, las declaraciones generales son a menudo atrevidas y frágiles, mientras que las mentiras generales son tediosas y vehementes. La verdad es frágil. Las declaraciones verdaderas requieren que su autor se arriesgue a las críticas. Los investigadores saben que sin riesgo, no se puede hacer una observación o enunciar una teoría. (Una *teoría* no es más que otro nombre para designar una o varias declaraciones universales, conectadas con las observaciones, no desmentidas todavía.)* Decir la verdad nos hace vulnerables. Por esta razón, las teorías son con frecuencia *osadas*, *arrogantes* o *provocadoras*; al mismo tiempo tienen que ser *frágiles* y *vulnerables*. Para muchos hombres, las teorías por tanto, se parecen a lo que piensan de las mujeres. *El origen de la especie* de Darwin ilustra el marcado contraste entre los numerosos hechos, tediosos pero sólidos, que Darwin recolectó y la atrevida teoría que elaboró. El aburrimiento de los hechos es un signo de veracidad.

En contraste, los cazadores de brujas que propagan el ‘creacionismo’ o el llamado ‘diseño inteligente’ son ejemplos de embusteros. Las mentiras específicas que propagan, tal como ‘el mundo fue creado en Octubre de 4004 BCE’, son sensacionales, mientras que las mentiras generales que propagan, tal como ‘no ha habido grandes cambios en el pasado’, son tediosas. Esto está en completo contraste con el sentido común. Más aún, las mentiras, en contraposición con las declaraciones verdaderas, hacen violentas a las personas. Cuanto peor es la mentira, más violenta es la gente. Esta conexión puede observarse de manera regular en las noticias. Dicho de otra forma, el ‘creacionismo’ y el ‘diseño inteligente’ no son sólo mentiras, son malas mentiras. Una ‘buena’ *mentira general*, como una buena teoría física, parece alocada y parece vulnerable, tal como ‘la gente tiene libre albedrío’. Una ‘buena’ *mentira específica* es tediosa, tal como ‘esto parece pan, pero en los próximos diez minutos ya no lo será’. Las buenas mentiras no inducen a la violencia. Los sentimientos pueden, por tanto, ser un criterio para juzgar la calidad de las mentiras, si prestamos una cuidadosa atención al tipo de declaración. Posteriormente en este capítulo discutiremos una cierta cantidad de mentiras comunes.

Un aspecto importante de cualquier ‘buena’ mentira es hacer el menor número de declaraciones *públicas* posible, así los críticos podrán comprobarlo lo menos posible. (Para cualquier que envíe correcciones de errores en este texto, les proporcionaré una pequeña recompensa.) Para detectar mentiras, el escrutinio público es importante, aunque no siempre confiable. Algunas veces, los científicos realizan declaraciones que no siempre están basadas en las observaciones. No obstante, una ‘buena’ mentira estará siempre

probablemente todas, con pasión por la física son espirituales. La mayoría no son religiosas.

* Dicho de otra forma, a un conjunto de patrones de observaciones sobre el mismo asunto, aún sin desmentir, se le llama *teoría (física)*. El término ‘teoría’ se usará en este sentido en nuestro paseo, esto es, con el significado de ‘conjunto de declaraciones generales correctas’. Este uso resulta de su origen griego: ‘teoría’, que quiere decir ‘observación’; significando originalmente, ‘contemplación apasionada y enfática’, resumiendo la totalidad de la física en una sencilla palabra. (‘Teoría’, al igual que ‘teatro’, tienen la misma raíz $\theta\acute{\epsilon}$, significando ‘el acto de la contemplación’.) A veces, no obstante, el término ‘teoría’ se utiliza – siendo confundido con ‘hipótesis’ – con el significado de ‘conjetura’, como en ‘tu teoría es errónea’, a veces con el significado de ‘modelo’, como en la teoría de ‘Chern–Simons’ y otras veces con el significado de ‘procedimiento estándar’, como en la ‘teoría de la perturbación’. Aquí se evitarán estos usos incorrectos. Para centrar este asunto: la *teoría de la evolución* no es una conjetura, sino un conjunto de declaraciones correctas basadas en la observación.

bien elaborada y dicha a propósito; las mentiras accidentales están mal vistas por los expertos. Son ejemplos de buenas mentiras en la ciencia el ‘éter’, los ‘OVNIS’, ‘la ciencia de la creación’, o la ‘fusión en frío’. A veces tomó muchas décadas detectar las mentiras en estos dominios.

En resumen, los puntos fundamentales del arte de mentir sin ser detectado son dos: no divulgar detalles, y permitir a algún grupo seleccionado ganar dinero con sus mentiras. Sea *vago*. Todos los métodos utilizados para verificar una declaración piden detalles, por *precisión*. En cualquier declaración, su grado de precisión nos marca el grado de compromiso del autor. Cuanto más precisión se exija, más débil se volverá la declaración y habrá más probabilidad de encontrar un fallo, si verdaderamente lo hay. Esta es la principal razón por la que elegimos un incremento de precisión como guía para nuestro ascenso a la montaña: deseamos evitar por completo las mentiras. (Y, además, tampoco buscamos dinero en este viaje.) Por cierto, el mismo método se usa en los juicios por delitos. Para descubrir la verdad, generalmente los investigadores realizan un montón de preguntas a los testigos, reuniendo tantos *detalles* como fuera posible para ver la luz. Cuando se ha reunido los suficientes detalles, y el grado de precisión es suficientemente elevado, la situación se clarifica. Decir ‘buenas’ mentiras es mucho más difícil que decir la verdad; ello requiere una gran imaginación.

“ La verdad es un abismo. ”
Demócrito

“ Enseñar supersticiones como verdades es la cosa más terrible. ”
Hypatia de Alejandría (c. 355–415)

“ [Verdad absoluta:] Es lo que los científicos dicen que es cuando llegan al final de sus labores. ”
Charles Peirce

Ref. 267

¿ES VERDADERA ESTA DECLARACIÓN? – UN POCO SOBRE LAS TONTERIAS

“ Hay tres tipos de personas: aquellas que creen en Papá Noel, las que no creen en Papá Noel y las que son Papá Noel. ”
Anónimo

“ La verdad es un concepto retórico. ”
Paul Feyerabend

La declaración de Feyerabend no tiene sentido. Todos deberíamos ser capaces de detectar disparates. He aquí cómo hacerlo.

No todas las declaraciones pueden ser calificadas como verdaderas o falsas. Hay una tercera opción: las declaraciones que simplemente *no tienen* sentido. Aún tales sentencias existen en matemáticas, donde tales declaraciones son llamadas *indecidibles*. En realidad,

▷ ‘Indecidible’ significa ‘disparate’! (107)

Un ejemplo es la hipótesis del continuo. Esta hipótesis es indecible porque hace una declaración que depende del significado preciso del término ‘conjunto’. El uso estándar

del término ‘conjunto’ en matemáticas, no está definido con suficiente precisión: por tanto no puede serle asignado un valor verdadero a la hipótesis del continuo. En resumen, las declaraciones pueden ser indecidibles, esto es, pueden ser disparatadas, porque los conceptos comprendidos en ellas no están lo suficientemente definidos.

Las declaraciones pueden ser también indecidibles por otras razones. Frase tales como ‘Esta declaración no es verdadera’ ilustra la situación. La frase es indecidible porque se refiere a ella misma. Kurt Gödel* incluso ha ideado una forma de construir tales declaraciones indecidibles en el dominio de la lógica y el de las matemáticas. Las distintas variaciones de estas declaraciones *auto-referentes*, especialmente populares en los campos de la lógica y el de las ciencias de la computación, han alcanzado una gran cantidad de popularidad.** De manera similar las declaraciones indecidibles se pueden formar con términos tales como ‘calculable’, ‘probable’ y ‘deducible’.

Ref. 268

De hecho, las declaraciones auto-referentes son indecidibles porque no tienen sentido. Si la definición corriente de ‘verdad’, es decir, correspondiente a los hechos, se sustituye en la oración ‘Esta declaración no es verdadera’, rápidamente nos daremos cuenta que no tiene un contenido significativo. El lingüista Noam Chomsky construyó una famosa frase sin sentido:

Las ideas verdes incoloras duermen furiosamente. (108)

Se utiliza con frecuencia como ejemplo de propiedades en el procesamiento del lenguaje del cerebro, pero nadie con sensatez lo elevaría al estado de una paradoja, ni escribiría sofisticados discursos sobre ello. Hacer eso con el título de esta sección sería un desperdicio similar de energía.

Ref. 219

La principal razón del popular éxito de la auto-referencia consiste en la dificultad de percibir su falta de significado.*** Un buen ejemplo es la oración:

Esta declaración es falsa o tu eres un ángel. (109)

Desafío 294 s De ella se puede deducir que realmente ‘tú eres un ángel.’ ¿Puede ver cómo? Si lo desea, puede cambiar la segunda parte y conseguir declaraciones todavía más interesantes. Tales

* Kurt Gödel (b. 1906 Brünn, d. 1978 Princeton), lógico famoso.

** Una introducción general se puede obtener de los bonitos libros de RAYMOND SMULLYAN: *Satan, Cantor and Infinity and Other Mind-boggling Puzzles*, Knopf, 1992; *What is the Name of This Book? The Riddle of Dracula and Other Logical Puzzles*, Touchstone, 1986, y en *The Lady or the Tiger? And Other Puzzles*, Times Books, 1982. Tampoco las definiciones pueden tener significados, como ocurre en la de David Hilbert ‘el número más pequeño que no se ha mencionado este siglo’ o ‘la secuencia de números descrita por más signos que los que contiene esta frase’.

*** Una víctima bien conocida de esta dificultad fue Pablo de Tarso. La paradoja del poeta cretense *Epimenedes* (siglo VI a.C. BCE) que dijo ‘Todos los cretenses mienten’ es demasiado difícil para un Pablo notoriamente falto de humor, quien en su carta a Tito (capítulo 1, versículos 12 y 13, de la biblia cristiana, califica a Epimenedes como un ‘profeta’, añadiendo algunos comentarios racistas, y afirmando que este ‘testimonio’ es verdadero. ¡Pero, esperen! Hay un giro final en esta historia. La declaración ‘Todos los cretenses mienten’ no es una paradoja en absoluto; se le puede atribuir un valor como verdad, porque la declaración no es auto-referente. ¿Podría confirmarlo? La única paradoja genuina es ‘Estoy mintiendo’, a lo que de hecho es imposible atribuir un valor como verdad.

Ref. 269

Desafío 293 s

ejemplos demuestran que las declaraciones que se refieren a ellas mismas deben ser ignoradas. En resumen, siempre que conozca a alguien que trate de utilizar la construcción auto-referente de Kurt Gödel de la que se desprenda otra declaración, dé un paso atrás, o mejor unos cuantos. La auto-referencia, especialmente la del tipo definido por Gödel, es un camino difícil pero corriente – especialmente entre los aspirantes a intelectuales – para pensar, contar y escribir *tonterías*.

▷ La auto-referencia es una forma de estupidez.

De las tonterías no se puede extraer nada útil. Bueno, no del todo; ayuda a visitar a un psiquiatra de manera regular.*

En la física, en las otras ciencias naturales y en los juicios legales no se utilizan las declaraciones auto-referentes. Por lo tanto, no hay problema.** De hecho, los trabajos de los lógicos confirman, a menudo de manera bastante espectacular, que no hay forma de ampliar el término ‘verdad’ más allá de la ‘correspondencia con los hechos.’

“ Ein Satz kann unmöglich von sich selbst aussagen, daß er wahr ist.***
Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 4.442 ”

CURIOSIDADES Y DESAFÍOS DIVERTIDOS SOBRE MENTIRAS Y TONTERÍAS

Ref. 270

“ Un hombre es consigo mismo el ingenuo más fácil, porque lo que él desea que sea verdad generalmente cree que es verdad.
Demóstenes, 349 B.C.E. ”

“ Quator vero sunt maxima comprehendendae veritatis offencicula, quae omnem quemcumque sapientem impediunt, et vix aliquem permittunt ad verum titulum sapientiae pervenire: videlicet fragilis et indignae auctoritatis exemplum, consuetudinis diurnitatis, vulgi sensus imperiti, et propriae ignorantiae occultatio cum ostentatione sapientiae apparentis.****
Roger Bacon, *Opus majus*, 1267. ”

“ Es ist ja nicht alles, was ich den Bürgern sage, gelogen.*****
Konrad Adenauer, 1962, Canciller de la Alemania Occidental. ”

* También Gödel se sometió a terapia.

Desafío 295 s

** ¿Por qué hay definiciones circulares, no auto-referentes, como las que son la base de la física Galileana?

*** ‘Es imposible que una proposición pueda expresar de sí misma que es verdadera.’ Traducción al español de Jesús Padilla Gálvez.

**** ‘Hay cuatro escollos para la verdad y el conocimiento: una autoridad débil e indigna, la costumbre, el prejuicio popular, y la ocultación de la ignorancia con el conocimiento aparente.’

***** ‘De hecho, no todo lo que le digo a la gente es mentira.’

Algunas mentiras son entretenidas y divertidas – y se las conoce como bromas –, algunas son signos de desequilibrios psíquicos, y algunas se dicen con intenciones delictivas. Algunas declaraciones no son mentiras, sino simplemente sandeces. Diviértase distinguiéndolas.

* *

En una iglesia, durante el sermón, un hombre se durmió. Estaba soñando con la Revolución francesa: estaba siendo conducido a la guillotina. En ese momento, su esposa se dio cuenta de que se había quedado dormido. En el mismo momento que el hombre soñaba que la cuchilla le estaba golpeando, su mujer le dio un golpecito en el cuello con su abanico. La impresión mató al hombre instantáneamente. – ¿Es verdadera o falsa esta historia?

Desafío 296 e

* *

Una mentira bien conocida: ‘Ayer me ahogué.’

* *

A partir de la década de 1990, los llamados *círculos de cultivo* están formados regularmente por personas que caminan con zancos, unas piezas de madera y algo de cuerda en los campos de cultivos. Sin embargo, muchos fingieron y aún más creyeron que estos círculos estaban formados por extraterrestres. ¿Podría aportar algunas razones por las que esto resulta imposible?

Desafío 297 s

* *

Con frecuencia uno oye o lee declaraciones como: ‘la mente (o el espíritu o el alma) es más fuerte que la materia.’ Cuídese de cualquiera de diga ésto; él quiere alguna cosa de usted. ¿Podría demostrar que tales declaraciones son completas y siempre están equivocadas?

Desafío 298 e

* *

En algunos países, han sido particularmente frecuentes a principios del siglo XXI dos mentiras. La primera: el calentamiento global no existe. La segunda: el calentamiento global no se debe a causa humanas. ¿Son éstas buenas o malas mentiras?

Desafío 299 s

* *

A veces se oye que una persona cuya piel está cubierta completamente con una finísima capa de polvo metálico puede morir debido a la imposibilidad de que su piel respire. ¿Puede demostrar con sus propias observaciones que esto es equivocado?

Desafío 300 s

* *

Una famosa mezcla de engaño y premisas de creencias sostiene que la Tierra fue creada hace unos seis mil años. (Algunos creyentes incluso usan esa mentira como justificación para la violencia contra los no creyentes.) ¿Puede explicar por qué el número está equivocado?

Desafío 301 s

* *

Desafío 302 s Una provocación famosa: el mundo ha sido creado el último Sábado. ¿Puede determinar si ésto está equivocado?

* *

En el sitio web www.museumofhoaxes.com se pueden encontrar cientos de engaños. En él se proporciona una excelente introducción al arte de la mentira; por supuesto solamente expone aquellas que han sido descubiertas. Disfrute con las historias de la ciencia, especialmente con las relacionadas con la arqueología. En Internet se pueden encontrar otros sitios similares.

* *

Desafío 303 e En la década de 1990, muchos llamados ‘curanderos’ en las Fiipinas ganaron mucho dinero sugiriendo a los pacientes que podían extraer objetos de sus cuerpos sin ninguna intervención quirúrgica. ¿Por qué ésto no es posible? (Para más información de mentiras sobre la salud, consultar el sitio web www.quackwatch.com.)

* *

Desafío 304 s ¿Es una mentira la homoeopatía?

* *

‘El ámbar es un remedio contra el dolor de muelas.’ ‘En un matrimonio, el compañero debería tener el grupo sanguíneo/signo zodiacal correcto.’ ‘Abrir un paraguas dentro de una casa trae mala suerte.’ ‘El número 8 da buena suerte.’ Esas son declaraciones de tonterías comunes en todo el mundo.

* *

Desafío 305 e A partir de los años 80 del pasado siglo, ciertas personas habían afirmado que es posible adquirir fácilmente los conocimientos de una persona a 1000 km de distancia, sin ningún tipo de comunicación entre ellas. No obstante, los asumidos ‘campos morfogenéticos’ para llevar a acabo esta hazaña no existen. ¿Por qué no?

* *

Desafío 306 s Se dice que en el edificio de una Brigada de Bomberos de una ciudad de los EEUU, hay una bombilla que ha permanecido encendida sin interrupción desde 1901 (al menos este era el caso en 2005). ¿Puede ser posible? Cientos de historias semejantes, frecuentemente conocidas como ‘leyendas urbanas,’ se pueden encontrar en el sitio web www.snopes.com. A pesar de todo, algunas de estas historia , no son leyendas urbanas, sino verdaderas, como lo demuestra este sitio.

* *

Una mentira corriente en la ciencia y en los negocios es la promesa de la energía libre. Pruebas falsas sobre esta mentira utilizan con frecuencia el electromagnetismo. Por otro lado, el electromagnetismo se basa en la relatividad, y la relatividad es con frecuencia suficiente para demostrar que lo que se dice es falso. Entréense para cuando surja la ocasión.

Para la gente que busca fondos para realizar dispositivos para conseguir energía libre,

la respuesta debería ser siempre la misma que en la Edad Media se les daba a los alquimistas que buscaban financiación para hacer oro: si usted estuviera en lo cierto, podría financiarse a sí mismo.

* *

‘Esta declaración ha sido traducida del Francés al Inglés.’ ¿Esta declaración es verdadera, falsa o ninguna de las dos?

* *

Desafío 307 s

En los aviones no hay fila 13. Muchos hoteles altos no tienen piso 13. ¿Qué hay detrás de este hábito? ¿Cuál es la verdad que se esconde detrás de ello? En una ocasión este autor le pidió a un cantante en Nápoles que cantara ‘Fenesta ca lucive’, una bella canción dada a conocer por Enrico Caruso e interpretada por otros muchos desde entonces. El cantante rehusó, explicando que el público local huiría corriendo y que el dueño del lugar se vería obligado a limpiarlo todo con sal, para espantar la mala suerte. A lo largo y ancho de todo el mundo podemos encontrar muchas supersticiones.

* *

Desafío 308 s

Durante un millar de años aproximadamente, determinadas personas han pretendido estar estigmatizadas, es decir, que ‘milagrosamente’ han sufrido heridas similares a las de padeció Jesús en su crucifixión. ¿Cómo se puede probar en un segundo de observación que todas esas personas, sin excepción, se han producido a sí mismos esas heridas?

* *

‘En la Edad Media y en la antigüedad, la gente creía que la Tierra era plana.’ Esta es una mentira famosa que raramente se cuestiona. El historiador Reinhard Krüger ha demostrado que la mentira se debe mayormente a los escritores Thomas Paine (1794) y Washington Irving (1928). El hecho es que desde Aristóteles, todo el mundo creía en una Tierra esférica.

* *

Desafío 309 s

¿Es el término ‘multiverso’, un pretendido opuesto a ‘universo’, una mentira o una creencia?

* *

Lo siguiente no es una mentira. Una buena forma de suprimir la curiosidad de los niños se utiliza en muchos entornos: deje a un niño mirar la televisión siempre que quiera. Hágalo durante unas semanas y no reconocerá al niño nunca más. Hágalo durante varios años, y habrá acabado con la curiosidad del niño para siempre. Internet y los smartphones tienen el mismo efecto..

* *

Desafío 310 e

¿Cómo podría demostrar que los ‘rayos de la Tierra’ son una mentira?

* *

¿Cómo demostraría que la declaración ‘las leyes de la Naturaleza podrían cambiar en

Desafío 311 s cualquier momento' es una mentira?

* *

Desafío 312 e 'Yo puedo generar energía partiendo del vacío.' Demuestre que ésto es mentira.

* *

Desafío 313 e 'No todo lo que existe se puede medir.' 'Hay cosas que no se pueden medir.' Demuestre que estas declaraciones frecuentes son mentira – sin excepción.

* *

'No todo es conocido.' Esta declaración es muy interesante: la física moderna afirma lo contrario en varios dominios. Por ejemplo, todas las formas de energía son conocidas; así son todas todas las formas de las entidades que se mueven. En pocas palabras, aún cuando esta declaración sea correcta – en realidad, no todo se conoce, especialmente en medicina – esto es con frecuencia utilizado por los embusteros. Preste atención cuando lo escuche; si la declaración está dicha sin aportar ninguna prueba, está hecha por un maleante.

* *

He aquí una mentira de los periodistas utilizando las matemáticas: 'Sus exámenes universitarios tratan a las mujeres postulantes peor que a los hombres; sus estadísticas muestran que sólo el 41 % del total de solicitantes admitidos son hembras, mientras que el 57 % son varones.' La universidad es pequeña y tiene solamente dos facultades; así que comprobemos los números.

La facultad 1 admitió el 60 % de todos los varones (60 de 100 solicitantes) y el 65 % de todas las solicitantes femeninas (13 de 20 solicitantes). La facultad 2 admitió el 30 % de todos los varones (3 de 10 solicitantes) y el 32 % de todas las hembras (16 de 50 solicitantes).

Desafío 314 e En total, la universidad por tanto admitió 63 de los 110 solicitantes masculinos (o el 57 %) y 29 de las 70 solicitantes femeninas (o el 41 %). Dicho de otra forma, aún cuando en cada facultad el porcentaje de mujeres admitidas resultó *superior*, el porcentaje de admisión *total* para las mujeres fue *inferior*. ¿Por qué? De hecho, esta es una historia verdadera; en esta versión, los números se han simplificado, para presentar la situación lo más claramente posible. Sin embargo una gran universidad tuvo, en una ocasión, que enfrentarse a este tipo de problema con los periodistas, a pesar de que se preferían a las mujeres en cada uno de los departamentos. Algunos periodistas son excelentes mentirosos

* *

Página 303 Muchas mentiras consisten solamente en un concepto, a veces en una sola palabra. Son ejemplos 'espada láser', 'éter', 'transustanciación' o 'nave espacial'. Hace mucho tiempo, cada palabra era un poema – hoy día, muchas palabras son mentiras. En realidad, la *ciencia ficción* es una fuente común de mentiras.

* *

Otro dominio en el cual las mentiras son corrientes es la industria de la alimentación.

Ahora es posible comprar huevos artificiales, tomates artificiales o gambas artificiales. Pero tampoco se libran de ésto los productos corrientes. Muchos productos contienen cisteína; durante décadas, la cisteína fue extraída del cabello humano. En Europa, hasta ahora, la mayoría de los productos alimenticios tampoco informan sobre el país de origen o sobre el contenido de ingeniería genética. La mayoría de los pretzels bávaros están hechos en China, por ejemplo.

* *

Una mentira famosa: los cultivos genéticamente modificados son buenos para el suministro de alimentos. De hecho, estos incrementan el uso de pesticidas, han reducido la fertilidad, cuestan más e incrementan los problemas alimenticios. El biocombustible para los coches ha producido los mismos desastrosos efectos

* *

‘X es la ciencia más antigua.’ Semejante declaración, donde X puede referirse a la metalurgia, la astronomía, la geografía, las matemáticas o a algún otro campo, se escucha de manera periódica. Obviamente, todas son mentiras y tonterías.

* *

Los físicos han ayudado a revelar que muchas declaraciones corrientes son falsedades. Son ejemplos: “la astrología sostiene” – “la creación ocurrió” – “el movimiento perpetuo es posible” – “el vacío es una fuente de energía” – “los rayos son lanzados por Zeus” – “algunas acciones traen mala suerte” – “la energía se acelera más rápido que la luz” – “la telepatía es posible” – “existen más de tres dimensiones espaciales” – “hay cosas que no pueden ser medidas” – “los milagros contradicen las leyes o las reglas de la Naturaleza” – “existen excepciones a las reglas de la Naturaleza” – “la teoría cuántica implica muchos mundos” – “no hay límites para la medición” – “en la Naturaleza existen cantidades infinitas” – “la supersimetría es válida” – “las partículas son membranas” – “existe un multiverso” – “la mente es más fuerte que la materia”. A lo largo de nuestra aventura mencionamos otras mentiras y muchos perjuicios divertidos y supersticiones.

* *

La British Broadcasting Corporation es famosa por sus bromas del 1 de Abril. Una de las mejores es el documental sobre los pingüinos voladores. Sencillamente busque en Internet la interesante y bonita película que muestra cómo una especie de pingüinos despegan y velan.

Desafío 315 e

LAS OBSERVACIONES Y SU RECOPIACIÓN

“El conocimiento es una declaración sofisticada de la ignorancia.”

Atribuido a Karl Popper

La recopilación de un gran número de declaraciones verdaderas sobre un tipo de observaciones, es decir, de un gran número de hechos, se llama *conocimiento*. Donde el

Ref. 271 dominio de las observaciones es suficientemente extenso, se habla de *ciencia*. Un *científico* es por lo tanto alguien que recolecta conocimiento.* Anteriormente descubrimos que una observación es una contribución clasificada en la memoria de varias personas. Puesto que hay movimiento en todo lo que nos rodea, la descripción de todas estas observaciones resultaría una tarea mastodóntica. Como para cualquier gran tarea, el uso de las herramientas apropiadas determinará, en gran medida, el grado del éxito que pueda obtenerse. Estas herramientas, en física y en todas las otras ciencias, pertenecen a tres grupos: herramientas para la recopilación de observaciones, herramientas para divulgar las observaciones y herramientas para divulgar las relaciones entre las observaciones. El último grupo ya ha sido tratado en la sección sobre el lenguaje y sobre las matemáticas. Solamente esbozaremos los otros dos.

¿RECOGEN LOS INSTRUMENTOS SUFICIENTES OBSERVACIONES?

“ Medir los que es mensurable; hacer mensurable lo que no lo es. ”

Frecuentemente atribuida, aunque incorrectamente, a Galileo.

Ref. 276

La física es una ciencia experimental; se basa en la *recogida* de observaciones. Para llevar a cabo esta tarea de manera efectiva, se han diseñado y construido toda clase de *instrumentos*, esto es, herramientas que faciliten las observaciones. Microscopios, telescopios, osciloscopios, así como termómetros, higrómetros, manómetros, pirómetros, espectrómetros entre otros, son ejemplo familiares. La precisión de muchas de esas herramientas está siendo continuamente mejorada aún en nuestros días; su producción constituye una parte considerable de la actividad industrial, sirviendo como ejemplos los aparatos de medición eléctrica y las herramientas de diagnóstico en la medicina, la química y la biología. Los instrumentos pueden ser tan pequeños como un diminuto punto de unos cuantos átomos de tungsteno, capaz de producir un rayo de electrones de varios voltios. y tan grandes como una circunferencia de 27 km, que produce en el CERN de Ginebra, un rayo de protones con más de 13 TV de votaje de aceleración efectiva. Han sido construidos instrumentos que almacenan y miden la materia conocida más fría del universo. Otros instrumentos pueden medir a muchos kilómetros de distancia variaciones de longitud bastante menores que el diámetro de un protón. Se han introducido instrumentos a gran profundidad en el interior de la Tierra, sobre la Luna, sobre varios planetas, y se han enviado fuera del sistema solar.

Todos los días, se están desarrollando e inventando instrumentos de medida mejores, más baratos y más precisos. A pesar del interés de estas actividades, en esta escalada, los instrumentos serán descritos sólo de pasada; hay disponibles muchos buenos libros de texto sobre ellos. Tampoco haremos mención en nuestra aventura a la mayoría de

Ref. 273, Ref. 274

* El término ‘cientista’ es un nombre inapropiado peculiar del idioma Inglés (scientist). Hablando con propiedad, un ‘cientista’ es un seguidor del *cientifismo*, una escuela filosófica extremista que trataba de resolver todos los problemas a través de la ciencia. Por esta razón, algunas sectas religiosas llevan el término en su denominación. Puesto que la lengua inglesa no dispone de un término más corto para designar a las ‘personas científicas’, como suelen ser llamadas, el término ‘cientista’ comenzó a aparecer en los Estados Unidos, a partir del siglo XVIII. Hoy día el término es usado en todos los países de habla inglesa – pero no fuera de ellos, afortunadamente.

Ref. 275
Vol. I, página 500

las observaciones recogidas por los instrumentos; sólo serán resumidas o citadas. Los resultados de las medidas más importantes de la física, están registrados en publicaciones estándar, tales como la Landolt–Börnstein series y en las revistas de física. El apéndice 18 proporciona un visión general de fuentes de información acreditadas.

¿Habrá nuevas observaciones futuras importantes en el dominio de los fundamentos del movimiento? Hoy por hoy, *en este específico dominio*, aún cuando el número de físicos y de publicaciones se encuentra en su punto más alto, el número de nuevos descubrimientos experimentales ha ido disminuyendo paulatinamente durante muchos años y es bastante pequeño en la actualidad. La sofisticación y la inversión necesaria para obtener nuevos resultados se ha hecho extremadamente alta. En muchos casos, los instrumentos de medida han alcanzado los límites de la tecnología, de los presupuestos o aún de la Naturaleza, como demuestra el CERN. Constantemente está incrementándose el número de experimentos que obtienen resultados que no muestran desviación con las predicciones teóricas. Está aumentando la cantidad de documentos históricos que intentan avivar campos de la investigación estancados o incluso aburridos. Reclamaciones de nuevos efectos y descubrimientos que resultan ser debidos a errores de medición, autoengaños o aún a fraudes, se han hecho tan frecuentes que el escepticismo sobre nuevos resultados se ha convertido en la respuesta común.

Lo más importante resulta ser que no se conocen diferencias entre las observaciones y las actuales teorías fundamentales del movimiento– la relatividad general y la teoría del campo cuántico – como tendremos ocasión de descubrir en los dos próximos volúmenes. Aunque en muchos dominios de la ciencia, incluyendo la física, se esperan todavía descubrimientos, nuevas observaciones sobre los fundamentos del movimiento constituyen solamente una posibilidad remota.

En resumen, la tarea de recolectar observaciones sobre los fundamentos del movimiento – aunque no sobre otros temas de la física – parece estar bastante *completa*. De hecho, la gran mayoría de las observaciones descritas en esta aventura fueron obtenidas antes de que acabara el siglo XX. No somos muy precoces en nuestro paseo.

“Cada generación se inclina a definir ‘el final de la física’ como coincidente con el final de sus contribuciones científicas.”
Julian Schwinger*

¿SE CONOCEN TODOS LOS OBSERVABLES FÍSICOS?

“Los científicos tienen modales odiosos, excepto cuando usted apoya su teoría; luego podrá pedirles dinero prestado.”
Mark Twain

* Julian Seymour Schwinger (b. 1918 New York City, d. 1994 Los Angeles), niño prodigio y físico, fue famoso por su claridad de pensamiento y sus excelentes clases. Trabajó sobre las guías de ondas y la radiación sincrotónica, realizó contribuciones a la física nuclear y desarrolló la electrodinámica cuántica. Por último recibió en 1965 el Premio Nobel de Física junto a Tomonaga y Feynman. Fue el director de tesis de muchos físicos famosos y escribió mucho e influyentes libros de texto. No obstante, al final de su vida, se mostró extrañamente interesado en un engaño que se volvió agrio: la fusión fría.

Ref. 272

La forma más práctica de *dar a conocer* las observaciones fue desarrollada hace mucho tiempo: las mediciones. Una medida permite la comunicación efectiva de una observación a otros tiempos y lugares. Esto no siempre resulta tan trivial como suena; por ejemplo, ¿en la Edad Media la gente era incapaz de comparar con precisión la ‘frialdad’ de los inviernos en dos años diferentes! El invento del termómetro proporcionó una solución confiable a este requerimiento. Una *medida* es por lo tanto la clasificación de una observación en un conjunto estándar de observaciones. Dicho con sencillez:

▷ Una medida es la *comparación con un estándar*.

Esta definición de medida es precisa y práctica, y por consiguiente ha sido aceptada universalmente. Por ejemplo, cuando se mide la longitud de una casa, este aspecto de la casa se clasifica en un determinado conjunto de estándares de longitud, a saber, el conjunto de longitudes definido para los múltiplos de una unidad. Una *unidad* es el nombre abstracto del estándar para un determinado observable. Los números y las unidades permiten la comunicación más precisa y efectiva de los resultados medidos.

Para todas las cantidades mensurables, han sido definidas todas las unidades estándar prácticas y los métodos de medida; las principales están recogidas y definidas en el apéndice A. Todas las unidades se derivan de una pocas fundamentales; esto se debe en última instancia al limitado número de nuestros sentidos: longitud, tiempo y masa están relacionados con la vista, el oído y el tacto. A su vez, nuestro número limitado de sentidos, se debe al pequeño número de observables de la Naturaleza. Animales y máquinas comparten los mismos sentidos fundamentales.

Llamaremos *observables* a los diferentes aspectos medibles de un sistema. La mayoría de los observables, como el tamaño, la velocidad, la posición, etc. se pueden describir con números, y en este caso son *cantidades*, es decir, múltiplos de alguna unidad estándar. Los observables generalmente están abreviados por *símbolos (matemáticos)*, generalmente letras de algún alfabeto. Por ejemplo, el símbolo *c* especifica comúnmente la velocidad de la luz. Para la mayoría de los observables, los símbolos estándar han sido definidos por instituciones internacionales.* Los símbolos de los observables que describen el estado de un objeto también se llaman *variables*. Las variables de las que dependen otros observables a menudo se denominan *parámetros*. (Recuerde: un parámetro es una variable constante.) Por ejemplo, la velocidad de la luz es una constante, la posición es una variable, y la temperatura es, con frecuencia, un parámetro, del que, por ejemplo, puede depender la longitud de un objeto. Nótese que no todos los observables son cantidades; particularmente, las paridades no son múltiplos de ninguna unidad.

Los observables físicos son herramientas para comunicar las observaciones. ¿Es posible hablar de observaciones como un absoluto? Sí, tal como lo hacemos todos los días. Pero es el hobby de muchos filósofos fingir lo contrario. Discuten si hay realmente un ejemplo para un ‘Elementarsatz’ – un hecho atómico – mencionado por Wittgenstein en

* Todos los símbolos matemáticos utilizados en este camino, junto a los alfabetos de los que han sido tomados, están recogidos en una lista en el apartado apéndice 16 sobre notación. Siempre que sean definidos seguirán los estándares internacionales. Los símbolos estándar de las cantidades físicas, tal como han sido definidos por la International Standards Organization (ISO), la International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP) y la International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), se pueden encontrar por ejemplo en la *biblia*, es decir, en el *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press, 1992.

su *Tractatus*. Los físicos tienen al menos uno que encaja: Las *diferencias existen*. Es una declaración sencilla; en la parte final de nuestro paseo, interpretará un papel fundamental.

En la actualidad, todos los observables físicos son conocidos. La tarea de definir herramientas para la comunicación de las observaciones por tanto puede considerarse *terminada*. Esta es una declaración sencilla y contundente. Demuestra que los fundamentales del movimiento están casi completados.

En efecto, el BIPM, el Bureau International des Poids et Mesures, ha dejado de añadir nuevas unidades. La última unidad, el katal, fue introducida en 1999 como abreviación de mol/s. La lista completa de las unidades físicas se presenta en el apéndice A.

No se espera encontrar nuevos observables. En el pasado, la importancia de un físico podía catalogarse por el número de observables que había descubierto. El descubrimiento de observables siempre ha sido menos corriente que el descubrimiento de nuevos patrones, o ‘leyes’ de la Naturaleza. Aún un gran científico como Einstein, que descubrió varios patrones de la Naturaleza, sólo introdujo un nuevo observable, el tensor métrico para la descripción de la gravedad. Siguiendo este criterio – al igual que otros físicos – Maxwell podía considerarse el físico más importante, habiendo introducido diversos observables materia-dependientes. Para Schrödinger, la función de onda que describe el movimiento del electrón pudo ser considerado un observable (aún cuando es una cantidad necesaria para calcular los resultados medidos, y no un observable en sí mismo). Por cierto, la introducción de *cualquier* término que sea adoptado por otros resulta un evento raro; ‘gas’, ‘entropía’ o ‘energía cinética’ son ejemplos de ello. Generalmente, los observables fueron desarrollados por muchas personas en colaboración de unas con otras. De hecho, casi ningún observable lleva el nombre de una persona, mientras que muchas ‘leyes’ sí.

Dado que la lista de observables necesaria para describir la Naturaleza está completa, ¿significa ésto que todos los patrones o reglas de la Naturaleza son conocidos? No necesariamente; en la historia de la física, los observables fueron, de manera general, definidos y medidos mucho *antes* de que se encontraran las reglas precisas que los conectaban. Por ejemplo, todos los observables utilizados en la descripción de movimiento mismo – tal como el tiempo, la posición y sus derivados, cantidad de movimiento, energía y todas las cantidades termodinámicas – fueron definidos con anterioridad o durante el siglo XIX, mientras que las versiones más exactas de los patrones o ‘leyes’ de la Naturaleza que los conectan, *relatividad especial* y *termodinámica del no-equilibrio*, han sido encontradas en el siglo XX. Lo mismo es verdad para todos los observables de interacción electromagnética. Los patrones correctos de la Naturaleza, la *electrodinámica cuántica*, fue descubierta mucho después que los observables correspondientes. Los últimos observables descubiertos han sido los campos de las interacciones nucleares fuerte y débil. También, en este caso, los patrones de la Naturaleza fueron formulados mucho después.

En resumen, se han descubierto todos los observables sobre los fundamentales del movimiento. Nos encontramos, en este momento de la historia, en una situación afortunada: podemos hablar con precisión de todo el movimiento observado en la Naturaleza. La última parte de nuestra aventura explorará la minúscula posibilidad de errores o lagunas de esta declaración.

¿LLEVAN TIEMPO LAS OBSERVACIONES?

Una observación es una interacción con alguna parte de la Naturaleza dirigida a la producción de un registro, tal como un recuerdo en el cerebro, un dato en una cinta, la tinta sobre un papel, o cualquier otro patrón fijo aplicado a un soporte. El proceso necesario de una interacción irreversible, a menudo se le llama *escritura* de un registro. Obviamente, escribir toma una determinada cantidad de tiempo; cero tiempo de interacción no produciría ningún registro en absoluto. Por lo tanto cualquier dispositivo de grabación, incluido nuestro cerebro, siempre necesitará algún *tiempo medio* de observación, por corto que pudiera resultar.

En resumen, lo que llamamos imagen fija, siendo ésta una imagen mental o una fotografía, es siempre el promedio de tiempo de una situación en movimiento. Sin promedios de tiempo, no tendríamos recuerdos fijos. Por otro lado, cualquier promedio de tiempo introduce un desenfoque que esconde ciertos detalles; y en nuestra búsqueda de la precisión, en determinados momentos, esos detalles pueden resultar importantes. El descubrimiento de esos detalles comenzará en la siguiente etapa de nuestro paseo, el volumen que explora al teoría cuántica.

En la parte final del ascenso a nuestra montaña, descubriremos que hay un mínimo para el posible tiempo promedio. Las observaciones de esa corta duración muestra tantos detalles que aún pierde la distinción entre las partículas y el espacio vacío. En contraste, nuestros conceptos de la vida cotidiana aparecen sólo tras un tiempo medio relativamente largos. La búsqueda de una descripción de la naturaleza independiente del tiempo promedio es uno de los grandes retos de nuestra aventura.

¿ES LA INDUCCIÓN UN PROBLEMA PARA LA FÍSICA?

“ Nur *gesetzmäßige* Zusammenhänge sind denkbar.* ”
Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 6.361

“ Existe una tradición de oposición entre los defensores de la inducción y los de la deducción. En mi opinión sería tan sensato como tomar los dos extremos de un gusano para discutir. ”
Alfred North Whitehead

Inducción es el término habitual utilizado para el acto de extraer, de un número pequeño y finito de experimentos, conclusiones generales sobre el resultado de *todos* los experimentos posibles realizados en otros lugares, o en otros tiempos. En cierto sentido, es un término técnico para asumir un riesgo, lo que resulta fundamental para cualquier declaración científica. Las declaraciones universales, incluidas las llamadas ‘leyes’ y patrones de la Naturaleza, confían en la inducción. La inducción ha sido un tema de discusión importante para los comentaristas científicos. Con frecuencia nos topamos con la observación de que el conocimiento en general, y la física en particular, se basa en la inducción para hacer sus declaraciones. Según algunos, la inducción es un tipo de creencia oculta que subyace en todas las ciencias pero que la mismo tiempo contrasta con ellas.

* ‘Sólo las conexiones *regulares* son *pensables*. Traducción al español de Jesús Padilla Gálvez.

Para evitar la pérdida de energía, haremos solamente algunas observaciones. La primera puede deducirse de un simple experimento. Trate de convencer a un crítico de la inducción para que ponga la mano en el fuego. Nadie que honestamente llame inducción a una creencia, sacaría la conclusión de que algunas experiencias en el pasado de tal acto, pudiera ser peligroso también en el futuro ... En resumen, de alguna manera la inducción funciona. Un segundo punto es que las declaraciones universales de la física se realizan siempre abiertamente; nunca son ocultas. La negativa de poner la mano en el fuego es una consecuencia de la invariancia de las observaciones bajo traslaciones de tiempo y espacio. De hecho, las declaraciones generales de este tipo forman la verdadera base de la física. No obstante, ninguna declaración física es una creencia solamente porque sea universal; siempre permanece abierta a comprobaciones experimentales. La inducción física no es un método oculto de argumentación, es una parte explícita de declaraciones experimentales. En realidad, la lista completa de las declaraciones 'inductivas' utilizadas en física es bien conocida: la dimos en la primera parte de nuestra aventura. Estas declaraciones son tan importantes que ha recibido un nombre especial: se les llama *simetrías*. La lista de todas las simetrías conocidas de la Naturaleza es la lista de todas la declaraciones inductivas utilizadas en la física.

Vol. I, página 300

Quizás el mejor argumento para el uso de la inducción es que no hay forma de evitarla cuando se reflexiona. No hay forma de pensar, hablar o recordar sin utilizar conceptos, es decir, sin asumir que la mayor parte de los objetos o entidades o procesos, conservan las mismas propiedades a través del tiempo. Tampoco hay forma de comunicarse con los demás sin asumir que las observaciones realizadas desde el punto de vista de los otros son similares a las propias nuestras. No hay forma de pensar sin simetría ni inducción. De hecho, los conceptos que relacionan la simetría con la inducción, como el espacio y el tiempo, pertenecen a los conceptos fundamentales del lenguaje. En realidad, las únicas frases que no utilizan la inducción, las frases de la lógica, no tienen ningún contenido (*Tractatus*, 6.11). ¡Sin inducción no podremos clasificar las observaciones de ninguna manera! La evolución nos ha dado memoria y un cerebro porque la inducción funciona. Criticar la inducción no es criticar las ciencias naturales, es criticar el uso del pensamiento en general. Nunca deberíamos tomar demasiado en serio a las personas que hacen lo que critican de los demás; señalar esporádicamente el ridículo de este esfuerzo en la cantidad justa de atención que se merecen.

Página 301

Ref. 271

Desafío 316 s

El asunto podría concluirse aquí, si no fuera por algunos interesantes desarrollos de la física moderna que añaden dos clavos en el ataúd de los argumentos en contra de la inducción. Primero, en física cada vez que hacemos declaraciones sobre todos los experimentos, todas las veces o todas las velocidades, tales declaraciones son en realidad sobre un *número finito* de casos. Sabemos – hoy más que nunca – que los infinitos, tanto en tamaño como en número, no ocurren en la Naturaleza. El número infinito de casos que aparecen en las declaraciones de la física clásica y en la mecánica cuántica son aparentes, no reales, y se debe a simplificaciones y aproximaciones de los humanos. Declaraciones de que un determinado experimento arroja el mismo resultado 'en todas partes' o de que una ecuación es correcta 'siempre', comprende todas las veces un número *finito* de ejemplos. Gran parte de la frecuente repulsión instintiva por lo diferente a tales declaraciones se evitan de esta manera. En las ciencias, así como en este libro, 'todo' *nunca* quiere decir un número infinito de casos.

Segundo, es bien conocido que con una muestra de pocos casos, la conclusión extraí-

da no sería extrapolable a una generalidad si los casos fueran independientes entre ellos. No obstante, esta conclusión sería correcta si los casos fueran interdependientes. De la observación de que una persona encontró un penique en la calle en dos meses consecutivos, no se puede concluir que alguien encontrará un penique al mes siguiente. La inducción solamente es correcta si sabemos que todos los casos tienen un comportamiento similar, por ejemplo, porque tengan el mismo origen. Por ejemplo, si un vecino con un agujero en el bolsillo lleva su salario por esa calle una vez al mes, y el agujero siempre se abre en ese punto porque es el principio de una escalera, entonces la conclusión podría ser correcta.

Los resultados de la física moderna que encontrará en la parte final de nuestro paseo, muestran que todas las situaciones de la Naturaleza son interdependientes, y por tanto, probaremos que lo que es conocido como ‘inducción’ es realmente una conclusión lógicamente correcta.

“ En el progreso de la física, la excepción, con frecuencia, resulta ser el caso general. ”

LA BÚSQUEDA DE LA PRECISIÓN Y SUS IMPLICACIONES

“ Der Zweck der Philosophie ist die logische Klärung der Gedanken.* ”
Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 4.112

Hablar correctamente sobre el movimiento quiere decir hacerlo con precisión. La precisión requiere evitar tres errores corrientes en la descripción de la Naturaleza.

Ref. 277 Primero, los conceptos deben ser *consistentes*. Los conceptos nunca deberían contener una contradicción en su definición. Por ejemplo, cualquier fenómeno que ocurra en la Naturaleza será un fenómeno ‘natural’; por tanto, hablar sobre fenómenos ‘sobrenaturales’ o fenómenos ‘no naturales’ resultaría un error que nadie interesado en el movimiento debería dejar pasar sin protestar; tales términos encierran una contradicción lógica. Intrínsecamente, *todas* las observaciones son naturales. A propósito, hay una recompensa de más de un millón de dólares para cualquiera que pruebe lo contrario. Durante más de veinte años, a pesar de los intentos, nadie ha sido capaz de conseguirlo.

Ref. 278 Segundo, los conceptos deben ser *inalterables*. Los conceptos no deberían ser inciertos o estar cambiando sus definiciones constantemente. Su contenido y sus límites deben ser constantes y explícitos. Lo contrario a esto se da frecuentemente entre los chiflados o en los políticos populistas; ello lo distingue de los pensadores más confiables. Los físicos también caen en esta trampa; por ejemplo, hay, por supuesto, sólo un *único* universo (físico), como su propio nombre indica. Hablar sobre más de un universo es un error cada vez más frecuente.

Tercero, los conceptos deben ser *usados y definidos*. Los conceptos no deberían ser utilizados fuera de su dominio de aplicación. Resulta fácil sucumbir a la tentación de transferir resultados desde la física a la filosofía sin comprobar el contenido. Sirva como

* ‘El objetivo de la filosofía es la aclaración lógica de los pensamientos.’ Traducción al español de Jesús Padilla Gálvez.

ejemplo la pregunta: ‘¿Por qué las partículas siguen las leyes de la Naturaleza?’ El fallo de la pregunta se debe a un malentendido del término ‘leyes de la Naturaleza’ y la confusión con las leyes del estado.

Si la Naturaleza estuviera gobernada por ‘leyes’, se podrían cambiar por el parlamento.

Debemos recordar que ‘leyes de la Naturaleza’ significa simplemente ‘patrones’, ‘propiedades’ o ‘descripción de comportamiento’. Por tanto podemos expresar correctamente la pregunta de otro modo como ‘¿Por qué las partículas se comportan de la manera en la que hemos descrito su comportamiento?’ y podremos reconocer su insensatez.

A lo largo de nuestro paseo, frecuentemente nos sentiremos tentados por estos tres errores. A continuación se presentan varias de esas situaciones y las formas de evitarlas.

“La consistencia es el último recurso de la falta de imaginación.”
Oscar Wilde

¿QUÉ SON LAS INTERACCIONES? – SIN EMERGANCIA

“El todo siempre es más que la suma de sus partes.”
Aristóteles, *Metafísica*, 10f–1045a.

En la descripción física de la Naturaleza, el todo siempre es *más* que la suma de sus partes. En realidad, la diferencia recibe un nombre especial:

- ▷ La diferencia entre un todo y las suma de sus partes se conoce como *interacción entre las partes*.

Por ejemplo, la energía del todo menos la suma de las energías de sus partes se llama energía de interacción. La suma de las interacciones es un tema importante de la física. En otras palabras, la física está interesada *principalmente* en la diferencia entre las partes y el todo. Esto es contrario a lo que sugieren los malos periodistas y otros pensadores perezosos.

Hay que señalar que el término ‘interacción’ está basado en la observación general de que cualquier cosa que afecte a cualquier otra cosa queda, a su vez, afectada por ella:

- ▷ Las interacciones son recíprocas.

Por ejemplo, si un cuerpo modifica la cantidad de movimiento de otro, el segundo modifica la cantidad de movimiento del primero en la misma cantidad (negativa). La reciprocidad de las interacciones es un resultado de las ‘leyes’ de la conservación. La reciprocidad es también la razón de que alguien que utilice el término ‘interacción’ sea considerado como un hereje por las religiones monoteístas, como señalan los teólogos de manera regular. Estos expertos en creencias regularmente enfatizan que tal reciprocidad niega implícitamente la inmutabilidad de la deidad. (¿Es esto correcto?)

La simple definición dada anteriormente suena elemental, pero conduce a sorprendentes conclusiones. Tomemos la idea atómica de Demócrito en su forma moderna: La Naturaleza está formada por vacío y por partículas. La primera consecuencia es la *paradoja de la descripción incompleta*: Los experimentos demuestran que hay interacciones entre el vacío y las partículas. No obstante, las interacciones son diferencias entre las partes y el todo, en este caso entre el vacío y las partículas por un lado, y el todo por el otro. Consecuentemente deducimos que la Naturaleza no está hecha solamente de vacío y partículas.

La segunda consecuencia es la *paradoja de la descripción demasiado completa*. Esto parte del resultado que será deducido más adelante:

- ▷ Los experimentos demuestran que las interacciones suceden a través del intercambio de partículas.

No obstante, ya hemos contado con las partículas como los pilares de la Naturaleza. ¿Significa esto que la descripción de la Naturaleza como vacío y partículas es una descripción demasiado completa, contando las mismas cosas dos veces? Resolveremos ambas paradojas en la última parte de nuestro ascenso a la montaña.

Desafío 318 s

Vol. VI, página ??

La aplicación de la definición de interacción también resuelve la pregunta frecuentemente planteada de si en la Naturaleza existen propiedades ‘emergentes’, es decir, propiedades de sistemas que no se desprenden de las propiedades de sus partes y las interacciones. Por la definición de interacción, no hay propiedades emergentes. Las propiedades ‘emergentes’ solamente pueden aparecer si las interacciones fueran aproximadas o descuidadas. La idea de propiedades ‘emergentes’ es un producto de mentes con horizontes restringidos, incapaces de ver o admitir la riqueza de las consecuencias que los principios generales pueden producir. Al defender la idea del surgimiento, se menosprecia la idea de las interacciones, trabajando, tal vez inconscientemente, en un hecho furtivo aparentemente inocuo, pero de hecho contra el uso de la razón en el estudio de la Naturaleza. La ‘emergencia’ es una superstición.

Vol. I, página 456

Ref. 280

¿QUÉ ES LA EXISTENCIA?

“¿Sabes lo que más me gusta? Preguntas retóricas.”

Ref. 281

Suponga que un amigo le dice ‘¡Hoy he visto un *grampus!*’ Naturalmente usted preguntaría que cómo era. ¿Qué respuesta esperaría usted? Nosotros esperaríamos algo similar a ‘Es un animal con un determinado número de cabezas parecidas a un *X*, sujetas a un cuerpo como un *Y*, con alas como una *Z*, que hace un ruido como un *U* y que sintió como una *V*’ – las letras denotan cualquier otro animal u objeto. Hablando de manera general, en el caso de un objeto, esta escena de los Viajes de Darwin a Sudamérica, demuestra que para poder hablar unos con otros, es necesario en primer lugar ciertos conceptos básicos comunes (‘animal’, ‘cabeza’, ‘ala’, etc.).* Además, para la definición de una nueva entidad se necesita una caracterización de sus partes (‘tamaño’, ‘color’),

* Por cierto, un grampus era el nombre que antiguamente se le daba a una ‘orca’.

de la forma en las que se relacionan entre sí, y de la forma que el todo se relaciona con el mundo de fuera ('sentir', 'sonido'). En otras palabras, para que un objeto exista, debemos poder proporcionar una lista de las relaciones con el mundo exterior.

▷ Un objeto *existe* si podemos relacionarnos con él.

Desafío 319 s ¿Es suficiente la observación para determinar la existencia?

Para un concepto abstracto, como 'tiempo' o 'supercuerda', la definición de la existencia tiene que ser redefinida sólo marginalmente:

▷ *La existencia (física)* es la efectividad para describir las interacciones con precisión.

Esta definición es aplicable a los árboles, tiempo, partículas virtuales, números imaginarios, entropía y muchas otras cosas. Por lo tanto no tiene sentido discutir si 'existe' un concepto físico o es 'solamente' una abstracción utilizada como herramienta para la descripción de las observaciones. Las dos posibilidades coinciden. El punto de discrepancia sólo puede ser si la descripción proporcionada por un concepto es o no *exacto*.

Para los conceptos matemáticos, la existencia tiene, de alguna manera, un significado diferente: se dice que existe un concepto matemático si no lleva incorporado contradicciones. Esto es un requerimiento mucho más débil que para la existencia física. Es por lo tanto incorrecto deducir la existencia física a partir de la existencia matemática. Esto es un error frecuente; desde los tiempos de Pitágoras en adelante, con frecuencia se decía que puesto que los conceptos matemáticos existen, deben existir por lo tanto en la Naturaleza. Históricamente, este error ocurrió con las declaraciones de que los planetas 'debían' tener órbitas circulares, que las formas de los planetas 'debían' ser esferas o que el espacio físico 'debía' ser Euclidiano. Hoy ésto continúa sucediendo con las declaraciones de que el espacio y el tiempo 'deben' ser continuos y que la Naturaleza 'debe' ser descrita mediante conjuntos. En todos esos caso el razonamiento es erróneo. De hecho, los continuos intentos para deducir la existencia física desde la existencia matemática oculta que lo contrario es correcto: una breve reflexión muestra que la existencia matemática es un caso especial de la existencia física.

Desafío 320 s

Notemos que también hay un tipo diferente de existencia, a saber, la *existencia psicológica*. Se puede decir que un concepto existe psicológicamente si describe una experiencia interna humana. Por tanto un concepto puede existir psicológicamente aunque no exista físicamente. Resulta fácil encontrar ejemplos partiendo de las religiones o desde sistemas que describen experiencias internas. También los mitos, las leyendas y las tiras cómicas, definen conceptos que solamente existen psicológicamente no físicamente. En nuestro paseo, siempre que nos reframamos a la existencia, querremos hacerlo solamente a la existencia física.

Desafío 321 s

¿EXISTEN LAS COSAS?

“ Wer Wissenschaft und Kunst besitzt,
 Hat auch Religion;
 Wer jene beiden nicht besitzt,
 Der habe Religion.*
 Johann Wolfgang von Goethe, *Zahme Xenien*,
 IX

Usando la definición anterior de existencia, la pregunta se convierte en trivial o imprecisa. Es trivial en el sentido de que las cosas existen necesariamente si describen observaciones, puesto que fueron definidas de esa manera. Pero quizás el interrogador lo que quiera preguntar es: ¿Verdaderamente existen con independencia del observador?

Usando lo anterior, esta pregunta puede reformularse así: ‘¿Existen las cosas que observamos independientemente de la observación?’ Tras miles de años de intensas discusiones por filósofos, lógicos, sofistas profesionales y aficionados, la respuesta es la misma: ‘Sí’, porque el mundo no cambió tras la muerte de la bisabuela. La desaparición de los observadores no parece que cambie el Universo. Estos hallazgos experimentales pueden ser corroborados insertando la definición de ‘existencia’ en la pregunta, que entonces se convertiría en: ‘¿Interactúan las cosas que observamos con otros aspectos de la Naturaleza cuando no interactúan con las personas?’ La respuesta es evidente. Varios libros populares sobre mecánica cuántica fantasean sobre la importancia de la ‘mente’ de los observadores – cualquiera que sea lo que este término quiera significar; proporcionan bonitos ejemplos de autores que se ven a sí mismos como irremplazables, pareciendo haber perdido la habilidad de verse como parte de una entidad mayor.

Por supuesto hay otras opiniones sobre la existencia de las cosas. La más famosa es la del obispo George Berkeley (b. 1685 Kilkennys, d. 1753 Oxford) quien con razón entendió que los pensamientos basados solamente en las observaciones, si se extendieran, podrían socavar la base de la organización religiosa de la cual era uno de los altos directivos. Para contraatacar esta tendencia, publicó en 1710 *A Treatise Concerning the Principles of Human Knowledge*, un libro negando la existencia del mundo material. Este libro reaccionario llegó a ser ampliamente conocido en los círculos de ideas afines (fue una época donde se escribían pocos libros) a pesar de que se basa en una idea fundamentalmente defectuosa: asume que el concepto de ‘existencia’ y el de ‘mundo’ se pueden definir independientemente. (Usted puede sentir curiosidad por intentar la hazaña.) Berkeley tenía dos objetivos cuando escribió su libro. Primero, trató de negar la capacidad de las personas para alcanzar juicios sobre la Naturaleza o sobre cualquier otro asunto *desde su propia experiencia*. Segundo, también trató de negar el *alcance ontológico* de la ciencia, es decir, las conclusiones que se pueden extraer desde la experiencia en relación con las preguntas sobre la existencia humana. (Más tarde, una universidad no se avergonzó de utilizar su nombre.) Incluso aunque Berkeley está generalmente desacreditado hoy en día, realmente consiguió su principal objetivo: fue el creador de la afirmación de que la ciencia y la religión no se contradicen, sino que se *complementan* entre sí. Para Berkeley, religión no significaba moralidad o espiritualidad; todo científico es amigo de ambas. Por religión, Berkeley quería decir que el conjunto estándar de creencias que él sostenía estaba por encima de las deducciones de la razón. La declaración ampliamente citada

* El que posee ciencia y arte, también tiene religión; el que no posea las dos, mejor tener religión.

sobre la compatibilidad entre la ciencia y la religión, en sí misma una creencia, incluso hoy día es sinceramente mantenida por muchos.

Otro error consiste en preguntar *por qué* existen las cosas. La pregunta carece de sentido. Es una pérdida de tiempo a causa de extrañas creencias. Cuando se investiga sobre el origen del movimiento, *todas* las creencias están en el camino. Llevar creencias es como viajar con exceso de equipaje: hacerlo nos impide alcanzar el objetivo de nuestra aventura.

¿EXISTE EL VACÍO?

« Profesor: ‘¿Qué es lo que hay entre el núcleo y los electrones?’
Estudiante: ‘Nada, sólo aire.’ »

En las discusiones filosóficas el ‘vacío’ se define generalmente como ‘no-existencia’. Entonces se convierte en un juego de palabras para responder con un sí o un no a la pregunta ‘¿Existe el vacío?’ La expresión ‘la existencia de la no-existencia’ resulta o una contradicción de términos o al menos inciertamente definida; el tema no debiera parecer tener gran interés. No obstante, en física surgen preguntas similares, y un físico debiera estar preparado para saber la diferencia entre ésta y la situación anterior. ¿Existe el vacío? ¿Existe el espacio vacío?. O, ¿está el mundo ‘lleno’ en todas partes, como el biólogo más conservador Aristóteles mantenía? En el pasado, la gente moría por dar una respuesta que era inaceptable para las autoridades.

No resulta obvio, pero sin embargo es importante que en la física moderna los conceptos de ‘vacío’ y ‘espacio vacío’ no son lo mismo que el concepto filosófico de ‘vacío’. El ‘vacío’ (en física) no define la ‘no-existencia’; por el contrario, define la ausencia de materia y radiación. El vacío (en física) es una entidad con propiedades observables específicas, tales como su número de dimensiones, sus constantes electromagnéticas, su curvatura, su masa evanescente, su interacción con la materia a través de la curvatura y a través de su influencia en la descomposición, etc. En la [página 147](#) se proporciona una tabla de las propiedades del vacío físico. Históricamente tomó mucho tiempo clarificar la distinción entre un vacío físico y un vacío filosófico. La gente confundía los dos conceptos y debatieron la existencia del vacío (físico) durante más de dos mil años. Los primeros en declarar que sí existía, con el valor suficiente para intentar mirar a través de la contradicción lógica en la realidad física subyacente, fueron Leucipo y Demócrito, los pensadores más atrevidos de la antigüedad. A su vez, sus especulaciones provocaron la respuesta reaccionaria de Aristóteles, quien rechazó el concepto de vacío. Aristóteles y sus discípulos propagaron la creencia sobre el *temor al vacío* en la Naturaleza (horror vacui).

La discusión cambió completamente en el siglo XVII, cuando Torricelli ideó el primer método experimental para realizar el vacío.* Utilizando mercurio en un tubo de cristal, produjo el primer vacío en un laboratorio. ¿Puede adivinar cómo? Alrededor de 1900 aparecieron nuevamente debates contra la existencia del vacío, cuando se sostenía que la

Desafío 323 s

* Evangelista Torricelli (b. 1608 Faenza, d. 1647 Florence), físico, alumno y sucesor de Galileo. La unidad (no-SI) de presión ‘torr’ se llama así en su honor.

luz necesitaba ‘éter’ para su propagación, usando casi los mismos argumentos que se habían utilizado doscientos años antes, pero con diferentes palabras. No obstante, fallaron los experimentos para detectar cualquiera de las supuestas propiedades de este concepto poco definido. Los experimentos en el campo de la relatividad general demostraron que un vacío se puede mover – aunque de una manera completamente diferente de la que se esperaba que lo hiciera el éter – que el vacío se puede doblar, pero luego tiende a volver a su forma. Posteriormente, a finales del siglo XX, la teoría del campo cuántico volvió a argumentar contra la existencia del verdadero vacío y en favor de un espacio lleno de pares virtuales de partícula-antipartícula. El asunto culminó con la discusión sobre la constante cosmológica.

Vol. VI, página ??

En resumen, el vacío (físico) existe. La pregunta ‘¿Existe el vacío (filosófico)?’ solamente quedará establecida de manera concluyente en la última parte de este paseo, de una manera bastante sorprendente.

Vol. VI, página ??

“Natura abhorret vacuum.

”
Antigüedad

¿ES INFINITA LA NATURALEZA?

“Resulta cierto y evidente para nuestros sentidos, que en el mundo algunas cosas están en movimiento. Ahora bien todo lo que se mueve es movido por algún otro... Si eso por lo que se mueve fuera a su vez ser movido, éste último necesitaría también ser movido por algún otro, y luego por otro de nuevo. Pero esto no puede continuar hasta el infinito, porque entonces no habría ningún primer motor y consecuentemente, ningún otro motor, observando que los motores posteriores sólo se mueven en la medida en que son movidos por el primer motor, como el bastón sólo se mueve por el movimiento de la mano. Por lo tanto, es necesario llegar hasta el primer motor movido o ningún otro; y ésto todo el mundo entiende que es dios.”

Tomás de Aquino (b. c. 1225 Aquino, d. 1274 Fossanova) *Summa Theologiae*, I, q. 2.

La mayor parte de las modernas discusiones sobre la teoría de conjuntos se centra en las formas de definir el término ‘conjunto’ por las recopilaciones de los distintos tipos de infinito. Para la descripción del movimiento ésto nos lleva a dos preguntas: ¿Es infinito el Universo? ¿Es un conjunto? Comencemos con la primera. Iluminando la pregunta desde varios puntos de vistas, descubriremos a la vez que es simple e imprecisa.

¿Necesitamos infinitas cantidades para describir la Naturaleza? Ciertamente, en la física clásica y en la cuántica, sí, por ejemplo, en el caso del espacio-tiempo. ¿Es ésto necesario? Ahora ya podemos decir unas cuantas cosas.

Cualquier conjunto puede resultar finito en un aspecto e infinito en otro. Por ejemplo, es posible emplear a lo largo de una distancia matemática finita una cantidad infinita de tiempo. Es también posible viajar a cualquier distancia en una cantidad dada de tiempo

matemático, teniendo opción de una velocidad infinita, incluso teniendo en cuenta la relatividad, como explicamos anteriormente.

Vol. II, página 44

A pesar del uso de infinitos, los científicos están todavía limitados. vimos anteriormente que existen varios tipos de infinitos. No obstante, ningún infinito mayor que la cardinalidad de los números reales interpreta un papel en la física. Ningún espacio de funciones o espacio de fase en la física clásica ni ningún espacio de Hilbert en la teoría cuántica es mayor que la cardinalidad. A pesar de la habilidad de los matemáticos para definir clases mucho mayores de infinitos, la descripción de la Naturaleza no las necesita. Aún las descripciones más elaboradas del movimiento utilizan sólo el infinito de los números reales.

Página 310

Ref. 282

Desafío 324 s

Pero es posible decir con certeza *de la Naturaleza* o de uno de sus aspectos que es realmente *infinito*? ¿Puede esa declaración ser compatible con las observaciones? No. Resulta evidente que cualquier declaración que clame que algo en la Naturaleza es infinito es una creencia, y no está respaldada por las observaciones. Eliminaremos con paciencia esta creencia en lo que sigue.

Ref. 267

La posibilidad de introducir falsos infinitos hace cualquier discusión sobre si la humanidad está cerca del ‘final de la ciencia’ bastante difícil. No existe relación entre la cantidad de conocimiento y el tiempo requerido para descubrirlo. Dependiendo de la velocidad con la que se avance hacia ello, el final de la ciencia puede estar cerca o resultar inalcanzable. En la práctica, los científicos tienen por tanto el poder de *hacer* infinita la ciencia o no, por ejemplo, reduciendo la velocidad del progreso. Ya que los científicos necesitan fondos para su trabajo, se puede adivinar la posición que de manera general pueden adoptar.

En resumen, no se puede probar que el Universo sea infinito. Pero, ¿puede probarse que es *finito*? A primera vista, ésta debería ser la única posibilidad que queda. (No es así, como ya veremos.) Pero aunque muchos han tratado de describir al Universo como finito en todos sus aspectos, ninguno hasta el momento ha tenido éxito. Con objeto de comprender el problema con el que se encontraron, continuaremos con la otra pregunta mencionada anteriormente:

¿ES UN CONJUNTO EL UNIVERSO?

Ref. 283

Una simple observación nos lleva a preguntarnos si el Universo es un conjunto. Durante 2500 años se ha dicho que el Universo estaba formado por vacío y por partículas. Esto implica que el Universo está formado por un determinado *número* de partículas. Quizás la única persona que llevó esta conclusión hasta el límite fue el astrofísico Arthur Eddington (b. 1882 Kendal, d. 1944 Cambridge), quien escribió:

Ref. 284

Yo creo que hay 15,747,724,136,275,002,577,605,653,961,181,555,468,044,717,914,527,116,709,366,231,425,076,185,631,031,296 de protones en el Universo y el mismo número de electrones.

Eddington fue ridiculizado una y otra vez por esta declaración y por las creencias que le habían llevado a hacerla. En realidad sus argumentos se basaban en sus preferencias personales por ciertos números favoritos. No obstante, no deberíamos reírnos demasiado en alto. En realidad, durante 2500 años casi todos los científicos han estado pensando

de la misma manera, ¡la única diferencia había sido que habían dejado sin especificar su número exacto!. De hecho, *cualquier otro número* puesto en la frase de arriba, habría resultado igualmente ridículo. Evitar las especificaciones es sólo una forma de cobardía para evitar enfrentarse a este nebuloso aspecto de la descripción de las partículas de la Naturaleza.

¿Hay un número de partículas absoluto en la Naturaleza? Si usted sonrió ante la declaración de Eddington, o si sacudió la cabeza con ello, pudiera significar que instintivamente usted cree que la Naturaleza no es un conjunto. ¿Es así? Siempre que definimos al Universo como la totalidad de los eventos, o como la totalidad de todos los puntos y objetos espacio-temporales, implica que se pueden distinguir los puntos espacio-temporales, que los objetos se pueden distinguir y que ambos son distinguibles unos de otros. Por lo que asumimos, por tanto, que la Naturaleza es separable y es un conjunto. Pero, ¿es esto correcto? La pregunta es importante. La capacidad para distinguir unos de otros los puntos espacio-temporales y las partículas, se conoce como *localidad*. Por lo que el Universo es separable o es un conjunto si y sólo si, nuestra descripción de él es local.* Y en la vida cotidiana, la localidad se observa sin excepción.

En la vida diaria también observamos que la Naturaleza es separable y es un todo al mismo tiempo. Es un ‘muchos que puede ser pensado como una unidad’: para la vida diaria la Naturaleza es un conjunto. En realidad, la característica fundamental de la Naturaleza es su diversidad. En el mundo que nos rodea, observamos cambios y diferencias; observamos que la Naturaleza es separable. Más aún, todos los aspectos de la Naturaleza permanecen unidos: existen relaciones entre estos aspectos, que son frecuentemente llamadas ‘leyes,’ afirmando que los diferentes aspectos de la Naturaleza forman un todo, al que generalmente se le llama Universo.

Dicho de otra forma, la posibilidad de describir las observaciones con la ayuda de las ‘leyes’ proviene de nuestra experiencia sobre la separabilidad de la Naturaleza. Cuanto con mayor precisión se especifique la separabilidad, con más precisión se podrán formular las ‘leyes’. En realidad, si la Naturaleza no fuera separable o no fuera una unidad, no podríamos explicar por qué caen las piedras hacia abajo. Por lo tanto, nos lleva a especular que podríamos deducir todas las ‘leyes’ a partir de la observación de que la Naturaleza es separable.

Además, solamente la separabilidad nos permite describir la Naturaleza completamente. Una descripción es una clasificación, esto es, una aplicación entre determinados aspectos de la Naturaleza y determinados conceptos. Todos los conceptos son conjuntos y relaciones. Puesto que el Universo es separable, puede ser descrito con la ayuda de conjuntos y relaciones. Ambos son entidades separables con partes distinguibles. A una descripción precisa comúnmente se le llama comprensión. En resumen, el Universo es comprensible solamente porque es separable.

Más aún, solamente la separabilidad del Universo hace de nuestro cerebro un instrumento tan bueno. El cerebro está construido partiendo de un gran número de componentes conectados, y sólo la separabilidad del cerebro permite su funcionamiento. Dicho de otra forma, pensar es sólo posible porque la Naturaleza es separable.

* En mecánica cuántica se utilizan también otras definiciones para la localidad. Las mencionaremos en la parte cuántica de este texto. La mencionada aquí es una diferente, más fundamental, y no conectada con la de la teoría cuántica.

Finalmente, sólo la separabilidad del Universo nos permite distinguir las franjas de referencias, y por tanto, definir todas las simetrías como la base de las descripciones físicas. Y en el mismo sentido que la separabilidad es por lo tanto necesaria para las descripciones *covariantes*, la unidad de la Naturaleza es necesaria para las descripciones *invariantes*. En otras palabras, las llamadas ‘leyes’ de la Naturaleza están basadas en la experiencia de que la Naturaleza es tanto separable como unificable – o sea, es un conjunto.

Estos argumentos parecen abrumadores para probar que el Universo es un conjunto. No obstante, estos argumentos son aplicables a la experiencia cotidiana, a dimensiones cotidianas y a energías cotidianas. ¿Es la Naturaleza un conjunto también *fuera* de los dominios de la vida diaria? ¿Son objetos diferentes para todas las energías, incluso cuando sean mirados con la mayor precisión posible?

Tenemos abierto tres temas: el asunto del número de partículas del Universo; la definición circular de espacio, tiempo y materia; y el tema de si describir la Naturaleza como hecha de partículas y vacío es una descripción por exceso, una descripción por defecto o ninguna de las dos. Estos tres temas nos hacen dudar si los objetos son contables en todas las energías. Descubriremos en la parte final del ascenso a nuestra montaña que en realidad, los objetos de la Naturaleza no pueden ser contados a energías altas. Las consecuencias serán muchas y fascinantes. Como ejemplo, trate de responder a lo siguiente: Si el Universo no es un conjunto, ¿qué significa eso para el espacio y para el tiempo?

Vol. VI, página ??

Desafío 325 s

¿EISTE EL UNIVERSO?

“ A cada espíritu progresista se oponen mil
hombres empeñados en guardar el pasado.
Maurice Maeterlink ”

Siguiendo la definición anterior, la existencia de un concepto significa que resulta útil para describir interrelaciones. Ahora bien, hay dos definiciones comunes para el concepto de ‘Universo’. La primera es definirlo como la totalidad de toda la materia, energía, espacio y tiempo. Pero de esta concepción resulta una extraña consecuencia: puesto que nada puede relacionarse con esta totalidad, no podemos decir que el Universo exista.

Por tanto, permítasenos tomar el segundo y más restrictivo punto de vista de que el Universo es sólo la totalidad de toda la materia de la energía. Pero también en este caso resultaría imposible relacionarse con el Universo. ¿Podría proporcionar varios argumentos para soportar esto?

Desafío 326 s

Vol. VI, página ??

Ref. 219

En resumen, llegamos a la conclusión de que el Universo no existe. Confirmaremos este resultado con más detalle más adelante en nuestro paseo. Como consecuencia, puesto que el Universo no existe, no tiene sentido ni siquiera tratar de responder *por qué* existe. La mejor respuesta podría ser: a causa de ideas verdes incoloras furiosamente durmientes.

¿QUÉ ES LA CREACIÓN?

“ (Gigni) De nihilo nihilum, in nihilum nil posse
reverti.*
Persius, *Satira*, III, v. 83-84. ”

Ref. 285

* Nada (puede surgir) de la nada, nada puede desaparecer en la nada.

Ref. 286

“Anaxágoras, descubriendo la antigua teoría de que nada proviene de la nada, decidió abolir el concepto de creación e introdujo en su lugar el de discriminación; no dudó en decir, en efecto, que todas las cosas se mezclan con las demás y esa discriminación produce su crecimiento.”
Fragmento anónimo, Edad Media.

El término ‘creación’ se oye con frecuencia cuando se habla sobre la Naturaleza. Es utilizado en distintos contextos con diferentes significados.

Se habla de creación como la caracterización de las acciones humanas, tales como la observación de un artista pintando o una secretaria mecanografiando. Obviamente, esto es un tipo de cambio. En la clasificación de los cambios mencionados al principio de nuestro paseo, los cambios citados se referían a movimientos de objetos, tales como los electrones en el cerebro, las moléculas en los músculos, el material de la pintura, o los electrones en el interior de un ordenador. Este tipo de creación es por tanto una clase especial de movimiento.

También se habla de creación en sentido biológico o social, así, ‘la creación de vida’, o ‘creación de un negocio’, o ‘la creación de la civilización’. Estos eventos son formas de crecimiento o de auto-organización; de nuevo, son casos especiales de movimiento.

Vol. IV, página ??

Los físicos dicen con frecuencia que una bombilla ‘crea’ luz o que una piedra que cae en un estanque ‘crea’ ondas de agua. De manera similar, hablan de ‘creación de pares’ de materia y antimateria. Esto fue uno de los descubrimientos importantes de la física de que todos esos procesos constituyen tipos especiales de movimiento, conocidos como excitación de campos.

Vol. V, página ??

Vol. II, página 250

En escritos populares sobre cosmología, ‘creación’ también es, de manera regular, aplicado, o mejor dicho, aplicado incorrectamente, al *big bang*. Sin embargo, la expansión del universo es un simple ejemplo de movimiento, y contrariamente al frecuente malentendido, la descripción del big bang incluye sólo procesos que caen en alguna de las tres categorías anteriores, como se muestra en el relevante capítulo de la relatividad general. El big bang no es un ejemplo de creación. La cosmología cuántica proporciona razones adicionales que demuestran por qué el inocente término de ‘creación’ no es aplicable al big bang. Primero, resulta que el big bang no fue un evento. Segundo, No fue un comienzo. Tercero, no proporcionó una *elección* entre un gran conjunto de posibilidades. El big bang no posee ninguna de las propiedades atribuidas al término ‘creación’.

Vol. II, página 249

En resumen, llegamos a la conclusión de que en todos los casos, la *creación es un tipo de movimiento*. (Lo mismo es aplicable a las nociones de ‘desaparición’ y ‘aniquilación’.) Ningún otro tipo de creación es observado en la Naturaleza. En particular, el sentido ingenuo de ‘creación’, es decir, ‘aparición desde la nada’ – *ex nihilo* en Latín – no se ha observado nunca en la Naturaleza. Todos los tipos observados de ‘creación’ requieren espacio, tiempo, fuerzas, energía y materia para su realización. La creación requiere algo que ya exista, para que pueda tener lugar. Adicionalmente, la exploración minuciosa demuestra que ningún proceso físico ni ningún ejemplo de movimiento tiene un comienzo. Nuestra caminata nos demostrará que la Naturaleza no nos permite identificar los comienzos. Esta sola propiedad es suficiente para demostrar que la ‘creación’ no es un concepto aplicable a lo que sucede en la Naturaleza. Peor aún, la creación se aplica

solamente a los sistemas físicos; descubriremos que la Naturaleza no es un sistema y, todavía peor, que los sistemas no existen en absoluto.

Lo opuesto a la creación es la *conservación*. Las declaraciones fundamentales de la física son los teoremas de la conservación: para la energía, la masa, la cantidad de movimiento, el momento angular, la carga, etc. De hecho, cada 'ley' de la conservación es un rechazo detallado y seguro del concepto de la creación. La antigua idea griega de los átomos ya encerraban este rechazo. Los atomistas afirmaban que nada se creaba ni nada se destruía, era solamente movimiento de los átomos. Cualquier transformación de la materia es un movimiento de átomos. En otras palabras, la idea de átomo fue una consecuencia directa de la negación de la creación. A la humanidad le tomó más de 2000 años para que dejaran de meter gente en la cárcel por hablar sobre los átomos, como le sucedió a Galileo.

Vol. I, página 359

No obstante, hay una excepción para la cual el concepto inocente de la creación es aplicable: es el que describe lo que los magos realizan en el escenario. Cuando un mago hace aparecer un conejo de ninguna parte, de hecho experimentamos la 'creación' a partir de la nada. En el mejor de los casos tal magia es una forma de entretenimiento, en el peor, un mal uso de la candidez. La idea de que el Universo resulta de cualquiera de estos dos casos no parece atractiva; pensándolo bien, quizás mirando el Universo como el mejor entretenimiento podría abrir un nuevo enfoque más productivo para la vida.

Voltaire (b. 1694 Paris, d. 1778 Paris) popularizó un argumento contra la creación frecuentemente utilizado en el pasado: No sabemos si la creación ha tenido lugar o no. Hoy la situación es diferente: nosotros *sí* sabemos que *no* tuvo lugar, porque la creación es un tipo de movimiento y, como veremos en la parte final de nuestro ascenso a la montaña, el movimiento no existía cerca del big bang.

¿Ha oído alguna vez la expresión 'creación de las leyes de la Naturaleza'? Este es uno de los ejemplo más comunes de la desinformación. Ante todo, esta expresión confunde las 'leyes' con la Naturaleza misma. Una descripción no es lo mismo que la cosa misma; todo el mundo sabe que regalar la descripción de una rosa es diferente a regalar una rosa verdadera. Segundo, la expresión implica que la Naturaleza es de la forma que es porque está forzada de alguna manera a seguir las 'leyes' – un punto de vista bastante infantil, además de incorrecto. Y en tercer lugar, la expresión asume que es posible 'crear' descripciones de la Naturaleza. Pero una 'ley' es una descripción, y una descripción por definición no puede ser creada: por lo que la expresión no tiene sentido en absoluto. La expresión 'creación de las leyes de la Naturaleza' es el epítome del pensamiento confuso.

Bien podría ser que llamar a un gran artista 'creativo' o 'divino', como era corriente en el Renacimiento, no resulte blasfemo, sino simplemente un estímulo a los dioses para intentar hacerlo también. De hecho, cada vez que se utiliza el término 'creación' para referirse a algo distinto a alguna forma de movimiento, se están descartando tanto las observaciones como la razón humana. La 'creación' es uno de los pseudoconceptos de nuestro tiempo moderno; ningún experto en movimiento debería olvidar esto. Es imposible completar nuestra aventura sin deshacerse de la 'creación'. Esto no resulta fácil. Nos encontraremos con varios intentos de volver a traer la creación, entre ellos, en el estudio de la entropía, en el estudio de la evolución biológica y en la teoría cuántica.

Vol. V, página ??

“ Todo acto de creación es antes que nada un acto de destrucción. ”

Pablo Picasso

¿ESTÁ DISEÑADA LA NATURALEZA?

“ Al principio se creó el Universo. Esto ha hecho que mucha gente esté muy enfadada y ha sido ampliamente considerado como un mal movimiento. ”
 Douglas Adams, *The Restaurant at the End of the Universe*.

Resulta ampliamente extendida la tendencia a inferir la creación intencional de un objeto a partir de su sola existencia. Algunas personas llegan a esta conclusión cada vez que ven un hermoso paisaje. Este hábito se deriva del triple prejuicio de que una bonita escena implica una compleja descripción, que a su vez implica unas complejas instrucciones de construcción, y, por lo tanto, apuntando a un *diseño* subyacente.

Ref. 287
 Vol. I, página 444

Esta cadena de pensamientos contiene varios errores. Primero, en general, la belleza no es una consecuencia de la complejidad. Normalmente es lo opuesto: verdaderamente, el estudio del caos y de la auto-organización muestra cómo se pueden generar hermosas formas complejas y patrones con descripciones extremadamente simples.

Es cierto que, para la mayor parte de los artefactos humanos, las descripciones complejas implican verdaderamente complejos procesos de elaboración; un ordenador personal es un buen ejemplo de objeto complejo con un complejo proceso de producción. Pero en la Naturaleza, esta conexión no es aplicable. Con anterioridad hemos visto que incluso la cantidad de información necesaria para construir un cuerpo humano es alrededor de un millón de veces menor que la información almacenada sólo en el cerebro. Se han encontrado resultados similares tanto en la arquitectura de las plantas como en muchos otros ejemplos de patrones de la Naturaleza. Las descripciones simples detrás de las complejidades aparentes de la Naturaleza han sido y todavía están siendo descubiertas mediante el estudio de la auto-organización, el caos, las turbulencias y las formas fractales. En la Naturaleza, las estructuras complejas provienen de procesos *simples*. Cuidese de cualquiera que diga que la Naturaleza tiene una ‘infinita’ o una ‘alta complejidad’: primero de todo, la complejidad no es una entidad mensurable, a pesar de los muchos intentos por cuantificarlo. Además, todos los sistemas complejos conocidos pueden ser descritos por (relativamente) pocos parámetros y ecuaciones sencillas. Finalmente, nada en la Naturaleza es infinito.

El segundo error en el argumento para el diseño consiste en ligar una descripción con una ‘instrucción’, y quizás aún imaginar que alguna ‘inteligencia’ desconocida está manejando los hilos del escenario del mundo. El estudio de la Naturaleza ha demostrado consistentemente que no hay ninguna inteligencia oculta ni ninguna instrucción detrás de los procesos de la Naturaleza. Una instrucción es una lista de órdenes para un ejecutor. Pero en la Naturaleza no existen las órdenes ni los ejecutores. No existen ‘leyes’ de la Naturaleza, solamente descripción de procesos. Nadie está construyendo un árbol; el árbol es un resultado del movimiento de las moléculas que lo componen. Los genes del árbol contienen información; pero a ninguna molécula se le dan instrucciones. Lo que a nosotros nos parecen instrucciones son únicamente movimientos naturales de moléculas y energía, descritas por los mismos patrones que tienen lugar en los sistemas no-vivientes. La idea completa de instrucción – al igual que la de ‘ley’ de la Naturaleza – es una ideología, nacida de una analogía con la monarquía o incluso con la tiranía, y

un antropomorfismo típico .

El tercer error en el argumento del diseño es la sugerencia de que una descripción compleja para un sistema, implica un diseño subyacente. Esto no es correcto. Una descripción compleja sólo implica que el sistema tiene una gran evolución tras él. La deducción correcta es: existe algo de gran complejidad; por lo tanto ha *crecido*, esto es, se ha transformado mediante la entrada de energía (moderada) con el tiempo. Esta deducción se aplica a las flores, las montañas, las estrellas, la vida, la gente, los relojes, los libros, los ordenadores personales y las obras de arte; de hecho se aplica a todos los objetos del Universo. La complejidad de nuestro entorno señala por tanto, la considerable edad de nuestro entorno y nos recuerda la brevedad de nuestra propia vida.

La falta de complejidad básica y la falta de instrucciones en la Naturaleza confirman un simple resultado: No existe ni una sola observación en la Naturaleza que implique o requiera del diseño o de la creación. Por otro lado, la variedad e intensidad de los fenómenos de la Naturaleza nos llenan de un profundo asombro. La belleza salvaje de la Naturaleza no muestra qué parte tan *pequeña* de la naturaleza somos en realidad, tanto en el espacio como en el tiempo.* Exploraremos esta experiencia con detalle. Y encontraremos que permanecer abierto a los restantes fenómenos de la Naturaleza en toda su abrumadora intensidad es fundamental para el resto de nuestra aventura.

Vol. V, página ??

“Existe una separación entre estado e iglesia, pero todavía no entre estado y ciencia.”
Paul Feyerabend

¿QUÉ ES UNA DESCRIPCIÓN?

“En teoría, no existe diferencia entre la teoría y la práctica. En la práctica, sí la hay.”

Página 349

Según el vocabulario utilizado de manera normal, la descripción de una observación es una lista de los detalles. El ejemplo anterior sobre el grampus lo mostraba claramente. Dicho de otra forma, una descripción de una observaciones es el acto de categorizarlo, es decir, de compararlo, mediante identificación o distinción, con todas las otras observaciones ya realizadas.

▷ Una descripción es una clasificación.

En resumen, *describir significa verlo como un elemento de un conjunto mayor.*

Una descripción se puede comparar con el signo ‘usted está aquí’ en el mapa turístico de una ciudad. De un conjunto de posiciones posibles, el ‘usted está aquí’ señala una posición real. De manera similar, una descripción resalta la situación en comparación con el resto de posibilidades. Por ejemplo, la fórmula $a = GM/r^2$ es una descripción de las observaciones que relacionan el movimiento con la gravedad, porque clasifica las aceleraciones observadas a conforme a la distancia a un cuerpo central r y a su masa M ; en realidad tal descripción ve cada caso específico como un ejemplo de un patrón

* La búsqueda del ‘sentido’ en la vida o en la Naturaleza es una forma, complicada y necesaria, de intentar encarar la pequeñez de la existencia humana.

general. El hábito de generalizar es una razón para el frecuente y molesto rechazo de los científicos: cuando ellos observan algo, su entrenamiento profesional generalmente los lleva a clasificarlo como un caso especial de un fenómeno conocido y así por tanto evitan ser sorprendidos o sentirse emocionados por ello.

Una descripción es por tanto lo opuesto a una *metáfora*; ésta última es una analogía que relaciona una observación con otro caso *especial*; Una descripción relaciona una observación con un caso *general*, tal como una teoría física.

“Felix qui potuit rerum cognoscere causas,
atque metus omnis et inexorabile fatum
subjecit pedibus strepitumque acherontis avari.”
Virgilio*

RAZÓN, PROPÓSITO Y EXPLICACIÓN

“Der ganzen modernen Weltanschauung liegt
die Täuschung zugrunde, daß die sogenannten
Naturgesetze die Erklärungen der
Naturerscheinungen seien.**”
Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 6.371

Compare los dos tipos de preguntas y respuestas siguientes:

1. ¿Por qué son verdes las hojas de la mayor parte de los árboles? Porque absorben la luz roja y azul. ¿Por qué absorben esos colores? Porque contienen clorofila. ¿Por qué es verde la clorofila? Porque todos los tipos de clorofila contienen magnesio entre los cuatro tipos de pirrol, y esta combinación química produce color verde, como resultado de sus niveles de energía mecánico cuántica. ¿Por qué las plantas contienen clorofila? Porque esto es lo que las plantas de tierra pueden sintetizar. ¿Por qué solamente esto? Porque todas las plantas evolucionaron originalmente de las algas marinas, las cuales solamente son capaces de sintetizar este compuesto, y no los compuestos de las algas azules o rojas, las cuales también se encuentran en el mar.
2. ¿Por qué los niños se suben a los árboles y algunas personas escalan montañas? A causa de las sensaciones que experimentan durante su actividad: el sentimiento de logro, el acto simbólico de ir hacia arriba, el deseo de conseguir una visión más amplia del mundo forma parte de este tipo de aventura.

Los dos tipos de preguntas ¿por qué?, muestran la diferencia general entre las razones y los propósitos (aunque los detalles de estos dos términos no estén definidos de la misma forma para todo el mundo). Un *propósito* o *intención* es una clasificación aplicada a las acciones de los humanos o de los animales; hablando estrictamente, especifica la búsqueda de un sentimiento, es decir, alcanzar algún tipo de satisfacción tras completar una acción. Por otro lado, una *razón* es una relación específica de un hecho con el resto del

* ‘Feliz aquel que pueda conocer las causas de todas las cosas y que, libre de todos los temores, pueda estar preparado para el destino inexorable y el ruido del Aqueronte a sus pies.’ *Georgica*, libro II, versos 490 ss. Publio Virgilio Maro (b. 70 Mantua, d. 19 BCE Brindisi), el gran poeta romano, autor de la *Enéida*. El Aqueronte (también concodido como Aquerón) era el río que cruzaban los que acababan de morir para comenzar su camino hacia el Hades.

** ‘La cosmovisión moderna integral sucumbe a un engaño de que las llamadas leyes de la naturaleza sean explicaciones de los fenómenos naturales.’ Traducción al español de Jesús Padilla Gálvez.

Universo, generalmente su pasado. Lo que llamamos razón siempre descansa fuera de la observación misma, mientras que propósito es siempre interno a él.

Razones y propósitos son las dos posibilidades de una explicación, es decir, las dos posibles respuestas a las preguntas que empiezan por ‘¿por qué?’. Generalmente los físicos no se preocupan por el propósito o por los sentimientos de las personas, principalmente porque su objetivo original, hablar sobre el movimiento con precisión, no parece ser alcanzable en este dominio. Por lo tanto, las explicaciones *físicas* de los hechos nunca son propósitos, sino siempre razones.

Ref. 288

- ▷ Una *explicación física* de una observación siempre es una descripción de su relación con el resto de la Naturaleza..

Tengamos en cuenta que los propósitos *no* se dejan a un lado porque pertenecen al futuro, sino porque son antropomorfismos inadmisibles. De hecho, para los sistemas deterministas, podemos igualmente decir que el futuro es realmente una *razón* para el presente y para el pasado, un hecho frecuentemente olvidado.

Una pregunta que empiece con un ‘¿por qué?’ es entonces accesible a la investigación física en tanto que pregunte por una razón y no por un propósito. En particular, las preguntas como ‘¿por qué las piedras caen hacia abajo y no hacia arriba?’ o ‘¿por qué los electrones tienen ese valor de masa, y por qué tienen masa?’ o ‘¿por qué tiene tres dimensiones el espacio y no treinta y seis?’ pueden ser respondidas, así como las preguntas por las conexiones entre las observaciones específicas y las más generales. Desde luego, no todas las demandas de explicaciones han sido todavía respondidas, y aún quedan problemas sin resolver. Nuestro ensayo actual sólo nos conduce desde unas cuantas respuestas a alguna de las preguntas más fundamentales sobre el movimiento.

La búsqueda más general para una explicación deriva de la pregunta: ¿por qué es el Universo tal como es? El tema se cubrirá en nuestro ascenso a la montaña utilizando dos enfoques habituales.

UNIFICACIÓN Y DEMARCACIÓN

“ Tout sujet est un; et, quelque vaste qu’il soit, il peut être renfermé dans un seul discours.* ”
Buffon, *Discours sur le style*.

Estudiando las propiedades del movimiento, prestando atención constantemente para incrementar la seguridad de la descripción, nos damos cuenta de que generalmente las explicaciones son de dos tipos:**

1. ‘Es como en todos los demás casos; también ésta es descrita por ...’ La situación es reconocida como un *caso particular* de una conducta general.
2. ‘Si la situación fuera diferente, podríamos llegar a una conclusión contraria a las observaciones.’ La situación se reconoce como el *único caso posible*.***

* Todo asunto es uno y, por muy vasto que sea, puede estar comprimido en un solo discurso.

** ¿Son éstas las únicas posibles?

*** Estos dos casos no deben ser confundidos con declaraciones similares que *parecen* ser explicaciones, pero que no lo son:

Desafío 327 s

En otras palabras, el primer procedimiento para encontrar una explicación consiste en formular patrones, reglas o ‘leyes’ que describan muchos más números de observaciones, y comparar las observaciones con ellos. Este esfuerzo se llama *unificación* de la física – por aquellos a los que le gusta; a los que no les gusta, lo llaman ‘reduccionismo’. Por ejemplo, la misma regla describe el vuelo de una pelota de tenis, el movimiento de las mareas en la orilla del mar, la temporización de las galciaciones, y el tiempo en el que el planeta Venus dejará de ser la estrella vespertina para convertirse en la estrella matutina. Todos estos procesos son consecuencia de la gravitación universal. De manera similar, no resulta evidente que la misma regla describa el origen del color de los ojos, la formación de un rayo, la digestión de la comida y el funcionamiento del cerebro, Estos procesos serán descritos por la electrodinámica cuántica.

La unificación obtiene sus éxitos más impresionantes cuando predice una observación que no se había hecho anteriormente. Un ejemplo famoso es la existencia de la antimateria, predicha por Dirac cuando investigaba las soluciones de una ecuación que describe el comportamiento exacto de la materia común.

El segundo procedimiento en la búsqueda de explicaciones consiste en eliminar cualquier otra alternativa imaginable en favor de la verdaderamente correcta. Este esfuerzo no tiene un nombre comúnmente aceptado: podría llamarse *demarcación* de las ‘leyes’ de la física – por aquellos a los que les guste; otros los llamarán ‘antropocentrismo’, o simplemente ‘arrogancia’.

Cuando descubrimos que la luz viaja de tal forma que emplea el menor tiempo posible para llegar a su destino, cuando describimos el movimiento por el principio de acción mínima, o cuando descubrimos que los árboles tienen ramas de manera que alcanzan el efecto mayor con el mínimo esfuerzo, estamos utilizando un punto de vista de demarcación.

En resumen, la unificación, responde a las preguntas ‘¿por qué?’, y la demarcación, responde a las preguntas ‘¿por qué no?’, son típicas para el progreso a través de historia de la física. Podemos decir que los aspectos duales de la unificación y la demarcación forman la composición y los rasgos opuestos de la física. Definen el deseo de *saber todo*.

Desafío 328 s No obstante, ni la demarcación ni la unificación pueden explicar el Universo como un todo. ¿Puede decir por qué? De hecho, aparte de la unificación y la demarcación, existe una tercera posibilidad que fusiona las dos y nos permite decir más sobre el Universo. ¿La puede encontrar? Nuestro paseo automáticamente nos conducirá a ella posteriormente.

Desafío 329 s

CERDOS, SIMIOS Y EL PRINCIPIO ANTRÓPICO

“Das wichtigste Hilfsmittel des Wissenschaftlers ist der Papierkorb.*”

Varios autores

El deseo de lograr la demarcación de los patrones de la Naturaleza es más interesante cuando seguimos las diferentes reglas posibles de la Naturaleza hasta que entran en con-

-
- ‘Es como el caso de ...’ Una similitud sin ningún otro caso *único no* es una explicación.
 - ‘Si fuera diferente, podría contradecir la idea de que ...’ Una contradicción con una *idea* o con una teoría *no* es una explicación.

* ‘El instrumento más importante de un científico es la papelera.’

tradición con la observación más llamativa: nuestra propia existencia humana. En este caso especial el programa de demarcación es conocido frecuentemente con el nombre de *principio antrópico* – del Griego ἄνθρωπος, que significa ‘hombre’. ¿Es posible realmente deducir todas las propiedades de la Naturaleza a partir de nuestra propia existencia?

Por ejemplo, si la distancia Sol-Tierra fuera diferente de lo que es, el cambio de la temperatura resultante en la Tierra haría imposible la aparición de la vida, para la que es necesaria el agua líquida. De manera similar, nuestro cerebro no funcionaría si la Luna no girara en torno a la Tierra. Es también bien conocido que si hubiera menos planetas grandes en el sistema solar, hubiera sido imposible la evolución para los humanos. Los grandes planetas desvían un gran número de cometas, evitando su choque con la Tierra. La colisión espectacular del cometa Shoemaker–Levy-9 con Júpiter, el evento astronómico de Julio de 1994, fue un ejemplo de esta desviación de los cometas.*

También el principio antrópico tiene sus éxitos más impresionantes cuando predice observaciones desconocidas. El ejemplo más famoso proviene del estudio de las estrellas. Los átomos de carbono, como el resto de los átomos excepto la mayoría de los átomos de hidrógeno, helio o litio, se forman en las estrellas por medio de la fusión. Cuando estudiaba la fusión en 1953, el conocido astrofísico Fred Hoyle** encontró que el núcleo de carbono no podía estar formado a partir de las partículas alfa presentes en el interior de las estrellas a una temperaturas razonables, a menos que presentaran un estado excitado con un incremento de la sección transversal. Del hecho de nuestra existencia, que se basa en el carbono, Hoyle predijo así la existencia un estado excitado previamente desconocido en el núcleo del carbono. Y, de hecho, el estado excitado se encontró unos meses después por Willy Fowler.***

Ref. 289

Ref. 290

Dicho en forma *solemne*, tenemos:

- ▷ El principio antrópico es la búsqueda para encontrar la descripción completa de la Naturaleza a partir del hecho experimental de la existencia humana.

El principio antrópico no es por tanto un principio. Sería mejor llamarlo *búsqueda antrópica* o *conjetura antrópica*.

Desafortunadamente, en la literatura popular el principio antrópico se transforma desde una búsqueda seria a una forma *distorsionada*, un crisol de ideas metafísicas absurdas en el que todos mezclan sus creencias favoritas. La observación experimental de nuestra propia existencia ha sido, muy frecuentemente, tergiversada para reintroducir la idea del ‘diseño’, es decir, que el Universo se ha creado con el ánimo de producir al ser

* Consultar, por ejemplo la web garbo.uwasa.fi/pc/gifslevy.html para ver una gran colección de imágenes de este evento.

** Fred Hoyle (b. 1915 Bingley, d. 2001 Bournemouth), importante astrónomo y astrofísico, fue el primer y posiblemente el único físico que hizo alguna vez una predicción específica – a saber, la existencia de un estado excitado del núcleo del carbono – partiendo del simple hecho de que los humanos existen. Un permanente inconformista, acuñó el término ‘big bang’ aún cuando no aceptó la evidencia de ello, y propuso otro modelo, el ‘estado estacionario’. Su investigación más importante y la más conocida versó sobre la formación de los átomos en el interior de las estrellas. También propagó la creencia de que la vida fue traída a la Tierra por microbios extraterrestres.

*** William A. Fowler (b. 1911 Pittsburgh, d. 1995 Pasadena) compartió en 1983 el Premio Nobel de Física con Subramanyan Chandrasekhar por este y por otros descubrimientos relacionados.

humano. Todavía con frecuencia se sugiere que el principio antrópico es una *explicación* de las reglas de la Naturaleza – un gran ejemplo de desinformación.

¿Cómo poder distinguir entre algo en serio o algo que haya sido manipulado? Empecemos con una observación. ¿Conseguiríamos exactamente los mismos patrones y reglas de la Naturaleza si usáramos la existencia de los cerdos o los monos como punto de partida?. Dicho de otra forma, si obtuviéramos conclusiones *diferentes* utilizando el *principio porcino* o el *principio 'simiónico'*, estaríamos utilizando la forma distorsionada del principio antrópico, de otra manera estaremos utilizando la forma seria. (La historia del carbono-12 es por lo tanto un ejemplo de forma seria.) Esta comprobación resulta efectiva porque no hay un patrón conocido o una 'ley' de la Naturaleza que sea particular para los humanos pero innecesaria para los simios o los cerdos.*

Podría ocurrir que un día un ordenador empezara a hablar sobre el 'principio computacional'. Eso sería otro ejemplo de forma distorsionada.

“ Er wunderte sich, daß den Katzen genau an den Stellen Löcher in den Pelz geschnitten wären, wo sie Augen hätten.** ”
Georg Christoph Lichtenberg

¿NECESITAMOS CAUSA Y EFECTO EN LAS EXPLICACIONES?

“ En la Naturaleza no hay ni recompensas ni castigos – hay solamente consecuencias. ”
Robert Ingersoll

“ El mundo no te debe nada. Estaba allí primero. ”
Mark Twain

“ No importa cuán cruel, desagradable y malvado seas, cada vez que respiras haces feliz a una flor. ”
Mort Sahl

Ref. 291

Históricamente, los dos términos 'causa' y 'efecto' han desempeñado un papel importante en las discusiones filosóficas. Los términos estaban unidos a determinados procesos u observaciones. En particular, durante el nacimiento de la mecánica moderna, fue importante para señalar que todo efecto tenía una causa, con objeto de distinguir un pensamiento exacto de un pensamiento procedente de una creencia, tal como los 'milagros', 'sorpresas divinas' o 'evolución a partir de la nada'. Fue igualmente fundamental para reforzar que los efectos son diferentes de las causas; esta distinción evita pseudo-explicaciones tales como el famoso ejemplo de Molière donde el doctor le explica a su paciente con términos elaborados que las pastillas para dormir funcionan porque contienen una 'virtud dormitoria'.

* Aunque los simios no parecen ser buenos físicos, como se describe en el texto de D. J. POVINELLI, *Folk Physics for Apes: the Chimpanzee's Theory of How the World Works*, Oxford University Press, 2000.

** 'Le sorprendió que los gatos tuvieran agujeros en su piel justamente en aquellos lugares donde tenían los ojos.' Georg Christoph Lichtenberg (b. 1742 Ober-Ramstadt, d. 1799 Göttingen), físico e intelectual, profesor en Göttingen, famoso aún hoy día por sus numerosos aforismos y sátiras extremadamente ingeniosas. Entre otros de su tiempo, Lichtenberg hacía chistes de todos aquellos que mantenían que el Universo estaba hecho precisamente a la medida del hombre, una idea que aparecía con frecuencia en el nebuloso mundo del principio antrópico.

Pero en física, los conceptos de causa y efecto no se utilizan en absoluto. Que los milagros no intervienen se expresa cada vez que usamos las simetrías, los teoremas de la conservación o las reglas de la Naturaleza. La observación de que causa y efecto difieren una de la otra, es inherente a la ecuación de evolución. Más aún, los conceptos de causa y efecto no están claramente definidos; por ejemplo, resulta especialmente difícil definir lo que se entiende como una causa o un efecto por oposición a varios de ellos. Ambos términos resultan también imposibles de cuantificar y de medir. En otras palabras, si ‘causa’ y ‘efecto’ pueden resultar útiles para la vida personal y la vida cotidiana, no lo son necesariamente para la física. En la exploración del movimiento, causa y efecto no interpretan ningún papel.

“ Ἄγαθον καὶ ἁρξὸν · ἔν καὶ ταῦτό.* ”
Heraclito

“ Wenn ein Arzt hinter dem Sarg seines Patienten geht, so folgt manchmal tatsächlich die Ursache der Wirkung.** ”
Robert Koch

¿SE REQUIERE LA CONCIENCIA?

“ Variatio delectat.*** ”
Cicerón

Ref. 292

Muchas de las mediocres discusiones que han habido sobre la conciencia, nos la vamos a saltar aquí. ¿Qué es la conciencia? De manera más simple y concreta, conciencia significa la posesión de una pequeña parte de uno mismo que está vigilando lo que el resto de nosotros está percibiendo, sintiendo, pensando y haciendo. En resumen, conciencia es la habilidad de observarse a sí mismo, y en particular los mecanismos internos propios y las motivaciones.

▷ *Consciencia* es la habilidad de la introspección.

La definición de conciencia explica por qué resulta tan difícil de comprender con precisión. En realidad, observar nuestra propia conciencia significaría observar la parte interior de nosotros que observa el resto de nosotros mismos. Esto parece una tarea casi imposible, independientemente de si la conciencia es un aspecto del hardware o del software de nuestro cerebro. Esta imposibilidad es la base de la fascinación y del misterio de nuestra conciencia y de nuestra humana naturaleza.

La definición de conciencia nos dice que *no* es un a prerequisite para estudiar el movimiento. De hecho, los animales, las plantas o las máquinas también son capaces de observar el movimiento, porque contienen sensores, es decir, dispositivos de medida. Por la misma razón, la conciencia *no* es necesaria para observar el movimiento mecánico

* ‘Bueno y malo – uno y lo mismo.’

** ‘Cuando un médico camina detrás del ataúd de su paciente, de hecho la causa sigue a veces al efecto.’

*** ‘El cambio agrada.’ Marco Tulio Cicerón (b. 106 Arpinum, d. 43 BCE Formiae), legislador importante, orador y político al final de la república de Roma.

Vol. IV, página ?? cuántico, aunque la medida sí. Por otro lado, la exploración del movimiento y la exploración de uno mismo tienen mucho en común: la necesidad de observar cuidadosamente, vencer lo preconcebido, vencer el miedo y el placer de hacerlo.

Por el momento, hemos puesto bastante énfasis en la precisión de los conceptos. Hablar sobre el movimiento es algo para disfrutar profundamente. Veamos por qué.

“Precisión y claridad obedecen a la relación de la indeterminación: su producto es constante.”
Niels Bohr

CURIOSIDAD

“La precisión es la hija de la curiosidad.”

Como en la historia de cada persona, también en la historia de la humanidad se observa un gran esfuerzo en la larga lucha por evitar las trampas de las autoridades para que se acepten sus declaraciones como verdades, sin la comprobación de los hechos. En efecto, cada vez que la curiosidad nos lleva a formular una pregunta, siempre hay dos formas de proceder. Una es comprobar los hechos personalmente, la otra es preguntar a alguien. Sin embargo, esta última forma es peligrosa: significa ceder algo de uno mismo. La gente sana, los niños cuya curiosidad permanece todavía viva, al igual que los científicos, eligen la primera opción. Después de todo, la ciencia se debe a la curiosidad de los adultos.

La curiosidad, también llamada *instinto exploratorio*, practica extraños juegos con las personas. Empezando con la experiencia original de que el mundo es un gran ‘caldo’ de cosas interactuando, la curiosidad nos puede llevar a encontrar *todos* los componentes y *todas* las interacciones. Eso motiva no sólo a las personas. Se ha observado que cuando las ratas presentan una conducta curiosa, determinadas células del hipotálamo muestran actividad y segregan hormonas que producen sentimientos positivos y emociones. Si una rata tuviera la posibilidad, mediante un implante de electrodos, de excitar esas mismas células al pulsar un interruptor, lo haría voluntariamente: las ratas se vuelven *adictas* a esos sentimientos conectados con la curiosidad. De igual manera que las ratas, los humanos son curiosos porque disfrutan con ello. Lo hace así al menos de cuatro maneras: porque son artistas, porque encuentran placer, porque son aventureros y porque son soñadores. Veamos cómo.

Ref. 293

Originalmente, la curiosidad proviene del deseo de interactuar de manera positiva con el entorno. Los niños pequeños proporcionan buenos ejemplos: la curiosidad es un ingrediente natural de sus vidas, de la misma manera que lo es para otros mamíferos y algunas especies de aves; por cierto la misma distribución taxonómica se encuentra en la conducta del juego. En pocas palabras, todos los animales que juegan son curiosos, y viceversa. La curiosidad proporciona las bases del aprendizaje, para la creatividad y, por tanto, para toda la actividad humana que deje un legado, como el arte o la ciencia. El escultor y teórico de arte Joseph Beuys mantuvo como suyo el principio de que *todo* acto creativo es una forma de arte. Los humanos, y especialmente los niños, disfrutan con la curiosidad porque sienten su importancia para la creatividad, y para el crecimiento en general.

Ref. 294

La curiosidad nos conduce generalmente a exclamar: ‘Oh!’, una experiencia que ge-

nera la segunda razón para ser curioso: saborear sentimientos de asombro y sorpresa. Epicuro (Epikuros) (b. 341 Samos, d. 271 BCE Atenas) mantenía que esta experiencia, θαυμάζειν, es el origen de la filosofía. Estos sentimientos, que en nuestros días son llamados con diferentes nombres, religioso, espiritual, numinoso, etc., son los mismos que los que crean adicción en las ratas. Entre estos sentimientos, Rudolf Otto volvió a introducir la distinción clásica entre lo fascinante y lo aterrador. Él llamó a las correspondientes experiencias ‘mysterium fascinans’ y ‘mysterium tremendum’.* De entre estas distinciones, físicos, científicos, niños y conocedores, toman una clara posición: eligen la fascinación como punto de partida para sus acciones y para su acercamiento al mundo. Tales sentimientos de fascinación inducen a algunos niños a mirar el cielo por la noche soñando con llegar a ser astrónomos algún día, otros miran a través de un microscopio para hacerse biólogos o físicos, etc., etc. (También podría ocurrir que la genética jugara su papel en este placer por la búsqueda de la novedad.)

Ref. 295

Quizás los momentos más bellos en el estudio de la física sean los que aparecen después de que nuevas observaciones hayan sacudido nuestros hábitos del pensamiento previamente sostenidos, forzándonos a renunciar a nuestra anterior convicción y engendrando el sentimiento de haber estado perdidos. Cuando, en ese momento de crisis, finalmente descubrimos una descripción más adecuada y exacta de las observaciones, que proporciona una mejor visión del mundo, nos sorprende un determinado sentimiento, al que generalmente se le llama iluminación. Cualquiera que haya mantenido vivo el recuerdo y haya saboreado estos momentos mágicos sabe que en estas situaciones, uno está impregnado de una unión de sí mismo con el mundo.** El placer de estos momentos, las aventuras del cambio de las estructuras del pensamiento conectadas con ellos, y la alegría de la comprensión interna que los sigue, proporciona el impulso para muchos científicos. Poco hablar y mucho placer es su común denominador. Con este espíritu, al importante físico Victor Weisskopf (b. 1908 Vienna, d. 2002 Newton) le gustaba bromear diciendo: ‘Hay dos cosas que hacen que la vida merezca la pena: Mozart y la mecánica cuántica.’

La elección de alejarse del ‘tremendum’ hacia el ‘fascinans’ proviene de un deseo innato, más obvio en los niños, de reducir la incertidumbre y el miedo. Esta unidad es el padre de todas las aventuras. Hay un conocido paralelismo en la antigua Grecia, donde los primeros hombres estudiaron las observaciones, como Epicuro, que estableció explícitamente que su objetivo era liberar a la gente del miedo innecesario al profundizar en el conocimiento y transformar a las personas desde víctimas pasivas y atemorizadas en seres fascinados, activos y responsables. Aquellos antiguos pensadores comenzaron a popularizar la idea de que, como los eventos corrientes de nuestra vida, los eventos más extraños también siguen unas reglas. Por ejemplo, Epicuro enfatizaba que el rayo era un fenómeno natural causado por las interacciones de las nubes, y destacaba que era

* Esta distinción es la base de RUDOLF OTTO, *Das Heilige – Über das Irrationale in der Idee des Göttlichen und sein Verhältnis zum Rationalen*, Beck 1991. Esta es la nueva edición de un trabajo que marcó una época, publicada originalmente a principios del siglo XX. Rudolf Otto (b. 1869 Peine, d. 1937 Marburg) fue uno de los más importantes teólogos de su tiempo.

** Varios investigadores han estudiado con más detalle las situaciones que conducen a estos momentos mágicos, destacando el médico y físico Hermann von Helmholtz (b. 1821 Potsdam, d. 1894 Charlottenburg) y el matemático Henri Poincaré (b. 1854 Nancy, d. 1912 Paris). Ellos distinguían cuatro estados en la concepción de una idea, como la base para ese estado mágico: saturación, incubación, iluminación y verificación.

Ref. 296

un proceso natural, o sea, un proceso que seguía unas reglas, de la misma manera que la caída de una piedra o cualquier otro proceso familiar de la vida cotidiana.

Investigando los fenómenos a su alrededor, los filósofos y posteriormente los científicos, lograron liberar a la gente de la mayoría de sus temores causados por la incertidumbre y la falta de conocimiento sobre la Naturaleza. Esta liberación desempeñó un importante papel en la historia de la cultura humana y todavía impregna la historia personal de muchos científicos. El objetivo de llegar a verdades estables y profundas ha inspirado (y también obstaculizado) a muchos de ellos; Albert Einstein es un buen ejemplo de ello, con el descubrimiento de la relatividad, ayudando a su puesta en marcha, pero luego oponiéndose a la mecánica cuántica.

Curiosamente, en la experiencia y en el desarrollo de cualquier ser humano, la curiosidad y posteriormente las ciencias, aparecen *antes* que la magia y la superstición. La magia necesita del engaño para ser efectiva, y la superstición necesita del adoctrinamiento; la curiosidad no necesita de ninguna de ellas. Los conflictos de la curiosidad con las supersticiones, las ideologías, las autoridades o el resto de la sociedad están por lo tanto programados de antemano.

La curiosidad es la exploración de los límites. Para cada límite, hay dos posibilidades: el límite puede resultar ser verdadero o sólo aparente. Si el límite resulta verdadero, la actitud más productiva es aceptarlo. Acercarse al límite entonces, proporciona fortaleza. Si el límite resulta ser sólo aparente y de hecho no existente, la actitud más productiva es volver a evaluar los errores detectados, extraer el papel positivo que desempeñó, y luego cruzar el límite. La distinción entre límites reales y aparentes solamente es posible cuando son investigados con gran cuidado, abiertamente y sin intencionalidad. En la mayoría de ellos, para la exploración de los límites se necesita valor.

“Das gelüftete Geheimnis rächt sich.*
Bert Hellinger

VALOR

“Il est dangereux d’avoir raison dans des choses
où des hommes accrédités ont tort.**
Voltaire

“Manche suchen Sicherheit, wo Mut gefragt ist,
und suchen Freiheit, wo das Richtige keine
Wahl läßt.***
Bert Hellinger

Ref. 299 La mayor parte del material de este capítulo es necesario para completar nuestra aventura. Pero necesitamos más. Como para cualquier empresa, la curiosidad también requiere valor, y la curiosidad total, que es el objetivo de nuestra búsqueda, requiere del valor total. De hecho, es fácil desfallecer en este viaje. La búsqueda es a menudo desestimada por algunos otros como algo inútil, poco interesante, infantil, confusa, dañina, loca o

* ‘El secreto revelado toma venganza.’

Ref. 297 ** ‘Es peligroso tener razón en los asuntos en los que los hombres han establecido que son erróneos.’

Ref. 298 *** ‘Algunos buscan la seguridad donde se requiere valor y buscan la libertad donde el camino correcto no deja otra opción.’

incluso malvada y merecedora de un castigo. Por ejemplo, entre la muerte de Sócrates en 399 BCE y Paul-Henri Thiry, Baron d'Holbach, en 1770, no se publicó ningún libro con la afirmación de que los 'dioses no existen', debido a las amenazas de muerte para cualquiera que se hubiera atrevido a tocar el asunto. Incluso hoy, este tipo de actitud, todavía abunda, como muestran los periódicos.

La curiosidad y la actividad científica son implícitamente opuestas a cualquier idea, persona u organización que trate de evitar la comparación de las declaraciones con las observaciones. Estos 'evasores' exigen vivir con supersticiones y creencias. Pero las supersticiones y las creencias producen un miedo innecesario. Y el temor es la base de todas las autoridades injustas. Nos encontramos en un círculo vicioso: evitar la comparación con la observación produce miedo – el miedo mantiene una autoridad injusta en el lugar – la autoridad injusta evita la comparación con las observaciones – etc.

La curiosidad y la ciencia son fundamentalmente opuestas a la autoridad injusta, una conexión que hizo la vida difícil para las personas como Anaxágoras en la antigua Grecia, Hypatia en el Imperio Romano cristiano, Galileo Galilei en los antiguos Estados Pontificios, Antoine Lavoisier en la Francia revolucionaria y Albert Einstein (y muchos otros) en la Alemania Nazi. En la segunda mitad del siglo XX, las víctimas fueron Robert Oppenheimer, Melba Phillips y Chandler Davis en los Estados Unidos, y Andrei Sakharov en la Unión soviética. Cada uno de ellos tiene una historia terrible pero instructiva, como la tienen, más recientemente, Fang Lizhi, Xu Liangying, Liu Gang y Wang Juntao en China, Kim Song-Man en Corea del Sur, Otanazar Aripov en Uzbekistan, Ramadan al-Hadi al-Hush en Libia, Bo Bo Htun en Birmania, Sami Kilani y Salman Salman en Palestina, Abdus Salam en Pakistán, así como mucho cientos más. En muchas sociedades autoritarias, el antagonismo entre la curiosidad y la injusticia ha impedido o incluso suprimido completamente el desarrollo de la física, otras ciencias naturales y la ingeniería, con consecuencias económicas, sociales y culturales, extremadamente negativas.

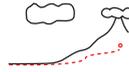
Cuando nos embarcamos en la aventura de comprender el movimiento, necesitamos ser conscientes de lo que estamos haciendo. De hecho, no podremos evitar obstáculos externos o al menos reducirlos en gran medida manteniendo el proyecto para nosotros mismos. Surgirán otras dificultades, esta vez de naturaleza personal. La curiosidad con frecuencia nos enfrentará a descubrimientos dolorosos. Muchos han intentado embarcarse en la aventura del movimiento con alguna intención oculta o explícita, generalmente de naturaleza ideológica, y luego se han enredado antes de llegar al final. Algunos no han estado preparados para aceptar la humildad requerida para tal esfuerzo. Otros no estaban preparados para la apertura y honradez requerida, lo que puede destrozar creencias profundamente arraigadas. Aún otros no estaban listos para volverse hacia lo poco claro, lo oscuro y lo desconocido, enfrentándolos en cada ocasión.

Por otro lado, los peligros de la curiosidad merecen la pena. Tener la curiosidad como una máxima, enfrentándonos a la desinformación y al miedo con todo nuestro coraje, conseguiremos la libertad desde todas las creencias. A cambio, venimos a saborear alguno de los placeres más completos y la más profunda satisfacción que la vida puede ofrecer.

En resumen: continuamos nuestra caminata. En este punto, el camino hacia la cima de la Montaña del Movimiento nos está conduciendo hacia la próxima aventura: descubrir el origen de los tamaños, formas y colores de la Naturaleza.

“Y los dioses dijeron al hombre: coge lo que quieras y paga su precio.”
Dicho popular

“Es difícil hacer a un hombre miserable mientras sienta que es digno de sí mismo.”
Abraham Lincoln



LA FÍSICA CLÁSICA EN UNA CÁSCARA DE NUEZ

Página 8

La electrodinámica clásica, junto con la mecánica, la termodinámica y la relatividad, completan nuestro paseo a través de la física clásica. En la estructura de la física, la física clásica abarca cuatro de los ocho puntos que componen toda la física, la ciencia del movimiento. Como un todo, la física clásica describe el movimiento de los cuerpos cotidianos, el movimiento del calor, el movimiento de los objetos extremadamente rápidos, el movimiento del espacio vacío, y el movimiento de la luz y de la carga eléctrica. Completando la física clásica, hemos cubierto la primera mitad de nuestra aventura. Resumamos lo que hemos descubierto hasta ahora sobre el movimiento – y lo que no hicimos.

¿QUÉ SE PUEDE MOVER?

En la Naturaleza, se pueden mover cuatro entidades: *objetos*, *radiación*, *espacio-tiempo* y *horizontes*. En todos los casos, sus movimientos ocurren de tal manera que minimizan el cambio. Al cambio también se le llama acción (física). En resumen, todo movimiento en la Naturaleza minimiza la acción.

En todos los casos de movimiento, distinguiremos el permanente o *propiedades intrínsecas* del *estado* variable. Hemos aprendido a distinguir y a caracterizar las propiedades intrínsecas posibles y los estados posibles de cada entidad que se mueve.

Sobre los *objetos*, encontramos que en la vida cotidiana, todos los objetos suficientemente pequeños o partículas, vienen determinados completamente por su *masa* y su *carga* eléctrica. No hay carga magnética. Masa y carga eléctrica son, por tanto, las únicas propiedades intrínsecas localizadas de los objetos cotidianos clásicos. Tanto la masa como la carga eléctrica están definidas por las aceleraciones que producen a su alrededor. Ambas cantidades se conservan; por tanto ambas cantidades pueden sumarse (con ciertas precauciones). La masa, en contraste con la carga, siempre es positiva, es decir, es siempre atractiva. La masa determina la interacción de los objetos en las colisiones y en la gravitación, la carga determina la interacción con los campos electromagnéticos.

Todos los aspectos *variables* de los objetos, esto es, su *estado*, pueden ser descritos utilizando la *cantidad de movimiento* y la *posición*, así como también el *momento angular* y la *orientación*. Estas cuatro cantidades pueden variar continuamente tanto en su magnitud como en su dirección. Por consiguiente, el conjunto de todas los estados posibles forman un espacio, el conocido como *espacio de fase*. El estado de todos los objetos que cambian de forma en su conjunto viene dado por los estados de todas sus partículas constituyentes. Estas partículas forman todos los objetos interactuando electromagnéti-

camente.

El lagrangiano determina la acción o el cambio total, de cualquier tipo de movimiento. La acción o el cambio es independiente del observador; el estado, no lo es. Los estados encontrados para diferentes observadores estarán relacionados: las relaciones son conocidas como 'leyes' o propiedades del movimiento. Para los diferentes momentos, se les llaman *ecuaciones de evolución*, para los diferentes lugares y orientaciones, se les llaman *relaciones de transformación*, y para los diferentes indicadores, se les llaman *indicador de transformaciones*. El movimiento para los objetos cotidianos queda completamente descrito por el principio de mínima acción: el movimiento minimiza la acción.

La *radiación* también se mueve. Todos los tipos de radiación cotidiana, como la luz, las ondas de radio y sus formas relacionadas, se desplazan mediante ondas electromagnéticas. Están representadas mediante las mismas ecuaciones que describen la interacción de los objetos cargados o magnéticos. Los campos electromagnéticos no tienen masa; su velocidad en el vacío es la velocidad de la energía máxima posible en la Naturaleza y es la misma para todos los observadores. El movimiento de la radiación produce el movimiento de las imágenes. Las *propiedades intrínsecas* de la radiación son su relación de dispersión y su relación de energía-momento angular. El *estado* de radiación viene determinado por la fortaleza de su campo electromagnético, su fase, su polarización y su acoplamiento a la materia. El movimiento de los campos electromagnéticos y las ondas minimizan la acción y el cambio.

El *espacio-tiempo* también se puede mover, cambiando su curvatura. El estado del espacio-tiempo viene dado por la métrica, que describe distancias y curvatura, y por tanto la deformación local. La deformación puede oscilar y propagarse, por lo que el espacio vacío puede moverse como una onda. También el movimiento del espacio-tiempo minimiza el cambio. El principio de mínima acción es válido. Las propiedades intrínsecas del espacio-tiempo son el número de dimensiones, su distintivo métrico y su topología. Los experimentos demuestran que el espacio-tiempo tiene 3+1 dimensiones, su firma métrica es + + +- y la topología del espacio-tiempo es simple.

Los *horizontes* pueden ser vistos como casos límites bien del espacio-tiempo o de la materia-radiación. Ambos comparten las mismas propiedades intrínsecas y de estado. El cielo oscuro de la noche, el límite del universo, es el ejemplo más importante de un horizonte. Los límites de los agujeros negros son otros ejemplos. El Universo, tanto su espacio-tiempo como su contenido de materia, muestran los valores máximos de edad y distancia. La historia del Universo es larga, aproximadamente tres veces más larga que la historia de la Tierra. A gran escala, toda la materia del Universo se separa entre sí: y su horizonte, está en expansión.

PROPIEDADES DEL MOVIMIENTO CLÁSICO

A nuestro alrededor, observamos el movimiento de los objetos, la radiación, el espacio-tiempo y los horizontes. En nuestra exploración de la física clásica, condensaremos seis propiedades específicas de todo movimiento clásico – o movimiento cotidiano.

1. El movimiento cotidiano es *continuo*. El movimiento continuo permite definir el espacio y el tiempo. Toda la energía se mueve en la forma que el espacio-tiempo lo manda, y el espacio se mueve como lo prescribe la energía. Esta relación describe el

movimiento de las estrellas, la caída de las piedras, de los rayos de luz y de las mareas. Reposo y caída libre son lo mismo, y la gravedad es el espacio-tiempo curvo. La masa rompe la simetría conforme y así distingue el espacio del tiempo.

La continuidad del movimiento es limitada: La velocidad (local) de la energía, la masa y la carga está limitada por arriba por una constante universal c , y el cambio de la energía (local) con el tiempo está limitado superiormente por una constante universal $c^5/4G$. El valor c para la velocidad se obtiene para el movimiento de partículas sin masa. Esto también relaciona al espacio y el tiempo. El valor de energía $c^5/4G$ se obtiene en los horizontes. Los horizontes se encuentran alrededor de los agujeros negros y en el límite del Universo. El valor máximo de energía también relaciona la curvatura espacio-tiempo con el flujo de energía y por tanto describe la elasticidad del espacio-tiempo.

La continuidad del movimiento está limitada de una segunda forma: Dos objetos, cualesquiera que éstos sean, no pueden estar al mismo tiempo en el mismo lugar. Esta es la primera afirmación que pudieron encontrar los humanos sobre el electromagnetismo. La declaración se debe a la repulsión de las cargas del mismo signo que se encuentran en la materia. Un investigación más detallada demuestra que las cargas eléctricas aceleran a otra cargas, que las cargas son necesarias para definir longitudes e intervalos, y que las cargas son la fuente de los campos electromagnéticos. También la luz es ese tipo de campo. La luz viaja a la máxima velocidad posible c . Al contrario que los objetos, la luz y los campos electromagnéticos pueden interpenetrarse.

2. El movimiento cotidiano *conserva* la masa, la carga eléctrica, la energía, el momento lineal y el momento angular. Para estas cantidades, *nada surge de la nada*. La conservación se aplica a todas las clases de movimientos: al movimiento lineal, al movimiento rotacional y al movimiento de la materia, a la radiación, el espacio-tiempo y los horizontes. Energía y cantidad de movimiento son similares a las sustancias continuas: nunca se destruyen, nunca son creadas, sino que son siempre redistribuidas. Ni siquiera el calor, el crecimiento, las transformaciones, la evolución biológica o la fricción son excepciones a la conservación.
3. El movimiento cotidiano es *relativo*: el movimiento depende del observador. Ni siquiera el suelo firme bajo nuestros pies contradice la relatividad.
4. El movimiento cotidiano es *reversible*: el movimiento cotidiano puede ocurrir hacia atrás. Ni siquiera la fricción, la rotura de objetos o la muerte son excepciones a la reversibilidad.
5. El movimiento cotidiano es *invariante en espejo*: el movimiento cotidiano puede ocurrir de forma invariante en espejo. En resumen, encontramos que el movimiento clásico de objetos, la radiación y el espacio-tiempo es simétrico derecha-izquierda. Los objetos hechos por los humanos, tales como la escritura, no son excepciones a la invariancia en espejo.
6. El movimiento cotidiano es *perezoso*: el movimiento se hace de tal manera que minimiza el cambio, es decir, la acción física. En la física Galileana y en la electrodinámica, la acción es el tiempo medio de la diferencia entre la energía cinética y la energía potencial. En la relatividad general, la acción contabiliza la curvatura y la elasticidad del espacio-tiempo. El principio de acción mínima – o vagancia cósmica – se mantiene en todos los casos.

Resumiendo: nuestra exploración de la física clásica nos ha enseñado que:

- ▷ El movimiento es *perezoso*: es *predecible* y *limitado*.

En otras palabras, la Naturaleza sigue *patrones* y *reglas*. El movimiento es determinista. No hay sorpresas en la Naturaleza. La Naturaleza *no puede* hacer cualquier cosa que quiera hacer.

Posteriormente descubriremos que algunos ejemplos extraños de movimiento no cotidiano violan la reversibilidad y la invariancia especular de una manera sutil. Las violaciones sutiles desaparecen si los términos son adecuadamente ampliados en su significado. También la conservación de la masa es violada por separado, pero se convierte, en la relatividad, en parte de la conservación de la energía. En resumen, las afirmaciones generales sobre el movimiento, adecuadamente corregidas, permanecen válidas para toda la Naturaleza.

Sobre todo, hemos visto que *el movimiento minimiza la acción*. También este profundo resultado permanecerá válido a lo largo de toda nuestra aventura. En otras palabras, el Universo no tiene libertad para determinar lo que ocurre en su interior.

Desafío 330 e

Tras completar las partes clásicas de esta aventura, usted podría pensar que conoce bien la física clásica. Si así lo cree, lea la excelente colección de FRIEDRICH HERRMANN, *Historical Burdens on Physics*, disponible para ser descargado de forma gratuita en www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/index_en.html. Si los temas presentados allí – todos sencillos de comprender – les resultan claros – aún si no estuviera de acuerdo con ellos – usted se habrá convertido en un verdadero experto de la física clásica.

EL FUTURO DEL PLANETA TIERRA

Es posible que la Naturaleza no nos depare sorpresas, pero todavía nos puede proporcionar muchas aventuras. El 2 de Marzo de 2009, un pequeño asteroide ‘casi’ golpeó la Tierra. Pasó a una distancia de sólo 63 500 km de nuestro planeta. El impacto, habría destruido una región del tamaño de Londres. Tales eventos ocurren de manera regular.* Diversas aventuras parecidas se pueden predecir por la física clásica; están recogidas en la [Tabla 25](#). Algunos de ellos son problemas a los que la humanidad deberá enfrentarse en un futuro lejano, pero otros, como las erupciones volcánicas o los impactos de asteroides, podrían suceder en cualquier momento. Todos son temas de investigación.

Ref. 300

TABLA 25 Ejemplos de movimientos desastrosos de posible importancia futura.

SITUACIÓN CRÍTICA	AÑOS DESDE AHORA
Tsunami gigante por erupción volcánica en las Islas Canarias	c. 10-200
Final de la física fundamental, con una prueba definitiva de que la Naturaleza es simple	c. 20 (hacia el año 2030)
Importante accidente de material nuclear o por uso de armas	desconocido

* La página web www.minorplanetcenter.net/iau/lists/Closest.html proporciona información sobre tales encuentros cercanos.

TABLA 25 (Continuación) Ejemplos de movimientos desastrosos de posible importancia futura.

SITUACIÓN CRÍTICA	AÑOS DESDE AHORA
Explosión volcánica en Groenlandia, Italia o cualquier otro lugar, produciendo un largo oscurecimiento del cielo	desconocido
Explosión de Yellowstone o cualquier volcán gigante produciendo un invierno volcánico de un año	0 a 100 000
Inestabilidad del manto de la Tierra produciendo una actividad volcánica masiva	desconocido
Mini era glaciár producida por el colapso de la Corriente del Golfo	desconocido
Reducción de la capa de ozono	c. 100
Elevación del nivel de los océanos por el efecto invernadero	> 100
Aparición de varios polos norte y sur magnéticos, permitiendo tormentas solares que entorpecerán las telecomunicaciones, interrumpirán el suministro de electricidad, incrementarán las mutaciones animales y desorientarán a los animales migratorios como las ballenas, aves y tortugas	c. 800
Nuestra nube de gas interestelar se separará del sistema solar, cambiando el tamaño de la heliosfera, y por tanto, exponiéndonos más a las auroras y a los campos magnéticos solares	c. 3 000
Reversión del campo magnético de la Tierra, implicando un período sin casi ningún campo magnético, con unos niveles de radiación cósmicas incrementados y por tanto más cánceres de piel y abortos espontáneos	desconocido
Agotamiento de oxígeno atmosférico producido por la reducción de los bosques y el exagerado consumo de combustible	> 1000
Próxima glaciación	c. 15 000
Posible colisión con una nube de gas interestelar asumiendo que se cruza con la Tierra cada 60 millones de años, probablemente ocasionando extinciones masivas	c. 50 000
Probable degeneración genética del homo sapiens debida a la reducción del cromosoma Y	c. 200 000
África colisiona con Europa, transformando al Mediterráneo en un lago que comenzará a evaporarse	alrededor de $3 \cdot 10^6$
Explosión de rayos- Gamma desde el interior de nuestra galaxia, ocasionando daños por radiación a muchos seres vivos	entre 0 y $5 \cdot 10^6$
Choques de asteroides con la Tierra, generando tsunamis, tormentas, oscuridad, luminosidad, etc.	entre 0 y $50 \cdot 10^6$
Aproximación de estrellas vecinas, comenzando con lluvia de cometas a través de la desestabilización de la nube Oort y por tanto riesgo para la vida en la Tierra	> 10^6
El continente americano choca con Asia	> $100 \cdot 10^6$
La nube molecular engloba al sistema solar	desconocido
Inestabilidad del sistema solar	> $100 \cdot 10^6$
El bajo contenido atmosférico de CO ₂ para la fotosíntesis	> $100 \cdot 10^6$

TABLA 25 (Continuación) Ejemplos de movimientos desastrosos de posible importancia futura.

SITUACIÓN CRÍTICA	AÑOS DESDE AHORA
Colisión de la Vía Láctea con un cluster de estrellas o con otra galaxia	$> 150 \cdot 10^6$
El Sol envejece y se vuelve más caliente, los mares se evaporan	$> 250 \cdot 10^6$
Los niveles de los océanos crecen debido al enlentecimiento de la rotación de la Tierra/paro (si no se evaporan antes)	$> 10^9$
Incremento/caída de la temperatura (dependiendo de la localización) debida al paro de la rotación de la Tierra	$> 10^9$
El Sol se queda sin combustible, se vuelve un gigante rojo, absorbe a la Tierra	$5,0 \cdot 10^9$
El Sol deja de brillar, se convierte en una enana blanca	$5,2 \cdot 10^9$
El núcleo de la Tierra se solidifica, se eliminan el campo magnético y por tanto el escudo de radiación cósmica de la Tierra	$10,0 \cdot 10^9$
Una nova cercana (por ejemplo, Betelgeuse) baña la Tierra y aniquila la radiación	desconocido
Una supernova cercana (por ejemplo, Eta Carinae) explota sobre el sistema solar	desconocido
El centro de la galaxia desestabiliza el resto de la galaxia	desconocido
Recolapsos del Universo – si ocurriera (véase página ??, volumen II)	$> 20 \cdot 10^9$
La materia se descompone en radiación – si ocurriera (véase apéndice ?? en el vol. V)	$> 10^{33}$
Problemas con las singularidades desnudas	sólo en la ciencia ficción
El vacío se vuelve inestable	sólo en la ciencia ficción
Final de la física aplicada	nunca

A pesar de la fascinación de las predicciones – todas hechas en el año 2000 – dejemos aparte estos temas de literatura tremendista y continuemos con nuestra aventura.

“ Soy viejo y me he enterado de muchos problemas. La mayor parte de ellos nunca han sucedido. ”
Sabiduría anónima

LA ESENCIA DE LA FÍSICA CLÁSICA – LO INFINITAMENTE PEQUEÑO Y LA FALTA DE SORPRESAS

En las tres primeras partes de nuestro paseo, sobre la física clásica, hemos encontrado que el movimiento minimiza el cambio. Cualquier tipo de movimiento a nuestro alrededor nos confirma que la Naturaleza es perezosa. La ‘pereza’ de la descripción clásica de la Naturaleza se basa en una importante afirmación.

- ▷ La física clásica es la descripción del movimiento utilizando el concepto de lo *infinitamente pequeño*.

Todos los conceptos utilizados hasta ahora, para el espacio, tiempo u otros observables, asumen que lo infinitamente pequeño existe. La relatividad especial, a pesar del límite de la velocidad, aún permite velocidades infinitamente pequeñas; la relatividad general, a pesar de sus límites de los agujeros negros, todavía permite fuerzas y valores de energía infinitamente pequeñas. De manera similar, en la descripción de la electrodinámica y de la gravitación, tanto las integrales y las derivadas son abreviaciones de procesos matemáticos que utilizan y asumen distancias e intervalos de tiempo infinitamente pequeños. En otras palabras, la descripción clásica de la Naturaleza se presenta y se basa en lo infinitamente pequeño para la descripción del movimiento.

Utilizando lo infinitamente pequeño como herramienta de investigación, la descripción clásica del movimiento descubre que la energía, la cantidad de movimiento, el momento angular y la carga eléctrica *se conservan*. También se conservan para dimensiones e intervalos de tiempo infinitamente pequeños. La exploración detallada de la conservación a una escala infinitamente pequeña nos ha llevado a una fuerte conclusión:

- ▷ El movimiento no presenta sorpresas, El movimiento es determinista, predecible, y limitado. El movimiento no presenta elecciones ni opciones.

Los experimentos confirman todas estas propiedades. Por lo tanto los experimentos implican que

- ▷ La Naturaleza no proporciona milagros.

En esta declaración, un ‘milagro’ es un término utilizado para un proceso *contra* las reglas de la Naturaleza. Algunas personas argumentan que lo infinito es un ingrediente necesario para realizar milagros. La física clásica demuestra lo opuesto: *la existencia de lo infinitamente pequeño evita los milagros*.

Pereza, conservación y falta de sorpresas también implican que el movimiento y la Naturaleza no son descritos por conceptos tales como ‘castigo’ o ‘recompensa’ o ‘miedo’. Este es también el caso para los desastres, catástrofes, suerte o sucesos felices. Pereza, conservación y falta de sorpresas también implican que el movimiento y la Naturaleza *no son diseñados y no tienen un objetivo*. Algunas personas claman lo opuesto; están equivocadas.

La física clásica implica la ausencia de sorpresas. Por muy tranquilizador que este resultado pueda ser, nos plantea una duda. Tanto la relatividad especial como la general han eliminado la existencia de lo infinitamente grande. No existe una fuerza, una energía un tamaño, una edad o una velocidad infinitamente grande. ¿Por qué existe lo infinitamente pequeño pero no lo infinitamente grande? Y si también se elimina lo infinitamente pequeño, ¿podrían ocurrir los milagros otra vez? De hecho, todavía hay muchas preguntas abiertas sobre el movimiento.

RESUMEN: ¿POR QUÉ TODAVÍA NO HEMOS ALCANZADO LA CUMBRE DE LA MONTAÑA?

“Las leyes y hechos más fundamentales de la ciencia física han sido todos descubiertos, y éstos están ahora tan firmemente establecidos que la posibilidad de que en algún momento pudieran ser suplantados como consecuencia de nuevos descubrimientos resulta extremadamente remota... Nuestros descubrimientos futuros deben buscarse en el sexto lugar de los decimales.”

Albert Michelson, 1894.*

Podríamos pensar que ahora conocemos la Naturaleza, como hizo Albert Michelson al finales del siglo XIX. Proclamó que la electrodinámica y la física Galileana implicaban que las principales leyes de la física eran bien conocidas. La declaración se cita a menudo como ejemplo de predicción defectuosa ya que refleja un cierre mental increíble hacia el mundo que lo rodeaba. Michelson no solo pasó por alto la necesidad de comprender la oscuridad del cielo y la relatividad general.

Michelson – al contrario que muchos físicos de su tiempo – también había pasado por alto tres contradicciones entre la electrodinámica y la Naturaleza para lo que no tenía excusa. Primero de todo, hemos visto anteriormente que los relojes y las barras de medida están necesariamente hechas de materia y se basan necesariamente en el electromagnetismo. Pero como vimos, la electrodinámica clásica no explica ni la estabilidad y las propiedades de la materia, ni la de los átomos. La materia está hecha de pequeñas partículas, pero la relación entre esas partículas, la electricidad y las cargas más pequeñas no está clara.

▷ No comprendemos a la materia.

Si no comprendemos la materia, aún menos entenderemos completamente el espacio y el tiempo, porque definimos el espacio y el tiempo utilizando dispositivos de medida hechos con materia.

En segundo lugar, Michelson sabía que el origen de ningún color de los observados en la Naturaleza, se puede describir mediante la electrodinámica clásica.

▷ No comprendemos a los colores.

La electrodinámica clásica puede solamente explicar las diferencias entre los colores y los cambios de color, pero no describir los valores absolutos de los colores.

Aún peor, Michelson pasó por alto una tercera limitación de la descripción clásica de la Naturaleza:

* De su discurso en la ceremonia de dedicación para el Ryerson Physical Laboratory de la University of Chicago. Michelson (b. 1852 Strelno, d. 1931 Pasadena) fue un físico importante e influyente; fue galardonado con el Premio Noble de física en 1907 por sus experimentos sobre la invariancia de la velocidad de la luz.

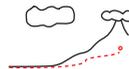
▷ No comprendemos la vida.

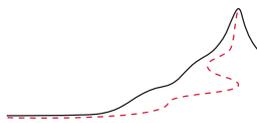
Las habilidades de los seres vivos – crecimiento, vista, oído, sentimiento, pensamiento, estar sano o enfermo, reproducción y muerte –son todas inexplicables por la física clásica. En realidad, todas esas habilidades *contradicen* a la física clásica. No obstante, Michelson recibió el Premio Noble de Física muchos años antes de su discurso.

A finales del siglo XIX, el progreso de la tecnología debido a la utilización de la electricidad, la química y la tecnología del vacío, hicieron posible la construcción de más y mejores máquinas y aparatos de medida. Todos fueron construidos con la física clásica en mente. En los años entre 1890 y 1920, estas máquinas clásicas destruyeron los fundamentos de la física clásica. Los experimentos con esos aparatos demostraron que la materia se compone de átomos de tamaño finito y constante, que hay un valor mínimo para la carga eléctrica, que hay un valor mínimo para la entropía, un valor mínimo para el momento angular y una acción mínima en la Naturaleza, y que tanto las partículas materiales como la luz se comportan aleatoriamente.

En resumen, los experimentos precisos demuestran que en la Naturaleza, la existencia de lo infinitamente pequeño está equivocado en muchos casos: muchos observables se presentan en *quantos* (a veces escritos también 'cuántos' o 'cuantos'. Todo se refiere a 'paquetes' (de energía)), Como un viejo imperio, la física clásica colapsó. La física clásica *no* describe la Naturaleza a pequeñas escalas. La *física cuántica* es la que se necesita.

En resumen, la comprensión de la luz, la materia y sus interacciones, incluyendo la vida misma, es el objetivo de las siguientes partes de nuestra aventura. Y para entender la vida necesitamos comprender el tamaño, la forma, el color y las propiedades materiales de todas las cosas – incluyendo a los átomos. Este conocimiento tiene lugar a pequeñas escalas. De manera más específica, para comprender la materia, el color y la vida, necesitaremos estudiar las *partículas*. Todavía queda mucho por explorar. Y esta exploración nos transportará de maravilla en maravilla.





Las medidas son comparaciones con patrones. Los patrones o estándares están basados en *unidades*. Muchos sistemas de unidades diferentes han sido usados en todo el mundo a lo largo de la historia. La mayoría de estos estándares confieren poder a la organización que está a cargo de ellos. Tal poder puede ser mal utilizado, lo que es el caso hoy en día, por ejemplo en la industria de los ordenadores, y así fue en el lejano pasado. La solución es la misma en ambos casos: organizar una norma independiente y global. Para las unidades de medida, esto ocurrió en el siglo XVIII: a fin de evitar el mal uso por parte de instituciones autoritarias, para eliminar los problemas con patrones diferentes, variables e irreproducibles, y - esto no es una broma - para simplificar la recaudación de impuestos y para hacerla más justa, un grupo de científicos, políticos y economistas acordaron un conjunto de unidades. Se llama *Sistema Internacional de Unidades*, abreviado *SI*, y se define por un tratado internacional, la 'Convention du Mètre'. Las unidades son gestionadas por una organización internacional, la 'Conférence Générale des Poids et Mesures', y sus organizaciones hijas, la 'Commission Internationale des Poids et Mesures' y la 'Bureau International des Poids et Mesures' (BIPM). Todo se originó en la época inmediatamente anterior a la revolución francesa.

Ref. 301

UNIDADES SI

- 'El *metro* es la longitud del trayecto recorrido por la luz en el vacío durante un intervalo de tiempo de $1/299\,792\,458$ de segundo'. (1983) La definición de 2019 es equivalente pero mucho menos clara.*
 - El *kilogramo*, símbolo kg, es la unidad SI de masa. Queda definido al tomar el valor numérico fijo de la constante de Planck h como $6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$ cuando viene expresada en la unidad $J \cdot s$, la cual es igual a $kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$. (2019)*
 - El *amperio*, símbolo A, es la unidad SI de corriente eléctrica. Queda definido al tomar el valor numérico fijo de la carga elemental e que es $1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$ cuando se expresa en la unidad C, la cual igual a $A \cdot s$. (2019)* Esta definición es equivalente a: Un amperio es $6,241\,509\,074... \cdot 10^{18}$ cargas elementales por segundo.
 - El *kelvin*, símbolo K, es la unidad SI de la temperatura termodinámica. Queda definida al tomar el valor numérico fijo de la constante de Boltzmann k que es $1,380\,649 \cdot 10^{-23}$ cuando se expresa en la unidad $J \cdot K^{-1}$. (2019)*
 - El *mol*, símbolo mol, es la unidad SI de cantidad de sustancia. Un mol contiene exactamente $6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$ entidades elementales. (2019)*
 - La *candela* es la intensidad luminosa, en una dirección dada, de una fuente que

emite una radiación monocromática de frecuencia $540 \cdot 10^{12}$ hercios y tiene una intensidad radiante en esa dirección de $(1/683)$ watt por estereorradián.’ (1979) La definición de 2019 es equivalente, pero mucho menos clara.*

Notemos que las unidades de tiempo y longitud se definen como ciertas propiedades de un ejemplo de movimiento estándar, llamado luz. En otras palabras, también la Conferencia General de Pesas y Medidas remarca que la observación del movimiento es un *requisito previo* para la definición y construcción del tiempo y el espacio. *El movimiento es el fundamento de toda observación y de toda medición.* Por cierto, el uso de la luz en las definiciones fue propuesto ya en 1827 por Jacques Babinet.**

A partir de estas unidades básicas, se definen todas las demás unidades por multiplicación y división. Por lo tanto, todas las unidades del SI tienen las siguientes propiedades:

- Las Unidades del SI forman un sistema con la *precisión del estado de la técnica en cada momento*: todas las unidades se definen con una precisión que es mayor que la precisión de las medidas de uso común. Por otra parte, regularmente se mejora la precisión de las definiciones. La incertidumbre relativa de la definición del segundo es de alrededor de 10^{-14} , para el metro sobre 10^{-10} , para el kilogramo cerca de 10^{-9} , para el amperio 10^{-7} , para el mol menos de 10^{-6} , para el kelvin 10^{-6} y para la candela 10^{-3} .

- Las Unidades del SI forman un sistema *absoluto*: todas las unidades se definen de tal manera que puedan ser reproducidos en cada laboratorio equipado adecuadamente, de forma independiente, y con alta precisión. Esto evita en lo posible cualquier uso indebido de la agencia de certificación. De hecho, las unidades SI están ahora tan cerca como es posible de la unidad natural de Planck, la cual se indicará más abajo. En la práctica, la SI es ahora una norma internacional que define los valores numéricos de las siete constantes c , \hbar , e , k , N_A y K_{cd} . Tras más de 200 años de discusiones, la CGPM tiene poco más que hacer.

- Las Unidades del SI forman un sistema *práctico*: las unidades básicas son cantidades de magnitudes cotidianas. Las Unidades utilizadas con frecuencia tienen nombres y abreviaturas estándar. La lista completa incluye las siete unidades básicas que acabamos de dar, las unidades suplementarias, las unidades derivadas y las unidades admitidas.

Las unidades SI *suplementarias* son dos: la unidad de ángulo (plano), definida como la relación de la longitud del arco al radio, es el *radián* (rad). Para el ángulo sólido, definido como la relación entre el área subtendida al cuadrado del radio, la unidad es el *estereorradián* (sr).

Las unidades *derivadas* con nombres especiales, en su ortografía oficial en inglés es decir, sin letras mayúsculas ni acentos, son los siguientes:

*

Los símbolos de las siete unidades son s, m, kg, A, K, mol y cd. Las definiciones oficiales completas se encuentran en www.bipm.org. Para obtener más detalles sobre los niveles de cesio, consulte un libro sobre física atómica. La escala Celsius de temperatura θ está definida como: $\theta/^{\circ}\text{C} = T/\text{K} - 273,15$; observe la pequeña diferencia con el número que aumenta en la definición del kelvin. En la definición de la candela, la frecuencia de la luz corresponde a 555,5 nm, es decir, al color verde, en torno a la longitud de onda a la que el ojo es más sensible.

** Jacques Babinet (1794–1874), físico francés que publicó un importante trabajo en óptica.

NOMBRE ABBREVIATURA		NOMBRE ABBREVIATURA	
hertz	Hz = 1/s	newton	N = kg m/s ²
pascal	Pa = N/m ² = kg/m s ²	joule	J = Nm = kg m ² /s ²
watt	W = kg m ² /As ³	coulomb	C = As
volt	V = kg m ² /As ³	farad	F = As/V = A ² s ⁴ /kg m ²
ohm	Ω = V/A = kg m ² /A ² s ³	siemens	S = 1/Ω
weber	Wb = Vs = kg m ² /As ²	tesla	T = Wb/m ² = kg/As ² = kg/Cs
henry	H = Vs/A = kg m ² /A ² s ²	grado Celsius	°C (ver definición de kelvin)
lumen	lm = cd sr	lux	lx = lm/m ² = cd sr/m ²
becquerel	Bq = 1/s	gray	Gy = J/kg = m ² /s ²
sievert	Sv = J/kg = m ² /s ²	katal	kat = mol/s

Desafío 331 s

Nótese que en todas las definiciones de las unidades, el kilogramo sólo aparece para las potencias de 1, 0 y -1. ¿Puede intentar encontrar el por qué?

Las unidades ajenas al SI *admitidas* son: *minuto*, *hora*, *día* (para el tiempo), *grado* 1° = π/180 rad, *minuto* 1' = π/10 800 rad, *segundo* 1" = π/648 000 rad (para ángulos), *litro*, y *tonelada*. Cualesquiera otras unidades deben ser evitadas.

Todas las unidades SI se hacen más prácticas gracias a la introducción de nombres y abreviaturas estándar para las potencias de diez, los llamados *prefijos*:*

POTENCIA	NOMBRE	POTENCIA	NOMBRE	POTENCIA	NOMBRE	POTENCIA	NOMBRE
10 ¹	deca da	10 ⁻¹	deci d	10 ¹⁸	Exa E	10 ⁻¹⁸	atto a
10 ²	hecto h	10 ⁻²	centi c	10 ²¹	Zetta Z	10 ⁻²¹	zepto z
10 ³	kilo k	10 ⁻³	milli m	10 ²⁴	Yotta Y	10 ⁻²⁴	yocto y
10 ⁶	Mega M	10 ⁻⁶	micro μ	no oficial:		Ref. 303	
10 ⁹	Giga G	10 ⁻⁹	nano n	10 ²⁷	Xenta X	10 ⁻²⁷	xenno x
10 ¹²	Tera T	10 ⁻¹²	pico p	10 ³⁰	Wekta W	10 ⁻³⁰	weko w
10 ¹⁵	Peta P	10 ⁻¹⁵	femto f	10 ³³	Vendekta V	10 ⁻³³	vendeko v
				10 ³⁶	Udekta U	10 ⁻³⁶	udeko u

▪ Las Unidades del SI forman un sistema *completo* : abarcan de manera sistemática el conjunto completo de observables de la física. Por otra parte, fijan las unidades de

* Algunos de estos nombres son inventados (yocto suene similar al latín *octo* 'ocho', zepto por sonar de manera similar al latín *septem*, yotta y zetta para parecerse a ellos, y exa y peta suenan como las palabras griegas *ἕξάκις* y *πεντάκις* para 'seis veces' y 'cinco veces', los no oficiales al sonido similar a las palabras griegas para nueve, diez, once y doce); algunos son del danés / noruego (atto de *atten* 'dieciocho', femto de *femten* 'quince'); algunos son del latín (de *mille* 'mil', de *centum* 'cien', de *decem* 'diez', de *nanus* 'enano'); algunos son del italiano (de *piccolo* 'pequeño'); algunos son griego (micro es de *μικρός* 'pequeño', deca / deka de *δέκα* 'diez', hecto de *ἑκατόν* 'cien', kilo de *χίλιοι* 'mil', mega de *μέγας* 'grande', giga de *γίγας* 'gigante', tera de *τέρας* 'monstruo').

Traducir : Estaba atrapado en un atasco de tráfico tal, que necesitaba un microsigo para recorrer un picoparsec y el consumo de combustible del mi coche era enorme: dos décimas de un milímetro cuadrado.

Desafío 332 e

medida de todas las otras ciencias puras también.

- Las Unidades del SI, forman un sistema *universal* que se puede utilizar en el comercio, en la industria, en el comercio, en casa, en educación y en investigación. Incluso podría ser utilizado por las civilizaciones extraterrestres, si existieran.

- Las Unidades del SI forman un sistema *auto-consistente*: el producto o cociente de dos unidades del SI es también una unidad del SI. Esto significa que, en principio, la misma abreviatura, por ejemplo, 'SI', podría ser utilizado para cada unidad.

Las unidades del SI no son el único conjunto posible que pueda cumplir con todos estos requisitos, pero es el único sistema existente, que lo hace. *

EL SIGNIFICADO DE LA MEDICIÓN

Cada medición es una comparación con un patrón estándar. Por lo tanto, cualquier medición requiere *materia* para realizar el patrón (incluso para un patrón estándar de velocidad), y *radiación* para lograr la comparación. El concepto de la medición por lo tanto asume que existen materia y radiación y se puede separar claramente una de otra.

Cada medición es una comparación. La medición por lo tanto implica que existen el espacio y el tiempo, y que se diferencian uno de otro.

Cada medida produce un resultado de la medición. Por lo tanto, cada medición implica el *almacenamiento* del resultado. El proceso de la medición de este modo implica que la situación antes y después de la medición puede ser diferenciada. En otros términos, toda medición es un proceso *irreversible*.

Cada medición es un proceso. Así, cada medición requiere una cierta cantidad de tiempo y una cierta cantidad de espacio.

Todas estas propiedades de las mediciones son sencillas pero importantes. Tenga cuidado con cualquiera que lo niegue.

PRECISIÓN Y EXACTITUD DE LAS MEDICIONES

Las medidas son la base de la física. Toda medida tiene un *error*. Los errores son debidos a la falta de precisión o a la falta de exactitud. La *precisión* significa lo bien que se reproduce un resultado cuando se repite la medición; la *exactitud* es el grado en que una medición corresponde al valor real.

La falta de precisión se debe a errores accidentales o al *azar*; estos se miden mejor por la *desviación estándar*, normalmente abreviada σ , que se define a través

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (110)$$

* Además de las unidades internacionales, también hay unidades *provinciales*. La mayoría de las unidades provinciales todavía en uso son de origen romano. La milla viene de *milia passum*, que solía ser mil (dobles) pasos de unos 1480 mm cada uno; hoy en día una milla náutica, que una vez fue definida como minuto de arco en la superficie de la Tierra, es exactamente 1852 m. La pulgada (inch, en inglés) proviene de *uncia/onzia* (un doceavo - ahora de un pie). La libra (pound, en inglés) (de *pondere* 'sopesar/pesar') se utiliza como traducción de *libra* - equilibrio - que es el origen de su abreviatura lb. Incluso el hábito de contar en docenas en lugar de las decenas es de origen romano. Estas y todas las otras unidades de entretenimiento similares - como el sistema en el que todas las unidades comienzan con 'f' y que utiliza furlong / quincena como unidad de velocidad - ahora se definen oficialmente como múltiplos de las unidades del SI.

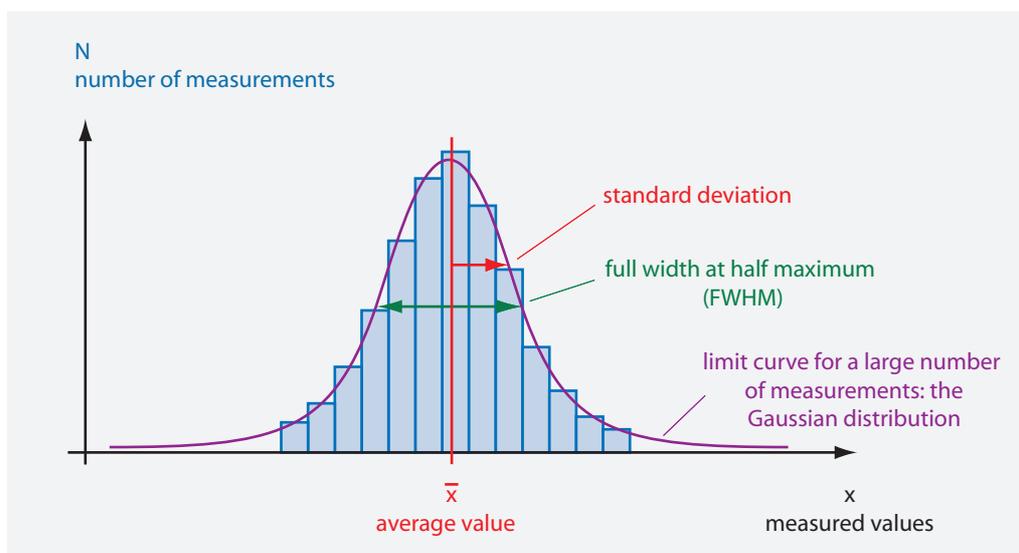


FIGURA 184 Un experimento de precisión y su distribución de medición. La precisión es alta si la anchura de la distribución es estrecha; la exactitud es alta si el centro de distribución concuerda con el valor real.

Desafío 334 s donde \bar{x} es el promedio de la x_i mediciones. (¿Se imagina por qué se utiliza $n - 1$ en la fórmula en lugar de n ?)

Para la mayoría de los experimentos, la distribución de los valores de medición tiende a una distribución normal, también llamada *distribución gaussiana*, cuando se aumenta el número de mediciones. La distribución, que se muestra en la Figura 303, se describe por la expresión

$$N(x) \approx e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}. \quad (111)$$

Desafío 335 e El cuadrado σ^2 de la desviación estándar es también llamada la *varianza*. Para una distribución gaussiana de los valores de medición, $2,35\sigma$ es la anchura completa a la mitad del máximo. .

Ref. 304 La falta de exactitud se debe a *errores sistemáticos*; éstos, por lo general, sólo se pueden estimar. Esta estimación se añade a menudo a los errores aleatorios para producir un *error experimental total*, a veces también llamada *incertidumbre total*. El *error relativo* o *incertidumbre relativa* es la relación entre el error y el valor medido.

Desafío 336 e Por ejemplo, una medida profesional dará un resultado como $0,312(6)$ m. El número entre paréntesis es la desviación típica σ , en unidades de los últimos dígitos. Al igual que anteriormente, se supone una distribución de Gauss de los resultados de medición. Por lo tanto, un valor de $0,312(6)$ m implica que se espera que el valor real a medir resulte

- dentro de 1σ con un 68.3 % de probabilidad, por tanto en este ejemplo, dentro de $0,312 \pm 0,006$ m;
- dentro de 2σ con un 95.4 % de probabilidad, por tanto en este ejemplo, dentro de $0,312 \pm 0,012$ m;
- dentro de 3σ con un 99.73 % de probabilidad, por tanto en este ejemplo, dentro de

- 0,312 ± 0,018 m;
- dentro de 4σ con un 99.9937 % de probabilidad, por tanto en este ejemplo, dentro de 0,312 ± 0,024 m;
 - dentro de 5σ con un 99.999 943 % de probabilidad, por tanto en este ejemplo, dentro de 0,312 ± 0,030 m;
 - dentro de 6σ con un 99.999 999 80 % de probabilidad, por tanto en este ejemplo, dentro de 0,312 ± 0,036 m;
 - dentro de 7σ con un 99.999 999 999 74 % de probabilidad, por tanto en este ejemplo, dentro de 0,312 ± 0,041 m.

Desafío 337 s (¿Tienen sentido los últimos números?)

Téngase en cuenta que las desviaciones estándar tienen un dígito, usted tendría que ser un experto mundial para usar dos, y un tonto para usar más. Si no se da una desviación estándar, se supone un (1). Como resultado, entre los profesionales, 1 km y 1000 m, ¡no son la misma longitud!

¿Qué sucede con los errores cuando se suman o restan dos valores de medición A y B ? Si todas las mediciones son independientes - o no correlacionadas - la desviación estándar de la suma y de la diferencia viene dada por $\sigma = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2}$. Tanto para el producto o cociente de dos valores medidos y no correlacionados C y D , el resultado es $\rho = \sqrt{\rho_C^2 + \rho_D^2}$ donde los términos ρ son las desviaciones estándar *relativas*.

Desafío 338 s Suponga que la medición para un objeto que se mueve 1 m es de 3 s: ¿cuál es el valor de la velocidad medida?

LÍMITES A LA PRECISIÓN

¿Cuáles son los límites de la exactitud y la precisión? No hay manera, incluso en principio, de medir una longitud x con una *precisión* superior de alrededor de los 61 dígitos, porque en la naturaleza, la relación entre la mayor y la menor longitud medible es $\Delta x/x > l_{\text{pl}}/d_{\text{horizonte}} = 10^{-61}$. (¿Es esta relación válida también para la fuerza o para el volumen?) En el volumen final de nuestro texto, el estudio de los relojes y metros rígidos refuerza este límite teórico.

Desafío 339 e
Vol. VI, página ??

Pero no es difícil deducir límites prácticos más estrictos. Ninguna máquina imaginable puede medir cantidades con una precisión superior a la medición del diámetro de la Tierra entre la longitud más pequeña jamás medida, sobre 10^{-19} m; es decir, con cerca de 26 dígitos de precisión. El uso de un límite más realista de una máquina de tamaño 1000 m implica un límite de 22 dígitos. Si, como se predijo anteriormente, las medidas de tiempo realmente lograran 17 dígitos de precisión, entonces se acercan al límite práctico, ya que además de tamaño, existe una restricción práctica adicional: el coste. De hecho, un dígito adicional en la precisión de medición a menudo significa un dígito adicional en el coste del equipo.

LAS CONSTANTES FÍSICAS

En la física, las observaciones de carácter general se deducen de las más fundamentales. Como consecuencia de ello, muchas mediciones se pueden deducir de las más fundamentales. Las medidas más fundamentales son las de las constantes físicas.

Las siguientes tablas muestran los mejores valores del mundo de las constantes físicas

Ref. 305 más importantes y propiedades físicas de las partículas - en unidades del SI y en algunas otras unidades comunes - publicados en las referencias estándar. Los valores son los promedios mundiales de las mejores mediciones realizadas hasta el presente. Como de costumbre, los errores experimentales, incluyendo los errores sistemáticos, tanto aleatorios como estimados, se expresan dando la desviación estándar en los últimos dígitos. De hecho, detrás de cada uno de los números en las siguientes tablas hay una larga historia digna de ser contada, pero para las que no hay suficiente espacio aquí .

Ref. 306

Ref. 305

En principio, todas las propiedades cuantitativas de la materia se pueden calcular con la teoría cuántica y los valores de ciertas constantes físicas. Por ejemplo, el color , la densidad y la propiedad elástica se pueden predecir usando las ecuaciones del modelo estándar de la física de partículas y los valores de las constantes básicas.

Vol. V, página ??

TABLA 27 Constantes física básicas constantes.

CANTIDAD	SÍMBOLO	VALORES UNIDADES SI	UNCERT. ^a
Constantes que definen las unidades de medidas SI			
Velocidad de la luz en el vacío ^c	c	299 792 458 m/s	0
Permeabilidad del vacío ^c	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m = 1,256 637 061 435 ... μ H/m	0
Permitividad del vacío ^c	$\epsilon_0 = 1/\mu_0 c^2$	8,854 187 817 620 ... pF/m	0
constante de Planck original	h	$6,626 069 57(52) \cdot 10^{-34}$ Js	$4,4 \cdot 10^{-8}$
Constante de Planck reducida, Cuanto de acción	\hbar	$1,054 571 726(47) \cdot 10^{-34}$ Js	$4,4 \cdot 10^{-8}$
Carga del positrón	e	0,160 217 656 5(35) aC	$2,2 \cdot 10^{-8}$
Constante de Boltzmann	k	$1,380 6488(13) \cdot 10^{-23}$ J/K	$9,1 \cdot 10^{-7}$
Constante gravitacional	G	$6,673 84(80) \cdot 10^{-11}$ Nm ² /kg ²	$1,2 \cdot 10^{-4}$
Constante de acoplamiento gravitacional $\kappa = 8\pi G/c^4$		$2,076 50(25) \cdot 10^{-43}$ s ² /kg m	$1,2 \cdot 10^{-4}$
Constantes fundamentales de origen desconocido)			
Número de dimensiones espacio-temporales		3 + 1	0
Constante de estructura-fina ^d o	$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}$	1/137,035 999 074(44)	$3,2 \cdot 10^{-10}$
e.m. constante de acoplamiento	$= g_{em}(m_e^2 c^2)$	= 0,007 297 352 5698(24)	$3,2 \cdot 10^{-10}$
constante de acoplamiento de Fermi ^d o	$G_F/(\hbar c)^3$	$1,166 364(5) \cdot 10^{-5}$ GeV ⁻²	$4,9 \cdot 10^{-6}$
constante de acoplamiento débil	$\alpha_w(M_Z) = g_w^2/4\pi$	1/30,1(3)	$1 \cdot 10^{-2}$
Ángulo de mezcla débil	$\sin^2 \theta_W(\overline{MS})$	0,231 24(24)	$1,0 \cdot 10^{-3}$
	$\sin^2 \theta_W$ (on shell)	0,2224(19)	$8,7 \cdot 10^{-3}$
	$= 1 - (m_W/m_Z)^2$		
Constante de acoplamiento fuerte ^d	$\alpha_s(M_Z) = g_s^2/4\pi$	0,118(3)	$25 \cdot 10^{-3}$
Matriz de mezcla de quark CKM	$ V $	$\begin{pmatrix} 0,97428(15) & 0,2253(7) & 0,00347(16) \\ 0,2252(7) & 0,97345(16) & 0,0410(11) \\ 0,00862(26) & 0,0403(11) & 0,999152(45) \end{pmatrix}$	
Invariante Jarlskog	J	$2,96(20) \cdot 10^{-5}$	

Motion Mountain - The venture of physics on a high level. Christoph Schiller, 1999-2022. See also: www.motionmountain.net

TABLA 27 (Continuación) Constantes físicas básicas.

CANTIDAD	SÍMBOLO	VALORES EN UNIDADES SI INCERT. ^a	
Matriz de mezcla de neutrino PMNS	P	$\begin{pmatrix} 0,82 & 0,55 & -0,15 + 0,038i \\ -0,36 + 0,020i & 0,70 + 0,013i & 0,61 \\ 0,44 + 0,026i & -0,45 + 0,017i & 0,77 \end{pmatrix}$	
Masas de partículas elementales (de origen desconocido)			
Masa del electrón	m_e	$9,109\,382\,91(40) \cdot 10^{-31}$ kg	$4,4 \cdot 10^{-8}$
		$5,485\,799\,0946(22) \cdot 10^{-4}$ u	$4,0 \cdot 10^{-10}$
		$0,510\,998\,928(11)$ MeV	$2,2 \cdot 10^{-8}$
Masa del muón	m_μ	$1,883\,531\,475(96) \cdot 10^{-28}$ kg	$5,1 \cdot 10^{-8}$
		$0,113\,428\,9267(29)$ u	$2,5 \cdot 10^{-8}$
		$105,658\,3715(35)$ MeV	$3,4 \cdot 10^{-8}$
Masa del tau (o tauón)	m_τ	$1,776\,82(16)$ GeV/ c^2	
Masa del neutrino electrónico	m_{ν_e}	< 2 eV/ c^2	
Masa del neutrino muónico	m_{ν_μ}	< 2 eV/ c^2	
Masa del neutrino tauónico	m_{ν_τ}	< 2 eV/ c^2	
Masa del quark Up	u	$1,8$ to $3,0$ MeV/ c^2	
Masa del quark Down	d	$4,5$ to $5,5$ MeV/ c^2	
Masa del quark Strange	s	$95(5)$ MeV/ c^2	
Masa del quark Charm	c	$1,275(25)$ GeV/ c^2	
Masa del quark Bottom	b	$4,18(17)$ GeV/ c^2	
Masa del quark Top	t	$173,5(1,4)$ GeV/ c^2	
Masa del fotón	γ	$< 2 \cdot 10^{-54}$ kg	
masa del bosón W	W^\pm	$80,385(15)$ GeV/ c^2	
masa del bosón Z	Z^0	$91,1876(21)$ GeV/ c^2	
masa de Higgs	H	$126(1)$ GeV/ c^2	
Masa del gluón	$g_{1..,8}$	$c. 0$ MeV/ c^2	
Masa de partículas compuestas			
Masa del protón	m_p	$1,672\,621\,777(74) \cdot 10^{-27}$ kg	$4,4 \cdot 10^{-8}$
		$1,007\,276\,466\,812(90)$ u	$8,9 \cdot 10^{-11}$
		$938,272\,046(21)$ MeV	$2,2 \cdot 10^{-8}$
Masa del neutrón	m_n	$1,674\,927\,351(74) \cdot 10^{-27}$ kg	$4,4 \cdot 10^{-8}$
		$1,008\,664\,916\,00(43)$ u	$4,2 \cdot 10^{-10}$
		$939,565\,379(21)$ MeV	$2,2 \cdot 10^{-8}$
Unidad de masa atómica	$m_u = m_{12C}/12 = 1$ u	$1,660\,538\,921(73)$ yg	$4,4 \cdot 10^{-8}$

a. Incertidumbre: desviación estándar de los errores de medición.

b. Sólo se mide desde 10^{-19} m hasta 10^{26} m.

c. Constante que define.

d. Todas las constantes de acoplamiento dependen de la transferencia de impulso-4, como se explica en el apartado de renormalización. Constante de estructura-fina es el nombre tradicio-

nal para la constante de acoplamiento electromagnético g_{em} en el caso de una transferencia de impulso-4 de $Q^2 = c^2 m_e^2$, que es la más pequeña posible. A mayores transferencias de impulso, tiene valores más grandes, por ejemplo, $g_{em}(Q^2 = c^2 M_W^2) \approx 1/128$.

Por el contrario, la constante de acoplamiento fuerte tiene valores más bajos a mayores transferencias de impulso, por ejemplo, $\alpha_s(34 \text{ GeV}) = 0,14(2)$.

¿Por qué todas estas constantes fundamentales tienen los valores que tienen?. Para cualquier constante básica *con una dimensión*, tales como el cuanto de acción \hbar , el valor numérico sólo tiene significado histórico. Es $1,054 \cdot 10^{-34}$ Js debido a la definición SI del julio y del segundo. La pregunta de por qué el valor de una constante dimensional no es más grande o más pequeño, por lo tanto requiere siempre comprender el origen de algunos números adimensionales que da la relación entre la constante y la *unidad natural* correspondiente que es definida con c , G , \hbar y α . Más detalles y los valores de las unidades naturales se darán posteriormente. Comprender el tamaño de los átomos, las personas, los árboles y las estrellas, la duración de los procesos moleculares y los procesos atómicos, o la masa de núcleos y montañas, implica la comprensión de la relación entre estos valores y las correspondientes unidades naturales. La clave para entender la naturaleza por lo tanto es la comprensión de todas las relaciones, y por tanto todas las constantes adimensionales. La búsqueda de la comprensión de todos las relaciones, incluyendo la constante de estructura fina α , se completará sólo en el volumen final de nuestra aventura.

Las constantes básicas producen las siguientes observaciones útiles de alta precisión.

Vol. IV, página ??

TABLA 28 Constantes físicas derivadas.

CANTIDAD	SÍMBOLO	VALOR EN UNIDADES SI	INCERT.
Resistencia de onda en el vacío	$Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$	376,730 313 461 77... Ω	0
Número de Avogadro	N_A	$6,022 141 29(27) \cdot 10^{23}$	$4,4 \cdot 10^{-8}$
Número de Loschmidt a 273,15 K y 101 325 Pa	N_L	$2,686 7805(24) \cdot 10^{23}$	$9,1 \cdot 10^{-7}$
Constante de Faraday	$F = N_A e$	96 485,3365(21) C/mol	$2,2 \cdot 10^{-8}$
Constante universal de los gases	$R = N_A k$	8,314 4621(75) J/mol K	$9,7 \cdot 10^{-7}$
Volumen molar de un gas ideal a 273,15 K y 101 325 Pa	$V = RT/p$	22,413 968(20) l/mol	$9,7 \cdot 10^{-7}$
Constante de Rydberg ^a	$R_\infty = m_e c \alpha^2 / 2h$	10 973 731,568 539(55) m^{-1}	$5 \cdot 10^{-12}$
Conductancia cuántica	$G_0 = 2e^2/h$	77,480 917 346(25) μS	$3,2 \cdot 10^{-10}$
Flujo magnético cuántico	$\varphi_0 = h/2e$	2,067 833 758(46) pWb	$2,2 \cdot 10^{-8}$
Razón de frecuencia de Josephson	$2e/h$	483,597 870(11) THz/V	$2,2 \cdot 10^{-8}$
Constante de Von Klitzing	$h/e^2 = \mu_0 c / 2\alpha$	25 812,807 4434(84) Ω	$3,2 \cdot 10^{-10}$
Magnetón de Bohr	$\mu_B = e\hbar/2m_e$	9,274 009 68(20) $\gamma J/T$	$2,2 \cdot 10^{-8}$
Radio clásico del electrón	$r_e = e^2/4\pi\epsilon_0 c^2 m_e$	2,817 940 3267(27) fm	$9,7 \cdot 10^{-10}$
longitud de onda Compton del electrón	$\lambda_C = h/m_e c$ $\lambda_c = \hbar/m_e c = r_e/\alpha$	2,426 310 2389(16) pm 0,386 159 268 00(25) pm	$6,5 \cdot 10^{-10}$ $6,5 \cdot 10^{-10}$
Radio de Bhor ^a	$a_\infty = r_e/\alpha^2$	52,917 721 092(17) pm	$3,2 \cdot 10^{-10}$
Cuanto de circulación	$h/2m_e$	$3,636 947 5520(24) \cdot 10^{-4} m^2/s$	$6,5 \cdot 10^{-10}$

Motion Mountain - The Adventure of Physics
Copyright © Christoph Schiller, June 1990-2020
Preprod: www.motionmountain.net

TABLA 28 (Continuación) Constantes físicas derivadas.

CANTIDAD	SÍMBOLO	VALORES EN UNIDADES SI INCERT.	
Carga específica del positrón	e/m_e	$1,758\,820\,088(39) \cdot 10^{11}$ C/kg	$2,2 \cdot 10^{-8}$
Frecuencia del ciclotrón del electrón	$f_c/B = e/2\pi m_e$	27,992 491 10(62) GHz/T	$2,2 \cdot 10^{-8}$
Momento magnético del electrón	μ_e	$-9,284\,764\,30(21) \cdot 10^{-24}$ J/T	$2,2 \cdot 10^{-8}$
	μ_e/μ_B	-1,001 159 652 180 76(27)	$2,6 \cdot 10^{-13}$
	μ_e/μ_N	$-1,838\,281\,970\,90(75) \cdot 10^3$	$4,1 \cdot 10^{-10}$
Factor-g del electrón	g_e	-2,002 319 304 361 53(53)	$2,6 \cdot 10^{-13}$
Razón de masa muón-electrón	m_μ/m_e	206,768 2843(52)	$2,5 \cdot 10^{-8}$
Momento magnético del muón	μ_μ	$-4,490\,448\,07(15) \cdot 10^{-26}$ J/T	$3,4 \cdot 10^{-8}$
factor-g del muón	g_μ	-2,002 331 8418(13)	$6,3 \cdot 10^{-10}$
Razón de masa protón-electrón	m_p/m_e	1 836,152 672 45(75)	$4,1 \cdot 10^{-10}$
Carga específica del protón	e/m_p	$9,578\,833\,58(21) \cdot 10^7$ C/kg	$2,2 \cdot 10^{-8}$
Longitud de onda Compton del protón	$\lambda_{C,p} = h/m_p c$	1,321 409 856 23(94) fm	$7,5 \cdot 10^{-10}$
Magnetón nuclear	$\mu_N = e\hbar/2m_p$	$5,050\,783\,53(11) \cdot 10^{-27}$ J/T	$2,2 \cdot 10^{-8}$
Momento magnético del protón	μ_p	$1,410\,606\,743(33) \cdot 10^{-26}$ J/T	$2,4 \cdot 10^{-8}$
	μ_p/μ_B	$1,521\,032\,210(12) \cdot 10^{-3}$	$8,1 \cdot 10^{-9}$
	μ_p/μ_N	2,792 847 356(23)	$8,2 \cdot 10^{-9}$
Razón giromagnética de protón	$\gamma_p = 2\mu_p/\hbar$	$2,675\,222\,005(63) \cdot 10^8$ Hz/T	$2,4 \cdot 10^{-8}$
Factor-g del protón	g_p	5,585 694 713(46)	$8,2 \cdot 10^{-9}$
Razón de masa neutrón-electrón	m_n/m_e	1 838,683 6605(11)	$5,8 \cdot 10^{-10}$
Razón de masa neutrón-protón	m_n/m_p	1,001 378 419 17(45)	$4,5 \cdot 10^{-10}$
Longitud de onda Compton del neutrón	$\lambda_{C,n} = h/m_n c$	1,319 590 9068(11) fm	$8,2 \cdot 10^{-10}$
Momento magnético de neutrón	μ_n	$-0,966\,236\,47(23) \cdot 10^{-26}$ J/T	$2,4 \cdot 10^{-7}$
	μ_n/μ_B	$-1,041\,875\,63(25) \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-7}$
	μ_n/μ_N	-1,913 042 72(45)	$2,4 \cdot 10^{-7}$
Constante de Stefan-Boltzmann	$\sigma = \pi^2 k^4/60\hbar^3 c^2$	$56,703\,73(21)$ nW/m ² K ⁴	$3,6 \cdot 10^{-6}$
Constante de desplazamiento de Wien	$b = \lambda_{\max} T$	2,897 7721(26) mmK	$9,5 \cdot 10^{-7}$
		58,789 254(53) GHz/K	$9,5 \cdot 10^{-7}$
Electrón-volt	eV	$1,602\,176\,565(35) \cdot 10^{-19}$ J	$2,2 \cdot 10^{-8}$
constante de conversión bits a entropía	$k \ln 2$	10^{23} bit = 0,956 994 5(9) J/K	$9,5 \cdot 10^{-7}$
Contenido de energía TNT		3.7 to 4,0 MJ/kg	$4 \cdot 10^{-2}$

a. Para una masa infinita del núcleo.

En la siguiente Tabla se dan algunas propiedades útiles de nuestro medio ambiente local.

TABLA 29 Constantes astronómicas.

CANTIDAD	SÍMBOLO	VALOR
Año trópico (o tropical) 1900 ^a	a	31 556 925,974 7 s
Año trópico 1994	a	31 556 925,2 s
Día sideral medio	d	23 ^h 56'4,090 53''
Distancia media Tierra-Sol ^b		149 597 870,691(30) km
Unidad astronómica ^b	AU	149 597 870 691 m
Año luz, basado en el año Juliano ^b	al	9,460 730 472 5808 Pm
Parsec	pc	30,856 775 806 Pm = 3,261 634 al
Masa de la Tierra	M_{\oplus}	5,973(1) · 10 ²⁴ kg
Constante gravitacional geocéntrica	GM	3,986 004 418(8) · 10 ¹⁴ m ³ /s ²
Longitud gravitacional de la Tierra	$l_{\oplus} = 2GM/c^2$	8,870 056 078(16) mm
Radio ecuatorial de la Tierra ^c	$R_{\oplus_{eq}}$	6378,1366(1) km
Radio polar de la Tierra ^c	R_{\oplus_p}	6356,752(1) km
Distancia (media) ecuador-polo ^c		10 001,966 km
Aplanamiento terrestre ^c	e_{\oplus}	1/298,25642(1)
Densidad media de la Tierra	ρ_{\oplus}	5,5 Mg/m ³
Edad de la Tierra	T_{\oplus}	4,50(4) Ga = 142(2) Ps
Gravedad normal de la Tierra	g	9,806 65 m/s ²
Presión atmosférica estándar de la Tierra	p_0	101 325 Pa
Radio de la Luna	R_{ζ_v}	1738 km en dirección a la Tierra
Radio de la Luna	R_{ζ_h}	1737,4 km en otras dos direcciones
Masa de la Luna	M_{ζ}	7,35 · 10 ²² kg
Distancia media a la Luna ^d	d_{ζ}	384 401 km
Distancia a la Luna en el perigeo ^d		típica 363 Mm, mínimo histórico 359 861 km
Distancia media a la Luna en el apogeo ^d		típica 404 Mm, máximo histórico 406 720 km
Tamaño angular de la Luna ^e		medio 0,5181° = 31,08', mínimo 0,49°, máximo 0,55°
Densidad media de la Luna	ρ_{ζ}	3,3 Mg/m ³
Gravedad en la superficie de la Luna	g_{ζ}	1,62 m/s ²
Presión atmosférica de la Luna	p_{ζ}	desde 10 ⁻¹⁰ Pa (noche) hasta 10 ⁻⁷ Pa (día)
Masa de Júpiter	M_{\jmath}	1,90 · 10 ²⁷ kg
Radio de Júpiter, ecuatorial	R_{\jmath}	71,398 Mm
Radio de Júpiter, polar	R_{\jmath}	67,1(1) Mm
Distancia media de Júpiter al Sol	D_{\jmath}	778 412 020 km
Gravedad en la superficie de Júpiter	g_{\jmath}	24,9 m/s ²
Presión atmosférica de Júpiter	p_{\jmath}	desde 20 kPa hasta 200 kPa
Masa del Sol	M_{\odot}	1,988 43(3) · 10 ³⁰ kg
Longitud gravitacional del Sol	$2GM_{\odot}/c^2$	2,953 250 08(5) km
Constante gravitacional heliocéntrica	GM_{\odot}	132,712 440 018(8) · 10 ¹⁸ m ³ /s ²

TABLA 29 (Continuación) Constantes astronómicas.

CANTIDAD	SÍMBOLO	VALOR
Luminosidad del Sol	L_{\odot}	384,6 YW
Radio ecuatorial del Sol	R_{\odot}	695,98(7) Mm
Tamaño angular del Sol		0,53° medio; mínimo en el 4 de julio (afelio) 1888", máximo en el 4 de Enero (perihelio) 1952"
Densidad media del Sol	ρ_{\odot}	1,4 Mg/m ³
Distancia media al Sol	AU	149 597 870,691(30) km
Edad del Sol	T_{\odot}	4,6 Ga
Velocidad solar en torno al centro de la galaxia	$v_{\odot g}$	220(20) km/s
Velocidad solar contra la radiación de fondo	$v_{\odot b}$	370,6(5) km/s
gravedad en la superficie del Sol	g_{\odot}	274 m/s ²
Presión fotosférica más baja del Sol	p_{\odot}	15 kPa
Distancia al centro de la Vía Láctea		8,0(5) kpc = 26,1(1,6) kal
Edad de la Vía Láctea		13,6 Ga
Tamaño de la Vía Láctea		c. 10 ²¹ m o 100 kal
Masa de la Vía Láctea		10 ¹² masa solares, c. 2 · 10 ⁴² kg
Grupo de galaxias conocidas más distante SXDF-XCLJ		9,6 · 10 ⁹ al

0218-0510

Desafío 340 s
Ref. 307

a. Constante que define, desde el equinoccio de primavera a equinoccio de primavera; una vez fue utilizado para definir el segundo. (Recuerde: π segundos es aproximadamente un nanosiglo - milmillonésima parte de un siglo.) El valor de 1990 es aproximadamente 0,7 s menos, que corresponde a una ralentización de alrededor de 0,2 ms/a. (¡Ojo!: ¿por qué?) También hay una fórmula empírica para la variación de la duración del año en el tiempo.

b. La precisión realmente sorprendente de tan sólo 30 m en la distancia media Tierra-Sol resulta del promedio de tiempo de las señales enviadas desde las sondas orbitales Viking y las de aterrizaje en Marte tomadas durante un período de más de 20 años. Tenga en cuenta que la Unión Astronómica Internacional distingue la distancia media Tierra-Sol de la *unidad astronómica* en sí misma; esta última se define como una longitud fija y precisa. Incluso el *año luzes* una unidad definida como un número exacto por la UAI. Para obtener más información, consulte www.iau.org/public/measuring.

c. La forma de la Tierra se describe con mayor precisión con el Sistema Geodésico Mundial. La última edición fue publicada en la 1984. Para una presentación completa de sus antecedentes y sus detalles, véase la página web www.wgs84.com. La Unión Geodésica Internacional afinó los datos en 2000. Los radios y los datos de aplanamiento aquí son los del 'sistema de marea media'. Se diferencian de las del 'sistema de marea cero' y otros sistemas en aproximadamente 0,7 m. Los detalles son una ciencia en sí misma.

d. Medida de centro a centro. Para encontrar la posición exacta de la Luna en el cielo en una cierta fecha, ver la página www.fourmilab.ch/earthview/moon_ap_per.html. Para los planetas, ver la página www.fourmilab.ch/solar/solar.html y las otras páginas del mismo sitio.

e. Los ángulos son definidos como sigue: 1 grado = $1^\circ = \pi/180$ rad, 1 (primer) minuto = $1' = 1^\circ/60$, 1 segundo (minuto) = $1'' = 1'/60$. Las unidades antiguas 'un tercer diminuto' y 'un cuarto minuto', cada uno $1/60$ -un sesentésimo- del precedente, ya no están en uso. ('Minuto' significa originariamente 'muy pequeño', como se hace todavía en inglés moderno)

Desafío 341 s En la siguiente Tabla se enumeran algunas propiedades de la naturaleza en general. (Si acepta un reto, ¿puede determinar si una propiedad del universo, no viene en la lista?)

TABLA 30 Constantes cosmológicas.

CANTIDAD	SÍMBOLO	VALOR
Constante cosmológica	Λ	$c \cdot 1 \cdot 10^{-52} \text{ m}^{-2}$
Edad del universo ^a	t_0	$4,333(53) \cdot 10^{17} \text{ s} = 13,8(0,1) \cdot 10^9 \text{ a}$
(determinado por el espacio-tiempo, vía expansión, utilizando la relatividad general)		
Edad del universo ^a	t_0	más de $3,5(4) \cdot 10^{17} \text{ s} = 11,5(1,5) \cdot 10^9 \text{ a}$
(determinado por la materia, vía galaxias y estrellas, utilizando la teoría cuántica)		
Parámetro de Hubble ^a	H_0	$2,3(2) \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1} = 0,73(4) \cdot 10^{-10} \text{ a}^{-1}$
		$= h_0 \cdot 100 \text{ km/s Mpc} = h_0 \cdot 1,0227 \cdot 10^{-10} \text{ a}^{-1}$
Parámetro de Hubble reducido ^a	h_0	0,71(4)
Parámetro de deceleración ^a	$q_0 = -(\ddot{a}/a)_0/H_0^2$	-0,66(10)
Distancia horizonte del universo ^a	$d_0 = 3ct_0$	$40,0(6) \cdot 10^{26} \text{ m} = 13,0(2) \text{ Gpc}$
Topología del universo		trivial hasta 10^{26} m
Número de dimensiones espaciales		3, para distancia hasta 10^{26} m
Densidad crítica del universo	$\rho_c = 3H_0^2/8\pi G$	$h_0^2 \cdot 1,87882(24) \cdot 10^{-26} \text{ kg/m}^3$
		$= 0,95(12) \cdot 10^{-26} \text{ kg/m}^3$
Parámetro de densidad (total) ^a	$\Omega_0 = \rho_0/\rho_c$	1.02(2)
Parámetro de densidad del barión ^a	$\Omega_{B0} = \rho_{B0}/\rho_c$	0.044(4)
Parámetro de densidad de la materia oscura fría ^a	$\Omega_{\text{CDM}0} = \rho_{\text{CDM}0}/\rho_c$	0.23(4)
Parámetro de densidad del neutrino ^a	$\Omega_{\nu 0} = \rho_{\nu 0}/\rho_c$	0.001 to 0.05
Parámetro de densidad de la energía oscura ^a	$\Omega_{X0} = \rho_{X0}/\rho_c$	0.73(4)
Parámetro de estado de la energía oscura	$w = p_X/\rho_X$	-1,0(2)
Masa del barión	m_b	$1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Densidad numérica de bariones		$0,25(1) / \text{m}^3$
Densidad de materia luminosa		$3,8(2) \cdot 10^{-28} \text{ kg/m}^3$
Estrellas en el universo	n_s	$10^{22 \pm 1}$
Bariones en el universo	n_b	$10^{81 \pm 1}$
Temperatura del fondo de microondas ^b	T_0	2,725(1) K
Fotones en el universo	n_γ	10^{89}
Densidad de energía del fotón	$\rho_\gamma = \pi^2 k^4 / 15 T_0^4$	$4,6 \cdot 10^{-31} \text{ kg/m}^3$
Densidad numérica de fotones		$410,89 / \text{cm}^3$ or $400 / \text{cm}^3 (T_0/2,7 \text{ K})^3$
Amplitud de la densidad de perturbación	\sqrt{S}	$5,6(1,5) \cdot 10^{-6}$
Amplitud de la onda gravitacional	\sqrt{T}	$< 0,71 \sqrt{S}$
Fluctuaciones sobre la masa 8 Mpc	σ_8	0.84(4)
Índice escalar	n	0.93(3)

TABLA 30 (Continuación) Constantes cosmológicas.

CANTIDAD	SÍMBOLO	VALOR
Índice de ejecución escalar	$dn/d \ln k$	-0,03(2)
Longitud de Planck	$l_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar G/c^3}$	$1,62 \cdot 10^{-35}$ m
Tiempo de Planck	$t_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar G/c^5}$	$5,39 \cdot 10^{-44}$ s
Masa de Planck	$m_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar c/G}$	21,8 μg
Instantes en la historia ^a	t_0/t_{Pl}	$8,7(2,8) \cdot 10^{60}$
Puntos espacio-temporales en el horizonte interno ^a	$N_0 = (R_0/l_{\text{Pl}})^3 \cdot (t_0/t_{\text{Pl}})$	$10^{244 \pm 1}$
Masa en el horizonte interno	M	$10^{54 \pm 1}$ kg

a. El índice 0 indica valores a día de hoy.

b. La radiación originada cuando el universo tenía 380 000 años y poseía una temperatura de alrededor de 3000 K; las fluctuaciones ΔT_0 que condujeron a la formación de las galaxias son hoy de unos $16 \pm 4 \mu\text{K} = 6(2) \cdot 10^{-6} T_0$.

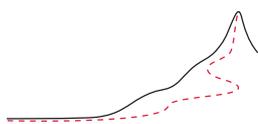
Vol. II, página 232

NÚMEROS ÚTILES

π	3,14159 26535 89793 23846 26433 83279 50288 41971 69399 37510 ₅
e	2,71828 18284 59045 23536 02874 71352 66249 77572 47093 69995 ₉
γ	0,57721 56649 01532 86060 65120 90082 40243 10421 59335 93992 ₃
$\ln 2$	0,69314 71805 59945 30941 72321 21458 17656 80755 00134 36025 ₅
$\ln 10$	2,30258 50929 94045 68401 79914 54684 36420 76011 01488 62877 ₂
$\sqrt{10}$	3,16227 76601 68379 33199 88935 44432 71853 37195 55139 32521 ₆

Ref. 308





DESAFÍOS, PISTAS Y SOLUCIONES

Desafío 1, página 10: No dude en ser exigente y estricto. La siguiente edición del texto se verá beneficiada por ello.

Desafío 3, página 18: El campo eléctrico distorsiona la llama acercándola o alejándola del peine. La [Figura 186](#) muestra una fotografía del efecto. En la www.youtube.com/watch?v=a7_8Gc_Llr8 se muestra un vídeo de un efecto similar en campos más fuertes.

Desafío 4, página 21: Las gotas de agua tienen que desprenderse del flujo *dentro* de los contraelectrodos metálicos. Existe siempre un cara minúscula sobre las estructuras de metal (debida a los rayos cósmicos, el rozamiento, carga previas, etc.). En la [Figura 185](#), esta carga inicial es la carga positiva dibujada abajo a la izquierda y arriba a la derecha de la estructura metálica. Cuando se forman las gotas de agua reciben una carga que es la opuesta a la del metal que rodea la región donde se forma la gota. Las gotas negativas caen dentro de la otra estructura metálica. A través de la carga negativa acumulada aquí, se incrementa la carga positiva acumulada en la primera estructura. Cuando la carga sobre la estructura metálica crece, la separación de las gotas es más eficiente. En otras palabras, la formación de gotas de agua en el interior de estructuras metálicas *amplifica* cualquier carga inicial. Después de un tiempo, el valor de la carga y el del voltaje asociado es tan alto que se produce una sonora explosión (si todo está seco, incluido el aire.) Luego todo el proceso vuelve a empezar. De hecho, un mecanismo de separación de carga vagamente similar lleva a la carga de las nubes y a los rayos. Si quiere construir un generador Kelvin en casa, eche un vistazo a la página web de.wikipedia.org/wiki/Kelvin-Generator, o busque otros sitios en Internet sobre este asunto.

Para evitar las chispas en los depósitos de combustible de sus coches, Opel simplemente derivó a tierra el tubo de metal de la entrada al tanque; habían olvidado asegurar el contacto eléctrico entre el tubo y el resto del coche.

La explosión de combustible puede también ocurrir cuando llena el depósito de su coche con un depósito de metal. Varias veces, el robo de combustible ha sido ‘castigado’ por una explosión producida por la electricidad estática cuando han tratado de verter combustible robado en su coche. En cualquier aeropuerto puede observar cómo evitar el problema: antes de unir la manguera al aeroplano, el empleado une un cable conductor desde el camión o el depósito al avión.

Desafío 5, página 23: Observamos las dos chispas a través de un espejo que gira rápidamente. De esta manera, pequeñas diferencias de tiempo marcan pequeñas diferencias de posición de las dos chispas. En el siglo XIX, los valores de velocidad medidos de esta manera variaban entre 6000 km/s y por encima de los 100 000 km/s, porque la velocidad depende de la efectiva capacitancia y la inductancia del cable y de la instalación. Sólo si esos efectos pudieran ser ignorados la velocidad medida sería la misma que la de la luz en el vacío, a saber alrededor de 300 000 km/s. El los cables modernos, la velocidad típica es de alrededor de un tercio de ese valor.

Desafío 6, página 24: Mientras el péndulo metálico golpeaba salvajemente entre las dos campanas se produjo un enorme ruido.

Desafío 8, página 28: No.

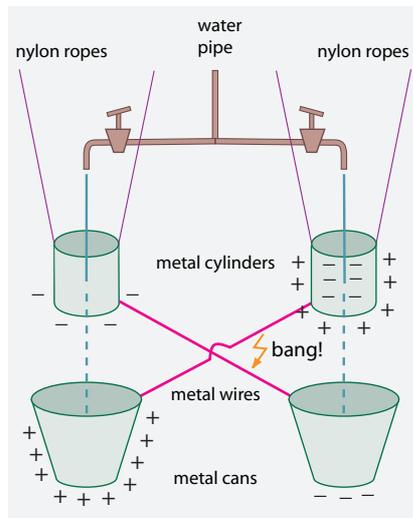


FIGURA 185 La clave del proceso del generador Kelvin: separación de cargas durante la formación de las gotas.



FIGURA 186 Forma en la que una llama reacciona con un peine frotado (© Shubham Das y Rakesh Kumar).

Desafío 9, página 28: El campo a 1 m de distancia de un electrón es de $1,4 \text{ nV/m}$.

Desafío 10, página 29: La ley del cuadrado inverso es un simple efecto geométrico: cualquier cosa que fluye de manera homogénea desde una esfera disminuye con el cuadrado de la distancia.

Desafío 11, página 30: Se consigue $F = \alpha \hbar c N_A^2 / 4R^2 = 3 \cdot 10^{12}$ N, una fuerza enorme, correspondiente al peso de 300 millones de toneladas. Demuestra la enorme fuerza que mantiene unida a la materia. Obviamente, no habría forma imaginable de guardar 1 g de carga positiva unida en una caja, puesto que las fuerzas repulsivas entre las cargas podrían ser aún mayor.

Desafío 13, página 30: Para demostrar la equivalencia completa entre las 'leyes' de Coulomb y de Gauss, primero se demuestra que se cumplen para una carga puntual única. Luego se expande el resultado a más de una carga puntual. Esto le da a la 'ley' de Gauss una forma de integral, como la que hay justamente antes de este desafío.

Para deducir la forma integral de la 'ley' de Gauss para una única carga puntual, tenemos que integrar sobre una superficie cerrada. Aquí el punto fundamental es notar que la integración sólo puede llevarse a cabo para una dependencia del cuadrado inverso. Esta dependencia permite transformar el producto escalar entre el campo local y el elemento de área en un producto normal entre la carga y el ángulo sólido Ω :

$$E \, dA = \frac{q \, dA \cos \theta}{4\pi \epsilon_0 r^2} = \frac{q \, d\Omega}{4\pi \epsilon_0}. \quad (112)$$

En el caso de que la superficie sea cerrada la integración es sencilla.

Para deducir la forma diferencial (la estática) de la 'ley' de Gauss, a saber

$$\nabla E = \frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad (113)$$

hacemos uso de la definición de la densidad de carga ρ y de la relación puramente matemática

$$\oint_{\text{superficie cerrada}} E \, dA = \int_{\text{volumen encerrado}} \nabla E \, dV. \quad (114)$$

Esta relación matemática, válida para cualquier campo vectorial E , se conoce como *teorema de Gauss*. Simplemente establece que el flujo es la integral de volumen de la divergencia.

Para deducir la forma completa de la ley de Gauss, incluyendo la derivada temporal del campo magnético, necesitaremos incluir los efectos relativistas por el cambio de punto de vista para un observador en movimiento.

Desafío 15, página 31: Los cuerpos sin carga pueden atraerse entre sí, si está hechos con componentes cargados que se neutralizan unos a otros, y si las cargas están restringidas en su movilidad. Las fluctuaciones de cargas producen atracción. La mayoría de las moléculas interactúan entre sí de esta manera; tales fuerzas son también la base de la tensión superficial de los líquidos y por tanto de la formación de las gotas.

Desafío 16, página 31: No; las baterías sólo separan las cargas y las bombean a su alrededor.

Desafío 18, página 34: La razón q/m para los electrones y la de las cargas libres del interior de los metales no son exactamente lo mismo.

Desafío 20, página 37: Encuentre un forma de comprobar el tema, lleve a cabo el experimento y ¡publíquelos!

Desafío 21, página 45: Si puede, publique el resultado. Los investigadores han tratado de poner a personas en el océano en los días nublados, han intentado experimentar en cuartos oscuros, pero no han encontrado nada hasta ahora. Tampoco las experiencias de personas con equipos de resonancia magnética por imagen han sido concluyentes hasta ahora.

Desafío 23, página 51: No.

Desafío 25, página 52: La versión correcta de la 'ley' de Ampère es

$$\nabla \times \mathbf{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \mu_0 \mathbf{j} \quad (115)$$

mientras que la expresión mencionada en el texto omite el término $\frac{\partial E}{\partial t}$.

Para otra manera de establecer la diferencia entre la versión correcta y la equivocada de la 'ley' de Ampère, véase RICHARD P. FEYNMAN, ROBERT B. LEIGHTON & MATTHEW SANDS, *The Feynman Lectures on Physics*, volume II, Addison Wesley, p. 21-1, 1977. Se pueden consultar libremente online en la www.feynmanlectures.info.

Desafío 26, página 53: Solo aumenta con velocidades relativista la mezcla de campos magnéticos y eléctricos de una considerable cantidad

Desafío 28, página 54: El campo dual $*F$ esta definido en la [página 84](#).

Desafío 29, página 55: Los productos escalares de cuatro vectores son siempre, por construcción, cantidades invariantes de Lorentz.

Desafío 30, página 56: La producción de Rayos-X necesita una alta concentración de energía; tales niveles resultan imposibles en los sistemas biológicos.

Desafío 31, página 56: Las ondas eléctricas de baja frecuencia son producidas en los sistemas nerviosos, y en particular en los cerebros. Como se mencionó anteriormente, varias especies de peces se comunican vía campos dipolares eléctricos que varían con el tiempo. Pero no se ha encontrado nunca una comunicación a través de ondas de *radio*. En realidad, hay poca esperanza de que tal sistema exista. ¿Por qué? (Pista: reflexionar sobre las frecuencias involucradas, su generación, y las propiedades físicas del agua y del aire.)

Ref. 16

Desafío 34, página 59: Casi todas las partículas neutras están hechas de partículas cargadas. Por tanto, el límite de velocidad también es válido para ellos. Solo hay una excepción: los neutrinos. Para ellos, este argumento no es válido. No obstante, aún los neutrinos tienen partículas *virtuales* cargadas a su alrededor, por lo que la velocidad máxima también les es aplicable.

Página 59

Desafío 35, página 60: Como se explicó anteriormente, para un observador que viaje a lo largo de un cable, los eventos de entrada y salida de cargas por los dos extremos no ocurren nunca simultáneamente; para el observador que se mueve, el cable está cargado. Por tanto existe un campo magnético para *cualquier* observador en movimiento.

Página 69

Desafío 36, página 62: La iluminación del Sol cambia la ionización de la capa superior de la atmósfera y provoca convección en la ionosfera. Las mareas mueven los iones en el océano y en la atmósfera. Estas corrientes producen campos magnéticos que pueden ser vistos en las agujas de las brújulas sensibles.

Desafío 37, página 62: Si puede encontrar tal efecto y es capaz de demostrarlo, publíquelo en un periódico didáctico.

Desafío 38, página 62: Generalmente, los cables de las líneas de alta tensión están demasiado calientes para ser confortables.

Desafío 39, página 62: Muévalos a una forma de T.

Desafío 40, página 62: Pista: una bombilla incandescente está caliente.

Desafío 41, página 62: Para tres o más conmutadores, se utilizan inversores; un inversor es un conmutador con dos entradas y dos salidas que en una posición, conecta la primera entrada a la segunda salida y viceversa. (Hay otras posibilidades, no obstante; se puede ahorrar cable usando conmutadores con relés electromagnéticos.)

Desafío 43, página 63: Se comportan de manera diferente: un batería alcalina llena contiene un gel que amortigua el rebote. Una batería vacía no tiene gel y rebota.

Desafío 44, página 63: Los niños rubios tienden a tener el pelo más fino, produciendo así un mayor efecto. Se necesita clima seco para evitar que la humedad del aire descargue la cabeza y por tanto evite que el cabello se levante.

Desafío 45, página 63: El transporte inalámbrico de energía eléctrica es posible; sin embargo, los sistemas actuales resultan generalmente grandes, caros y peligrosos para la salud humana. La idea de recolectar energía solar del espacio profundo y posteriormente enviarla a la Tierra en forma de microondas ha sido con frecuencia puesta de manifiesto. La financiación y los peligros la han bloqueado hasta ahora.

Desafío 47, página 64: Pegue dos espejos en ángulo recto. O mírese usted mismo en una TV o utilice una videocámara.

Desafío 48, página 65: Esto es nuevamente un ejemplo de una combinación de triboluminiscencia y de triboelectricidad. Consulte también los sitios web scienceworld.wolfram.com/physics/Triboluminescence.html y www.geocities.com/RainForest/9911/tribo.htm.

Desafío 51, página 68: La pimienta es más ligera que la sal, y por tanto reacciona a la cuchara antes de que lo haga la sal.

Desafío 52, página 71: Para un longitud de onda de 546,1 nm (verde estándar), que es un poco superior a 18 longitudes de ondas.

Desafío 53, página 71: El tamaño angular del sol resulta demasiado grande; aquí no influye la difracción.

Desafío 54, página 72: Solamente tiene que utilizar una cámara de alta velocidad.

Desafío 55, página 72: La corriente fluye perpendicularmente al campo magnético y por tanto se desvía. Atare a todo el imán con él.

Desafío 56, página 73: El equivalente más simple de una bobina es poner una masa que pueda girar por la acción de agua en movimiento. Un transformador estaría hecho por dos de esas masas conectadas a través de un eje.

Desafío 57, página 74: La luz puede rodear la Tierra siete veces en un segundo.

Desafío 61, página 75: En la Naturaleza no hay imanes permanentes que quepan en un piso y que sean lo suficientemente fuertes para conseguir una altura de flotación entre 50 y 80 cm. (Tenga en cuenta que en una imagen de la altura flotante es tan alta que las piernas de la mujer no tocarían el suelo.) Y cualquiera que lo hay intentado con electromagnetismo sabe que tal dispositivo debería ser tan grande como una habitación completa.

Si observa con cuidado estas imágenes, también notará que no son fotografías: hay errores con las sombras y con las imágenes reflejadas de la mujer. Y sobre todo, nadie cortarían una cama por la mitad con una mujer acostada. Finalmente, nadie ha visto jamás la cama flotante que se muestra en las imágenes.

Desafío 63, página 77: Las matemáticas requeridas para encontrar la solución son fascinantes. ¡Explórelas!

Desafío 64, página 77: La capa cargada tiene el efecto de que casi solamente los iones de una carga pasan los canales. Como resultado, las cargas quedan separadas a los dos lados del líquido, y se genera una corriente.

Desafío 65, página 77: La atracción a distancias bajas se debe a la 'fuerza imagen', la atracción de una carga a cualquier superficie conductora. Midiendo la distancia d desde el centro de la esfera, la repulsión de la carga puntual comienza para valores $d > 1,618R$.

Desafío 66, página 77: Las corrientes de fuga cambian la imagen. La relación de voltaje a largo plazo viene dada por la razón de la resistencia de fuga $V_1/V_2 = R_1/R_2$, como puede ser fácilmente comprobado experimentalmente.

Desafío 67, página 78: Los cables paralelos en las líneas de alta tensión forman un condensador. La diferencia de potencial que aparece es suficiente para encender una lámpara de neón.

Desafío 68, página 78: El agua interrumpe las pequeñas chispas de descarga, llamadas *aigrettes* (crestas con mechones). Cuando aparece una nueva, hace un pequeño ruido. Luego, con la llegada de agua nueva, se interrumpe otra vez, y se repite el proceso. Los *aigrettes* son una forma de descarga en corona; también producen pérdida de potencia e interferencias de radio.

Desafío 69, página 78: Ver más arriba, en la sección sobre los invariantes.

Desafío 72, página 80: El modelo no funciona en tres dimensiones. Un intento de corregir esto es F. DE FLAVIIS, M. NORO & N. G. ALEXOPOULOS, *Diaz-Fitzgerald time domain (D-FTD) method applied to dielectric and lossy materials*, preimpresión disponible online en www.researchgate.net.

Desafío 73, página 81: Buscar en la web, por ejemplo en las páginas blog.biodiversitylibrary.org/2012/06/narwhal-oceans-one-toothed-wonder.html o narwhalslefttooth.blogspot.de/2011/05/narwhal-tusk-debate.html.

Desafío 78, página 88: Alguna cantidad de movimiento, generalmente una parte muy pequeña, es transportada por el campo electromagnético. Sabiendo que el momento electromagnético viene determinado por el vector potencial, ¿podría comprobar si todo sale correctamente?

Desafío 79, página 89: Las líneas de campo y las superficies equipotenciales son siempre ortogonales entre sí. Por tanto una línea de campo no puede cruzar dos veces una superficie equipotencial.

Desafío 91, página 97: Véase la **Figura 187**. Si el cable no presenta resistencia, la mayor parte de la energía fluye por fuera de los dos conductores y paralelos a ellos. Si el cable presenta resistencia, los vectores de Poynting apuntan ligeramente hacia los conductores. Para el caso de un transformador, lo que puede deducirse de la carcasa del cable según la analogía esbozada en la imagen, consultar la bonita documentación de F. HERRMANN & G. B. SCHMID, *The Poynting vector field and the energy flow within a transformer*, American Journal of Physics 54, pp. 528–531, 1986.

Desafío 90, página 96: El argumento es el mismo que para el incremento de la entropía: es posible la reversión de los procesos, pero la probabilidad es tan baja que no aparecerá en la práctica. La posibilidad extremadamente baja se debe a las fluctuaciones inducidas por el entorno.

Desafío 93, página 97: Simplemente dibuje una corriente a través de una bobina con su campo magnético, luego dibuje una imagen especular de la corriente y vuelva a dibujar el campo magnético.

Desafío 94, página 98: Otras simetrías de la Naturaleza incluyen la helicidad de las moléculas del ADN que forman los cromosomas y muchas otras moléculas de los sistemas vivientes, la preferencia de la mano derecha en la mayoría de los humanos, la asimetría de las especie de peces que permanecen planos en el fondo de los mares.

Desafío 95, página 98: La explicación de la diferencia entre derecha e izquierda no es posible en absoluto valiéndose de los sistemas gravitacionales o electromagnéticos o de sus efectos. La única manera es usar la interacción nuclear débil, como se muestra en el capítulo dedicado al núcleo.

Desafío 96, página 98: El Lagrangiano no varía si una de sus tres coordenadas se cambia por su valor negativo.

Desafío 97, página 99: La imagen voltea: una rotación de 90 grados gira la imagen 180 grados.

Desafío 98, página 99: Imagine a E y B como los vectores unitarios de dos ejes en un espacio complejo. Entonces una rotación de esos ejes será también una simetría de dualidad generalizada.

Desafío 100, página 103: El momento angular se puso en el sistema cuando se formó. Si traemos una carga puntual desde el infinito a lo largo de una línea recta hasta su posición final cerca

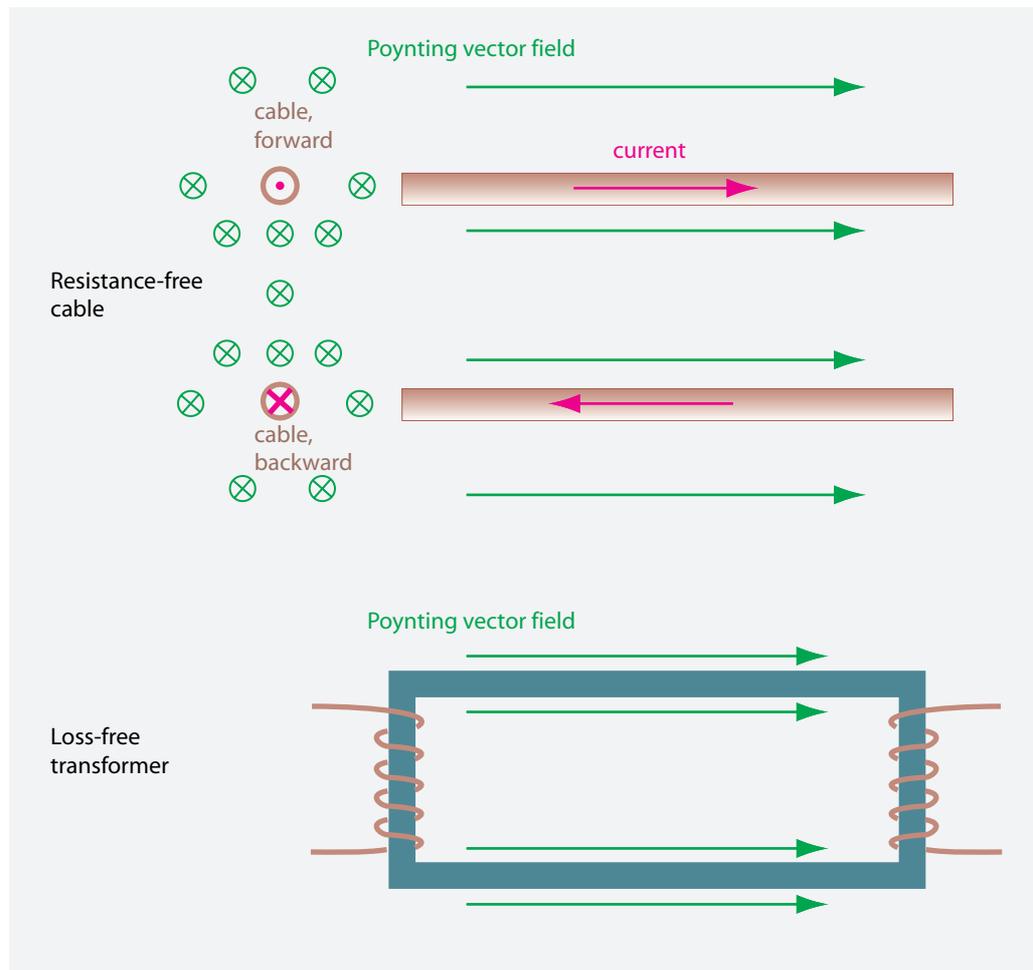


FIGURA 187 El campo del vector de Poynting para un cable sin resistencia eléctrica y la situación en un transformador sin pérdidas.

de un dipolo magnético, la fuerza magnética que actúa sobre la carga no se dirige a lo largo de la línea del movimiento. Por lo tanto crea un par que no se desvanece sobre el origen. Véase J. M. AGUIRREGABIRIA & A. HERNANDEZ, *The Feynman paradox revisited*, *European Journal of Physics 2*, pp. 168–170, 1981.

Desafío 101, página 103: Demuestre que aunque el campo magnético radial de una onda esférica se desvanece por definición, las ecuaciones de Maxwell requerirían ser distintas de cero. Como las ondas electromagnéticas son transversales, también es suficiente para demostrar que es imposible peinar una esfera peluda sin tener un vórtice (doble) o dos vórtices sencillos. A pesar de estas afirmaciones, la teoría cuántica cambia la imagen de alguna manera: la probabilidad de emisión de un fotón desde un átomo excitado a un estado degenerado es simétrica esféricamente por completo.

Desafío 102, página 103: Si son tenidos en cuenta la conservación de los momentos lineal y angular, no existe ambigüedad en el vector de Poynting. Véase, por ejemplo, W. H. FURRY, *Examples of momentum distributions in the electromagnetic field and in matter*, *American Journal of*

Physics 37, pp. 621–636, 1969.

Desafío 103, página 104: La radiación estimada es suprimida fuertemente porque el tamaño del dipolo (el enchufe) es mucho más pequeño que la longitud de onda del campo.

Desafío 105, página 104: No. No se han encontrado motores electromagnéticos ni bobinas en ningún ser vivo. Los músculos, los actuadores más potentes en biología, están hechos de un gran número de motores electrostáticos. La razón fundamental para esta diferencia es la baja eficiencia de los motores microscópicos *electromagnéticos*, los cuales contrastan con la alta eficiencia de los motores microscópicos *electrostáticos*. A tamaños microscópicos, la eficiencia aventaja a los interruptores.

Desafío 107, página 110: En todos los casos de interferencias, la energía es redistribuida en otras direcciones. Esta es la regla general; a veces es bastante complicado descubrir esta otra dirección.

Desafío 108, página 110: El autor ve regularmente alrededor de 7 líneas; asumiendo que la distancia es alrededor de $20\ \mu\text{m}$, esto hace unos $3\ \mu\text{m}$ por línea. La longitud de onda debe ser menor que este valor y la frecuencia, por lo tanto, mayor que 100 THz. Los valores reales para los distintos colores se encuentran en la tabla del espectro electromagnético.

Desafío 110, página 112: La distancia l entre las líneas de un patrón de interferencia viene dada por $l = \lambda d/s$, donde d es la distancia a la pantalla, y s es la separación de la fuente.

Para conocer más sobre interferencias y las condiciones para su aparición, explore el concepto de número de Fresnel. Por ejemplo, el número de Fresnel permite distinguir el ‘campo lejano’ del ‘campo cercano’, dos situaciones que ocurren en muchos fenómenos de las ondas.

Desafío 111, página 112: Él se dio cuenta de que cuando un prisma producía un arcoíris, un termómetro localizado en la región posterior del color rojo mostraba una elevación de la temperatura.

Desafío 114, página 121: La birrefringencia aparece cuando la refracción depende de la polarización. Solamente son posibles dos polarizaciones lineales independientes, por lo que no es posible la trirrefringencia en la Naturaleza. ¡Esto es válido también para los cristales que tienen tres índices de refracción en tres direcciones!

Desafío 115, página 123: La luz reflejada en una superficie de agua está parcialmente polarizada. Los espejismos no lo son.

Desafío 116, página 126: La **Figura 188** muestra líneas del campo eléctrico. Asumamos que la carga se mueve con una velocidad inicial v_0 que es pequeña comparada con c y que se desacelera hasta cero durante un tiempo t_0 . Después de un tiempo T , el pulso de radiación ha viajado una distancia $R = cT$, donde $T \gg t_0$. La figura muestra que en una vuelta (torcedura), dibujada en rojo, la razón del campo transversal E_t y del campo radial E_r viene dada por la inclinación de la torcedura. (¿Por qué?) La geometría conduce a

$$\frac{E_t}{E_r} = \frac{v_0 T \sin \theta}{ct_0} = \frac{aR \sin \theta}{c^2}. \quad (116)$$

Insertando la expresión de Coulomb para el campo radial, obtenemos

$$E_t = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{a \sin \theta}{R}. \quad (117)$$

La magnitud del campo transversal por tanto decrece con $1/R$. Además, el campo depende del ángulo θ ; esto se ve claramente tanto en la **Figura 188** como en la **Figura 69** de la **página 126**. Dicho de otra forma, las antenas transmisoras tiene una dirección preferida de emisión de potencia, a saber, perpendicularmente a la dirección de aceleración.

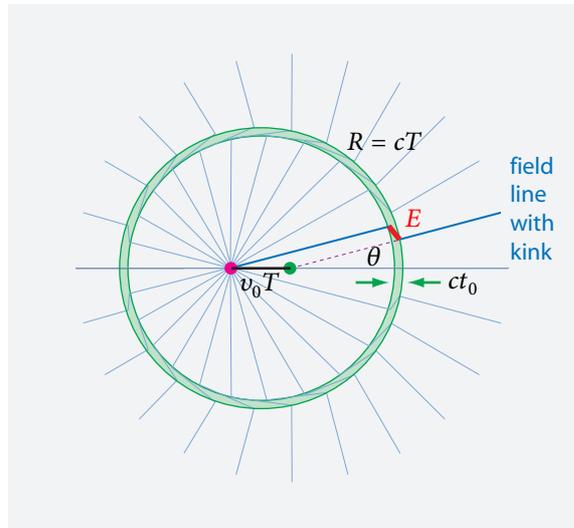


FIGURA 188 Calculando el campo transversal E de una carga acelerada brevemente.

Desafío 117, página 129: Tal observador experimentaría un campo ondulado pero estático, lo cual no puede existir, como demuestran las ecuaciones para el campo electromagnético.

Desafío 118, página 129: Usted no moriría nunca. ¿Podría alcanzar el final del Universo?

Desafío 121, página 130: Una superficie de 1 m^2 perpendicular a la luz, recibe una radiación aproximada de 1 kW . Esto genera la misma presión que un peso de unos $0,3 \text{ mg}$ de materia. Esto genera $3 \mu\text{Pa}$ para superficies negras, y el doble para los espejos.

Desafío 123, página 132: El lado brillante obtiene el doble de transferencia de impulso que el que obtiene el lado negro, por lo que debería ser empujado hacia atrás.

Desafío 126, página 134: La rotación de la luz se puede entender de dos maneras: girando el patrón de intensidad alrededor de la dirección de propagación, o girando el patrón de polarización alrededor de la propagación. Ambas son posibles: un Prisma de paloma gira la intensidad (y la polarización) media onda y la lámina de onda solo gira la polarización, para una longitud de onda fija. Ambos aspectos también pueden ser girados con las disposiciones de espejos explicadas anteriormente.

Página 151

Desafío 128, página 134: Los patrones de interferencias cambian cuando se cambian los colores. Los arcoíris también aparecen porque los diferentes colores se deben a las diferentes interferencias.

Desafío 131, página 136: Los arcoíris ternarios y cuaternarios forman un arco alrededor del Sol. Para verlos, normalmente uno tiene que colocarse detrás de un edificio o de un árbol que tape la vista directa del Sol. En 2011, solamente había unas pocas fotografías de arcoíris ternarios y sólo una de arcoíris cuaternario en todo el mundo.

Desafío 132, página 136: El arcoíris completo es como un círculo. Usted puede producir uno con una manguera de jardín, si mantiene la manguera en a mano mientras está sentado en una silla de espaldas al Sol de la tarde. (Vale, hemos olvidado algo; ¿Se imagina qué?) El círculo se debe a la forma esférica de las gotas. Si las gotas tuvieran una forma diferente, y si estuvieran alineadas, el arcoíris tendría una forma distinta a la de un círculo.

Desafío 135, página 143: Tome una película de la explosión de una supernova distante, o aún mejor, de un estallido óptico o de rayos-gamma, y compruebe si la explosión ocurre al mismo

tiempo para cada color separadamente. Esto se ha realizado extensamente y no se ha detectado ninguna diferencia dentro de los errores experimentales.

Desafío 137, página 146: La primera parte de primero (forerunner) es un dispositivo con la longitud de onda efectiva más corta posible; por tanto, viene dado por el límite para frecuencia infinita.

Desafío 138, página 146: La luz es pulsada; por lo que es la velocidad de la energía.

Desafío 139, página 146: Dentro de la materia, la energía se transforma en átomos, luego se convierte en luz, más tarde en los próximos átomos, etc. Esto lleva tiempo y retrasa la propagación.

Desafío 141, página 148: Para fotones individuales, la permeabilidad, la permitividad y la impedancia de onda no están bien definidas. La invariancia conformal, la dimensionalidad y la topología no son válidas para las minúsculas escalas de Planck. En la proximidad de los agujeros negros, si son tenidos en cuenta los efectos cuánticos, hay rozamiento en los cuerpos en movimiento. La teoría de campo cuántico enseña que el vacío contiene y está formado por pares de partícula-antipartícula. La cosmología enseña que el vacío contiene energía no-cero, y lo mismo es lo que sugiere la teoría de campo cuántico. La relatividad general enseña que el vacío curvo se puede mover y así lo hace la gravedad cuántica. En resumen, se puede decir que el vacío tiene todas las propiedades que en alguna ocasión se le atribuyeron al éter, pero de una forma que difiere fundamentalmente de lo que fue discutido por sus valedores.

Desafío 142, página 148: Casi no pasa la luz; la intensidad de la poca luz que es transmitida depende exponencialmente de la razón entre la longitud de onda y el diámetro del agujero. También se dice que tras el agujero hay una onda evanescente.

Desafío 143, página 149: La densidad de energía es $1 \text{ kW/m}^2/c = 3,3 \text{ } \mu\text{J/m}^3$. Suponiendo ondas sinusoidales, el (raíz significa cuadrada) campo eléctrico es $\sqrt{3,3 \text{ } \mu\text{J/m}^3/\epsilon_0} = 610 \text{ V/m}$ – un valor bastante alto. El (raíz significa cuadrada) campo magnético es $610 \text{ V/m}/c = 2,1 \text{ } \mu\text{T}$ – un valor bastante bajo.

Desafío 144, página 149: Cualquier ejemplo de luz tiene solamente un color.

Desafío 146, página 149: La descripción de la luz como una sustancia ayudada a la comprensión de los rayos de luz. Por otro lado, la luz es una sustancia bastante especial: no tiene permanencia cotidiana – puede ser absorbida – y no tiene masa.

Desafío 147, página 150: Se desperdicia demasiada luz, los escudos de viento son demasiado caros, y no hay razón para hacer algo así si nadie más lo hace.

Desafío 149, página 153: El mínimo son tres espejos. En la **Figura 189** se muestra una composición con dos espejos. Existe también una composición con tres espejos con entradas paralelas y rayos de salida; ¿puede encontrarla?. Las ideas detrás de estas composiciones son también explicadas en los documentos de Enrique Galvez y sus colaboradores.

Ref. 98

Desafío 150, página 153: A la izquierda del interferómetro, existe luz en la dirección B, en el de la derecha, en la dirección A. El problema también se puede generalizar a formas arbitrarias de interferómetros. La forma de solucionarlo en este caso es el uso de la *fase de Berry*. Si estuviera interesado, explore este interesante concepto con la ayuda de su biblioteca favorita.

Desafío 151, página 160: La temperatura media de la Tierra es por tanto 287 K. La energía el Sol es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura. La energía se esparce (aproximadamente) sobre la mitad de la superficie terrestre. La misma energía, de la superficie solar, proviene de una superficie mucho más pequeña, dada por el mismo ángulo que la Tierra delimita allí. Por tanto, tenemos $E \sim 2\pi R_{\text{Tierra}}^2 T_{\text{Tierra}}^4 = T_{\text{Sol}}^4 R_{\text{Tierra}}^2 \alpha^2$, donde α es la mitad del ángulo delimitado por el Sol. Como resultado, la temperatura del Sol se estima que es de $T_{\text{Sol}} = (T_{\text{Tierra}}^4/\alpha^2)^{0,25} = 4 \text{ kK}$.

Desafío 155, página 161: Puesto que el máximo del espectro de longitudes de ondas y de frecuencias no es lo mismo, por lo tanto no puede y *no* sigue que $c = f\lambda$.

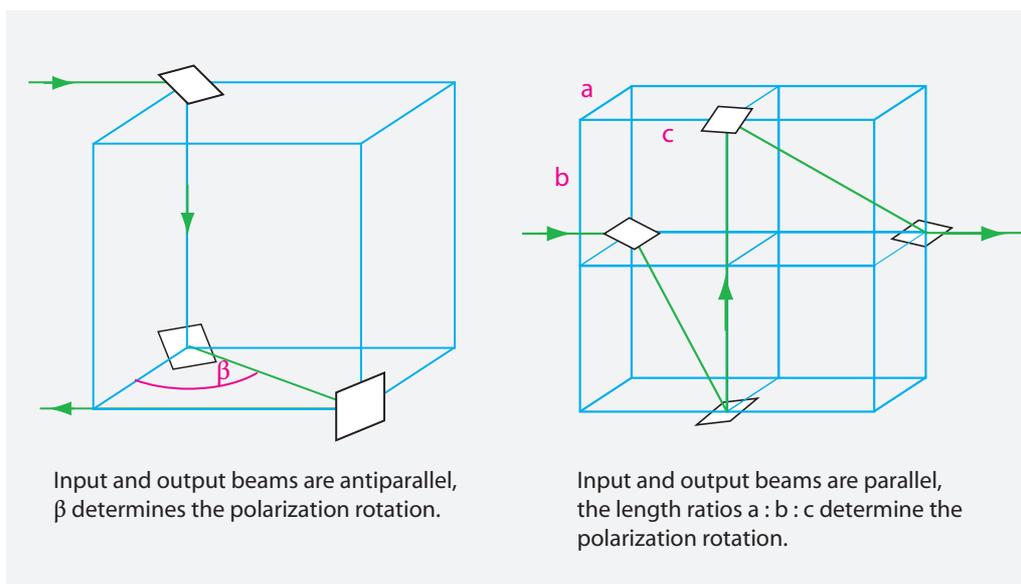


FIGURA 189 Composición de dos espejos que giran la polarización de un rayo de luz en un ángulo predeterminado.

Desafío 158, página 162: A altas temperaturas, todos los cuerpos se aproximan a los cuerpos se aproximan a los cuerpos negros. El color es más importante que otros efectos del color. El horno y los objetos tienen la misma temperatura. Por tanto no se pueden distinguir uno del otros. No obstante para conseguirlo, ilumine la escena con una luz potente y tome una fotografía de baja sensibilidad. Por esto se necesita una luz brillante para tomar fotos de lo que sucede en el interior de los incendios.

Desafío 159, página 163: Consiguiendo una mayor temperatura permitirá romper el segundo principio de la termodinámica. Para explorar esta cuestión con más profundidad, lea en los libros de texto sobre las llamadas *leyes de Kirchhoff*.

Desafío 160, página 163: La temperatura efectiva de la luz láser puede también ser descrita como *superior al infinito*; esto permite también calentar objetivos a temperaturas extremadamente altas.

Desafío 163, página 169: Para espejos o lentes pequeñas, como los utilizadas en los microscopios, la producción en masa es más fácil para las lentes. Por el contrario, los espejos grandes son mucho más fáciles y baratos de construir, montar y usar que las grandes lentes, porque los espejos utilizan menos cristal, son más ligeros, y permiten modificar su forma mediante activadores.

Desafío 164, página 169: El jarabe muestra un efecto aún más bello en la siguiente composición. Tome un largo tubo transparente cerrado en uno de sus extremos y llénelo de jarabe. Ilumínelo con un láser rojo de helio-neón desde la base. Luego introduzca un polarizador lineal dentro del tubo: la luz vista en el tubo tendrá forma de espiral. Rotando el polarizador podrá hacer que la espiral avance o retroceda. Este efecto, llamado *actividad óptica* del azúcar, es debido a la propiedad del azúcar para girar la polarización de la luz y una propiedad especial de las plantas: ellas hacen solamente una de las dos formas especulares del azúcar.

Desafío 166, página 172: La relación, llamada 'ley' de refracción es

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} . \quad (118)$$

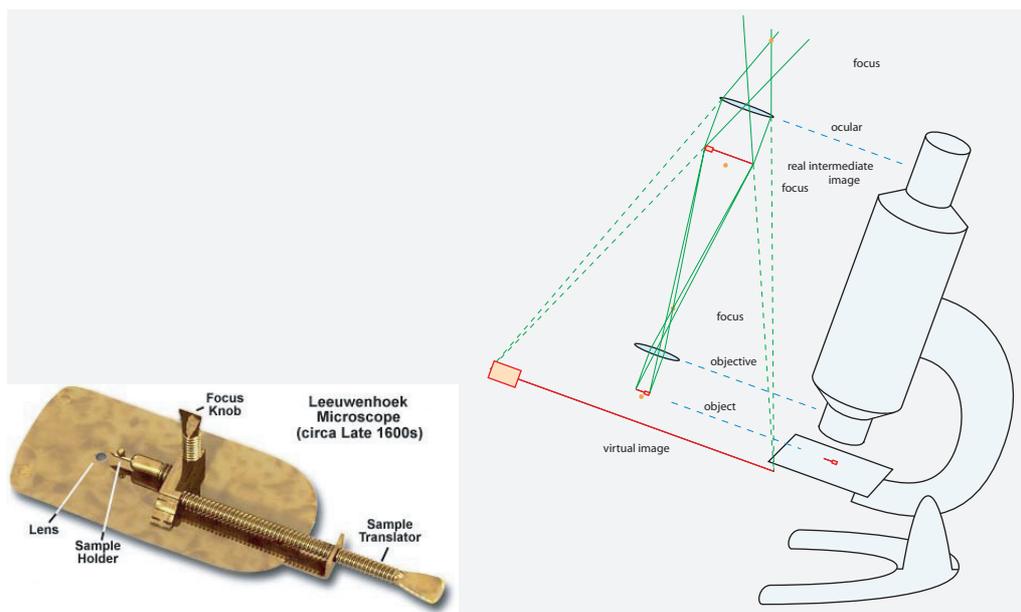


FIGURA 190 El microscopio comercial más antiguo, de 1680, estaba hecho de una sola lente (longitud c. 8 cm, que tenía que mantenerse cerca del ojo), pero los microscopios modernos se componen de dos lentes convergentes (foto WikiCommons).

La particular razón de la velocidad entre el vacío (o el aire, que es casi la misma) y un material proporciona el *índice de refracción* n de ese material:

$$n = \frac{c_1}{c_0} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_0} \quad (119)$$

Incorrectamente muchos llaman a la 'ley' de refracción 'ley de Snell', o 'ley de Descartes' aunque otros muchos la encontraron antes que ellos (y aunque el apellido es 'Snel').

Desafío 167, página 176: La fórmula de la lente fina es

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f}. \quad (120)$$

Es válida tanto para lentes convergentes como divergentes, siempre que sus grosores sean despreciables. La fortaleza de una lente puede, por tanto, ser medida por la cantidad $1/f$. A la unidad 1 m^{-1} se le llama *dioptría*; se utiliza especialmente para las gafas de lectura. Las lentes convergentes tienen valores positivos, las lentes divergentes valores negativos.

A pesar de todo, la fórmula para lentes finas es solamente una aproximación, y nunca se utiliza para el diseño de las lentes. Es una reliquia de los viejos libros de texto. Los diseñadores modernos de lentes siempre usan la óptica Gaussiana para sus cálculos. Véase, por ejemplo, FRANCIS A. JENKINS & HARVEY E. WHITE, *Fundamentals of Optics*, McGraw-Hill, 1957.

Desafío 169, página 178: Un microscopio de luz está compuesto básicamente de dos lentes convergentes. Una lente – o un sistema de lentes – proporciona una imagen real aumentada y la segunda produce una imagen virtual aumentada de la imagen real previa. La **Figura 190** también muestra que los microscopios siempre voltean la imagen presentándola al revés. Debido a la longitud de onda de la luz, los microscopios de luz tienen una resolución máxima aproximada de

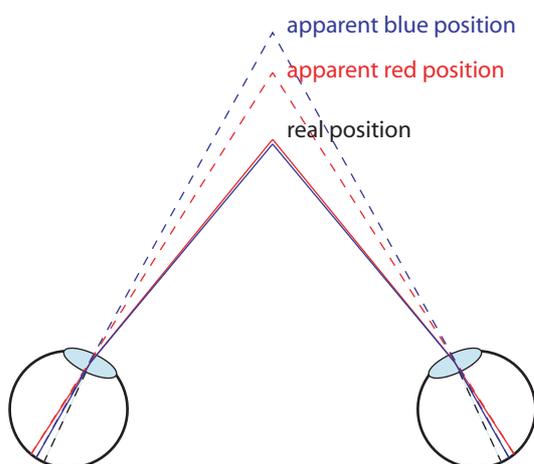


FIGURA 191 Relación entre el efecto de profundidad del color y la dispersión de la lente del ojo humano.

1 μm . Tenga en cuenta que la *magnificación* de los microscopios es ilimitada; lo que si es limitada es su *resolución*. Es exactamente el mismo comportamiento mostrado por las imágenes digitales. La *resolución* es sencillamente el tamaño del menor pixel posible que tenga sentido.

Parece ser que el microscopio fue inventado en 1538 por Girolamo Fracastro. El primer microscopio viable fue construido en los Países Bajos alrededor de 1590. El progreso de los microscopios fue tan lento a causa de que la producción de cristales y lentes resultaba extremadamente difícil en aquella época, especialmente la de las lentes pequeñas. Por tanto, David Brewster propuso en 1819 construir un microscopio usando las lentes de los ojos de los peces; cuando esta idea fue llevada a cabo con las lentes de una anguila, resultó un microscopio con un sorprendente rendimiento. Para saber más sobre microscopios, consulte el bonito texto de ELIZABETH M. SLATER & HENRY S. SLATER, *Light and Electron Microscopy*, Cambridge University Press, 1993, o explore websites dedicadas, tales como www.mikroskopie-muenchen.de o micro.magnet.fsu.edu/primer/techniques.

Desafío 171, página 179: Como se muestra en la **Figura 191**, la dispersión de la lente producen un aparente posicionamiento distinto de la imagen. Para más detalles sobre dispersión en los ojos humanos y las formas de utilizarla para crear efectos tridimensionales, consulte el artículo de C. UCKE & R. WOLF, *Durch Farbe in die dritte Dimension*, Physik in unserer Zeit 30, pp. 50–53, 1999.

Desafío 172, página 183: El rayo de 1 mm volvería 1000 veces más ancho, como un rayo de 1 m. Un rayo de luz verde perfecto de 1 m de ancho tendría en la Luna 209 m de anchura; ¿puede calcular este resultado de la (importante) fórmula que involucra la distancia, longitud de onda, diámetro inicial y diámetro final? Trate de adivinar esta bonita fórmula primero, y luego dedúzcala. En realidad, los valores son varias veces mayor que el mínimo teórico calculado. Consulte las websites www.csr.utexas.edu/mlrs y ilrs.gsfc.nasa.gov.

Desafío 173, página 183: A menudo se dice que la evolución ajustó el número de conos del ojo a la máxima resolución teórica posible con la pupila abierta y sus aberraciones; los expertos en este tema no obstante mantienen que de alguna manera hay un mayor número de conos, como reservorio.

Desafío 174, página 184: La respuesta debería estar entre una o dos docenas de kilómetros, suponiendo unas condiciones atmosféricas ideales.

Desafío 177, página 193: De hecho, no hay forma de que un holograma de una persona pueda caminar alrededor y asustar a una persona real. Un holograma es siempre transparente; siempre se puede ver el fondo a través de un holograma. Un holograma por tanto siempre da una impresión percida a la que generalmente muestran las imágenes en movimiento para simular un fantasma. Si el fondo es negro, ilumínalo con una linterna para descubrirlo.

Desafío 178, página 194: La pequeña longitud de onda de la luz probablemente impide lograr este sueño. Para una verdadera pantalla holográfica, los píxeles deben ser más pequeños que la longitud de onda de la luz y deben poder reproducir la información de fase. Entonces, la siguiente pregunta es: ¿cuánto del sueño se puede realizar? Si encuentra una solución, se hará rico y famoso.

Desafío 181, página 201: Hay un *punto ciego* en el ojo; es la región en la que no se perciben las imágenes. El cerebro supone que la imagen en ese lugar es la misma que en sus fronteras. Si un punto cae exactamente en su interior, desaparece.

Desafío 182, página 202: El mecanismo que compensa los receptores azules que faltan en la fovea no funcionan tan rápidamente; verá una mancha debida a la fovea.

Desafío 184, página 203: El ojo y el cerebro no cambian la dirección de arriba y abajo a una cierta edad. Además, ¿de dónde viene la idea de que los bebés ven al revés?

Desafío 185, página 211: El ojo y el sistema visual resta patrones que son constantes en el tiempo.

Desafío 186, página 214: Realmente no; un Ojo-de-Gato usa dos reflejos a los lados de un cubo. Un ojo de un gato vivo tiene un mayor número de reflejos. Aunque los efectos finales son iguales: la luz se vuelve a la dirección de donde procede.

Desafío 189, página 221: Utilice la difracción; mire el patrón sobre una pared a unos cuantos metros detrás del cabello.

Desafío 191, página 222: A $10 \text{ pc} = 32,6 \text{ al}$, el Sol tendría una magnitud aparente de 4.7. A $20 \text{ pc} = 65,2 \text{ al}$, aparecería 4 veces más débil, por tanto alrededor de 1.5 mayor de magnitud, o sea, con una magnitud aparente de 6.2 aproximadamente. Esto es casi la magnitud límite del ojo. La magnitud real de limitación del ojo no es ni constante ni universal, por lo que la distancia de 50 años luz no es un límite ajustado. La magnitud limitante, – como la visión nocturna, o *sensibilidad escotópica* – depende de la presión parcial del oxígeno en la atmósfera que el observador esté respirando, de la claridad del aire, de la distancia zenital, y, sobre todo, del grado de adaptación a la oscuridad. Un ojo expuesto al brillo total de un cielo nocturno en un lugar muy apartado de la contaminación lumínica todavía no está adaptado completamente a la oscuridad. Usted puede ver fácilmente estrellas de séptima magnitud bloqueando la mayor parte del cielo y mirando sólo una pequeña parte de él. Algunos observadores, en condiciones ideales, han reportado confiablemente haber visto estrellas casi de octava magnitud.

Desafío 192, página 223: La superficie verde vista a los lejos con un ángulo bajo es mayor que cuando se ve verticalmente, donde se puede ver también el suelo; el suelo se cubre con la verde hierba en una observación a baja altura.

Desafío 193, página 223: De hecho es cierto. Los telescopios modernos tienen una gran superficie que recogen la luz (hasta 50 m^2) y poseen detectores extremadamente sensibles. El número

de fotones emitidos por una cerilla encendida en la Luna en la dirección de un telescopio a gran distancia (¿cuánta?) es suficiente para disparar el detector.

Desafío 194, página 224: Por supuesto que no, ya que la velocidad de grupo no está limitada por la relatividad especial. La velocidad de energía si es limitada, pero no cambia en estos experimentos.

Desafío 195, página 224: Compró trajes para su madre y para él mismo cuyos colores resultaban inapropiados.

Desafío 197, página 225: El explorador prusiano Alexander von Humboldt comprobó exhaustivamente este mito en el siglo XIX. Visitó muchos pozos mineros y preguntó a incontables mineros en México, Perú y Siberia sobre sus experiencias. También preguntó a numerosos desholinadores. Ninguno de ellos ni ningún otro ha visto alguna vez estrellas durante el día.

Desafío 198, página 225: Mire al sol con los ojos cerrados, y recuerde la sombra roja que ve. Entre en una habitación cerrada, encienda una bombilla, y mírela con los ojos cerrados. Sitúese a una distancia de la bombilla en la que vea la misma sombra roja. Luego calcule la potencia del Sol a partir de la potencia de la bombilla y la dependencia del cuadrado inverso.

Desafío 199, página 226: Si tira de una cinta adhesiva enrollada, además de luz, también se emiten Rayos-X. Este es un ejemplo de triboluminescencia. Vea el experimento en vivo en la película de www.youtube.com/watch?v=J3i8oRi0WNc.

Desafío 207, página 237: El cuerpo humano es ligeramente conductor y cambia la forma del campo y, por lo tanto, efectivamente lo cortocircuita. Generalmente, el campo no puede utilizarse para generar energía, ya que las corrientes involucradas son demasiado pequeñas. (Los rayos son una historia diferente, por supuesto. Son debidos – muy indirectamente – al campo de la Tierra, pero son demasiado irregulares para ser usados de manera consistente. El pararrayos de Franklin es un buen ejemplo.) El campo con buen tiempo, se puede utilizar como fuente de energía porque su resistencia interna es de $3 \text{ G}\Omega/\text{m}$.

Desafío 208, página 237: El campo en la superficie de una esfera de radio r viene dada por $E = Q/4\pi\epsilon_0 r^2$. Insertando $E = 200 \text{ V/m}$, obtenemos $Q = 0,9 \text{ MC}$.

Desafío 209, página 240: Si encuentra un método que sea diferente a la conocida estimación, publíquelo.

Desafío 215, página 247: Todas las ilusiones del acto volador parecen como si los magos estuvieran colgados de cables, como ha sido observado por muchas personas, incluido yo mismo. (Lo flashes fotográficos están prohibidos, se pone un fondo brillante para dificultar la visión de los cables, no se tira de ningún anillo sobre el mago, el acuario en el que flota se mantiene abierto para permitir a los hilos de pescar que puedan pasar a su través, siempre se elige 'al azar' a la misma persona de entre el público, ect.) Información de testigos que realmente vieron los hilos de pescar utilizados por David Copperfield explican las razones para esos montajes. El grupo de noticias 'usenet' alt.magic.secrets, y en particular Tilman Hausherr, fue fundamental para clarificar este tema en todos sus detalles, incluyendo el nombre de la compañía que realizó el mecanismo de la suspensión.

Desafío 217, página 247: Cualquiera nuevo merece una publicación.

Desafío 218, página 252: La energía sónica es también posible, como lo es el trabajo mecánico.

Desafío 219, página 255: La deformación espacio-tiempo no está relacionada con la electricidad; al menos a las energías cotidianas. Para las energías próximas a la de Planck, esto podría ser diferente, pero todavía no se ha predicho nada al respecto

Desafío 221, página 257: La absorción ideal es la negrura (aunque podría ser el enrojecimiento o la blancura a temperaturas más altas).

Desafío 222, página 257: De hecho, el Sol emite alrededor de $4 \cdot 10^{26}$ W de su masa de $2 \cdot 10^{30}$ kg, unos 0,2 mW/kg. El cuerpo humano adulto (en reposo) emite unos 100 W (usted puede comprobarlo por la noche en la cama), por tanto unos 1,2 W/kg. Esto es aproximadamente 6000 veces más que el Sol. La razón: solamente en centro mismo del Sol emite energía. Si esa cantidad de energía se divide entre la masa total, incluyendo toda la masa que no emite energía en absoluto, se obtienen un valor promedio muy pequeño. Por cierto, cualquier vela o, mejor, cualquier puntero láser emite más luz por masa, por razones similares.

Desafío 223, página 257: Las cargas de una caja metálica se reorganizan de tal manera que el campo interior desaparece. Esto hace que los coches y los aviones sean seguros contra los rayos. Por supuesto, si el campo exterior varía tan rápidamente que la reorganización no puede conseguirse, los campos *pueden* entrar en la jaula de Faraday. (Por cierto, también los campos con grandes longitudes de onda penetran en los metales; los controles remotos especializados para abrir puertas de seguridad generalmente utilizan frecuencias de 25 kHz para conseguirlo.) No obstante, antes de salir de un coche alcanzado por un rayo, puesto que el coche está sobre ruedas de goma con una baja conducción, espere un tiempo para permitir que la carga fluya hacia tierra.

Para la gravedad y cajas sólidas, la reorganización de la masa no es posible, de tal manera que no hay escudos contra la gravedad.

Desafío 224, página 258: El Mu-metal es una aleación de hierro-níquel, que con frecuencia contiene trazas de otros metales, que tiene una alta permeabilidad μ_r en un rango de 50 000 a 140 000; resulta sorprendentemente dúctil. El alto valor de permeabilidad concentra de manera efectiva los campos magnéticos en el interior de la aleación y por tanto permite aplicar campos magnéticos a través del mu-metal y alrededor de un volumen cerrado, los que resulta ser un escudo.

Desafío 227, página 260: Este es un tema delicado. No resulta claro si los campos de 50 Hz son peligrosos para los humanos. Existe una alta probabilidad de que no lo sean; pero el asunto no está zanjado.

Desafío 228, página 260: El número de fotones multiplicado por el cuanto de acción \hbar .

Desafío 229, página 261: Primero, Faraday podría haber encontrado un enlace superficial usando el experimento del mencionado tubo. Pero él estaba buscando una posible conexión profunda. No obstante, la gravitación y la electricidad no están completamente conectadas, ya que una es debida a la masa y la otra se debe a la carga. Mucho después de Faraday, se descubrió que la gravedad también incluye el gravitomagnetismo, es decir, efectos mensurables debidos al movimiento de masas – pero todavía sin relación con el electromagnetismo. Una conexión distante entre gravitación y electricidad aparecerá solamente en la parte final de esta aventura

Desafío 230, página 261: La carga se para porque un satélite negativamente cargado repele a los electrones y por tanto frena cualquier mecanismo de recolección de electrones. Los electrones son capturados con más frecuencia que los iones porque es más fácil para ellos que para los iones tener una colisión inelástica con el satélite, debido a una mayor velocidad a una temperatura dada.

Desafío 231, página 261: Cualquier mecanismo de pérdida explicará la pérdida de energía, como la resistencia eléctrica o la radiación electromagnética. En Internet se discute con frecuencia este pequeño problema.

Desafío 232, página 261: Utilice el cable como se muestra en la **Figura 192**. Si la oscilación se ajusta adecuadamente a la frecuencia, y si el contacto se separa adecuadamente de la punta, y si agarra fuertemente los dos contactos, recibirá una descarga superior a la que puede soportar.

Desafío 234, página 262: Esto podría ser posible en un futuro cercano; pero tanto el experimento, que probablemente mida los detalles del campo magnético del cerebro, como la comprobación exacta de su seriedad no resultará sencillo.

Página 33

Vol. II, página 167

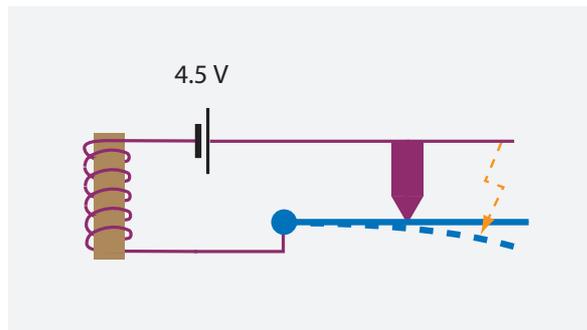


FIGURA 192 Cómo conseguir descargas eléctricas con una batería de bolsillo de 4.5 V.

Desafío 235, página 263: No, el sistema no es seguro. En cualquier sistema, la seguridad viene dada por su parte más débil. Y en cualquier sistema de contraseña, los puntos más débiles son el transporte de datos en bruto – en este caso las señales de la tapa eléctrica del ordenador – y el sistema de comprobación de contraseñas. Ambos son vulnerables como cualquier otro sistema de contraseñas. (Si quiere aprender sobre seguridad, lea los escritos de Bruce Schneier, la mayoría de los cuales están disponibles en Internet.)

Vol. II, página 96
Página 28
Página 40

Desafío 236, página 265: Los valores máximos para el campo eléctrico y el magnético son aquellos de los que se extrae la máxima fuerza posible $c^4/4G$ en una carga elemental e . La Tabla 3 da los valores máximos de campo eléctrico y la Tabla 8 los valores máximos para el campo magnético.

Desafío 238, página 267: Ver desafío 28.

Desafío 240, página 269: Se pueden medir muchas cargas e y mostrar que siempre son múltiplos de la misma unidad. Este método fue utilizado por Millikan en su famoso experimento. Sólo se pueden medir las fluctuaciones corrientes, y demostrar que las que siguen al ruido de un disparo, esto es, las del flujo de cargas discretas del mismo valor.

Desafío 242, página 269: las cargas puntuales implicarían una densidad de energía infinita. Esto es imposible. Si este argumento se aplicara solamente a la electrodinámica clásica o a la Naturaleza resultaría un acalorado debate. La opinión mayoritaria es que la teoría cuántica permite las cargas puntuales, porque las partículas cuánticas no están nunca en reposo, lo que evita de manera efectiva una energía de densidad infinita.

Desafío 244, página 269: El potencial de la Tierra sería $U = -q/(4\pi\epsilon_0 R) = 60$ MV, donde el número de electrones del agua debe ser tenido en cuenta.

Desafío 245, página 270: Siempre se produce un error de medición cuando se miden campos de valores, aún cuando se mida un campo electromagnético 'evanescente'. Además, la teoría cuántica permite valores arbitrarios de densidad de carga pequeños mediante la densidad de probabilidad debida a las funciones de onda.

Vol. VI, página ??

Desafío 249, página 273: El tema es: ¿es el 'Universo' un concepto? En la parte final de esta aventura demostraremos que no lo es.

Desafío 251, página 282: Al pensar, se conservan la energía física, el momento lineal y el momento angular, y la entropía no se destruye. Cualquier experimento que demostrara algo diferente apuntaría a procesos desconocidos. No obstante, no hay pruebas de tales procesos.

Desafío 252, página 283: El mejor método no puede ser mucho más corto del que se necesita para describir 1 entre 6000 millones, o 33 bits. Los sistemas de codificación postal de Holanda y de Reino Unido (incluyendo las letras NL o UK) no están lejos de estos valores y por tanto puede decir que son muy eficientes.

Vol. V, página ?? **Desafío 253, página 284:** Parra sistemas complejos, cuando lo desconocido es numeroso, el avance viene dado simplemente por el incremento de respuestas. Para el Universo como un todo, el número de temas abiertos es bastante bajo, como se demostrará más adelante; en este asunto no ha habido mucho avance en los pasados años. Pero el avance es claramente mensurable en este caso también.

Vol. VI, página ?? **Desafío 254, página 284:** ¿Se puede utilizar el término ‘completo’ al describir la Naturaleza? Sí, se puede. De hecho, la humanidad no está lejos de una descripción completa del movimiento. Para una encuesta clara, véase el último volumen de nuestra aventura.

Desafío 256, página 286: Hay muchas bañeras en serie: bañeras termales en cada célula sensible de los ojos, bañeras termales en el interior de los nervios hacia el cerebro y bañeras termales en el interior de las células del cerebro.

Desafío 258, página 287: Sí.

Desafío 260, página 295: Los chips basados en trits deberían ser rediseñados desde el principio. Esto podría resultar una pérdida de recursos y del trabajo previo.

Vol. V, página ?? **Desafío 264, página 302:** Reducir la lista de los semánticos primitivos no es difícil; usted podría encontrar con facilidad formas de llevarlo a cabo bien a través de las matemáticas o mediante los conceptos físicos. Pero ¿está *completa* realmente la lista de los primitivos semánticos? Para los primitivos matemáticos ese es el caso. Pero los físicos podrían decir que las propiedades de los objetos, del espacio-tiempo y de las interacciones forman posiblemente su pequeña lista. No obstante, ¡esta lista de propiedades es bastante más larga que la encontrada por los lingüistas! Una razón es que los físicos han encontrado ‘primitivos físicos’ que no aparecen en la vida cotidiana. Otra razón es que los físicos no han alcanzado una unificación. en este sentido, el objetivo de los físicos es limitado, actualmente, por la lista de preguntas inexplicables sobre la Naturaleza. Esa lista se proporcionará más adelante; forma el punto de partida de la última parte de esta aventura.

Por cierto, se puede argumentar que la lista de primitivos en realidad ya está completa, puesto que permite hablar de todo. Esto implica que la persona media posee ya, sin saberlo, una *teoría del todo*. Por consiguiente, los físicos sólo necesitan ponerse al día como la media de las personas ...

Desafío 265, página 306: Ni hay un contenido definido, con límites establecidos claramente, ni un dominio de aplicación.

Vol. VI, página ?? **Desafío 266, página 306:** ¡Imposible! Eso no puede ser un concepto, puesto que no tiene contenido. La solución al tema debe ser y será diferente. La última parte de este paseo propondrá una.

Desafío 267, página 309: A ninguna. Esta paradoja demuestra que tal ‘conjunto de todos los conjuntos’ no existe.

Desafío 268, página 309: La más famosa es la clase de todos los conjuntos que no se contienen a sí mismos. Esto no es un conjunto, pero sí una clase

Desafío 269, página 309: Dividir tartas es difícil. Un método sencillo que resuelve muchos – aunque no todos – problemas entre N personas $P_1 \dots P_N$ es el siguiente:

- P_1 corta el pastel en N trozos.
- P_2 a P_N eligen un trozo.
- P_1 se queda con la última parte.
- $P_2 \dots P_N$ juntan sus partes para formar un total.
- Luego $P_2 \dots P_N$ repiten el algoritmo con una persona menos.

El problema resulta mucho más complejo si no está permitida la reagrupación de partes. Un método *justo* (en pasos finitos) para 3 persona, usando nueve pasos, fue publicado en 1944 por

Steinhaus, y un método *satisfactorio para todas las partes* en la década de 1960 por John Conway. Un método satisfactorio para todos para cuatro personas no se encontró hasta 1995; tiene 20 pasos.

Desafío 270, página 310: $(x, y) := \{x, \{x, y\}\}$.

Desafío 271, página 311: Pista: demostrar que cualquier lista contable de reales pierde al menos un número. Esto fue demostrado por primera vez por Cantor. Su forma fue escribir la lista en expansión decimal y luego encontrar un número que con seguridad no estuviera en la lista. Segunda pista: su truco mundialmente famoso se conoce con el nombre de *argumento diagonal*.

Desafío 272, página 311: pista: todos los reales son límites de series de racionales.

Desafío 274, página 313: Sí, pero siempre que la división por cero no esté permitida y los números estén restringidos a los racionales y los reales.

Desafío 275, página 313: Hay infinitos de estos llamados *números parásitos*. El más pequeño ya es grande: 1016949152542372881355932203389830508474576271186440677966. Si se cambia en el puzzle el número para 8 es 1012658227848, para 2 es 105263157894736842, para 7 es 1014492753623188405797, para 3 es 1034482758620689655172413793, y para 9 es 10112359550561797752808988764044943820224719. La solución más pequeña para el número 6 es de lejos el mayor de esta lista.

Desafío 276, página 314: Una manera fue dada anteriormente: $0 := \emptyset$, $1 := \{\emptyset\}$, $2 := \{\{\emptyset\}\}$ etc.

Desafío 277, página 317: La sustracción es fácil. La adición no es conmutativa solamente para los casos en los que interviene el infinito: $\omega + 2 \neq 2 + \omega$.

Desafío 278, página 318: Son ejemplos $1 - \varepsilon$ or $1 - 4\varepsilon^2 - 3\varepsilon^3$.

Desafío 279, página 318: La respuesta es 57; la referencia citada da los detalles.

Desafío 280, página 320: $2^{2^{22}}$ y $4^{4^{4^4}}$.

Desafío 283, página 320: El niño tiene menos 0.75 años de edad, o menos nueve meses de edad; el padre por tanto está muy cerca de la madre.

Desafío 284, página 320: Esta no es una pregunta fácil. Los primeros números no-triviales son 7, 23, 47, 59, 167 y 179. Consultar ROBERT MATTHEWS, *Maximally periodic reciprocals*, Bulletin of the Institute of Mathematics and its Applications 28, pp. 147–148, 1992. Matthews demuestra que un número n para el cual $1/n$ genere el máximo de $n - 1$ dígitos decimales en expansión decimal es una clase especial de número primo que se puede calcular por los llamados *primos de Sophie Germain* S ; se debe tener $n = 2S + 1$, donde ambos S y $2S + 1$ deben ser primos y donde $S \bmod 20$ debe ser 3, 9, u 11.

Por tanto los primeros números n son 7, 23, 47, 59, 167 y 179, correspondientes a valores para S de 3, 11, 23, 29, 83 y 89. En 1992, el mayor S conocido que cumplía el criterio fue

$$S = (39051 \cdot 2^{6002}) - 1, \quad (121)$$

un número primo Sophie Germain de 1812-dígitos de longitud que es 3 mod 20. Fue descubierto por Wilfred Keller. Este primo Sophie Germain lleva a un primo n con una expansión decimal que tiene aproximadamente 10^{1812} dígitos de largo antes de que comience a repetirse a sí mismo. Lea su libro favorito sobre teoría de los números para encontrar más. Curiosamente, la solución a este desafío también está conectada con la del desafío 275. ¿Puede encontrar más?

Desafío 285, página 320: Klein no pertenece a ningún grupo. Como resultado, alguno de sus estudiantes más desagradables concluyeron que él no era en absoluto un matemático.

Desafío 286, página 320: Un barbero no puede pertenecer a ningún grupo; la definición de barbero es por tanto contradictoria y debe ser rechazada.

Desafío 287, página 320: Véase la página web members.shaw.ca/hdhcubes/cube_basics.htm para una mayor información sobre cubos mágicos.

Desafío 290, página 321: Tal expresión es derivada con el resultado intermedio $(1 - 2^2)^{-1}$. El manejo de series divergentes parece absurdo, pero los matemáticos saben cómo dar a la expresión un contenido definido. (Véase GODFREY H. HARDY, *Divergent Series*, Oxford University Press, 1949.) Los psiquiatras utilizan a menudo expresiones similares sin pensar para nada en la teoría de campos cuánticos.

Desafío 288, página 321: Trate de encontrar otro hexágono mágico y luego la unicidad del conocido.

Desafío 291, página 322: El resultado está relacionado con la función zeta de Riemann. Como introducción, véase en.wikipedia.org/wiki/Prime_number.

Desafío 293, página 334: ‘Todos los cretenses mienten’ es *falso*, puesto que lo opuesto, es decir, ‘algunos cretenses dicen la verdad’ es verdad en el caso expuesto. La trampa es que el opuesto a la frase original es generalmente, pero *falsamente*, asumida como ‘todos los cretenses dicen la verdad’.

Desafío 294, página 334: La declaración no puede ser falsa, debido a la primera mitad y a la construcción ‘o’. Puesto que es verdad, la segunda mitad debe ser cierta y por tanto, usted es un ángel.

Desafío 295, página 335: Los términos ‘circular’ y ‘autorreferencial’ describen dos conceptos diferentes.

Desafío 297, página 336: Lo extraterrestres no pueden ser el origen de los cultivos circulares, porque, como Papá Noel o los fantasmas, no existen en la Tierra.

Vol. V, página ?? Desafío 299, página 336: Esto puede ser debatido; en cualquier caso se sabe definitivamente que ambas declaraciones son realmente mentiras, como se muestra en detalle posteriormente..

Desafío 300, página 336: Si esta declaración falsa fuera verdad, los nadadores o los buceadores podrían morir ya que su piel tampoco podría respirar.

Desafío 301, página 336: Es igualmente correcto decir que la tierra fue creada hace cien años, que nuestro entorno y nuestros recuerdos fueron creados en nuestro cerebro para hacernos creer que la tierra es más antigua. Es difícil refutar tal sinsentido, pero es posible. Véase también el siguiente reto.

Desafío 302, página 337: Es sorprendentemente difícil refutar tales tonterías, si están pensadas a fondo. La razón para una fecha determinada (o cualquier otra fecha) no es obvia. Ni tampoco es obvio lo que se entiende por el término ‘creación’.

Desafío 304, página 337: No. Como muchos experimentos demuestran, la homeopatía es un conjunto de *numerosas* mentiras. Por ejemplo, Internet proporciona vídeos de gente tragando – sin daño alguno – cientos de pastillas homeopáticas al tiempo que están calificadas como ‘extremadamente peligrosas cuando se sobredosifican’. Por cierto, muchas de las mentiras de la homeopatía han sido generadas por una única persona. Como siempre, las mentiras más exitosas son aquellas que permiten a un selecto grupo de personas ganar mucho dinero.

Desafío 306, página 337: La historia de la bombilla encendida parece ser correcta. La bombilla es muy débil, para que el cable no se evapore.

Desafío 307, página 338: El origen podría estar en el número de personas presentes en la última cena en el Nuevo Testamento; o el olvidado decimotercer sigo del Zodiaco. No hay verdad en esta superstición. De hecho, *toda superstición es una mentira*. No obstante, cuidado con la gente que se muestra recelosas de aquellos a los que no les importan las supersticiones, o se muestran violentos como reacción.

Desafío 308, página 338: Sin excepción hasta ahora, todos aquellos que simulan haber sido estigmatizados presentan heridas en las *palmas* de sus manos. No obstante, en la crucifixión, los clavos fueron puestos perforando las *muñecas*, puesto que puestos en las palmas de las manos no hubieran soportado el peso de un cuerpo humano: las palmas se habrían desgarrado.

Vol. II, página 260

Desafío 309, página 338: El término ‘multiverso’ es a la vez una superstición y una mentira. Sobre todo, no tiene sentido. Es similar al intento de producir un plural para la palabra que designa al ‘todo’.

Desafío 311, página 339: ¿En qué marco de referencia? ¿Cómo? Cuidado con cualquiera que haga esa declaración: es un mentiroso.

Desafío 316, página 346: Solamente la inducción nos permite hacer uso de las similitudes y por lo tanto, definir conceptos.

Desafío 317, página 348: Esto depende de la definición (del concepto) utilizada para deidad. El Panteísmo no tiene ese problema, por ejemplo.

Vol. VI, página ??

Desafío 318, página 349: Sí, como veremos.

Desafío 319, página 350: Sí, ya que la observación implica interacción.

Desafío 320, página 350: La falta de contradicciones internas significa que un concepto es válido como herramienta de pensamiento; mientras utilizamos nuestros pensamientos para describir la Naturaleza, la existencia matemática es una versión especializada de la existencia física, como el pensamiento en sí mismos es un proceso natural. Es realidad, los conceptos matemáticos son también útiles para la descripción de los trabajos de los ordenadores y semejantes.

Otra forma de llegar a esto es enfatizar que todos los conceptos matemáticos están contruidos a base de conjuntos y relaciones, o de algunas generalizaciones adecuadas de ellos. Estos pilares básicos han sido sacados de nuestro entorno físico. A veces la idea se expresa de manera diferente; muchos matemáticos han reconocido que determinados conceptos matemáticos, tal como los números naturales, han sido tomados directamente de la experiencia

Desafío 321, página 350: Son ejemplos Aquiles, Odiseo, Mickey Mouse, los dioses del Politeísmo y los espíritus.

Desafío 323, página 352: Torricelli consiguió el vacío con un tibo de cristal en forma de U, utilizando mercurio, el mismo metal líquido usado en los termómetros. ¿Se imagina cómo? Una pregunta más difícil: ¿dónde consiguió el mercurio?

Desafío 324, página 354: Afirar que algo es infinito no son creencias si la declaración es refutable. Un ejemplo es la frase ‘Hay infinitamente muchos mosquitos.’ Tal declaración está simplemente equivocada. Otras declaraciones no son refutables, como ‘El Universo continúa sin límite tras el horizonte.’ Tal declaración es una creencia. Ambos casos de declaraciones sobre infinitos no son hechos.

Desafío 325, página 356: Tampoco son conjuntos y por tanto no son colecciones de puntos.

Desafío 326, página 356: Todavía no hay posibilidad de interactuar con toda la materia y la energía, ya que es esto incluye a uno mismo.

Desafío 327, página 362: No. Sólo hay una generalización que incluye a los dos.T

Desafío 328, página 363: Una explicación del Universo no es posible, ya que el término explicación requiere la posibilidad de hablar sobre fuera del que está en consideración. El Universo no forma parte de un conjunto mayor.

Desafío 329, página 363: Ambos pueden ser vistos como dos caras del mismo argumento: No hay otra elección; sólo hay una posibilidad. De manea equivalente, el resto de la Naturaleza muestra que las observaciones tienen que ser como son, porque todo depende de todo.

Desafío 331, página 383: La masa es una medida de la cantidad de energía. El ‘cuadrado de la masa’ no tiene sentido.

Desafío 334, página 385: La fórmula con $n - 1$ se ajusta mejor. ¿Por qué?

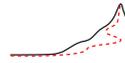
Desafío 337, página 386: No! Son demasiado precisos para tener sentido. Son solamente datos como ilustración para el comportamiento de la distribución Gaussiana. Las distribuciones de medidas reales no son gaussianas a la precisión implícita de estos números.

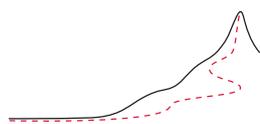
Desafío 338, página 386: Alrededor de 0,3 m/s. No son 0,33 m/s, ni 0,333 m/s, ¡ni tampoco cualquier cantidad con más números tres!

Desafío 340, página 392: La desaceleración varía *cuadráticamente* con el tiempo, ¡porque cada nueva ralentización se suma a la anterior!

Desafío 341, página 393: No, las propiedades de las partes del universo solamente forman parte de la lista. El Universo mismo no tiene propiedades, como se muestra al final de este volumen.

Vol. VI, página ??





BIBLIOGRAFÍA

“ [...] moi, qui trouve toujours tous les livres trop longs, et surtout les miens [...] ”
Voltaire, *Lettre à M. Cideville*.*

- 1 JULIAN SCHWINGER, L. L. DERAAD, K. A. MILTON & W. Y. TSAI, *Classical Electrodynamics*, Perseus, 1998. Un excelente texto sobre el tema por uno de sus más grandes maestros.
Véase también el bonito libro de problemas de ANDRÉ BUTOLI & JEAN-MARC LÉVY-LEBLOND, *La physique en questions – électricité et magnétisme*, Vuibert, 1999. Citado en las páginas 17 y 89.
- 2 Un bello libro sobre la historia del magnetismo y el interés que genera es JAMES D. LIVINGSTON, *Driving Force – the Natural Magic of Magnets*, Harvard University Press, 1996. Citado en la página 18.
- 3 R. EDWARDS, *Filling station fires spark cars’ recall*, *New Scientist*, pp. 4–5, 4 March 1995. Citado en la página 19.
- 4 S. DESMET, F. ORBAN & F. GRANDJEAN, *On the Kelvin electrostatic generator*, *European Journal of Physics* 10, pp. 118–122, 1989. En Internet también puede encontrar planos para su construcción. Citado en la página 21.
- 5 F. STEINLE, *Exploratives Experimentieren – Georges Dufay und die Entdeckung der zwei Elektrizitäten*, *Physik Journal* 3, pp. 47–52, 2004. Citado en la página 22.
- 6 Para un grabado de la varilla original de Franklin, véase E. P. KRIDER, *Benjamin Franklin and lightning rods*, *Physics Today* 59, pp. 42–48, 2006. Citado en la página 23.
- 7 W. RUECKNER, *An improved demonstration of charge conservation*, *American Journal of Physics* 75, pp. 861–863, 2007. Citado en la página 26.
- 8 Para más detalles sobre las distintas unidades electromagnéticas, consultar el texto estándar de J. D. JACKSON, *Classical Electrodynamics*, 3rd edition, Wiley, 1998. Citado en las páginas 29 y 420.
- 9 Consultar los viejos pero bellos documentos de RICHARD C. TOLMAN & T. DALE STEWART, *The electromotive force produced by the acceleration of metals*, *Physical Review* 8, pp. 97–116, 1916, RICHARD C. TOLMAN & T. DALE STEWART, *The mass of the electric carrier in copper, silver and aluminium*, *Physical Review* 9, pp. 164–167, 1917, y la posterior pero con un experimento mucho más preciso de C. F. KETTERING & G. G. SCOTT, *Inertia of the carrier of electricity in copper and aluminium*, *Physical Review* 66, pp. 257–267, 1944. (Obviamente el idioma americano no incluía la ‘i’ para aluminium durante este período.)

* ‘[...] yo, a quien todos los libros le parecen largos, el primero de todos el mío [...]’.

- El primero de estos documentos es también una revisión de los primeros intentos, y explica el experimento en detalle. El último documento muestra lo que debía ser tenido en consideración para conseguir una precisión suficiente. Citado en la página 32.
- 10 Este efecto fue medido por primera vez por S. J. BARNETT, *A new electron-inertia effect and the determination of m/e for the free electron in copper*, Philosophical Magazine 12, p. 349, 1931. Citado en la página 33.
 - 11 Ver por ejemplo C. SCHILLER, A. A. KOOMANS, T.L. VAN ROOY, C. SCHÖNENBERGER & H. B. ELSWIJK, *Decapitation of tungsten field emitter tips during sputter sharpening*, Surface Science Letters 339, pp. L925–L930, 1996. Citado en la página 33.
 - 12 L. I. SCHIFF & M. V. BARNHILL, *Gravitational-induced electric field near a metal*, Physical Review 151, pp. 1067–1071, 1966. F. C. WITTEBORN & W. M. FAIRBANK, *Experimental comparison of the gravitational force on freely falling electrons and metallic electrons*, Physical Review Letters 19, pp. 1049–1052, 1967. Citado en la página 34.
 - 13 J. LEPAK & M. CRESCIMANNO, *Speed of light measurement using ping*, preimpresión electrónica disponible en arxiv.org/abs/physics/0201053. Citado en la página 34.
 - 14 Esta historia fue impresa como portada por el *Wall Street Journal* el 15 de Diciembre de 2006 bajo el título *Firms seek edge through speed as computer trading expands*. Citado en la página 35.
 - 15 J. D. PETTIGREW, *Electroreception in monotremes*, Journal of Experimental Biology 202, pp. 1447–1454, 1999. Citado en la página 37.
 - 16 Para un excelente artículo de revisión sobre el fascinante campo de peces eléctricos, consulte C. D. HOPKINS, *Electrical Perception and Communication*, Encyclopedia of Neuroscience 3, pp. 813–831, 2009. Hopkin's research laboratory can be found at www.nbb.cornell.edu. Citado en las páginas 37 y 398.
 - 17 Sobre la búsqueda de monopolos magnéticos, consulte la website del Particle Data Group, la referencia mundial, en pdg.web.cern.ch. Véase también H. JEON & M. LONGO, *Search for magnetic monopoles trapped in matter*, Physical Review Letters 75, pp. 1443–1447, 1995. Consultar también A. S. GOLDHABER & W. P. TROWER, *Resource letter MM-1: magnetic monopoles*, American Journal of Physics 58, pp. 429–439, 1990. Citado en la página 39.
 - 18 PIERRE DE MARICOURT, *Tractatus de magnete*, 1269. Citado en la página 41.
 - 19 R. WILTSCHKO & W. WILTSCHKO, *Magnetic Orientation in Animals*, Springer, 1995. Citado en la página 43.
 - 20 M. LAUWERS & al., *An iron-rich organelle in the cuticular plate of avian hair cells*, Current biology 23, pp. 924–929, 2013. Este documento preselecciona al candidato más nuevo para la ubicación de los pájaros por los sensores magnético básicos.
 - 21 I. A. SOLOV'YOV, K. SCHULTEN & W. GREINER, *Nur dem Schnabel nach?*, Physik Journal 9, pp. 23–28, 2010. Citado en la página 44.
Citado en la página 44.
 - 22 La razón entre el momento angular L y el momento magnético M es

$$\frac{L}{M} = \frac{2m}{e} \cdot \frac{1}{g}, \quad (122)$$

donde e es la carga del electrón y m su masa. Ambos L y M son mensurables. La primera medida fue publicada con un valor para g igual a 1, muy probablemente porque los autores esperaban este valor. Las mediciones de otros investigadores dieron valores mas cercanos a 2 que a 1, una observación que no fue comprendida hasta el descubrimiento del espín. Las

- publicaciones originales son A. EINSTEIN & W. J. DE HAAS, *Proefondervinderlijk bewijs voor het bestaan der moleculaire stroommen van Ampère*, Koninklijke Akademie der Wetenschappen te Amsterdam, Verslagen 23, p. 1449, 1915, and A. EINSTEIN & W. J. DE HAAS, *Experimental proof of the existence of Ampère's molecular currents*, Koninklijke Akademie der Wetenschappen te Amsterdam, Proceedings 18, p. 696, 1916. Citado en la página 48.
- 23 S. J. BARNETT, *Magnetization by rotation*, Physical Review 6, pp. 171–172, 1915, y S. J. BARNETT, *Magnetization by rotation*, Physical Review 6, pp. 239–270, 1915. Citado en la página 49.
- 24 Consulte J. D. JACKSON, *Classical Electrodynamics*, 3rd edition, Wiley, 1998, o también R. F. HARRINGTON, *Time Harmonic Electromagnetic Fields*, McGraw-Hill, 1961. Citado en las páginas 54 y 89.
- 25 El mejor libro disponible sobre el cerebro el de ERIC R. KANDEL, JAMES H. SCHWARTZ & THOMAS M. JESSELL, *Principles of Neural Science*, fifth edition, McGraw-Hill, 2000. El sitio web suhep.phy.syr.edu/courses/modules/MM/brain/brain.html proporciona una introducción a la fisiología del cerebro. Citado en la página 54.
- 26 N. SALINGAROS, *Invariants of the electromagnetic field and electromagnetic waves*, American Journal of Physics 53, pp. 361–363, 1985. Citado en la página 55.
- 27 A. L. HODGKIN & A. F. HUXLEY, *A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve*, Journal of Physiology 117, pp. 500–544, 1952. Este famoso artículo sobre biología teórica le valió a los autores para merecer el Premio Nobel de Medicina de 1963. Citado en la página 56.
- 28 Vea el excelente artículo de revisión de T. HEIMBURG, *Die Physik von Nerven*, Physik Journal 8, pp. 33–39, 2009. Consultar también S. S. L. ANDERSEN, A. D. JACKSON & T. HEIMBURG, *Towards a thermodynamic theory of nerve pulse propagation*, Progress in Neurobiology 88, pp. 104–113, 2009, el sitio web membranes.nbi.dk, y el texto THOMAS HEIMBURG, *Thermal Biophysics of Membranes*, Wiley-VCH, 2007. Citado en la página 57.
- 29 A. C. DE LA TORRE, *$v \leq c$ in 1820?*, European Journal of Physics 20, pp. L23–L24, March 1999. Citado en la página 58.
- 30 Véase U. FANTZ & A. LOTTER, *Blitze zum Anfassen*, Physik in unserer Zeit 33, pp. 16–19, 2002. Más información disponible en www.physik.uni-augsburg.de/epp. Citado en la página 66.
- 31 R. H. TYLER, S. MAUS & H. LÜHR, *Magnetic signal due to ocean tidal flow identified in satellite observations*, Science 299, pp. 239–241, 2003. Las películas de la fecha se pueden encontrar en el sitio web www.tu-braunschweig.de/institute/geophysik/spp/publikationen.html. Citado en la página 69.
- 32 H. MONTGOMERY, *Unipolar induction: a neglected topic in the teaching of electromagnetism*, European Journal of Physics 20, pp. 271–280, 1999. Citado en la página 72.
- 33 Sobre el estado geodinámico, consultar los artículos G. A. GLATZMAIER & P. H. ROBERTS, *Rotation and magnetism of Earth's inner core*, Science 274, pp. 1887–1891, 1996, y P. H. ROBERTS & G. A. GLATZMAIER, *Geodynamo theory and simulations*, Reviews of Modern Physics 72, pp. 1081–1123, 2000. Un artículo más antiguo es R. JEANLOZ & B. ROMANOWICZ, *Geophysical dynamics at the center of the Earth*, Physics Today pp. 22–27, August 1997. Citado en las páginas 72 y 240.
- 34 A. YAZDANI, D. M. EIGLER & N. D. LANG, *Off-resonance conduction through atomic wires*, Science 272, pp. 1921–1924, 28 June 1996. Para el aluminio, oro, plomo, niobio, así como la influencia de las propiedades químicas, consultar ELKE SCHEER, *The signature*

- of chemical valence in the electric conduction through a single-atom contact*, *Nature* **394**, pp. 154–157, 9 July 1998. Citado en la página 76.
- 35 J. YANG, F. LU, L. W. KOSTIUK & D. Y. KWOK, *Electrokinetic microchannel battery by means of electrokinetic and microfluidic phenomena*, *Journal of Micromechanics and Microengineering* **13**, pp. 963–970, 2003. Citado en la página 77.
- 36 Véase L. KOWALSKI, *A myth about capacitors in series*, *The Physics Teacher* **26**, pp. 286–287, 1988, and A. P. FRENCH, *Are the textbook writers wrong about capacitors?*, *The Physics Teacher* **31**, pp. 156–159, 1993. Citado en la página 77.
- 37 Una discusión de una relación de indeterminación eléctrica diferente, se puede encontrar en Y.-Q. LI & B. CHEN, *Quantum theory for mesoscopic electronic circuits and its applications*, preprint at arxiv.org/abs/cond-mat/9907171. Citado en la página 79.
- 38 Una evaluación sobria pero optimista, libre del optimismo barato de la prensa sensacionalista, es R. W. KEYES, *Miniaturization of electronics and its limits*, *IBM Journal of Research and Development* **32**, pp. 84–88, 1988. En su última figura predice que el límite inferior kT para la energía disipada por una operación lógica podría alcanzarse en 2015. Citado en la página 80.
- 39 J. A. HERAS, *Can Maxwell's equations be obtained from the continuity equation?*, *American Journal of Physics* **75**, pp. 652–657, 2007, preimpresión en arxiv.org/abs/0812.4785. El asunto está tratado aún con más claridad en J. A. HERAS, *How to obtain the covariant form of Maxwell's equations from the continuity equation*, *European Journal of Physics* **30**, pp. 845–854, 2009, y en J. A. HERAS, *An axiomatic approach to Maxwell's equations*, *European Journal of Physics* **37**, p. 055204, 2016, preimpresión en arxiv.org/abs/1608.00659. Véase también L. BURNS, *Maxwell's equations are universal for locally conserved quantities*, *Advances in Applied Clifford Algebras* **29**, p. 62, 2019, preimpresión en arxiv.org/abs/1906.02675. Citado en las páginas 81, 86, 100 y 264.
- 40 Un resumen similar es la base de FRIEDRICH W. HEHL & YURI N. OBUKOV, *Foundations of Classical Electrodynamics – Charge, Flux and Metric*, Birkhäuser 2003. Citado en la página 81.
- 41 Sobre la existencia de líneas de campo magnético cerradas en el caso general, ver J. SLEPIAN, *Lines of force in electric and magnetic fields*, *American Journal of Physics* **19**, pp. 87–90, 1951, M. LIEBERHERR, *The magnetic field lines of a helical coil are not simple loops*, *American Journal of Physics* **78**, pp. 1117–1119, 2010, F. HERRMANN & R. VON BALTZ, *Altlasten der Physik (128): Geschlossene magnetische Feldlinien*, *Praxis der Naturwissenschaften: Physik in der Schule* **60**, pp. 48–49, 2011. Citado en la página 85.
- 42 OLEG D. JEFIMENKO, *A relativistic paradox seemingly violating conservation of momentum law in electromagnetic systems*, *European Journal of Physics* **20**, pp. 39–44, 1999. Citado en la página 88.
- 43 H. VAN DAM & E. P. WIGNER, *Classical relativistic mechanics of interacting point particles*, *Physical Review* **136B**, pp. 1576–1582, 1965. Citado en la página 88.
- 44 MARK D. SEMON & JOHN R. TAYLOR, *Thoughts on the magnetic vector potential*, *American Journal of Physics* **64**, pp. 1361–1369, 1996. Citado en las páginas 90 y 92.
- 45 JEAN SIVARDIÈRE, *Simple derivation of magnetic vector potentials*, *European Journal of Physics* **14**, pp. 251–254, 1993. Citado en la página 90.
- 46 T. T. WU & C. N. YANG, 1975, *Concept of nonintegrable phase factors and global formulation of gauge fields*, *Physical Review D* **12**, pp. 3845–3857, Citado en la página 93.
- 47 Consultar la referencia Ref. 8 o A. M. STEWART, *Angular momentum of the electromagnetic field: the plane wave paradox explained*, *European Journal of Physics* **26**, pp. 635–641,

2005. Citado en la página 97.
- 48 Un texto de electrodinámica completamente escrito con formas (matemáticas) es KURT MEETZ & WALTER L. ENGL, *Elektromagnetische Felder – mathematische und physikalische Grundlagen*, Springer, 1980. Citado en la página 94.
- 49 Véase por ejemplo la discusión de M. C. CORBALLIS & I. L. BEALE, *On telling left from right*, *Scientific American* 224, pp. 96–104, March 1971. Citado en la página 98.
- 50 En 1977, Claus Montonen y David Olive demostraron que la teoría cuántica permiten transformaciones duales aún con la inclusión de la materia, si existieran tipos específicos de monopolos magnéticos, los llamados *diones*. El documento fundamental es D. OLIVE & C. MONTONEN, *Magnetic monopoles as gauge particles*, *Physics Letters* 72B, pp. 117–120, 1977. Se han realizado muchos otros documentos basados en éste; no obstante, sin un soporte experimental que lo apoye. Citado en la página 100.
- 51 WOLFGANG RINDLER, *Essential Relativity – Special, General, and Cosmological*, revised 2nd edition, Springer Verlag, 1977, page 247. Existe también una bonita documentación de M. LE BELLAC & J. -M. LÉVY-LEBLOND, *Galilean electrodynamics*, *Nuovo Cimento B* 14, p. 217, 1973, que explica las posibilidades además de los problemas que aparecieron cuando se trataba de definir la teoría de una manera no relativista. Citado en la página 100.
- 52 L. -C. TU, J. LUO & G. T. GILLES, *The mass of the photon*, *Reports on Progress of Physics* 68, pp. 77–130, 2005. Citado en las páginas 100 y 101.
- 53 El sistema de mecanografiar mediante el pensamiento solamente ha sido descrito en muchos documentos, tales como los de B. BLANKERTZ, F. LOSCH, M. KRAULEDAT, G. DORNHEGE, G. CURIO & K. -R. MÜLLER, *The Berlin Brain-Computer Interface: accurate performance from first session in BCI-naïve subjects*, *IEEE Transactions on biomedical engineering* 55, pp. 2452–2462, 2008. Consultar la página www.bbci.de para más información. Citado en la página 102.
- 54 Véase, por ejemplo, el documento de I. MARTINOVIC, D. DAVIES, M. FRANK, D. PERITO, T. ROS & D. SONG, *On the feasibility of side-channel attacks with brain-computer interfaces*, presented at USENIX Security, 2012, encontrado en www.usenix.org/conference/usenixsecurity12. Citado en la página 103.
- 55 D. SINGLETON, *Electromagnetic angular momentum and quantum mechanics*, *American Journal of Physics* 66, pp. 697–701, 1998, Citado en la página 103.
- 56 La fortaleza del polo magnético se discute en los libros de texto de J.C. Maxwell, A. Sommerfeld, J.D. Jackson y otros. Citado en la página 104.
- 57 C. HOYOS, N. SIRCAR & J. SONNENSCHNEIN, *New knotted solutions of Maxwell’s equations*, *J. Phys. A: Math. Theor.* 48, p. 255204, 2015, preimpresión en arxiv.org/abs/1502.01382. El documento también proporciona una revisión corta de la investigación reciente Citado en la página 104.
- 58 Para un cuento cautivador sobre la historia de las ideas sobre la luz, véase DAVID PARK, *The Fire Within the Eye: a Historical Essay on the Nature and Meaning of Light*, Princeton University Press, 1997. Como ejemplo de la compleja historia de la óptica, véase el famoso texto de Alhazen o Ibn al-Haytham, *Book of Optics* 1021. No obstante, ningún sitio web en Árabe permite la lectura del texto, y los artículos de Wikimedia en Árabe sobre este asuntos son mucho más cortos que los que están en Francés o en Inglés. En realidad, como la mayoría de los antiguos pensadores de Oriente Medio, Alhazen (b. c. 965 Basra, d. 1039 Cairo) es mejor conocido en Europa que en su propia región. Una traducción en Latín del Libro de Óptica se puede leer en la pagina web imgbase-scd-ulp.u-strasbg.fr/displayimage.php?album=44&pos=0 de la Université de Strasbourg. Hacia el año 1000, Alhazen realizó mu-

- chos experimentos sobre la refracción de la luz, como hizo Ptolomeo casi novecientos años antes que él. Los resultados medidos de Ptolomeo son todavía conocidos. Pero ninguno de los investigadores encontró la ley de Snell – expresión de Descartes para la refracción. Alhazen incluso conocía la función seno; a pesar de este grado de conocimiento, no encontró esta fórmula. Para más detalles, ver E. KIRCHNER, *Wie ontdekte de wet van Snellius?*, *Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde* 81, pp. 198–201, 2015. Citado en la página 105.
- 59 Véase el texto de RAYMOND L. LEE & ALISTAIR B. FRASER, *The Rainbow Bridge: Rainbows in Art, Myth, and Science*, Pennsylvania State University Press, 2000. Se puede ver un capítulo en la dirección www.usna.edu/Users/oceano/raylee/RainbowBridge/Chapter_8.html. Citado en la página 111.
- 60 Para una explicación detallada de arcoíris supernumerarios, véase www.atoptics.co.uk/fz696.htm. Para una bonita colección de imágenes, consulte www.flickr.com/groups/supernumeraryrainbows/. Un artículo excelente sobre arcoíris y sobre los efectos de las formas de las gotas, con bonitas fotografías, gráficos y dibujos, es I. SADEGHI, A. MUNOZ, P. LAVEN, W. JAROSZ, F. SERON, D. GUTIERREZ & H. W. JENSEN, *Physically-based simulation of rainbows*, *ACM Transactions on Graphics* 31, pp. 1–6, 2011. Estas muestran, entre otras, cómo las gotas aplanadas producen arcoíris aplanados. Citado en las páginas 111 y 142.
- 61 El hermoso experimento de hendidura fue publicado por E. A. MONTIE, E. C. COSMAN, G. W. 'T HOOFT, M.B. VAN DER MARK & C. W. J. BEENAKKER, *Observation of the optical analogue of quantized conductance of a point contact*, *Nature* 350, pp. 594–595, el 18 de Abril de 1991, y en una versión más extensa E. A. MONTIE, E. C. COSMAN, G. W. 'T HOOFT, M.B. VAN DER MARK & C. W. J. BEENAKKER, *Observation of the optical analogue of the quantised conductance of a point contact*, *Physica B* 175, pp. 149–152, 1991. El resultado fue también publicado en numerosas revistas científicas. Citado en la página 111.
- 62 Una reciente medida de la frecuencia de la luz es presentada en TH. UDEM, A. HUBER, B. GROSS, J. REICHERT, M. PREVEDELLI, M. WEITZ & T. W. HAUSCH, *Phase-coherent measurement of the hydrogen 1S–2S transition frequency with an optical frequency interval divider chain*, *Physical Review Letters* 79, pp. 2646–2649, 1997. Otra es C. SCHWOB, L. JOZEFOWSKI, B. DE BEAUVOIR, L. HILICO, F. NEZ, L. JULIEN, F. BIRABEN, O. ACEF & A. CLAIRON, *Optical frequency measurement of the 2S–12D transitions in hydrogen and deuterium: Rydberg constant and Lamb shift determinations*, *Physical Review Letters* 82, pp. 4960–4963, 21 June 1999. Citado en la página 112.
- 63 Los descubridores de ese método, el peine de frecuencia, Theodor Hänsch y John Hall fueron galardonados, junto a Roy Glauber, con el Premio Nobel de Física de 2005. Véase JOHN L. HALL & THEODOR W. HÄNSCH, *History of optical comb development*, en JUN YE & STEVEN T. CUNDIFF, editors, *Femtosecond Optical Frequency Comb: Principle, Operation, and Applications*, Springer, 2004. Citado en la página 112.
- 64 M. BURRESI, D. VAN OSTEN, T. KAMPFRATH, H. SCHOENMAKER, R. HEIDEMAN, A. LEINSE & L. KUIPERS, *Probing the magnetic field of light at optical frequencies*, *Science Express* October 2009. Citado en la página 115.
- 65 K. L. KELLY, *Color designations for colored lights*, *Journal of the Optical Society of America* 33, pp. 627–632, 1943. Citado en la página 118.
- 66 Sobre los patrones de polarización y su uso por los insectos, véase K. PFEIFFER & U. HOMBERG, *Coding of azimuthal directions via time-compensated combination of celestial compass cues*, *Current Biology* 17, pp. 960–965, 2007. Citado en las páginas 122 y 449.

- 67 La mejor introducción a los espejismos están en las páginas web de Andrew Young en aty.sdsu.edu/mirages/mirintro.html. Consultar también las páginas de aty.sdsu.edu/bibliog/alphindex.html y aty.sdsu.edu/bibliog/toc.html. él explica los muchos tipos que existen: espejismos inferiores, espejismos superiores, fata morganas, falsos espejismos, espejismos tipo Wegener, Nachspiegelung, y también proporciona muchas referencias, distinguiendo claramente cuales son las que proporciona explicaciones correctas y cuales no. También simula espejismos, como se explica en la página aty.sdsu.edu/mirages/mirsims/mirsimintro.html. Todavía no hay un artículo moderno que revise el tema. Ver también A. T. YOUNG, G. W. KATTAWAR & P. PARVIAINEN, *Sunset science I – the mock mirage*, Applied Optics 36, pp. 2689–2700, 1997. Para otro aspecto de los espejismos, ver G. HORVÁTH, J. GÁL & R. WEHNER, *Why are water-seeking insects not attracted by mirages? The polarization pattern of mirages*, Naturwissenschaften 83, pp. 300–303, 1997. Citado en la página 123.
- 68 W. K. HAIDINGER, *Über das direkte Erkennen des polarisierten Lichts*, Poggendorf's Annalen 63, pp. 29–39, 1844, W. K. HAIDINGER, *Beobachtung des Lichtpolarisationsbüschels in geradlinig polarisiertem Lichte*, Poggendorf's Annalen 68, pp. 73–87, 1846, W. K. HAIDINGER, *Dauer des Eindrucks der Polarisationsbüschel auf der Netzhaut*, Poggendorf's Annalen 93, pp. 318–320, 1854. Citado en la página 123.
- 69 Ver el capítulo sobre pinceles de polarización en MARCEL G. J. MINNAERT, *Light and Colour in the Outdoors*, Springer, 1993, o la serie de libros originales, MARCEL G. J. MINNAERT, *De natuurkunde van 't vrije veld*, Thieme & Cie, 1937. Para más detalles, véase G. P. MISSION, *Form and behaviour of Haidinger's brushes*, Ophthalmology and Physiological Optics 137, pp. 392–396, 1993, or J. GREBE-ELLIS, *Zum Haidinger-Büschel*, 2002, en didaktik.physik.hu-berlin.de/forschung/optik/download/veroeffentlichungn/haidinger.pdf. Sobre la refringencia del ojo, consultar L. BOUR, *Een eigenaardige speling der natuur*, Nederlands tijdschrift voor natuurkunde 67, pp. 362–364, Diciembre de 2001. En particular, una fotografía del ojo usando iluminación polarizada lineal y tomada por un analizador mostrando una cruz negra dentro de la pupila. Citado en la página 124.
- 70 T. W. CRONIN & J. MARSHALL, *Patterns and properties of polarized light in air and water*, Philosophical Transactions of the Royal Society B 366, pp. 619–626, 2011, de libre disposición online en rstb.royalsocietypublishing.org. Citado en la página 124.
- 71 EDWARD M. PURCELL, *Electricity and Magnetism – Berkeley Physics Course Volume 2*, McGraw–Hill, 1984. Citado en la página 126.
- 72 Esto era una serie de libros en veinte volúmenes de AARON BERNSTEIN, *Naturwissenschaftliche Volksbücher*, Duncker, 1873-1874. El joven Einstein los leyó, entre 1892 y 1894, casi 'sin pestañear', como escribió más tarde. Todavía se puede leer en muchas bibliotecas. Citado en la página 129.
- 73 Sobre las formas de levitar y manipular pequeñas cuentas de vidrio con láseres, véase el artículo D. MCGLOIN, *Optical tweezers: 20 years on*, Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 364, pp. 3521–3537, 2006. Las fotografías de la página 130 son de T. LI, S. KHEIFETS, D. MEDELLIN & M. G. RAIZEN, *Measurement of the instantaneous velocity of a Brownian particle*, Science 328, pp. 1673–1675, 2010, y T. LI, S. KHEIFETS & M. G. RAIZEN, *Millikelvin cooling of an optically trapped microsphere in vacuum*, Nature Physics 7, pp. 527–530, 2011. Citado en la página 129.
- 74 La primera explicación correcta del molino de luz fue dada por OSBORNE REYNOLDS, *On certain dimensional properties of matter in the gaseous state*, Royal Society Philosophical Transactions Part 2, 1879. La mejor discusión es la que proporciona la web de PHIL GIBBS, en la lista de preguntas frecuentes de la 'usenet news group' sci.physics; está disponible

- en la www.desy.de/user/projects/Physics/General/LightMill/light-mill.html. En commons.wikimedia.org, se puede encontrar una película sobre un radiómetro girando. . Citado en la página 132.
- 75 P. LEBEDEV, *Untersuchungen über die Druckkräfte des Lichtes*, *Annalen der Physik* 6, pp. 307–458, 1901. Lebedew confirmó el resultado de Kepler de que la presión de la luz es la base para el cambio de dirección de las colas de los cometas cuando circulan alrededor del Sol. Citado en la página 132.
- 76 P. GALAJDA & P. ORMOS, *Applied Physics Letters* 78, p. 249, 2001. Citado en la página 132.
- 77 Un breve repaso es dado por MILES PADGETT & LES ALLEN, *Optical tweezers and spanners*, *Physics World* pp. 35–38, Septiembre de 1997. Los documentos originales del grupo de Ashkin son A. ASHKIN, J. M. DZIEDZIC, J. E. BJORKHOLM & S. CHU, *Observation of a gradient force optical trap for dielectric particles*, *Optics Letters* 11, p. 288, 1986, y A. ASHKIN, J. M. DZIEDZIC & T. YAMANE, *Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams*, *Nature* 330, p. 769, 1987. Una explicación pedagógica sobre llaves ópticas, junto con la forma de construirlas, se puede encontrar en D. N. MOOTHOO, J. ARLT, R. S. CONROY, F. AKERBOOM, A. VOIT & K. DHOLAKIA, *Beth's experiment using optical tweezers*, *American Journal of Physics* 69, pp. 271–276, 2001, y en S. P. SMITH, S. R. BHALOTRA, A. L. BRODY, B. L. BROWN, E. K. BOYDA & M. PRENTISS, *Inexpensive optical tweezers for undergraduate laboratories*, *American Journal of Physics* 67, pp. 26–35, 1999. Citado en la página 132.
- 78 R. A. BETH, *Mechanical detection and measurement of the angular momentum of light*, *Physical Review* 50, p. 115, 1936. Para mediciones modernas, véase N. B. SIMPSON, K. DHOLAKIA, L. ALLEN & M. J. PADGETT, *Mechanical equivalence of spin and orbital angular momentum of light: an optical spanner*, *Optics Letters* 22, pp. 52–54, 1997, and M. E. J. FRIESE, T. A. NIEMINEN, N. R. HECKENBERG & H. RUBINSZTEIN-DUNLOP, *Optical torque controlled by elliptical polarization*, *Optics Letters* 23, pp. 1–3, 1998. Ver también J. H. POYNTING, *The wave motion of a revolving shaft, and a suggestion as to the angular momentum in a beam of circularly polarised light*, *Proceedings of the Royal Society London A* 82, pp. 560–567, 1908. Citado en la página 132.
- 79 Las fotografías son de P. H. JONES, F. PALMISANO, F. BONACCORSO, P. G. GUCCIARDI, G. CALOGERO, A. C. FERRARI & O. M. MARAGO, *Rotation detection in light-driven nanorotors*, *ACS Nano* 3, pp. 3077–3084, 2009. Citado en las páginas 133 y 449.
- 80 A. VALENZUELA, G. HAERENDEL, H. FÖPPL, F. MELZNER, H. NEUSS, E. RIEGER, J. STÖCKER, O. BAUER, H. HÖFNER & J. LOIDL, *The AMPTE artificial comet experiments*, *Nature* 320, pp. 700–703, 1986. Citado en la página 134.
- 81 Véase el texto en Latín de DIETRICH VON FREIBERG, *De iride et radialibus impressionibus*, c. 1315. Citado en la página 136.
- 82 J. WALKER, *Multiple rainbows from single drops of water and other liquids*, *American Journal of Physics* 44, pp. 421–433, 1976, y su *How to create and observe a dozen rainbows in a single drop of water*, *Scientific American* 237, pp. 138–144, 1977. Ver también K. SASSEN, *Angular scattering and rainbow formation in pendant drops*, *Journal of the Optical Society of America* 69, pp. 1083–1089, 1979. Un bello documento con las fórmulas de los ángulos de todos arcoíris es E. WILLERDING, *Zur Theorie von Regenbögen, Glorien und Halos*, 2003, preimpresión en Internet. También proporciona los fuentes de los programas que permiten simular un arcoíris en un ordenador personal. Citado en la página 136.
- 83 Hay también otras formas de ver el rayo verde, durante un tiempo más largo, es decir, cuando aparece un espejismo a la puesta de sol. Una explicación con fotografías en color las pue-

de encontrar en M. VOLLMER, *Gespiegelt in besonderen Düften ...– Oasen, Seeungeheuer und weitere Spielereien der Fata Morgana*, *Physikalische Blätter* 54, pp. 903–909, 1998. Citado en la página 136.

- 84** Los colores resultantes del brode del Sol se muestran claramente en la página de Andrew Young mintaka.sdsu.edu/GF/explain/simulations/std/rims.html. Su sitio web mintaka.sdsu.edu/GF ofrece la mejor explicación del fogonazo verde, incluyendo los distintos tipos que existen (explicados en mintaka.sdsu.edu/GF/papers/Zenit/glance.html), cómo observarlo, y los numerosos efectos físicos involucrados. Están disponibles detalladas simulaciones y un material extenso. Véase también su documento A. T. YOUNG, *Sunset science – III. Visual adaptation and green flashes*, *Journal of the Optical Society of America A* 17, pp. 2129–2139, 2000. Citado en la página 136.
- 85** Consulte la maravillosa web de Les Cowley sobre óptica atmosférica, www.atoptics.co.uk. O el libro DAVID K. LYNCH & WILLIAM LIVINGSTON, *Color and Light in Nature*, second edition, Cambridge University Press, 2001. Ellos actualizan y expanden la fascinación por los colores de la Naturaleza – como, por ejemplo, los halos sobre la Luna y el Sol, o el color de las sombras – que fue comenzado por el bonito y clásico libro ya mencionado anteriormente en la: MARCEL G. J. MINNAERT, *Light and Colour in the Outdoors*, Springer, 1993, una versión actualizada basada en la serie de libros originales MARCEL G. J. MINNAERT, *De natuurkunde van 't vrije veld*, Thieme & Cie, 1937. Citado en la página 136.
- 86** Sobre el color de la capa de ozono vista al amanecer y el color del cielo en general, véase G. HOEPPE, *Die blaue Stunde des Ozons*, *Sterne und Weltraum* pp. 632–639, Agosto de 2001, y también su extenso libro GÖTZ HOEPPE, *Blau: Die Farbe des Himmels*, Spektrum Akademischer Verlag, 1999, también disponible en Inglés como la extensa revisión GÖTZ HOEPPE, *Why the Sky is Blue: Discovering the Color of Life*, Princeton University Press, 2007,. Este bello texto también cuenta que las bacterias fueron fundamentales para la formación del color del cielo. Citado en la página 138.
- 87** El bonito *RGB Color Atlas* de 2011 por Tauba Auerbach encuentra en su impresionante web taubaauerbach.com/view.php?id=286&alt=698. Los libros fueron producidos en colaboración con Daniel E. Kelm. De hecho, ambos produjeron tres de los libros, con columnas en diferentes direcciones, como se muestra en la website. Citado en la página 139.
- 88** Esta famoso descubrimiento es de BRENT BERLIN & PAUL KAY, *Basic Color Terms: Their Universality and Evolution*, University of California Press, 1969. El estado de sus largas décadas de la *encuesta mundial del color* está resumida en www1.icsi.berkeley.edu/wcs. Por supuesto existen también estudios realizados para encontrar posibles excepciones; pero la estructura básica es sólida, como demostró en las conferencias precedentes C. L. HARDIN & LUISA MAFFI, *Colour Categories in Thought and Language*, Cambridge University Press, 1997. Citado en la página 140.
- 89** Para una discusión exhaustiva de las diversas velocidades de los trenes de ondas, consulte el texto clásico de LOUIS BRILLOUIN, *Wave Propagation and Group Velocity*, Academic Press, New York, 1960. Desarrolla en detalle el tema discutido por ARNOLD SOMMERFELD, *Über die Fortpflanzung des Lichtes in dispergierenden Medien*, *Annalen der Physik*, 4th series, 44, pp. 177–202, 1914. Véase también ARNOLD SOMMERFELD, *Optik*, Dietrichssche Verlagsbuchhandlung, Wiesbaden 1950, sección 22. Hay disponible una traducción en Inglés ARNOLD SOMMERFELD, *Lectures on Theoretical Physics: Optics*, 1954,. Citado en las páginas 144, 145 y 146.
- 90** Ahora es posible cambiar la velocidad de grupo en fibras, incluso a voluntad, como demostraron M. GONZÁLEZ-HERRÁEZ, K. -Y. SONG & L. THÉVENAZ, *Optically controlled slow and fast light in optical fibers using stimulated Brillouin scattering*, *Applied Physics Let-*

ters 87, p. 081113, 2005. Ellos demostraron que la velocidad de grupo desde $0.24c$ a más infinito y más allá a valores negativos.

Otro experimento fue realizado por S. CHU & S. WONG, *Linear pulse propagation in an absorbing medium*, Physical Review Letters 48, pp. 738–741, 1982. See also S. CHU & D. STYER, *Answer to question #52. Group velocity and energy propagation*, American Journal of Physics 66, pp. 659–661, 1998. En 1993 fue descrito otro ejemplo por el grupo de Raymond Chiao para el caso de ciertos materiales no lineales en R. CHIAO, P. G. KWAIT & A. M. STEINBERG, *Faster than light?*, Scientific American 269, p. 52, Agosto de 1993, y R. Y. CHIAO, A. E. KOZHEKIN & G. KURIZKI, *Tachyonlike excitations in inverted two-level media*, Physical Review Letters 77, pp. 1254–1257, 1996. En otra configuración experimental utilizando dispersión anómala de gas cesio, ver L. J. WANG, A. KUZMICH & A. DOGARIN, *Gain-assisted superluminal light propagation*, Nature 406, pp. 277–279, 20 July 2000. Citado en la página 145.

- 91 G. NIMTZ, A. ENDERS & H. SPIEKER, Journal de Physique I (Paris) 4, p. 565, 1994. Desafortunadamente, el mismo Nimitz parecía creer que él transportaba energía o señales más rápidas que la luz; contó con la ayuda de críticos a menudo mal preparados para sus sofisticados experimentos. Ver A. ENDERS & G. NIMTZ, Physikalische Blätter 49, p. 1119, Dezember 1993, and the weak replies in Physikalische Blätter 50, p. 313, April de 1994. Ver también A. M. STEINBERG, Journal de Physique I (Paris) 4, p. 1813, 1994, A. M. STEINBERG, P. G. KWAIT & R. Y. CHIAO, Physical Review Letters 71, pp. 708–711, 1993, and A. RANFAGNI, P. FABENI, G. P. PAZZI & D. MUGNAI, Physical Review E 48, p. 1453, 1993. Citado en la página 146.
- 92 Y. P. TERLETSKII, *Paradoxes in the Theory of Relativity*, Plenum Press, 1968. Citado en la página 146.
- 93 Véase la excelente explicación de KIRK T. McDONALD, *Negative group velocity*, American Journal of Physics 69, pp. 607–614, 2001. Citado en la página 146.
- 94 Un resumen de todas las pruebas sobre el movimiento del éter fue dada por R. S. SHANKLAND, S. W. MCCUSKEY, F. C. LEONE & G. KUERTI, *New analysis of the interferometer observations of Dayton C. Miller*, Review of Modern Physics 27, pp. 167–178, 1955. Un viejo texto es el de H. WITTE, Annalen der Physik 26, p. 235, 1908. Citado en la página 147.
- 95 La historia del concepto de vacío, puede verse en el libro de E. GRANT, *Much Ado About Nothing*, Cambridge University Press, 1981, y en su extenso texto de referencia de EDMUND T. WHITTAKER, *A History of the Theories of Aether and Electricity*, Volume 1: *The Classical Theories*, Volume 2: *The Modern Theories*, Tomash Publishers, American Institute of Physics 1951, 1987.

Los distintos *modelos de éter* – engranajes, tubos, vórtices – propuestos en el siglo XIX, fueron desechados por varios motivos. A partir de los muchos modelos utilizados para explicar los campos eléctricos y magnéticos como movimiento de algunas entidades, se concluyó que la velocidad de la luz dependía de los campos eléctricos y magnéticos. Un tipo de campo venía descrito generalmente por el movimiento lineal de sus entidades, el otro por el movimiento rotatorio o el retorcimiento; ambas tareas son posibles. Como consecuencia, el éter debía ser algo así como un fluido extraño que fluye perfectamente, pero que resiste la rotación de elementos de volumen, como McCulloch dedujo en 1839. No obstante, los experimentos demuestran que la velocidad de la luz en el vacío no depende de la intensidad del campo electromagnético. Los vórtices se abandonaron porque se vio que en el mundo real los vórtices son inestables. Todos los modelos recibieron su golpe final cuando no pudieron resistir el requerimiento de la relatividad especial. Citado en la página 148.

- 96 M. VON LAUE, *Zur Thermodynamik der Interferenzerscheinungen*, *Annalen der Physik* 20, pp. 365–378, 1906. Citado en la página 149.
- 97 Ver, por ejemplo, la revisión de L. C. TU, J. LUO & G. T. GILLIES, *The mass of the photon*, *Reports on Progress in Physics* 68, pp. 77–130, 2005. Citado en la página 151.
- 98 Para aprender sobre la geometría de fase en óptica, ver E. J. GALVEZ & P. M. KOCH, *Use of four mirrors to rotate linear polarization but preserve input-output collinearity II*, *Journal of the Optical Society of America* 14, pp. 3410–3414, 1999, E. J. GALVEZ & C. D. HOLMES, *Geometric phase of optical rotators*, *Journal of the Optical Society of America* 16, pp. 1981–1985, 1999, Así como otros varios documentos de Enrique Galvez. Consultar también el documento de R. BHANDARI, *Geometric phase in interference experiments*, *Current Science* 67, pp. 224–230, 1994. Citado en las páginas 152 y 404.
- 99 Un útil colección histórica de documentos es la de FRANK WILCZEK & ALFRED SHAPER, eds., *Geometric Phases in Physics*, World Scientific, 1989. Consultar también los vívidos documentos de M. BERRY, *Pancharatnam, virtuoso of the Poincaré sphere: an appreciation*, *Current Science* 67, pp. 220–223, 1994. Citado en la página 152.
- 100 DÉNES SZÁZ & GÁBOR HORVÁTH, *Success of sky-polarimetric Viking navigation: revealing the chance Viking sailors could reach Greenland from Norway*, *Royal Society Open Science* 5, p. 172187, 2018. Citado en la página 153.
- 101 STEPHEN G. LIPSON, DAVID S. TANNHAUSER & HENRY S. LIPSON, *Optical Physics*, Cambridge University Press, 1995. Citado en la página 153.
- 102 El documento original es J. F. NYE & M. V. BERRY, *Dislocations in wave trains*, *Proceedings of the Royal Society A* 336, pp. 165–190, 1974. Un resumen nuevo es M. V. BERRY, *Exploring the colours of dark light*, *New Journal of Physics* 4, pp. 74.1–74.14, 2002, de libre disposición online en la www.njp.org. Citado en la página 154.
- 103 O. ARTEAGA, E. GARCIA-CAUREL & R. OSSIKOVSKI, *Stern-Gerlach experiment with light: separating photons by spin with the method of A. Fresnel*, *Optics Express* 27, pp. 4758–4768, 2019. Citado en la página 154.
- 104 M. ARRAYÁS & J. L. TRUEBA, *Electromagnetic torus knots*, preprint at arxiv.org/abs/1106.1122. Citado en la página 154.
- 105 En todas las bibliotecas existen muchas buenas introducciones a la óptica. Una buena introducción que explica los conceptos fundamentales paso a paso es el relevante capítulo del libro de física de ERIC MAZUR, disponible en Internet; algún día será publicado por Prentice Hall. Citado en la página 156.
- 106 Una buena visión general de la invención y de la vida de Frits Zernike la proporciona MENNO VAN DIJK, *Ken uw klassieken: hoe Frits Zernike fasecontrast ontdekte*, *Nederlands tijdschrift voor natuurkunde* 71, pp. 194–196, Julio de 2005. Citado en la página 156.
- 107 Consultar su sitio web www.cie.co.at/cie. Citado en la página 160.
- 108 P. D. JONES, M. NEW, D. E. PARKER, S. MARTIN & I. G. RIGOR, *Surface air temperature and its changes over the past 150 years*, *Reviews of Geophysics* 37, pp. 173–199, Mayo de 1999. Citado en la página 160.
- 109 Él recuerda este episodio de 1933 en M. PLANCK, *Mein Besuch bei Adolf Hitler*, *Physikalische Blätter* p. 143, 1947. Citado en la página 160.
- 110 Imágenes de objetos en un horno al rojo vivo y a temperatura ambiente se muestran en C. H. BENNETT, *Demons, engines and the second law*, *Scientific American* 255, pp. 108–117, Noviembre de 1987. Citado en la página 161.
- 111 Si quiere leer más sobre el tema, eche un vistazo la texto clásico de WARREN J. SMITH, *Modern Optical Engineering: the Design of Optical Systems*, 3rd edition, McGraw-Hill, 2000.

- La principal referencia histórica es la de R. CLAUSIUS, *Über die Concentration von Wärme und Lichtstrahlen und die Grenzen ihrer Wirkung*, Poggendorff's Annalen der Physik 121, pp. 1–44, 1864. Citado en las páginas 163 y 229.
- 112 Los valores de medidas y rangos de las cantidades físicas están recogidos en HORST VÖLZ & PETER ACKERMANN, *Die Welt in Zahlen*, Spektrum Akademischer Verlag, 1996. Citado en la página 165.
- 113 Ver, por ejemplo, K. CODLING & L. J. FRASINSKI, *Coulomb explosion of simple molecules in intense laser fields*, Contemporary Physics 35, pp. 243–255, 1994. Citado en la página 166.
- 114 La referencia estándar sobre la propagación de la luz es MAX BORN & EMIL WOLF, *Principles of Optics – Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*, Pergamon Press, 6th edition, 1998. Citado en la página 169.
- 115 E. D. PALIK, *Handbook of optical constants of solids*, Academic Publishing, 1998. Citado en la página 172.
- 116 Más fotografías de espejismos, incluso películas, se puede ver en www.polarimage.fi/mirages/mirages.htm y virtual.finland.fi/netcomm/news/showarticle.asp?intNWSAID=25722. Citado en la página 174.
- 117 E. J. J. KIRCHNER, *De uitvinding van het telescoop in 1608: gewoon twee lenzen*, Nederlands tijdschrift voor natuurkunde 74, pp. 356–361, 2008. Citado en la página 176.
- 118 Una descripción fascinante sobre lo que la gente ha conseguido en este campo hasta ahora se da en el texto clásico de referencia de ROLF RIEHKER, *Fernrohre und ihre Meister*, VEB Verlag Technik, second edition, 1990. Ver también el de PETER MANLY, *Unusual Telescopes*, Cambridge University Press, 1991, y HENRY C. KING, *The History of the Telescope*, Dover, 2003. Citado en la página 178.
- 119 Una introducción al asunto del 22° halo, el de 46° halo, perros solares, y muchos otros arcos y lazos que se pueden observar alrededor del Sol, se puede consultar en los documentos bellamente ilustrados de R. GREENLER, *Lichterscheinungen, Eiskristalle und Himmelsarchäologie*, Physikalische Blätter 54, pp. 133–139, 1998, o el libro de ROBERT GREENLER, *Rainbows, Halos, and Glories*, Cambridge University Press, 1980. Citado en la página 179.
- 120 J. AIZENBERG, V. C. SUNDAR, A. D. YABLON, J. C. WEAVER & G. CHEN, *Biological glass fibers: Correlation between optical and structural properties*, Proceedings of the National Academy of Sciences 101, pp. 3358–3363, 2004, también disponible online de manera gratuita en www.pnas.org. Citado en la página 180.
- 121 K. FRANZ & al., *Müller cells are living optical fibers in the vertebrate retina*, Proceedings of the National Academy of Sciences 104, pp. 8287–8292, 2007. Citado en la página 180.
- 122 Una lista completa de datos y argumentos que demuestran que el pelo de los osos polares no tiene funciones de fibra, se puede encontrar en las páginas it.stlawu.edu/~koon/mar-ref.html y it.stlawu.edu/~koon/polar.html. Citado en la página 180.
- 123 La predicción de la refracción negativa se debe a V. G. VESELAGO, *The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ* , Soviet Physics Uspekhi 10, p. 509, 1968. (El documento original en Ruso es de 1967.) La explicación de las diferentes direcciones de refracción fue publicada por P. M. VALANJU, R. M. WALSER & A. P. VALANJU, *Wave refraction in negative-index media: always positive and very inhomogeneous*, Physical Review Letters 88, p. 187401, 8 Mayo de 2002. También se corrige el principio de Fermat, como fue explicado en V. G. VESELAGO, *About the wording of Fermat's principle for light propagation in media with negative refraction index*, arxiv.org/abs/cond-mat/0203451. Citado en la página 181.

- 124** El primer ejemplo de sistema material con índice de refracción negativa fue presentado por David Smith y su equipo. R. A. SCHELBY, D. R. SMITH & S. SCHULTZ, *Experimental verification of a negative index of refraction*, *Science* **292**, p. 77-79, 2001. Ejemplos más recientes son A. A. HOUCK, J. B. BROCK & I. L. CHUANG, *Experimental observations of a left-handed material that obeys Snell's law*, *Physical Review Letters* **90**, p. 137401, 2003, C. G. PARAZZOLI, R. B. GREGOR, K. LI, B. E. C. KOLTENBAH & M. TANELIAN, *Experimental verification and simulation of negative index of refraction using Snell's law*, *Physical Review Letters* **90**, p. 107401, 2003. S. FOTEINOPOULOU, E. N. ECONOMOU & C. M. SOUKOULIS, *Refraction in media with a negative refractive index*, *Physical Review Letters* **90**, p. 107402, 2003. Citado en la página **181**.
- 125** S. A. RAMAKRISHNA, *Physics of negative refractive index materials*, *Reorts on Progress of Physics* **68**, pp. 449–521, 2005. Citado en las páginas **181** y **182**.
- 126** J. PENDRY, *Neegative refraction makes a perfect lens*, *Physical Review Letters* **85**, p. 3966, 2000. Ver también J. B. PENDRY, D. SCHURIG & D. R. SMITH, *Controlling electromagnetic fields*, *Science* **312**, pp. 1780–1782, 2006, y D. SCHURIG, J. J. MOCK, B. J. JUSTICE, S. A. CUMMER, J. B. PENDRY, A. F. STARR & D. R. SMITH, *Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies*, *Science* **314**, pp. 977–980, 2006. Citado en la página **182**.
- 127** Sobre metamateriales, consultar A. LAI, C. CALOZ & T. ITOH, *Composite rightleft-handed transmission metamaterials*, *IEEE Microwave Magazine* **5**, pp. 34–50, Septiembre de 2004. Citado en la página **182**.
- 128** M. ZEDLER & P. RUSSE, *Investigation on the Dispersion Relation of a 3D LC-based Metamaterial with an Omnidirectional Left-Handed Frequency Band*, 2006 International Microwave Symposium Digest, San Francisco pp. 1477–1479, 2006. M. ZEDLER, C. CALOZ & P. RUSSE, *A 3D Isotropic left-handed metamaterial based on the rotated transmission line matrix (TLM) scheme*, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* **55**, pp. 2930–2941, 2007. Citado en la página **182**.
- 129** Lea online el texto de Grimaldi en la fermi.imss.fi.it/rd/bdv?/bdviewer/bid=000000300682. Citado en la página **183**.
- 130** JAMES E. FALLER & E. JOSEPH WAMPLER, *The lunar laser reflector*, *Scientific American* pp. 38–49, Marzo de 1970. Citado en la página **183**.
- 131** Neil Armstrong del Apollo 11, Jim Lovell del Apollo 8 y Apollo 13, y Jim Irwin del Apollo 15 lo buscaron extensamente y luego hicieron declaraciones negativas, como se dijo en *Science News* p. 423, 24 & 31 Diciembre de 1994. Desde la lanzadera espacial, a pesar de dar vueltas solamente a unos cientos de kilómetros sobre la Tierra, la muralla *puede* ser vista cuando el Sol está lo suficientemente bajo de tal manera que parezca mas ancha por su propia sombra, como se explicó en *Science News* **149**, p. 301, 1996. Citado en la página **184**.
- 132** S. W. HELL, *Strategy for far-field optical imaging and writing without diffraction limit*, *Physics Letters A* **326**, pp. 140–145, 2004, Véase también V. WESTPHAL & S. W. HELL, *Nanoscale resolution in the focal plane of an optical microscope*, *Physical Review Letters* **94**, p. 143903, 2005, y V. WESTPHAL, J. SEEGER, T. SALDITT & S. W. HELL, *Stimulated emission depletion microscopy on lithographic microstructures*, *Journal of Physics B* **38**, pp. S695–S705, 2005. Citado en la página **186**.
- 133** M. SHIH, M. SEGEV & G. SALAMO, *Three-dimensional spiraling of interacting spatial solitons*, *Physical Review Letters* **78**, pp. 2551–2554, 1997. Ver también el documento más legible de M. SEGEV & G. STEGEMAN, *Self-trapping of optical beams: spatial solitons*, *Physics Today* **51**, pp. 42–48, Agosto de 1998. Citado en la página **187**.

- 134** Sobre imágenes Talbot-Lau con Rayos-X, véase por ejemplo el documento A. MOMOSE & al., *X-ray phase imaging: from synchrotron to hospital*, Philosophical Transactions of the Royal Society A 372, p. 20130023, 2014, de lectura libre en rsta.royalsocietypublishing.org. Citado en la página 188.
- 135** Consultar el estupendo resumen de FRANK SCHAEFFEL, *Processing of information in the human visual system*, pp. 1–33, in ALEXANDER HORNBERG, editor, *Handbook of Machine Vision*, Wiley-VCH, 2006. Citado en la página 201.
- 136** W. H. EHRENSTEIN & B. LINGELBACH, *Das Hermann-Gitter*, Physik in unserer Zeit 6, pp. 263–268, 2002. El diario también muestra una variación de color de estas redes. Citado en la página 202.
- 137** Para disfrutar de muchas otras flores bajo iluminación ultravioleta, vaya a la extensa colección de www.naturfotograf.com/index2. Citado en la página 204.
- 138** Como ejemplo de tal investigación, véase S. A. BACCUS, B. P. OLVECKY, M. MANU & M. MEISTER, *A retinal circuit that computes object motion*, Journal of Neuroscience 28, pp. 6807–6817, 2008. Para una revisión anterior, ver M. MEISTER & M. J. BERRY, *The neural code of the retina*, Neuron 22, pp. 435–450, 1999. Citado en la página 207.
- 139** Consultar por ejemplo, el resumen de D. M. BERSON, *Strange vision: ganglion cells as circadian photoreceptors*, Trends in Neurosciences 26, pp. 314–320, 2003. Citado en la página 207.
- 140** Esta impresionante historia está sacada del maravilloso blog watchingtheworldwakeup.blogspot.de/2008/11/mountain-biking-moonlight-color-vision.html – un blog que muestra lo que es la pasión por la Naturaleza. Sin citas.
- 141** El mito de la sensibilidad ocular se desmiente en detalle por B. H. SOFFER & D. K. LYNCH, *Some paradoxes, errors, and resolutions concerning the spectral optimization of human vision*, American Journal of Physics 67, pp. 946–953, 1999. Citado en la página 209.
- 142** A. BRÜCKNER, J. DUPARRÉ, F. WIPPERMANN, R. LEITEL, P. DANNBERG & A. BRÄUER, *Ultra-compact close-up microoptical imaging system*, Proceedings of the SPIE, 7786, p. 77860A, 2010. Citado en la página 210.
- 143** DAVID R. WILLIAMS, *Supernormal Vision*, Science News 152, pp. 312–313, 15 Noviembre de 1997. Ver también aria.cvs.rochester.edu/team/williams_d/ así como las fotografías en roorda.vision.berkeley.edu/ del interior de los ojos de un ser humano vivo. Su última publicación es A. ROORDA, A. METHA, P. LENNIE & D. R. WILLIAMS, *Packing arrangement of the three cone classes in the primate retina*, Vision Research 41, pp. 1291–1306, 2001. Citado en la página 211.
- 144** Consultar, por ejemplo, el bonito libro de SIMON INGS, *Das Auge - Meisterstück der Evolution*, Hoffmann & Campe, 2008. Sobre las limitaciones del ojo, consultar THOMAS DITZINGER, *Illusionen des Sehens: Eine Reise in die Welt der visuellen Wahrnehmung*, Südwest, 1998, que incluye la fascinación *ilusión de Ouchi* mostrada en la Figura 193. Citado en la página 211.
- 145** Esto le ocurrió a Giovanni Bellini (b. c. 1430 Venecia, d. 1516 Venecia) el gran pintor del Renacimiento, que incluso dejó esta experiencia por escrito, produciendo por tanto una de las mayores ‘meteduras de pata’ de la historia. Si toma una fotografía del efecto con una cámara de control remoto, podrá probar que su cámara es también sagrada. Citado en la página 214.
- 146** S. R. WILK, *How retroreflectors really work*, Optics & Photonics News, pp. 6–7, December 1993. Citado en la página 214.

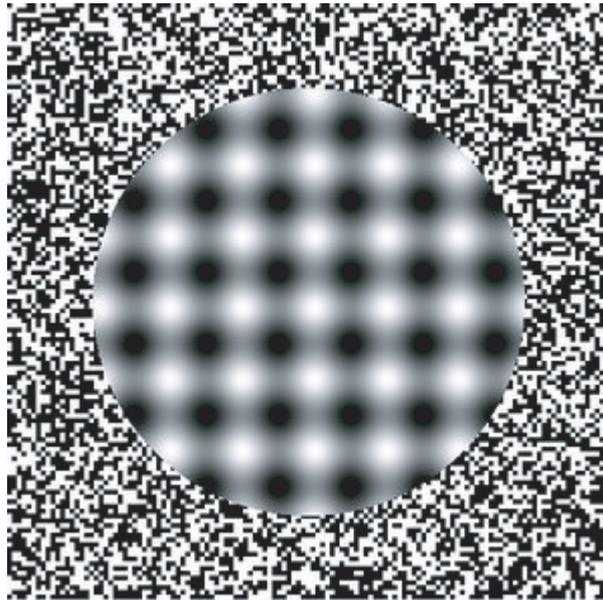


FIGURA 193 La ilusión de movimiento de Ouchi.

- 147 G. G. P. VAN GORKUM, *Introduction to Zeus displays*, Philips Journal of Research 50, pp. 269–280, 1996. Ver también N. LAMBERT, E. A. MONTIE, T. S. BALLER, G. G. P. VAN GORKUM, B. H. HENDRIKS, P. H. TROMPENAARS & S. T. DE ZWART, *Transport and extraction in Zeus displays*, Philips Journal of Research 50, pp. 295–305, 1996. Citado en la página 216.
- 148 Entre los muchos documentos sobre los agujeros de las víboras, véase el excelente resumen de B. SCHWARZSCHILD, *Neural-network model may explain the surprisingly good infrared vision of snakes*, Physics Today pp. 18–20, Septiembre de 2006; está basado en los fantásticos resultados de A. B. SICHERT, P. FRIEDEL & J. L. VAN HEMMEN, *Snake’s perspective on heat: reconstruction of input using an imperfect detection system*, Physical Review Letters 97, p. 068105, 2006. Citado en la página 217.
- 149 J. CYBULSKI, J. CLEMENTS & M. PRAKASH, *Foldscope: Origami-based paper microscope*, preimpresión en arxiv.org/abs/1403.1211. Citado en la página 219.
- 150 Para una explicación, ver S. Y. VAN DER WERF, G. P. KÖNNEN & W. H. LEHN, *Novaya Zemlya effect and sunsets*, Applied Optics 42, pp. 367–378, 2003. Citado en la página 221.
- 151 E. W. STREED, A. JECHOW, B. G. NORTON & D. KIELPINSKI, *Absorption imaging of a single atom*, Nature Communications, 3, p. 933, 2012, preimpresión en arxiv.org/abs/1201.5280. Citado en la página 221.
- 152 Este problema fue sugerido por Vladimir Surdin. Citado en la página 223.
- 153 Para desviaciones de la ‘ley’ geométrica de la reflexión véase M. MERANO, A. AIELLO, M. P. VAN EXTER & J. P. WOERDMAN, *Observing angular deviations in the specular reflection of a light beam*, Nature Photonics 3, pp. 337 – 340, 2009. Consultar también M. MERANO, A. AIELLO, G. W. ’T HOOFT, M. P. VAN EXTER, E. R. ELIEL & J. P. WOERDMAN, *Observation of Goos-Hänchen shifts in metallic reflection*, Optics Express 15, pp. 15928–15934, 2007. Este bonito campo de la investigación necesita un buen artículo de revisión. Para una medida en el retraso de tiempo en la reflexión total, alrededor de 28 fs, consultar D. CHAUVAT & al., *Timing the total reflection of light*, Physics Letters A

- 336, pp. 271–273, 2005. Citado en la página 223.
- 154** Tal afirmación fue hecha implícitamente por D. MUGNAI, A. RANFAGNI & R. RUGGERI, *Observation of superluminal behaviors in wave propagation*, Physical Review Letters **84**, p. 4830, 2000. Una excelente explicación de refutación fue dada por W. A. RODRIGUES, D. S. THOBER & A. L. XAVIER, *Causal explanation for observed superluminal behavior of microwave propagation in free space*, preimpresión en arxiv.org/abs/physics/0012032. Citado en la página 224.
- 155** Si desea conocer más sobre cómo aparece el mundo para los diferentes tipos de daltonismo, vea las páginas webexhibits.org/causesofcolor/2.html o la www.vischeck.com/examples. Citado en la página 224.
- 156** H. KOBAYASHI & S. KOHSHIMA, *Unique morphology of the human eye*, Nature **387**, pp. 767–768, 1997. Exploraron 88 especies de primates. Citado en la página 225.
- 157** A. N. HEARD-BOOTH & E. C. KIRK, *The influence of maximum running speed on eye size: a test of Leuckart's law in mammals*, The Anatomical Record **295**, pp. 1053–1062, 2012. Citado en la página 231.
- 158** La mayoría de los expertos mundiales en rayos son rusos. Dos buenos libros son VLADIMIR A. RAKOV & MARTIN A. UMAN, *Lightning: Physics and Effects*, Cambridge University Press, 2003, y EDUARD M. BAZELYON & YURI P. RAIZER, *Lightning Physics and Lightning Protection*, Institute of Physics Publishing, 2000. Como sencilla introducción, véase también la sección dedicada a los rayos de la página www.nrcan-rncan.gc.ca. Citado en la página 233.
- 159** Sobre la pasión de toda la vida de Luke Howard, consultar el libro de RICHARD HAMBLYN, *The Invention of Clouds*, Macmillan 2001. Citado en la página 233.
- 160** Ver J. LATHAM, *The electrification of thunderstorms*, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society **107**, pp. 277–289, 1981. Para una revisión más amplia y reciente, ver EARLE R. WILLIAMS, *The tripole structure of thunderstorms*, Journal of Geophysical Research **94**, pp. 13151–13167, 1989. Consultar también el libro del NATIONAL RESEARCH COUNCIL STAFF, *The Earth's Electrical Environment*, Studies in Geophysics, National Academy Press, 1986. Citado en la página 233.
- 161** La exploración de cómo se separan las cargas en la nubes es un campo de investigación en sí mismo. Ver, por ejemplo, el resumen y la lista de la literatura en enviromom.us/lightning/lightningformation.html. todavía no está completamente establecida del mecanismo a una escala atómica exacta. Existen dos razones principales: los experimentos son difíciles, y la electrificación no resulta completamente comprendida en la mayoría de los sistemas materiales, incluyendo el conocido proceso de frotar varillas de vidrio con una piel. Citado en la página 233.
- 162** A. V. GUREVICH & K. P. ZYBIN, *Runaway breakdown and the mysteries of lightning*, Physics Today **58**, pp. 37–43, Mayo de 2005. Citado en la página 236.
- 163** Para aprender más sobre corrientes atmosféricas, quizás quiera ojear la revista popularizada del trabajo realizado en EEUU por E. A. BERING, A. A. FEW & J. R. BENBROOK, *The global electric circuit*, Physics Today **51**, pp. 24–30, October 1998, o el resumen más técnico de E. BERING, *Reviews of Geophysics (supplement)* **33**, p. 845, 1995. Citado en la página 237.
- 164** El uso de las resonancias de Schumann en el condensador Tierra–ionosfera para este campo de investigación, se explica en K. SCHLEGEL & M. FÜLLERKRUG, *Weltweite Ortung von Blitzen*, Physik in unserer Zeit **33**, pp. 257–261, 2002. Citado en la página 237.

- 165** J. R. DWYER, M. A. UMAN, H. K. RASSOUL, M. AL-DAYEH, E. L. CARAWAY, J. JERAULD, V. A. RAKOV, D. M. JORDAN, K. J. RAMBO, V. CORBIN & B. WRIGHT, *Energetic radiation produced by rocket-triggered lightning*, *Science* **299**, pp. 694–697, 2003. Citado en la página [236](#).
- 166** J. R. DWYER, *A fundamental limit on electric fields in air*, *Geophysical Research Letters* **30**, p. 2055, 2003. Citado en la página [236](#).
- 167** B. M. SMIRNOV, *Physics of ball lightning*, *Physics Reports* **224**, pp. 151–236, 1993. Ver también D. FINKELSTEIN & J. RUBINSTEIN, *Ball lightning*, *Physical Review* **135**, pp. 390–396, 1964. Para más folklore sobre el tema busque en Internet. Citado en la página [238](#).
- 168** G. D. SHABANOV, *The optical properties of long-lived luminous formations*, *Technical Physics Letters* **28**, pp. 164–166, 2002, A. I. EGOROV & S. I. STEPANOV, *Long-lived plasroids produced in humid air as analogues of ball lightning*, *Technical Physics* **47**, pp. 1584–1586, 2002, A. E. EGOROV, S. I. STEPANOV & G. D. SHABANOV, *Physics Uspekhi Laboratory demonstration of ball lightning*, **47**, pp. 99–101, 2004, y G. D. SHABANOV & B. YU. SOKOLOVSKII, *Macroscopic separation of charges in a pulsed electric discharge*, *Plasma Physics Reports* **31**, pp. 512–518, 2005. (Todos ellos son traducciones en Inglés de los documentos rusos anteriores.) Consultar las páginas web biod.pnpi.spb.ru/pages_ru/Stepanov/index.html stealthtank.narod.ru, balllightning.narod.ru/hvewd.html y www.ipp.mpg.de/ippcms/eng/presse/pi/05_06_pi.html, para más detalles y más películas espectaculares.. Citado en la página [238](#).
- 169** G. SILVA PAIVA, A. C. PAVÃO, E. ALPES DE VASCONCELOS, O. MENDES & E. F. DA SILVA, *Production of ball-lightning-like luminous balls by electrical discharges in silicon*, *Physics Review Letters* **98**, p. 048501, 2007. Citado en la página [239](#).
- 170** Para un resumen reciente, ver S. PARROTT, arxiv.org/abs/gr-qc/9711027. También T. A. ABBOTT & D. J. GRIFFITHS, *Acceleration without radiation*, *American Journal of Physics* **53**, pp. 1203–1211, 1985. Ver también A. KOVETZ & G. E. TAUBER, *Radiation from an accelerated charge and the principle of equivalence*, *American Journal of Physics* **37**, pp. 382–385, 1969. Citado en la página [246](#).
- 171** C. DE ALMEIDA & A. SAA, *The radiation of a uniformly accelerated charge is beyond the horizon: a simple derivation*, *American Journal of Physics* **74**, pp. 154–158, 2006. Citado en la página [247](#).
- 172** Un resumen de estas conocidas simulaciones es G. A. GLATZMAIER, *Geodynamo simulations - how realistic are they?*, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* **30**, pp. 237–257, 2002. Un confirmación experimental fundamental es J. ZHANG, X. D. SONG, Y. C. LI, P. G. RICHARDS, X. L. SUN & F. WALDHAUSER, *Inner core differential motion confirmed by earthquake doublet waveform doublets*, *Science* **309**, pp. 1357–1360, 2005. Citado en la página [241](#).
- 173** Una excelente revisión es E. H. BRANDT, *Levitation in Physics*, *Science* **243**, pp. 349–355, 1989. Citado en las páginas [242](#) y [246](#).
- 174** Véase el artículo de R. TUCKERMANN, S. BAUERECKER & B. NEIDHART, *Levitation in Ultraschallfeldern – Schwebende Tröpfchen*, *Physik in unserer Zeit* **32**, pp. 69–75, February 2001. Gotas líquidas de hasta 1 g han sido levitadas de esta manera. Citado en la página [242](#).
- 175** F. C. MOON & P. Z. CHANG, *Superconducting Levitation – Applications to Bearings and Magnetic Transportation*, Wiley & Sons, 1994. Citado en las páginas [242](#) y [246](#).
- 176** W. T. SCOTT, *Who was Earnshaw?*, *American Journal of Physics* **27**, pp. 418–419, 1959. Citado en la página [243](#).

- 177** El truco consiste en demostrar que $\text{div } \mathbf{E} = 0$, $\text{curl } \mathbf{E} = 0$, por tanto $E\nabla^2 E = 0$ y, de esto, $\nabla^2 E^2 \geq 0$; por lo que no hay campos eléctrico máximos en la ausencia de cargas libres. La misma prueba funciona para los campos magnéticos. No obstante, los cuerpos con constantes dieléctricas *más bajas* que su entorno *pueden* ser levitados en campos eléctricos estáticos. Un ejemplo son las burbujas de gas en los líquidos, como demostró T. B. JONES & G. W. BLISS, *Bubble dielectrophoresis*, Journal of Applied Physics 48, pp. 1412–1417, 1977. Citado en la página 243.
- 178** B. SCHARLAU, V. NORDMEIER & H. J. SCHLICHTING, *Magnetische Levitation*, en DEUTSCHE PHYSIKALISCHE GESELLSCHAFT, (editor) *Didaktik der Physik*, Lehmanns, 2003. Citado en las páginas 244 y 245.
- 179** Ver A. K. GEIM, M. D. SIMON, M. I. BOAMFA & L. O. HEFLINGER, *Magnet levitation at your fingertips*, Nature 400, pp. 323–324, 1999. Citado en la página 245.
- 180** Las primeras fotografías de un ión aislado fueron las de W. NEUHAUSER, M. HOHENSTATT, P. E. TOSCHEK & H. DEHMELT, *Localized visible Ba⁺ mono-ion oscillator*, Physical Review A 22, pp. 1137–1140, 1980. Ver también D. J. WINELAND & W. M. ITANO, Physics Letters A 82, p. 75, 1981, así como F. DIETRICH & H. WALTER, Physical Review Letters 58, p. 203, 1987.
Para átomos aislados, ver las fotografías de Z. HU & H. J. KIMBLE, Optics Letters 1, p. 1888, 1994, F. RUSCHEWITZ, D. BETTERMANN, J. L. PENG & W. ERTMER, Europhysics Letters 34, p. 651, 1996, D. HAUBRICH, H. SCHADWINKEL, F. STRAUCH, B. UEBERHOLZ, R. WYNANDS & D. MESCHÉDE, Europhysics Letters 34, p. 663, 1996. Citado en la página 245.
- 181** Ver por ejemplo MARK BUCHANAN, *And God said...let there be levitating strawberries, flying frogs and humans that hover over Seattle*, New Scientist pp. 42–43, 26 July 1997, o C. WU, *Floating frogs*, Science News 152, pp. 632–663, 6 Diciembre de 1997, y C. Wu, *Molecular magnetism takes off*, Physics World April 1997, page 28. Los experimentos de Andre Geim, Jan Kees Maan, Humberto Carmona y Peter Main fueron publicados por P. RODGERS, Physics World 10, p. 28, 1997. Algunos de sus resultados se pueden encontrar en M. V. BERRY & A. K. GEIM, *Of flying frogs and levitrons*, European Journal of Physics 18, pp. 307–313, 1997. Consultar también su www.ru.nl/hfml/research/levitation/. Citado en la página 246.
- 182** El conocido juguete permite la levitación sin el uso de ninguna fuente de energía y fue llamado ‘Levitron’. No fue inventado por Bill Hones de Fascination Toys & Gifts en Seattle, como explica la www.levitron.com. El juguete es explicado por RON EDGE, *Levitation using only permanent magnets*, Physics Teacher 33, p. 252, Abril de 1995. También se explica en M. V. BERRY, *The LevitronTM: an adiabatic trap for spins*, Proceedings of the Royal Society A 452, pp. 1207–1220, 1996, (of Berry’s phase fame) así como por M. D. SIMON, L. O. HEFLINGER & S. L. RIDGEWAY, *Spin stabilized magnetic levitation*, American Journal of Physics 65, pp. 286–92, 1997, y por T. B. JONES, M. WASHIZU & R. GANS, *Simple theory for the Levitron*, Journal of Applied Physics 82, pp. 883–889, 1997. Citado en la página 246.
- 183** El truco de la perforación y la construcción de un Levitrón se explican en el guión de la bonita conferencia de JOSEF ZWÉCK, *Physik im Alltag*, Skript zur Vorlesung im WS 1999/2000 der Universität Regensburg. Citado en la página 246.
- 184** La predicción sobre la levitación generalizada es de STEPHEN B. HALEY, *Length quantization in levitation of magnetic microparticles by a mesoscopic superconducting ring*, Physical Review Letters 74, pp. 3261–3264, 1995. El tema se discute con más detalle en STEPHEN B. HALEY, *Magnetic levitation, suspension, and superconductivity: macros-*

- copic and mesoscopic*, Physical Review B 53, p. 3506, 1996, invertido en orden con STEPHEN B. HALEY, *Quantized levitation of superconducting multiple-ring systems*, Physical Review B 53, p. 3497, 1996, así como STEPHEN B. HALEY, *Quantized levitation by multiply-connected superconductors*, LT-21 Proceedings, in Czechoslovak Journal of Physics 46, p. 2331, 1996. En 1998, no existía todavía una confirmación experimental (Stephen Haley, comunicación privada). Citado en la página 246.
- 185** Descripciones detalladas de muchos de estos efectos se pueden encontrar en el excelente resumen editado por MANFRED VON ARDENNE, GERHARD MUSIOL & SIEGFRIED REBALL, *Effekte der Physik und ihre Anwendungen*, Harri Deutsch, 2004. Citado en la página 247.
- 186** R. BUDDAKIAN, K. WENINGER, R. A. HILLER & SETH J. PUTTERMAN, *Picosecond discharges and stick-slip friction at a moving meniscus of mercury in glass*, Nature 391, pp. 266–268, 15 Enero de 1998. Ver también Science News 153, p. 53, 24 Enero de 1998. Citado en la página 248.
- 187** HENK SWAGTEN & REINDER COEHOORN, *Magnetische tunneljuncties*, Nederlands tijdschrift voor natuurkunde 64, pp. 279–283, November 1998. Citado en la página 248.
- 188** H. OHNO, D. CHIBA, F. MATSUKURA, T. OMIYA, E. ABE, T. DIETL, Y. OHNO & K. OHTANI, *Electric-field control of ferromagnetism*, Nature 408, pp. 944–946, 21-28 Diciembre de 2000. Citado en la página 249.
- 189** Este efecto fue descubierto por G. RIKKEN, B. VAN TIGGELEN & A. SPARENBERG, *Lichtverstrooiing in een magneetveld*, Nederlands tijdschrift voor natuurkunde 63, pp. 67–70, maart 1998. Citado en la página 250.
- 190** VITALIJ PECHARSKY & KARL A. GSCHNEIDNER, *Giant magnetocaloric effect in Gd₅(Si₂Ge₂)*, Physical Review Letters 78, pp. 4494–4497, 1995, y, de los mismos autores, *Tunable magnetic regenerator alloys with a giant magnetocaloric effect for magnetic refrigeration from ~20 to ~2990 K*, Applied Physics Letters 70, p. 3299, 1997. Citado en la página 251.
- 191** J. WEISSMÜLLER, R. N. VISWANATH, D. KRAMER, P. ZIMMER, R. WÜRSCHUM & H. GLEITER, *Charge-induced reversible strain in a metal*, Science 300, pp. 312–315, 11 April 2003. Citado en la página 251.
- 192** A. AJDARI, *Electro-osmosis on inhomogeneously charged surfaces*, Physical Review Letters 75, pp. 755–758, 1995. Citado en la página 252.
- 193** Este efecto fue descubierto por J. N. HUIBERTS, R. GRIESSEN, J. H. RECTOR, R. J. WIJNGARDEN, J. P. DEKKER, D. G. DE GROOT & N. J. KOEMAN, *Yttrium and lanthanum hydride films with switchable optical properties*, Nature 380, pp. 231–234, 1996. Una buena introducción es R. GRIESSEN, *Schaltbare Spiegel aus Metallhydriden*, Physikalische Blätter 53, pp. 1207–1209, 1997. Citado en la página 253.
- 194** M. J. AITKEN, *Thermoluminescence Dating*, Academic Press, 1985. No obstante, la precisión del método es mucho peor que la del fechado por C14, como se demuestra por H. HUPPERTZ, *Thermolumineszenzdatierung: eine methodologische Analyse aufgrund gesicherter Befunde*, Peter Lang Verlag, 2000. Citado en la página 255.
- 195** Consultar cualquier libro de termoestadística, tal como LINDA REICHL, *A Modern Course in Statistical Physics*, Wiley, 2nd edition, 1998. Citado en la página 257.
- 196** El Sol emite unos $4 \cdot 10^{26}$ W con una masa de $2 \cdot 10^{30}$ kg, unos 0,2 mW/kg; una persona con una masa promedio de 75 kg emite alrededor de 100 W (puede comprobarlo usted mismo en la cama por la noche), esto es, unas 500 veces más. Citado en la página 257.

- 197** Ver por ejemplo, J. M. AGUIRREGABIRIA, A. HERNANDEZ & M. RIVAS, *Velocity fields inside a conducting sphere near a slowly moving charge*, American Journal of Physics **62**, pp. 462–466, 1994. Citado en la página [257](#).
- 198** Este ejemplo de la electrodinámica fue descubierto en la década de 1890 y desde entonces se ha explorado con detalle. Puede encontrar numerosos vídeos sobre este fenómeno en Internet, incluso en la bonita página ecfuchs.com/?page=waterbridge, que tiene también una lista de literatura al respecto. Son documentos recientes E. C. FUCHS, M. SAMMER, A. D. WEXLER, P. KUNTKE & J. WOISETSCHLÄGER, *A floating water bridge produces water with excess charge*, Journal of Physics D: Applied Physics **49**, p. 125502, 2016, y A. G. MARÍN & D. LOHSE, *Building water bridges in air: electrohydrodynamics of the floating water bridge*, preimpresión en arxiv.org/abs/1010.4019. Citado en la página [258](#).
- 199** PHILIP COHEN, *Open wide, this won't hurt a bit*, New Scientist p. 5, 3 Febrero de 1996. Citado en la página [258](#).
- 200** Para una lista de referencia sobre piezoelectricidad ósea, consultar la página web silver.neep.wisc.edu/~lakes/BoneElectr.html. Citado en la página [258](#).
- 201** J. E. AVRON, E. BERG, D. GOLDSMITH & A. GORDON, *Is the number of photons a classical invariant?*, European Journal of Physics **20**, pp. 153–159, 1999. Citado en la página [260](#).
- 202** Esto se deduce de las medidas de $g - 2$, como explicó en su discurso el Premio Noble HANS DEHMELT, *Experiments with an isolated subatomic particle at rest*, Reviews of Modern Physics **62**, pp. 525–530, 1990, y en HANS DEHMELT, *Is the electron a composite particle?*, Hyperfine Interactions **81**, pp. 1–3, 1993. Citado en la página [261](#).
- 203** Una buena y corta introducción es el documento de F. RÖHRLICH, *The self-force and radiation reaction*, American Journal of Physics **68**, pp. 1109–1112, 2000. Citado en la página [262](#).
- 204** La distinción entre el pensamiento de ‘sí’ y ‘no’ ya es posible con un simple encefalograma. Para una demostración en vídeo de la diferenciación de conceptos utilizando técnicas de imagen cerebral, ver www.youtube.com/watch?v=JVLu5_hvr8s. Citado en la página [263](#).
- 205** C. G. TSAGAS, *Magnetic tension and the geometry of the universe*, Physical Review Letters **86**, pp. 5421–5424, 2001. Un resumen de este asunto es C. G. TSAGAS, *Geometrical aspects of cosmic magnetic fields*, arxiv.org/abs/gr-qc/0112077. Citado en la página [265](#).
- 206** A. D. ERLYKIN & A. W. WOLFENDALE, *The origin of cosmic rays*, European Journal of Physics **20**, pp. 409–418, 1999, Citado en la página [269](#).
- 207** Consultar por ejemplo, el bonito libro de texto STEPHEN C. STEARNS & ROLF F. HOEKSTRA, *Evolution: An Introduction*, Oxford University Press, 2000. Para una historia fascinante sobre la evolución para no especialistas, ver RICHARD FORTEY, *Life – An Unauthorized Biography*, Harper Collins, 1997, o también MENNO SCHILTHUIZEN, *Frogs, Flies & Dandelions – the Making of Species*, Oxford University Press, 2001. Consultar también STEPHEN J. GOULD, *The Panda's thumb*, W.W. Norton & Co., 1980, uno de los varios libros interesantes e informativos sobre la biología evolutiva por el mejor escritor en este campo. Un resumen informativo sobre los resultados de la evolución, con las muchas ramas del árbol genealógico que ocasiona, viene en la phylogeny.arizona.edu/tree. Sobre los resultados de la evolución de los seres humanos, consultar el informativo texto de K. KUSCH & S. KUSCH, *Der Mensch in Zahlen*, Spektrum Akademischer Verlag, 2nd edn., 2000. El épico libro de CHARLES DARWIN, *On the Origin of Species*, se puede encontrar en la web, por ejemplo en la página darwin-online.org.uk. Citado en la página [272](#).
- 208** Una descripción sencilla es MALCOLM ROSS MACDONALD, *The Origin of Johnny*, Jo-

- nathan Cape, 1976. Ver también BAS HARING, *Kaas en de evolutietheorie*, Houtekiet, 2001. Citado en la página 272.
- 209 RICHARD BANDLER, *Using Your Brain for a Change*, Real People Press, p. 18, 1985. Citado en la página 273.
- 210 Hay desacuerdo entre los expertos sobre el momento preciso de esta experiencia. Para algunos, solamente el nacimiento es sí mismo ese momento. No obstante, existen varios métodos estándar de recuperar recuerdos de la vida temprana, aún del momento antes del nacimiento. Uno de ellos es el de NORBERT J. MAYER, *Der Kainkomplex – neue Wege der systemischen Familientherapie*, Integral Verlag, 1998. Citado en la página 273.
- 211 SANJIDA O'CONNELL, *Mindreading – How We Learn to Love and Lie*, Arrow, 1998. Este interesante libro describe la importancia de *mentir* en el desarrollo de un ser humano, y explica los problemas de aquellos que no pueden leer otras mentes y por tanto no pueden mentir, tales como los autistas. Citado en las páginas 274 y 328.
- 212 El enfoque para describir las observaciones como partes relacionadas se llama *estructuralismo*; El punto de partida de este movimiento fue el de de-Saussures *Cours de linguistique générale* (ver las notas al pie de la página 298). Varios pensadores han tratado de utilizar el mismo enfoque en la teoría de la filosofía, la mitología y la literatura, aunque con menos éxito. Un resumen del (modesto) éxito del estructuralismo en la lingüística y sus fallos en otros campos, es el de L. JACKSON, *The Poverty of Structuralism: Literature and Structuralist Theory*, Longman, 1991. El autor arguye que cuando un sistema se reduce a interacciones, se olvida del contenido específico y de las propiedades de los elementos del sistema, y este enfoque no permite una comprensión completa del sistema bajo estudio. Citado en la página 275.
- 213 Para una visión de las habilidades mentales distintas a las de Piaget (descritas en la página 275), un autor muy discutido actualmente es el soviético psicólogo experimental Lev Vigotsky, cuyas ideas innovadoras y complicada vida son descritas, por ejemplo, en LEV VIGOTSKY, *Mind in Society*, Harvard University Press, 1978, o en RENÉ VAN DER VEER & JAAN VALSINER, *Understanding Vigotsky: a Quest for Synthesis*, Blackwell Publishers, 1994. Un material más abundante se puede encontrar en el extenso trabajo de RENÉ VAN DER VEER & JAAN VALSINGER, *The Vigotsky Reader*, Blackwell, 1994. Citado en la página 275.
- 214 Para más detalles una fuente poco convencional es el bonito texto de BRUNO BETTELHEIM, *The Uses of Enchantment: the Meaning and Importance of Fairy Tales*, Knopf, 1976. Citado en la página 275.
- 215 Una introducción sencilla es MANFRED SPITZER, *Lernen – Gehirnforschung und Schule des Lebens*, Elsevier, 2007. Citado en la página 279.
- 216 Ver el bonito libro de texto de MARTIN TREPEL, *Neuroanatomie: Struktur und Funktion*, Urban & Fischer, 5th edition, 2012. También muestra las partes del cerebro dedicadas a la planificación del movimiento y su control. Citado en la página 279.
- 217 Citado en V. HARLEN, R. RAPPAMANN & P. SCHATA, *Soziale Plastik – Materialien zu Joseph Beuys*, Achberger Verlag, 1984, p. 61. Citado en la página 280.
- 218 Los problemas que aparecen cuando se pierde la capacidad para clasificar o memorizar se relatan en el bonito libro del neurólogo OLIVER SACKS, *The Man Who Mistook His Wife for a Hat*, Picador, 1985, el cual recoge muchos casos estudiados en sus trabajos. Caso más impresionantes son recogidos en su igualmente impresionante texto *An Anthropologist on Mars*, Picador, 1995.
- Ver también el bonito texto de DONALD D. HOFFMAN, *Visual Intelligence – How*

- We Create What We See*, W.W. Norton & Co., 1998, y la página web www.cogsci.uci.edu/~ddhoff asociada a él. Citado en las páginas 280 y 285.
- 219** Para una apasionada introducción a las conexiones entre el lenguaje y el cerebro desde la perspectiva de Chomskian, ver el libro más vendido de STEVEN PINKER, *The Language Instinct – How the Mind Creates Language*, Harper Perennial, 1994. La oración de la idea verde se discute en un capítulo del libro. Citado en las páginas 280, 334 y 356.
- 220** Una introducción a la neurología es JOSEPH LEDOUX, *Synaptic Self: How Our Brains Become Who We Are*, Viking Press, 2002. Citado en la página 280.
- 221** Otra buena introducción al estudio de clasificadores es JAMES A. ANDERSON, *An Introduction to Neural Networks*, MIT Press, 1995. Una introducción a la ciencia de los ordenadores es la de J. GLENN BROOKSHEAR, *Computer Science, An Overview*, 6th edition, Addison Wesley, 2000, o en RICK DECKER & STUART HIRSHFIELD, *The Analytical Engine: An Introduction to Computer Science Using the Internet*, Brooks/Cole Publishers, 1998. Citado en la página 280.
- 222** Un resumen del estado de la investigación en el origen del de los bípedos es el de B. WOOD, *Four legs good, two legs better*, Nature 363, pp. 587–588, 17 Junio de 1983. Citado en la página 280.
- 223** Una buena introducción a las redes neuronales es J. HERTZ, A. KROGH & R. PALMER, *Introduction to the Theory of Neural Computation*, Addison Wesley, 1991. Citado en la página 281.
- 224** Citado por H. EVES, *Mathematical Circles Squared*, Prindle, Weber and Schmidt, 1972. Citado en la página 283.
- 225** K. BAUMGÄRTEL, D. GENOUX, H. WELZL, R. Y. TWEEDIE-CULLEN, K. KOSHIBU, M. LIVINGSTONE-ZATCHEJ, C. MAMIE & I. M. MANSUY, *Control of the establishment of aversive memory by calcineurin and Zif268*, Nature Neuroscience 11, pp. 572–578, 2008. Citado en la página 285.
- 226** Más sobre la conexión entre la entropía y los ordenadores se puede encontrar en la clásica documentación de R. LANDAUER, *Irreversibility and heat generation in the computing process*, IBM Journal of Research and Development 5, pp. 183–191, 1961, y en C. H. BENNETT & R. LANDAUER, *The fundamental physical limits of computation*, Scientific American 253, pp. 48–56, 1985. Citado en la página 287.
- 227** W. H. ZUREK, *Thermodynamic cost of computation, algorithmic complexity and the information metric*, Nature 341, pp. 119–124, 14 August 1989. Citado en la página 287.
- 228** L. SZILARD, *Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen*, Zeitschrift für Physik 53, p. 840, 1929. Este clásico documento se puede consultar en Inglés en los documentos recopilados por Leo Szilard. Citado en la página 287.
- 229** J. J. HOPFIELD, Nature 376, pp. 33–36, 1995. Este artículo de uno de los padres del campo presenta la posibilidad por la que la *sincronización* de las señales nerviosas, en lugar de las frecuencias de disparo generalmente asumidas, podrían llevar información también. Citado en la página 288.
- 230** Los detalles de las propiedades de los patrones de disparo de las neuronas están muy bien descritas en el artículo de M. MAHOWALD & R. DOUGLAS, *A silicon neuron*, Nature 354, pp. 515–518, 19/26 Diciembre de 1991, en el que muestra cómo estimular una conducta eléctrica de la neurona utilizando un circuito de silicio. Citado en la página 288.
- 231** A. MECHELLI, J. T. CRINION, U. NOPPENY, J. O'DOHERTY, J. ASHBURNER,

- R. S. FRACKOWIAK & C. J. PRICE, *Neurolinguistics: structural plasticity in the bilingual brain*, Nature 431, p. 757, 2004. Citado en la página 289.
- 232** La discusión de si el cerebro es o no es superior a un ordenador está bellamente resumida por G. VOLLMER, *Algorithmen, Gehirne, Computer – Was sie können und was sie nicht können, Teil I und Teil II*, Naturwissenschaften 78, p. 481, 1991, y 78, pp. 533–542, 1991. Citado en la página 290.
- 233** T. SEIDEL, *The role of student characteristics in studying micro teaching-learning environments*, Learning Environments Research 9, pp. 253–257, 2006. Citado en la página 291.
- 234** Como introducción, ver K. AMUNTS & al., *BigBrain: an ultrahigh-resolution 3d human brain model*, Science 340, pp. 1472–1475, 2013. Citado en la página 291.
- 235** Los resultados con niños se deben a Niels Birbaumer, los de los artista escénicos a Boris Kleber, ambos en la Universität Tübingen. Hay más información en www.dgfbf.de y en applied-neuroscienc.org. Citado en la página 292.
- 236** J. T. CHOI & A. J. BASTIAN, *Adaptation reveals independent control networks for human walking*, Nature Neuroscience 10, pp. 1055–1062, 2007. Citado en la página 292.
- 237** Una introducción entretenida en la importancia del instinto y el sistema nervios entérico es GIULIA ENDERS, *Darm mit Charme*, Ullstein, 2014. Merece la pena su lectura, la cual contiene referencias interesantes. Citado en la página 293.
- 238** Sobre este aspecto de la investigación del sueño, ver J. MAYER, H. G. SCHUSTER, J. CH. CLAUSSEN & M. MÖLLE, *Corticothalamic projections control synchronization in locally coupled bistable thalamic oscillators*, Physical Review Letters 99, p. 068102, 2007. Citado en la página 293.
- 239** La discusión más famosa sobre el tema es la resumida por J. MADDOX, J. RANDI & W. W. STEWART, *'High-dilution' experiments a delusion*, Nature 334, pp. 287–290, 1988. En particular, fue demostrado que dos investigadores del equipo estaban pagados por una empresa interesada en difundir la desilusión.
Las animaciones claras de la www.physik.fu-berlin.de/en/einrichtungen/ag/ag-netz/movies/water_dynamics/ visualizan la estructura del agua líquida y el movimiento de sus moléculas. Citado en la página 295.
- 240** A. LOUVEAU, I. SMIRNOV, T. J. KEYES, J. D. ECCLES, S. J. ROUHANI, J. D. PESKE, N. C. DERECKI, D. CASTLE, J. W. MANDELL, K. S. LEE, T. H. HARRIS & J. KIPNIS, *Structural and functional features of central nervous system lymphatic vessels*, Nature 523, pp. 337–341, 2015. Citado en la página 295.
- 241** E. KROPFF, J. E. CARMICHAEL, M. -B. MOSER & E. I. MOSER, *Speed cells in the medial entorhinal cortex*, Nature 523, pp. 419–424, 2015. Citado en la página 295.
- 242** K. S. KASSAM, A. R. MARKEY, V. L. CHERKASSKY, G. LOEWENSTEIN & M. A. JUST, *Identifying emotions on the basis of neural activation*, PLoS One 8, p. e66032, 2013, freely available at www.plosone.org. Citado en la página 296.
- 243** Para definiciones ligeramente diferentes y una gran cantidad de otras interesantes informaciones sobre el idioma, vea el bonito libro de DAVID CRYSTAL, *The Cambridge Encyclopedia of Language*, Cambridge University Press, 1987. Citado en la página 298.
- 244** No obstante, el lenguaje con el mayor diccionario disponible es el holandés, con los 40 volúmenes del *Wordenboek der Nederlandsche Taal*, que apareció entre 1864 y 1998. Posee casi 400 000 entradas. Citado en la página 300.
- 245** La lista y el comentario sobre el descubrimiento de los conceptos se debe a la comunicación personal de Anna Wierzbicka. Una larga lista está publicada en su libro *Semantics, Primes and Universals*, Oxford University Press, 1996. Citado en las páginas 302 y 325.

- 246** W. S. HATCHER, *Foundations of Mathematics*, W.B. Saunders Co., 1968. Existe también un artículo de P. J. COHEN & R. HERSCH, *Non-Cantorian set theory*, *Scientific American* 217, pp. 104–116, 1967. Cohen fue el matemático que en 1963 probó que la negación de la hipótesis del continuo podía ser añadida a los axiomas de la teoría de conjuntos y aún produciría una teoría consistente; él llamó a esos conjuntos *no-Cantorianos*. Citado en la página 309.
- 247** Véase el bonito artículo de I. STEWART, *Fair shares for all*, *New Scientist*, pp. 42–46, 17 Junio de 1995. Citado en la página 309.
- 248** Muchos resultados sobre lo infinito están resumidos en el excelente y encantador libro de bolsillo de RUDY RUCKER, *Infinity and the Mind – the Science and Philosophy of the Infinite*, Bantam, 1983. Citado en las páginas 311 y 312.
- 249** La prueba de la independencia de la hipótesis del continuo está en dos partes. Primera, Kurt Gödel probó en 1940 un axioma puede ser añadido de manera consistente a la teoría de conjuntos ZFC de tal manera que la hipótesis del continuo resulta correcta. Posteriormente, en 1963, Paul Cohen probó que un axioma se puede añadir consistentemente a la teoría de conjuntos ZFC de tal manera que la hipótesis del continuo resulta falsa. Citado en la página 311.
- 250** El extraño mundo de la teoría de categorías, a veces llamado la abstracción de todas las abstracciones, se presenta en F. WILLIAM LAWVERE & STEPHEN H. SCHANUEL, *Conceptual Mathematics: a First Introduction to Categories*, Cambridge University Press, 1997. Citado en la página 312.
- 251** Esta división general de las matemáticas se explica muy bien en el texto de PIERRE BASIEUX, *Die Architektur der Mathematik – Denken in Strukturen*, Rororo, 2000. Citado en la página 313.
- 252** UMBERTO PELIZZARI, *L’homme et la mer*, Flammarion, 1994. Sin citas.
- 253** El tema es tratado por TOMÁS DE AQUINO, *Summa Theologica*, en la pregunta 52 de la primera parte. El texto completo, varios miles de páginas, se puede consultar en www.newadvent.org. Volveremos a ello en la parte de la teoría cuántica, en la sección sobre el principio de exclusión de Pauli. Parece que toda la pregunta se remonta a PETER (THE) LOMBARD, *Liber Sententiarum* c. 1150. Citado en la página 314.
- 254** B. C. GALLIVAN, *How to fold paper in half twelve times: an “impossible challenge” solved and explained*, Historical Society of Pomona Valley, 2002, también encontrado en www.osb.net/Pomona/12times.htm. Consultar también www.sciencenews.org/20040124/mathtrek.asp. Citado en la página 314.
- 255** I. STEWART, *Daisy, daisy, give me your answer, do*, *Scientific American*, pp. 76–79, Enero de 1995. Este artículo pedagógico explica cómo el crecimiento de las plantas generalmente produce flores cuyo número de pétalos pertenecen a la serie de Fibonacci 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, etc. (La figura de la página 262 proporciona unos cuantos ejemplos.) Las desviaciones de este caso ideal también son explicadas. El trabajo original se compone de dos artículos de S. DOUADY & Y. COUDER, *La physique des spirales végétales*, *La Recherche* 24, pp. 26–36, 1993, y *Phyllotaxis as a self-organized growth process*, in *Growth Patterns in Physical Sciences and Biology*, edited by J.M. GARCIA-RUIZ & al., Plenum Press, 1993. A pesar de esto y de otras muchas publicaciones sobre la serie de Fibonacci, el argumento se la página 321 muestra que la mayoría de estos documentos se sostienen sobre arena. Citado en las páginas 314, 321 y 322.
- 256** H. DAVSON, *The Eye*, Academic Press, 1962. Citado en las páginas 284 y 315.
- 257** Ver la akbar.marlboro.edu/~mahoney/cube/NxN.txt. Citado en la página 315.

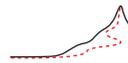
- 258** Como introducción a los número surreales véase el artículo de POLLY SHULMAN, *Infinity plus one, and other surreal numbers*, Discover, pp. 99–105, Diciembre de 1995. También está el texto de D. KNUTH, *Surreal Numbers: How two ex-Students Turned on to Pure Mathematics and Found Total Happiness*, Addison Wesley, 1974, o www-cs-faculty.stanford.edu/~knuth/sn.html. Las referencias citadas sobre el tema incluyen JOHN H. CONWAY, *On Numbers and Games*, Academic Press, 1976, E. R. BERLEKAMP, J. H. CONWAY & R. K. GUY, *Winning Ways for Your Mathematical Plays, Volume I: Games in General*, Academic Press, 1982, and H. GONSHOR, *An Introduction to Surreal Numbers*, Cambridge University Press, 1986. Citado en las páginas 316 y 318.
- 259** Este bonito problema es expuesto por IAN STEWART, *A bundling fool beats the wrap*, Scientific American, pp. 109–111, Junio de 1993. Para cuatro dimensiones, la respuesta se sabe que está entre 50 000 y 100 000, mientras que la respuesta penta-dimensional se conjetura que es ‘nunca’. Citado en la página 318.
- 260** ALFRED TARSKI, *Introduction to Modern Logic*, Dover, 1946. Véase también el famoso libro infantil del matemático y fotógrafo LEWIS CARROLL, *Alice in Wonderland*. Citado en la página 305.
- 261** A. PAIS, *Niels Bohr’s Times: in Physics, Philosophy, and Polity*, Oxford University Press, 1991, page 176. Citado en la página 319.
- 262** EUGENE WIGNER, *Symmetries and Reflections*, Indiana University Press, 1962. Citado en la página 319.
- 263** GÖRAN WIKELL, *The layout of digits on pushbutton telephones – a review of the literature*, Tele 34, pp. 34–42, 1982. Citado en la página 321.
- 264** Un claro resumen de filosofía y ciencia, generalmente conocido como *epistemología*, sin detalles innecesarios, lo proporciona ROBERT BLANCHÉ, *L’Epistémologie*, Presses Universitaires de France, 1972. Citado en la página 323.
- 265** Sobre los diferentes aspectos de la falta de fiabilidad de las declaraciones generales es común citar el trabajo del epistemólogo Karl Popper (b. 1902 Vienna, d. 1994 London), especialmente su extenso y aburrido libro *Logik der Forschung*, publicado por primera vez en 1934. La razón para este aburrimiento es que el trabajo de Popper es simplemente que es un calentamiento de las ideas de Pierre Duhem. Citado en la página 330.
- 266** Para una buen forma de conseguir que la sangre se licue, ver L. GARLASCHELLI, F. RAMACCINI & S. DELLA SCALA, *Working bloody miracles*, Nature 353, p. 507, 1991. El *Grand dictionnaire universel du XIXe siècle*, de PIERRE LAROUSSE, también contiene una receta; fue de nuevo mostrado al público en la década de 1980 por Henri Broch. Un bonito y clasico texto es el de HARRY HOUDINI, *Miracle Mongers and their Methods*, Prometheus Books, Buffalo, 1981. El original, escrito en 1920, por el famoso mago conocido como ‘El Gran Houdini’, está ambién disponible en la etext.lib.virginia.edu/toc/modeng/public/HouMirM.html. La leche bebida por las estatuas indias fueron corrientes alrededor del mundo en 1994 y 1995. Sobre curanderros, ver JAMES RANDI, *Flim-flam!*, Prometheus Books, Buffalo, New York, 1987, y el exquisito libro de HANS CONRAD ZANDER, *Warum ich Jesus nicht leiden kann*, Rowohlt, 1994. Citado en la página 331.
- 267** JOHN HORGAN, *The End of Science – Facing the Limits of Knowledge in the Twilight of the Scientific Age*, Broadway Books, 1997, pp. 31–32, y capítulo 2, nota 2. Citado en las páginas 333 y 354.
- 268** Para un opinión completamente contraria a la descrita aquí, vea el libro de GREGORY J. CHAITIN, *The Limits of Mathematics*, Springer Verlag, 1997, que también lo puede encontrar en el sitio web del autor en la www.cs.auckland.ac.nz/CDMTCS/chaitin/

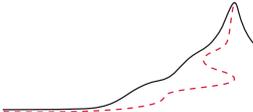
- [lm.html](#), junto con sus otros trabajos. Chaitin ha dedicado la mayoría de su vida a las cuestiones presentadas en esta sección, especialmente sobre computabilidad. Citado en la página 334.
- 269** Véase el libro de J. BARWISE & J. ETCHEMENDY, *The Liar*, Oxford University Press, New York, 1987. Citado en la página 334.
- 270** DEMOSTHENES, *Third Olynthiac*, sección 19. Citado en la página 335.
- 271** Esta definición (declaración 4.11) y muchas otras declaraciones sobre ciencia se encuentran en el bonito y merecidamente famoso texto de LUDWIG WITTGENSTEIN, *Tractatus logico-philosophicus*, Edition Suhrkamp, 1963. En él se proporciona un resumen condensado de las bases de la ciencia, el pensamiento y el lenguaje en una colección de sentencias latamente estructuradas y numeradas. Citado en las páginas 341 y 346.
- 272** Ver M. DRESDEN, *The Klopsteg memorial lecture*, American Journal of Physics 66, pp. 468–482, 1998. Citado en la página 342.
- 273** Son bien conocidos los libros de, por ejemplo, FRIEDRICH KOHLRAUSCH, *Praktische Physik*, Teubner, 24. Auflage, 1996. Citado en la página 341.
- 274** Los resultados están descritos, por ejemplo, en L. BERGMANN & C. SCHÄFER, *Lehrbuch der Experimentalphysik*, Band I, II, III und IV, W. de Gruyter. Citado en la página 341.
- 275** LANDOLT-BÖRNSTEIN, editado por K. -H. HELLWEGE & O. MADELUNG, *Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik*, Neue Serie, Springer Verlag, Berlin, 1984. Esta serie de más de cien volúmenes contiene todas las observaciones importantes del dominio de la física. Citado en la página 342.
- 276** El origen de esta incorrecta atribución se encuentra en el libro de GERHARD SZCZESNY, *Brecht, Leben des Galilei – Dichtung und Wirklichkeit*, Ullstein, Berlin 1966, p. 6. La declaración nunca fue hecha por Galileo; este asunto ha sido discutido extensamente en círculos de especialista, por ejemplo, por F. KLEINERT, “Messen was meßbar ist” - *Über ein angebliches Galilei-Zitat*, Berichte zur Wissenschaftsgeschichte 11, p. 221, 1988, o en Internet por Peter Jaencke. Citado en la página 341.
- 277** Las extrañas y a veces peligrosas consecuencias de las creencias, se puede encontrar en, por ejemplo, MARTIN GARDNER, *Fads and Fallacies*, Dover, 1957, y en JAMES RANDI, *Faith Healers*, Prometheus Books, 1989. El premio del millón de dólares por demostrar cualquier efecto paranormal está disponible en su sitio web www.randi.org. Citado en la página 347.
- 278** Véase la bonita colección de manivelas en la página web www.crank.net. Citado en la página 347.
- 279** Resulta interesante observar que la mayoría de los modernos teólogos, en la era de Internet, evitan repetir esas antiguas e incorrectas creencias y colgarlas online. Citado en la página 348.
- 280** La visión opuesta sobre la emergencia de las propiedades está fuertemente defendida en el libro de ROBERT LAUGHLIN, *A Different Universe: Reinventing Physics from the Bottom Down* Basic Books, 2005, o por P. JENSEN, *Particle physics and our everyday world*, Physics Today pp. 58–59, July 1998. Sus convicciones merecen la pena ser tenidas en cuenta. Citado en la página 349.
- 281** Véase la página 133 de la bibliografía de JOHN BOWLBY, *Charles Darwin*, Pimlico, 1991. Citado en la página 349.
- 282** ROGER PENROSE, *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*, Jonathan Cape, 2004, page 378. Citado en la página 354.
- 283** Una bonita introducción a la filosofía griega es la de EDUARD ZELLER, *Outlines of the History of Greek Philosophy*, Dover, 1980, una reimpresión de un libro publicado en 1928. Entre

- otros, presenta una clara exposición de la filosofía de Demócrito y de otros presocráticos. Citado en la página 354.
- 284** La famosa referencia se encuentra al principio del capítulo XI, 'El Universo Físico', en ARTHUR EDDINGTON, *The Philosophy of Physical Science*, Cambridge, 1939. Citado en la página 354.
- 285** GIUSEPPE FUMAGALLI, *Chi l'ha detto?*, Hoepli, Milano, 1983. Citado en la página 356.
- 286** Ver JEAN-PAUL DUMONT, *Les écoles présocratiques*, Folio Essais, Gallimard, p. 653, 1991. Citado en la página 357.
- 287** Para un bonito texto sobre los fractales, ver HEINZ-OTTO PEITGEN, HARTMUT JÜRGENS & DIETMAR SAUPE, *Fractals for the Classroom*, Springer Verlag, 1992, pp. 232–245. También está disponible en diversos idiomas. Citado en la página 359.
- 288** Como ha sido señalado por René Descartes. Citado en la página 362.
- 289** La famosa resonancia del carbono ^{12}C fue encontrada por Willy Fowler, como se describe en E. MARGARET BURBRIDGE, G. R. BURBRIDGE, W. A. FOWLER & F. HOYLE, *Synthesis of the elements in stars*, *Reviews of Modern Physics* 29, pp. 547–560, 1957. Citado en la página 364.
- 290** Una amplia descripción del tema viene dada en el grueso libro de JOHN D. BARROW & FRANK J. TIPLER, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press, 1986. El término es sí mismo se debe a Brandon Carter, quien lo acuñó en 1973 y lo presentó en un simposium dedicado al 500 aniversario de Nicolás Copérnico. Para más literatura, ver YURI I. BALASHOV, *Resource Letter AP-1: the anthropic principle*, *American Journal of Physics* 59, pp. 1069–1076, 1991. Citado en la página 364.
- 291** VOLTAIRE, *Candide ou l'optimisme*, 1759. Véase también la nota al pie de la página 272 del volumen I. El libro es tan bueno que la aduana de los EEUU lo estuvo requisando hasta 1930, y los servicios postales rehusaban transportarlo hasta 1944. Para más detalles, utilizar como argumento de búsqueda 'banned books online' (libros prohibidos online) en la 'www'. Citado en la página 365.
- 292** El número de libros sobre la conciencia es grande y los contenidos no siempre son interesantes, y frecuentemente no están basados en hechos, como se muestra en KARL R. POPPER & JOHN ECCLES, *The Self and its Brain – an Argument for Interactionism*, Rutledge, 1993. Citado en la página 366.
- 293** Ver, por ejemplo, la *Encyclopedia Britannica*, Macropaedia, en la entrada sobre conducta animal. Citado en la página 367.
- 294** Una introducción directa e informativa al trabajo y las ideas de Joseph Beuys (en Alemán) es la de RENATE GEORGI, *Joseph Beuys*, RAAbits Kunst, Raabe Fachverlag, September 1996. Citado en la página 367.
- 295** Dos estudios, uno de R.P. EBSTEIN & al., *Dopamine D4 receptor (D4DR) exon III polymorphism associated with human personality trait of novelty seeking*, *Nature Genetics* 12, pp. 78–80, Enero de 1996, y otro de J. BENJAMIN & al., *Population and familial association between the D4 dopamine receptor gene and measures of novelty seeking*, *Nature Genetics* 12, pp. 81–84, Enero de 1996, encontraron que las personas con una forma especial del gen receptor de dopamina D4, o D4DR, son más propensos a la búsqueda de novedades que las personas con la forma general. El gen D4DR regula la formación de los receptores de dopamina, un mensajero químico del cerebro que ha sido considerado durante algún tiempo como candidato a la sustancia involucrada con la propensión a la búsqueda de novedades. Citado en la página 368.

- 296** ver JACQUES HADAMARD, *The Mathematician's Mind – The Psychology of Invention in the Mathematical Field*, Princeton Science Library, 1996. Para una perspectiva moderna, ver PIERRE DE GENNES, *Fragile Objects: Soft Matter, Hard Science, and the Thrill of Discovery*, Springer, 1996. donde de Gennes critica determinados sistemas educativos que ponen mucha más presión en las matemáticas, destruyendo por tanto la creatividad. Citado en la página 368.
- 297** Voltaire lo escribe en su *Catalogue pour la plupart des écrivains français qui ont paru dans Le Siècle de Louis XIV, pour servir à l'histoire littéraire de ce temps* (1752). Citado en la página 369.
- 298** Este es el hermoso folleto de BERT HELLINGER, *Verdichtetes*, Carl-Auer Systeme Verlag, 1996. Citado en la página 369.
- 299** Por ejemplo, se necesita valor para encarar la envidia. Sobre este asunto consultar el texto clásico de HELMUT SCHOECK, *Der Neid*, 1966, publicado en Inglés como *Envy: A Theory of Social Behavior*, 1969. Es un trabajo estándar en este campo. Citado en la página 369.
- 300** BILL MCGUIRE, *A Guide to the End of the World: Everything You Never Wanted to Know*, Oxford University Press, 2002. Sobre pasados desastres, véase la introducción de TONY HALLAM, *Catastrophes and Lesser Calamities – the Causes of Mass Extinctions*, Oxford University Press, 2004. Citado en la página 375.
- 301** *Le Système International d'Unités*, Bureau International des Poids et Mesures, Pavillon de Breteuil, Parc de Saint Cloud, 92310 Sèvres, France. Todos los nuevos desarrollos concernientes a unidades SI están publicados en periódico *Metrologia*, editado por el mismo cuerpo. Mostrando el lento ritmo de una vieja institución, la BIPM no lanzó un sitio web hasta 1998; ahora está asequible en www.bipm.fr. Consultar también la página www.utc.fr/~tthomass/Themes/Unites/index.html; ésta incluye las biografías de las personas que dieron sus nombres a varias de las unidades. El sitio de su equivalente británico, www.npl.co.uk/npl/reference, es mucho mejor; proporciona muchos detalles además de las definiciones en Inglés de las unidades del SI. Citado en la página 381.
- 302** La biblia en el campo de la medida del tiempo es un trabajo en dos volúmenes de J. VANIER & C. AUDOIN, *The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards*, Adam Hilge, 1989. Una cuenta popular es TONY JONES, *Splitting the Second*, Institute of Physics Publishing, 2000.
El sitio opdafl.obspm.fr/www/lexique.html proporciona un glosario de los términos utilizados en el campo. Para medidas de *longitud* con precisión, las herramientas elegidas son láseres especiales, como los láseres de modo bloqueado y de peines de frecuencia. Existe una enorme literatura sobre estos asuntos. Igualmente extensa es la literatura sobre la precisión de las medidas de la *corriente eléctrica*; hay una carrera en marcha por la mejor manera de hacerlo; contando las cargas o midiendo las fuerzas magnéticas. El asunto, todavía está abierto. Sobre las medidas de la *masa* y de la masa atómica, consultar el Volumen II, página 66. Sobre medidas de alta precisión de la *temperatura*, consultar el Volumen I, página 584. Citado en la página 382.
- 303** Los prefijos no oficiales del SI fueron propuestos por primera vez en la década de 1990 por Jeff K. Aronson de la University of Oxford, y puede que sean de uso general en el futuro. Ver *New Scientist* 144, p. 81, 3 Diciembre de 1994. También existen otras propuestas menos serias. Citado en la página 383.
- 304** Los distintos conceptos todavía son un asunto de un estándar internacional separado, ISO 5725, con el título *Accuracy and precision of measurement methods and results*. Una buena introducción es JOHN R. TAYLOR, *An Introduction to Error Analysis: the Study of Uncertainties in Physical Measurements*, 2nd edition, University Science Books, Sausalito, 1997.

- Citado en la página 385.
- 305** P. J. MOHR & B. N. TAYLOR, *CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 1998*, *Reviews of Modern Physics* 59, p. 351, 2000. Este es el conjunto resultante de constantes de un ajuste internacional recomendado para el uso intrnacional por el Committee on Data for Science and Technology (CODATA), un cuerpo del International Council of Scientific Unions, que los trae junto al International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP), el International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) y otras organizaciones. La página web de la IUPAC es www.iupac.org. Citado en la página 387.
- 306** Algunas de las historias se pueden encontrar en el texto de N. W. WISE, *The Values of Precision*, Princeton University Press, 1994. El campo de las medidas de alta precisión, de donde provienen los resultados de estas páginas, es un mundo en sí mismo. Una bella introducción a él es J. D. FAIRBANKS, B. S. DEEVER, C. W. EVERITT & P. F. MICHAELSON, eds., *Near Zero: Frontiers of Physics*, Freeman, 1988. Citado en la página 387.
- 307** Para detalles consultar también la bien conocida referencia astronómica, P. KENNETH SEIDELMANN, *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*, 1992. Citado en la página 392.
- 308** Consulte la referencia correspondiente en el primer volumen. Citado en la página 394.





CRÉDITOS

RECONOCIMIENTOS

Muchas personas que han mantenido vivo el regalo de su curiosidad han prestado su ayuda para hacer que este proyecto se convirtiera en una realidad. Sobre todo, Peter Rudolph y Saverio Pascazio han sido - presentes o no - una referencia constante para la realización del mismo. Fernand Mayné, Anna Koolen, Ata Masafumi, Roberto Crespi, Serge Pahaut, Luca Bombelli, Herman Elswijk, Marcel Krijn, Marc de Jong, Martin van der Mark, Kim Jalink, mis padres Peter e Isabella Schiller, Mike van Wijk, Renate Georgi, Paul Tegelaar, Barbara y Edgar Augel, M. Jamil, Ron Murdock, Carol Pritchard, Richard Hoffman, Stephan Schiller, Franz Aichinger y, sobre todo, mi esposa Britta me han proporcionado valiosos consejos y estímulos.

Mucha gente ha proporcionado ayuda en el mismo, así como en el acopio de material. De máxima utilidad fue la ayuda de Mikael Johansson, Bruno Barberi Gnecco, Lothar Beyer, las numerosas mejoras de Bert Sierra, las sugerencias detalladas de Claudio Farinati, las muchas mejoras de Eric Sheldon, las detalladas sugerencias de Andrew Young, - ver también su extenso, informativo y austero sitio web mintaka.sdsu.edu/GF - la continua ayuda y consejo de Jonatan Kelu, las correcciones de Elmar Bartel, y en particular la extensa, apasionada y meticulosa ayuda de Adrian Kubala. Agradecemos al Prof. Padilla Gálvez su beneplácito para utilizar en esta obra su traducción al español de los aforismos de Wittgenstein.

Material de importancia fue proporcionado por Bert Peeters, Anna Wierzbicka, William Beaty, Jim Carr, John Merrit, John Baez, Frank DiFilippo, Jonathan Scott, Jon Thaler, Luca Bombelli, Douglas Singleton, George McQuarry, Tilman Hausherr, Brian Oberquell, Peer Zalm, Martin van der Mark, Vladimir Surdin, Julia Simon, Antonio Fermani, Don Page, Stephen Haley, Peter Mayr, Allan Hayes, Norbert Dragon, Igor Ivanov, Doug Renselle, Wim de Muynck, Steve Carlip, Tom Bruce, Ryan Budney, Gary Ruben, Chris Hillman, Olivier Glassey, Jochen Greiner, squark, Martin Hardcastle, Mark Biggar, Pavel Kuzin, Douglas Brebner, Luciano Lombardi, Franco Bagnoli, Lukas Fabian Moser, Dejan Corovic, Paul Vannoni, John Haber, Saverio Pascazio, Klaus Finkenzeller, Leo Volin, Jeff Aronson, Roggie Boone, Lawrence Tuppen, Quentin David Jones, Arnaldo Uguzzoni, Frans van Nieuwpoort, Alan Mahoney, Britta Schiller, Petr Danecek, Ingo Thies, Vitaliy Solomatin, Carl Offner, Nuno Proença, Elena Colazingari, Paula Henderson, Daniel Darre, Wolfgang Rankl, John Heumann, Joseph Kiss, Martha Weiss, Antonio González, Antonio Martos, André Slabber, Ferdinand Bautista, Zoltán Gácsi, Pat Furrie, Michael Reppisch, Enrico Pasi, Thomas Köppe, Martin Rivas, Herman Beeksma, Tom Helmond, John Brandes, Vlad Tarko, Nadia Murillo, Ciprian Dobra, Romano Perini, Harald van Lintel, Andrea Conti, François Belfort, Dirk Van de Moortel, Heinrich Neumaier, Jarosław Królikowski, John Dahlman, Fathi Namouni, Paul Townsend, Sergei Emelin, Freeman Dyson, S.R. Madhu Rao, David Parks, Jürgen Janek, Daniel Huber, Alfons Buchmann, William Purves, Pietro Redondi, Andrew Young, Dammoun Saghian, Zach Joseph Espiritu, Wladimir Egorov, Markus Zecherle, Miles Mutka, además de una serie de personas que prefieren permanecer en el anonimato. Las herramientas de software fueron pulidas con una gran ayuda sobre tipografía y composición tipográfica por Michael

Zedler y Achim Blumensath y con el repetido e inestimable soporte de Donald Arseneau; igualmente han ayudado Ulrike Fischer, Piet van Oostrum, Gerben Wierda, Klaus Böhncke, Craig Upright, Herbert Voss, Andrew Trevorrow, Danie Els, Heiko Oberdiek, Sebastian Rahtz, Don Story, Vincent Darley, Johan Linde, Joseph Hertzlinger, Rick Zaccane, John Warkentin, Ulrich Diez, Uwe Siart, Will Robertson, Joseph Wright, Enrico Gregorio, Rolf Niepraschk, Alexander Grahn,

La composición y diseño del libro se debe a la consultoría profesional de Ulrich Dirr. La tipografía fue muy mejorada con la ayuda de Johannes Küster y su tamaño de letra Minion Math. El diseño del libro y su página web también se debe en gran parte a las sugerencias y el soporte de my esposa Britta.

También doy las gracias a los legisladores y a los contribuyentes en Alemania, quienes, en contraste con la mayor parte de los demás países del mundo, permiten a los residentes el uso de las bibliotecas universitarias locales.

Desde 2007 hasta 2011, la edición electrónica y la distribución del texto de La Montaña en Movimiento fue generosamente financiada por la Klaus Tschira Foundation.

CRÉDITOS DE PELÍCULAS

Las animaciones de una onda electromagnética plana de la [página 107](#) son copyright y cortesía de Thomas Weiland y han sido obtenidas de su página web www.temf.de en el Technische Universität Darmstadt. Las animaciones de una onda polarizada de la [página 125](#) son copyright y cortesía de José Antonio Díaz Navas. La animación del campo electromagnético emitido por una carga oscilante de la [página 127](#) es copyright y cortesía de Daniel Schroeder. Algún día la publicará en su sitio web physics.weber.edu/schroeder/mrr/MRRtalk.html. La animación del campo electromagnético emitido por un dipolo oscilante de la [página 127](#) es copyright y cortesía de Daniel Weiskopf y se puede encontrar en su página web www.vis.uni-stuttgart.de/~weiskopf. La animación de una velocidad de grupo en la [página 144](#) y la de refracción en la [página 171](#) son copyright de la ISVR, University of Southampton, y cortesía de Steve Elliot. Ambas se pueden encontrar en el sitio web www.isvr.soton.ac.uk. La impresionante película de un pulso de luz que rebota en un espejo de la [página 158](#) – también en el volumen II – es copyright y cortesía de Wang Lihong y Washington University at St. Louis. La fascinante película del ritmo cardíaco del embrión de un ratón de la [página 201](#) es copyright y cortesía de Kyrill Larin y se encuentra en su página web en bol.egr.uh.edu.

CRÉDITOS DE IMÁGENES

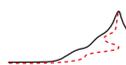
La fotografía de la parte este del pico Langtang Lirung en los Himalayas Nepaleses, mostrados en la cubierta anterior, es cortesía y copyright de Kevin Hite y se encuentra en su blog thegettingthere.com. La fotografía de un arcoíris circular de la [página 15](#) es copyright y cortesía de Oat Vaiya-boon, y tomada de su colección; su sitio web es hangingpixels.com. Las fotografías de objetos de la [página 17](#) son cortesía de Wikimedia y Royal Philips Electronics. La fotografía del efecto de un peine frotado sobre el agua de la [página 17](#) es copyright y cortesía de Robert Fritzius y se encuentra en su sitio web www.datasync.com/~rsfl/fun/bend-w.htm. Las fotografías de las líneas de campo eléctrico de la [página 20](#) son copyright y cortesía de Eli Sidman, del Technical Service Group of the Massachusetts Institute of Technology, y se encuentran en el sitio web del grupo en tsgphysics.mit.edu. Los innovadores gráficos por ordenador de los campos eléctricos de la [página 20](#) son copyright y cortesía del grupo TEAL en MIT, y se encuentran en su sitio web web.mit.edu/8.02t/www/802TEAL3D/visualizations/guidedtour/Tour.htm. La fotografía del rayo de la [página 21](#) es copyright de Steven Horsburgh (véase www.horsburgh.com) y ha sido utilizada con su permiso. La fotografía del generador de Kelvin de la [página 22](#) es cortesía y copyright de

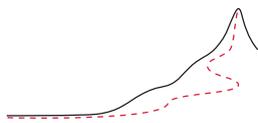
Harald Chmela y ha sido tomada de su sitio web www.hcrs.at. La imagen del experimento de la conservación de carga de la [página 24](#) es copyright y cortesía de Wolfgang Rueckner. En la [página 25](#), la fotografía del electrómetro del bote de mermelada es cortesía y copyright de Harald Chmela y ha sido tomada de su sitio web www.hcrs.at; La fotografía de un tiburón blanco es copyright y cortesía de Klaus Jost y se encuentra en su bonito sitio web en www.jostimages.com; la fotografía del electrómetro digital es cortesía y copyright de Advantest. En la [página 32](#), todas las fotografías excepto una son cortesía de Wikimedia; La fotografía de la célula solar es copyright y cortesía de Q-Cells. En la [página 38](#), la mayor parte de las fotografías son cortesía de Wikimedia; la fotografía de las galaxias es cortesía y copyright Anthony Ayiomamitis, la fotografía del Sol es cortesía de la NASA. En la [página 39](#), las fotografías de las líneas de campo magnético son cortesía de Wikimedia; los gráficos por ordenador son cortesía y copyright de MIT. En la [página 42](#), la fotografía de la paloma es cortesía y copyright del Institute of Molecular Pathology de Viena. La fotografía de *M. bavaricum* en la [página 45](#) es copyright de Marianne Hanzlik y es cortesía de Nicolai Petersen. En la [página 46](#), las fotografías de los motores eléctricos y del galvanómetro son cortesía de Wikimedia; las fotografías del motor eléctrico moderno es cortesía y copyright de Honda. Las imágenes de la bobina de Tesla de la [página 61](#) son cortesía y copyright de Robert Billon, y se encuentran en su sitio web f3wm.free.fr. La fotografía del pelo electrificado en el parque, de la [página 64](#), es cortesía y copyright de Evan Keller y se encuentra en su sitio web www.flickr.com/photos/evankeller. Las visualizaciones de almacenamiento magnético mostradas en la [página 65](#) son copyright y cortesía de Hendryk Richert y se encuentran en el sitio web de su empresa en www.matesy.de. El rifle de Gauss de la [página 66](#) es cortesía y copyright de Simon Quellen Field y se encuentra en su sitio web www.sci-toys.com. En la [página 67](#), la foto de Robert Krampf es cortesía de Wikimedia. En la [página 68](#), la fotografía del globo de plasma es cortesía y copyright de Philip Evans. La fotografía de un elevador en la [página 69](#) es cortesía y copyright de Jean-Louis Naudin; se puede encontrar más información en su sitio web www.jlnlabs.org. La figura oceánica de la [página 69](#) es cortesía de Stefan Maus, y está tomada de su sitio web www.gfz-potsdam.de/pb2/pb23/SatMag/ocean_tides.html. En la [página 70](#), las imágenes del entorno magnético de la Tierra son cortesía de la NASA. La fotografía del motor de la [página 72](#) es cortesía y copyright de Stefan Kluge. La fotografía del modelo de cama flotante de la [página 75](#) y de los gráficos por ordenador de la imaginaria cama flotante a tamaño completo son cortesía y copyright de Janjaap Ruissenars en la www.UniverseArchitecture.com. El cómic de la [página 79](#) es cortesía y copyright de Randall Munroe, y se encuentra en su sitio web xkcd.com. En la [página 79](#), las imágenes de permitividad son copyright de Kenneth Mauritz and courtesy of Wikimedia. En la [página 58](#), los gráficos de los nervios son copyright y cortesía de Thomas Heimburg y Wiley-VCH. La imagen del arcoíris de la [página 97](#) es del sitio web de la NOAA. En la [página 102](#), la fotografía del control por pensamiento son copyright y cortesía de Fraunhofer FIRST. La fotografía del prisma de las [página 106](#) y la [página 135](#) es de Susan Schwartzenberg y cortesía y copyright de Exploratorium, se encuentra en www.exploratorium.edu. En la [página 108](#), la fotografía de Heinrich Hertz es cortesía de Wikimedia. En la [página 108](#), la fotografía de los transmisores y receptores reconstruidos son copyright y cortesía de la Fondazione Guglielmo Marconi. Las fotografías del bonito control remoto sencillo mostrado en la [página 109](#) son copyright y cortesía de Guido Pegna, y se encuentran en su sitio web www.pegna.com. La imagen del dedo de la [página 110](#) es copyright y cortesía de Chuck Bueter y se encuentra en su instructivo sitio web old.transitofvenus.org. La imagen del arcoíris secundario de la [página 111](#) es cortesía y copyright de Antonio Martos. La imagen del arcoíris supernumerario de la [página 111](#) es cortesía y copyright de Wolfgang Hinz y de su sitio web www.meteoros.de. En la [página 112](#), el gráfico de medida es cortesía y copyright del Nature Publishing Group. La imagen de interferencia en la guitarra de la [página 113](#) es copyright y cortesía de Bernard Richardson de la Cardiff University. La imagen de interferencia del espejo del telescopio es copyright y cortesía de Mel Bartels y se puede encontrar en su sitio www.

bbastrodesigns.com. La imagen del patrón moteado es copyright y cortesía de Epzcaw y se encuentra en Wikimedia Commons. Las imágenes de los patrones producidos por la doble rendija son copyright y cortesía de Dietrich Zawischa y se encuentran en su sitio web sobre la belleza y la ciencia en www.itp.uni-hannover.de/~zawischa. La imagen combinada de infrarrojo y luz visible de un arcoíris de la [página 114](#) es cortesía y copyright de la colección de Stefan Zeiger en la www.photo.net/photodb/member-photos?include=all&user_id=439012. En la [página 120](#), las fotografías de antenas son copias de Martin Abegglen y K. Krallis y son cortesía de Wikimedia. Las fotografías de la birrefringencia de la [página 121](#) son copyright y cortesía de Roger Weller, de su sitio web skywalker.cochise.edu/wellerr/mineral/calcite/calcite1.htm, Brad Amos, de su sitio web homepage.ntlworld.com/w.amos2/BradAmos'sWebsite, y Martin Pietralla, de su material de lectura. El patrón de la polarización del cielo de la [página 122](#) se debe a Keram Pfeiffer y la cortesía de Elsevier; se puede encontrar en [Ref. 66](#). La imagen sobre la medida de campo de luz de la [página 116](#) es cortesía y copyright de L. (Kobus) Kuipers. Las fotografías de las camas de agua levitando mostradas en la [página 130](#) son cortesía y copyright de Mark Raizen y Tongcang Li. La fotografía del cometa McNaught de la [página 131](#) es cortesía y copyright de Flagstaffotos. La fotografía de nanotubos de carbono girando de la [página 133](#) es cortesía de A.C. Ferrari y está tomada del documento [Ref. 79](#). En la [página 133](#), la fotografía de cómo los paraguas descomponen la luz blanca es cortesía de Wikimedia. La fotografía del destellos verde solar de la [página 137](#) es copyright y cortesía de Andrew Young y parte de su extensa y fascinante sitio web en mintaka.sdsu.edu/GF; la fotografía del destello verde lunar es copyright y cortesía de Laurent Laveder y tomada de su bonito sitio en www.PixHeaven.net. La imagen de agua lechosa de la [página 137](#) fue realizada para su texto y es copyright de Antonio Martos. En la [página 138](#), los gráficos del espacio de color son copyright y cortesía de SharkD. El libro de colores de la [página 139](#) es copyright y cortesía de Tauba Auerbach; se puede encontrar en su bonito sitio web taubaauebach.com. El arcoíris de la [página 140](#) es copyright y cortesía de Denis Betsch y se puede encontrar en www.atoptics.co.uk/fz696.htm. La fotografía del arco de niebla de la [página 141](#) es cortesía y copyright de Michel Tournay, y se puede encontrar en su sitio web www.spacew.com/gallery/MichelTournay. La fotografía de un arcoíris dividido de la [página 141](#) es cortesía y copyright de Eva Seidenfaden, y se puede encontrar en su sitio web www.paraselen.de. La fotografía del arcoíris séxtuple de la [página 141](#) es cortesía y copyright de Terje Nordvik, y se puede encontrar en antwrrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap070912.html. La fotografía del arcoíris rojo de la [página 141](#) es cortesía y copyright de Zhu XiaoJin, y se puede encontrar en su colección en www.cs.cmu.edu/~zhuxj/astro/. La fotografía del arcoíris de Luna de la [página 141](#) es cortesía y copyright de Laurent Laveder, y se puede encontrar en su colección en la www.pixheaven.net. La fotografía de los perihelios de la [página 142](#) es cortesía y copyright de Phil Appleton y se encuentra en su sitio web www.astronet.ru/db/xware/msg/1174325/solsticehalo_appleton.jpg.html. La fotografía del arco circuncenital de la [página 143](#) es cortesía y copyright de Paul Gitto. La fotografía del interferómetro de Mach-Zehnder de la [página 150](#) es copyright y cortesía de Félix Dieu y Gaël Osowiecki y se encuentra en sus sitios web www.flickr.com/photos/felixdieu/sets/72157622768433934/ y www.flickr.com/photos/gaeloso/sets/72157623165826538/. La imagen de Rayos-X de una mano de la [página 157](#) es copyright de Drgnu23 y cortesía de Wikimedia. En la [página 159](#), es espectro solar es cortesía y copyright de Chris Gueymard, el principal experto mundial en espectros solares. La imagen del horno al roo vivo de la [página 162](#) es copyright y cortesía de Wolfgang Rueckner. La fotografía de horno solar de la [página 162](#) es cortesía y copyright de Gerhard Weinrebe. En la [página 164](#), la fotografía de la planta de energía solar es cortesía de Wikimedia. En la [página 166](#), las fotografías de un láser y de una fuente de Rayos-X son cortesía y copyright de Time-Bandwidth y SPECS. La fotografía del pez fantasma de la [página 168](#) es cortesía y copyright de Tamara Frank, y se encuentra en su sitio web www.flickr.com/photos/gioischia/. En la [página 169](#), la fotografía de espejos concéntricos es cortesía y copyright de Media Lario Technologies. La fotografía del rayo de luz

doblado de la [página 170](#) es cortesía y copyright 2003 de Jennifer Nierer. Los gráficos del vaso de agua de la [página 171](#) son cortesía y copyright 2003 de Robin Wood, y se encuentran en su sitio web www.robinwood.com. Las imágenes de la ilusión de una flecha de la [página 171](#) son cortesía y copyright de Maric Vladimir; Han sido tomadas de una película corta encontrada en su canal de youtube en www.youtube.com/user/maricv84/videos. La fotografía de un espejismo superior de la [página 173](#) es cortesía y copyright de Thomas Hogan y se encuentra en su sitio web home.centurytel.net/Arkcite/looming.htm. La fotografía de un espejismo inferior de la [página 173](#) es cortesía y copyright de Andy Barson y se encuentra en su sitio web www.andybarson.co.uk. Las imágenes de espejismos de la [página 174](#) son copyright y cortesía de Nicola Petrolino y de Mila Zinkova, las imágenes de espejismos de la [página 175](#) son copyright y cortesía de Olaf Schneider, encontradas en blog.olafschneider.de/2013/04/, y de Gerold Prenger y encontradas en la www.fotocommunity.de/photo/luftspiegelung-gerold-prenger/21508949. Las imágenes formadas por lentes de la [página 177](#) son copyright y cortesía de Eric Kirchner y encontradas en sus documentos citados en el texto. La foto de una gloria de la [página 178](#) es copyright de Brocken Inaglory y cortesía de Wikimedia Commons. Las fotografías sobre las fibras ópticas de la [página 180](#) son copyright y cortesía de NOAA, Hochschule Mittweida y de Schott. El dibujo de un metamaterial de la [página 182](#) es copyright y cortesía de la IEEE y de Michael Zedler. La foto de la mancha de Poisson de la [página 184](#) es cortesía y copyright de Christopher Jones, y está tomada de su sitio web www.union.edu/PUBLIC/PHYDEPT/jonesc/scientific_photos.htm. En la [página 185](#), las imágenes son cortesía y copyright de Jenoptik, Wikimedia y de Jeff Sherman. La imagen microscópica de la [página 185](#) es copyright y cortesía de Stefan Hell. Las imágenes de Rayos-X de un pulgar de la [página 189](#) son cortesía y copyright de Momose Atsushi. La foto de un holograma de la [página 190](#) es copyright y cortesía de Yves Gentet y se puede encontrar en su sitio web www.ultimate-holography.com. En la [página 192](#), el holograma del euro es cortesía y copyright de Hans-Ulrich Pötsch y se encuentra en su sitio web en la www.hupoetsch.de/Makro.htm. El dibujo de la [página 193](#) procede de la Deutsche Gesellschaft für Holographie, cortesía de Niklas Möller y se puede encontrar en su excelente e informativo sitio web www.dgholo.de. En la [página 194](#), el interferograma de una guitarra es cortesía de Wikimedia. En la [página 195](#), la fotografía de un sistema de imagen tridimensional es cortesía y copyright del USC Stevens Institute for Innovation. En la [página 196](#), las imágenes son cortesía y copyright de Nikon y de Carl Zeiss. En la [página 197](#), la fotografía del microscopio electrónico es cortesía y copyright de Carl Zeiss; La propia imagen es cortesía de Wikimedia. las imágenes del microscopio óptico de campo cercano de la [página 198](#) son copyright y cortesía de WITec GmbH y se encuentran en su sitio web www.witec.de. Los termógrafos de Rayos-X de la [página 199](#) son copyright y cortesía de Manuel Dierick y su grupo de investigación en la University of Ghent y se encuentran en su sitio web en www.ugct.ugent.be. En la [página 200](#), la imagen de Rayos-X es copyright y cortesía de Fraunhofer IIS. La fotografía infrarroja de la [página 204](#) es copyright y cortesía de Serge Augustin. La fotografía del girasol de la [página 204](#) es copyright y cortesía de Andrew Davidhazy y se encuentra es su sitio web www.rit.edu/~andpph. Las imágenes del ojo de la [página 206](#) son cortesía y copyright del National Eye Institute en el National Institute of Health en los EEUU. Las imágenes de las retinas de la [página 214](#) son cortesía y copyright de Austin Roorda. La imagen de la aureola de la [página 215](#) es copyright y cortesía de Bernt Rostady se encuentra en su sitio web www.flickr.com/photos/brostad/257104770/sizes/l/. En la [página 218](#), las fotografías de los sensores de imagen son cortesía y copyright de Wikimedia, Austin Roorda, Hamamatsu Photonics y Guido Westhoff/Leo van Hemmen. En la [página 210](#), las ilustraciones son cortesía y copyright de Watcher; han sido tomadas de maravilloso y bonito blog en la watchingtheworldwakeup.blogspot.com, lleno de pasión por la naturaleza que nos rodea. Las fotografías sobre el microscopio plano basado en una matriz de microlentes mostrado en la [página 210](#) son cortesía y copyright de Frank Wippermann. Las fotografías sobre el microscopio hecho por hojas de papel dobladas

de la [página 220](#) son cortesía y copyright del Foldscope team en la www.foldscope.com. La imagen de un único ion de la [página 221](#) es cortesía y copyright de Dave Kielpinski; posiblemente también MacMillan Publishing tiene los mismos copyrights; Ellos han permitido su uso. En la [página 222](#), las figuras de endoscopio son copyright y cortesía de Karl Storz. Las imágenes que muestran daltonismo en la [página 224](#) son cortesía y copyright de Michael Douma, de su espléndido sitio web en webexhibits.org/causesofcolor/2.html. Las fotografías de las habitaciones de Ames de la [página 226](#) son cortesía y copyright de Sergio Davini, tomadas de su sitio web www.flickr.com/photos/mosso, y cortesía y copyright de David Darling, tomadas de su sitio web enciclopédico www.daviddarling.info. En la [página 227](#), la ilusión coloreada es cortesía y copyright de Kitaoka Akiyoshi, y tomada de su maravilloso sitio web en www.ritsumei.ac.jp/~akitaoka. La foto del pseudoscopio de la [página 227](#) es copyright y cortesía de Joshua Foer. La fotografía de la [página 228](#) es cortesía y copyright de Nick Veasey; su maravillosa colección de impresionantes imágenes de Rayos-X se pueden encontrar en www.untitled.co.uk. En la [página 230](#), las imágenes de los agujeros del disco son cortesía de Wikimedia. La espectacular fotografía de un rayo de la [página 235](#) es copyright y cortesía de Niklas Montonen. Las fotografías de nubes de la [página 234](#) son cortesía de la NASA. En la [página 235](#), las imágenes son cortesía y copyright de nordique, NASA y NOAA. Las imágenes de nubes de plasma en el laboratorio que simulan bolas luminosas de la [página 238](#) son cortesía y copyright de Sergei Emelin y Alexei Pirozerski y tomadas de su sitio web balllightning.narod.ru. Los dibujos del interior de la Tierra de la [página 239](#) son copyright y cortesía de MPI-Chemie, Mainz/GEO y se pueden encontrar en el catálogo en la www.mpch-mainz.mpg.de/mpg/deutsch/Panels_B.pdf. Fueron amablemente proporcionadas por Mirjana Kotowski. Los gráficos por ordenador de la [página 241](#) son copyright y cortesía de Gary Glatzmaier; Se pueden encontrar en su página web www.es.ucsc.edu/~glatz/geodynamo.html. Las fotografías de levitación diamagnética de la [página 244](#) son copyright y cortesía de Joachim Schlichting y se pueden encontrar en su sitio web www.uni-muenster.de/Physik/DP. Las fotografías de la levitación y de la esfera que gira de la [página 245](#) son copyright y cortesía de Kay Kublenz y se pueden encontrar en su sitio web www.schwebemagnet.de. En la [página 279](#), el electroencefalograma es cortesía de Wikimedia. En la [página 285](#), la fotografía de la neurona es copyright de Medlat y cortesía de Wikimedia. La fotografía de las arandelas de Fibonacci de la [página 322](#) es copyright y cortesía de Donald Simanek y se puede encontrar en su sitio web www.lhup.edu/~dsimanek. La imagen de un pitufo de la [página 303](#) es copyright 2016 de Peyo y con licencia de I.M.P.S. en Bruselas, encontrado en www.smurf.com. La fotografía de la llama de la [página 396](#) es cortesía y copyright de Shubham Das y fue hecha para este libro por él y por Rakesh Kumar. La fotografía de la cubierta posterior, de un basilisco corriendo sobre el agua, es cortesía y copyright del Belgian group TERRA vzw y se encuentra en su sitio web www.terravzw.org. Todos los dibujos son copyright de Christoph Schiller. Si usted tiene la sospecha de que su copyright no ha sido correctamente otorgado u obtenido, ello no ha sido llevado a cabo a propósito; le ruego que en ese caso tenga la bondad de ponerse en contacto conmigo.





ÍNDICE DE NOMBRES

A

ABBOTT

- A**
Abbott, T.A. 433
Abe, E. 435
Abegglen, Martin 120, 449
Acef, O. 422
Ackermann, Peter 428
Adams, Douglas 359
Adenauer, Konrad 335
Advantest 25, 448
Aguirregabiria, J.M. 401, 436
Aiello, A. 431
Aitken, M.J. 435
Aizenberg, J. 428
Ajdari, A. 435
Akerboom, F. 424
Al-Dayeh, M. 433
al-Farisi, Kamal al-Din 136
al-Hadi al-Hush, Ramadan 370
Albert Einstein
 adolescente 129
Alexopoulos, N.G. 400
Alhazen 421
Allen, L. 424
Allen, Les 424
Allen Lee, Wei-Chung 282
Almeida, C. de 433
Amos, Brad 121, 449
Ampère, André-Marie 59
 life 47
Amunts, K. 439
Anaxágoras 294, 357, 370
Andersen, S.S.L. 419
Anderson, James A. 438
Antonio Díaz Navas, José 125, 447
- Anónimo 192, 377
Appleton, Phil 142, 449
Aquino, Tomás de 440
Arago, Dominique-François 184
 life 45
Ardenne, Manfred von 435
Aripov, Otanazar 370
Aristóteles 348, 352
Arlt, J. 424
Armstrong, Neil 429
Aronson, Jeff K. 444
Aronson, Jeff K. 446
Arrayás, M. 427
Arseneau, Donald 447
Arteaga, O. 427
Ascher, Marcia 313
Ashburner, J. 438
Ashcroft, Neil 256
Ashkin, A. 424
Ashkin, Arthur 132
Askin, A. 424
Ata Masafumi 446
Audoin, C. 444
Auerbach, Tauba 139, 449
Augel, Barbara 446
Augel, Edgar 446
Augustin, Serge 204, 450
Augustine de Hippo 61
Avron, J.E. 436
Ayiomamitis, Anthony 38, 448
- B**
Babinet, Jacques
 life 382
Baccus, S.A. 430
Bacon, Roger 335
Baez, John 446
Bagnoli, Franco 446
Balashov, Yuri I. 443
Baller, T.S. 431
Baltz, R. von 420
Bandler, Richard 437
Bandler, Richard 273, 326
Barberi Gnecco, Bruno 446
Barnett, S.J. 418, 419
Barnhill, M.V. 418
Barrow, John D. 443
Barson, Andy 173, 450
Bartel, Elmar 446
Bartels, Mel 113, 448
Barwise, J. 442
Basieux, Pierre 440
Bastian, A.J. 439
Bauer, O. 424
Bauerecker, S. 433
Baumgärtel, K. 438
Bautista, Ferdinand 446
Bazelyon, Eduard M. 432
BBC 340
Beale, I.L. 421
Beaty, William 446
Beauvoir, B. de 422
Beda el Venerable 322
Beeksmá, Herman 446
Beenakker, C.W.J. 422
Belfort, François 446
Bellac, M. Le 421
Bellini, Giovanni 430
Benbrook, J.R. 432
Benjamin, J. 443

B

BENNETT

- Bennett, C.H. 427, 438
 Berg, E. 436
 Berger, Hans 279
 Bergmann, L. 442
 Bering, E. 432
 Bering, E.A. 432
 Berkeley, George 351
 Berlekamp, E.R. 441
 Berlin, Brent 425
 Bernstein, Aaron 423
 Bernstein, Aaron 129
 Berry, M. 427
 Berry, M.J. 430
 Berry, M.V. 427, 434
 Berry, Michael 152
 Berson, D.M. 430
 Beth, R.A. 424
 Betsch, Denis 140, 449
 Bettelheim, Bruno 437
 Bettermann, D. 434
 Beuys, Joseph 280, 367, 443
 Beyer, Lothar 446
 Bhalotra, S.R. 424
 Bhandari, R. 427
 Biggar, Mark 446
 Billon, Robert 61, 448
 Biraben, F. 422
 Birbaumer, Niels 439
 Bismarck, Otto von 324
 Bjorkholm, J.E. 424
 Blanché, Robert 441
 Blankertz, B. 421
 Bliss, G.W. 434
 Blumensath, Achim 447
 Boamfa, M.I. 434
 Bohr, Niels 319, 367
 Boltzmann, Ludwig 86
 Bombelli, Luca 446
 Bonaccorso, F. 424
 Boone, Roggie 446
 Born, Jan 293
 Born, Max 428
 Bose, Georg 22
 Bour, L. 423
 Bowlby, John 442
 Boyda, E.K. 424
 Brandes, John 446
 Brandt, E.H. 433
 Brebner, Douglas 446
 Brecher, Kenneth 230
 Brewster, David 407
 Brillouin, Louis 425
 Broch, Henri 441
 Brock, J.B. 429
 Brocken Inaglorry 178, 450
 Brody, A.L. 424
 Bronshtein, Matvei 8
 Brookshear, J. Glenn 438
 Brown, B.L. 424
 Bruce, Tom 446
 Bräuer, A. 430
 Brückner, A. 430
 Buchanan, Mark 434
 Buchmann, Alfons 446
 Buddakian, R. 435
 Budney, Ryan 446
 Bueter, Chuck 110, 448
 Burbridge, G.R. 443
 Burbridge, E. Margaret 443
 Burns, L. 420
 Burrese, M. 422
 Butler, Samuel 272
 Butoli, André 417
 Böhncke, Klaus 447
- C**
- Calogero, G. 424
 Caloz, C. 429
 Cantor, Georg
 life 311
 Caraway, E.L. 433
 Carl Zeiss 196, 450
 Carlip, Steve 446
 Carmichael, J.E. 439
 Carmona, Humberto 434
 Carr, Jim 446
 Carroll, Lewis 441
 Carter, Brandon 443
 Castle, D. 439
 Chaitin, Gregory J. 441
 Chandrasekhar,
 Subramanyan 364
 Chang, P.Z. 433
 Chaplin, Charlie 98
 Chauvat, D. 431
 Chen, B. 420
 Chen, G. 428
 Cherkassky, V.L. 439
 Chiao, R. 426
 Chiao, R.Y. 426
 Chiba, D. 435
 Chmela, Harald 22, 25, 448
 Choi, J.T. 439
 Chomsky, Noam 334
 Christian Oersted, Hans 46
 Chu, S. 424, 426
 Chuang, I.L. 429
 Cicerón, Marco Tulio 366
 Clairon, A. 422
 Clausius, R. 428
 Claussen, J.Ch. 439
 Clements, J. 431
 Clerk Maxwell, James
 life 82
 Codling, K. 428
 Coehoorn, Reinder 435
 Cohen, P.J. 440
 Cohen, Paul 440
 Cohen, Paul J. 309
 Cohen, Philip 436
 Colazingari, Elena 446
 Conroy, R.S. 424
 Conti, Andrea 446
 Conway, J.H. 441
 Conway, John 316, 413
 Conway, John H. 441
 Copperfield, David 247, 409
 Copérnico, Nicolás 443
 Corballis, M.C. 421
 Corbin, V. 433
 Corovic, Dejan 446
 Cosman, E.C. 422
 Cotton, Aimé 262
 Couder, Y. 440
 Coulomb, Charles-Augustin
 de
 life 28
 Cowley, Les 425
 Crescimanno, M. 418
 Crespi, Roberto 446
 Crinion, J.T. 438
 Cronin, T.W. 423
 Crookes, William
 life 132
 Crystal, David 439
 Cummer, S.A. 429
 Cundiff, Steven T. 422

C

CURIO

- Curio, G. 421
 Cybulski, J. 431
- D**
- Dahlman, John 446
 Dalton, John
 life 224
 Dam, H. Van 420
 Danecek, Petr 446
 Dannberg, P. 430
 Darley, Vincent 447
 Darling, David 226, 451
 Darre, Daniel 446
 Darwin 329, 332, 349
 Darwin, Charles 436
 Das, Shubham 396, 451
 Davidhazy, Andrew 204, 450
 Davies, D. 421
 Davini, Sergio 226, 451
 Davis, Chandler 370
 Davson, H. 440
 Davy, Humphry 46
 de Aquino, Tomás 353
 de Maricourt, Pierre 41
 de paso a paso (wafer
 steppers), obleas 80
 Deaver, B.S. 445
 Decker, Rick 438
 Dehmelt, H. 434
 Dehmelt, Hans 436
 Dekker, J.P. 435
 Della Scala, S. 441
 Demosthenes 442
 Demócrito 333, 349, 352, 443
 Demóstenes 335
 DeRaad, L.L. 417
 Derecki, N.C. 439
 Descartes, René 274, 443
 Desmet, S. 417
 DGH 193
 Dholakia, K. 424
 Diana, princesa de Gales 331
 Dierick, Manuel 199, 450
 Dietl, T. 435
 Dietrich, F. 434
 Dietrich von Freiberg 424
 Dieu, Félix 150, 449
 Diez, Ulrich 447
 DiFilippo, Frank 446
- Dijk, Menno van 427
 Dirac 363
 Dirr, Ulrich 447
 Ditzinger, Thomas 430
 Dobra, Ciprian 446
 Dogarin, A. 426
 Dornhege, G. 421
 Douady, S. 440
 Douglas, R. 438
 Douma, Michael 224, 451
 Dragon, Norbert 446
 Dresden, M. 442
 Drgnu23 157, 449
 Drude, Paul
 life 270
 Dufay, Charles 22
 Duhem, Pierre 441
 Dumont, Jean-Paul 443
 Duparré, J. 430
 Dwyer, J.R. 433
 Dyson, Freeman 446
 Dziedzic, J.M. 424
- E**
- E. Kelm, Daniel 425
 Ebstein, R.P. 443
 Eccles, J.D. 439
 Eccles, John 443
 Economou, E.N. 429
 Eddington, Arthur 443
 Eddington, Arthur 354
 Edge, Ron 434
 Edwards, R. 417
 Egorov, A.E. 433
 Egorov, A.I. 433
 Egorov, Anton 238
 Egorov, Wladimir 446
 Ehrenstein, W.H. 430
 Eigler, D.M. 419
 Einstein, A. 419
 Einstein, Albert 98, 283, 319,
 344, 370
 sobre las matemáticas 305
 Ekman, Paul 328
 Eliel, E.R. 431
 Elliot, Steve 447
 Els, Danie 447
 Elsevier 122, 449
 Elswijk, H.B. 418
- Elswijk, Herman B. 446
 Emelin, Sergei 238, 446, 451
 Emerson, Ralph Waldo 303
 Enders, A. 426
 Enders, Giulia 439
 Engl, Walter L. 421
 Epicuro 368
 Epikuros 368
 Epzcaw 113, 449
 Erlykin, A.D. 436
 Ertmer, W. 434
 Espiritu, Zach Joseph 446
 Etchemendy, J. 442
 Euler, Leonhard 321
 Evans, Philip 68, 448
 Everitt, C.W. 445
 Eves, H. 438
 Exploratorium 106, 135, 448
 Exter, M.P. van 431
- F**
- Fabeni, P. 426
 Fairbank, W.M. 418
 Fairbanks, J.D. 445
 Faller, James E. 429
 Fang Lizhi 370
 Fantz, U. 419
 Faraday, Michael 19, 52, 58, 71,
 72
 life 46
 Farinati, Claudio 446
 Fermani, Antonio 446
 Ferrari, A. C. 424
 Ferrari, A.C. 133, 449
 Few, A.A. 432
 Feyerabend, Paul 333, 360
 Feynman, Richard 103
 Feynman, Richard P. 398
 Feynman, Richard P. 342
 Field, Simon Quellen 448
 Finkelstein, D. 433
 Finkenzeller, Klaus 446
 Fischer, Ulrike 447
 Flagstaffotos 131, 449
 Flavell, J.H. 275
 Flaviis, F. De 400
 Foer, Joshua 227, 451
 Foldscope team 220, 451
 Fortey, Richard 436

F

FOTEINOPOULOU

- Foteinopoulou, S. 429
 Fowler, W.A. 443
 Fowler, Willy 443
 life 364
 Fracastro, Girolamo 407
 Frackowiak, R.S. 439
 Fraenkel, Adolf/Abraham 309
 Frank, M. 421
 Frank, Tamara 168, 449
 Franklin, Benjamin 23
 life 22
 Franz, K. 428
 Fraser, Alistair B. 422
 Frasiniski, L.J. 428
 Fraunhofer FIRST 102, 448
 Fraunhofer IIS 200
 Fraunhofer, Joseph 111
 French, A.P. 420
 Fresnel, Augustin Jean 111
 Freud, Sigmund 285
 Friedel, P. 431
 Friese, M.E.J. 424
 Fritzius, Robert 17, 447
 Fuchs, E.C. 436
 Fuchs, Elmar 259
 Fumagalli, Giuseppe 443
 Furrie, Pat 446
 Furry, W.H. 401
 Föppl, H. 424
 Füllerkrug, M. 432
- G**
- Gabor, Dennis 192
 Galajda, P. 424
 Galilei, Galileo 177, 352, 358,
 370
 Galileo Galilei 341
 Gallivan, B.C. 440
 Galvani, Luigi 56
 life 35
 Galvez, E.J. 427
 Galvez, Enrique 404
 Gans, R. 434
 Garcia-Caurel, E. 427
 Garcia-Ruiz, J.M. 440
 Gardner, Martin 442
 Garlaschelli, L. 441
 Gauß, Carl-Friedrich
 life 30
- Geim, A.K. 434
 Geim, Andre 434
 Gennes, Pierre de 444
 Genoux, D. 438
 Gentet, Yves 190, 450
 GEO 239, 451
 Georgi, Renate 443
 Georgi, Renate 446
 Gesellschaft, Deutsche
 Physikalische 434
 Gibbs, Phil 423
 Gilbert, William
 life 18
 Gilles, G.T. 421
 Gillies, G.T. 427
 Gitto, Paul 143, 449
 Glassey, Olivier 446
 Glatzmaier, G.A. 419, 433
 Glatzmaier, Gary 241, 451
 Glauber, Roy 422
 Gleiter, H. 435
 Goethe, Johann Wolfgang
 von 326, 351
 Goldhaber, A.S. 418
 Goldsmith, D. 436
 Gonshor, H. 441
 González, Antonio 446
 González-Herráez, M. 425
 Goos, Fritz 223
 Gordon, A. 436
 Gordon, Andrew 23
 Gorkum, G.G.P. van 431
 Gould, Stephen J. 436
 Graham, George 62
 Grahn, Alexander 447
 Grandjean, F. 417
 Grant, E. 426
 Grebe-Ellis, J. 423
 Greegor, R.B. 429
 Greenler, R. 428
 Greenler, Robert 428
 Gregorio, Enrico 447
 Greiner, Jochen 446
 Greiner, W. 418
 Griessen, R. 435
 Griffiths, D.J. 433
 Grimaldi, Francesco 183
 Groot, D.G. de 435
 Gross, B. 422
- Gschneidner, Karl A. 435
 Gucciardi, P. G. 424
 Gueymard, Chris 159, 449
 Guglielmo Marconi,
 Fondazione 108, 448
 Gurevich, A.V. 432
 Gutierrez, D. 422
 Guy, R.K. 441
 Gács, Zoltán 446
 Gál, J. 423
 Gödel, Kurt 334, 335, 440
- H**
- Haas, W.J. de 419
 Haber, John 446
 Hadamard, Jacques 444
 Haeckel, Ernst 326
 Haerendel, G. 424
 Haidinger, W.K. 423
 Haidinger, Wilhelm 123
 Haley, Stephen 246, 446
 Haley, Stephen B. 434, 435
 Hall, John 422
 Hall, John L. 422
 Hallam, Tony 444
 Hamamatsu Photonics 218,
 450
 Hamblyn, Richard 432
 Hamilton, William 306
 Hanzlik, Marianne 45, 448
 Hardcastle, Martin 446
 Hardin, C.L. 425
 Hardy, Godfrey H. 414
 Hardy, Godfrey H. 328
 Haring, Bas 437
 Harlen, V. 437
 Harrington, R.F. 419
 Harris, T.H. 439
 Hasselberg, Ernst von 321
 Hatcher, W.S. 440
 Haubrich, D. 434
 Hausch, T.W. 422
 Hausherr, Tilman 409, 446
 Hayes, Allan 446
 Heard-Booth, A.N. 432
 Heaviside 82
 Heaviside, Oliver 105
 Hebb, Donald 285
 Heckenberg, N.R. 424

H

HEFLINGER

- Heflinger, L.O. 434
 Hehl, Friedrich W. 420
 Heidelberg Engineering 212
 Heideman, R. 422
 Heimbürg, T. 419
 Heimbürg, Thomas 419
 Heimbürg, Thomas 57, 58, 448
 Heisenberg, Werner 178
 Hell, S.W. 429
 Hell, Stefan 185, 186, 450
 Hellinger, Bert 444
 Hellinger, Bert 329, 369
 Hellwege, K.-H. 442
 Helmholtz 111
 Helmholtz, Hermann von 203
 Helmholtz, Hermann von
 life 203
 Helmholtz, Hermann von 368
 Helmond, Tom 446
 Hemmen, J.L. van 431
 Henderson, Paula 446
 Hendriks, B.H. 431
 Henry Poynting, John 96
 Heras, J.A. 420
 Hermann, Ludimar 202
 Hernandez, A. 401, 436
 Herrmann, F. 400, 420
 Herrmann, Friedrich 375
 Hersch, R. 440
 Hersch, Reuben 309
 Herschel, William 112
 Hertz 82
 Hertz, Heinrich 86, 105, 108
 Hertz, J. 438
 Hertzlinger, Joseph 447
 Heumann, John 446
 Hilbert, David 320, 334
 life 305
 Hilico, L. 422
 Hiller, R.A. 435
 Hillman, Chris 446
 Hinz, Wolfgang 111, 448
 Hirshfield, Stuart 438
 Hirst, Paul 170
 Hite, Kevin 447
 Hitler, Adolf 160
 Hochschule Mittweida 180,
 450
 Hodgkin, A.L. 419
 Hodgkin, A.L. 56
 Hoekstra, Rolf F. 436
 Hoeppe, G. 425
 Hoeppe, Götz 425
 Hoffman, Donald D. 437
 Hoffman, Richard 446
 Hogan, Thomas 173, 450
 Hohenstatt, M. 434
 Holmes, C.D. 427
 Homberg, U. 422
 Honda 46, 448
 Hones, Bill 434
 Hooft, G.W. 't 422
 Hooft, G.W. 't 431
 Hopfield, J.J. 438
 Hopkins, C.D. 418
 Horgan, John 441
 Hornberg, Alexander 430
 Horsburgh, Steven 19, 21, 447
 Horváth, G. 423
 Horváth, Gábor 427
 Houck, A.A. 429
 Houdini, Harry 441
 Howard, Luke 233
 Hoyle, F. 443
 Hoyle, Fred 364
 life 364
 Hoyos, C. 421
 Htun, Bo Bo 370
 Hu, Z. 434
 Huber, A. 422
 Huber, Daniel 446
 Huiberts, J.N. 435
 Humboldt, Alexander von
 409
 Huppertz, H. 435
 Huxley, A.F. 419
 Huxley, A.F. 56
 Huygens, Christiaan
 life 110
 Hypatia 298, 333, 370
 Hänchen, Hilda 223
 Hänsch, Theodor 422
 Hänsch, Theodor W. 422
 Höfner, H. 424
- I**
 Ibn al-Haytham 421
 IEEE 182, 450
- IIS, Fraunhofer 450
 Ingersoll, Robert 365
 Ings, Simon 219, 430
 Institute of Molecular
 Pathology 42, 448
 Irving, Washington 338
 Irwin, Jim 429
 ISVR, University of
 Southampton 144, 171, 447
 Itano, W.M. 434
 Itoh, T. 429
 Ivanov, Igor 446
- J**
 Jackson, A.D. 419
 Jackson, J.D. 417, 419
 Jackson, L. 437
 Jaencke, Peter 442
 Jalink, Kim 446
 James, William 285
 Jamil, M. 446
 Janek, Jürgen 446
 Jarosz, W. 422
 Jean Fresnel, Augustin
 life 184
 Jeanloz, R. 419
 Jechow, A. 431
 Jeff Sherman 185, 450
 Jefimenko, Oleg D. 420
 Jenkins, Francis A. 406
 Jenoptik 185, 450
 Jensen, H.W. 422
 Jensen, P. 442
 Jeon, H. 418
 Jerauld, J. 433
 Jessell, Thomas M. 419
 Johannes de Haas, Wander
 life 48
 Johansson, Mikael 446
 Jones, Christopher 184, 450
 Jones, P. H. 424
 Jones, P.D. 427
 Jones, Quentin David 446
 Jones, T.B. 434
 Jones, Tony 444
 Jong, Marc de 446
 Jordan, D.M. 433
 Jost, Klaus 25, 448
 Jozefowski, L. 422

Julien, L. 422
 Just, M.A. 439
 Justice, B.J. 429
 Jürgens, Hartmut 443

K

Köppe, Thomas 446
 Kampfraith, T. 422
 Kandel, Eric R. 419
 Kant, Immanuel 217, 307
 Karl Storz 222, 451
 Kassam, K.S. 439
 Kattawar, G.W. 423
 Kay, Paul 425
 Keller, Evan 64, 448
 Keller, Wilfred 413
 Kelly, K.L. 422
 Kelu, Jonatan 446
 Kepler, Johannes 131
 Kerr, John
 life 115
 Kettering, C.F. 417
 Keyes, R.W. 420
 Keyes, T.J. 439
 Kheifets, S. 423
 Kielpinski, D. 431
 Kielpinski, Dave 221, 451
 Kim Song-Man 370
 Kimble, H.J. 434
 King, Henry C. 428
 Kipnis, J. 439
 Kirchhoff, Gustav 105, 128
 Kirchner, E. 422
 Kirchner, E.J.J. 428
 Kirchner, Eric 177, 450
 Kirk, E.C. 432
 Kiss, Joseph 446
 Kitaoka Akiyoshi 227, 451
 Klaus Tschira Foundation 447
 Kleber, Boris 439
 Klein, Felix 320
 Kleinert, F. 442
 Kluge, Stefan 72, 448
 Knuth, D. 441
 Knuth, Donald 316
 Kobayashi, H. 432
 Koch, P.M. 427
 Koch, Robert 366
 Koeman, N.J. 435

Kohlrausch, Friedrich 442
 Kohshima, S. 432
 Koltenbah, B.E.C. 429
 Koolen, Anna 446
 Koomans, A.A. 418
 Koshibu, K. 438
 Kostiuk, L.W. 420
 Kostiuk, Larry 77
 Kotowski, Mirjana 451
 Kovetz, A. 433
 Kowalski, L. 420
 Kozhekin, A.E. 426
 Krallis, K. 120, 449
 Kramer, D. 435
 Krampf, Robert 66, 67, 448
 Krauledat, M. 421
 Krider, E.P. 417
 Krijn, Marcel 446
 Krogh, A. 438
 Kropff, E. 439
 Kruskal, Martin 316
 Królikowski, Jarosław 446
 Krüger, Reinhard 338
 Kubala, Adrian 446
 Kublenz, Kay 245, 451
 Kuerti, G. 426
 Kuipers, Kobus 115
 Kuipers, L. 422
 Kuipers, L. (Kobus) 116, 449
 Kumar, Rakesh 396, 451
 Kuntke, P. 436
 Kurizki, G. 426
 Kusch, K. 436
 Kusch, S. 436
 Kuzin, Pavel 446
 Kuzmich, A. 426
 Kwait, P.G. 426
 Kwiat, P.G. 426
 Kwok, D.Y. 420
 Können, G.P. 431
 Küster, Johannes 447

L

Lai, A. 429
 Lambert, N. 431
 Landauer, R. 438
 Landolt-Börnstein 442
 Lang, N.D. 419
 Larin, Kyrill 201, 447

Larousse, Pierre 441
 Latham, J. 432
 Laue, Max von 149
 Laue, M. von 426
 Laughlin, Robert 442
 Lauwers, M. 418
 Laveder, Laurent 137, 141, 449
 Laven, P. 422
 Lavoisier, Antoine 370
 Lawvere, F. William 440
 Lebedew, P. 424
 Lebedew, Pyotr 132
 Ledoux, Joseph 438
 Lee, K.S. 439
 Lee, Raymond L. 422
 Lehn, W.H. 431
 Leighton, Robert B. 398
 Leinse, A. 422
 Leitel, R. 430
 Lenin 45
 Lennie, P. 430
 Leone, F.C. 426
 Lepak, J. 418
 Leucipo 352
 Li, K. 429
 Li, T. 423
 Li, Tongcang 130, 449
 Li, Y-Q. 420
 Li, Y.C. 433
 Lichtenberg, Georg Christoph
 life 365
 Lieberherr, M. 420
 Lincoln, Abraham 371
 Linde, Johan 447
 Lingelbach, B. 430
 Lingelbach, Elke 202
 Lintel, Harald van 446
 Lipperhey, Johannes
 life 177
 Lipson, Henry S. 427
 Lipson, Stephen G. 427
 Liu Gang 370
 Livingston, James D. 417
 Livingston, William 425
 Livingstone-Zatchej, M. 438
 Loewenstein, G. 439
 Lohse, D. 436
 Loidl, J. 424
 Lombard, Peter (the) 440

J
 JULIEN

L

LOMBARDI

- Lombardi, Luciano 446
 Longo, M. 418
 Longuet-Higgins, Christopher 152
 Lorentz, Hendrik A. life 50
 Losch, F. 421
 Lotter, A. 419
 Louveau, A. 439
 Louveau, Antoine 295
 Lovell, Jim 429
 Lu, F. 420
 Luo, J. 421, 427
 Lynch, D.K. 430
 Lynch, David K. 425
 Lévy-Leblond, J.-M. 421
 Lévy-Leblond, Jean-Marc 417
 Lühr, H. 419
- M**
- Maan, Jan Kees 434
 Macdonald, Malcolm Ross 436
 MacMillan Publishing 451
 Maddox, J. 439
 Madelung, O. 442
 Maeterlink, Maurice 356
 Maffi, Luisa 425
 Mahoney, Alan 446
 Mahowald, M. 438
 Main, Peter 434
 Malus, Louis 121
 Mamie, C. 438
 Mandell, J.W. 439
 Manly, Peter 428
 Mansuy, I.M. 438
 Manu, M. 430
 Marago, O. M. 424
 Maricourt, Pierre de 418
 Mark, Martin van der 446
 Mark, M.B. van der 422
 Markey, A.R. 439
 Marshall, J. 423
 Martin, S. 427
 Martinovic, I. 421
 Martos, Antonio 111, 137, 446, 448, 449
 Marín, A.G. 436
 Matesy 63, 65
- Matsukura, F. 435
 Matthews, Robert 413
 Mauritz, Kenneth 79, 448
 Maus, S. 419
 Maus, Stefan 69, 448
 Maxwell 344
 Mayer, J. 439
 Mayer, Norbert J. 437
 Mayné, Fernand 446
 Mayr, Peter 446
 Mazur, Eric 427
 McCulloch 426
 McCuskey, S.W. 426
 McDonald, Kirk T. 426
 McGloin, D. 423
 McGuire, Bill 444
 McQuarry, George 446
 McTaggart 328
 Mead, Alden 152
 Mechelli, A. 438
 Medellín, D. 423
 Media Lario Technologies 169, 449
 Medlat 285, 451
 Meetz, Kurt 421
 Meister, M. 430
 Melzner, F. 424
 Mendes, O. 433
 Merano, M. 431
 Mermin, David 256
 Mermin, David 147
 Merrit, John 446
 Meschede, D. 434
 Metha, A. 430
 MethoxyRoxy 282
 Michaelson, P.F. 445
 Michelson, Albert sobre el final de la física 379
 Millikan 411
 Milton, K.A. 417
 Minnaert, Marcel G.J. 423, 425
 Mission, G.P. 423
 MIT 20, 39, 447, 448
 Mock, J.J. 429
 Mohr, P.J. 445
 Molière 365
 Momose Atsushi 189, 450
 Momose, A. 430
- Montgomery, H. 419
 Montie, E.A. 422, 431
 Montonen, C. 421
 Montonen, Claus 421
 Montonen, Niklas 234, 451
 Moon, F.C. 433
 Moortel, Dirk Van de 446
 Moothoo, D.N. 424
 Moser, E.I. 439
 Moser, Lukas Fabian 446
 Moser, M.-B. 439
 Mozart 368
 MPI-Chemie, Mainz 239, 451
 Mugnai, D. 426, 432
 Munoz, A. 422
 Munroe, Randall 79, 448
 Murdock, Ron 446
 Murillo, Nadia 446
 Musiol, Gerhard 435
 Mutka, Miles 446
 Muynck, Wim de 446
 Mölle, M. 439
 Möller, Niklas 450
 Müller, K.-R. 421
- N**
- Namouni, Fathi 446
 NASA 38, 70, 71, 235, 448, 451
 Nature 112, 448
 Naudin, Jean-Louis 69, 448
 NEI at NIH 206
 Neidhart, B. 433
 Nelemans, Lijnis 244
 Neuhauser, W. 434
 Neumaier, Heinrich 446
 Neuss, H. 424
 New, M. 427
 Nez, F. 422
 Nieminen, T.A. 424
 Niepraschk, Rolf 447
 Nierer, Jennifer 170, 450
 Nietzsche, Friedrich 300
 Nieuwpoort, Frans van 446
 Nikon 196, 450
 Nimitz, G. 426
 Nimitz, Günter 146
 NOAA 97, 180, 235, 450, 451
 Noppeney, U. 438
 nordique 235, 451

N

NORDMEIER

- Nordmeier, V. 434
 Nordvik, Terje 141, 449
 Noro, M. 400
 Norton, B.G. 431
 Nussbaumer, Peter 244
 Nye, J.F. 427
- O**
 O'Connell, Sanjida 437
 O'Doberty, J. 438
 Oberdiek, Heiko 447
 Oberquell, Brian 446
 Obukov, Yuri N. 420
 Odiseo 415
 Offner, Carl 446
 Ohno, H. 435
 Ohno, Y. 435
 Ohtani, K. 435
 Olive, D. 421
 Olive, David 421
 Olveczky, B.P. 430
 Omiya, T. 435
 Oostrum, Piet van 447
 Oppenheimer, Robert 370
 Orban, F. 417
 Ormos, P. 424
 Osowiecki, Gaël 150, 449
 Ossikovski, R. 427
 Osten, D. van 422
 Osterle, Fletcher 77
 Otto, Rudolf 368
 Otto, Rudolf
 life 368
- P**
 Pablo de Tarso 334
 Pacioli, Luca 322
 Padgett, M.J. 424
 Padgett, Miles 424
 Padilla Gálvez, Jesús 271, 298,
 304, 307, 318, 323, 324, 335,
 345, 347, 361
 Page, Don 446
 Pahaut, Serge 446
 Paine, Thomas 338
 Pais, A. 441
 Paiva, G. Silva 433
 Palik, E.D. 428
 Palmer, R. 438
- Palmisano, F. 424
 Pancharatnam,
 Shivaramakrishnan 152
 Parazzoli, C.G. 429
 Park, David 421
 Parker, D.E. 427
 Parks, David 446
 Parrott, S. 433
 Parviainen, P. 423
 Pascazio, Saverio 446
 Pasi, Enrico 446
 Pauli, Wolfgang 329
 Pavão, A.C. 433
 Pazzi, G.P. 426
 Pecharsky, Vitalij 435
 Peeters, Bert 446
 Pegna, Guido 109, 448
 Peirce, Charles 333
 life 298
 Peitgen, Heinz-Otto 443
 Pelizzari, Umberto 440
 Pendry, J. 429
 Pendry, J.B. 429
 Pendry, John 181, 182
 Peng, J.L. 434
 Penrose, Roger 442
 Perini, Romano 446
 Perito, D. 421
 Persius 356
 Peske, J.D. 439
 Petersen, Nicolai 448
 Petrolino, Nicola 174, 450
 Pettigrew, J.D. 418
 Peyo 303, 451
 Pfeiffer, K. 422
 Pfeiffer, Keram 122, 449
 Philips 17
 Phillips, Melba 370
 Piaget, J. 275
 Piaget, Jean 275
 life 275
 Picasso, Pablo 98, 288, 358
 Pietralla, Martin 121, 449
 Pinker, Steven 438
 Pirozerski, Alexei 238, 451
 Pitágoras 319
 PixHeaven.net 137
 Planck, M. 427
 Planck, Max 160
- life 160
 Poincaré, Henri 368
 Poisson, Denis
 life 184
 Popper, Karl 340, 441
 Popper, Karl R. 443
 Porta, Giambattista della 177
 Povinelli, D.J. 365
 Powis, Mike 225
 Poynting, J.H. 424
 Prakash, M. 431
 Prenger, Gerold 175, 450
 Prentiss, M. 424
 Prevedelli, M. 422
 Price, C.J. 439
 Pritchard, Carol 446
 Proença, Nuno 446
 Purcell, Edward M. 423
 Purves, William 446
 Putterman, Seth J. 435
 Pötsch, Hans-Ulrich 192, 450
- Q**
 Q-Cells 32, 448
 Quellen Field, Simon 66
- R**
 Rahtz, Sebastian 447
 Raizen, M.G. 423
 Raizen, Mark 130, 449
 Raizer, Yuri P. 432
 Rakov, V.A. 433
 Rakov, Vladimir A. 432
 Ramaccini, F. 441
 Ramakrishna, S.A. 429
 Rambo, K.J. 433
 Randi, J. 439
 Randi, James 441, 442
 Ranfagni, A. 426, 432
 Rankl, Wolfgang 446
 Rappmann, R. 437
 Rassoul, H.K. 433
 Rañada, Antonio 154
 Reball, Siegfried 435
 Rector, J.H. 435
 Redondi, Pietro 446
 Reichert, J. 422
 Reichl, Linda 435
 Renselle, Doug 446

R

REPPISCH

- Reppisch, Michael 446
 Reynolds, Osborne 423
 Richards, P.G. 433
 Richardson, Bernard 113, 448
 Richert, Hendryk 63, 448
 Ridgeway, S.L. 434
 Rieger, E. 424
 Riehker, Rolf 428
 Riemann, Bernhard 128
 life 105
 Rigor, I.G. 427
 Rikken, G. 435
 Rindler, Wolfgang 421
 Rivas, M. 436
 Rivas, Martin 446
 Roberts, P.H. 419
 Robertson, Will 447
 Rodgers, P. 434
 Rodrigues, W.A. 432
 Rohrlich, F. 436
 Romanowicz, B. 419
 Roorda, A. 430
 Roorda, Austin 211, 214, 218,
 450
 Rooy, T.L. van 418
 Ros, T. 421
 Rostad, Bernt 215, 450
 Rouhani, S.J. 439
 Royal Philips Electronics 447
 Ruben, Gary 446
 Rubinstein, J. 433
 Rubinsztein-Dunlop, H. 424
 Rucker, Rudy 440
 Rucker, Rudy 312
 Rudolf Hertz, Heinrich
 life 108
 Rudolph, Peter 446
 Rueckner, W. 417
 Rueckner, Wolfgang 24, 162,
 448, 449
 Ruggieri, R. 432
 Ruhlen, Merritt 300
 Ruissenaars, Janjaap 75, 448
 Ruschewitz, F. 434
 Russer, P. 429
- S**
 S. Kassan, Karim 296
 S.R. Madhu Rao 446
 Saa, A. 433
 Sacks, Oliver 437
 Sadeghi, I. 422
 Saghian, Damoon 446
 Sahl, Mort 365
 Sakharov, Andrei 370
 Salam, Abdus 370
 Salamo, G. 429
 Salditt, T. 429
 Salingaros, N. 419
 Salman Salman 370
 Sami Kilani 370
 Sammer, M. 436
 Sands, Matthew 398
 Sassen, K. 424
 Saube, Dietmar 443
 Saussure, Ferdinand de
 life 298
 Schadwinkel, H. 434
 Schaeffel, Frank 430
 Schanuel, Stephen H. 440
 Scharlau, B. 434
 Schata, P. 437
 Scheer, Elke 419
 Schelby, R.A. 429
 Schiff, L.I. 418
 Schiller, Britta 446, 447
 Schiller, C. 418
 Schiller, Christoph 195, 451
 Schiller, Isabella 446
 Schiller, Peter 446
 Schiller, Stephan 446
 Schilthuizen, Menno 436
 Schlegel, K. 432
 Schlichting, H.J. 434
 Schlichting, Joachim 244, 451
 Schmid, G.B. 400
 Schneider, Olaf 175, 450
 Schneier, Bruce 411
 Schoeck, Helmut 444
 Schoenmaker, H. 422
 Schott 180, 450
 Schroeder, Daniel 127, 447
 Schrödinger 344
 Schrödinger, Erwin 145
 Schulden, K. 418
 Schultz, S. 429
 Schurig, D. 429
 Schuster, H.G. 439
 Schwartz, James H. 419
 Schwartzberg, Susan 106,
 135, 448
 Schwarzschild, B. 431
 Schwinger, Julian 417
 Schwinger, Julian
 life 342
 Schwob, C. 422
 Schäfer, C. 442
 Schönenberger, C. 418
 Scott, G.G. 417
 Scott, Jonathan 446
 Scott, W.T. 433
 Seeger, J. 429
 Segev 187
 Segev, M. 429
 Seidel, T. 439
 Seidelmann, P. Kenneth 445
 Seidenfaden, Eva 141, 449
 Semon, Mark D. 420
 Seron, F. 422
 Shabanov, G.D. 433
 Shabanov, Gennady 238
 Shambhavi 38
 Shankland, R.S. 426
 Shapere, Alfred 427
 SharkD 138, 449
 Shaw, George Bernard 327
 Sheldon, Eric 446
 Shih, M. 429
 Shulman, Polly 441
 Siart, Uwe 447
 Sichert, A.B. 431
 Sidman, Eli 20, 447
 Sierra, Bert 446
 Silva, E.F. da 433
 Simanek, Donald 322, 451
 Simon Ohm, Georg
 life 75
 Simon, Julia 446
 Simon, M.D. 434
 Simpson, N.B. 424
 Singleton, D. 421
 Singleton, Douglas 446
 Sircar, N. 421
 Sivardière, Jean 420
 Slabber, André 446
 Slater, Elizabeth M. 407
 Slater, Henry S. 407

S

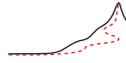
SLEPIAN

- Slepian, J. 420
 Smirnov, B.M. 433
 Smirnov, I. 439
 Smith, D.R. 429
 Smith, David 429
 Smith, S.P. 424
 Smith, Warren J. 427
 Smullyan, Raymond 334
 Soffer, B.H. 430
 Sokolovskii, B.Yu. 433
 Solomatin, Vitaliy 446
 Solov'yov, I.A. 418
 Sommerfeld, Arnold 425
 Sommerfeld, Arnold
 life 145
 Song, D. 421
 Song, K.-Y. 425
 Song, X.D. 433
 Sonnenschein, J. 421
 Soukoulis, C.M. 429
 Sparenberg, A. 435
 SPECS 166, 449
 Spieker, H. 426
 Spitzer, Manfred 437
 squark 446
 Staff, National Research
 Council 432
 Starr, A.F. 429
 Stearns, Stephen C. 436
 Stegeman, G. 429
 Steinberg, A.M. 426
 Steinhilber, G. 413
 Steinle, F. 417
 Stepanov, S. I. 433
 Stepanov, S.I. 433
 Stewart, A.M. 420
 Stewart, I. 440
 Stewart, Ian 441
 Stewart, T. Dale 417
 Stewart, W.W. 439
 Stoney, George
 life 34
 Story, Don 447
 Strauch, F. 434
 Streed, E.W. 431
 Styer, D. 426
 Stöcker, J. 424
 Sulloway, Frank J. 329
 Sun, X.L. 433
 Sundar, V.C. 428
 Surdin, Vladimir 431, 446
 Swagten, Henk 435
 Szczesny, Gerhard 442
 Szilard, L. 438
 Szilard, Leo 287
 Száz, Dénes 427
T
 Tanielian, M. 429
 Tannhauser, David S. 427
 Tarde, Gabriel
 life 329
 Tarko, Vlad 446
 Tarski, Alfred 441
 Tauber, G.E. 433
 Taylor, B.N. 445
 Taylor, John R. 420, 444
 Tegelaar, Paul 446
 Terletskii, Y.P. 426
 Tesla, Nikola
 life 61
 Thaler, Jon 446
 Thales de Mileto 18
 Theodoricus Teutonicus de
 Vriberg 136
 Thidé, Bo 89
 Thies, Ingo 446
 Thiry, Paul-Henri 370
 Thober, D.S. 432
 Thomson (Kelvin), William
 life 19
 Thomson, Joseph John 34
 Thévenaz, L. 425
 Tiggele, B. van 435
 Time-Bandwidth 166, 449
 Tipler, Frank J. 443
 Tolkien, John Ronald 292
 Tolman, Richard C. 417
 Tomonaga 342
 Tomás de Aquino 314
 Torre, A.C. de la 419
 Torricelli, Evangelista
 life 352
 Toschek, P.E. 434
 Tournay, Michel 141, 449
 Townsend, Paul 446
 Trepel, Martin 437
 Trevorrow, Andrew 447
 Trompenaars, P.H. 431
 Trower, W.P. 418
 Trueba, J.L. 427
 Tsagas, C.G. 436
 Tsai, W.Y. 417
 Tschira, Klaus 447
 Tu, L.-C. 421
 Tu, L.C. 427
 Tuckermann, R. 433
 Tuppen, Lawrence 446
 Twain, Mark 327, 342, 365
 Tweedie-Cullen, R.Y. 438
 Tyler, R.H. 419
U
 Ucke, C. 407
 Udem, Th. 422
 Ueberholz, B. 434
 Uguzzoni, Arnaldo 446
 Uman, M.A. 433
 Uman, Martin A. 432
 Upright, Craig 447
 USC Stevens Institute for
 Innovation 195, 450
 Ustinov, Peter 98
V
 Vaiyaboon, Oat 16, 447
 Valanju, A.P. 428
 Valanju, P.M. 428
 Valenzuela, A. 424
 Valsiner, Jaan 437
 Valsinger, Jaan 437
 van der Pauw, J.L. 76
 van Hemmen, Leo 218, 450
 van Leeuwenhoek, Antoni
 life 178
 Vanier, J. 444
 Vannoni, Paul 446
 Vasconcelos, E. Alpes de 433
 Veasey, Nick 228, 451
 Veer, René van der 437
 Verne, Jules 136
 Veselago, V.G. 428
 Veselago, Victor 181
 Vigotsky, Lev 437
 Vigotsky, Lev 275
 Virgilio 361
 Viswanath, R.N. 435

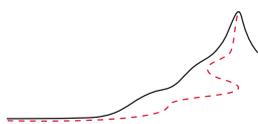
V

VLADIMIR

- Vladimir, Maric 171, 450
 Voit, A. 424
 Volin, Leo 446
 Vollmer, G. 439
 Vollmer, M. 425
 Volta, Alessandro
 life 62
 Voltaire 443
 Voltaire 358, 369, 417
 Voss, Herbert 447
 Völz, Horst 428
- W**
 Waldhauser, F. 433
 Walker, J. 424
 Walser, R.M. 428
 Walter, H. 434
 Wampler, E. Joseph 429
 Wang Juntao 370
 Wang Lihong 158, 447
 Wang, L.J. 426
 Warkentin, John 447
 Washington University at St.
 Louis 447
 Washington University de St.
 Louis 158
 Washizu, M. 434
 Watcher 210, 450
 Weaver, J.C. 428
 Wehner, R. 423
 Weiland, Thomas 107, 447
 Weinrebe, Gerhard 162, 449
 Weiskopf, Daniel 127, 447
 Weiss, Martha 446
 Weisskopf, Victor
 life 368
 Weissmüller, J. 435
 Weitz, M. 422
 Weizenbaum, Joseph 290
 Weller, Roger 121, 449
 Welzl, H. 438
 Weninger, K. 435
 Werf, S.Y. van der 431
 Westhoff, Guido 218, 450
 Westphal, V. 429
 Wexler, A.D. 436
 Wheatstone, Charles 34
 Whewell, William 71
 White, Harvey E. 406
- Whitehead, Alfred North 345
 Whittaker, Edmund T. 426
 Wiechert, Johann Emil 34
 Wien, Wilhelm
 life 161
 Wierda, Gerben 447
 Wierzbicka, Anna 301, 325,
 439, 446
 Wigner, E.P. 420
 Wigner, Eugene 441
 Wigner, Eugene 319
 Wijk, Mike van 446
 Wijngarden, R.J. 435
 Wikell, Göran 441
 WikiCommons 276, 406
 Wikimedia 17, 32, 38, 39, 46,
 67, 164, 185, 194, 197, 218,
 230, 279, 282, 447–451
 Wilczek, Frank 427
 Wilde, Oscar 276, 348
 Wiley-VCH 58, 448
 Wilhelm Ritter, Johann 112
 Wilk, S.R. 430
 Willerding, E. 424
 Williams, D.R. 430
 Williams, David 211
 Williams, David R. 430
 Williams, Earle R. 432
 Wiltschko, R. 418
 Wiltschko, W. 418
 Wineland, D.J. 434
 Wippermann, F. 430
 Wippermann, Frank 210, 450
 Wise, N.W. 445
 WITec 198
 Witte, H. 426
 Witteborn, F.C. 418
 Wittgenstein, Ludwig 442
 Wittgenstein, Ludwig 271,
 298, 304, 307, 318, 323, 324,
 335, 345, 347, 361
 Woerdman, J.P. 431
 Woisetschlager, J. 436
 Wolf, Emil 428
 Wolf, R. 407
 Wolfendale, A.W. 436
 Wong, S. 426
 Wood, B. 438
 Wood, Robin 171, 450
- Wright, B. 433
 Wright, Joseph 447
 Wu, C. 434
 Wu, T.T. 420
 Wynands, R. 434
 Würschum, R. 435
- X**
 Xavier, A.L. 432
 Xu Liangying 370
- Y**
 Yablon, A.D. 428
 Yamane, T. 424
 Yang, C.N. 420
 Yang, J. 420
 Yazdani, A. 419
 Ye, Jun 422
 Young, A.T. 423, 425
 Young, Andrew 137, 423, 425,
 446, 449
 Young, Thomas 111
 life 111
- Z**
 Zaccone, Rick 447
 Zalm, Peer 446
 Zander, Hans Conrad 441
 Zawischa, Dietrich 113, 449
 Zecherle, Markus 446
 Zedler, M. 429
 Zedler, Michael 446, 450
 Zeiger, Stefan 114, 449
 Zeiss 197
 Zeller, Eduard 442
 Zermelo, Ernst
 life 309
 Zernike, Frits 156
 Zhang, J. 433
 Zhu XiaoJin 141, 449
 Zimmer, P. 435
 Zinkova, Mila 174, 450
 Zurek, W.H. 438
 Zurek, Wojciech 287
 Zwart, S.T. de 431
 Zweck, Josef 434
 Zybin, K.P. 432



Z
ZYBIN



ÍNDICE DE MATERIAS



Symbols

'ley' de Ampère 52, 83
'ley' de Coulomb 83
'ley' de Faraday 84
'ley' de Gauss 30
'ley' de Gauss para el campo magnético 85
'ley' de Moore 80
'ley' de Ohm 75, 270
'leyes' de Coulomb y de Gauss, equivalencia de las 30
'ley' de Snell 406
4-force 95
4-potencial 92

sistema SI 29

A

a posteriori 307
a priori 307
concepto 275
abeja
melífera 123
abejas 42
y campo eléctrico 37
aberración
cromática 135
de la lente de Seide 179
absorción
color y 252
cuerpo negro y 257
de la luz 252
de ondas de radio 251
de ondas sonoras 251

espectro solar y 159
por un metal 98
resonancia del ciclotrón y 251
saturable 255
velocidad de fase y 144
velocidad de grupo y 145
absorción saturable 255
abstracción
de todas las abstracciones 440
aburrimento como signo de veracidad 332
accidente
nuclear 375
acción
describe todo el movimiento 372
electromagnética 93
Lagrangiana 93
acción, quantum de, \hbar física y 8
aceite 252
aceleración de Laplace 50
aceleración de Lorentz 50
acero 42
activador 56
actividad
óptica 253
actividad de espejo de fase conjugada 255
actividad electro-óptica 252
actividad electrolítica 252
actividad magneto-óptica 250
actividad óptica 405
acumulabilidad de la carga 26

acumulable 30
acústico-óptico
deflector 187, 188
efecto 253
adición de Maxwell 83
adimensionales 389
aditividad 26, 50
ADN 284, 285, 289
ADN 119
afelio 392
afición
peligrosa 67
Ag 248
AgBr 252
AgCl 112, 253
AgI 252
Agotamiento de oxígeno 376
agua 249, 255
flujo y electrónica 73
memoria del 295
puente flotante 258
puente flotante de 259
agua del grifo 17
aguja
e imagen invertida en la retina 203
aigrettes 400
aire
como aislante 248
aislamiento 248
aislantes 24
Al 249
al arranque 268
albedo 129
alcance ontológico 351
aleaciones de metales 250

A

ALEMANIA

- Alemania, ilegalidad de la vida 161
- alimentación
 mentira 339
- Allen, Woody 284
- almacenamiento, magnético 63
- aluminium 417
- alumnos
 clases de 291
- amarillo 118, 225
- aminoácidos 253
- ampere 76
- amperio
 definición 381
- amplificación de Raman 255
- amplificación paramétrica 255
- amplitud 106
- Ampolla de Lorenzini 25, 36
- Ampère
 los gatos de 47
- amígdala 285
- ancas de rana 35
- anchura completa a la mitad del máximo 385
- andalusita 253
- anestesia 57
- anestésicos 56
- anguila
 eléctrica 37
- animismo 275
- aniquilación 248
- anisotropía inducida ópticamente 253
- antena
 como arma 167
 del transmisor 127
 fotografías de 120
 GSM 28
 metal de 125
 más simple 126
 peligro de una 258
 polarización y 120
 transmisora 402
 y metamateriales 183
- anteojos 217
- aparición 173
- aplicación
 definición 312
- matemática 312
- apogeo 391
- Apolo 183
- aprendizaje 280
 el mejor método para el 9
 sin marcadores 9
 sin pantallas 9
- Ar 248
- araña 123
 saltadora 178
- arcoíris 110, 179
- adicional 110
- anchura 141
- como borde de un disco blanco 136
- cuatrario 136
- explicación 136
- fotografía de un 111
- hermanados 142
- infrarrojo 114
- irregular 142
- origen del 136
- polarización 142
- polarización del 122
- secundario 136
- ternario 136
- tipos raros de 141
- arcoíris adicionales 111
- arcoíris de niebla 142
- arena 314
- argumento 312
 diagonal 413
- armas
 con la luz 167
 electromagnéticas 167
- armónicos
 generación de, segunda 255
- arociris
 primario 136
- arrastré del potencial vector por las corrientes 91
- arseniuro de galio 248
- artefacto 359
- asombro 360
- aspectos
 de la Naturaleza 275
- asteroide
 choque con la Tierra 376
- astronauta *see* cosmonauta
- ateísmo
 peligros del 370
- atmósfera
 como prisma 136
- atto 383
- Au 249
- aureola 214
- autismo 274, 289, 437
- auto-referentes 334
- automóvil 194
- aventuras, futuras 375
- aves
 migración de las 43
- axioma
 de elección 308, 309
- axiomas
 adicionales, de la teoría de conjuntos 311
 de la teoría de conjuntos 308
 límites de los 304
 y física 305
 ZFC de la teoría de conjuntos 308
- axiomas de ZFC. 308
- azul 119
- azul primario 119
- azúcar 253, 254, 405
 jarabe de 169
- año trópico 391
- B**
- bacteria magnética
 figura de 45
- balisor 78
- ballena, azul 219
- ballenas 290
- bastoncillos 205
- bastoncillos de la retina 211, 283
- bastoncillos en la retina 315
- batería 31, 62
 de carga eléctrica 261
 descarga, ilustración 411
 larga duración 71
 y motor 72
- bañera, física 286
- becquerel 383
- bella

B

BETELGEUSE

- durmiente, efecto de la 129
 Betelgeuse 377
 Bi 248–250
 biblia 334, 343
 bibliotecas 147
 big bang
 y Fred Hoyle 364
 biofuel 340
 bioluminescencia 254
 BIPM 344, 381
 birrefringencia 121, 253
 fotografía de 121
 y navegación de los
 vikings 153
 BiSb 250
 BiSeTe 248
 bit
 definición 283
 biólogos evolutivos 272
 blanco 160
 puro 160
 bobina de Tesla 61
 bobinas de Tesla 66
 bolsa
 como dispositivo
 anti-gravedad 247
 bombillas
 puzzle de las 62
 borrado
 de memoria 287
 bosque
 lo que resplandece en un
 225
 bot conversacional 290
 bremsstrahlung 255
 brillantez 138
 brillante 314
 brillo 165
 brillo metálico 252
 bruma
 electromagnética 257
 bruma electromagnética 257
 brújula 62
 Bureau International des
 Poids et Mesures 381
 burocracia
 y matemáticas 308
 byte 288
 Bélgica 184
 búsqueda
 antrópica 364
 búsqueda antrópica 364
 búsqueda de la novedad 368
C
 cabello
 remolino del 98
 cabilderos 326
 cable
 y relatividad 58–60
 cables
 y nervios 56
 cables de corriente,
 eliminación de 63
 calcineurina 285
 calcita 121, 153, 253
 calentamiento, global 336
 calor de emisión del Sol 435
 cama
 flotante 74, 75
 camarón mantis 124
 cambio
 cuanto de, valor preciso
 del 387
 camaleón 219
 caminar 438
 sobre dos patas 280
 campo
 cercano 402
 de carga acelerada,
 ilustración 403
 diferencia entre eléctrico y
 magnético 99
 ecuación de, primera de
 Maxwell 82–84
 ecuación de, segunda de
 Maxwell 85
 ecuación de, segunda de
 Maxwell 84
 electromagnético 18
 electromagnético,
 definición 53
 eléctrico de una partícula
 que rebota 126
 emisión de 251
 evaporación de 252
 físico 18
 ionización de 252
 lejano 402
 líneas de 89
 magnético 41
 magnético, como efecto
 relativista 59
 magnético, definición del
 50
 magnético, y mareas 69
 morfo genético, mentira
 del 337
 movimiento de
 electromagnético 104
 objetos rodeados por un 17
 peine y agua 17
 radio 18
 teoría de campo 89
 visualizando lo eléctrico
 20
 campo electromagnético 18,
 93, 264
 acción del 54
 energía del 96
 evolución del 82–104
 impulso del 96
 invariantes del 54
 Lagrangiano del 54
 linealidad del 106
 momento angular del 96
 movimiento del 82–104
 tensor 54
 tensor energía- cantidad
 de movimiento 95
 campo electromotriz 85
 campo eléctrico 18, 27
 comunicación de los peces
 por 37
 intensidad del 26
 líneas de 20
 propiedades del 29
 tabla de propiedades del 30
 tabla de valores 28
 campo eléctrico de Planck 28
 campo gauge 89, 93
 campo magnético 50
 comportamiento especular
 del 49
 crítico 40
 detectando el 43
 tabla de propiedades del 50

C

CAMPO

- tabla de sensores del 51
- viendo el 65
- visualización de 39
- campo magnético de Planck 40
- campo-cercano 186
- campos
 - cuasistáticos 116
- campos de Planck 265
- campos magnéticos 18
 - tabla de valores de 40
- canales proteínicos 56
- candela 163
 - definición 381
- cantidad
 - definición 343
- capa
 - resistencia eléctrica 76
- capa de inversión 175
- capa de invisibilidad 183
- capa de ozono
 - reducción 376
- capa, de invisibilidad 183
- capacidad
 - indeterminación de la 79
- capacidad calorífica 256
- capas 240
- carbón 252
- cardinales
 - inaccesibles 311
- cardinalidad 311
- carga
 - (casi) no magnética 60
 - acumuladores de 31
 - cantidad de 24
 - colisión con otras cargas 87
 - de prueba 27, 51, 266
 - discreción de 266
 - elemental 266
 - elemental e , física y 8
 - experimento sobre la conservación de la 24
 - fotografías de bombas de 32
 - ilustración de una colisión 87
 - negativa 23
 - positiva 22
 - positrón o electrón, valor de la 387
 - puntual 269
 - radiación debida a la aceleración 246
 - radiación debida a la gravedad 246
 - resinosa 22
 - resultados básicos 81
 - tabla de propiedades 26
 - tabla de valores en la Naturaleza 27
 - valor mínimo de 266
 - vítrea 22
- carga del positrón
 - específica 390
 - valor de la 387
- carga eléctrica 21
- carga magnética
 - (casi) no hay tal 60
 - y fortaleza del polo 104
- cargas
 - consecuencias del flujo de 33
- carillón, eléctrico 23
- carro que apunta al sur 152
- Casandra 329
- catarata
 - y carga 262
- categoría
 - definición de 312
 - y conceptos 306
- catástrofes 375
 - tabla de futuras 375
- catódicos
 - rayos 33
- causa
 - y efecto 366
- causalidad 366
- CD
 - ilustración de la pista de un 230
 - reproductor de 229
- Cd 250
- CdS 248, 254
- CeB₆ 249
- celeritas 105
- celosía de Hermann 202
- celosís de Hering 202
- centi 383
- Cepillo de Haidinger
 - ilustración del 122
- cepillo de Haidinger 123
- cerebro 284, 315
 - capacidad de almacenamiento 288
 - capacidad del 288–290
 - consumo de energía 280
 - consumo de energía del 289
 - control del movimiento con el 280
 - curiosidades 290
 - células rápidas en el 295
 - de ballena 290
 - del gato 292
 - el mejor libro sobre el 419
 - enfriamiento 280
 - habla y 281
 - hardware del 292
 - ilustraciones del 276
 - leyendo pensamientos 262
 - propiedades, tabla de 277
 - razón para el tamaño del 282
 - similar a un ordenador 279
 - y fruta 289
 - y Luna 364
 - y visión 226
- cerebro de ballena 290
- cerilla
 - en la Luna 409
- cero 314
- cerveza 255
- CGPM 382
- chiflados 347
- chispa
 - campo de 28
 - generación de una 19
- chocolate
 - y la velocidad de la luz 109
- ciclotorsión 226
- cielo 253
 - color azul del 137
 - vespertino, simulación de leche 137
- ciencia 341
 - de necesidades simbólicas

C

CIENCIA

- 304
- final de la 354
- más antigua 340
- ciencia ficción 339
- cientifismo 341
- cientista
 - nombre inapropiado 341
- científico 341
- cinta
 - adhesiva 226
 - adhesiva, peligros de 64
 - adhesiva, Rayos-X desde una 409
- cinturón 152
- circuitos integrados 73
- circuitos neuronales 280
- cirros 233
- cisteína 340
- clase 309
- clasificación 275
- clasificador 280
- clorofila 361
- cloud
 - photographs 234
- CMOS 262
- Co 248, 249
- cobalto 18
- cobre 24, 248, 267, 270
- coches Opel 19
- coches y chispas 19
- coches, polarizadores en los 150
- CODATA 445
- coherencia
 - definición 191
- cohesor 109
- colmillos
 - de narval 81
- color 112, 252
 - como mezcla 134–140
 - desplazamiento del, de Wien 161
 - encuesta mundial 425
 - espacio de, ilustraciones del 138
 - tiene tres dimensiones 138
- colores de la Naturaleza 425
- columnas neocorticales 291
- comando ping
 - para medir la velocidad de la luz 34
- comas
 - invertidas 274
- combustible
 - ladrones de 395
 - llenado de 395
- cometa 131
 - artificial 134
 - cola de 134, 424
 - fotografía de la cola 131
 - lluvia 376
- comillas 274
- Commission Internationale des Poids et Mesures 381
- compact disc 284
- comparación con un estándar 343
- complejidad
 - alta 359
 - infinita 359
- completitud 26
- componentes de Fourier 260
- comprensibilidad
 - del Universo 355
- computación
 - científicos de la 272
- comunicación
 - más rápida que la luz 146
- comunismo 45
- concepto 298, 307
 - a priori 275
 - definición 271, 275, 306
 - descubrimiento físico del 326
 - matemático, existencia de 350
- conciencia 366–367
- condensador 261
 - 'ley' de carga para un 63
 - puzzle de carga 261
 - circuito en serie 77
 - relación de indeterminación 78
- condiciones
 - del contorno 94
 - iniciales 94
- conductancia cuántica 389
- conductividad 248
 - conductividad calorífica 256
- conducto
 - hialoideo 207
- Conférence Générale des Poids et Mesures 381
- Conferencia General de Pesas y Medidas 382
- conjetura
 - antrópica 364
 - definición 328
- conjetura antrópica 364
- conjunto 306, 309
 - definición 307–310
 - definición, ilustración 308
 - definición, tabla de 308
 - no-Cantoriano 440
 - ¿es útil para describir el Universo? 355
- conjunto producto 310
- conmutador, inversor 398
- conocimiento
 - definición de 340
 - mentira 339
- conos
 - en la retina 205
- conos de la retina 283
- conos en la retina 315
- consciencia 101
 - definición 366
- conservación 26, 358
- conservación de la energía 203
- Const. de conversión bits a entropía 390
- constante cosmológica 393
- constante de acoplamiento de Fermi 387
- constante de acoplamiento fuerte 387
- Constante de acoplamiento gravitacional 387
- Constante de Boltzmann 387
- constante de Boltzmann k 160
 - física y 8
- Constante de desplazamiento de Wien 390
- constante de estructura fina 145
- constante de estructura-fina

C

CONSTANTE

- 387, 388
- Constante de Faraday 389
- Constante de Planck
 - valor de la 387
- constante de Planck 160
- constante de radiación de Stefan–Boltzmann para el cuerpo negro 257
- constante de radiación del cuerpo negro de Stefan-Boltzmann 390
- Constante de Rydberg 389
- constante de von-Klitzing 389
- constante gravitacional 387
 - geocéntrica 391
 - heliocéntrica 391
- constante gravitacional G física y 8
- constantes
 - astronómicas, tabla de 391
 - cosmológicas, tabla de 393
 - físicas derivadas, tabla de 389
 - tabla de constantes físicas básicas 387
- contabilidad 311
- contacto 16
 - no existe el 88
 - y levitación 247
- contar
 - como aproximación 319
- continuidad
 - de la carga 26
- continuo 30, 50
- control remoto
 - más simple posible 109
- Convention du Mètre 381
- copos de nieve 314
- cordierita 153
- cornea 253
- correcciones
 - definición 328
- corriente
 - eléctrica 24
 - gira los metales, la 48
 - rota los metales, la 48
 - tabla de sensores de 36
 - tabla de valores de la 35
- corriente eléctrica de Planck 35
- cortex cerebral 291
- corteza
 - de la Tierra 240
- cosmonauta 183, 184
- cosmos 273
- coulomb 383
- covariania
 - y separabilidad 356
- Cr 249
- creacionismo 332
- creación 357–360
 - ciencia, como mentira 333
 - como un tipo de movimiento 357
 - creencia 336, 337
 - y el big bang 357
- creación de pareja 254
- creencias 370
 - contra hechos 330
 - en los conceptos físicos 324
- crystal
 - líquido 187
- crystal de aumento 176
- crystal líquido 252
 - efecto 252
- criptocromos 44
- cromosoma 376
- cromosoma X
 - y ceguera al color 224
 - y mujer tetracromático 209
- Cs 252
- Cu 248, 249
- cuadrado
 - dependencia inversa del radio al 29
 - mágico 320
- cuanto de acción
 - valor preciso del 387
- cuanto de circulación 389
- cuarzo 251, 253, 255
- cuaterniones 105, 318
- cubo
 - de Bronshtein 8
 - de la física 8
 - mágico 320, 414
- cubo de Bronshtein 8
- cubo de la física 8
- Cubo de Rubik 315
- cuerpo negro
 - radiación del 257
- cuerpo
 - eléctricamente cargado 21
 - neutro 24
 - neutro, y atracción electrostática 31
- cuerpo humano
 - emisión de luz del 165
- cuerpo negro 159–162, 257
 - como fuente de luz 158
 - constante de radiación 257
 - definición 159
 - radiación del 256
 - y Sol 160
- culombio 25
- cumulonimbos 233
- curandero
 - Filipinas 337
- curiosidad 367–369
 - definición 367
 - pasos 326
- corriente
 - indeterminación de la 79
- cuántica
 - láser de cascada 255
- cuántico
 - punto 77
- cuánto de acción 160
- cámara
 - ojo 205
 - sagrada 430
 - tamaño-píldora 229
- cátodo 71
- célula
 - primaria 62
 - secundaria 62
 - voltaica 62
- célula ganglionar
 - fotosensible 207
- Célula seca Clarendon 71
- célula voltaica 31
- células
 - número de 314
- células solares 31, 252
- círculos de cultivo 336
- córnea 124
- cúmulos 233

D

D4DR

- D**
D4DR gen 443
daltonismo 224
 ilustraciones 224
deca 383
deci 383
declaraciones
 empíricas 330
 especulativas 330
 indecidibles 333
 sin sentido 333–335
 tediosas 332
dedo
 prueba las propiedades de la onda de luz con un 109–110
dedo índice 110
dedos
 difracción en los, fotografía de la 110
deflector
 acústico-óptico 187
 acústico.óptico 188
 electro-óptico 188
degree
 Celsius 383
deidad 348
delfín 36
demarcación 363
demonio
 de Maxwell 287
demonio de Maxwell 287
densidad de flujo magnético 50
densidad del momento 96
densidad luminosa 166
densidad numérica de bariones 393
depresión
 tratamiento 293
desafío
 más importante de la ciencia 102
desafíos
 clasificación de los 9
desastres
 tabla de futuros 375
desastres, futuros 375
descomposición de la luz
 ejemplos de la 135
descomposición fuera de control 236
descripción 360
 definición 360
descubrimiento
 de conceptos físicos 326
desplazamiento de Wien para el color 161
desviación
 estándar, ilustración de la 385
desviación estándar 384
 ilustración 385
detalles
 de la Naturaleza 275
 y mentiras 333
deterioro dental 258
deután 224
diamagnetismo 42, 249
diamagnéticos 42
diamante 172, 248, 253
 dispersión en el 172
dicróismo 250, 253
 circular 262
dielectricidad 251
dieléctricos 24
dientes 258
 crecimiento de los 259
 son piezoeléctricos 259
diestros 98
difracción 183–187
 en los dedos, fotografía de la 110
 límite de 183
 límite de la 186
difusión de Mie 253
digitalización
 de imágenes 157
dimensionalidad 30, 50
 espacial 147
dinamo 31, 47
 principio de la 52
diones 421
dioptría 406
dioses
 definición 331
 divisibilidad de los 311
 e infinitud 378
 e interacciones 348
 existencia 370
 no pueden sorprender 375
 no tienen libre albedrío 375
 y arte 358
 y movimiento 353
dipolar
 fuerza 72
dipolo
 magnético 41
dirección 30, 50
discretizaciones magnéticas 74
diseño 359
 inteligente 359
 no es inteligente 378
diseño inteligente 332, 359
dispersión 172
 anómala 426
 en el ojo 179
 en el ojo, ilustración de 179
 relación de 106
dispersión cromática 252
dispersión de Brillouin 255
dispersión de Raleigh 253
dispersión por partículas 137, 188, 253
dispersión por partículas de Rayleigh 137
dispositivos anti-gravedad 247
distinguibilidad 26, 30, 50
distribución
 Gaussiana 385
 normal 286, 385
distribución gaussiana 385
DNA 315
doctrina 330
dodecacromaticidad 139
dominio
 definición de 312
donación
 para este libro 10
dopamina 443
dormir
 aprendizaje y 293
 razón para 293
dualidad

D

 DVD

- electromagnética 99
- transformación de 85
- DVD
- lector 229
- día
 - sideral 391
 - unidad de tiempo 383
- día soleado 165
- dígito
 - origen de 322
- E**
- ecuaciones de campo de Maxwell
 - primera 84
 - primera de las 82
 - segunda de las 84–85
- ecuaciones de evolución 373
- ecuaciones de Maxwell
 - ilustración de las 83
- ecuaciones de Maxwell para la electrodinámica 55
- ecuación de Maxwell
 - ilustración de la 84
- Edad del Sol 392
- efecto Paschen–Back 250
- efecto
 - termomagnético 250
 - termoeléctrico 248
 - y causa 366
 - óptico no-lineal 255
- efecto acusto-magnético 250
- efecto acústico-eléctrico 248
- efecto Auger 253
- efecto Back–Goudsmit 250
- efecto Barnett 49
- efecto Barret 249
- efecto Casimir 255
- efecto Compton 253
- efecto Cotton–Mouton 250
- efecto de Haas–van Alphen 48
- efecto de la bella durmiente 129
- efecto de Mößbauer 254
- efecto de válvula de giro 250
- efecto del ojo de polilla 219
- efecto Doppler
 - opuesto 181
- efecto Einstein–de Haas 48
- efecto electrocinético 252
- efecto Etingshausen 250
- efecto Etingshausen–Nernst 249
- efecto Faraday 250
 - inverso 250
- efecto fotoacústico 254
- efecto fotoelectromagnético 250
- efecto fotoeléctrico 252
- efecto Freederichsz 252
- efecto Goos–Hänchen 181
- efecto Hall 249
 - fotónico 250
- efecto Hanle 250
- efecto Josephson 249
- efecto Joule 248, 249
- efecto Kerr 252
 - óptico 255
- efecto Kirlian 74
- efecto magneto–Seebeck 250
- efecto magnetoacústico 251
- efecto magnetocalórico 251
- efecto magnetoelástico 249
- efecto magnetorreológico 251
- efecto Majorana 250
- efecto Matteucci 249
- efecto Meissner 251
- efecto Nagaoka–Honda 249
- efecto navegación solar 253
- efecto Nernst 250
- efecto Novaya Zemlya 173, 221
- efecto optoacústico 254
- efecto optogalvánico 249
- efecto pellizco 249
- efecto Peltier 248
- efecto Penning 248
- efecto piel 249
- efecto Pockels 252
- efecto Raman 253
- efecto Richardson 249
- efecto Righi–Leduc 250
- efecto Sasaki–Shibuya 249
- efecto Schadt–Helfrichs 252
- efecto Schottky 251
- efecto Seebeck 248
- efecto Shubnikov–de Haas 48, 250
- efecto Smekal–Raman 253
- efecto Stark 252
- efecto Thomson 248
- efecto Villar 249
- efecto Voigt 250
- efecto Weigert 253
- efecto Wiedemann 249
- efecto Zeeman 250
- efectos electromagnéticos 55
- efecto Zener 252
- EHF, frecuencia
 - extremadamente alta 118
- Einstein, Albert
 - sobre las matemáticas 305
- elasticidad 255
- elección, falta de
 - en el big bang 357
- electret 18
- electricidad
 - definición 31
 - líquida 31, 33–35
 - resumen de la 81
- electrificación 78, 248
- electro-óptico
 - deflector 188
- electro-ósmosis 252
- electrocromaticidad 253
- electrodinámica
 - cambios de 100–101
 - definición de 54
 - fallo de la 265
 - fallos de la 265, 267
 - resumen de la 264–265
- electrodo 71
- electroencefalograma 279
 - ilustración de 279
- electroestricción 251
- electrohidrodinámica 258
- electrohumedecimiento 252
- electrolito 71
- electrolitos 266
- electroluminescencia 254
- electromagnetismo
 - como prueba de la relatividad especial 128
 - limites del 79
 - resumen del 81
- electromagnéticas
 - armas 167
- electromagnetismo 52

E

ELECTRORRECEPCIÓN

- electrorrecepción 36
- electroscopio
 - de condensador 63
- electrostática 29
- electrómetro 25
 - fotografías de tipos de 25
- electrón
 - definición de 34
 - factor-g del 390
 - masa del 388
 - momento magnético 390
 - movimiento en los metales 267
 - saltando sobre un cristal, ilustración de un 216
 - salto 215
 - velocidad del 145, 267
- electrón-volt
 - valor del 390
- electrónica
 - y flujo de agua 73
 - óptica 158
- electrónicos
 - polímeros 279
- elefantes 290
- elemento
 - termoeléctrico 31
- elemento de un conjunto 26, 30, 50, 309
- elevación 173
- elevadores 67
- elfos 236, 237
- Eliza 290
- ELW, ondas extremadamente largas 117
- eléctricas
 - líneas 62
- emergencia 348–349, 442
 - de propiedades 349
- emisividad 248, 257
 - definición 159
- emisión de calor del Sol 410
- emisión térmica 249
- emociones 292
- enana
 - blanca 40
- enano
 - falso humano 226
- encendedor de gas 109
- enchufe de pared 104
- Enciclopedia 47
- endoscopio 187, 221
 - ilustración de 222
- energía 21
 - eléctrica 76
 - flujo 164
 - flujo de 96
 - libre, es una mentira 337
 - solar 163
 - velocidad de 145
- energía solar 163
- engaños
 - colección de 337
- enseñanza
 - el mejor método para la 10
- enseñar
 - con objetivos 290
- enteros 316
- entidades 275
- entorno 273
- entrecerrar los ojos 183
- entrono 162
- entropía 284
- Enéida 361
- epilepsia 294
- epistemología 441
- equidna 36
- equilibrio termal 162
- equivocación
 - definición 328
- era glacial 376
- error
 - al azar 384
 - en las medidas 384
 - relativo 385
 - sistemático 385
 - total 385
- escritura 345
- esfera, peluda 401
- espacio de fase 372
- espacio vectorial Euclidiano 30, 50
- espectro
 - definición de 107
 - electromagnético, tabla del 116
 - solar, gráfico de 159
- espectro electromagnético
 - tabla del 116
- espectrómetros 134
- especulación
 - definición 328
- espejismo 173, 271, 423
 - fotografías e ilustraciones de 173
 - Sol 221
- espejismo inferior 174
- espejo 97
 - biológicos 168
 - campos para energía solar 162
 - conjugación de fase 255
 - conmutable 253
 - cóncavo, puzzle 99
 - de metal 98
 - definición 97–99
 - dieléctrico 168
 - emisividad 159
 - en el telescopio 157
 - giratorio, para imágenes en 3-dim. 194
 - panorama 97
 - para imagen 168
 - parabólico, aplilado 195
 - polos magnéticos y 97
 - puzzle 64
 - sin imagen 129
 - y cambio de polarización 151
 - y campo magnético 49
- espejo conmutable 253
- espejos dieléctricos 168
- espiritualidad
 - definición 331
- espín
 - del electrón 49
- estelar
 - aproximación 376
- estereopsis 189
 - engaño 226
- estereorradián 382
- estigma 338
- estratos 233
- estrella
 - observadas durante el día 157
 - verde 161

E
ESTRELLA

- estrella de neutrones 40
- estrellas
 - número de 314
- estructura
 - algebraica 313
 - topológica 313
- estructura algebraica 313
- estructuralismo 437
- estructuras de orden 313
- estructuras topológicas 313
- Eta Carinae 377
- EUV 119
- evento
 - definición 323
- evolución 272–273, 288
 - a partir de la nada 365
- ex nihilo 357
- Exa 383
- exactitud 384
 - límite a la 386
- excéntricos
 - retos para los 306
- existencia 349–353
 - de conceptos matemáticos 350
 - de las cosas 351
 - del Universo 356
 - psicológica 350
- existencia psicológica 350
- existencia, física 350
- expansión decimal, periódica 320
- experiencia 275, 276
- experimentalistas 327
- experimentos 323
- explicación 365
 - física 362
- explosiones de rayos-gamma 376
- explosión
 - de Yellowstone 376
- eye, human 423

- F**
- fabricante de lente
 - fórmula 228, 229
- falsificación 286
- falso
 - definición 328
- fama
 - forma de alcanzar la 263
- fantasmas 408
- farad 383
- fase 106
 - adiabática 152
 - cuántica 152
 - de Berry 152
 - factor de 93
 - geometría de, ilustración de la 151
 - geométrica 151–153
 - geométrica, definición 152
 - singularidades de 154
 - topológica 152
 - velocidad 143
 - velocidad de 106
- fase de Berry 152, 404
- fase geométrica 151–153
 - rotación especular de, ilustración de 405
- fata morgana *see* espejismo
- Fe 248, 249, 254
- fechado por C14 435
- feldespató 121, 255
- femto 383
- fenómeno
 - definición 323
 - no natural 347
 - sobrenatural 347
- fenómenos no naturales 347
- fenómenos sobrenaturales 347
- ferroelasticidad 255
- ferroelectricidad 251
- ferromagnetismo 249
 - de materiales 42
- fibra
 - usos de la, fotografías de 180
 - óptica 179
- field
 - visualizing 19
- filósofos de la ciencia 272
- final de la ciencia 354
- finito 354
- fisiólogos 272
- flecha
 - dirección y truco de agua 171
- flujo 397
 - eléctrico 30
- flujo magnético 85
- flujo magnético cuántico 389
- fluorescencia 254
- fogonazo
 - verde, sobre el Sol 137
- fogonazo verde 425
- foraminífero 199
- forma, matemática 94
- fosforescencia 254
- fotconductividad 254
- fotoelectricidad 252
- fotostereografía 252
- fotografía 156, 252
- fotoluminiscencia 254
- fotón
 - masa del 388
- fotón
 - contradice las ecuaciones de Maxwell, el 267
 - densidad numérica 393
 - efecto de arrastre del 252
 - masa de un 100
 - masa del 150
- Franz Aichinger 446
- frecuencia angular 106
- frecuencia del ciclotrón 390
- frecuencia
 - peine de 422
- Friendbot 290
- fuego 248
- fuerza de Coulomb 29
- función
 - armónica 243
 - definición 312
 - matemática 312
- fusión
 - confinamiento inercial 163
- fusión en frío
 - como mentira 333
- futuro
 - y presente 362
- física 326
 - aburrida 303
 - cimientos 319
 - clásica, resumen de la 372–380
 - como ciencia básica 271

F

FSICA

- como estudio del cambio 323
 - del estado sólido 256
 - documentos de, chiste 147
 - es hablar sobre el movimiento 272
 - fin de la 342
 - fin de la física aplicada 377
 - fundamental, final de la 375
 - lento progreso de la 128
 - mapa de la 8
 - publicaciones 147
 - y lenguaje 302
 - física aburrida 303
 - física clásica
 - esencia de la 377
 - final de la 379
 - resumen de la 372–380
 - física cuántica 380
 - física del estado sólido 256
 - en la sociedad 256
 - físicas
 - etimología de 326
 - físicos
 - niños 273
 - físicos experimentales 327
 - físicos teóricos 327
 - fórmula
 - fabricante de lente 229
 - fórmula de Coulomb
 - ilustración de la 29
 - fórmula de Heaviside 87
 - fórmula de la lente
 - fina 228
 - fórmula de Larmor 127
 - fórmula de lente
 - fina 176
 - fóvea
 - definición de la 205
- G**
- GaAs 253, 254
 - gadolinio 251
 - gafas 217
 - gafas de sol
 - y simios 225
 - gafas de visión nocturna 165
 - gafas, de visión nocturna 165
 - galcacione 363
 - galvanómetro 46
 - gamba 123, 124
 - gambas
 - y visión 139
 - gas
 - constante, universal 389
 - gato
 - cerebro 292
 - gatos
 - de Ampère los 47
 - Gd 249
 - GdFeCo 250
 - GdSiGe 251
 - gen, D4DR 443
 - generación de armónicos 255
 - generador Kelvin 19, 395
 - foto de un 22
 - ilustración 396
 - generados Kelvin 31
 - genio 327
 - geodinamo 240
 - Giga 383
 - girasoles 314
 - patrones de Fibonacci 322
 - glaciación 376
 - globo
 - frotamiento, y lana 17
 - globo de aire caliente 258
 - globo de plasma 66, 68
 - globos de aire caliente 117
 - gloria 428
 - gluón 388
 - golpear con un campo 88
 - grado
 - unidad de ángulo 383
 - grafito 245, 248, 249, 252
 - grampus 349, 360
 - Gran Muralla 184
 - Gran Muralla China 429
 - granate
 - hierro de ytrio 64
 - gravedad
 - jaulas tipo Faraday 257
 - gravedad en la superficie del Sol 392
 - gravitoluminescencia 255
 - gray (unit) 383
 - grupo sanguíneo
 - y tonterías 337
 - guitarra
 - interferograma de una, fotografía del 194
 - género
 - mentira 339
- H**
- H 248
 - habitaciones de Ames 226
 - Habitación de Ames
 - fotografías de 226
 - halo 179, 214, 425, 428
 - ilustraciones del 215
 - halobacteria 63
 - hardware
 - del cerebro 292
 - He–Ne 255
 - hecho
 - definición 323, 328
 - hecto 383
 - Heiligenschein 214
 - helicóptero 237
 - helio 246, 252, 364
 - henry 383
 - hermano mayor 312
 - hertz 383
 - hexágono
 - mágico 321
 - mágico, ilustración 321
 - Hg 250
 - hidrógeno 252, 364
 - hielo en el aire
 - fotografía del efecto 143
 - hierro 18
 - Hilversum 258
 - hipocampo 293
 - hipocretina 295
 - hipótesis
 - definición 328
 - hipótesis del continuo 311, 333
 - holografía 158, 189–194
 - holograma 189–194
 - Denisjuk 190, 193
 - en movimiento 193
 - fotografías de 192
 - imagen de 192
 - producción de un, ilustración de la 191
 - transmisión de 192

H

HOLOGRAMAS

- hologramas 191
 homoeopatía 337
 hora 383
 horizonte 373
 horno 161
 colores en el interior de un 162
 solar, fotografía de 162
 horror vacui 352
 hueso
 es material piezoeléctrico 258
 hundimiento 173
- I**
 icono 298
 ideas verdes 334
 ideas, berdes 334
 idioma 272
 idioma humano 302
 Idioma Inglés
 tamaños del 299
 idioma Inglés 300
 idiomas hablados por una
 persona 315
 ilimitado 50
 ilimitados 30
 iluminación 368
 iluminancia 165
 tabla de valores 165
 ilusión
 de movimiento, ilustración 431
 desaparición del color 227
 profundidad del color 407
 sobre el paralelismo 202
 sobre los cruces 203
 óptica 226
 ilusión de Ouchi 430
 imagen 298
 a través de escaneo 194
 captación de 156–158
 como parte 273
 con espejos 168
 e interferencia 188
 formación 168
 pixel de 179
 por ultrasonido 229
 real 176
 tocar una imagen 129
 virtual 176
 y dispositivos de enfoque 176
 imagen por ultrasonido 229
 imaginación 274
 imanes 18, 41–42, 246
 corrientes internas de los 48
 ilustraciones de tipos de 38
 para niños 74
 imitación 329
 impenetrabilidad 255
 imán 72
 rompecabezas de 62
 InAs:Mn 249
 incandescencia 248, 256
 incandescencia 256
 incertidumbre
 relativa 385
 total 385
 inclinación 173
 incontabilidad 311
 incubación 368
 indicador de transformación 373
 inducción 345–347
 inducción magnética 50
 infantil
 psicología 272
 infinitamente pequeños
 no existen en la Naturaleza 380
 infinitesimales 316
 infinito 354
 en la Naturaleza 353–354
 no aparece en la Naturaleza 346
 infinitud 30, 50, 310–312
 información
 definición 283
 definición de 283
 medida de la 283
 tabla de valores 283
 infrarroja
 fotografía 204
 luz 112
 infrarrojo
 observación con el ojo 219
 Infrarrojos 118
 InP 253
 InSb 249, 250
 insecto 123
 instinto exploratorio 367
 instrumentos
 de medida 341
 intención 361
 intensidad
 luminosa 164
 intensidad luminosa 164
 interacción
 definición 274, 348, 349
 es recíproca 348
 interfaz cerebro–ordenador 102
 interferencia 110, 111, 154
 e imágenes 188
 figuras de patrones de interferencia 113
 interferencias 107
 interferograma 193
 fotografía de un 194
 interferómetro
 3-dimensional, ilustración de un 154
 fotografía de un 150
 interferómetro Talbot-Lau 188
 interruptor
 eléctrico 62
 puzzle 62
 intersubjetividad 329
 introspección
 y consciencia 366
 invariancia 26
 conforme 147
 y separabilidad 356
 invariancia de indicador 91
 invariancia de paridad 98
 invariante Jarlskog 387
 invariantes
 del campo electromagnético 54
 inversión de tiempo 96
 inyectiva 310
 ion 71
 fotografía de sombra de un 221
 iones 56, 266

IONIZACIÓN

- ionización 248, 251
- ionosfera 74, 260, 261
 - como espejo de radio 103
 - ilustración de la 70
- IRA o casi infrarrojo 118
- IRB o infrarrojo medio 118
- IRC o infrarrojo lejano 118
- irradiancia 165
- Islas Canarias 375
- ISO 343
- IUPAC 343, 445
- IUPAP 343, 445
- ión
 - definición de 34
 - y tiempo de reacción 268
- J**
- jarabe 405
 - dobra la luz, fotografía 170
 - ilustración de la refracción 171
- jaula de Faraday 257–258
- jets 236
- joule 383
- jugar 323
- Júpiter
 - propiedades 391
- K**
- katal 344
- kelvin
 - definición 381
- kilo 383
- kilogramo
 - definición 381
- kinesiología 326
- L**
- La Montaña del Movimiento
 - propósito de la serie de libros 7
- Lagrangiano
 - del campo electromagnético 264
- Lagrangiano de Proca 101
- LaH 253
- Landolt–Börnstein series 342
- laser
 - mortal de impulso pulsado 167
- lateralización 98
- latidos del corazón 315
- law
 - and sausage 324
- leche 137, 331, 441
- lectura de la mente 102, 262
- lectura del pensamiento 102
- lectura mental
 - foto de un experimento de 102
- lenguaje 298–322
 - de pitufo 303
 - escrito 299
 - gramática del 301
 - hablado 299
 - humano 299
 - sintaxis del 301
 - y física 302
 - y matemáticas 302
- lenguaje de pitufo 303
- lenguaje humano 300
- lente 176, 228
 - aberración de una 135
 - asférica 228
 - convergente 176
 - distancia focal 228
 - divergente 176
 - e imágenes, ilustración de 176
 - esférica 228
 - finas, fórmula 228
 - foco de la 228
 - perfecta 182
- lentes
 - anguila 407
- lentes de anguila 407
- levitación 129, 242–251
 - consumiendo energía 242
 - de cuenta con un láser 130
 - de humanos 246
 - de una cama 74
 - de una rana 244, 246
 - diamagnética 245–246
 - en un campo eléctrico 69
 - estacionaria 242
 - fotografías de 244, 245
 - láser 129
 - no estacionaria 242
 - por ultrasonido 242
 - sin energía 242
 - óptica 129, 423
- levitación láser 129
- levitación 247
- Levitron 434
- ley
 - de la Naturaleza 274
 - del pensamiento 345
 - desde la pereza 324
 - de la Naturaleza 348
 - no puede ser creada 358
 - primera 273
- leyenda
 - urbana 337
- leyendas urbanas 184, 337
- leyes de Kirchhoff 405
- limón
 - como batería 63
- línea
 - de alta tensión 62
- linealidad del campo electromagnético 106
- líneas de vórtex 89
- líneas equipotenciales 89
- lingüistas 272
- litio 364
- litro 383
- llama 248
 - y peine, fotografía 396
- llaves
 - ópticas 132
- localidad 355
- localización (débil, Anderson) 248
- longitud de onda 111
- longitud de onda Compton 389
- Lourdes 330
- luciérnaga 124, 254
- lumen 383
- luminescencia 254
- luminescencia de semiconductores 254
- Luminosidad del Sol 392
- luminosidad del Sol 410, 435
- Luna
 - cerilla en la 409
 - como espejo de radio 103

L
LUNA

- densidad de la 391
 - propiedades 391
 - y cerebro 364
 - Luna y láser 183
 - Lunokhod 183
 - lux 165, 383
 - luz 118
 - a través de un pequeño agujero 148
 - anchura de un rayo de luz 112
 - año 391, 392
 - blanca 135
 - bombilla de 149, 160
 - cambio de polarización 151
 - como sustancia 149
 - detección de oscilaciones 112
 - doblando la 187
 - entropía de la 162-163
 - es electromagnética 115-116
 - es una onda 110-112
 - fuentes de 158-168
 - infrarroja vista 219
 - la detección es un efecto cuántico 156
 - la generación es siempre un efecto cuántico 156
 - límite de concentración 162-163
 - medición de la intensidad 163
 - medidas de intensidad de la 166
 - mezcla de 134
 - momento angular de la 132
 - monocromática 134
 - naturaleza de la 105
 - no polarizada 124
 - parcialmente polarizada 124
 - resumen sobre la 155
 - sentir la 134
 - temperatura de la 162-163
 - temperatura y entropía de la 149
 - toma el camino más corto, ilustración de la 172
 - transmisión que muestra el carácter de onda 112
 - transporte de 156
 - velocidad invariante en electromagnetismo 128
 - y el experimento de Hertz 116
 - luz barométrica 248
 - luz de acné 225
 - luz solar
 - medidas de la 148
 - luzt
 - masiva 150
 - LW, ondas largas 117
 - lx 165
 - lámina de onda 403
 - lámpara
 - en una línea de alta tensión 78
 - láser 166, 191
 - actividad 255
 - como arma 167
 - como estrella guía 170
 - escaneo 188
 - fluoruro de deuterio 167
 - fotografía de un 166
 - rayos-X 262
 - y cuentas de cristal 129
 - y Luna 183
 - léxicos universales 301
 - límite
 - de resolución 183
 - límite de Planck 120
 - Límite inferior de frecuencia 116
 - límites
 - a la precisión 386
 - línea
 - alta tensión 78
 - línea de lata tensión 78
 - líneas de campo magnético 85
 - lógicos 272
 - lúpulo 98
- M**
- magia 358, 369
 - magnetar - magnetoestrella - 40
 - magnetismo
 - como efecto relativista 58-60
 - en plantas 64
 - relacionado con la electricidad 45
 - magnetismo conmutable 249
 - magnetoencefalografía 101
 - magnetoestrellas 75
 - magnetorrecepción 42-45
 - magnetorresistencia 248
 - magnetosomas 45
 - magnetostricción 249
 - Magnetón de Bohr 389
 - magnetón nuclear 390
 - magnetón, nuclear 390
 - mala suerte 338
 - manco 97
 - Manhattan como mina de cobre 24
 - mano
 - imagen de rayos-X de una 157
 - manto
 - de la Tierra 240
 - manzana
 - caída de la 330, 331
 - como batería 63
 - marcador
 - malo para el aprendizaje 9
 - marea
 - y magnetismo 68
 - mareas
 - y campos magnéticos 69
 - margaritas 314
 - mariposa de alas transparentes 219
 - masa
 - negativa 243
 - masa de Higgs 388
 - masa del bosón W 388
 - masa del bosón Z 388
 - masa del muón 388
 - masa del quark bottom 388
 - masa del quark charm 388
 - masa del quark down 388
 - masa del quark strange 388
 - masa del quark top 388
 - masa del quark up 388
 - Masa del Sol 391

M

M A S A

- masa del tau 388
- matemáticas
 - ciencia de las necesidades simbólicas 307
 - como colección de herramientas 319
 - como guía 308
 - definición de 304
 - es la física aplicada 305
 - y conceptos 304
 - y lenguaje 302
- matemáticos 272, 304, 319
- materia
 - más fuerte que la mente 336
 - tabla de propiedades electromagnéticas de la 248
 - transformación de la 358
- materia gris 279, 291
- material
 - con índice negativo 182
 - de refracción negativa 181–183
 - electro-óptico 187
 - magnético 41–42
 - tabla de propiedades magnéticas 43
 - zurdo 181–183
- material magnético
 - visualizando su comportamiento 42
- materiales
 - tabla de propiedades dieléctricas de los 44
- materiales foto-refractivos 187
- materiales fotorefractivos 253
- materiales zurdos 181
- materiales diamagnéticos 245
- matriz de mezcla
 - neutrino PMNS 388
 - quark CKM 387
- matrona 203
- medición
 - comparación 384
 - definición 384
 - irreversibilidad 384
 - proceso 384
 - significado 384
- medida
 - bañeras y 286
 - como clasificación 343
 - definición 343, 381
 - definición de error de 384
- medidas
 - y estándares 343
- medidor de Lorentz 55
- Mega 383
- memoria 275
 - almacenamiento de 285
 - borrado de 287
 - definición 284
 - del agua 295
 - escritura única 289
 - innata 289
 - regrabable 289
 - sinapsis y 285
- mensurabilidad 30, 50
 - de la carga 26
- mente
 - más débil que la materia 336
- mentira 327–333
 - definición 328
 - desacreditada por la física 340
 - específica 332
 - general 332
 - sobre la luz 134
- mentiras 331
 - ejemplos de 336–340
- mercado de valores 35
- Mercedes Benz 124
- mercurio 248, 252
- mesa
 - como dispositivo anti-gravedad 247
- mesón 34
- metal multicapas 248, 250
- metales 255
- metamaterial 182–183
 - ilustración de un 182
 - resonante 182
 - transmisión-tipo 182
- metricidad 26, 30, 50
- metro
 - definición 381
- metáfora 361
- mezcla de frecuencias 255
- Mg 249
- Michelson, Albert
 - sobre el final de la física 379
- micro 383
- micronistagmos 208
- microonda 117
 - estación de energía 399
- microondas
 - horno 238
- microscopio 178
 - de barrido de campo cercano 198
 - de campo cercano 157
 - de efecto túnel 198
 - de fuerza atómica 198
 - de fuerza magnética 198
 - de luz 406
 - de papel, fotografías de un 220
 - electrónico de escaneo 194
 - exploración del campo cercano 186
 - más antiguo, fotografía 406
 - plano 210
 - plano, fotografías 210
 - plegado de papel 219
 - resolución del, fotografías de la 185
 - tipos modernos de, fotografía de 196
- microscopio de luz 406
- microscopy
 - scanning 194
- microscopía 156
 - campo brillante 156
 - confocal de barrido con láser 195
 - de escaneo 194
 - de fluorescencia 198
 - de reducción de emisión estimulada 186
 - fluorescente 186
 - multifotón 198
 - óptica de barrido de campo cercano 198
- microscopía de campo oscuro

M

MICROSCOPA

- 156
- microscopía de contraste de fase 156
- microscopía de contraste de interferencia diferencial 156
- microscopía de escaneo láser confocal 157
- microscopía fluorescente 156
- microscopía oblicua 156
- miel 91
- migración de aves 43
- milagro 365, 366
 - definición 378
- militares
 - y ciencia ficción 134
- milla 384
- milli 383
- millón de dólares 347
- minuto 383
 - definición 393
- mirascopeo 194
- misterios 331
- Mn 249
- Mo 249
- modulador
 - acústico-óptico 184
- molino de luz 132
 - fotografía de un 131
- momento
 - mágico 273, 368
- momento angular 49, 133
 - de la luz 132
- momento magnético del muón 390
- momentos mágicos 368
- monopolo 85
 - magnético 101
 - no magnético 60
- monopolo magnético 99
 - no hay tal 60
- monopolos
 - tabla de búsquedas 39
- montañas
 - color azul 137
- morgana, fata *see* espejismo
- Motion Mountain
 - ayuda al proyecto 10
 - soporte del proyecto 10
- motivación
 - de los estudiantes 290
- motor
 - eléctrico y relatividad 58–60
 - más sencillo 72
 - unipolar 72
- motores eléctricos 48
 - fotografías de tipos de 46
- movimiento
 - control con el cerebro 280
 - de las imágenes 373
 - dentro de los átomos 268
 - es fundamental 382
 - inversión de 96
 - las cuatro entidades que lo muestran 372–373
 - no tiene sorpresas 378
 - predictibilidad del 375
 - resumen de propiedades 373–375
 - teoría final 271
 - y unidades de medida 382
- movimiento del ketchup 267
- movimientos primitivos 295
- mu-metal 258, 410
- mujer
 - tetracromático 209
- multiverso
 - es una tontería 329, 338, 347
- mundo 273
 - caos o sistema 273
 - encuesta del color del 425
- mundos
 - muchos, tontería 340
- muón 34
 - factor-g del 390
- MW, ondas medias 117
- mácula lútea 124
- mágico
 - hexágono 321
- mágicos
 - cubos y cuadrados 320
- máquinas electrostáticas 66
- máser 133
- método
 - científico, pasos del 326
- método científico
 - pasos del 326
 - método, científico
 - tabla de pasos 327
 - músculos 315

N

- n-Ge 249
- n-Si 249
- NaCl 249
- nano 383
- naranja 118
- NASA 134
- Naturaleza
 - no diseñada 359
 - no puede sorprender 375
 - no tiene libre albedrío 375
 - sentido de la 360
- naturaleza 273
- navaja de Occam 325
- Nb-Oxide-Nb 249
- Ne 248
- necesidades
 - ciencia de simbólicas 304
- necesidades simbólicas
 - ciencia de 304
- neocortex 293
- neriosa
 - señal 438
- nervio
 - gráfico de señales en un 57
 - ilustración de estructura y señales 58
 - velocidad 268
- nervios
 - funcionamiento de los 56–58
- neurona
 - en la retina 207
 - espejo 292
 - fotografía de una 285
- neuronas 281, 288, 315
- neurólogos 272
- neutralidad
 - eléctrica 24
- neutralidad eléctrica 24
- neutrino
 - masas 388
 - masas del 388
 - matriz de mezcla 388

N

NEUTRN

- neutrón
 longitud de onda
 Compton 390
 masa del 388
 momento magnético 390
- Newton 183
 newton 383
- Ni 249
- niobio 248
- Nit 166
- nivel de los océanos 377
- niños
 como físicos 273
- NOAA 448
- noción 298
- nodo 98
- nova 377
- nube
 carga de una, ilustración de la 235
 de plasma flotante 238
 gas interestelar 376
 molecular 376
- nube de gas interestelar 376
- nube de plasma
 flotante 238
 fotografías 238
- nube de tormenta
 es una batería 237
- nube Oort 376
- nubes de tormenta
 como acelerador 236
- níquel 18
- núcleo
 de la Tierra 240
 supraquiasmático 207
- número 26, 316
 diádico, racional 316
 parásito 413
 primo 322
 real 316
 surreal 316
 surreal, ilustración 317
 transfinito 311
- Número de Avogadro 389
- número de Fresnel 402
- Número de Loschmidt 389
- número de partículas 354, 355
- número diádico 317
- número finito 346
- número surreales 441
- números 318
 grandes, tabla de ejemplos 314
- números complejos 318
- números naturales 314
- números ordinales 316
- números racionales 316
- números reales 316, 318
- números surreales
 ilustración 317
- O**
- objeto 301
 como parte 273
 levitación de un 242, 243
- obleas paso a paso 230
- observable
 definición 343
- observación 286
 definición 274, 345
 tiempo para una 345
- OCT 200
- OCT 200, 258
 embrión de ratón 201
- océano
 nivel 376
- oftalmología 211
- ohm 76, 383
- ojo 201–231
 ,cerrado, medida con 225
 de los mamíferos 208
 claro del 225
 compuesto 209
 construcción 205
 cámara 205
 de insectos, ilustración de 210
 de los primates 208
 dibujo de sección del 206
 dispersión en el, ilustración de la 179
 humano 124, 179
 imagen de la cornea del 212
 insecto 179
 la parte con más movimiento 205
- limitaciones del 201
- limitación del 205
- limitación del, ilustración de una 202
- propiedades del 205
- píxeles 205
- ojo de insecto 179
- ojo humano 179
 y polarización 123
- ojos
 de los pájaros 208
- ojos de gato
 brillo de los 214
- olvido
 y entropía 287
- omatidios 209
- onda
 armónica 106, 107
 definición de 106
 ecuación de 106
 electromagnética 106, 107, 125
 electromagnética esférica 103
 electromagnética, ilustraciones de 107
 evanescente 182, 223, 404
 momento angular de una 134
 polarizada circularmente 124
 rango de 125
 terahertz 118, 258
 vector de 106
 velocidades de, ilustración de las 144
 velocidades de, película de tipos de 144
- onda de radio 108
 rango de 125
- onda electromagnética 125
 generación de 126
- ondas alfa 279
- ondas beta 279
- ondas de gravedad 134
- ondas de radio
 $1/r$ dependencia de 126
- ondas de terahertz 258
- ondas de terahertzios 118

O

ONDAS

- ondas delta 279
 - ondas theta 279
 - operación, (binaria) 313
 - opinión grupal 329
 - opuesto 302, 331
 - orden 26
 - ordenador
 - digital 294
 - forma de trabajar un 294
 - similar al cerebro 279
 - ordenador digital 294
 - orexina 295
 - orientación
 - óptica 250
 - ornitorrinco 36
 - oro 172, 252
 - oscuridad 252
 - oscuridad/negrura
 - definición 159
 - oso
 - polar 180
 - OVNI como mentira 333
 - oído de paloma
 - fotografía de partículas magnéticas en el 42
- P**
- p-Ge 252
 - palabras 298
 - habladas 283, 315
 - impresas 284
 - oídas 283, 315
 - palabras impresas 315
 - palillo de dientes 238
 - pan
 - y mentiras 340
 - pantalla 214–217
 - 3-dimensional, fotografía de 195
 - calidad de ventana 194
 - calidad fotográfica 194
 - clases de 215
 - par ordenado 310
 - paradoja
 - de la descripción demasiado completa 349
 - de la descripción incompleta 349
 - paradoja del barbero 320
 - paradoja del mentiroso 334
 - paradoja, del mentiroso 334
 - paraelectricidad 251
 - paraguas
 - y tonterías 337
 - paramagnetismo 42, 249
 - paramagnéticos 42
 - pararrayos 23
 - , ilustración de la extraña barra personal de Franklin 23
 - parguas
 - descompone la luz 133
 - parhelios 142
 - fotografía de 142
 - parpadeos 315
 - parsec 391
 - partes, suma de las 348
 - partículas de espín 1 134
 - partículas de espín 2 134
 - parámetro
 - definición 343
 - Parámetro de Hubble 393
 - pascal 383
 - paso a paso
 - oblas 230
 - pasta de dientes 284
 - patata
 - como batería 63
 - patrocinador
 - de este libro 10
 - patrones 323
 - patrón
 - de la Naturaleza 274
 - Pauw, método de of Van der 76
 - Pb 254
 - PbLaZrTi 252
 - PbSe 248
 - PbTe 248
 - peces del mar profundo 254
 - pegatinas anti-robo 250
 - peine
 - de frecuencia 422
 - y electricidad 17
 - pelo
 - erizamiento en un parque infantil 64
 - número 315
 - puzzle 63
 - película 158
 - películas de Hollywood 324
 - pepino como lámpara 149
 - pequeño, infinitamente
 - no existe en la Naturaleza 380
 - percepción
 - definición 274
 - pereza
 - de la física 323–324
 - de los conceptos físicos 326
 - perigeo 391
 - perihelio 392
 - permanencia 372
 - permeabilidad 147
 - del vacío 52, 387
 - permisividad
 - del espacio libre 29
 - permitividad 147
 - de los materiales 79
 - del vacío 387
 - gráfico de 79
 - persona 435
 - Peta 383
 - petrolero
 - hundimiento de un 67
 - petroleros 67
 - pez
 - eléctrico 36
 - pez fantasma 168
 - phot 165
 - pico 383
 - piedra solar
 - y navegación 153
 - piedras 312, 357, 362, 369
 - singulares 16
 - piel 118
 - acertijo de la 336
 - efecto 249
 - imagen en profundidad 211
 - piezoelectricidad 251
 - pila 62
 - pilares solares 179
 - pingüino
 - volador 340
 - pintura retrorreflexiva 214
 - pintura, calor y 224
 - pinzas

P

PIROELECTRICIDAD

- ópticas 132
- piezoeléctricidad 251
- pistola aturdidora 60
- pistolas de bobina 66
- pistolas de raíles 66
- placas de onda 153
- planta
 - solar, fotografía de 164
- plantas
 - y campo eléctrico 37
- plasmas 249, 266
- plasmoides 238
- plasticidad 255
- plata 24
- platonismo 304
- polarizabilidad 251
 - eléctrica 78
- polarización 120, 253
 - de la luz 120
 - cepillo de 123
 - de la luz 120–124
 - del cielo, ilustración de la 122
 - detección a simple vista 123
 - eléctrica 26
 - lineal 124
 - magnética 41
 - onda electromagnética 120–124
- polarizadores en las luces de los coches y parabrisas 150
- polen 197
- polifacético 111
- polo
 - magnético 41, 49
 - magnético, en un espejo 97
 - magnético, fortaleza del 104
 - magnético, múltiples en la Tierra 376
- polo magnético
 - en un espejo 97
- polo norte 41
 - magnético 47
- polo sur 41
 - magnético 47
- polvo 253
- polímero 255
- polímeros electrónicos 279
- positiva 22
- positiva o negativa 26
- potasio 56
- potencia
 - axioma conjunto de 308
 - conjunto 311
 - de luz 164
 - ruido de fuente de 260
- potencia del Sol 225
- potencial
 - eléctrico
 - indeterminación del 79
 - energía 65
 - vector, ilustración del 89
- potencial eléctrico 91
- potencial vector
 - arrastrado por cargas 91
 - magnético 90
- potencial vector magnético 90
- precisión 333, 384
 - límites a la 386
 - tres errores a evitar 347
- predicado 301
- predictibilidad del movimiento 375
- prefijos 383, 444
 - SI, tabla de 383
- prefijos, SI 383
- prejuicio 330
- presión atmosférica 391
- presión de la luz 130
- Presión fotosférica más baja del Sol 392
- presión luminosa 253
- presocráticos 443
- primitiva
 - semántica universal 301
- primitivos
 - semánticos, tabla de los 301
- primo
 - Sophie Germain 413
- principio
 - antropico 364
 - antropico, comprobando el 365
 - computacional 365
 - de acción mínima 55
 - físico, definición 323
 - porcino 365
 - simiónico 365
- principio antrópico 364
- principio computacional 365
- principio de exclusión de Pauli 440
- prisma 172
 - como atmósfera 136
 - fotografía del trabajo de un 106
- Prisma de paloma 403
- prismas de Dove 227
- Problemas de Hilbert 305
- producto Cartesiano 310
- profesor
 - honestidad del 324
- promedio 345
- propiedad
 - de la Naturaleza 274
- propiedades emergentes 349
- propósito 361
- protán 224
- protón
 - carga específica del 390
 - factor-g 390
 - longitud de onda Compton 390
 - masa del 388
 - momento magnético del 390
 - razón giromagnética del 390
- prueba
 - definición de 328
- pseudoscopia 226, 227
- pseudovector 49
- psiquiatra 335
- puente
 - de agua flotante 258
 - flotante de agua 259
- puerta
 - lógica Y 287
- puerta Y
 - lógica 287
- puesta de Sol 136, 137
 - y refracción 173
- punto
 - de contacto 77

P
PUNTO

- punto de Poisson 184
 - puzzle
 - de la madre joven 320
 - difícil, sobre resistencia 79
 - puzzle de reflejos 97
 - pájaro
 - ve la polarización 123
 - pájaros
 - sobre líneas eléctricas 62
 - péndulo de Foucault 152
 - pólders 184
 - públicas 332
- Q**
- quark
 - matriz de mezcla 387
 - queso
 - y la velocidad de la luz 109
 - quimioluminiscencia 254
 - quiralidad 64
 - cuántos 380
- R**
- radiación 108, 373
 - armas de 167
 - cósmica 269
 - del cuerpo negro 256, 257
 - la, es dependiente del observador 246
 - partícula 266
 - térmica 256
 - radiación calorífica 248
 - radiación de transmisión 255
 - radiación térmica 161, 248, 256
 - radiador
 - color del calor 224
 - radio
 - astronomía 167
 - campo 18
 - control de, lo más simple posible 109
 - estereoscópico 189
 - fotografía de Hertz, primera 108
 - ondas 117
 - sencillamente auto-construida. 109
 - transmisores de 167
 - Radio de Bhor 389
 - radio del electrón
 - clásico 389
 - radio transmisor
 - más simple posible 109
 - radián 382
 - radiómetro 132
 - rana
 - levitando 244, 246
 - rango
 - definición de 312
 - rayo 19, 27, 233
 - alcanzando un árbol
 - fotografía de 234
 - forma de zigzag de un 233
 - globular 238
 - peligro al sobrevivir 236
 - primeros auxilios 236
 - rayo de luz
 - como un tirabuzón 187
 - doblado gravitacional de un, ilustración de un 187
 - retorciendo un 187
 - rayo láser
 - sentir un 134
 - tubular 225
 - rayo láser tubular 225
 - rayo tractor 149
 - rayo verde 424
 - rayo, tractor 149
 - rayo-X
 - telescopio de 157
 - rayos 165, 233-239
 - cósmicos 269
 - foto de múltiples 21
 - rayos cósmicos 237
 - rayos cósmicos 233, 376
 - rayos globulares 238
 - Rayos-X
 - desde una cinta adhesiva 409
 - rayos-X
 - CT, ilustraciones 200
 - emisión por los rayos 236
 - fuertes 119
 - imagen de una mano 157
 - imágenes de, belleza de los 228
 - láser de 262
 - suaves 119
 - tomografía de 200
 - tomografías de, ilustraciones de 199
 - y arte 228
 - óptica, fotografía de 169
 - razón 361
 - Razón de frecuencia de Josephson 389
 - razón de masa
 - muón-electrón 390
 - neutrón-electrón 390
 - neutrón-protón 390
 - protón-electrón 390
 - realidad 274
 - recaudación de impuestos 381
 - recaudadores de fondos 326
 - recombinación 248
 - recuerdo
 - y promedio de tiempo 345
 - red 281
 - reduccionismo 363
 - reflectividad 129, 130, 253
 - reflexión de Bragg 253
 - refracción 183
 - refracción 169-253
 - 'ley' de 405
 - astronómica 173
 - definición 169
 - en el ojo 179
 - explicación 170
 - terrestre 173
 - total 223
 - y aureolas 214
 - índice de 406
 - índice de, ilustración del 181
 - índice de, negativa 181
 - registro
 - definición 285
 - regla
 - de la Naturaleza 274, 323
 - regla de la mano derecha 83
 - regla de Lenz 85
 - rejillas
 - de difracción 182
 - relaciones de Kramers-Kronig 80
 - relación 275, 306, 309

R

RELACION

- binaria 310
- definición 307–310
- definición, ilustración 308
- relación de indeterminación
 - para la corriente 79
 - para los condensadores 78
- relación de Lorentz 53
- religión
 - definición 331
- remolino, cabello 98
- rendija
 - gráfico de transmisión 112
- repetidor gamma suave 40
- represión 101
- repulsión
 - de cargas 374
- resina 18
- resistencia
 - de átomos individuales 76
 - difícil puzzle sobre 79
 - eléctrica 76
- resistividad 248
- resolución 407
 - impresión máxima 229
 - límite de 183
- resonancia del ciclotrón 251
- resonancia magnética 251
- resonancias de Schumann 432
- respiraciones 315
- resplandor
 - fotografía del 178
- retina 211
 - con imagen invertida 203
 - detalles 205
 - fotografía de la 214
 - introducción a la 205
 - y neuronas 207
- retroceso 33
- reversión
 - del campo magnético de la Tierra 376
- revestimiento
 - anti-reflexión 219
- rifle de
 - Gauss 66
- rifle de Gauss 64
- roayos-X
 - fuentes de, fotografía de una 166
- roja 211
- rojo 118
- rojo primario 118
- rosa 225, 358
- rotacional 90
 - ilustración de 90
 - visualización del 90
- rotación 90
 - inducida por la luz 133
- rotación de Faraday 250
- rubí 252, 255
- rueda de Barlow 72
- rueda de Benham 230
 - ilustración 231
- ruido 286
- rutilo 121
- rápidas
 - células en el cerebro 295
- S**
- sabio, siete 18
- Sahara 314
 - señal de 50 Hz en el medio del 260
- sal 252
- salamandra 36
- salto Goos-Hänchen 223
 - ilustración del 223
- salto Imbert-Fedorov 223
- saturación 138, 368
- Sb 248
- Se 254
- secuencia 26
- segundo 383
 - definición 393
- semi-anillo 314
- semiconductividad 248
- semiconductores 251
- semáforo 268
- sensación
 - definición 274
- sensibilidad del ojo 209
- sensibilidad escotópica 408
- sensor 56
- sensores de plantas
 - para campos eléctricos y magnéticos 103
- sensores del airbag 36
- sentido
 - cerebro y 292
 - de la vida 360
- sentimientos y mentiras 332
- separabilidad 26, 355
 - del Universo 355
- serie de Fibonacci 440
 - tonterías sobre la 321
- señal
 - detalles de la definición 147
 - es transporte de energía 147
 - física 143
 - no puede moverse más rápido que la luz 146
 - velocidad de 143
 - velocidad de la 142–147
 - velocidad de una, eléctrica 267
- SHF, frecuencia super alta 117
- SI
 - prefijos
 - tabla de 383
 - unidades 381, 387
- si
 - definición de 302
- Si – silicio 252
- siemens 383
- sievert 383
- signo 298
- silicio 248, 249
- simetría conforme 96
- simetría de indicador 91
- simetría especular 98
- simetrías
 - como declaraciones inductivas 346
- simios
 - y gafas de sol 225
- sinapsis 285, 288
- singularidad, desnuda 377
- sistema algebraico 313
- sistema de rechazo activo 167
- Sistema Geodésico Mundial 392
- Sistema Internacional de Unidades (SI) 381
- sistema nervioso
 - entérico 292

S

SISTEMA

- fotografías 277
 - sistema nervioso entérico 292
 - sistema SI 163
 - sistema solar
 - inestabilidad 376
 - sistema unitario de Heaviside–Lorentz 29
 - sistema unitario electromagnético 29
 - sistema unitario electrostático 29
 - sistema unitario Gaussiano 29
 - sistemas de pixelado 179
 - sistemas de píxeles 218
 - sistemas de realidad virtual 189
 - smartphone 338
 - malo para el aprendizaje 9
 - SNOM
 - fotografía de un 198
 - sobra
 - de la Gran Muralla China 429
 - sobre 310
 - sobre, pegado 65
 - sobredescripción 93
 - sodio 56
 - Sol 410, 435
 - de la tarde 136
 - envejecimiento del 377
 - perros 428
 - perros del 142
 - solenoides 47
 - solidez 247, 255
 - solo los muertos son legales 161
 - sombra
 - color de la 425
 - con agujero 184
 - con halo o aureola 214
 - de cables 71
 - de la Gran Muralla de China 184
 - y efectos de onda, ilustraciones de la 184
 - sonido 183
 - sonografía 200
 - sonoluminescencia 255
 - sorpresa
 - ninguna en la naturaleza 375
 - sorpresas divinas 365
 - sorpresas divinas 365
 - soviets 45
 - spin 49
 - spirales 321
 - sprites 236, 237
 - suerte
 - mala 337
 - sueño 274
 - adivinanza 336
 - energía del 287
 - sujeto 301
 - suma de las partes 348
 - superconductividad 248
 - superconductores 251
 - superlente 182
 - superluminal 146
 - supermercados 225
 - supernovas 377
 - superordenador 291
 - superposición 106
 - superradiación 255
 - supersticiones 370
 - superstición 330, 338, 369, 414
 - suporte
 - este libro 10
 - SW, ondas cortas 117
 - símbolo
 - definición de 298
 - matemático 343
- T**
- talio 132
 - tamaño de letra Minion Math 447
 - tapetum 168
 - taquímetro 80
 - TbDyFe 249
 - teclado
 - diferentes tipos de 321
 - tejidos, visión a través de los 118
 - telecomunicación 161
 - telescopio 176
 - tipos de, fotografía de 177
 - viviente 178
 - Telescopio abierto holandés 177
 - telescopio de Galileo 177
 - telescopía 157
 - televisión
 - imagen de tubo de rayos catódicos 216
 - la mayor decepción de la industria de la 215
 - mata la curiosidad 338
 - tubo de 217
 - televisión
 - tubo de 254
 - teléfono móvil 18
 - temperatura
 - negativa 163
 - temperatura del fondo de microondas 393
 - tensor 53
 - antisimétrico 50
 - energía-cantidad de movimiento 95
 - tensor campo dual 84
 - tensor energía-cantidad de movimiento para el campo electromagnético 95
 - teorema de Earnshaw 243
 - teorema de Gauss 397
 - teoría 332
 - del todo 271
 - origen del término 327
 - teoría de la evolución 332
 - teoría del todo 412
 - teoría física 332
 - Tera 383
 - termoluminescencia 255
 - tesis
 - definición 328
 - tesla 51, 383
 - tetracromaticidad 139
 - teóricos 327
 - tiburón 25, 36
 - tiempo de reacción e iones 268
 - Tierra
 - aplanamiento de la 391
 - carga de la 27
 - corteza de la 240

T

TIPOGRAFÍA

- densidad media de la 391
 edad de la 391
 entretimiento de la
 rotación 377
 estructura de la,
 ilustración 239
 gravedad normal 391
 inestabilidad del manto
 376
 longitud gravitacional de
 la 391
 masa 391
 radio ecuatorial 391
 radio polar de la 391
 rayos de la 338
 solidificación del núcleo
 377
 tipografía itálica 298
 TNT contenido de energía
 390
 todo, el 273
 TOE 271
 tomografía 157, 199–201
 de coherencia óptica 200
 crio-eléctrica 200
 de coherencia óptica 211
 de emisión de positrones
 200
 de inducción magnética
 200
 de rayos-X 200
 de resistividad eléctrica
 200
 opto-acústica 200
 por muones 201
 tomografía opto-acústica 200
 tomografía por muones 201
 tonalidad o matiz 138
 tonelada, o ton 383
 tonterías 333–335
 ejemplos de 336–340
 topología 147
 tormentas solares 260
 tormentas, solares 260
 toro
 visión del 208
 torque 49
 trampa
 rotante, fotografía de una
 245
 trampas de Paul 246
 trampas de Penning 246
 transformación
 de la materia 358
 relaciones de 373
 transformación gauge 93
 transformador
 campo vectorial de
 Poynting de un 97
 correspondencia con el
 agua 73
 ecuación de Maxwell y 84,
 85
 tormenta solar y 260
 transistor 73
 transmisor
 el más simple posible 109
 transparencia 253
 transporte paralelo 152
 transustanciación 332
 traza
 de una matriz 54
 triboelectricidad 248
 triboluminescencia 254, 409
 tricromaticidad 139
 triplet
 Pitagórico 320
 triprisma de Fresnel 153
 trirrefringencia 121
 trit 295
 tritán 224
 truenos 233
 tsunamis
 desde las Islas Cararias 375
 tubo de rayos catódicos 18, 33,
 54, 60
 en fluorescencia 254
 imagen de 216
 tungsteno 149
 turmalina 153, 251
 tv 254
 términos 298
- U**
- udeko 383
 Udekta 383
 UHF, frecuencia ultra alta 117
 Ultravioleta 119
- ultravioleta
 fotografía 204
 luz 112
 unidad
 astronómica 391
 definición 343
 unidad astronómica 392
 unidad central de proceso 294
 unidad de masa atómica 388
 unidad natural 389
 unidades 381
 no-SI 384
 provinciales 384
 sistema de 29
 unidades de clasificación 281
 unidades SI
 prefijos de 383
 suplementarias 382
 unificación 363
 universal
 gramatical 300
 léxico 301
 semántico 300
 Universo
 es comprensible 355
 existencia del 356
 no diseñado 359
 no es información, el 284
 ¿es un conjunto? 354–356
 universo 273
 otro 329
 recolapso del 377
 sólo uno 347
 UNIX 34
 Unión Astronómica
 Internacional 392
 Unión Geodésica
 Internacional 392
 UVA 119
 UVB 119
 UVC 119
- V**
- vector de Poynting
 campo del 97
 vacío 147, 352, 'void' en
 Inglés)352
 como medio 148
 como portador 148

V

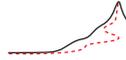
VAGUERA

- impedancia de onda 147
 - inestable 377
 - modelo fallido de Maxwell 80
 - permeabilidad del 387
 - permitividad del 387
 - resistencia de onda 389
 - tabla de propiedades 147
 - vaguería en la física 324
 - valor 312, 369–370
 - vampiro 129
 - vanadato de sodio 121
 - variable
 - definición 343
 - varianza 385
 - vaío
 - impedancia de onda 149
 - vector
 - axial 49
 - vector de Poynting 95, 96, 103
 - ilustración 401
 - vela 164, 238
 - velocidad
 - de deriva del electrón 74
 - de la luz *c*
 - física y 8
 - de la punta de un rayo 72
 - de los electrones 267
 - de señales eléctricas 267
 - del agua en una manguera 268
 - energía de 145
 - límite 155
 - velocidad de deriva 267
 - velocidad de grupo 144
 - negativa 146
 - puede ser infinita 145
 - velocidad de la luz 267
 - el movimiento del observado es imposible 129
 - es invariante 128
 - tipos de 142–147
 - verdadera 146
 - y chocolate 109
 - y llamada por satélite 109
 - velocidad del frente 146
 - velocidad del primero 146
 - velocidd
 - de los electrones 268
 - vendeko 383
 - Vendekta 383
 - verbo 301
 - verdad 331
 - definición 328
 - es empírica, la 330
 - pura 329
 - verde 118
 - estrella 161
 - fogonazo 136
 - viendo el 211
 - verde primario 119
 - verificación 368
 - vertebrados gaseosos
 - malhumorados 331
 - VHF, frecuencia muy alta 117
 - vida
 - sentida de la 360
 - vidrio 248, 250, 253
 - viendo 161, 188
 - viento
 - solar 69
 - viento solar 40, 69, 72, 134, 253
 - violeta 119, 225
 - viscosidad 255
 - vocabulario 299, 304
 - volcán
 - gigante 376
 - volcánica
 - explosión 376
 - volt 76, 383
 - voltaje 32
 - indeterminación del 79
 - tabla de valores para el 60
 - Voltaje de Planck 60
 - volumen molar 389
 - VUV 119
 - Vái Láctea
 - edad 392
 - Vía Láctea 377
 - masa 392
 - tamaño 392
 - víbora
 - fosa de la 217
 - sien de una 217, 218
 - video
 - malo para el aprendizaje 9
- W**
- W 248, 249, 252
 - watt 383
 - weber 383
 - weko 383
 - Wekta 383
 - wolfratos 253
- X**
- X-rays 119
 - xenno 383
 - Xenta 383
- Y**
- yocto 383
 - Yotta 383
- Z**
- zancos 336
 - zepto 383
 - Zetta 383
 - ZFC 309
 - ZnS 254
 - ZnSb 248
 - Zodiaco
 - y tonterías 337
 - zurdos 98
- África
 - colisión con Europa 376
- ácido sulfúrico 252
- ámbar 18
 - y tonterías 337
- ángel
 - en un pin 314
 - eres uno? 334
- ángulo
 - crítico 124
- ángulo de Brewster 123
- ángulo de mezcla débil 387
- ánodo 71
- árbol 314
- árboles y electricidad 18
- átomo
 - individual 76
- éter 426
 - y vacío 147
 - como mentira 333
 - modelo 426

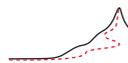
ningún 147–148
tabla de propiedades 147
vacío y 352
y vacío 148
índice 298
índice refractivo 170

índice
de refracción negativa 181
índigo 119
óptica
adaptativa 211, 214
adaptiva 213

definición 156
difractiva, fotografías de
185
resumen de 231



NDICE



LA MONTAÑA DEL MOVIMIENTO

La Aventura de la Física – Vol. III

Luz, Cargas y Cerebros

- ¿Qué son la electricidad y el magnetismo?
- ¿Cómo se forma un arcoíris?
- ¿Cual es el viaje más fantástico posible?
- ¿Qué es la luz?
- ¿Cómo se pueden levitar cosas?
- ¿Qué pueden hacer los láseres?
- ¿Cual es la diferencia entre el cerebro y un ordenador?
- ¿Cuales son las mayores catástrofes que se esperan para el futuro?
- ¿Qué problemas de física están sin resolver?



Respondiendo a estas y otras preguntas sobre el movimiento, estas series proporcionan entretenimiento y dan un nuevo giro a la introducción de la física moderna - uno que supone una sorpresa y un desafío en cada página. Partiendo de la vida cotidiana, la aventura proporciona un resumen de los modernos resultados de la mecánica, el calor, el electromagnetismo, la relatividad, la física cuántica y la unificación.

Christoph Schiller, PhD Université Libre de Bruxelles, es físico y un popularizador de la física. Escribió este libro para sus hijos y para todos los estudiantes, profesores y lectores interesados en la física, la ciencia del movimiento.

