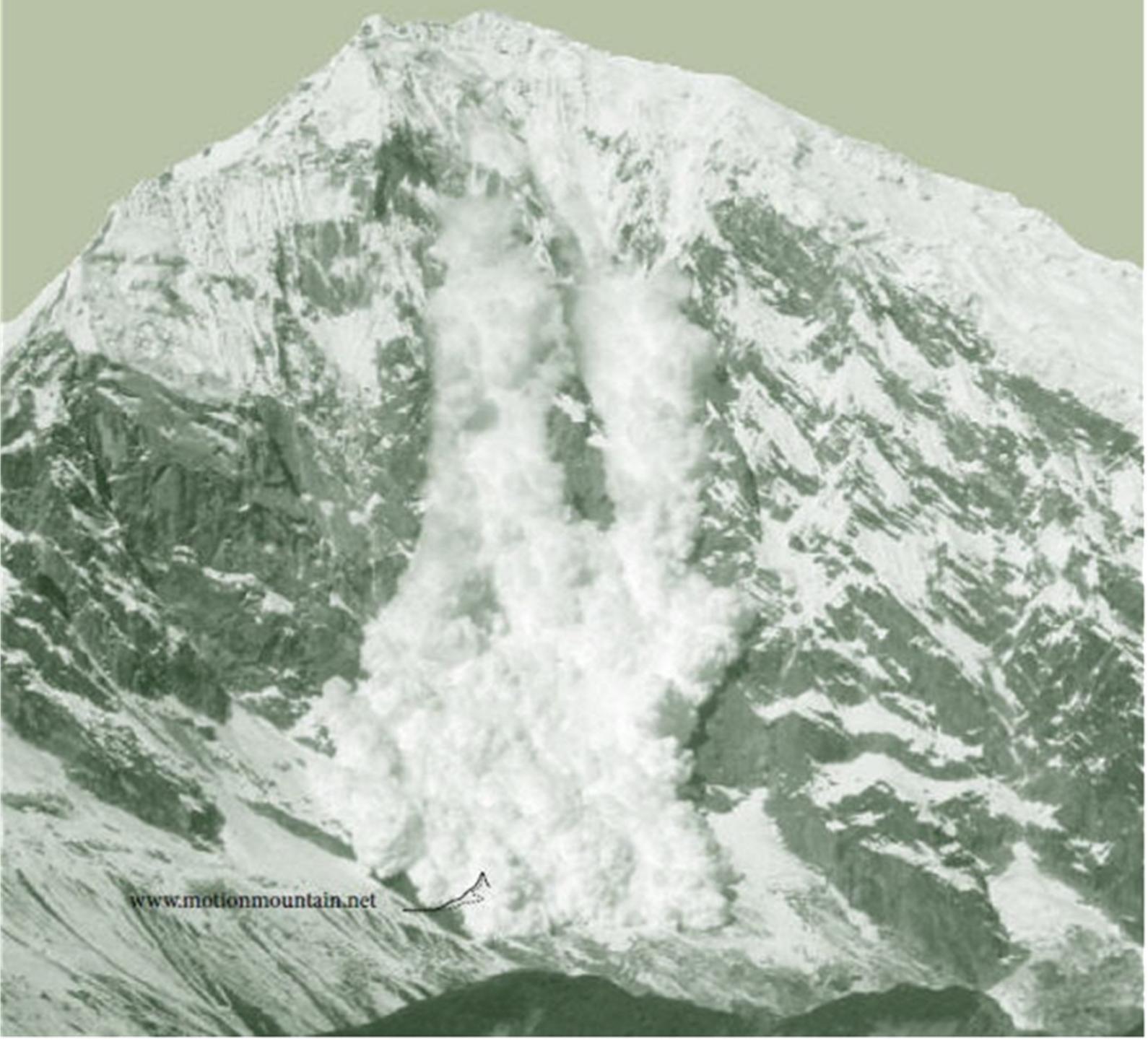


Christoph Schiller

Preveo: Dragoš Vulović

PLANINA KRETANJA

**PUSTOLOVINA FIZIKE – VOL. III
SVETLOST, NABOJI I MOZAK**





Naslov orginala:

Christoph Schiller

Motion Mountain



The Adventure of Physics

Volume III

Light, Charges and Brains

Edition 28.1, available as free pdf
with films at www.motionmountain.net

Preveo sa engleskog

Dragoš Vulović

dvulovic@sbb.rs



Planina kretanja

Pustolovina fizike

Volumen III

Svetlost, naboji i mozak

Izdanje 28.1, dostupno kao besplatna pdf datoteka
sa filmovima na www.motionmountain.net

Editio vicesima octava.

*Proprietas scriptoris © Chrestophori Schiller
tertio anno Olympiadis trigesimae.*

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

Dvadesetosmo izdanje

Copyright © 1990–2016 by Christoph Schiller,

Od treće godine 24. Olimpijade

Do prve godine 31. Olimpijade.



Ova pdf datateka je licencirana preko Creative Commons Attribution-Noncommercial-No DerivativeWorks 3.0 Germany

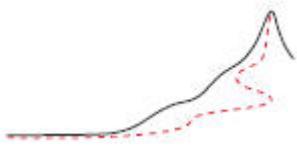
Licenca, čiji potpun tekst može da se nadje na veb stranici <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de>, uz dodatna ograničenja za reprodukciju, distribuciju i korišćenje, kako celine, tako i delova, za bilo koji proizvod ili bilo kakvu uslugu, komercijalnu ili ne, nije dozvoljeno bez pismenog dopuštenja vlasnika licence. Datateka pdf je bila i ostala besplatna za svakog u svrhu čitanja, memorisanja i štampanja za ličnu upotrebu i za elektronsku distribuciju, ali samo u neizmenjenom obliku i besplatno.

To Britta, Esther and Justus Aaron

τῷ ἐμοὶ δαίμονι

Die Menschen stärken, die Sachen klären¹.

¹ Osnažite ljude, razjasnite stvari



PREDGOVOR

*Primum movere, deinde docere.¹
Antiquity*

Ova knjiga je napisana za svakog ko je radoznao u pogledu kretanja u prirodi. Kako se kreću stvari, ljudi, životinje slike i prazan prostor? Odgovor vodi do mnogih avantura, a ovaj deo knjige predstavlja ono najbolje kada se istražuje bilo šta električne prirode. On vodi od merenja električne struje do korišćenja magnetnog polja u lečenju preloma kostiju, pa sve do upotrebe svetlosti za sečenje metala i do razumevanja ljudskog mozga.

U strukturi moderne fizike, prikazane na *slici 1*, rezultati kretanja usled elektriciteta najzačuđujući je aspekt za polaznu tačku na donjem delu slike. Zapravo, sve oko nas kreće se usled električnih procesa. Ovaj uvod u elektricitet, magnetizam, svetlost i mozak treća je od šest knjiga koje su nastale iz trostrukog cilja kojeg sam pratio od 1990. godine: da prikažem kretanje na način koji je jednostavan, savremen i privlačan.

Da bi bio **jednostavan** tekst je fokusiran na pojmove, pri čemu je matematika zadržana na neophodnom minimumu. Razumevanje principa fizike ima prednost nad korišćenjem formula u izračunavanjima. Ceo tekst je unutar oblasti dodiplomskih studija.

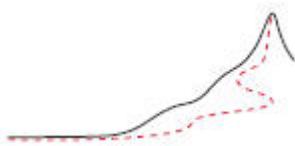
Da bi bio **savremen** tekst je obogaćen brojnim draguljima – kako teoretskim tako i praktičnim – koji su rasejani širom naučne literature

Da bi bio **privlačan** tekst nastoji da preplaši čitaoca što je više moguće. Čitanje knjige iz opšte fizike treba da bude slično odlasku na predstavu madioničara. Gledamo, iznenadeni smo, ne verujemo sopstvenim očima, razmišljamo i na kraju shvatamo trik. Kada posmatramo prirodu imamo često isti doživljaj. Zaista, svaka stranica predstavlja za čitaoca najmanje jedno iznenadenje ili provocira čitaoca da o tome razmisli.

Moto teksta, “*Die Menschen starken, die Sachen klaren*”, poznata izreka Hartmuta von Hentinga o pedagogiji, prevodi se kao “*Osnažite ljudе, razjasnite stvari*”. Razjasniti stvari – i oslanjati se samo na istinu – zahteva hrabrost, kao što promena navike razmišljanja izaziva strah, često sakriven besom. Ali savladavanjem naših strahova naša snaga se povećava. Takođe doživljavamo jače i lepše emocije. Sve velike avanture u životu omogućavaju to, a otkrivanje kretanja je jedna od njih. Uživajte u tome.

Minhen, 30. juna 2016.

¹ “Najpre kreni, zatim uči” U modernim jezicima pomenući tip kretanja srca (*moving*) naziva se **motivacija**; oba pojma potiču od istog latinskog korena.



PREDGOVOR UZ PREVOD

Prevodenje na neki strani jezik predstavlja često tešku i opasnu probu opterećenja koju tekst orginala ponekad ne može da izdrži.

Ivo Andrić, *Nešto o prevodenju*

Serija od šest knjiga koju je napisao Christoph Schiller u vidu pustolovina koje očekuju čitaoci prilikom penjanja na Planinu Kretanja, jednostavno mora da pokrene čitaoca da krene ka vrhu. Svaka od šest pustolovina pruža jedinstvene osnove ne samo da se razume fizika, već i da nas osloboди od straha pred njenim zagonetkama i da nam pokrene radoznaost za narednu pustolovinu.

Autor zaista ispunjava svoja obećanja i postiže sva tri postavljena cilja. Tekst je zaista **jednostavan, savremen i privlačan**. U svih šest knjiga, izuzetno nadahnuto, detaljno i jasno, i na duhovit način, izneta je ogromna količina podataka, izazova za razmišljanje, preporučene literature i biografskih podataka o ljudima koji su tokom 2 milenijuma istraživali i otkrivali i tajne života.

Poveden ovim kvalitetima započeo sam u septembru 2016. godine prevodenje šest knjiga Motion Mountain, izdanje 2016., samo nekoliko meseci od objavljivanja na internetu. Rezultat skoro trogodišnjeg rada nalazi se pred vama.

U početku imao sam namjeru da prevod bude namenjen samo za lične potrebe i potrebe moje porodice. Međutim, što se prevodenje bližilo kraju, to sam sve više počeo da razmišljam da bi ovaj prevod mogao da pruži zadovoljstvo i drugima.

Prevod je nastao, između ostalog, zahvaljujući svesrdnoj podršci autora, Christoph Schiller-a. Neizmerno sam mu zahvalan za sve ono što je omogućilo da prevod bude deo družine Motion Mountain.

Unapred se zahvaljujem svim čitaocima koji me budu izvestili o svojim zapažanjima i svim mogućim poboljšanjima putem elektronske pošte dvulovic@sbb.rs. Time će doprineti da tekst prevoda postane još kvalitetniji.

Knjigu posvećujem:

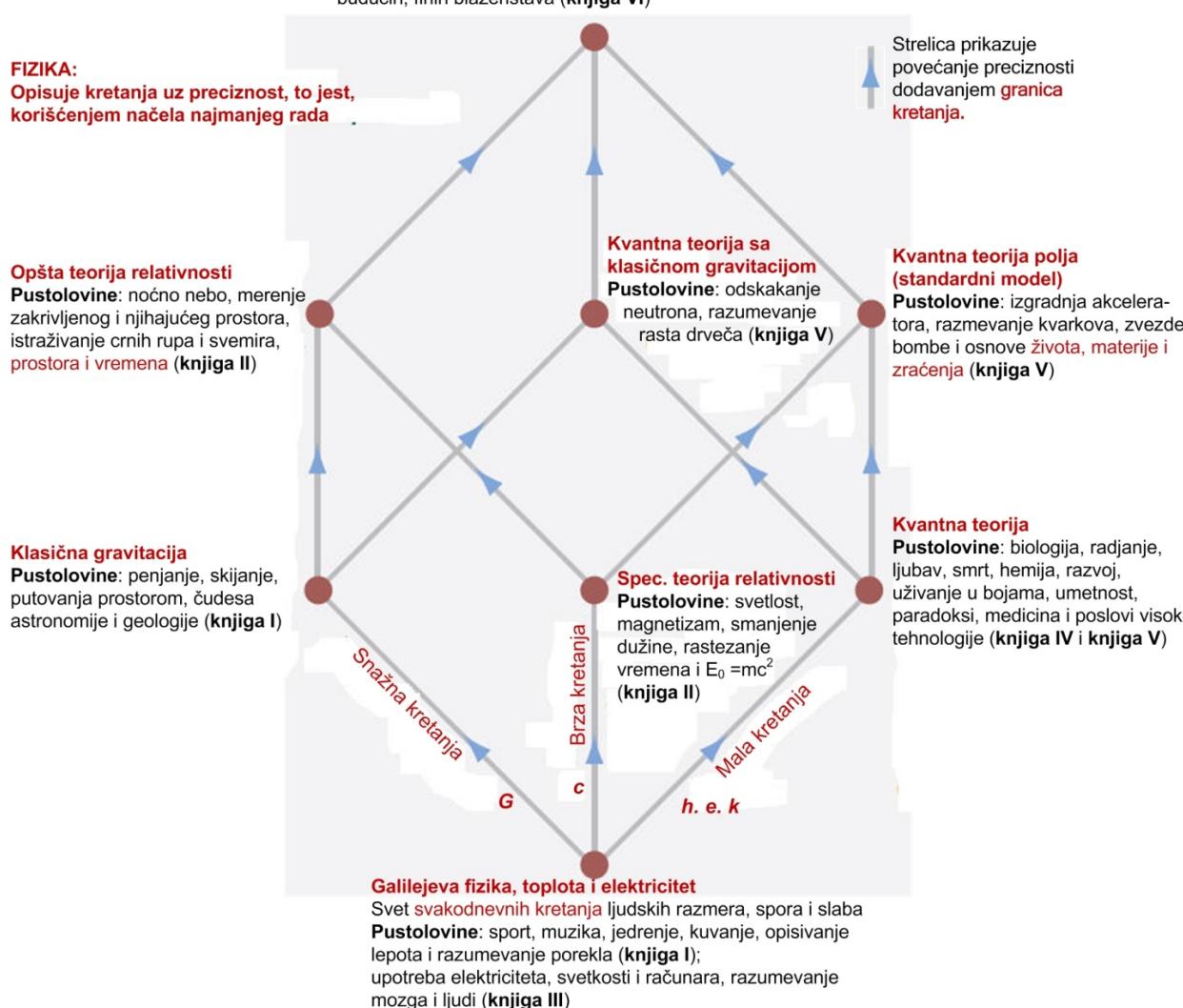
mojim čerkama: Ireni i Ivani, njihovoj deci, mojim unucima: Uni, Stevanu, Pavlu i Mariji.

Posebnu zahvalnost zaslužuje moja supruga, Nevenka. Njeno razumevanje i podrška doprineli su da predano radim na prevodu. Strpljivo je podnosiла моју, bezmalo trogodišњу, preokupiranost penjanjem na Planinu Kretanja.

u Novom Sadu,
od septembra 2016. do maja 2019.

Konačan, objedinjen opis kretanja

Pustolovine: opisuje (precizno) sva kretanja, razumevanje porekla boja, prostor-vremena i čestica, uživanje u izuzetnom razmišljanju, izračunavanje masa i veza, hvatanje budućih, finih blaženstava (knjiga VI)



Slika 1 Kompletma mapa fizike, nauke o kretanju. Počinje se od donjeg dela slike od svakodnevnih kretanja i pokazane su veze sa poljima savremene fizike: veze su određene za velika i snažna kretanja gravitacionom konstantom G , za brza kretanja brzinom svetlosti c i za mala kretanja Plankovom konstantom \hbar , elementarnim naelektrisanjem e i Boltzmanovom konstantom k .

KORIŠĆENJE OVE KNJIGE

Napomene na levoj margini teksta odnose se na bibliografske reference, na neku drugu stranicu teksta ili na rešenje izazova. U izdanju u boji primedbe u levoj margini označe za fuznote i veze sa veb stranicama prikazani su zelenom bojom. Veze za internet imaju tendenciju da vremenom nestanu. Većina veza može ponovo da se nađe na veb strani preprinta www.archive.org, gde su sačuvane kopije starijih stranica interneta. U besplatnom izdanju, koje se može učitati sa www.motionmountain.net u formatu pdf, sve napomene i veze su povezane i može se na njih kliknuti. Izdanje u formatu .pdf sadrži takođe sve filmove; oni mogu da se pogledaju korišćenjem programa Adobe Reader.¹

¹ U tekstu ovog prevoda ova udobnost delimično je moguća. Prevod je urađen u programu Microsoft Word (ne po preporuci autora u LaTex-u), tako da su upućivanja na bibliografske podatke, na određenu stranicu ili na rešenje izazova, stavljena na odgovarajuća mesta u sam tekstu i prikazana u zagradi **koso, podebljano i crvenom bojom**.

Veze sa veb stranicama iz originalnog teksta prenete su u prevod.

Filmovi (QuickTime film) koji u originalu mogu da se pokrenu klikom na sliku zamenjeni su u prevodu vezom sa odgovarajućim video zapisom u YouTube. (prim. prev.)

Rešenja i uputstva za **Izazove** dati su u dodacima. Izazovi su klasificirani kao laki (e – easy), kao standardni za učenike (s – student), kao teški (d – dificult) i kao nivo istraživanja (r – research). Izazovi za koje nisu data rešenja ipak su uvrštena u knjigu i označeni su sa (ny).

SAVETI ZA ONE KOJI UČE

Učenje nam omogućava da otkrijemo kakva osoba bi mogla da budemo. Učenje proširuje znanja, povećava inteligenciju i obezbeđuje osećaj za pristupanje. Stoga učenje iz knjiga, posebno onih o prirodi, može da bude korisno i zabavno. Izbegavajte kao kugu loše metode učenja. Ne koristite marker ili olovku da biste podvlačili tekst ili stranicu. To je trošenje vremena, pruža lažni osećaj udobnosti i čini tekst nečitljivim. I ne učite sa ekrana. Posebno nikad, ali nikad, ne učite preko interneta, sa video zapisa i svih igara koje su otrov i droga za mozak. Mobilni telefoni su raspršivači droge koji čine ljude zavisnicima i sprečavaju učenje. Niko ne nauči efikasno markirani tekst ili gledanjem u ekran niti uživa u tome.

Iz ličnog iskustva i kao učenika i kao predavača, jedna metoda nikada nije omanula u pretvaranju neuspelnog učenika u uspešnog: ako čitate tekst radi učenja, rezimirajte svaki pročitani odeljak **naglas sopstvenim rečima i slkama**. Ukoliko niste u stanju to da učinite, pročitajte ponovo odeljak. Ovo ponavljajte sve dok naglas jasno sopstvenim rečima i slikama ne razumete ono što ste pročitali. I **uživajte** dok glasno izgovarate. To možete da radite sami, ili sa prijateljem, u sobi, ili dok šetate. Ako ovo uradite sa bilo čim što čitate, znatno ćete smanjiti vreme učenja i čitanja, uživaćete još više učeći iz dobrih tekstova, a mnogo manje ćete omrznuti loše tekstove. Majstori ove metode mogu da je koriste čak i kada slušaju predavanja tihim glasom, čime izbegavaju pravljenje beleški.

SAVETI ZA PREDAVAČE

Predavač treba da voli učenike i da voli da ih vodi u istraživanju oblasti koju su odabrali. Njegov ili njen entuzijazam za posao je ključ uspeha za posao. Ako ste predavač, pre no što počnete lekciju ili sliku, osetite i recite sebi koliko uživate u temi predavanja; zatim opišite osećaj i recite sebi kako ćete voditi svakog od učenika da uživa u toj temi isto koliko i vi. Izvršite ovu vežbu detaljno, svaki put. Tako ćete smanjiti poteškoće u vašem razredu i povećati vaš uspeh kao predavača.

Ova knjiga nije napisana imajući na umu ispite; ona je napisana tako da i predavači i učenici **razumu i uživaju** u fizici, nauki o kretanju.

POVRATNE INFORMACIJE I PODRŠKA

Ovo poslednje pdf izdanje teksta je besplatno i ostaće i ubuduće za učitavanje sa interneta. Bio bih zahvalan da dobijem od vas e-poštu na adresu f@motionmountain.net, posebno za sledeća pitanja:

- Šta je nejasno i treba li da se poboljša? (**Izazov Is**)
- Koji vam deo, tema, zagonetka, slika ili film nedostaju?

Isto tako za pomoć za specifične tačke navedene na www.motionmountain.net/help.html posebno ste dobrodošli. Sve povratne informacije će se koristiti za poboljšanje narednih izdanja. Dobrodošli ste ako pošaljete povratne informacije e-poštom ili slanjem pdf datoteke sa dodatim žutim zabeleškama, da se obezbede ilustracije ili fotografije ili da se učestvuјe u ispravkama wiki na veb stranici Ukoliko želite da prevedete neko poglavlje iz knjige na vaš jezik, molim da me obavestite

U ime svih čitalaca, unapred se zahvaljujem za vaš savet. Za posebno korisnu saradnju vi ćete biti spomenuti – ukoliko želite – u priznanjima, dobićete nagradu ili oboje.

PODRŠKA

Dobrodošle su sve vaše donacije u dobrotvorne svrhe, oslobođene od poreza neprofitnoj organizaciji koja je prevela i publikovala ovu seriju knjiga! Za detalje, pogledati na veb stranicu www.motionmountain.net/donation.html. Poreska služba Nemačke proverava svrhu korišćenja vaših donacija. Ako želite, vaše ime će biti uključeno u popis sponzora. Unapred se zahvaljujem za vašu pomoć u ime svih čitalaca širom sveta.

Postoji i izdanje na papiru, bilo u boji ili crno-belo na www.amazon.com ili www.lulu.com. A sada, uživajte u čitanju.

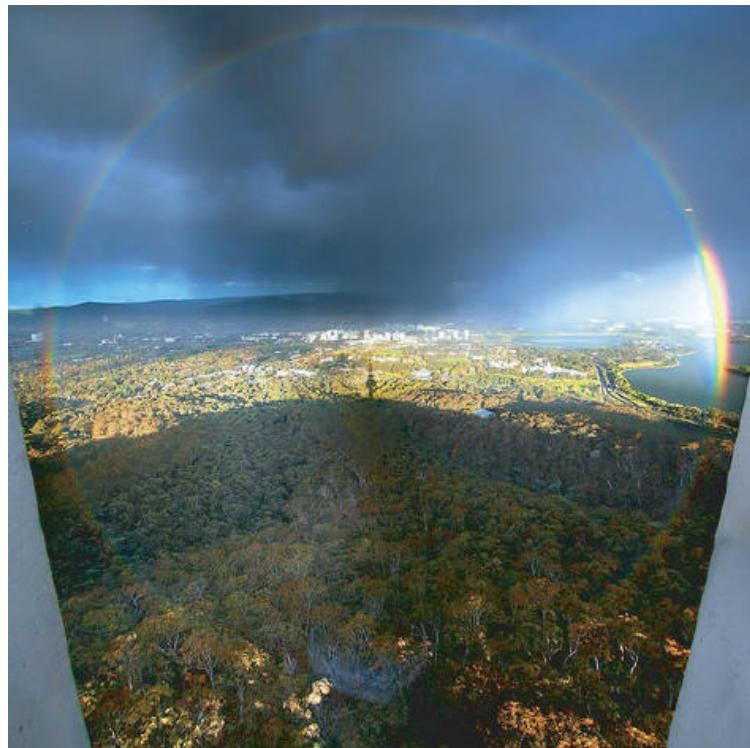
SADRŽAJ

1 TEČAN ELEKTRICITET, NEVIDLJIVA POLJA I NAJVEĆA BRZINA	17
Polja: čilibar, magnetna ruda i mobilni telefoni	17
Kako može da se napravi munja?	20
Električni naboј	23
Jačina električnog polja	25
Pumpanje naboja	28
Šta je elektricitet?	28
Možemo li da otkrijemo inerciju elektriciteta?	29
Osećanje električnih polja	30
Magneti i ostali magnetični materijali	32
Kako životinje osećaju magnetno polje?	35
Magnetizam i elektricitet	36
Kako da se napravi motor?	37
Koje struje teku unutar magneta?	38
Opisivanje magnetnih polja	39
Elektromagnetizam	41
Invarijante i lagranžijan elektromagnetskih polja	42
Korišćenje elektromagnetskih efekata	43
Kako rade nervi?	43
Kako motori dokazuju da je relativnost ispravna	45
Zanimljivosti i zabavni izazovi o električnim i magnetnim stvarima	46
Zaključak: tri osnovne činjenice o elektricitetu	59
2 OPIS RAZVOJA ELEKTROMAGNETNOG POLJA	61
Prva Maksvelova jednkost elektrodinamike polja	61
Druga Maksvelova jednkost elektrodinamike polja	62
Valjanost i suština Maksvelovih jednakosti polja	63
Sudar nanelektrisanih čestica	64
Šta je dodir?	64
Merno polje – elektromagnetski vekorski potencijal	65
Lagranžijan elektromagnetizma	68
Tenzor energija-količina kretanja i njegove simetrije kretanja	69
Energija i količine kretanja elektromagnetskog polja	70
Šta je ogledalo? Da li je priroda invarijanta pariteta?	70
Kakva je razlika između električnih i magnetnih polja?	72
Može li elektrodinamika da bude drugačija?	72
Mozak: najteži izazov elektrodinamike	73
Izazovi i zabavne zanimljivosti o elektrodinamici	74
Zaključak o kretanju elektromagnetskog polja	75
3 ŠTA JE SVETLOST?	77
Šta su elektromagnetski talasi?	78
Eksperimenti sa elektromagnetskim talasima	79
Svetlost je talas	80
Svetlost i drugi elektromagnetski talasi	83
Polarizacija of elektromagnetskih talasa	84
Raspon elektromagnetskog zračenja	90
Sporost napretka u fizici – i relativnosti	91
Kako izgleda svet kada se putuje na zraku svetlosti?	93
Možemo li da dodirnemo svetlost?	93
Rat, svetlost i laži	96
Šta je boja?	96
Zabava sa dugama	100

Kolika je brzina svetlosti? Kolika je brzina signala?	102
Signalni i predviđanja.....	104
Oproštaj od etera	104
Izazovi i zabavne zanimljivosti o svetlosti, polarizaciji i geometrijskoj fazi.....	105
Zaključak o svetlosti.....	109
4 SLIKE I OKO – OPTIKA	111
Način na koji se dobijaju slike	111
Izvori svetlosti.....	112
Zašto možemo da se vidimo međusobno? Crna tela i temperatura svetlosti.....	112
Granice koncentracije svetlosti	115
Merenje jačine svetlosti.....	116
Drugi izvori svetlosti i zračenja.....	117
Zračenje kao oružje	118
Slike – prenos svetlosti	118
Pravljenje slika sa ogledalima	118
Da li svetlost uvek putuje pravolinijski? – Prelamanje	120
Savijanje svesti pomoću cevi – optičko vlakno.....	125
Zakasnilo 200 godina – negativan indeks prelamanja.....	126
Metamaterijali	127
Svetlost oko uglova – difrakcija.....	127
Savladavanje granice difrakcije.....	129
Ostali načini da se savije svetlost.....	130
Upotreba interferencije za snimanje.....	131
Kako se prave hologrami i druge slike u tri dimenzije?.....	131
Slike pomoću skeniranja	136
Tomografija	137
Oči i mozak: biološko dobijanje slika i njihova obrada.....	139
Da li vidimo sve što postoji?	139
Ljudsko oko	141
Ljudsko oko naspram drugih očiju	143
Kako možemo da napravimo sliku unutrašnjosti oka?.....	145
Kako da dokažete da ste svetac	147
Prikazivanje slika	148
Elektroni koji skakuću i najveće razočaranje TV industrije.....	148
Izazovi i zabavne zanimljivosti o slikama i oku	149
Zaključak o primenjenoj optici.....	158
5 ELEKTROMAGNETNI EFEKTI.....	159
Da li je munja pražnjenje? – Elektricitet u atmosferi	159
Da li postoje loptaste munje?	162
Planetarno magnetna polja	163
Levitacija	164
Da li gravitacija čini da naboji zrače?	167
Materija, levitacija i elektromagnetni efekti.....	167
Sva tela emituju zračenje.....	173
Izazovi i zanimljivosti o elektromagnetskim efektima	173
6 ZAKLJUČCI I GRANICA KLASIČNE ELEKTRODINAMIKE	177
Prostor je zakrivljen, nije ravan.....	178
Vrednosti naboja su diskretne, nisu neprekidne	178
Koliko brzo se kreću naboji?	179
Koja kretanja se događaju unutar atoma?.....	180
Izazovi i zanimljivosti o diskretnosti naboja	180
7 PRIČA O MOZGU.....	183
Razvoj	184
Deca, zakoni i fizika	184
Elektronika polimera	187

Zašto mozak?.....	187
Neuroni i mreža	190
Šta je informacija?	191
Šta je pamćenje?	192
Kapacitet mozga	194
Zanimljivosti o mozgu	196
8 GOVORNI JEZIK I POJMOVI	201
Šta je govorni jezik?	201
Sastojni govornog jezika i njihova hijerarhija	202
Da li je matematika jezik?	204
Šta je pojam?	205
Šta su skupovi? Šta su odnosi?	206
Beskonačnost – i njene osobine	208
Funkcije i strukture	209
Brojevi	210
Da li je matematika uvek korisna?.....	214
Zanimljivosti i zabavni izazovi o matematici	215
9 LAŽI I OBRASCI PRIRODE	217
Da li su fizički pojmovi otkriveni ili su konstruisani?.....	218
Kako nalazimo fizičke pojmove, obrasce i pravila?	219
Šta je laž?.....	220
Šta je dobra laž?.....	221
Da li je ovaj iskaz tačan? – Malo o besmislicama	224
Zanimljivosti i zabavni izazovi o lažima i besmislicama	225
Opažanja i njihova zbirka.....	228
Da li je prikupljeno dovoljno opažanja?.....	228
Da li su poznata sva opažanja u fizici?	229
Treba li vremena za opažanja?	230
Da li je indukcija problem u fizici?	230
Potraga za preciznošću i njene posledice.....	232
Šta su interakcije? – Nema pojave.....	233
Šta je postojanje?	234
Da li stvari postoje?	234
Da li praznina postoji?	235
Da li je priroda beskrajna?	236
Da li svemir predstavlja skup?.....	237
Da li svemir postoji?.....	238
Šta je stvaranje?	238
Da li je priroda konstruisana?	240
Šta je opis?.....	241
Razlog, svrha i objašnjenje	241
Objedinavanje i razgraničenje	242
Svinje, majmuni i načelo antropije	243
Da li su u objašnjanjima potrebni uzroci i efekti?	244
Da li je potrebna svest?.....	245
Radoznalost	245
Hrabrost	247
10 KLASIČNA FIZIKA U ORAHOVOJ LJUSCI	249
Šta može da se kreće?	249
Osobine klasičnog kretanja.....	250
Budućnost planete Zemlje	251
Suština klasične fizike – beskonačnomalo i odsustvo iznenađenja	252
Zaključak: Zašto još uvek nismo došli do vrha planine?	253
DODATAK A – JEDINICE, MERENJA I KONSTANTE.....	255
SI merne jedinice	255

Smisao merenja	257
Preesiznost i tačnost merenja.....	258
Granice preciznosti.....	259
Fizičke konstante.....	259
Korisni brojevi.....	265
IZAZOVI, SAVETI I REŠENJA	267
BIBLIOGRAFIJA	285
ZASLUGE	309
Priznanja.....	309
Zaslužni za film	310
Zaslužni za slike	310



SVETLOST, NABOJI I MOZAK

U našem traganju da naučimo kako se stvari kreću, iskustvo u pešačenju i drugim kretanjima, dovodi nas do otkrića slika proizvedenih električnim nabojem, da se električni naboji kreću, nagomilavaju i u interakciji su, i da u prirodi postoje najmanji električni naboji. Da razumemo kakve veze ima ljubav sa magnetima i čilibarom, zbog čega je mozak tako interesantan uređaj i kako se razlikuje dobra od loše laži.



Poglavlje 1

TEČAN ELEKTRICITET, NEVIDLJIVA POLJA I MAKSIMALNA BRZINA

Šta je svetlost? Proučavanje relativnosti ostavilo nas je u potpunom mraku, iako smo započeli da tražimo odgovor na to pitanje. Istina, naučili smo kako se kretanje svetlosti upoređuje sa nekim objektima. Isto tako smo naučili da je svetlost subjekt koji se kreće i ne može da bude zaustavljen, da svetlost daje graničnu brzinu za svaki oblik energije i da je svetlost u našim merenjima standard brzine. Međutim, nismo naučili ništa o prirodi same svetlosti, ni o bojama, ni kako ih proizvode kišne kapi¹ i druge materije.

Drugo pitanje je otvoreno: šta je **dodir**. Još uvek to ne znamo. U našim istraživanjima relativnosti naučili smo da su sve interakcije, uključujući dodir, nastale usled razmene nečeg. Ali čega? Mi smo samo naučili da zaista ne postoji mehanička interakcija. (**Vol. II, strana 68**). Kakva je priroda dodira?

Treće pitanje se takođe pojavljuje: kako mi **osećamo** dodir ili kontakt? Šta su davači i kako se njihov izlaz, podaci, obraduju u mozgu ili u mašinama? Ne samo mozak, već takođe i drugi sistemi za obradu podataka koriste elektricitet. Šta su **podaci** i šta je **elektricitet**?

Odgovor na pitanje o prirodi svetlosti, dodiru i mozgu **nisu** u vezi sa gravitacijom. Ako sastavimo popis motora (**Vol. I, strana 171**) koje možemo naći u ovom svetu, primetićemo da gravitacija teško može da opiše bilo koji od njih. Nisu usled gravitacije nastali ni kretanje morskih talasa, ni vatra i zemljotresi ni blag povetarac. Isto to se može primeniti za kretanje svetlosti u dugi ili za pokrete mišića. Da li ste slušali otkucaje sopstvenog srca pomoću stetoskopa? (**Izazov 2e**). Možete iskoristiti, kao što mnogi lekari to sada čine, vaš mobilni telefon da snimite otkucaje vašeg srca. Ako to ne učinite, ne možete tvrditi da ste doživeli misteriju kretanja. Vaše srce ima oko 3000 miliona otkucaja tokom vašeg života. Zatim ono stane.

Jedno od najzačuđujućih otkrića nauke jesu da su uzrok otkucaja srca, vatra, svetlost i samo razmišljanje povezani sa posmatranjima od pre hiljada godina koristeći dva čudna temelja. Ovi temelji pokazuju

- Svi ovi primeri kretanja koje u običnom životu nazivamo **mehaničkim**, bez izuzetaka, imaju **električno** poreklo.

Osim toga, tvrdoća, mekoća i neprobojnog materije uzrokovani su usled unurtašnjeg elektriciteta. Ali isto tako emitovanje svetlosti, stvaranje boja i rad naših nerava i mozga je usled električnih procesa (**Ref. 1**). Svi ovi aspekti deo su svakodnevnog života, pa možemo ostaviti na sranu sve komplikacije usled gravitacije i zakrivljenog prostor-vremena.

Istraživanja svetlosti, dodira i mozga podrazumeva da možemo otkrijemo kako madioničari čine da objekt lebdi. Ustvari, najproduktivniji načina da se prouči električno kretanje je da se počne, kao i u slučaju gravitacije, sa onim vrstama kretanja koja su proizvedena bez ikakvog dodira tela koja učestvuju. To se može načiniti na tri načina

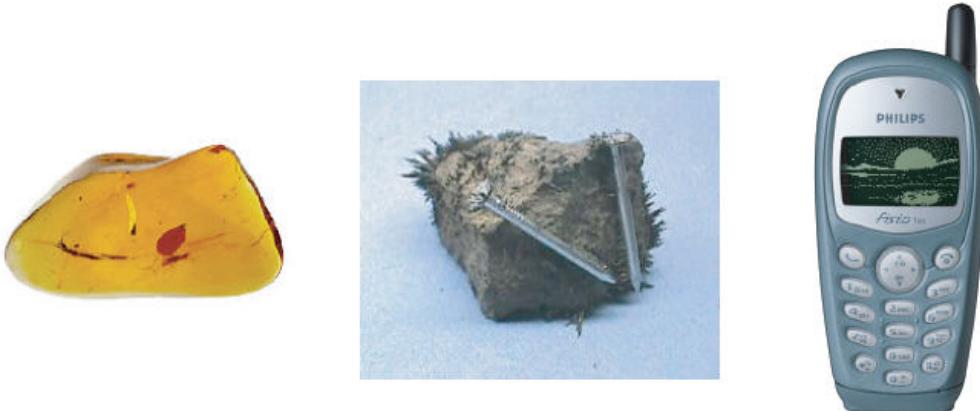
POLJA: ĆILIBAR, MAGNETNA RUDA I MOBILNI TELEFONI

Uvek možete da iznenadite decu efektom koji je prikazan na **slici 3**: češalj protrljan o vunenu tkaninu skreće mlaz vode. Isti efekt može da se dobije pomoću gumenog balona ispunjenog vazduhom i koji je protrljan o vunenu tkaninu. Obe stvari mogu skrenuti mlaz vode bez ikakvog dodira.

Stari Grci su već osmotrili ovaj efekt pre mnogo godina. Zapravo priča o elektricitetu počinje sa drvećem. Drveće ima posebnu vezu sa elektricitetom. Kada se drvo preseče pojavi se viskozna smola. Vremenom ona očvrsne, pa se posle nekoliko miliona godina stvori **ćilibar**. Kada se ćilibar trlja o mačje krvno dobija sposobnost da privlači male objekte, kao što je piljevina ili komadići papira. Ovo je bilo poznato još u

¹ Fotografija kružne duge na **strani 15** snimljena je 2000. godine sa Telstra Tower u Kanberi (© Oat Vaiyaboon).

šestom veku stare ere Talesu iz Mileta, jednom od sedam mudraca. Isto posmatranje može da se izvede i pomoću mnogih drugih kombinacija polimera, na primer, češljevi i kosa, sa đonom cipela na tepihu i prašinom i sočivom ili katodnom cevi unutar starih TV aparata. Drugi interesantan efekt može da se postigne kada se protrljaj češalj postavi u blizinu upaljene sveće. (Možete li da zamislite šta će se dogoditi?) (**Izazov 3s**).



Slika 2 Objekti koje okružuje polje: čilibar (cca 1 cm) privlači piljevinu, magnetna ruda (cca 1 cm) privlači gvozdene opiljke i mobilni telefon (cca 10 cm) privlači druge mobilne telefone i ljude (© Wikimedia, Philips).



Slika 3 Kako da začudite decu, posebno ako je suvo vreme (fotografija © Robert Fritzius).

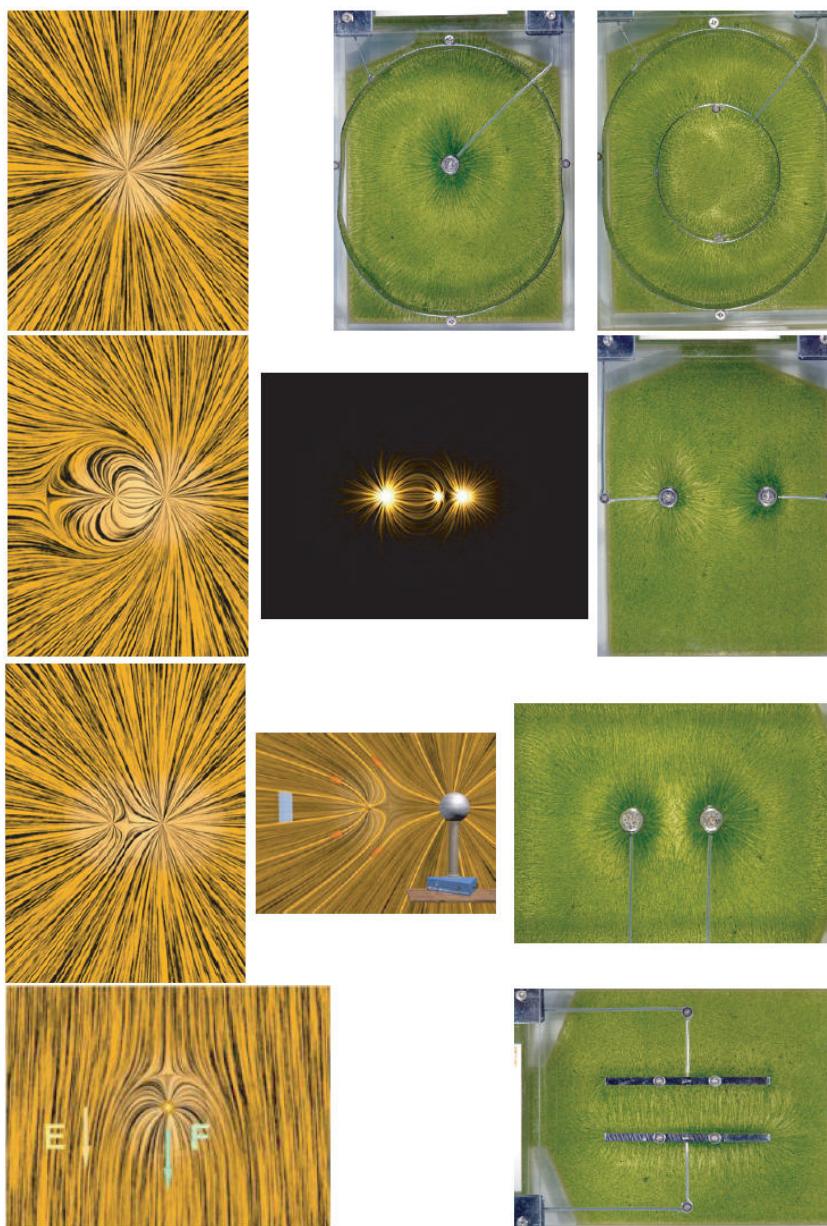
Drugi deo priče o elektricitetu uključuje magnetnu rudu, mineral gvožđa koji se nalazi u pojedinim pećinama širom sveta, na primer u oblasti koji se (još uvek) naziva Magnezija u grčkoj provinciji Tesalija i u nekim oblastima centralne Azije. Kada se dva komada ovog minerala postave jedan uz drugi, oni će se privlačiti ili odbijati, u zavisnosti od njihove međusobne orijentacije. Osim toga, magnetna ruda privlači objekte od kobalta, nikla i čelika.

U današnje takođe nalazimo male objekte u prirodi sa još prefinjenijim svojstvima, kao što su oni prikazani na desnoj strani **slike 2**. Neki od njih omogućavaju da razgovarate sa prijateljima u daljini, drugi otklučavaju vrata automobila, a neki vam omogućavaju da uključite televizor.

Ukratko, u prirodi postoje situacije u kojima tela ispoljavaju uticaj na druga tela koja su *udaljena*. Za prostor koji okružuje telo koje ispoljava takav uticaj kaže se da ima polje. **Polje (fizičko)** je subjekt koji utiče na ubrzanja drugih tela u određenoj oblasti prostora.

➤ **Polje je prostor koji menja količinu kretanja.**

Ili ako vam se više dopada, **polje je prostor u kojem se pojavljuje sila**. Ili ponovo, polje je prostor sa izvesnim posebnim sastavom. Uprkos ovom posebnom sastavu, polja su nevidljiva, isto kao i prostor.



Slika 4. Vizualizacija uz pomoć grafike računara onoga što je nevidljivo (levo) i pomoću semena u ulju (desno): **struktura električnog polja u prostoru**. Gore: polje oko tačkastog ili loptastog električnog naboja; u drugom redu: dva ili tri električna naboja suprotnih znakova; treći red: dva električna naboja istog znaka; dole: električni naboј u stranom polju E i polje između dve ploče. Na električne naboje deluje sila F usmerena duž takozvanih **linija električnog polja**; gustina linija određuje jačinu polja pa stoga i veličinu sile. (© MIT, Eli Sidman, MIT).

Tri objekta koja su već pomenuta proizvode tri različite vrste polja:

1. Polje oko čilibara – koji se na grčkom naziva *ἤλεκτρον*, sa značenjem u korenu reči “brilijantno, sjajno” – nazvano je **električno polje**. Naziv je dobio prema predlogu poznatog lekara i fizičara u slobodnom vremenu, Vilijama Džilberta (William Gilbert (1544, Colchester – 1603 London)). Objekti koji su okruženi stalnim električnim poljem nazivaju se **elektreti**. Elektreti nisu tako uobičajeni; između ostalog oni se koriste u nekim sistemima zvučnika. Elektreti mogu da budu izvesni kristali ili polimeri.
2. Polje koje okružuje mineral nađen u Magneziji nazvano je **magnetno polje**, a predmet koji ga stvara nazvan je **magnet**. ([Ref. 2](#)). Većina magneta, ali ne i svi, načinjeni su od metala.
3. Polje u okolini mobilnog telefona nazvano je **radio polje**, ili kao što ćemo videti kasnije, **elektromagnetno polje**. Nasuprot prvih dvaju polja, ovo polje osciluje u vremenu. Kasnije ćemo sazнати da je mnogo drugih objekata okruženo ovakvim poljem, mada je ono često jako slabo. Objekti koji emituju oscilirajuća polja, kao što su mobilni telefoni ili svetiljke, nazivaju se radiopredajnici ili

elektromagnetni emiteri. Sa izvesnim radiopredajnicima, kao što ćemo videti, upoznati smo tokom svakodnevnog života: svetiljke i laseri.

Eksperimenti pokazuju da polja **nemaju masu** niti materijalnu podršku. Polja utiču na udaljena tela. Pošto su polja nevidljiva, da bismo ih mogli zamisliti, potrebno je da ih obojimo. Način da se oboji električno polje prikazan je na *slici 4*. Bojenje je inspirisano eksperimentima sa semenjem ili prašinom. Vizuelizacija magnetnog i radio polja biće prikazana u daljem tekstu. Ovakve slike su najbolji način da se električna polja učine vidljivim; takođe prvi istraživač koji je predložio pojam polja, Majkl Faradej (Michail Faraday), koristio se takvima slikama.

Istraživanjem kako da vizualiziramo polja, zapažamo da električno polje možemo da učinimo vidljivim bilo da dodelimo malu strelicu ili vektor u svakoj tački polja, ili da se postavi snop linija u svakom delu prostora. Ostale vizualizacije otkrićemo u daljem tekstu.

Električna, magnetna i radio polja dugo vreme nisu bila zapažena u svakodnevnom životu. Zapravo, u prošlosti, u većini zemalja na snazi su bili zakoni kojima je zabranjivano stvaranje takvih polja! Još i danas zakoni jako ograničavaju karakteristike mašina koje koriste i stvaraju takva polja. Ovi zakoni zahtevaju da u svakom uređaju koji se pokreće, stvara zvuk, ili prikazuje pokretne slike, polje treba da ostane **unutar** uređaja. Takođe iz ovih razloga madioničari koji pokreću objekt po stolu pomoću skrivenog magneta, još uvek iznenaduju i zabavljaju svoje gledaoce. Da bismo još jače osetili zanos, pogledaćemo dublje u nekoliko rezultata eksperimenata.

KAKO MOŽE DA SE NAPRAVI MUNJA?

Svako je video sevanje munje ili je posmatrao efekt koji ima grom kada udari u drvo. Očigledno je da su atmosferska pražnjenja pokretna pojava. Fotografije, kao što je ona na *slici 5*, pokazuju da vrh groma napreduje prosečnom brzinom od oko 600 km/s. Ali **šta** se to kreće? Da bismo to otkrili, treba da nađemo način da napravimo sopstvenu munju. Godine 1995. automobilska kompanija Opel slučajno je ponovo otkrila jedan stari i jednostavan način da se to postigne.

Opelovi inženjeri su nehotično napravili mehanizam za stvaranje varnice u svojim automobilima; kada su punjeni rezervoari gorivom, stvarana je varnica koja je ponekad dovodila do eksplozija na benzinskim stanicama. Opel je povukao iz saobraćaja 2 miliona automobila. (*Ref. 3*).

Šta su to inženjeri uradili loše? Oni su nesvesno kopirali uslove za uređaj stvaranja varnica koji svako može da napravi kod kuće, a kojeg je pronašao Vilijam Tompson (William Thompson)¹, **Kelvinov generator**. Ponavlјajući ovaj eksperiment danas, treba da uzmemmo dve slavine za vodu, četiri prazne konzerve od pasulja ili kafe, od kojih dve treba da imaju otvore na dnu, malo najlonske strune i malo bakarnog provodnika. (*Ref. 4*). Sastavimo li to prema prikazu na *slici 6*, pa pustimo da teče voda, zapazićemo čudnu pojavu: povremeno će da se pojavi velika varnica između bakarnih provodnika na mestu gde su oni na najmanjem razmaku, dajući glasan prasak. Možete li da pogodite uslov za protok kojim se postiže ovaj rezultat? I šta je kompanija Opel učinila da bi popravila automobile koji su povučeni i u upotrebe? (*Izazov 4s*)

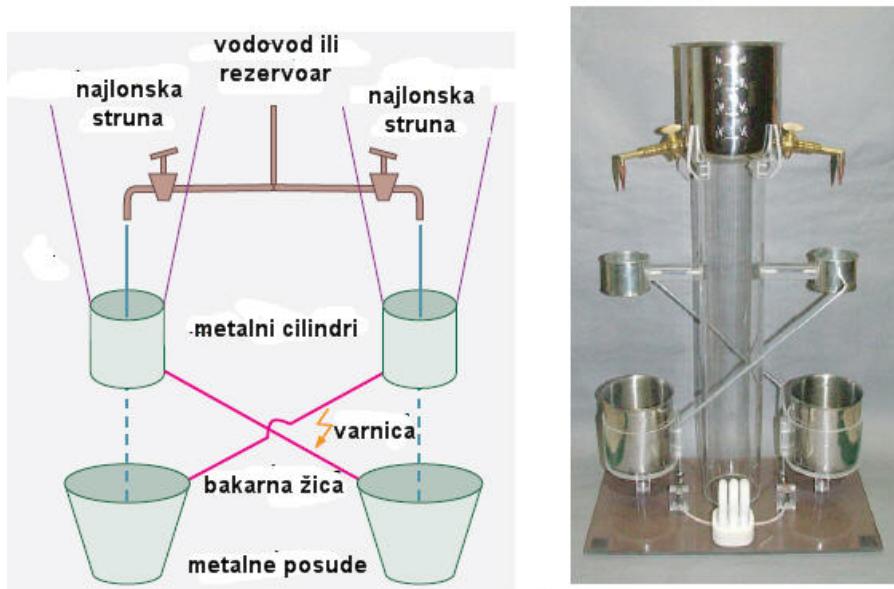
Ako prekinemo dotok vode u Kelvinov generator neposredno pe no što se stvori varnica, otkrićemo da obe posude imaju sposobnost da privlače piljevinu ili komadiće papira. Generator radi isto ono što je radio protljani cilibar, samo uz veći prasak zbog posuda. Obe posude i svi pripojeni metalni delovi okruženi su električnim poljem. Ovo polje vremenom se povećava, sve dok ne preskoči varnica. Odmah posle preskoka varnice posude su (skoro) sasvim bez okruženja električnim poljem. Očigledno je da protok vode pokupi nešta u svaku posudu; danas to nazivamo **električni naboј**. Takođe kažemo da su takva tela **naelektrisana**. Ovaj i drugi eksperimenti takođe pokazuju da električni naboј može da **teče** u metalima. Kada je vrednost

¹ Vilijam Tompson (William Thomson, 1824 Belfast, 1907 Largs) bio je značajan fizičar i profesor Univerziteta u Glazgovu. Radio je na određivanju starosti Zemlje, pokazao je da je Zemlja mnogo starija od 6000 godina, u šta severovalp, ali takođe (pogrešno) trvrdeći da je Zemlja mnogo mlađa što su zaključili (ispravno) geolozi i Darwin. On je takođe uticao na razvoj teorije magnetizma i elektriciteta, na opis etera i na termodinamiku. On je širio upotrebu pojma "energija", kao što se koristi sada, umesto zbumujućih drugih pojmove. Bio je jedan od poslednjih naučnika u širenju mehaničke analogije za objašnjavanje pojava, pa stoga jak oponent Maksvelovim opisima elektromagnetizma. To je uglavnom bio razlog da nije dobio Nobelovu nagradu. Takođe je bio jedan od umova u polaganju prvog transatlanskog podmorskog kabla. Viktorijanac i religiozan do srži u kostima, prilikom dobijanja plemićke titule on je odabrao za svoje novo ime naziv malog potoka u blizini njegove kuće: stoga je postao Baron Kelvin of Largs. Tako je jedinica temperature dobila svoje ime prema maloj reci u Škotskoj.

električnog polja dovoljno velika, električni naboј može da teče i kroz vazduh, izazivajući varnicu ili munju.



Slika 5 Udar groma: fotografija je napravljena pomoću kamere u pokretu tako da prikazuje višestruke udare. (© Steven Horsburgh)



Slika 6. Jednostavan Kelvinov generator; onaj na desnoj strani napaja fluorescentnu sijalicu koristeći tekuću vodu (fotografija © Harald Chmela).

Isto tako ćemo orkriti da su posude uvek okružene sa **dve različite vrste** električnog polja; tela koja jedna posuda privlači, druga posuda ih odbija. Svestrani genije, Šarl Dufe (Charles du Fay, 1698 Paris, 1739 Paris), otkrio je:

- Postoje **dve različite vrste** električnog naboja.

U dugom i pažljivo sprovedenom nizu eksperimenata on je potvrdio da svi materijali koje je mogao da pribavi mogu da se nanelektrišu i da se svi električni naboјi mogu svrstati u dve vrste. (**Ref. 5**). Isto tako on je prvi dokazao:

- Tela sa **istom vrstom** električnih naboja se **odbijaju**, a tela sa **različitim** električnim naboјima se **privlače**.

Dufe je detaljno pokazao da se svi eksperimenti sa elektricitetom mogu objasniti pomoću ova dva iskaza. Dufe je nazvao ove dve vrste nanelektrisanja “vitreus”(staklast) i “resinous” (smolast). Na nesreću, Dufo je preminuo vrlo mlađ. Uprkos tome, njegovo otkriće se brzo širilo. Nekoliko godina kasnije Žorž Bose

(Georg Bose) iskoristio ih je da bi razvio prvu električnu mašinu, a kojom je istraživanje varnica i nauke o elektricitetu postalo moda širom Evrope.¹

Dvadeset godina posle Dufea, godine 1750. političar i fizičar u slobodno vreme, Bendžamin Frenkljin (Benjamin Franklin, 1706. Boston – 1790. Philadelphia) predložio je da se elektricitet dobijen na staklenoj šipki protrljanoj suvom tkaninom nazove **pozitivnim**, umesto vitreous, a onaj koji se dobije na čilbaru **negativnim**, umesto resinous. Stoga, umesto dva tipa električnih naboja, on je predložio da:

- Postoji samo **jedna** vrsta naelaktrisanja.

Tela mogu da imaju ili previše ili premalo takvog naelektrisanja. Uz ove nove pojmove, tela koja imaju naelektrisanja istog znaka odbijaju se, a tela koja imaju naelektrisanja suprotnih znakova privlače se; električni naboji suprotnih znakova ako teku uporedno poništavaju se međusobno. Velike apsolutne vrednosti električnog naboja podrazumevaju velike efekte naelektrisanja. Proteklo je više od sto godina od predloga za ove pojmove da bi bili prihvaćeni jednoglasno.

Ukratko, **električni efekti nastaju usled protoka električnih naboja**. E. sada, za svaki protok potrebno je vreme. Koliko je elektricitet brz? Jednostavan način da se izmeri brzina elektriciteta je da se napravi mala varnica na jednom kraju dugačkog provodnika, pa da se posmatra koliko će vremena biti potrebno da se pojavi varnica na drugom kraju. U praksi, ove dve varnice su skoro jednovremene; brzina koja se meri je mnogo veća od bilo čega što opažamo u našem okruženju. Kako biste vi izmerili brzinu? I zbog čega su različiti istraživači u svojim eksperimentima dobijali veoma različite vrednosti brzine? (**Izazov 5s**). Rezultat ovih eksperimenata je da brzina elektriciteta iznosi veliki procenat brzine svetlosti – mada nije nikada veća od nje.

Varnice, električni lukovi i munje su slični. Da li su to protoci naelektrisanja? Eksperimenti koji su vršeni u Francuskoj 1752. godine, sledeći predloge Bendžamina Frenkljina objavljenih u Londonu 1751. godine, pokazali su da se zaista može kretati elektricitet iz olujnog oblaka kroz dugačak štap.² Olujni oblaci su okruženi električnim poljima. Ovi francuski eksperimenti učinili su da Frenkljin bude poznat širom sveta; oni su isto tako doprineli da se širom sveta koriste gromobrani. (**Ref. 6**). Kasnije je Frenkljin napravio gromobran j na svojoj kući, ali malo neobične vrste, kao što je prikazano na **slici 7**. Ovaj uređaj, koji je izmislio Endrju Gordon (Andrew Gordon) nazvan je električno zvono. Možete li zamisliti šta je proizvodio u svom prostoru tokom lošeg vremena, svi delovi su bili izrađeni od metala, i zašto? (**Izazov 6s**). (Nemojte ponavljati ovaj eksperiment; svaki uređaj piključem na gromobran može da ubije.)



slika 7 Frenkljinov lični gromobran – kopija Gordonovog zvona – jedan je od mnogih eksperimenata koji upečatljivo pokazuju da naelektrisanje može da teče

Ukratko, **električna polja potiču od tela** – dokazujući da su ona naelktricana. Električni naboј može da se postigne trenjem i drigim postupcima. Postoje naboji sa dva znaka, negativni i pozitivni. Električni naboј može da teče: tada se naziva električna **struja**. Najlošiji provodnici su polimeri, oni se nazivaju izolatori ili

¹ Ustvari, ova moda još uvek traje. Danas postoji više načina da se stvori varnica, pa čak i električni luk, to jest neprekidna varnica. Postoji velika skupina ljudi koji su izradili takve generatore visokih napona kao hobi kod svojih kuća; pogledati, na primer, web stranu www.kronjaeger.com/hv/. Postoji takođe i velika skupina ljudi koja to radi profesionalno, primajući plate od poreza, ljudi koji grade ubrzivače čestica (akcelaratore)

² Detalji kako se može napraviti munja i kako se ona prostire, još uvek su tema istraživanja. Uvod u to je dat na **strani 159**.

dielektrici. Električni naboј stavljen na izolator ostaje na mestu gde je bio stavljen. Nasuprot tome, metali su dobri provodnici, električni naboј stavljen na provodnik proširiće se po celoj njegovoј površinii. Najbolji provodnici su srebro i bakar. To je razlog da je u današnje vreme, posle dve stotine godina korišćenja elektriciteta, najveća koncentracija bakra na svetu ispod površine Menhetna. Isto tako je i vazduh dobar izolator. Međutim, električni naboјi mogu da teku i kroz vazduh ukoliko je električno polje dooljno jako; to stvara varnicu, ili munje, ukoliko je varnica velika.



slika 8 Jednostavan pribor kojim se pokazuje da je električni naboј očuvan: ako se krzno kojim se tare pomeri sa prve posude na drugu, električni naboј uzet sa prve posude premešta se na drugu, kao što pokazuju oba elektrometra (© Wolfgang Rueckner).

ELEKTRIČNI NABOЈ

Pošto svi eksperimenti sa električnim naboјem mogu da se objasne tako što će se nazvati dva nanelektrisanja pozitivnim i negativnim, zaključujemo da neka tela imaju više, a neka manje električnih naboјa u odnosu na nenelektrisano ***neutralno*** telo. Električni naboјi mogu da teku samo kada u kontakt dođu tela sa rezličitim nenelektrisanjima. Dakle, ako električni naboјi mogu da teku i da se akumuliraju, morano da imamo mogućnost da nekako izmerimo njihovu količinu. Očigledno, količina električnog naboјa, obično obeležena sa q , mora da bude određena preko uticaja tela, koje ga oseća kada je izložen polju, recimo delića strugotine. Nenelektrisanje je zato određeno tako što se ono upoređi sa standardnom referencom električnog naboјa. Za nenelektrisano telo mase m koje je ubrzavano u polju, njegovo nenelektrisanje q određeno je odnosom

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

to jest, upoređivanjem njegove promene količine kretanja sa promenom količine kretanja referentnog električnog naboјa. Električni naboј stoga određuje kretanje tela u električnom polju na isti način, kao što masu određuje količina kretanja u polju gravitacije. Nenelektrisanje je prema tome druga sopstvena osobina tela posle mase, koju smo, otkrili tokom našeg hodanja.

U praksi se električni naboј meri pomoću elektrometra. Nekoliko takvih uređaja je prikazano na [slici 9](#). Glavne eksperimentalne osobine električnog naboјa koje su otkrivene u eksperimentima sa elektromerima, nabrojane su u [Tabeli 1](#).

Jedinica za merenje električnog naboјa ***kulon***, određena je standardnim tokom kroz metalni provodnik, kako je opisano u [Dodatku A](#). To je moguće pošto su svi eksperimenti pokazali

➤ Nenelektrisanje je ***očuvano***, može da ***teče*** i može da se ***akumulira***.

Drugim rečima, ako se menja električni naboј fizičkog sistema, uvek je razlog što električni naboј teče u sistem ili iz sistema. Ovo jednostavno može da se proveri uz pomoć dve metalne posude na koj su spojena dva elektrometra, kao što je prikazano na [slici 8](#). ([Ref. 7](#)). Prema tome, ***nenelektrisanje se ponaša kao tečna***

supstanca. Stoga smo primorani da koristimo za njegovo ponašanje skalarnu veličinu q , koja može na fizičkom telu da bude pozitivna, da nestane i da ima negativnu vrednost.



Slika 9 Razni elektrometri: elektrometar sopstvene izrade izrađen u tegli od marmelade, stari (otvoren) Dolezalek elektrometar velike preciznosti, Lorencinijeva ampula ajkule i savremen digitalni elektrometar (© Harald Chmela, Klaus Jost na web strani www.jostimages.com/, Advantest).

Opisivanje električnog naboja kao skalarne veličine prikazuje ponašanje električnog naboja u svim svakodnevnim situacijama. Međutim, kao i u slučajevima svih klasičnih pojmoveva sa kojima smo se sretatali ranije, neki od rezultata eksperimenata za električni naboju u svakodnevnim okolnostima iz **Tabele I** pokazaće se da su samo približni. Još precizniji eksperimenti zahtevaju preispitivanje ideje o kontinualnoj promeni vrednosti električnog naboja. Uprkos tome, još uvek nije zapažen suprotan primer očuvanja električnog naboja.

Ukratko, **električni naboj je skalarna veličina kola opisuje nastanak električnog polja. Električni naboj je očuvan.** Ne postoji način da se uništi ili stvori električni naboj ni iz čega. Već smo pomenuli da se objekt bez električnog naboja naziva neutralnim. Isto tako na neutrelna tela utiču električna polja. To se dešava pošto nanelektrisani objekti polarizuju neutralno telo kada mu se dovoljno približi. Električna polarizacija je razdvajanje pozitivnih i negativnih električnih naboja u odvojene delove objekta. Iz tog razloga neutralni objekti, kao što su kosa ili mlaz vode, budu privučeni nanelektrisanom telu, kao što je protrljan češalj. Mogu da budu polarizovani kako izolatori, tako i provodnici; a polarizacija se ispoljava na pojedinačni molekul tela u svakodnevnom životu i na kompletne zvezde.

TABELA 1 Osobine **klasičnog** električnog naboja: skalarna gustina

Električni naboj	Fizičke osobine	Matematički naziv	Odrednica
Može da se razlikuje	razlikovanje	element skupa	strana 207
Može da se odrediti	redosled	red	Vol. IV, strana 173
Može da se uporedi	nerelčivost	metričnost	Vol. IV, strana 182
Može da se menja postepeno	kontinualnost	kompletност	Vol. V, strana 75
Može da se dodaje	akumulativnost	aditivnost	Vol. I, strana 67
Može da se izdvoji	izdvojivost	pozitivan ili negativan	
Nema usmerenje	skalar	broj	strana 210
Ne može da se menja	očuvanje	invarijanta	$q = \text{const}$

TABELA 2 Vrednosti električnog naboja zapaženih u prirodi

Opažanje	Veličina naboja
Najmanja izmerena vrednost stalnog električnog naboja	$1.6 \cdot 10^{-19}$ C
Električni naboj za jedan bit u računaru	ispod 10^{-15} C
Električni naboju u malom kondenzatoru	10^{-7} C
Protok električnih naboja u srednjem udaru groma	1 C do 100
Električni naboju u potpuno napunjrenom akumulatoru	0,2 MC
Električni naboju planete Zemlje	- 1 MC
Električni naboju izdvojen iz savremene elektrane godišnje	$3 \cdot 10^{11}$ C
Ukupan naboju pozitivan (ili negativan) opažen u svemiru	$10^{60 \pm 1}$ C
Ukupan električni naboju opažen u svemiru	0 C

JAČINA ELEKTRIČNOG POLJA

Električni naboji proizvode privlačenja ili odbijanja drugih električnih naboja. Isto tako električni naboji menjaju količinu kretanja; električni naboji deluju silom na druge električne naboje. Ovo se događa i na velikim rastojanjima. Eksperimenti u kojima je istraživano očuvanje energije i količine kretanja pokazali su da je najbolji opis ove interakcije kao što je već rečeno: električni naboju pravi polje, a polje potom deluje na drugi električni naboju.

TABELA 3 Nekaopažena električna polja

Opažanje	Električno polje
Polje na udaljenosti 1 m od elektrona u vakuumu	Izazov 9s
Vrednost polja kojeg oseća ajkula	manje od $0,5 \mu\text{V}/\text{m}$
Šum iz svemira	$10 \mu\text{V}/\text{m}$
Polje radio predajnika snage 100 W na daljini od 10 km	$0,5 \text{ mV}/\text{m}$
Polje unutar provodnika, kao što je bakarna žica	$0,1 \text{ V}/\text{m}$
Polje neposredno ispod dalekovoda visokog napona	$0,1$ do $1 \text{ V}/\text{m}$
Polje GSM (Global System for Mobile Communication) antene na 90 m	$0,5 \text{ V}/\text{m}$
Polje unutar tipičnog domaćinstva	1 do $10 \text{ V}/\text{m}$
Polje sijalice snage 100 W na rastojanju 1 m	$50 \text{ V}/\text{m}$
Polje osnove atmosfereZemlje	100 do $300 \text{ V}/\text{m}$
Polje unutar olujnog oblaka	preko $100 \text{ kV}/\text{m}$
Maksimalno električno polje u vazduhu pre nastanka varnice	1 do $3 \text{ MV}/\text{m}$
Električna polja u biološkim membranama	$10 \text{ MV}/\text{m}$
Električna polja unutar kondenzatora	do $1 \text{ GV}/\text{m}$
Električna polja u impulsu petavatnog lasera	$10 \text{ TV}/\text{m}$
Električna polja u jonu U^{91+} , u jezgru	$1 \text{ EV}/\text{m}$
Maksimalno električno polje u vakuumu, ograničeno stvaranjem para elektrona	$1,3 \text{ EV}/\text{m}$
Maksimalno električno polje u prirodi (ispravljeno Plankovo elekt. polje $c^4/4Ge$)	$1,9 \cdot 10^{62} \text{ V}/\text{m}$

Eksperimenti, kao što je onaj prikazan na **slici 4**, pokazuju

- Električno polje stvara linje polja u prostoru.

Kao posledica toga, električno polje se ponaša kao da su male strelice vezane za svaku tačku x u prostoru. Električno polje je zato opisano smerom i jačinom. Lokalan smer polja određen je lokalnim smerom linije polja – tangentom na liniju polja. Lokalna jačina polja određena je lokalnom gustinom linija polja. Smer i jačina ne zavise od položaja posmatrača. Uktatko:

- *Električno polje $E(x)$ je vektorsko polje*

Eksperimenti su pokazali da je ono najbolje određeno preko obrasca:

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

primjenjenog na svaku tačku u prostoru \mathbf{x} . Odrednica električnog polja stoga se zasniva na tome kako ono *pomera* električne naboje. U opštem slučaju električno polje je vektor

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

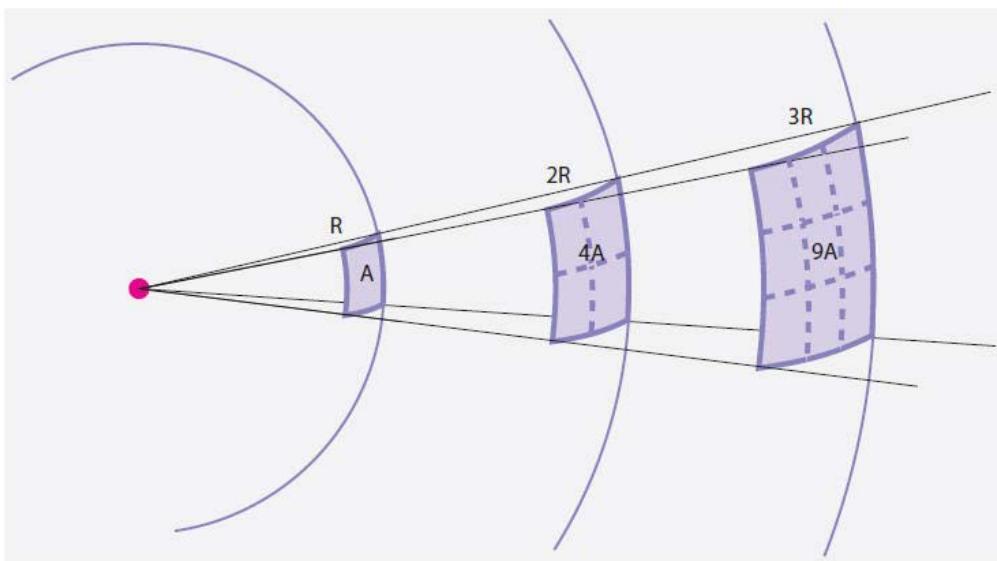
i ono se meri u umnošcima jedinica N/C ili V/m. (*Izazov 7e*).

Odrednica električnog polja predpostavlja da je ispitni električni naboj q toliko mali da ne ometa polje E . Mi ćemo sakriti ovo pitanje pod tepih do budućih vremena. To je drastičan potez: mi na taj način zanemarujemo kvantnu teoriju i kvantni efekt; na njega ćemo se vratiti kasnije. (*Strana 178*). Odrednica električnog polja takođe podrazumeva da je prostor-vreme ravno i zanemaruje sva pitanja koja nastaju usled zakrivljenosti prostor-vremena.

Uzgred, da li odrednica električnog polja koja je upravo data predpostavlja brzinu električnog naboja koja je daleko manja od brzine svetlosti? (*Izazov 8s*).

Da bismo u potpunosti opisali kretanja usled elektriciteta, potreban nam je obrazac koji objašnjava kako električni naboji *stvaraju* električno polje. Ovaj obrazac je postavio uz veliku preciznost (ali ne prvi put) u toku Francuske revolucije Šarl-Avgustin de Kulon (Charles-Augustin de Coulomb) na svom privatnom posedu.¹ On je našao da postoji električno polje oko svakog malog, ili svakog loptastog električnog naboja Q koje je u *mirovanju*, U položaju \mathbf{r} ovo električno polje \mathbf{E} dato je izrazom:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q \mathbf{r}}{r^2 r} \quad \text{pri čemu je: } \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9,00 \text{ GVm/C} \quad (4)$$



Slika 10 Vizualizacija Kulonovog obrasca i Gausov zakon

Kasnije ćemo ovaj obrazac proširiti za električni naboj u kretanju. Čudna konstanta srazmernosti je opšte važeća. Konstanta je određena pomoću takozvane *provodnosti slobodnog prostora* ϵ_0 , i zbog toga je istorijski gledano jedinica za električni naboj bila prva koja je određena.² Osnovna tačka u ovom obrascu je da polje slabi sa kvadratom rastojanja; možete li da predpostavite poreklo ove zavisnosti? (*Izazov 10s*). Jednostavan način da se objasni obrazac Kulona je prikazan na *slici 10*.

¹ Šarl – Avgust de Culon (Charles-Augustin de Coulomb, 1736. Angouleme – 1806. Paris) bio je inženjer i fizičar, poznat po svojim brižljivo izvršenim eksperimentima sa električnim nabojima, čvrstim temeljima za izučavanje elektrotehnike.

² Moguće su i ostale odrednice ove i ostalih konstanti proporcionalnosti sa kojima ćemo da se sretamo kasnije, dovele su do *sistema jedinica* koji je različit od SI sistema korišćenog u ovom tekstu. SI sistem je detaljno prikazan u *Dodatku A*. Među starijim konkurenatima najvažniji su: Gausov sistem jedinica često korišćen u teorijskim izračunavanjima, Hevisajd-Lorencov (Haevside-Lorentz) sistem jedinica, elektrostaticki sistem jedinica i elektrmagnetni sistem jedinica. (*Ref. 8*)

Dva predhodna obrasca omogućavaju nam da napišemo interakciju između dva nanelektrisana tela kao

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \frac{\mathbf{r}}{r} = -\frac{dp_2}{dt} \quad (5)$$

gde je dp promena količine kretanja, a \mathbf{r} vektor koji spaja centre dveju masa. Ovo je čuveni obrazac za elektrostatičko privlačenje i odbijanje. I on je delo Kulona. Obrazac je valjan samo za nanelektrisana tela koja su ili **male veličine** ili su **loptasta**, a pre svega, samo za tela koja su međusobno u **stanju mirovanja** i u odnosu na posmatrača. Proučavanja interakcija između električnog naboja u staju mirovanja naziva se **elektrostatika**.

TABELA 4 Osobine klasičnog električnog polja: (polarni) vektor u svakoj tački prostora

Električno polje može ...	Fizička svojstva	Matematički naziv	Opis
da privuče telo	ubrzanje čestice	spajanje	izraz (4)
da odbije telo	ubrzanje čestice	spajanje	izraz (4)
da se razlikuje	razlikovanje	element skupa	strana 207
da se postepeno povećava	kontinuitet	realni vektorski prostor	Vol. I, strana 67 Vol. V, strana 275
da se usmeri bilo gde	smer	vektorski prostor dimenzionalnost	Vol. I, strana 67
da se upoređuje	merljivost	metričnost	Vol. IV, strana 182
da se sabira	aditivnost	vektorski prostor	Vol. I, strana 67
da ima određene uglove	smer	Euklidov vektorski prostor	Vol. I, strana 67
da prekorači svaku granicu	beskrajnost	neograničenost	strana 208
da promeni smer prilikom refleksije	polaritet	paritetno-neparni vektor	strana 70
da zadrži smer kod preokreta vremena	polaritet	vremenski-parni vektor	strana 70

Električna polja ubrzavaju električne naboje. Kao rezultat toga, u svakodnevnom životu električna polja imaju dve glavne osobine: ona sadrže energiju i ona mogu da polarizuju tela. Sadržaj energije je usled elektrostatičke interakcije između električnih naboja. Veličina te interakcije je znatna. Na primer, ona je osnova za snagu naših mišića. Snaga mišića je mikroskopski efekt Kulonovog obrasca (5). Drugi primer je čvrstina materijala čelika ili dijamanta. Kao što ćemo da otkrijemo, svi atomi se drže u celini zbog elektostatičkog privlačenja. Da biste se uverili u snagu elektrostatičkog privlačenja, odgovorite na sledeće pitanje: kolika je sila između dve kutije sa po jednim gramom protona u svakoj, a koje su postavljene na dva pola Zemlje? (**Izazov 11s**)- Pokušajte da pogodite rezultat pre no što izračunate začudujuću vrednost.

Elektrostatičko privlačenje je prema tome mnogo jače od gravitacijskog privlačenja. Koliki je odnos između njih? (**Izazov 12e**).

Kulonov obrazac za polje oko nanelektrisanja može drugačije da se napiše, na način koji pomaže da se uopšti i za tela koja nisu loptasta. Uzme se zatvorena površina, to jest neka površina A koja obuhvata izvesnu zapreminu. Tada je integral električnog polja po ovoj površini A , električni upliv, obuhvaćeno nanelektrisanje Q podeljeno sa ϵ_0 :

$$\oint_A \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (6)$$

Ovaj matematički izraz, nazvan Gausov zakon,¹ ekvivalentan je rezultatu Kulona.

¹ Karl-Fridruh Gaus (Carl-Friedrich Gauß, 1777. Braunschweig, - 1855. Gottingen) bio je, zajedno sa Leonardom Ojlerom (Leonhard Euler), najznačajniji matematičar svih vremena. Postao je dečje čudo kada je u 19. godini konstruisao pravilni sedamnaestougao pomoću kompasa i lenjira (videti veb stranu mathworld.wolfram.com/Heptadecagon.html). Bio je toliko ponosan na ovaj rezultat da je stavio crtež ove geometrijske figure na svoj nadgrobni spomenik. Gaus je postigao više rezultata u teoriji brojeva, topologiji, statistici, algebri, kompleksnim brojevima i diferencijalnoj geometriji koji su i danas deo savremene matematike i nose njegovo ime. Između mnogih dostignuća on je stvorio teoriju zakrivljenosti i razvio neeuklidsku geometriju. Radio je takođe i na elektromagnetizmu i astronomiji.

Gaus je inao težak karakter, radio je uvek samo za sebe, i nije osnovao školu, Malo je objavljivao, pošto mu je moto bio: pauca sedmatura (malo, ali zrelo). Kao posledica toga, kada bi neki drugi matematičar objavio novi

(Zapazite da u pojednostavljenom obliku koji je ovde dat, on važi samo za statičke situacije.) (**Izazov 13s**). Pošto je unutar provodnika električno polje jednako nuli, Gausov zakon podrazumeva, na primer, da ako je električni naboј q okružen nenelektrisanom metalnom loptom, da će **spoljna** površina metalne lopte pokazivati isto nenelektrisanje q . (**Izazov 14e**).

Da li se nenelektrisana, neutralna tela, privlače međusobno? Na prvi pogled ne. Ali ako se pitanje istraži malo preciznije, otkrićemo da mogu da se privlače. (**Vol. V, strana 93**). Možete li naći uslov u kojem se to događa? (**Izazov 15s**). Ustvari, uslovi su sasvim važni, jer se naše telo, koje je sastavljeno od neutralnih molekula na taj način drži u celini.

PUMPANJE NABOJA

Zbog toga što je sila elektromagnetne interakcije velika, razdvajanje električnih naboja nije lak zadatak. To je razlog što se električni efekti široko koriste tek oko sto godina. Čovečanstvo je čekalo da se izmisle praktični i efikasni uređaje da bi se razdvojila nenelektrisanja i stavila u pokret. Da bismo koristili električne efekte potrebne su **pumpe nenelektrisanja**. Neki od ovih uređaja prikazani su na **slici 11**. Možete li objasniti zašto je baterija ili bilo koji drugi od ovih uređaja izvor nenelektrisanja. (**Izazov 16s**)

Naravno, svaka pumpa nenelektrisanja zahteva energiju. Baterije u mobilnim telefonima i jonski kanali u živim ćelijama za ovu smicalicu koriste hemijsku energiju. Termoelektrični elementi, koji se koriste u nekim časovnicima, koriste razliku temperatura zgloba i okolnog vazduha da bi razdvojili nenelektrisanja; solarne ćelije koriste svetlost, piezoelektrični elementi koriste udarac, a dinamo i Kelvinov generator koriste kinetičku energiju.



Slika 11 Razne vrste pumpi nenelektrisanja: dinamo na biciklu, alternator u elektrani, mašina Vimshursta (Wimshurst), električna jegulja, voltin stub, list bilke i solarna ćelija (© Wikimedia, Q-Cells).

ŠTA JE ELEKTRICITET

Pojam elektricitet takođe se koristi i kao naziv za polje istraživanja. Uobičajeno je da se ovaj pojam koristi tako što se odnosi na električnu struju. Uopšteno, pojam se koristi za efekte električnih naboja, za njihovo kretanje i njihova polja.

Zapravo, odrednica u rečniku krije dublje pitanje: kakva je priroda električnog naboja? Kako bismo rešili ovo izuzetno teško pitanje, počećemo sledećim pitanjem.

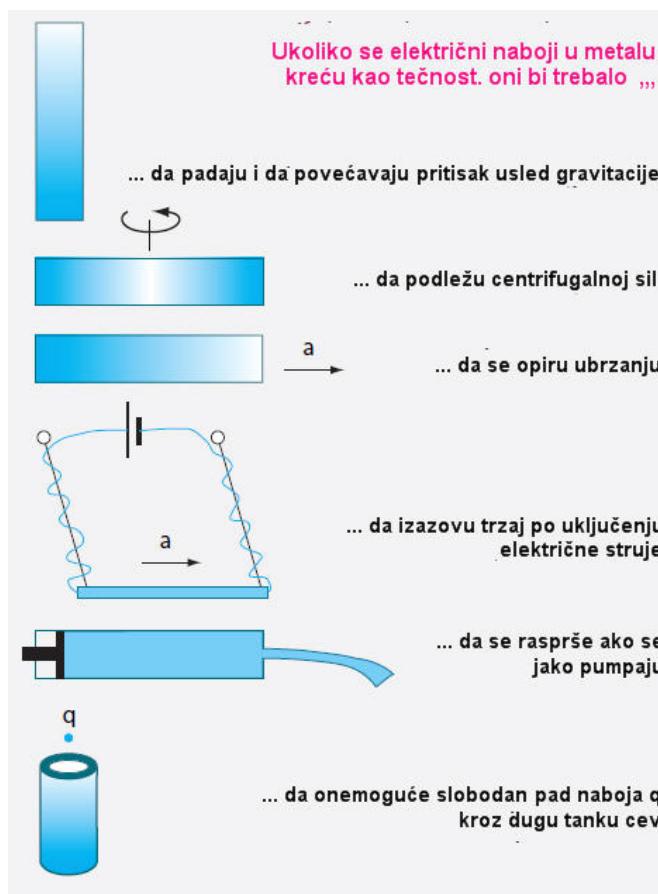
rezultat, on bi redovno pokazivao svoje beleške u kojima je bio zapisao isti rezultat već nekoliko godiba ranije. Ove beleške su sada dostupne on-line, na veb strani www.sub.uni-goettingen.de/sub-aktuell/.

MOŽEMO LI DA OTKRIJEMO INERCIJU ELEKTRICITETA

Ako je električni naboj nešto što teče kroz metal, mi bismo bili u mogućnosti da zapazimo efekt koji je prikazan na **slici 12**: električni naboj bi trebalo da pada, trebalo bi da ima inerciju i trebalo bi da može da se razdvoji od materije. I zaista, svaki od ovih efekata je opažen. Na primer, ako se dugačka metalna šipka drži vertikalno, možemo da izmerimo razliku električnog potencijala, odnosno **napon**, između vrha i dna. Drugim rečima, na ovakav način možemo da izmerimo **težinu** elektriciteta. Isto tako možemo da izmerimo razliku potencijala između krajeva šipke koja se ubrzava. (**Ref. 9**). Alternativno, možemo da izmerimo potencijalnu ražliku između centra i oboda metalnog diska koji se obrće. Poslednji eksperiment bio je zapravo način na koji je prvi put precizno izmeren odnos q/m za struju u metalima. Vrednost inercije elektricitete iznosi:

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

za sve metale, uz sasvim male razlike u drugoj decimali. Negativan predznak je zbog odrednice električnog naboja. Ukratko, električni naboj u metalima ima masu, premda je ona veoma mala.



Slika 12 Posledice protoka elektriciteta prema razmatranjima u tekstu.

Ako električni naboj ima masu, uvek kada uključimo prekidač električne struje mi dobijamo trzaj. (**Ref. 10**) Ovaj jednostavni efekt može lako da se izmeri i potvrđuje odnos mase prema nanelektrisanju koji je upravo naveden. Isto tako, opažena je emisija struje u vazduhu ili u vakuumu; ustvari svaka katodna cev u starim televizorima koristi taj princip da bi se stvorio zrak koji će napraviti sliku. (**Ref. 11**). Emisija se oseća više kod metalnih objekata sa oštrim, isturenim delovima. Zraci koji su stvoreni na takav način – možemo reći da postoji “slobodni” elektricitet – nazivaju se **katodni zraci**. Unutar nekoliko procenata, oni pokazuju isti odnos mase prema nanelektrisanju kao izraz (7). Ova saglasnost stoga pokazuje da se električni naboji kreću skoro kao slobodni u metalima kao i u vazduhu; ovo je razlog što su metali tako dobri povodnici električne struje.

Ako električni naboj pada **unutar** vertikalne metalne šipke, možemo načiniti začuđujući zaključak da katodni zraci nebi trebalo da budu sposobi da padaju kroz vertikalnu metalnu cev. Kao što ćemo videti kasnije, katodni zraci se sastoje od slobodnih elektrona. Naziv “elektron” dao je Džordž Stoni (George Stoney). Elektroni su najmanji i najlakši električni naboji koji se kreću u metalima; oni su obično – al ne i

uvek – “atomi” elektriciteta. Posebno, elektroni sprovode električnu struju u metalima. Naelektrisanje elektrona je jako malo, iznosi 0,16 aC, tako da se protok električnih naboja u svakodnevnom životu sastoji od velikog broja elektrona; kao rezultat toga, električni naboji zapravo se ponašaju kao kontinualni fluid. Česticu je otkrio i predstavio 1897. godine Johan-Emil Vihert (Johann Emil Wiechert, 1861 Tilsit - 1928 Gottingen), a tri godine kasnije, nezavisno od njega Džozef Džon Tompson (Joseph John Thomson, 1856. Cheetham Hill – 1940. Cambridge).

Katodni zraci nebi trebalo da imaju sposobnost da padaju kroz vertikalnu metalnu cev, pošto se poništavaju ubrzanje usled električnog polja proizvedenog pomerenim elektricitetom u metalnoj cevi i gravitacijsko ubrzanje. (*Izazov 17e*). Stoga elektroni nebi trebalo da imaju osobinu da padaju kroz dug tanak valjak. Ovo nebi bio slučaj ako bi se elektricitet u metalima ponašao kao tečnost. (*Ref. 12*). U eksperimentima koji su zaista bili izvedeni zapaženo je umanjenje ubrzanja usled slobodnog pada za 90%. Možete li da zamislite zbog čega nije dobijena idealna vrednost od 100%? (*Izazov 18s*).

Precizni eksperimenti sa električnim naboljima izbačenim iz metala pokazuju da oni imaju odnos električnog naboja prema masi od

$$\frac{q}{m} = 1,758820150(44) \cdot 10^{11} \text{ C/kg} \quad (8)$$

Čestice sa ovom osobinom nazivaju se **elektroni**. Drugi tipovi čestica, da drugačijim električnim naboljem, takođe postoje u prirodi. Primer za to su **joni**, koji se nalaze u baterijama, **mioni**, koji se nalaze u kosmičkom zračenju i **mezoni**, koji su proizvod u ubrzivaču čestica (akcelerator). Sa ovim česticama ćemo se sresti kasnije u našoj pustolovini.

Pošto se električna struja ponaša kao tečnost, trebalo bi da imamo mogućnost da izmerimo njenu brzinu. Prvi koji je to učinio bio je Čarls Vitston (Charles Wheatstone) 1834. godine. U poznatom eksperimentu on je koristio provodnik dužine četvrtinu milje (oko 400 m) da bi izazvao tri varnice: jednu na početku, jednu u sredini i jednu na kraju. Potom je na mehanički časovnik postavio ogledalo koje se brzo obrталo. Primećujući koliko su slike triju varnica pomerene jedna prema drugoj, on je odredio da je brzina 0,45 Gm/s, premda uz veliku grešku merenja. Kasnije su mnogo preciznija merenja pokazala da je brzina uvek ispod 0,3 Gm/s, a da ona zavisi od metala i od vrste izolacije provodnika. Velika vrednost brzine ubedila je mnoge ljude da koriste elektricitet za prenos poruka. Ustvari, ovim eksperimentima je merena **brzina signala** elektromagnetskog talasa prenošenog u metalnom provodniku. Stvarna brzina električnih nabolja mnogo je manja, kao što će biti pokazano u daljem tekstu. (*Strana 179*). Savremena verzija eksperimenta za brzinu signala, za zaljubljenike u računare, koristi komandu “ping” u operativnom sistemu UNIX. (*Ref. 13*). Komanda “ping” meri vreme za koje signal iz jednog računara dođe do drugog i vrati se do prvog. Ako se zna dužina kabla koji su dva računara povezana, može da se odredi brzina signala. Pokušajte. (*Izazov 19e*).

Za mnoge ljude je brzina elektriciteta **isuvlače sporu**. Čipovi u računaru bili bi brži kada bi ona bila veća. I računari koji su povezani sa berzom deonica postavljeni su što je moguće bliže berzi, pošto prednost u vremenu na kratkim udaljenostima komuniciranja (uključujući kašnjenje unutar komutacijskih čipova) obezbeđuju bitnu prednost za postizanje dobrih finansijskih rezultata na izvesnim tržištima. (*Ref. 14*).

Ukratko, eksperimenti su pokazali da da **svi električni nabolji imaju masu**. Dakle, kao i sva tela sa masom, **električni nabolji kreću se sporije od svetlosti**. Električni nabolj je osobina materije; slike i svetlost nemaju električni nabolj.

OSEĆANJE ELEKTRIČNIH POLJA

Zbog čega je elektricitet opasan po ljude? Glavno razlog je što i samim ljudskim telom upravljaju “električni provodnici”. Kao rezultat toga, elektricitet doveden u spolja ljudsko telo stupa u interferenciju sa unutrašnjim signalima. Ovo je bilo poznato još od 1789. godine. Te godine doktor medicine Luidi Galvani (Luigi Galvani, 1737. Bologna – 1798. Bologna) otkrio je da električna stuja izaziva grčanje mišića kod uginulih životinja. Za čuveni prvi eksperiment koristio je žablje krake: kada je u njih doveden elektricitet, oni su počeli snažno da se grče. Istraživanja koja su usledila potvrdila su da svi nervi koriste električne signale. Korišćenjem elektriciteta mogu se, na primer, izazvati pokreti živog tela. Nervi su “provodnici upravljanja” kod životinja. Mi ćemo još detaljnije istražiti nerve u daljem tekstu. (*Strana 43*).

Električna jegulja je najopasnija životinja sa elektricitetom. Pošto električne jegulje imaju jači efekt u vazduhu no u vodi, kada neka životinja uđe u njihovu teritoriju, one često iskoče iz vode u susret uljezu,

tako da mogu da ga lako ubiju svojim ugrađenim naponom od 500 V i strijom od 1 A, proizvedenom u organu za elektricitet visokog napona. Sposobne su da ubiju konja na taj način.

Pošto se upravljuju pomoću elektriciteta, svi sisari mogu da osete jaka električna polja. Ljudi mogu da osete polja koja su manja od 10 kV/m, kada im se nakostreši kosa. Nasuprot tome, mnoge životinje mogu da osete mnogo slabija električna (i magnetna) polja. Morski psi, na primer, mogu da ostete polje slabije od 0,5 μ V/m korišćenjem posebnog čula, ampula Lorencinija, koje su raspoređene oko njenih usta. Njih morski psi koriste da bi otkrili polje koje stvara kretanje plena u vodi; to im omogućava da uhvate plen čak i u mraku.

Mišići kod živog plena stvaraju električna polja. Različite životinje u vodi imaju razvijena čula da otkriju plen u vodi koja je isuviše zamuljena da bi bila providna. Daždevnjak i kljunar (*Ornithorhynchus anatinus*), poznati sisar koji liči na patku, mogu takođe da osete električna polja; ali oni postižu osetljivost. reda mV/m. Brojne ribe, takozvane jake i slabe električne ribe, čak stvaraju električna polja kako bi postigle bolje otkrivanje plena.¹ Ovaj pristup se koristi, na primer, kod ribe surlašice (*Gnathonemus petersii*). Postignuta je osetljivost je ispod 2 mV/m. Zapravo, različite električne ribe koriste polje dipola koje se menja u vremenu da bi komunicirale! (*Ref. 15*). One na taj način saopštavaju drugoj ribi svoje vrste svoj pol, svoj identitet i komuniciraju o udvaranju, agresiji, smirivanju i opasnostima. (*Ref. 16*). Učestanosti koje koriste nalaze se u opsegu između nekoliko i 200 Hz, a polja su dipolna polja koja se stvaraju između prednjeg i zadnjeg dela nihovih tela.

TABELA 5 Neka opažene vrednosti električne struje

Opažanje	Vrednost struje
Najmanja struja ikada izmerena (jedan elektron u pokretu)	3 aA
Signali u ljudskom telu	20 μ A
Smrtonosna struja za ljude	niska kao 20 mA, obično 100 mA
Struja za kretanje lokomotive voza	600 A
Struja u udaru groma	10 do 100 kA
Najveća struja koju je proizveo čovek	20 MA
Struja u Zemlji, poreklo njenog magnetnog polja	oko 100 MA
Najveća moguća struja u prirodi (ispravljena Plankova električna struja $e\sqrt{c^5/4\hbar G}$)	1,5 YA

TABELA 6 Neki senzori električne struje

Merenje	Senzor	Opseg
Običan instrument od 20 E	pad napona na otporniku	do oko 3 A
Prag osetljivosti	ljudski nerv	oseća od 0,1 mA naviše
Bezopasno grčenje mišića sa opuštanjem	ljudski nerv	do 10 mA duže vreme, do 200 mA tokom najviše 10 ms
Promena ritma	ljudsko srce	srce staje kada kroz njega protekne oko 20 mA
Jaki grčevi mišića uz neka oštećenja	ljudski nervi	do 100 mA duže vreme, do 1 A tokom najviše 200 ms
Pojava dima, jake opeketine	ljudsko meso	od 1 A
Paljenje	drvlo	od 1 kA
Električna jegulja <i>Electrophorus electricus</i>	ugrađeno u telo	do 1 A i 500 V

Nijedna kopnena životinja nema čulo za slaba električna polja, jer svako električno polje u vazduhu biva jako prigušeno kada se sretne sa telom životinje ispunjeno vodom.² Zaista, uobičajena atmosfera ima slabo vertikalno električno polje od oko 100 V/m; unutar ljudskog tela ovo polje je prigušeno do reda μ V/m, što je mnogo manje od unutrašnjeg električnog polja od životinja. Drugim rečima. ljudi nemaju čulo za slaba

¹ Tehnologiji je bilo potrebno sve do 2000. godine da bi iskoristila isti efekt. U današnje vreme senzori vazdušnog jastuka u automobilu često koriste električno polje da bi se odredilo da li je osoba u sedištu dete ili odrasla, pa prema tome menjaju način ponašanja jastuka prilikom udesa

² Ipak mali broj kopnenih sisara koji plivaju malo ispod vode imaju senzore električnog polja.

električna polja pošto pripadaju kopnenom životinjama. (Da li ljudi imaju sposobnost da osete električna polja u vodi? Izgleda da to niko ne zna.) (*Izazov 20r*). Međutim, postoji nekoliko izuzetaka. Možda vam je poznato da pojedini stariji ljudi mogu da oste u svojim zglobovima približavanje oluje. Ovo nastaje zbog podudaranja učestanosti elektromagnetsnog polja koje emituje olujni obak – oko 100 kHz – i rezonantne učestanosti omotača nervnih ćelija. (*Strana 85*).

Sadržaj vode u ljudskom telu znači takođe da električna polja u vazduhu, koja se mogu naći u prirodi, kao kada visok napon nakostreši njihovu kosu, predstavljaju potencijalnu opasnost za ljude.

Velika električna otpornost vazduha takođe znači da u slučaju promenljivih elektromagnetsnih polja, ljudi su skloni da na njih mnogo više utiče magnetna nego električna komponenta.



Slika 13 Različite vrste magneta i radnih magneta: igla u kompasu, potkovičasti magnet, dve galasije, magnetno čulo goluba, Zemlja, magnetna dizalica i Sunce (© Wikimedia, Shambhavi, Anthony Aiomamitis, NASA).

MAGNETI I OSTALI MAGNETIČNI MATERIJALI

Proučavanje magnetizma širilo se po svetu nezavisno od proučavanja elektriciteta. Pred kraj dvnaesetog veka počeo je da se upotrebljava kompas u Evropi. U to vreme vodile su se žučne rasprave da li je on usmeren ka severu ili ka jugu. Onda je, 1269. godine vojni inženjer Pjer Peleren de Marikur (Pierre Pelerin de Maricourt, 1219. Maricourt – 1292. nepoznato) objavio svoj rad o magnetnim materijalima. (*Ref. 18*). On je otkrio da svaki magnet ima *dve tačke* i kojima je magnetizam najjači i nazvao ih je *polovi*. On je

otkrio da čak i pošto se magnet preseče, dobijena dva komada zadržavaju dva pola: kada se magnetna ruda ostavi da se slobodno obrće, jedan kraj se usmeri prema severu a drugi prema jugu.

- Svi magneti su dipoli

Dva pola magneta nazvani su **severni pol** i **južni pol**. Marikur je takođe otkrio:

- Istoimeni polovi se odbijaju, a raznoimeni se privlače.

Kao posledica toga, magnetni severni pol na Zemlji je u blizini južnog pola, a magnetni južni pol u blizini severnog pola.

Magneti su okruženi magnetnim poljima, magnetna polja, isto kao i električna polja mogu da se načine vidljivim pomoću magnetnih linija. Na **slici 14** prikazani su neki načini da se to učini. Neposredno zapažamo glavnu razliku između magnetnih i električnih linija polja: linije magnetnog poklja nemaju ni početak ni kraj, dok ih linije električnog polja imaju. (Međutim, linije magnetnog polja obično nisu zatvorene: to se događa i vrlo posebnim slučajevima.) Smer linija polja određuje smer magnetnog polja, a gustina linija određuje jačinu polja.

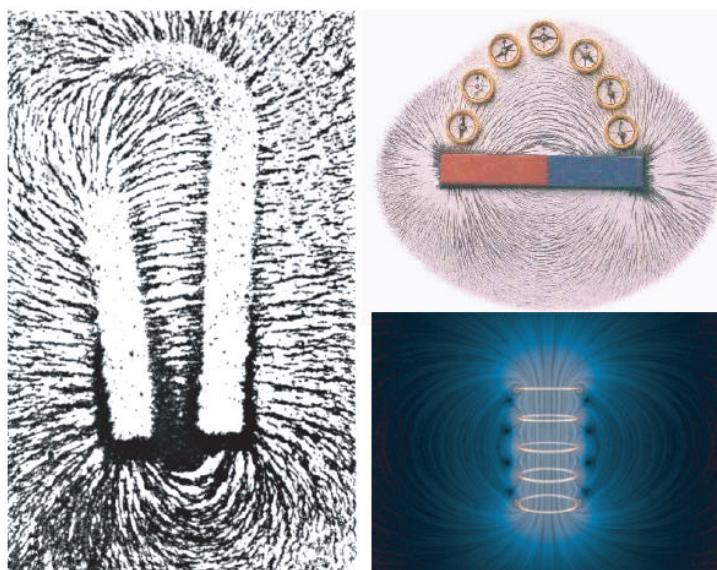
Mnogi sistemi u prirodi su magneti, kao što je prikazano na **slici 13**. Postojanje dva magnetna pola važi za sve magnete u prirodi: molekuli, atomi i elementarne čestice ili su dipoli ili nisu magnetski.

- Ne postoje magnetni jednopolovi.

Linije magnetnog polja mogu da počnu ili da se završe u magnetnim jednopolovima – ako bi postojali. Uprkos obećanjima za večnu slavu, nijedan jednopol nikada nije bio pronađen. Istraga je prikazana u **Tabeli 7**.

TABELA 7 Traženje magnetnih jednopolova, odnosno magnetnih naboja u preko 140 eksperimenata

Traženje	Magnetni naboј
Najmanji magnetni naboј predložen kvantnom teorijom	$g = \frac{\hbar}{e} = \frac{eZ_0}{2\alpha} = 4,1 \text{ pWb}$
Traženje u mineralima, od planina do dna okeana	nijedan, samo dipoli (Ref. 17)
Traženje u meteoritima i mineralima sa Meseca	nijedan, samo dipoli (Ref. 17)
Traženje u kosmičkom zračenju	nijedan (lažna uzbuna 1970-ih) samo dipoli (Ref. 17)
Traženje unutar ubrzivača čestica (akcelerator)	nijedan, samo dipoli (Ref. 17)



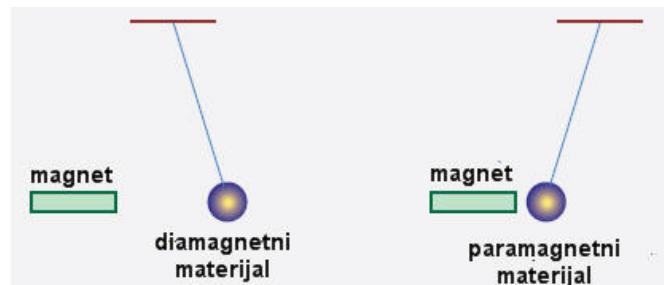
Slika 14 Vizuelizacija magnetnog polja oko magneta i navoja – pomoću gvozdenih opiljaka, pomoću igle kompasa i računarskom grafikom. (© Wikimedia, MIT).

Magneti imaju i drugu važnu osobinu, prikazanu na **slici 15**: magneti svojim magnetnim poljem pretvaraju nemagnetne materijale u magnetne. Postoji, prema tome, **magnetna polarizacija**, slična električnoj polarizaciji. Veličina polarizacije zavisi od vrste materijala; neke vrednosti su date u **Tabeli 9**

- Izvesne materijale, takozvane **diamagnetne materijale**, magnet odbija, obično samo malom silom.

- Druge, takozvane **paramagnetne materijale** magnet privlači.
- Neki bitni materijali su **feromagnetni materijali**, kao što je čelik, zadržavaju izazvanu magnetnu polarizaciju. Feromagnetni materijali se koriste za proizvodnju stalnih magneta – prema tome veštačkih magnetnih ruda.

Magnetni materijali su bitni za industrijsku proizvodnju električne struje i deo su većine uređaja koji koriste elektricitet.



Slika 15 Dva osnovna načina ponašanja magnetnih materijala (ispitivano u nehomogenom polju) diamagnetizam i paramagnetizam

TABELA 8 Neka opažena magnetna polja

Opažanje	Jačina magnetnog polja
Najmanje izmereno magnetno polje (to jest, polje Šumanove rezonanse)	1 fT
Magnetno polje koje proizvode struje iz mozga	0,1 pT do 3 pT
Magnetno polje koje proizvodi jedna aktivnost mišića	1 pT
Međugalaktička magnetna polja	1 pT do 10 pT
Magnetno polje u ljudskim grudima, usled struja u srcu	100 pT
Magnetno polje naše galaksije	0,5 nT
Magnetno polje usled solarnog vetra	0,2 nT do 80 nT
Magnetno polje neposredno ispod dalekovoda visokog napona	0,1 µT do 100 µT
Magnetno polje Zemlje	20 µT do 70 µT
Magnetno polje unutar elektificirane kuće	0,1 µT do 100 µT
Magnetno polje u blizini mobilnog telefona	100 µT
Magnetno polje koje utiče na kvalitet vidljive slike u mraku	100 µT
Magnetno polje u blizini magneta od gvožđa	100 mT
Mrlja na Suncu	1T
Magnetno polje u blizini stalnog magneta visoke tehnologije	1,3 T maksimum
Magnetno polje koje izaziva osećaj hladnoće kod ljudi	5 T i više
Magnetno polje u ubrzivaču čestica (akcelerator)	10 T
Statičko magnetno polje proizvedeno superprovodnim navojem	22 T
Statičko magnetno polje proizvedeno u laboratoriji hibridnim magnetima	45 T
Najjače pulsirajuće magnetno polje proizvedeno bez uništenja navoja	76 T
Pulsirajuće magnetno polje u trajanju od 1 µs pomoću implozivnih navoja	1000 T
Polje zvezde belog patuljka	10^4 T
Polje u impulsu petavatnog lasera	30 kT
Polje neutronske zvezde	od 10^6 T do 10^{11} T
Kriično kvantno magnetno polje	4,4 GT
Najjače ikada izmereno polje, na magnetaru i soft gama repeator SGR-1806-20	0,8 do $1 \cdot 10^{11}$ T
Procenjeno magnetno polje u blizini atomskog jezgra	1 TT
Maksimalno moguće magnetno polje u prirodi (ispravljeno Plankovo magnetno polje $c^3/4Ge$)	$6,3 \cdot 10^{53}$ T

KAKO ŽIVOTINJE OSEĆAJU MAGNETNO POLJE

Svaki glupak može da postavi više pitanja nego što sedam mudraca može da da odgovore

Antika

Poznato je da pčele, morski psi, kanadski ždralovi, mnoge druge ptice, lososi, pastrmke, morske kornjače, delfini, kao i izvesne bakterije mogu da osećaju magnetno polje. ([Ref. 19](#)). Tu je u pitanju sposobnost **magnetorecepkcije**. Svi ovi oblici života koriste ovu sposobnost za navigaciju. Najčešći način otkrivanja je korišćenje malih čestica magneta unutar ćelija; ćelija na taj način oseća kako se ovi ugrađeni magneti pomjeraju u magnetnom polju. Magneti su mali, obično veličine 50 nm. Ovi mali magneti se koriste za navigaciju duž magnetnog polja Zemlje. Za više životinja, promene magnetnog polja Zemlje, 20 do 70 μT stvaraju sliku predela koja je slična vidljivoj slici predela kod ljudi. One mogu da je upamte i da je koriste za navigaciju.

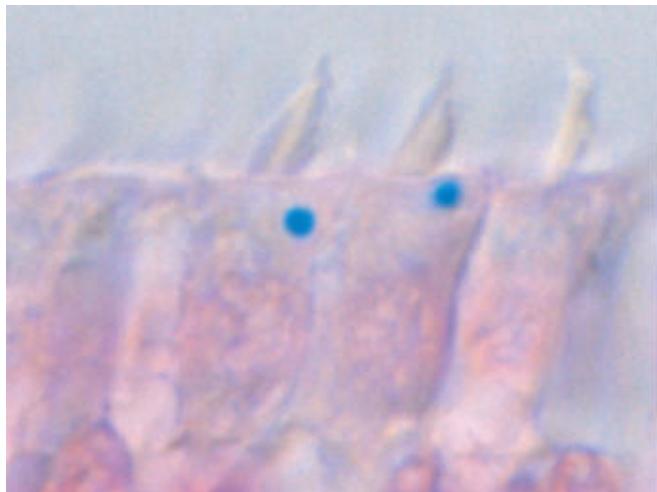
Ustvari, ptice selice kao što je kanadski ždral (*Grus canadensis*) izgleda da imaju **dva** načina da osećaju magnetno polje. Pre svega, oni maju male kristale gvožđa koji se nalaze unutar neurona i koji stvaraju magnetnu mapu koju potom koriste za navigaciju. Dugo vremena mislilo se da su ovi neuroni smešteni u kožu iznad kljuna. Poslednjih godina konačno je shvaćeno da je ova često citirana “činjenica” kolektivna greška; čestice stvarnog magnetnog čula verovatno su smeštene u neuronima unutar uha ptice, tik ispod dlaka, kao što je prikazano na *slici 16*. ([Ref. 20](#)). Drugo magnetno čulo ptica selica je kompas inklinacije koji im saopštava ugao između magnetnog polja i vertikale. Ovaj sistem se zasniva na molekulima proteina osetljivih na magnetizam, takozvane **criptohrome**. Mehanizam je smešten u oko i zasniva se na plavoj svetlosti. Ovo drugo magnetno čulo, koje još nije shvaćeno u potpunosti, koriste ptice da bi odredile opšti pravac u kojem lete. ([Ref. 21](#)).

TABELA 9 Magnetna svojstva materijala – za statičko polje na sobnoj temperaturi.

Materijal	Relativna magnetna propustljivost μ_r
Diamagnetni materijali $\mu_r < 1$, koje magneti odbijaju	
Superprovodnici tipa 1	0
Visoko orijentisani pirolitski grafit	0,99955
Bizmut	0,99983
Grafit	0,99984
Zlato	0,999966
Bakar	0,9999936
Voda	0,9999912
Uobičajene životinje i biljke	kao voda
Paramagnetni materijali $\mu_r > 1$, koje magneti privlače	
Vazduh, kiseonik	1,0000019
Biomagnetne čestice u živim organizmima	1,000006
Aluminijum	1,000022
Platina	1,00026
Feromagnetni materijali $\mu_r \gg 1$, sposobni da se napravi magnet	
SmCo	oko 1,04
NdFeB	oko 1,15
Kobalt	80 do 200
Nikl	100
Gvožđe	300 do 10.000
Permaloj	oko 8.000
Feriti	do 15.000
μ -metal	do 140.000
Amorfni metali	do 500.000

Može li čovek da oseti statičko magnetno polje? Do sada ne postoji konačan odgovor. Magnetni mikrokristali postoje u ljudskom mozgu, no da li čovek može da oseti magnetno polje još uvek je otvoreno pitanje. Možda vi možete da nadete način da se ispita ova mogućnost? (**Izazov 2Ir**).

Nasuprot tome, oscilujuća i pulsirajuća magnetna polja ljudi mogu da osete. Postoji anegdotski dokaz da polje od 0,2 T koje oscilira na 170 Hz dovodi do ukočenosti prstiju tokom nekoliko dana. Takođe se dokazuje da postoje korisni efekti pulsirajućih polja, ali to je još uvek pod znakom pitanja; s druge strane, oscilirajuća magnetna polja imaju pozitivno dejstvo pri lečenju preloma kostiju.



Slika 16 Obojene ćelije iz unutrašnjeg uha goluba; upotrebljene hemikalije daju česticama gvožđa plavu boju. Magnetne čestice, po jedna u svakoj ćeliji, leže tik ispod dlaka. (© Institut za molekularnu patologiju Beč).

TABELA 10 Dielektrične osobine materijala – za statička polja i sobnoj temperaturi

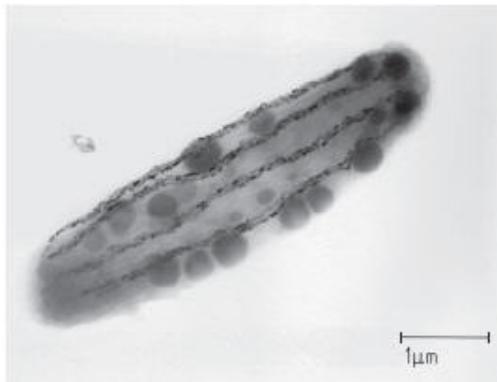
Materijal	Relativna dielektrična konstanta ϵ_r
Izolacioni materijali	
Vakuum	1
Vazduh	1,0006
Teflon	2,1
Grafit	10 do 15
Silicijum dioksid	3,9
Silicijum	11,7
Metanol	30
Voda	80,1
Titanijum dioksid	86 do 173
Paraelektrični materijali	
Stroncijum titanat (peroskit)	310
Barijum stroncijum titanat (perovskit)	500
Feroelektrični materijali $\epsilon_r >> 1$, sposobni da formiraju elektrete	
Litijum niobat (ispod 1430 K)	...
Barijum titanat	1.250 do 10.000
Feroelektrični polimeri	do 100.000
Kalcijum bakar titanat	preko 250.000

Primedba: Vrednosti relativne dielektrične konstante zavise od učestanosti primjenjenog polja i od temperature. Vrednosti koje su navedene u tabeli važe samo za statička polja i sobnu temperaturu. Vrednosti za veće učestanosti ili druge temperature pokazuju jaka odstupanja. (**strana 59**).

MAGNETIZAM I ELEKTRICITET

Da li su magnetizam i elektricitet povezani? Početkom 19. veka Fransoa Arago (Francois Arago)¹ otkrio je da jesu. Istraživao je brod koji je pretrpeo jaku oluju. U to vreme brodovi su bili izrađivani od drva. U brod je udario grom; kao rezultat toga za brod je bio potreban nov kompas. Prema tome, udar groma imao je sposobnost da razmagneti kompas. Arago je znao da je grom električna pojava. Zaključio je da magnetizam i elektricitet moraju biti u vezi.

Ukratko, magnetizam mora biti u vezi sa kretanjem električnih naboja. Ako je magnetizam povezan sa kretanjem, mora da postoji mogućnost da magnetizam i elektricitet pokrenu materiju.



Slika 17 Magnetostatična bakterija *Magnetobacterium bavaricum* sa njenim magnetozomima (© Mari-anne Hanzlik).

KAKO DA SE NAPRAVI MOTOR

Komunizam, to je moć lokalnih uprava plus elektrifikacija cele zemlje.

Lenjin². (Vladimir Iljič Lenjin)

Razlog za ovu Lenjinovu rečenicu bila su dva otkrića. Jedno je načinio 1820. godine Hans Kristijan Ersted (Hans Christian Oersted)³ i drugo 1831. godine Majkl Faradej (Michael Faraday).⁴ Rezultati njihovih eksperimenata potpuno su promenili svet za manje od jednog veka.

Na dan 21. jula 1821. godine Hans Kristijan Ersted objavio je na latinskom dokument, koji je u Evropi izazvao oluju. Ersted je otkrio – u toku predavanja i prikazivanja svojim studentima – da kada se struja propusti kroz provodnik, pokrene se magnet koji je u blizini. Drugim rečima, on je otkrio da

➤ Protok elektriciteta može da **pokrene** tela.

Zahvaljujući Erstedovom dokumentu svako u Evropi uz malo spretnosti počeo je da eksperimentiše sa elektricitetom. Eksperimenti koji su usledili pokazali su da se **dva** provodnika kroz koja protiče struja

¹ Fransoa Arago (Francois Arago, 1786. Estagel – 1853 Paris) bio je fizičar i političar; bio je prijatelj Aleksandra fon Humboldta (Alexander von Humboldt)

² Vladimir Iljič Lenjin (1870. Simbirsk – 1924. Gorki) osnivač SSSR (Saveza Sovjetskih Socijalističkih Republika), godine 1920. rekao je ovo u centru za razvojne planove za zemlju. U Rusiji su se u to vreme lokalne uprave nazi-vale sovjeti.

³ Hans Kristijan Ersted (Hans Christian Oersted, 1777. Rudkobing – 1851. Copenhagen) fizičar i profesor, osnivač škole koja je kasnije postala Tehnički Univerzitet Danske.

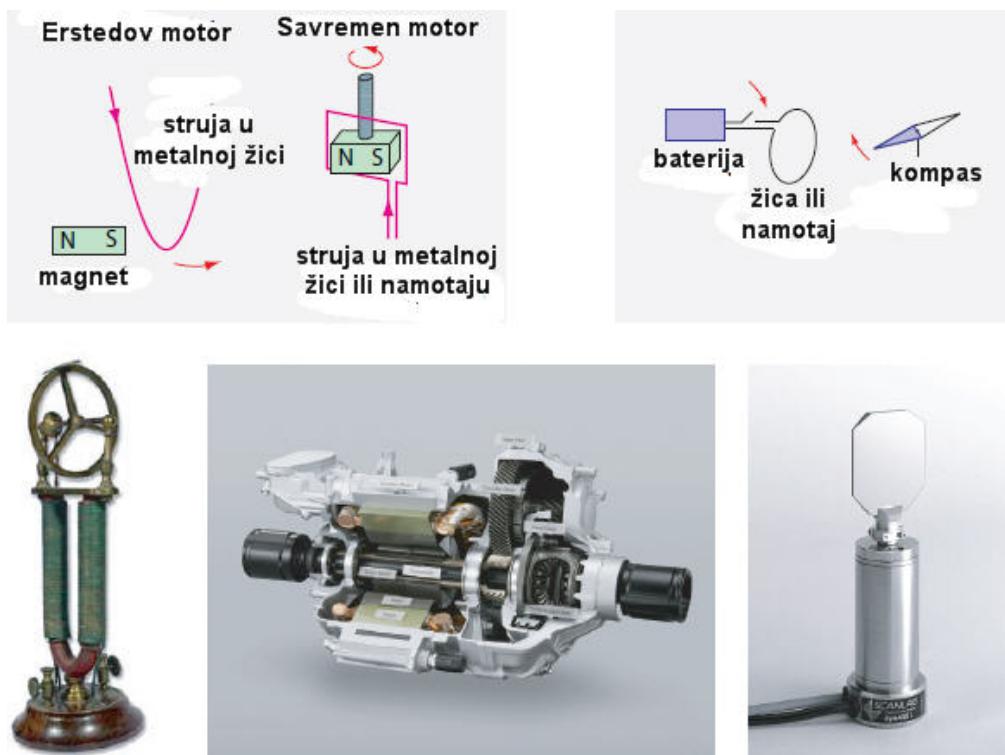
⁴ Majkl Faradej (Michael Faraday, 1791. Newington Butts – 1867. London) rođen je u jednostavnoj porodici, neškolovanoj i dubokih, ali naivnih religijskih pogleda. Kao dečak postao je pomoćnik u to vreme najpoznatijeg hemičara Hamfri Dejvia (Humphry Davy, 1778. Penzance – 1829. Geneva). Faradej nije imao matematičko obrazovanje, ali je postao uticajan fizičar, a kasnije je postao i član Kraljevskog Društva. Kao skroman čovek, on je odbijao da primi bilo kakvu nagradu tokom života. Radio je na temama iz hemije, atomskoj strukturi materije, ali najviše od svega, on je razvio pojam (magnetnih) polja i linija polja. Koristio je polja da bi opisao sva svoja brojna eksperimenta otkrića iz elektromagnetizma, kao što je Faradejev efekt. Polja je kasnije matematički opisao Maksvel, koji je u to vreme bio jedina osoba u Britaniji koja je prihvatile Faradejev pojam polja.

privlače ili odbijaju, u zavisnosti od toga da ju su struje paralelne ili antiparalelne. Ovaj i drugi eksperimenti pokazali su da

- Provodnici kroz koje protiče struja ponašaju se kao magneti.

Ustvari, suprotno je takođe tačno: ako zamislimo male struje koje se u krugovima kreću unutar magneta, dobićemo jedinstven opis za sva magnetna polja zapažena u prirodi. Drugim rečima, Ersted je otkrio konačan dokaz da se elektricitet može pretvoriti u magnetizam.

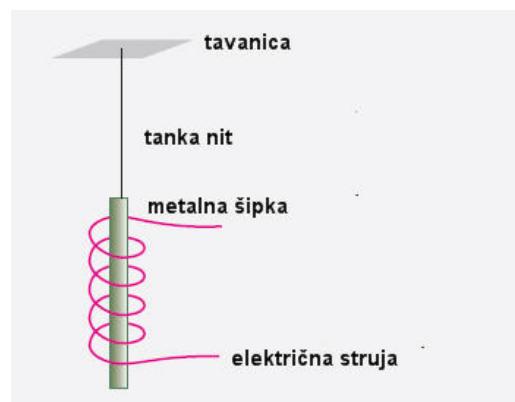
Sve ove veze imaju elektriciteta i magnetizma mogu da se iskoriste da bi se napravili **električni motori**. Prvo, električna struja u namotaju iskoristi se za stvaranje magnetnog polja; zatim se polje iskoristi za pokretanje magneta koji je učvršćen na osovinu motora. Detalji kako se to zaista radi zavise od veličine motora koji se izrađuje; to čini posebnu oblast nauke: elektrotehnički inženjeri. Na **slici 18** prikazani su neki primeri električnih motora.



Slika 18 Stara i savremena verzija električnog motora i galvanometar sa ogledalom sa ograničenim opsegom obrtanja koji se koristi za upravljanje laserskih zraka. Veličine su oko 20 cm, 50 cm i 15 cm (© Wikimedia, Honda, Wikimedia).

KOJE TEKU STRUJE UNUTAR MAGNETA?

Ne postoje magnetni jednopoli. Prema tome, sva magnetna polja u prirodi nastaju od pomeranja električnih naboja. Ali to je čudno; ako sva magnetna polja nastaju usled kretanja električnih naboja, ona bi morala da postoje u tom slučaju i unutar magnetnetnog minerala, odnosno unutar stalnog magneta. Može li to da se dokaže?



Slika 19 Struja izaziva obrtanje metalne šipke.

Godine 1915. dva čoveka u Holandiji pronašla su jednostavan način da dokažu da se u svakom stalnom magnetu pokreću nanelektrisanja. Oni su obesili metalnu šipku o tavanici pomoću tanke niti a zatim oko nje postavili namotaj, kao što je prikazano na *slici 19*. Predviđeli su da će male struje u šipki da postanu poravnate sa magnetnim poljem namotaja. Kao rezultat toga, očekivali su da će struja koja protiče kroz namotaj učiniti da se šipka obrće duž ose. I zaista, kada su propustili jaku struju kroz namotaj, šipka se obrtala. (Kao posledica struje šipka se namagnetisala.) (*Ref. 22*). U današnje vreme ovaj efekt se naziva Ajnštajn-de Hasov efekt, prema dvojici ljudi koji su ga osmislili, izmerili i objasnili.¹ Efekt je prema tome pokazao da čak i u slučaju stalnog magneta magnetno polje nastaje usled unutrašnjih kretanja nanelektrisanja. Jačina Ajnštajn-de Has efekta takođe pokazuje da su elektroni čestice koje se kreću. Dvanaest godina kasnije, 1927. godine, postalo je jasno da je moment količine kretanja odgovoran za ovaj efekt mešavina orbitalne i momenta količine kretanja; ustvari, obrtanje (spin) elektrona u efektu ima glavnu ulogu. Mi ćemo objaniti obrtanje elektrona (spin) u delu kvantne teorije, Ukratko:

- Magnetni polovi nastaju usled osa obrtanja nanelektrisanja.

Osim toga, magneti imaju dva pola pošto osa obrtanja ima dva kraja. Stalni magneti su izrađeni od feromagnetičnih materijala. Ovo stalno namagnećenje nastaje usled poravnjanja mikroskopskih obrtnih kretanja. Zbog ove povezanosti može da se predviđi još jedan iznenađujući efekt: obrtanje bi trebalo da namagnetiše komad nenamagnetisanog feromagnetičnog materijala, pošto bi se male struje koje se obrću poravnale duž ose obrtanja. (*Ref. 23*). Ovaj efekt, koji je takođe opažen, nazvan je **Barnetov efekt**, prema njegovom pronalazaču. Isto kao Ajnštajn-de Has efekt, jačina Barnetovog efekta može da se iskoristi za određivanje žiromagnetičnog odnosa elektrona. (*Vol. IV, strana 85*). Ukratko, takođe Barnetov efekt dokazuje da obrtanje elektrona (spin) u magnetizmu igra veliku ulogu (uglavnom) u odnosu na njihovu orbitalnu količinu kretanja.

OPISIVANJE MAGNETNIH POLJA

Svi eksperimenti pokazuju da magnetno polje ima određen smer u prostoru, i veličinu istu za sve posmatrače (u stanju mirovanja) bilo kakvog usmerenja. Stoga ćemo da pokušamo da opišemo magnetno polje kao vektor. Međutim, to bi moglo da bude pogrešno, pošto se magnetno polje ne ponaša kao strelica kada se postavi pred ogledalo. Zamislite da neki sistem stvara magnetno polje usmereno udesno. Možete uzeti bilo koji sistem, namotaj, mašinu itd. Potom napravite ili zamislite drugi sistem koji je tačna verzija prvog sistema u ogledalu: namotaj u ogledalu, mašinu u ogledalu itd. Magnetni sistem kojeg stvara sistem u ogledalu neće biti usmeren uлево, kako se možda očekivalo: on će i dalje biti usmeren udesno. (Proverite i sami.) (*Izazov 22e*). Drugim rečima, magnetna polja se **ne ponašaju** u potpunosti kao strelica.

Drugim rečima, nije sasvim ispravno da se magnetna polja opišu vektorom $\mathbf{B} = (B_x, B_y, B_z)$, pošto se vektori ponašaju kao strelica. Magnetno polje je pseudovektor, ili vektor ose, moment količine kretanja i moment takođe su primeri takve veličine. Precizan način je da se opiše magnetno polje preko veličine²

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

koja se naziva **antisimetričan tenzor**.

Magnetno polje je određeno ubrzanjem koje ispoljava na pokretna nanelektrisanja. Ovo ubrzanje je opaženo kako glasi:

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

¹ Vander Johan de Has (Wander Johannes de Haas, 1878. Lisse – 1960. Bilthoven) bio je fizičar koji je najpoznatiji za dva posebna magneto-električna efekta nazvana po njemu, **Šubnikov-de Has efekt** (jak porast magnetne otpornosti bizmuta pri niskim temperaturama i jakim magnetnim poljima i de Has-vanAlfen efekt (dijamagnetska osetljivost bimita pri iskim temperaturama i periodičnom funkcijama magnetnog polja).

² Veličina \mathbf{B} ne naziva se "magnetno polje", osim ponekad i retko. Mi ćemo pratiti savremenu, logičnu odrednicu, koja je zamенила zastarelju, gde je \mathbf{B} nazvano "gustina magnetnog upliva" ili "magnetna indukcija" i drugu veličinu \mathbf{H} koja je nazivana – nepravilno, ali tokom vekova – magnetno polje. Ova veličina \mathbf{H} neće se pojavljivati tokom našeg hodanja, ali je važna za opis magnetizma u materijalima.

za nanelektrisanje q mase m . Ovaj obrazac se često naziva **Lorencovo ubrzanje**, prema značajnom fizičaru Hendrigu A. Lorencu (Hendrik A. Lorentz)¹ koji ga je prvi jasno iskazao². Lorencovo ubrzanje naziva se takođe i **Laplasovo ubrzanje**, koje određuje veličinu i smer magnetnog polja \mathbf{B} . Jednica magnetnog polja naziva se Tesla, a njena skraćenica je T. Imamo $1\text{T} = 1\text{Ns/Cm} = 1\text{Vs/m}^2 = 1\text{Vs}^2/\text{Am}$.

TABELA 11 Svojstva klasičnog magnetnog polja: aksijalnog vektora

Magnetno polje može da...	Fizička svojstva	Matematički naziv	Odrednica
privlači struju	skretanje naboja	spajanje	jednakost (10)
odbija struju	skretanje naboja	spajanje	jednakost (10)
se razlikuje	razlikovanje	element skupa	strana 207
se menja postepeno	neprekidnost	realni vektorski prostor	Vol. I, strana 67, Vol. V, strana 275
usmeri bilo gde	smer	vektorski prostor, dimenzionalnost	Vol. I, strana 67
se uporedi	merljivost	metričnost	Vol. IV, strana 182
se sabira	sabiranje	vektorski prostor	Vol. I, strana 67
ima određen ugao	smer	Euklidov vektorski prostor	Vol. I, strana 67
prevazilazi sve granice	beskrajnost	neograničenost	strana 208
zadrži smer pri refleksiji	aksijalnost	paritetno-neparni vektor, pseudovektor	strana 70
promeni smer pri preokretu vremena	aksijalnost	vremenski-parni vektor	strana 70

Magnetno polje je određeno i može da se izmeri prema njegovom uticaju na električne naboje u kretanju. Istražimo ovu odrednicu. Da li upravo iskazana odrednica magnetnog polja podrazumeva brzine nanelektrisanja mnogo manje od brzine svetlosti? (**Izazov 23s**).

Odrednica magnetnog polja podrazumeva, isto kao i kod električnog polja, da je ispitno nanelektrisanje q toliko malo da ono ne remeti polje \mathbf{B} koje se meri. I ponovo, mi ćemo zanemariti ovo pitanje, što znači da ćemo zanemariti sve kvantne efekte, do kasnije faze naše pustolovine. (**Strana 178**).

Odrednica magnetnog polja takođe podrazumeva da je prostor-vreme ravno i zanemaruje sva pitanja nastala usled zakrivljenosti prostor-vremena.

Lorencovo ubrzanje je osnovni efekt kojeg magnetno polje ima na nanelektrisanje u pokretu. Lorencovo ubrzanje temelj je rada svakog električnog motora. Električni motor je naprava koja koristi magnetno polje što je moguće efikasnije da bi ubrzala nanelektrisanja koja protiču kroz provodnik ili namotaj. Usled kretanja nanelektrisanja, kreće se i provodnik. U električnom motoru elektricitet se najpre pretvara u magnetizam, a potom u kretanje. Prvi efikasni električni motori bili su napravljeni već 1830. godine.

Nanelektrisanje koje se kreće proizvodi magnetno polje. Slično kao i kod električnog polja potrebno je da znamo kako kretanje nanelektrisanja određuje jačinu magnetnog polja. Eksperimenti, kao što je bio Erstedov, pokazuju da magnetno polje tačkastog nanelektrisanja q koje se kreće brzinom \mathbf{v} stvara polje \mathbf{B} dato kao

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

¹ Za više detalja o Hendriku A. Lorencu (Hendrik A. Lorentz, 1853. Arnhem – 1928. Haarlem) videti u volumenu o relativnosti (**Vol. II, page 35**)

² Izraz $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ je vektorski proizvod dva vektora. (**Vol. I, strana 93**). Najpraktičniji način da se izračuna vektorski proizvod $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ jedna po jedna komponenta dat je putem determinante

$$\mathbf{v} \times \mathbf{B} = \begin{vmatrix} \mathbf{e}_x & v_x & B_x \\ \mathbf{e}_y & v_y & B_y \\ \mathbf{e}_z & v_z & B_z \end{vmatrix} \quad \text{ili više nemarno} \quad \mathbf{v} \times \mathbf{B} = \begin{vmatrix} + & - & + \\ v_x & v_y & v_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix} \quad (11)$$

Ovo se lako pamti i lako je za izvođenje, kako sa slovnim oznakama, tako i sa brojnim vrednostima. (Ovde su \mathbf{e}_x , \mathbf{e}_y i \mathbf{e}_z jedinični vektori u smeru osa x, y i z, respektivno.) Izračunato, ekvivalentno je izrazu

$$\mathbf{v} \times \mathbf{B} = \mathbf{e}_x (v_y B_z - B_y v_z) + \mathbf{e}_y (B_x v_z - v_x B_z) + \mathbf{e}_z (v_x B_y - B_x v_y) \quad (12)$$

što je mnogo teže za pamćenje

Ovo se naziva Amperov zakon. I ponovo, čudan sačinilac $\mu_0/4\pi$ je zbog istorijskog načina u kojem su bile određivane električne jedinice. Sačinilac μ_0 naziva se provodnost vakuuma, a određen je razlomkom Njutn po amperu na kvadrat, kao što je dato u obrascu. Lako je da se zapazi da magnetno polje ima jačinu datu kao vE/c^2 , pri čemu je E električno polje koje je izmerio posmatrač koji se *kreće sa* nanelektrisanjem. (**Izazov 24e**). To je jedan od mnogih nagoveštaja da je magnetizam relativistički efekt.

Primetićemo da jednakost (13) važi samo za male brzine i mala ubrzanja. Možete li naći opšti izraz? (**Izazov 25s**)

TABELA 12 Neki senzori za statička i kvazistatička magnetna polja

Merenje	Senzor	Opseg
Napon	Halova sonda	do više T
Indukovana elektromotorna sila (napon)	golubovi	od nekoliko nT
Stimulacija rasta kostiju	piezoelektricitet i magnetostrikcija kostiju	od 50 mT
Indukovana elektromotorna sila (napon)	ljudski nervi	od nekoliko T
Osećaj u grudnom košu i ramenima	ljudski nervi	jako pomereni gradijanti
Morski psi	indukoan napon kada leluja levo desno	nekoliko nT
Biljke	nejasno	mali uticaj na rast

ELEKTROMAGNETIZAM

Godine 1831. Majkl Faradej je otkrio još jedan komad slagalice koju čine elektricitet i magnetizam, onaj koji je Amper prevideo. On je otkrio da

- Magnet *koji se kreće* izaziva tok struje u električnom kolu.

Magnetizam se prema tome pretvara u elektricitet. Ovo važno otkriće omogućilo je proizvodnju toka električne struje pomoću generatora, takozvanih dinama, korišćenjem snage vode, snage vetra i snage pare. Ustvari, prvi dynamo je već 1832. odine napravio Amper i njegovi tehničari. Dynamo je naglo počeo da širi upotrebu elektriciteta u svetu. Iza svake priključnice na zidi postoji negde dynamo.

Ersted je pronašao da električna struja može da napravi magnetno polje. Faradej je pronašao da bi magnetna polja mogla da proizvedu električne struje i električna polja. Električna i magnetna polja prema tome su dva aspekta istog fekomena: elektromagnetizma. Bilo je potrebno sledećih 30 godina da bi se razmršio potpun opis.

Dodatni eksperimenti pokazali su da magnetna polja takođe dovode do električnih polja ako se promeni tačka posmatranja. Mogli biste da proverite ovo na bilo kojem primeru sa *slike 18* do *slike 43*.

- Magnetizam je relativistički elektricitet.

Električna i magnetna polja delimično se pretvaraju jedno u drugo kada se pređe iz jednog inercijskog referentnog sistema u drugi. Magnetna i električna polja se prema tome ponašaju kao prostor i vreme, koji se takođe pomešaju kada se promeni jedan inercijski sistem drugim. U takvom slučaju, specijalna teorija relativnosti govori nam da mora postojati jedinstven pojam, *elektromagnetno polje*, koje opisuje oba. Istražujući detalje, nalazi se da elektromagnetno polje \mathbf{F} koje okružuje telo sa elektičnim nabojem mora da bude opisano pomoću asimetričnog 4-tenzora:

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

Očigledno je da elektromagnetno polje F , pa prema tome i svaki član ovih matrica, zavisi od prostora i vremena. Pre svega, matrice pokazuju da su elektricitet i magnetizam dva vida istog efekta.¹ Osim toga, pošto se električna polja pojavljuju samo u gornjem redu i krajnjoj levoj koloni, u svakodnevnom životu i za male brzine, elektricitet i magnetizam mogu da se razdvoje. (Zašto?) (**Izazov 26s**).

Korišćenjem relativističkog načina pisanja, elektromagnetno polje je stoga određeno preko 4-ubrzanja \mathbf{b} koje ono ispoljava na naelektrisanje q mase m i brzine \mathbf{u} :

$$\begin{aligned} \mathbf{mb} &= q\mathbf{Fu} \quad \text{ili ekvivalentno tome u načinu pisanja 3-vektora} \\ \frac{dE}{dt} &= q\mathbf{Ev} \quad \text{i} \quad \frac{dp}{dt} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \end{aligned} \quad (15)$$

Izraz pokazuje kako snaga dE/dt (slovo E označava energiju dok \mathbf{E} označava električno polje) i 3-sila dp/dt zavise od električnog i magnetnog polja.² Izraz za 4-vektor i izraz za 3-vektor opisuju isti sadržaj; jednostavnost onog prvog je razlog upotrebe matrice (14) za opis elektromagnetskog polja \mathbf{F} .

Naglašavamo da je proširena **Lorencova jednakost** (15) odrednica elektromagnetskog polja \mathbf{F} , pošto je polje određeno kao “materijal” koji ubrzava naelektrisanja. Osim toga, svi uređaji koji stavljuju naelektrisanja u pokret, kao što su baterije i dinama, isto kao i svi uređaji koji se pokreću usled toka naelektrisanja, kao što su električni motori i mišići, opisani su ovim izrazom. Zbog toga se ovaj izraz, u 3-vektorskem obliku, proučava već u srednjim školama. Lorencova jednakost opisuje sve slučajeve u kojima kretanje objekata može videti golim okom ili osetiti našim čulima, kao što je kretanje električnog motora, u vozu velikih brzina, u liftu, u zubarskoj bušilici, kretanju slike koju je stvorio zrak elektrona u katodnoj cevi starih TV prijemnika, ili putovanje električnog signala kroz kabel i u nervima našeg tela. (**Ref. 24** i **Ref. 25**).

Ukratko, nalazimo da interakcija između naelektrisanja može da se opiše u dva iskaza: Prvi, naelektrisanja **stvaraju** električno i magnetno polje; drugi, na naelaktrisanja **utiče** električno i magnetno polje. Naelektrisanja se kreću, tako da polja zavise od vremena. Njihovo proučavanje se zato naziva **elektrodinamika**.

INVARIJANTE I LAGRANZIJAN ELEKTROMAGNETNIH POLJA³

Tenzor elektromagnetskog polja \mathbf{F} je asimetričan 4-tenzor. (Možete li da napišete odnose između $F^{\mu\nu}$, $F_{\mu\nu}$ i F^μ_ν ?) (**Izazov 27e**). Kao i svaki asimetrični tenszor, elktromagnetno polje ima dve invarijante, to jest, dva izvedena svojstva koja su zajednička za svakog posmatrača. Prva invarijanta je izraz

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

a druga invarijanta je proizvod

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

Možete li da potvrdite ove dve invarijante korišćenjem odrednice za trasu tr i zbir elemenata u dijagonalni? (**Izazov 28s**).

Prvi izraz za invarijantu, $B^2 - E^2/c^2 = (1/2) \operatorname{tr} F^2$ pokazalo se da je (srazmeran) gustini lagranžijana elektromagnetskog polja. Osim toga, ova prva invarijanta je skalar. Ova prva invarijanta podrazumeva da ako je E veće, manje ili jednak sa $c \cdot B$ za jednog posmatrača, isto to je i za sve ostale posmatrače. Slično kao i za sve intenzivne veličine koje se razvijaju, lagranžian je srazmeran sa kvadratom veličine jačine.

¹ Ustvari, izraz za polje sadrži svuda izraz $1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ umesto brzine svetlosti c . Razlog za ovu zamenu ubrzo ćemo objasniti.

² U komponentnom načinu zapisivanja, koristeći konvenciju sabiranja grčkih indeksa koji se pojavljuju dva puta, definicija Lorencove sile je:

$$m \frac{d}{d\tau} \begin{pmatrix} \gamma c \\ \gamma v_x \\ \gamma v_y \\ \gamma v_z \end{pmatrix} = q \begin{pmatrix} 0 & E_x/c & E_y/c & E_z/c \\ E_x/c & 0 & B_z & -B_y \\ E_y/c & -B_z & 0 & B_x \\ E_z/c & B_y & -B_x & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \gamma c \\ \gamma v_x \\ \gamma v_y \\ \gamma v_z \end{pmatrix} \quad (16)$$

³ Ovaj odeljak može da se preskoči prilikom prvog čitanja.

Znak minus u izrazu je isti onaj minus koji se pojavljuje u $c^2t^2 - x^2$: to je rezultat mešanja električnih i magnetnih polja koja je posledica podrške (boost).

Gustina lagranžijana može da se iskoristi za određivanje klasičnog rada elektromagnetskog polja:

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

Kao i obično, rad je merilo **promena** koje se događaju u sistemu; prema tome određuje količinu promene koja se pojavljuje kada se elektromagnetno polje kreće. (**Vol. IV, strana 40**). (Izraz za promenu, ili rad, zraka svetlosti koji se kreće smanjuje se na proizvod njegove jačine i ukupne promene faze.) Rad elektromagnetskog polja prema tome se povećava sa njegovom jačinom i njegovom učestanošću. Kao i obično, ovaj izraz za rad može da se iskoristi da bi se opisalo kretanje elektromagnetskog polja korišćenjem **načela najmanjeg rada**. U stvari, ovo načelo podrazumeva jednakosti razvoja elektromagnetskog polja, koje se nazivaju **Maksvelove jednakosti polja elektrodinamike**. Ovakav pristup je najlakši način da se one usvoje. (**Strana 61**). Razmatračemo jednakosti polja u detaljima veoma brzo.

Druga invarijanta tenzora elektromagnetskog polja, $4EB = -c \operatorname{tr} F^*F$ je pseudoskalar, on opisuje da li je ugao između električnog i magnetnog polja oštar ili tup za sve posmatrače.¹

KORIŠĆENJE ELEKTROMAGNETNIH EFEKATA

Primena elektromagnetnih efekata u svakodnevnom životu promenila je svet. Na primer, postavljanje uličnog osvetljenja u gradovima skoro je potpuno otklonilo predhodna uobičajena noćna ubistva. Ovi i svi drugi električni uređaji koristili su činjenicu da nanelektrisanja mogu da se kreću u metalima, a posebno, što elektromagnetna energija može da promeni oblik:

- u mehaničku energiju – što se događa u zvučnicima, motorima i mišićima,
- u svetlost – kao u svetiljkama, laserima, staklenim vlknima, svicima, velikim lignjama i raznim životinjama u dubinama okeana,
- u toplotu – kao u električnim pećima, čebadima, čajnicima, i kod električnih jegulja da bi omamile i ubile plen,
- u hemijske efekte – kao u hidrolizi, punjenju baterija, galvanizaciji i u mozgu,
- u hladnoću – kao što su frižideri. Peltijeovi elementi, ali ne i kod poznatih živih sistema,
- u signale radio talasa – kao što su radio i televizija, ali ne i kod poznatih živih sistema,
- u skladištenje podataka – kao što su magnetni zapisi, računari, pamćenje kod životinja i ljudskih bića.

Usled svih ovih mogućnosti, električnom osvetljenju, laserima, baterijama, električnim motorima, frižiderima, radiju, telefonima, rentgenskim zracima, televiziji i računarima, ljudski život se u potpunosti promenio za manje od jednog veka.

Elektromagnetski efekti su stoga korisni da se nešta izvede na posebnom mestu i vremenu, tako da se ostvare pokretači. Osim toga, elektromagnetski efekti su korisni da se sačuvaju informacije iz okruženja, prema tome da se ostvare senzori. (**Strana 168**).

¹ Postoji zapravo i treća Lorencova invarijanta, daleko manje poznata. Ona je posebna za elektromagnetna polja i ona je kombinacija polja i njegovog vektorskog potencijala (**Ref. 26**):

$$\begin{aligned} k_3 &= \frac{1}{2} A_\mu A^\mu F_{\rho\nu} F^{\rho\nu} - 2A_\rho F^{\rho\nu} F_{\nu\mu} A^\mu = \\ &= (\mathbf{A} \cdot \mathbf{E})^2 + (\mathbf{A} \cdot \mathbf{B})^2 - |\mathbf{A} \times \mathbf{E}|^2 - |\mathbf{A} \times \mathbf{B}|^2 + 4\frac{\varphi}{c}(\mathbf{A} \cdot \mathbf{E} \times \mathbf{B}) - \left(\frac{\varphi}{c}\right)^2 (E^2 + B^2) \end{aligned} \quad (20)$$

Ovaj izraz je Lorencova (ali ne i merna) invarijanta; ako poznajemo nju može da nam pomogne da razjasnimo nejasna pitanja, kao što je nepostojanje talasa u kojima su električno i magnetno polje paralelni. Zaista, za monohromatske talase u ravni sve tri invarijante nestaju i Lorencovoj metrići. (**Strana 68**). Takođe i veličine $\partial_\mu j_\mu$, $j_\mu A_\mu - j$ – budući da su električne struje – i $\partial_\mu A_\mu$ su Lorencove invarijante. (Zašto?) (**Izazov 29s**). Poslednja od njih, sistem nezavisnosti od rasipanja 4-potencijala, **odražava invarijantu izbora metrike**. Metrika u kojoj je izraz jednak nuli, naziva se **Lorencova metrika**.

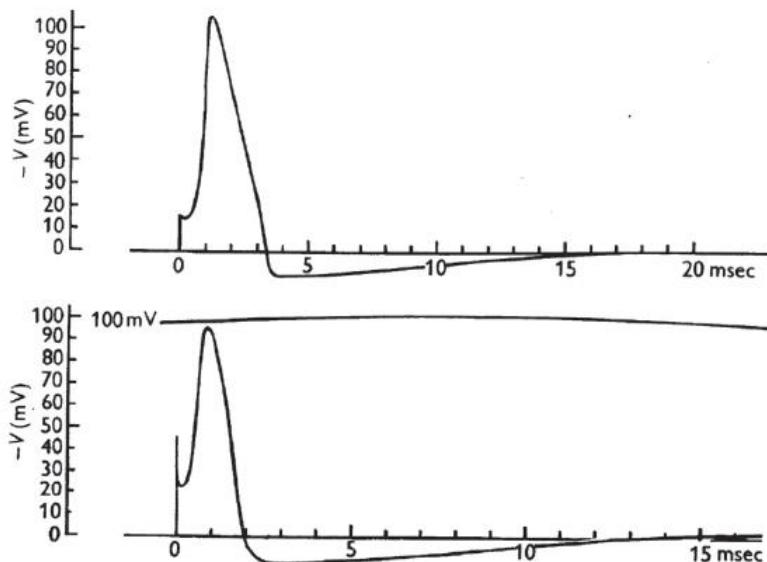
Mnogi od ovih upotreba elektromagnetizma pojavljuju se i u biološkim sistemima. Međutim, ipak nijedan biološki sistem ne koristi X-zrake. (Zašto?) (**Izazov 30s**). Nijedan biološki sistem ne koristi električno hlađenje. (Zašto?). I da li postoji biološki sistem koji komunicira putem radio talasa? (**Izazov 31s**).

KAKO RADE NERVI

Nervi su čudo. Bez nerava mi ne bismo mogli da osećamo zadovoljstvo, ne bismo osećali bol, ne bismo videli, niti bismo čuli. Bez nerava mi ne bismo živeli. Ali kako nervi prenose signale?

Godine 1789., kao što je već pomenuto, ([strana 30](#)) Luidi Galvani otkrio je kako nervi prenose električne signale, tako što je izveo eksperiment sa žabljim kracima. Da li su nervi provodnici? Jedan i po vek posle Galvanija postalo je jasno da nervi, ili preciznije aksoni nerava, ne provode elektricitet koristeći elektrone, kako to čine metali, već koristeći **jone**. Signali u nervima se prostiru koristeći kretanje jona natrijuma Na^+ i kalijuma K^+ kroz membrane ćelija nerva. Proizvedena brzina signala je između 0,5 m/s i 120 m/s, što zavisi od vrste nerva. (Aksoni nerva koji su obavijeni mielinom, proteinom koji služi kao električni izolator, brži su od neobavijenih aksona.). Brzina signala je dovoljna za preživljavanje mnogih vrsta – oni pomažu da telo pobegne u slučajevima opasnosti.

Nervi se razlikuju od provodnika i u sledećem pogledu: oni ne mogu da prenesu signal konstantnog napona, već samo **impulse**. Prvi, približan model za ovakvo ponašanje bili su predstavili Hodžgin i Haksli (Hodgkin and Huxley) 1952. godine. ([Ref. 27](#)). Koristeći posmatranja o ponašanju natrijuma i kalijuma, oni su napravili elaborat koji opisuje jednakost evolucije koja opisuje napon V u nervima, a time i način prostiranja signala. Jednakost prikazuje karakteristične vrhove napona izmerenih u nervima, prikazanih na [slici 20](#).



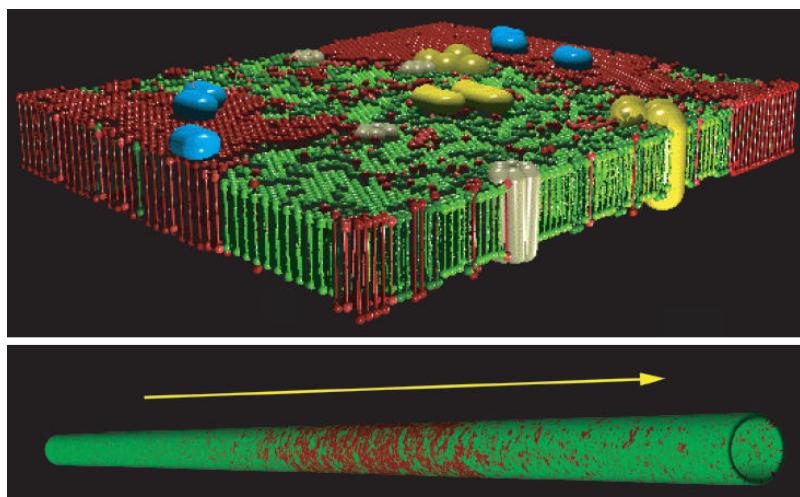
Gornja kriva: rešenje jednakosti (26) za početnu depolarizaciju od 15 mV, izračunato za 6°C. Donja kriva: praćenje potencijala akcije membrane, snimljeno na 9,1°C (akson 14). Vertikalna razmara je ista za obe krive (nezavisno od zakrivljenosti u donjem snimku). Horizontalna razmara se razlikuje za sačinilac pogodan za razliku temperature.

Slika 20 Električni signal u nervu, (gore) izračunat i (dole) izmeren, prema Hodžgin i Haksliju

Precizan mehanizam kojim joni prolaze kroz membrane, koristeći takozvani kanal proteina, bio je objašnjen tek dvadeset godina kasnije. Uprkos ovom velikom opsegu rada, pa čak i pošto su Hodžgin i Haksli dobili Nobelovu nagradu za medicinu za njihov rad, model ne može da bude ispravan. Model ne objašnjava osobinu obratnosti procesa prostiranja, opaženu promenu debljine nerva tokom prostiranja niti pobuđenost nerva prostim izobličenjem ili promenom temperature; pre svega, model nije mogao da objasni delovanje anestetika. Detalju funkcionisanja nerava ostali su nepoznati.

Tek oko 2000. godine otkrili su Tomas Hajmburg (Thomas Heimborg) i njegov tim način na koji se signali prostiru kroz nerv. ([Ref. 28](#)). On je pokazao da je impuls u nervu elektromehanički solitonski talas valjkaste opne. U valjkastoj opni struktura proteina se promeni uz tečnog u čvrsto stanje i ponovo u tečno. Ovaj kratak, malo debiji prsten čvrstog proteina širi se duž valjka: to jest impuls nerva. Ukratko, impuls nerva ne čini da se protein kreće, već se kreće oblast čvrstog proteina. Model je prikazan na [slici 21](#). (Pojam "čvrst" ima precizno tehničko značenje u dvodimenzionalnom sistemu i opisuje posebno stanje

poređanosti molekula.) Ovaj model prostiranja objašnjava sve osobine impulsa nerva koje ranije nisu bile objašnjene. Posebno, on objašnjava da anestetici dejstvuju pošto se ratvore u opni i time blokiraju stvaranje i prostiranje prstena. Sva kvantitativna predviđanja modela podudarna su sa posmatranjima.



Slika 21 Gore: biološke opne sa lipidima u čvrstom stanju (crveni), lipidima u tečnom stanju (zeleni) i raznim rastvorenim proteinima (žuti, plavi, beli). Dole: prostiranje impulsa u nervu kao dvodimenzionalno fazno pretvaranje tečno-čvrsto-tečno duž valjkaste opne nerva (© Thomas Heimborg/Wiley-VCH).

Ukratko, signali nerva su elektromehanički impulsi; oni su mešavina talasa struje i zvuka. Elektromehanički model nerva objašnjava kako se prostiru signali, kako se oseća bol i zbog čega se bol ne oseća tokom anestezije.

Interesantno je, ali elektromehanički model prostiranja impulsa u nervu nije objasnio (još uvek) zbog čega tokom anestezije mi gubimo svest. To je dodatni proces koji se događa u mozgu. Zna se da je gubitak svesti povezan sa promenom moždanih talasa, ali detalji još uvek su tema istraživanja. Mozak još uvek ima divnih svojstava za istraživanje.

KAKO MOTORI DOKAZUJU DA JE RELATIVNOST ISPRAVNA

Jedina matematička operacija koju sam izvodio u svom životu bila je da okrenem ručicu računaljke.

Majkl Faradej

Svi električni motori zasnivaju se na posledici da postoji interakcija električnih struja i magnetnih polja. Najjednostavniji primer je privlačenje dva paralelna provodnika kroz koje teku struje. Samo ovo zapažanje, koje je učinio Amper 1820. godine, dovoljno je da izvrši kretanje veće od određene nemoguće maksimalne brzine. ([Ref. 29](#)). Dokaz je veličanstveno jednostavan.

Mi ćemo zamisliti originalan eksperiment i zamisliti dve dugačke nanelektrisane šipke mase m , na rastojanju d koje se kreću u istom smeru brzinom v . Posmatrač koji se *kreće* zajedno sa šipkama zapaziće elektrostaticko odbijanje šipki, dato sa ([Izazov 32e](#))

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

pri čemu je λ nanelektrisanje po jedinici dužine šipki. Drugi posmatrač, koji je u *stanju mirovanja*, zapaziće dva efekta: elektrostaticko odbijanje i privlačenje koja je otkrio Amper.



Slika 22 Nanelektrisane šipke kreću se paralelno i prikazuju relativističku prirodu magnetizma, kao što je objašnjeno u tekstu

Drugi posmatrač prema tome zapaža (**Izazov 33e**)

$$ma_{em} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{2\lambda^2}{d} + \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\lambda^2 v^2}{d} \quad (22)$$

Zapažanje mora da bude dosledno zapažanju prvog posmatrača. To će biti ostvareno samo ako oba posmatrača zapaze odbijanje. Jednostavno se može dokazati da će drugi posmatrač videti odbijanje, kao što ga je video prvi posmatrač, samo ako je

$$v^2 < \frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0} = c^2 \quad (23)$$

Ova maksimalna brzina, brzina svetlosti c , koja ima vrednost od 0,3 GM/s, prema tome važi za sve objekte koji nose naelektrisanje. Pošto *svi* objekti u svakodnevnom životu sadrže naelektrisanja postoji prema tome maksimalna brzina materije.

Da li ste sposobni da ovaj dokaz za maksimalnu brzinu isto tako proširite i na neutralne čestice? (**Izazov 34d**). O ovoj graničnoj brzini, koja nam je već poznata, saznaćemo ubrzano više.

Drugi dokaz za magnetizam kao relativistički pojам je sledeći. U provodniku sa električnom strujom naelektrisanje je nula za posmatrača koji miruje u odnosu na provodnik: za tog posmatrača provodnik je **neutralan**. Razlog je da za tog posmatrača električni naboji ulaze i izlaze iz provodnika istovremeno. Sada zamislimo posmatrača koji leti duž provodnika. Događaji ulaska i izlaska nisu više istovremeni: provodnik je **nanelektrisan** za ovog posmatrača. (Naelektrisanje zavisi od smera kretanja posmatrača.) Sada zamislimo da je nanelektrisan i posmatrač koji se kreće. Njega će provodnik da privlači ili da ga odbija, pošto je za njega provodnik nanelektrisan. Posmatrač koji se kreće reći će da je privlačenje usled **električnog** polja provodnika. Posmatrač u stanju mirovanja takođe će primetiti privlačenje ili odbijanje posmatrača u pokretu, ali pošto je za njega provodnik neutralan, on će zaključiti da pokretno nanelektrisanje ispoljava silu – verovatno malo različite vrednosti, ali to je formalnost – usled električne struje u provodniku; posmatrač u stanju mirovanja reći će da je provodnik okružen **magnetnim** poljem koje jedino nastaje kao efekt nanelektrisanja koji se kreću.

Ukratko, električni efekti nastaju manje više od statičkih električnih naboja i zbog njihovog električnog polja; magnetizam, magnetni efekti i magnetna polja nastaju usled **kretanja** električnih naboja.¹ Postojanje magnetnog polja je relativistička posledica postojanja električnog polja. Osim toga, magnetizam **ne nastaje** usled čestica sa magnetnim nabojem. Takve čestice, koje se nazivaju magnetni jednopol, ne postoje. (Ipak, magnetni naboji se mogu uvesti kao matematički alat radi opisivanja materijla.) (**Strana 75**). Jačina magnetizma, koja se koristi u radu električnog motora, uključujući vašu električni četkicu za zube, dokazuje da je relativnost u pravu: postoji maksimalna brzina u prirodi za sve mase i za sva nanelektrisanja. I električna i magnetna polja nose energiju i količinu kretanja. Ona su samo dve strane istog novčića.

ZANIMLJIVOSTI I ZABAVNI IZAZOVI O ELEKTRIČNIM I MAGNETNIM STVARIMA

*Alii vero et facta mirati et intellecta assecuti.*²

Avgustin Hiponski (Augustine of Hippo)

Pre no što proučimo detaljno kretanje elektromagnetskog polja, našalimo se malo sa elektricitetom.

* * *

U današnje vreme pravljenje zabave sa varnicama je jako napredovalo. Teslin transformator, koji je dobio ime po Nikoli Tesli¹, najjednostavniji je uređaj koji omogućava da se kod kuće prave dugačke varnice.

¹ Elektroni u metalima kreću se brzinom od oko 1 μm/s; (**strana 179**) stoga ako se krećem istom brzinom duž kabla kroz koji protiče stalna struja, neću biti u stanju da osetim bilo kakvo magnetno polje. Šta je u ovom dokazu pogrešno? (**Izazov 35d**)

² "Drugi su, međutim, bili oduševljeni činjenicama i shvatanjem njihovog značenja" Augustin iz Hipoa, Sveti Augustin, Sermon 98, 3. (Aurelius Augustinus Hippo Regius, 354. Tagaste – 430. Hippo Regius) bio je uticajan teolog moralista. Uprkos tome, nije vodio pažnju o majci svog vanbračnog sina, jer mu je njegova majka zabranila da to čini.

Pažnja: To je veoma opasno i to je razlog da takav uređaj ne može da se kupi (skoro) bilo gde. Osnovna šema i primer prikazani su na [slici 23](#). Teslin transformator liči na veliku metalnu pečurku (da bi se izbegla neželjena pražnjenja), a nacrt za njegovu konstrukciju može da se nađe na brojnim veb stranama ili u klubovima entuzijasta, kao što je www.stefan-kluge.de/.

* * *

1722. godine Džordž Graham (George Graham) je otkrio, dok je posmatrao iglu kompasa, da magnetno polje Zemlje pokazuje odstupanja svakog dana. Možete li zamisliti zbog čega nastaju ova ova odstupanja? ([Izazov 36d](#)).

* * *

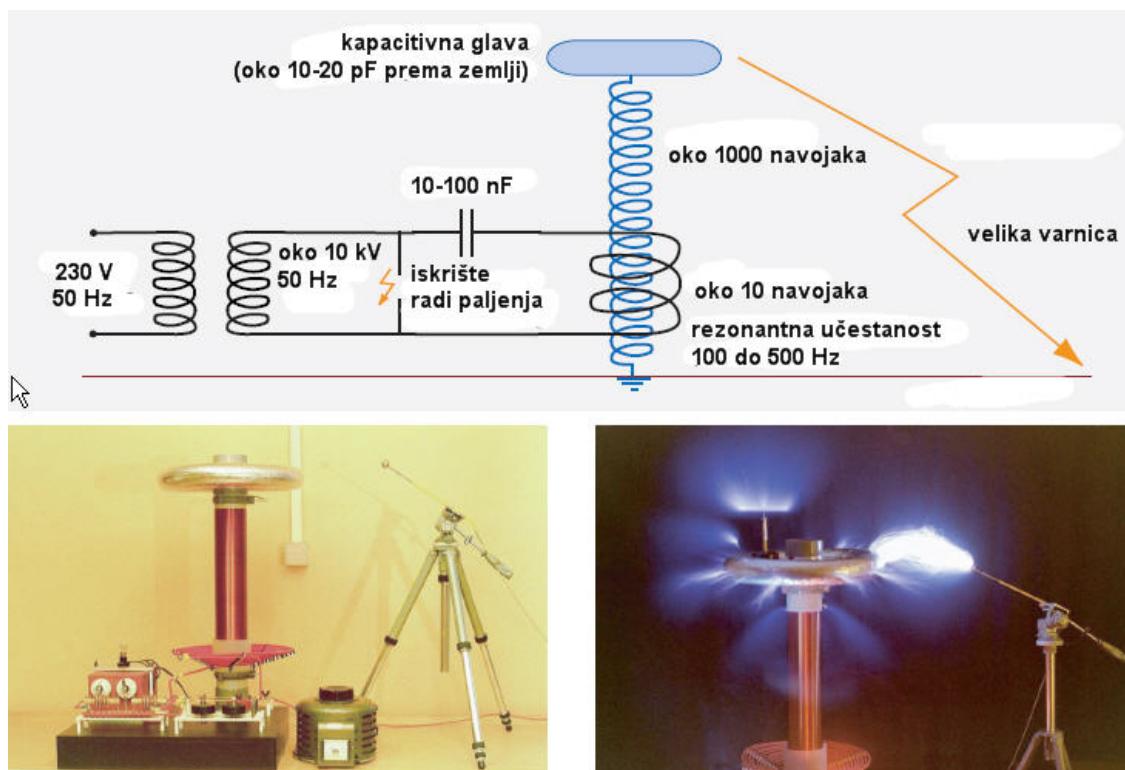
Ako je čak i kucanje na drvena vrata električni efekt, trebalo bi da smo sposobni da otkrijemo polje kada se to čini. Možete li da zamislite eksperiment kojim bi se to proverilo? ([Izazov 37d](#)).

* * *

Ptice ne bivaju povređene kada stoje na nezaštićenom električnom vodu. Pa ipak, skoro nikad nije primećena ptica na tankom provodniku visokog napona 100 kV i višeg, kojim se snaga prenosi na velika rastojanja. Zašto? ([Izazov 38s](#)).

* * *

Kako možete da razlikujete magnet od nemagnetisane metalne šipke iste veličine i od istog materijala bez korišćenja spoljnih stredstava? ([Izazov 39s](#)).



Slika 23 Šema veza, realizacija i rad Teslinog transformatora koji stvara varnice i pražnjenja u koroni (fotografije © Robert Billon).

* * *

U podrumu kuće postoje tri prekidača kojima se uključuju tri sijalice na prvom spratu. Vi ste u podrumu i dopušteno vam je da odete na prvi sprat samo jednom. Kako ćete odrediti kojim prekidačem se uključuje koja sijalica? ([Izazov 40s](#))

¹ Nikola Tesla (1856. Smiljan – 1943 New York City) bio je inženjer i pronalazač. On je pronašao i unapredio višefazni sistem naizmeničnih struja, električni motor naizmenične struje, bežičnu komunikaciju, fluorescentno osvetljenje i mnogo drugih primena elektriciteta. Isto tako jedan je od pronalazača radija. Jedinica za magnetno polje u SI sistemu dobila je naziv prema njemu. Imao je čudan karakter, njegove ideje bile su ponekad nerealne; na primer, on je zamišljao da se Teslin transformator može iskoristiti za bežičan prenos snage.

TABELA 13 Vrednosti napona zapaženih u prirodi

Opažanje	Napon
Najmanji izmereni napon	oko 10 fV
Ljudski nerv	70 mV
Voltina ćelija	1 V
Naponska ćelija ("baterija")	1,5 V
Priključnice u domaćinstvu	110 V, 127 V ili 230 V
Električna jegulja	100 do 600 V
Napajanje tramvaja	500 V
Varnica kada se trlja pulover od polimera	1 kV
Električna ograda	0,7 do 10 kV
Napajanje železnice	15 kV ili 25 kV
Svećica u automobilu	15 kV
Katodna cev kod kolor televizora	30 kV
Cev za X-zrake (Rentgen)	30 do 200 kV
Elektronski mikroskop	0,5 kV do 3 MV
Uredaj za onesposobljavanje	65 do 600 V
Udar groma	10 dp 100 MV
Rekordan napon u akceleratoru	1 TV
Maksimalno moguć napon u prirodi (ispravljen Plankov napon $1/e\sqrt{\hbar c^5/4G}$)	$6,1 \cdot 10^{27}$ V

* * *

Kako ćete povezati sijalicu na zidnu priključnicu i tri prekidača tako da osvetljenje može da se uključu svakim prekidačem a isključi bio kojim drugim prekidačem. I isto to za četiri prekidača? (**Izazov 41s**). Niko ne uzima za ozboljno fizičara koji je sposoban da napiše Maksvelove jednakosti, a ne može da reši ovaj mali problem.

* * *

Prve primene građenja da bi se proizvodila električna struja bile su velike mašine na principu trenja. Onda je 1799. Aleksandar Volta (Alessandro Volta, 1745. Como – 1827. Como) pronašao nov uređaj za proizvodnju elektriciteta i nazvao ga je *stub*; danas se negov osnovni element naziva *ćelija (naponska), primarna ćelija*¹, ili manje ispravno, *baterija*. (Tačnije rečeno baterija je skup naponskih ćelija, kao što je ona koja se nalazi u kolima. Naponske ćelije zasnivaju se na hemijskim procesima; one obezbeđuju mnogo više struje, manje su i jednostavnije se rukuje njima no elektrostatičkim mašinama. Pronalazak baterije izmenio je istraživanja elektriciteta toliko temeljno da je Volta postao poznat u celom svetu. Najzad je jednostavan i pouzdan izvor elektriciteta bio dostupan za upotrebu u eksperimentima; za razliku od mašina sa trenjem, ćelije i stubovi su kompaktni, rade u svim vremenskim uslovima i ne prave buku.

Jabuka ili krompir ili limun uz umetnut komad bakra i komad cinka najjednostavnija je moguća naponska ćelija. Ona obezbeđuje napon od oko 1 V i može da se iskoristi za napajanje digitalnih časovnika ili da proizvede klik u slušalicama. Volta je takođe otkrio zakon električnog naboja $q = C \cdot U$ za kondenzatore (pri čemu je C kapacitet, a U napon) i pronalazač je visoko osjetljivog kapacitivnog elektroskopa. Mada je bio skroman čovek, jedinica za električni potencijal, ili "napon", kako ga je Volta nazivao, izvedena je iz njegovog imena. "Baterija" je veći broj naponskih ćelija; pojam je preuzet iz ranije, čiste vojne upotrebe.² Baterija u mobilnom telefonu je samo razrađena zamena za mnogo jabuka i krompira.

* * *

Naponske ćelije postoje u biološkim ćelijama. Za halobakteriju je unutarnja naponska ćelija čak osnova preživljavanja. Pošto živi u slanoj vodi, unutarnja naponska ćelija pomaže joj da izbegne uginuće od osmoze.

* * *

¹ Sekundarna ćelija je ona koja se može dopunjavati.

² Stub načinjen od ploče cinka, komada upijajućeg papira natopljenog slanom vodom i bakarnog novčića lako se pravi kod kuće i proverava na kalkulatoru ili digitalnom časovniku. (**Izazov 42e**).



Slika 24 Čest efekt na igralištima (© Evan Keller).

* * *

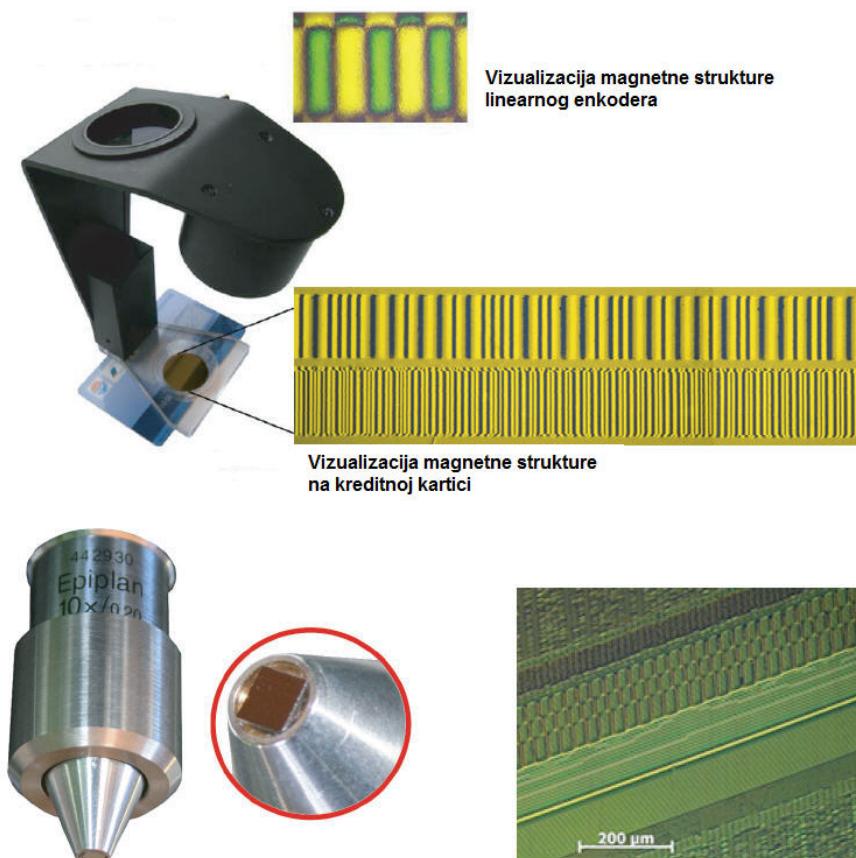
Šta se događa na **slici 24**? Zbog čega je većina takvih slika snomljeno pri lepom vremenu i sa plavokosom decom? (**Izazov 43d**).

* * *

Stoni računari i telefoni kogu da komuniciraju bez provodnika, koristeći radio talase. Zašto ovi i drugi električni uređaji nisu u mogućnosti da prime i snagu putem radio talasa, pa da se izbace vodovi za napajanje? (**Izazov 44s**).

* * *

Magnetni zapis izgleda mnogo manje zagonetno ako se učini vidljivim. Na **slici 25** prikazano je kako to može jednostavno da se uradi. Postupak takođe omogućava da se snime filmovi. Sta se događa unutar metala kada se namagnetiše? Lepi filmovi na veb sajtovima www.youtube.com/watch?v=HzxTqQ40wSU i na www.youtube.com/watch?v=LFC6tbbMUaA koje je snimio Hendryk Richert of Matesy, prikazuju kako se oblast magnećenja menja kada se magnet približi komadu metala. Ovi filmovi su snimljeni pomoću običnog mikroskopa, korišćenjem pomoći polarizatora i sloja granata fero-itrijuma raspoređenog na staklu.



Slika 25 Gore: kako izgleda informacija uskladištena u magnetnom zapisu na kreditnoj kartici bez ikakve elektronike, samo korišćenjem sočiva, polarizatora i magneto-optičkog sloja; dole: Kako izgleda informacija na tvrdom disku snimljeno na isti način, dodavanjem jednostavno prevučenog stakla na polarizacijski mikroskop (© Matesy).

* * *

Biljke takođe reaguju na magnetno polje. Osim toga, različita magnetna polja daju različite uzorke rasta. Mehanizmi, koji su povezani sa kriptohromatskim sistemima još uvek su predmet istraživanja.

* * *

Magneti se mogu upotrebiti za ubrzavanje čelične kuglice. Najpoznatiji primer je Gausova puška, koja je prikazana na *slici 26*. Ako se krajnja leva kuglica lagano gurne prema prvom magnetu, treća kuglica će takođe da bude odbačena. Potom se proces ponavlja: brzina još više poraste za petu, sedmu i devetu kuglicu. Ovaj eksperiment uvek iznenadi bilo koga ko ga gleda prvi put. Odakle nastaje količina kretanja krajnje kuglice? (*Izazov 45e*).



Slika 26 Gausova puška napravljena sa nekoliko čeličnih kuglica i četiri magneta pričvršćenih na lenjir pomoću lepljive trake (© Simon Quellen Field).

* * *

Objekti koji nemaju simetriju levo-desno nazivaju se *hiralni*, prema grčkoj reči “ruka”. Možete li da napravite ogledalo koje *neće* menjati hiralno (to jest, neće “zameniti levo desnim”) Na dva različita načina? (*Izazov 46s*).

* * *

Kotur lepljive trake je opasna naprava. Brzo povlačenje trake sa kotura stvara emisiju svetlosti (preko triboluminiscencije) i malih varnica. Sumnja se da je aktivirano više eksplozija u rudnicima kada su takve varnice zapalile eksplozivne smeše gasova.

* * *

Uzmite kovertu, pokvasite je i zlepite. Pošto ste pustili da se osuši dan ili više dana, otvorite je u mraku. Na mestu gde su dve srane papira bile razdvojene koverta svetli plavom svetlšću. Zašto? (*Izazov 47s*). Da li je moguće ubrzati proces pomoću sušača za kosu?

* * *

Na električni naboj u električnom polju deluje sila. Drugim rečima, električno polje stvara potencijalnu energiju za nanelektrisanje. Pošto je energija očuvana, električna potencijalna energija može da bude pretvorena u kinetičku i toplotnu energiju. Šta ove mogućnosti dozvoljavaju da se učini? Šta one sprečavaju? (*Izazov 48e*).

* * *

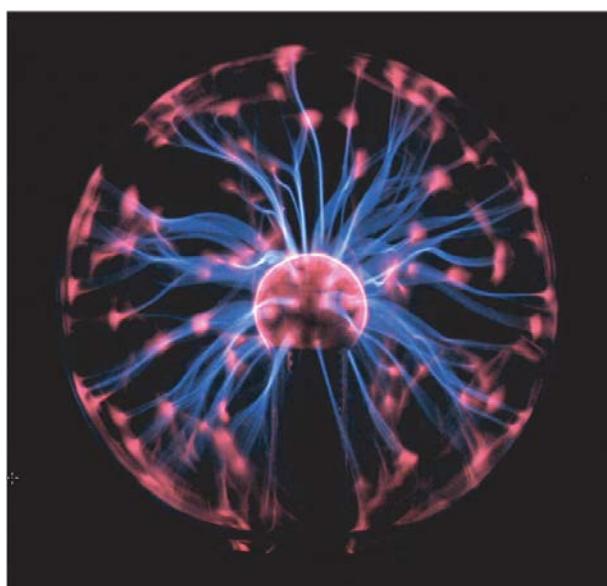


Slika 27 Opasan hobby, ovde ga prikazuje Robert Krampf (© Wikimedia).

Elektromagnetizam je pun iznenađenja i nudi mnogo efekata koji mogu da se ponove kod kuće. Internet je prepun opisa o tome kako da se konstruiše Teslin transformator radi pravljenja varnica, puške od navoja, ili puške sa šinama za gađanje objekata, elektrostatičkih mašina da vam se nakostreši kosa i mnogo više. Ako volite eksperimente, samo potražite ove članke. Neki ljudi zarađuju za život tako što prikazuju na bini efekte visikih napona, kao što je dugotrajno pražnjenje iz njihovih prstiju i kose. Dobro poznat primer je Robert Kramp, takođe poznat kao "Gospodin Elektricitet" na veb strani thehappyscientist.com. Ne ponavljajte ova izvođenja, retko se pominje da je mnogo njih doživelo opasne nesreće dok su to izvodili.

* * *

Pražnjenja koja se kreću zapažena kod mnogih objekata, poznata kao **plazma globusi**, stvaraju se u staklenoj boci ispunjenoj helijumom, neonom ili bilo kojim inertnim gasom na niskom pritisku, obično 0,1 do 10 Pa, dovedenom naponu od 5 do 10 kV i učestanosti obično 30 do 40 kHz. Pri ovim uslovima temperatura jona pri pražnjenju je sobna temperatura, tako da ne postoji opasnost; temperatura elektrona, koja ne može da se oseti, je oko 20.000 K. ([Ref. 30](#)). Približavanjem ruke lopti menja se električni potencijal, a time i oblik pražnjenja. Ako bi se približila fluorescentna cev do ove naprave, počela bi da svetli; pomeranjem prsta duž cevi mogli biste "čarobnjački" da menjate mesto gde svetli. Internet je pun informacija o plazma globusima.



Slika 28 Staklena kugla sa niskim pritiskom, ili plazma globus, prečnika oko 30 cm i ugrađenim izvorom visokog napona, prikazuje karakteristična električna pražnjenja. U uobičajenim plazma globusima pražnjenja se kreću unaokolo – lagano i nepravilno (© Philip Evans).

* * *

Električni efekti koji nastaju usled trenja ili protoka tečnosti obično su mali. Međutim, 1990-ih godina mnogi tankeri su iznenada nestali. Mornari su ispirali zidove rezervoara prskanjem morske vode iz creva. Prskanje je dovelo do nanelektrisanja rezervoara, a pražnjenje je zatim zapalilo pare ulja u rezervoaru. To je izazvalo eksploziju i kao posledicu potonuće tankera. Slične nesreće se događaju redovno kada se hemikalije pretaču iz jednog rezervoara u drugi.

* * *

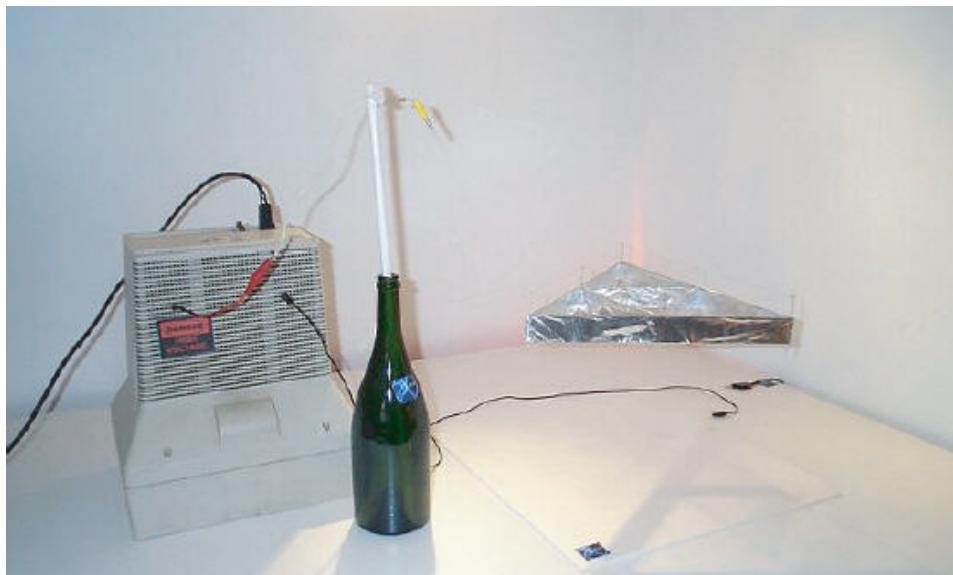
Trljanje plastične kašike komadom vunene tkanine nanelektrisaće kašiku. Ovako nanelektrisana kašika može da se upotrebni za odvajanje bibera pomešanog sa solju, tako što se kašika drži iznad mešavine. Zašto? ([Izazov 50s](#)).

* * *

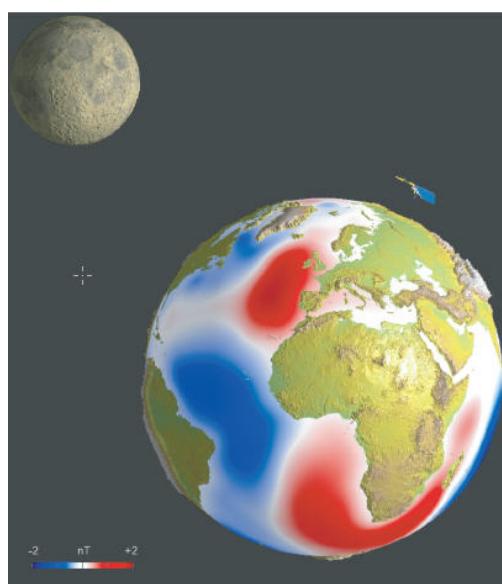
Kada se nanelektrisanja kreću ona proizvode magnetno polje. Posebno, kada se joni unutar Zemlje kreću usled provođenja topote, oni stvaraju magnetno polje Zemlje. Kada se joni podignu u atmosferu pokrenuti solarnim vjetrom, pojavljuje se geomagnetska struja, čija jačina polja može biti velika kao i samo polje Zemlje. Godine 2003. otkriven je još jedan mehanizam. Kada plime pomeraju vodu u okeanima, joni soli stvaraju slabo magnetno polje; ono može da bude izmereno pomoću magnetometara visoke osetljivosti u satelitima koji kruže oko Zemlje. Posle dve godine merenja iz malih satelita bilo je moguće da se napravi lep film o tokovima u okeanu. Na [slici 30](#) prilazaran je efekt. ([Ref. 31](#)).

* * *

Magnetno polje Zemlje jasno je pod uticajem Sunca. **Slika 31** prikazuje u detaljima kako struja nanelektrisanih čestica sa Sunca, takozvani solarni vетар, utiče na linije polja i više procesa događa se visoko u atmosferi. Detalji ovih začuđujućih procesa još uvek su predmet istraživanja.



Slika 29 Podizanje lakog objekta – prekrivenog aluminijumskom folijom – korišćenjem pražnjenja visokog napona (© Jean-Louis Naudin na veb strani inaudin.free.fr/).



Slika 30 Magnetno polje nastalo usled plima (© Stefan Maus).

* * *

Nazivi elektroda, elektrolit, jon, anoda i katoda bio je predložio Vilijam Vevel (William Whewell, 1794. Lancaster – 1866. Cambridge) na zahtv Majkla Faradeja; Faradej nije imao formalno obrazovanje i zamolio je svog prijatelja Vevela da za njega formira ove grčke reči. Za anodu i katodu Vevel je uzeo reči koje znače doslovno “ulica na gore” i “ulica na dole”. Faradej je potom popularizovao ove reči, kao i ostale reči pomenute gore.

* * *

Najkraći do sada proizveden impuls svetlosti trajao je 100 as. Koliko bi talasnih dužina zelene svetlosti odgovaralo ovome? (**Izazov 51s**).

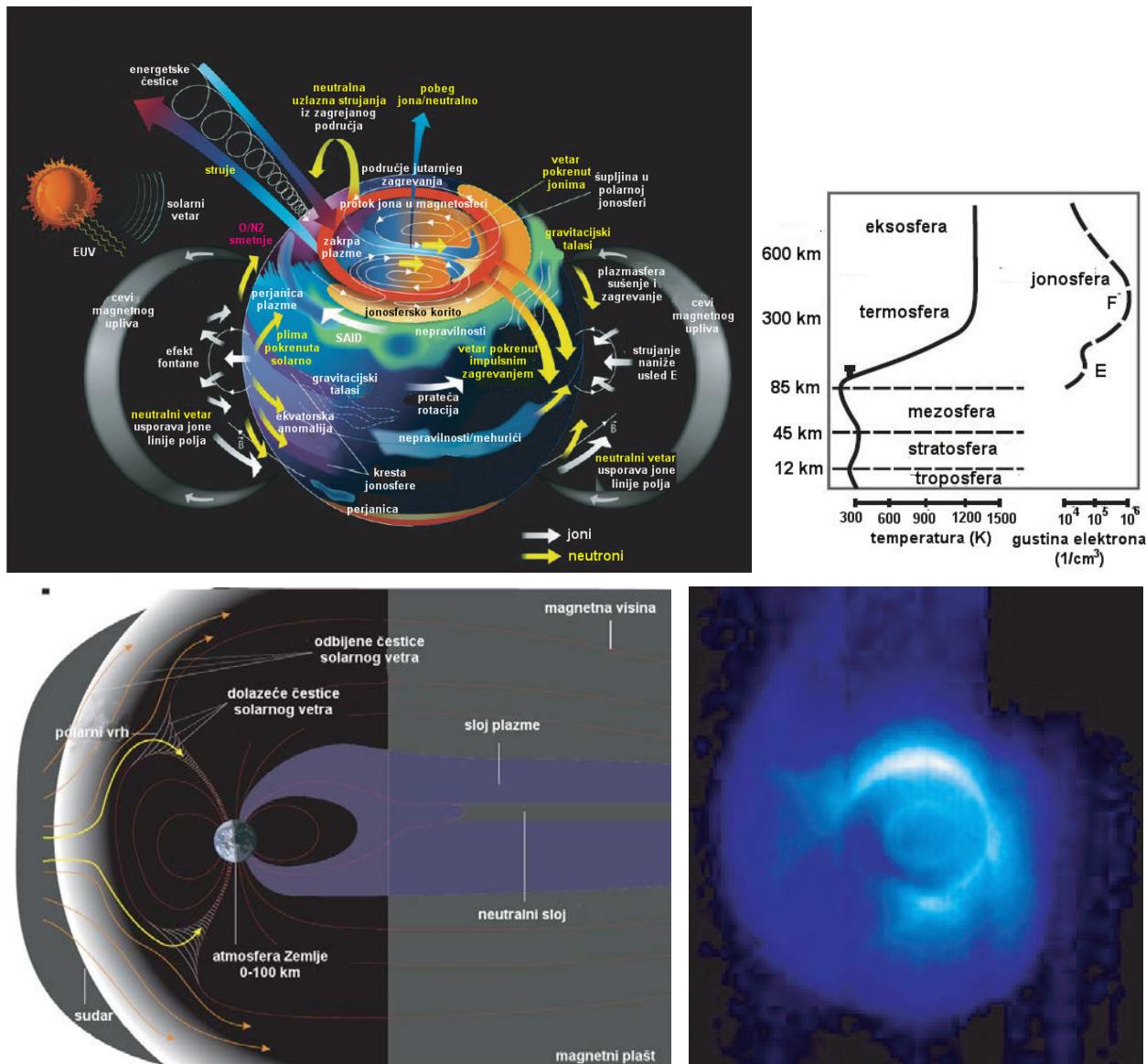
* * *

Koliko dugo može da traje baterija? Na Univerzitetu Oksford, u Klarendon holu, posetioci mogu da vide električno zvono pokretano baterijom koje zvoni od 1840. godine. Dve baterije, dva Zamboni stuba, daju

visok napon i malu struju, dovoljne da održavaju zvono u radu. Više drugih sličnih uređaja, koji koriste Zamboni stubove, radili su u Italiji sa baterijom koja je trajala preko 100 godina.

* * *

Zbog čega često vidimo senke kuća i senke drveća, ali nikada senku električnih vodova koji vise nad ulicom? (*Izazov 52s*).



Slika 31. Gore: interakcija solarnog veta i magnetnog polja Zemlje; dole: nazivi slojeva oko Zemlje i fotografija hladne plazme ili magnetosfere koja okružuje Zemlju snimljeno pri izuzeno ultra-ljubičastom i pokazuje kako je prsten u osnovi svake aurore tako i rep usmeren ka Suncu (ljubaznošću NASA)

* * *

Kako biste izmerili brzinu vrha udara groma? Koji red veličine očekujete? (*Izazov 53s*).

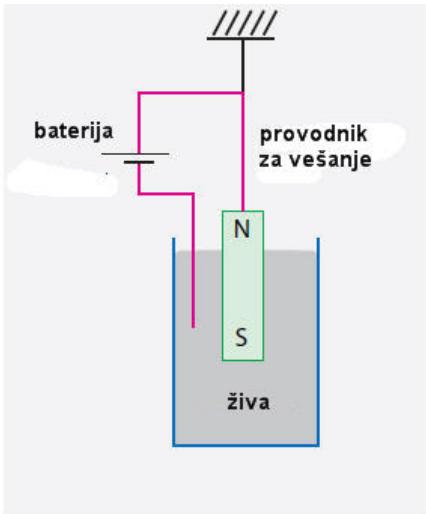
* * *

Jedan od najjednostavnijeg mogućeg električnog motora otkrio je Faradej 1831. godine. Obešen magnet i uronjen u živu počeo je da se obrće kada je kroz njega proticala struja. (*Ref. 32*). Videti *sliku 32*. Još nešto, kada je magnet prisilno obrtan, uređaj (često nazivan točak Barlova) radio je takođe kao generator struje; ljudi su nastojali da proizvedu struju u kući pomoću ovakvog sistema! Možete li da objasnite kako je to radio? (*Izazov 54s*).

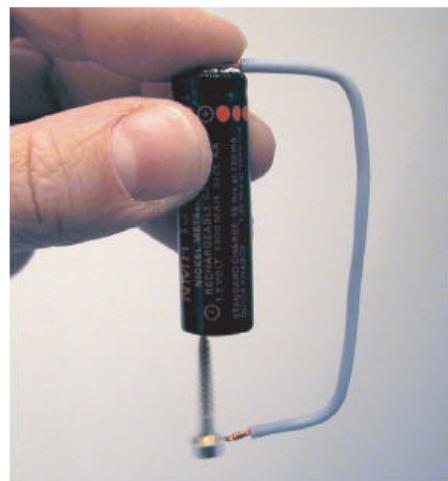
Savremena verzija ovog motora pravi se pomoću baterije, komada provodnika, provodnog magneta od Samarijum-kobalta i zavrtnja. Rezultat je prikazan na *slici 33*.

* * *

Magnetno polje Zemlje ima jačinu dipola od $7,8 \cdot 10^{22}$ Am². ([Ref. 33](#)). Ono nas štiti, zajedno sa atmosferom, od smrtonosnih čestica solarnog veta i kosmičkog zračenja, tako što ih odbija do polova. U sadašnje vreme, odsustvo magnetnog polja dovelo bi do visokog zračenja tokom sunčanih dana; ali u prošlosti to odsustvo je sprečavalo razvoj ljudske vrste. Mi dugujemo za našu egzistenciju magnetnom polju Zemlje. U sadašnje vreme magnetno polje slabi za oko 5% tokom jednog veka. Izgleda da će možda potpuno nestati za 1500 godina; Nije jasno da li će to dovesti do porasta kosmičkog zračenja koje pogađa površinu Zemlje, ili će sam solarni vетar preuzeti ovaj zaštitni efekt.



Slika 32 Unipolarni motor



Slika 33 Najjednostavniji motor (© Stefan Kluge).

Poređenje elektriciteta sa vodom dobar je način da se shvati elektronika. [Slika 34](#) pokazuje nekoliko primera koje čak mogu da koriste tinejdžeri. Možete li dopuniti sliku sa poređenjem za namotaj, pa time i za transformator? ([Izazov 55s](#))

* * *

Slike takođe obuhvataju i **tranzistor**. Ovaj element, kao što hidraulična komponenta pokazuje, može biti upotrebljen za upravljanje velikim strujama pomoću malih struja. Prema tome, tranzistori se mogu koristiti kao **prekidači** i kao **pojačavači**. To je razlog što u svim elektronskim kolima, od radija do mobilnih telefona i računara – tranzistori imaju veliku primenu. Savremen mobilni telefon ili računar obično sadrže nekoliko miliona tranzistora, uglavnom sadržanim unutar takozvanih integrisanih kola. Projektovanje ovih sastavnih delova predstavlja posebnu nauku.

Postoji čak i način da se predhodna analogija usmeri u drugi smer: moguće je napraviti matematički doslednu analogiju između električnih kola i neprekidnih polja. Potrebna kola su beskrajne rešetke ili mreže u svim smerovima prostora, i nazivaju se mimetičke diskretizacije. Ako volite da razmišljate u električnim pojmovima, možete ovo da istražujete. Potražite ove pojmove na internetu.

* * *

Jonosfera oko Zemlje ima rezonantnu učestanost od 7 Hz; iz tog razloga svaki aparat za merenje malih učestanosti uvek dobije jak signal na ovoj vrednosti. Možete li da date objašnjenje za ovu učestanost? ([Izazov 56s](#)).

* * *

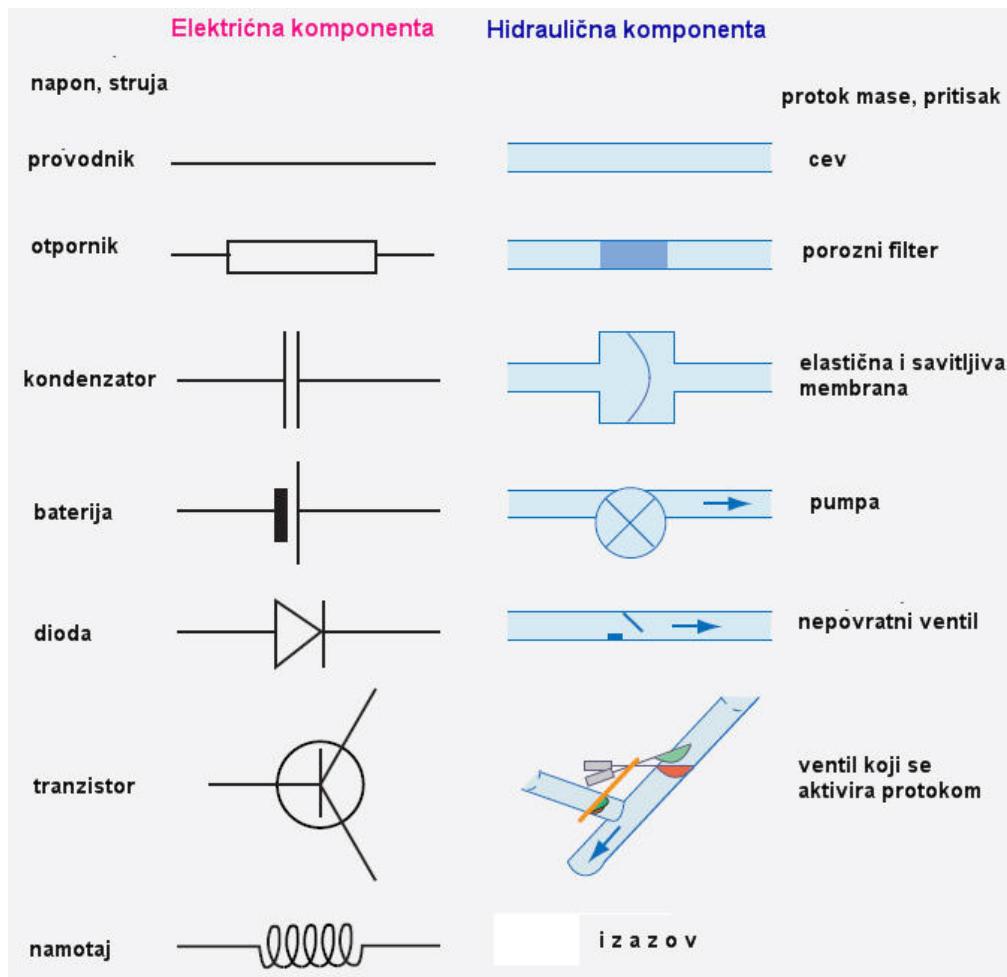
Kirlianov efekt, koji nam omogućava da pravimo jako lepe i zanimljive fotografije, nije osobina objekta, već rezultat primene promenljivog električnog polja.

* * *

U domaćinstvima se uglavnom koristi naizmenična struja. Drugim rečima, kroz vodove zapravo ne protiču elektroni; pošto je pomak elektrona u bakarnom provodniku reda $1 \mu\text{m}/\text{s}$, elektroni se samo pomeraju napred-nazad za 20 nm . ([Strana 179](#)). Iz voda ništa ne ulazi niti izlazi! Zbog čega onda električne kompanije za uzvrat traže realan protok novca, umesto da se zadovolje sa kretanjem novca ka njima i nazad? ([Izazov 57e](#)).

* * *

Da li elekroni i protoni imaju isti električni naboj? Eksperimenti pokazuju da su vrednosti jednake do najmanje dvadeset decimala. Kako biste to proverili? ([Izazov 58ny](#)).



slika 34 Sličnost elektronike i protoka vode

* * *

Vrednost nanelektrisanja nezavisna je od brzine, čak i u blizini brzine svetlosti. Kako biste to potvrdili? (*Izazov 59ny*).

* * *

Magnete mogu da koriste čak i školska deca za penjanje iz čelični zid. Pogledajte prikaz ovoga na veb strani www.physicslessons.com/TPNN.htm



Slika 35 Problem plutajućeg kreveta: dok je levi model dužine od oko 40 cm i visinom od nekoliko cm na kojoj je lebdeo, postojao i uveseljavao mnoge, verzija stvarne veličine na desnoj strani je nemoguća (© Janjaap Ruissenars na veb strani www.UniverseArchitecture.com). Dve slike na desnoj strani nisu fotografije: prikazuju san, ne realnost. Zašto?

* * *

Mogu li magneti da se primene da se napravi plutajući krevet? Godine 2006. holandski arhitekta je prikazao publici mali model lepog lebdećeg kreveta, prikazanog na levoj strani **slike 35**, kojeg su u vazduhu održavali stalni magneti. Da bi se spričilo prevrtanje modela on je bio vezan za pod pomoću četiri veze. Na svojoj veb strani taj arhitekt je nudio verziju kreveta normalne veličine po ceni od milion US dolara. Međutim, slike povećanog kreveta – jedine dve slike koje su postojale – nisu bile fotografije, već računarske grafike, pa je taj sanjani krevet nemoguć. Zašto? (**Izazov 60s**).

* * *

Magnetna polja ekstremno visokih vrednosti imaju čudne efekte. U polju od 10^{10} T vakuum postaje efektivno dvoloman, foton mogu da se rascepe i da srastu, a atomi se skupljaju. (**Strana 84**). Na primer, za atome vodonika procenjuje se da postaju dve stotine puta uži u jednom smeru. Na sreću, takvi uslovi postoje samo u posebnim neutronskim zvezdama, zvanim **magnetari**.

* * *

Omov zakon, opažanje da je skoro za sve materijale struja I srazmerna naponu U , glasi

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

i to zbog školskog učitelja, Georg Simon Om (Georg Simon Ohm, 1789. Erlangen - 1854. München), bio je učitelj u školi i fizičar. Istraživao je valjanost ove srazmernosti veoma detaljno i za više materijala; u ono vreme su takva merenja bila teško izvodljiva. Om je otkrio da se ova srazmernost može primeniti na većinu materijala i za više jačina struje, sve dok ostaju neizmenjeni temperatura, gustina materijala i gustina nanelektrisanja. Srazmernost zato ne važi u situacijama sa varnicama i u poluprovodnicima. Ali ona važi za većinu čvrstih provodnika, posebno za metale. Omova dostignuća bila su prepoznata tek kasnije tokom njegovog života, i on je konačno bio unapređen u profesora Tehničkog Univerziteta u Minhenu. Kasnije je jedinica **električnog otpora R** – a to je zvanično ime činioca srazmere između napona merenog u **voltima**, i struje, merene u **amperima** – dobila naziv po njemu. Jedan **ohm** je određen kao $1 \text{ V/A} = 1 \Omega$.

U današnje vreme jednostavno je merenje Omovog odnosa. Od nedavno može da se izmeri čak električna otpornost jednog atoma: u slučaju ksenona to je oko $10^5 \Omega$. (**Ref. 34**). Isto tako je nađeno da atomi olova imaju deset puta veću provodnost nego atomi zlata. Možete li zamisliti zbog čega? (**Izazov 61ny**).

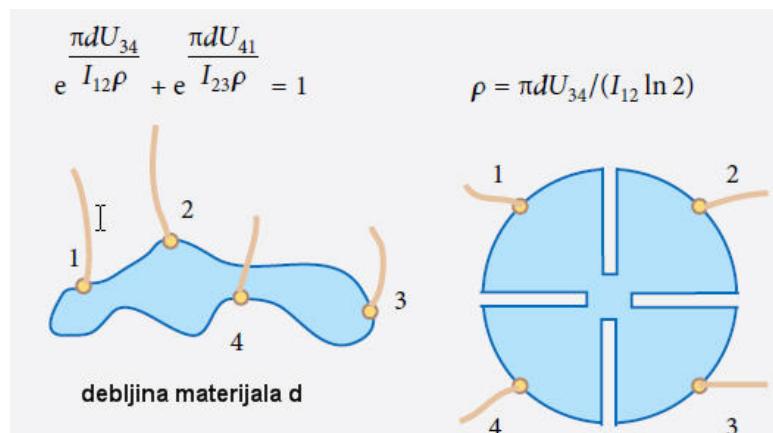
* * *

Već više desetina godina Omov zakon se uči u srednjim školama sve dok svaki učenik u razredu ne izgubi interes za ovu materiju. Na primer, električna snaga P koja se u otporniku pretvara u toplotu data je sa

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

Ovaj obrazac smo već pomenuli; pogledajte. (**Vol. I, strana 273**). Sada znate sve što treba da znate o ovom pojmu. Pre svega, izraz za električnu snagu, koja u otporniku opisuje električno grejanje, na primer grejanje u štednjaku savremenih kuhinja ili automatu za kafu.

* * *



Slika 36 Možete li da zaklučite obrazac Van der Pau za specifičnu otpornost ρ za homogene slojeve bilo kakvog oblika (levo) ili za simetričan oblik (desno)?

* * *

Omov zakon, koji tako jednostavno izgleda, ima mnoge začuđujuće matematičke aspekte. Na primer, 1958. godine holandski fizičar J. L van der Pau (Pauw) uveo je začuđujući obrazac i postupak koji omogućava merenje specifične otpornosti ρ za slojeve materijala **bilo kakvog** oblika. Potrebno je samo da se vežu četiri zlatna provodnika na sloj bilo gde na njegovom obimu. Specifična otpornost je potom data izrazom prikazanim na *slici 36*. Možete li zamisliti kako se došlo do obrasca? (*Izazov 62d*). (To nije jednostavan problem.) Obrazac je značajno smanjio radne napore u laboratorijama širom sveta; pre no što je ovaj obrazac otkriven, u svakom eksperimentu su istraživači morali da naprave izdvojen poseban uzorak koji je omogućavao merenje specifične otpornosti materijala kojeg su ispitivali.

* * *

Dobar način da se zaradi novac je da se proizvodi električna struja i da se prodaje. Godine 1964. Flečer Osterle (Fletcher Osterle) izmislio je potpuno nov način. Princip je prikazao mnogobrojnoj publici u lepom eksperimentu 2003. godine. (*Ref. 35*). Lari Kostiuk i njegova grupa uzeli su staklenu ploču, na obe strane naneli provodni sloj, a onda urezali nekoliko stotina hiljada malih kanala duž ploče: 450.000 mikrokanala, svaki prečnika oko 15 μm urezali su u ploču prečnika 2 cm. Kada se pusti voda da teče kroz kanale, proizvodi se struja. Kontakti na dve provodne ploče mogu da se koriste kao kontakti baterije i proizvode 1,5 μA električne struje.

Ova jednostavna naprava koristi efekt pošto se staklo, kao i većina izolatora, prekriva slojem električnog naboja kada se uroni u tečnost. Možete li da zamislite zbog čega se proizvodi struja? (*Izazov 63s*). Nažalost, efikasnost proizvodnje elektriciteta od samo 1% čini ovaj način mnogo manje interesantnim od pokretanja generatora propelerom.

* * *

Za lepe prikaze o magnetnim i električnim poljima, pogledati veb stranu web.mit.edu/8.02t/www/802_TEAL3D/visualizations

* * *

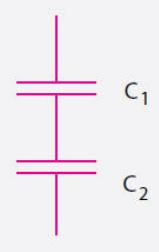
Elektrostatika je ponekad suprotna od onoga što se očekuje. Uzmite izolovani provodnu loptu poluprečnika R i tačkasti električni naboј koji se nalazi izvan lopte, oboje sa istim nanelektrisanjem. Iako se nanelektrisanja istog znaka odbijaju, na malom rastojanju od lopte, lopta će privući tačkasti električni naboј. Zašto? Na kojem rastojanju d će biti odbijen? (*Izazov 64s*).

* * *

Poluprovodnik galijumarsenid može da se uzorkuje sa takozvanim kvantnim tačkama i tačkastim kontaktima. Ovakva struktura omogućava da se prebroje pojedinačni elektroni. Ovo se sada rutinski radi u mnogim laboratorijama širom sveta.

* * *

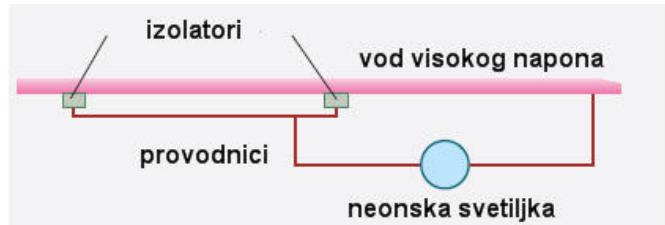
Električni naboјi dva kondenzatora vezana redno obično nisu jednaki, kao što bi naivna očekivanje predpostavilo. (*Ref. 36*). Za idealne kondenzatore, bez provođenja, odnos napona je obrnuto сразмерan kapacitetima, to jest $V_1/V_2 = C_2/C_1$, zbog jednakosti električnih naboјa kojima su napunjeni. Ovo lako može da se zaključi sa *slike 37*. Međutim, u praksi ovo je tačno samo za vreme između nekoliko minuta i nekoliko desetina minuta. Zašto? (*Izazov 65s*).



Slika 37 Dva kondenzatora u rednoj vezi

* * *

Na nekim nadzemnim vodovima visokog napona, kada su postavljeni u prirodi, kada protiče struja svetle male neonske svetiljke, nazvane **balisori**, kao što je prikazano na *slici 38*. Možete da ih vidite ako putujete vozom od Pariza na aerodrom Roissy. Kako to radi? (*Izazov 66s*).



Slika 38 Neonska svetiljka na vodu visokog napona.

* * *

Za vreme kiše, ili u magli, nadzemni vodovi visokog napona često proizvode zvukove; ponekad čak i pevaju. Šta se tu događa? (Izazov 67s).

* * *

Električna polarizacija svojstvo je materije odgovorno za skretanje mlaza vode iz slavine kada mu se prinese nanelektrisan češljaj. (Strana 17). To je određeno kao jačina električnog dipola indukovanih od strane promjenjenog električnog polja. Odrednica jednostavno objašnjava opažanja da mnogi objekti dobijaju nanelektrisanje kada se dovedu u električno polje. Uzgredno, kako tačno češljevi postaju nanelektrisani kada se trljaju, pojавa nazvana **nanelektsanost**, još uvek je misterija savremene nauke.

* * *

Čisto magnetno polje ne može da se pretvori u čisto električno polje promenom posmatranog sistema. Najbolje što se može postići je stanje slično jednakoj mešavini magnetnih i električnih polja. Možete li dati dokaz koji bi rasvetlio ovaj odnos? (Izazov 68s).

* * *

Izračunavanje otpora beskrajne mreže jedan je od najzadivljujućih problema u elektrotehnici, kao što je prikazano na *slici 39*. Možete li nači rešenje? (Izazov 69ny).

* * *



Slika 39 Problem iz elektrotehnike koji nije jednostavan (© Randall Munroe).

* * *

Za svaku graničnu vrednost u prirodi postoji odgovarajuća jednakost neodređenosti. Ovo važi takođe i za elektricitet i donju granicu nanelektrisanja. Zaista, postoji obrazac neodređenosti za kondenzatore, u obliku

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

gde je e električni naboj pozitrona, C kapacitet i U napon ili potencijalna razlika. Postoji takođe još jedan obrazac neodređenosti između električne struje I i vremena t :

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

Oba ova obrasca mogu se nači u literaturi. (Ref. 37).

* * *

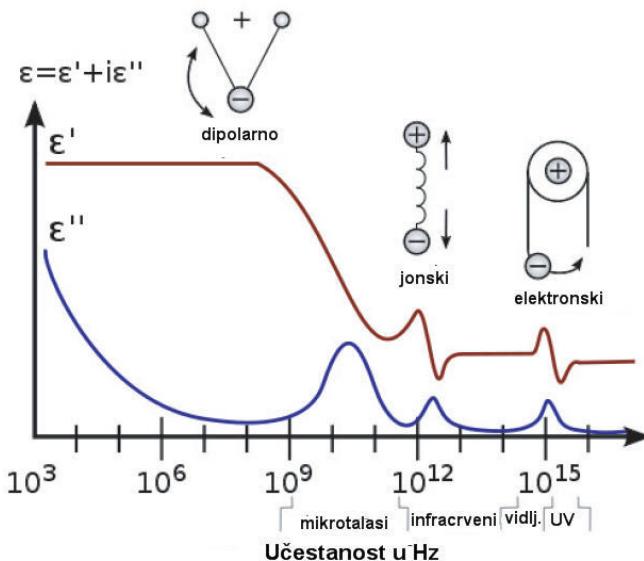
Električne osobine materijala, nasuprot njihovim magnetnim osobinama, jako menjaju učestanost primjenjene električne polje. Na **slici 40** prikazano je kako učestanost menja provodnost, i koji mikroskopski efekti su na određenoj učestanosti osnova svojstva. Kriva je samo šematska: prikazuje osobine objedinjenih različitih materijala. U prirodi su realan i imaginarni deo provodnosti povezani preko takozvanog **Kramers-Kroning odnosa**, koji je važan za mnoge teme za materijale povezane sa fenomenom talasa. Dve krive na slici ne prate u potpunosti taj odnos.

* * *

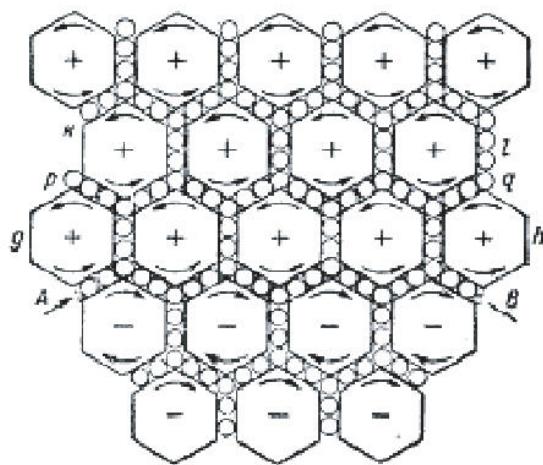
Ako se osovina obrće, na njen kraj može da se pričvrsti magnet. Uz takav magnet koji se obrće može da se napravi jeftin tahometar. Kako? (**Izazov 70e**).

* * *

U Maksvelovom radu iz elektromagnetizma iz 1861. godine, on je uključio model magnetnog i električnog polja u vakuumu, **slika 41**. Koji je najveći problem u ovom modelu vakuma? (**Izazov 71s**)



Slika 40. Promena relativne provodnosti (realan i imaginarni deo) uz promenu učestanosti za izmišljeni materijal (mešavina od više materijala) i opšti procesi koji su odgovorni za različite opsege učestanosti (© Kenneth Mauritz).



Slika 41 Maksvelov neuspešan model vakuma.

* * *

Koliko dugo mogu integrisana kola na bazi silicijuma da se izrađuju sva manja i manja? Mišljenja po ovom pitanju su različita. (**Ref. 38**). Optimistička predviđanja, često nazivana Murov zakon, menjaju se uz predviđanja da od 2011. godine nadalje, smanjenje veličine biće usporeno usled visokih cena potrebne opreme. Na primer, sledeća generacija "wafer steppers", najskuplje mašine za izradu silicijumskih čipova moraće da radi pod izuzetnim ultraljubičastim svetlom – obično 13 nm – kako bi se postigla mala veličina

tranzistora. Na toj talasnoj dužini vazduh je apsorber, a sočiva moraju da budu zamenjena ogledalima. Ostaje nejasno da li će to biti tehnički i ekonomski opravdano. Budućnost ima krajnju reč.

* * *

Godine 1990. slika na mikroskopu je pokazala, na iznenadenje, da su kljove narvala pune završetaka nerava. Prema tome, kljove moraju biti organ čula. Međutim, detalji i stvarna upotreba ovog organa još uvek nije shvaćena. Kako biste vi to odredili? (**Izazov 72s**)

ZAKLJUČAK: TRI OSNOVNE ČINJENICE O ELEKTRICITETU

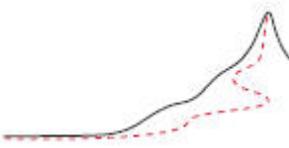
Eksperimenti koje smo do sada opisali pokazuju tri osnovna rezultata:

- Električni naboji deluju silom na druge elektične naboje.
- Električni naboji su očuvani,
- Električni naboji, slično kao i materija, kreću se sporije od svetlosti.

Iz ova tri iskaza – odrednice električnog naboja, očuvanja i invarijante brzine svetlosti – može da se izvede svaki aspekt klasične elektrodinamike. (**Ref. 39**). Posebno, lagranžijan elektrodinamike i Maksvelove jednakosti polja mogu da se izvedu iz ova tri iskaza; oni opisuju način na koji električni naboji stvaraju bilo koje električno, magnetno ili elektromagnetno polje. Isto tako može da se izvede Lorencova sila, koja opisuje u kakvoj su vezi kretanje električnih naboja sa masom i kretanje elektromagnetskih polja.

Dokaz o povezanosti između očuvanja električnog naboja i jednakosti polja može da se prikaže matematički; mi ga nećemo ovde prikazati, pošto je tu na neki način obuhvaćena algebra. (**Ref. 39**). Osnovna povezanost koju treba imati na umu: sve u elektrodinamici sledi iz osobina električnog naboja koje smo do sada razmatrali. (**Ref. 40**).





Poglavlje 2

OPIS RAZVOJA ELEKTROMAGNETNOG POLJA

Električna i magnetna polja se menjaju: jednostavno rečeno, ona se kreću. Kako se ustvari to događa? Džejms Klerk Maksvel (James Clerk Maxwell)¹ je 1860. godine prikupio je sva poznata znanja iz eksperimenata koja je mogao da nađe i izveo precizan opis kretanja elektromagnetskog polja. Dvadeset godina kasnije, Hevisajd (Heaviside) i Herc (Herz) izdvojili su glavne tačke Maksvelovih ideja iz njegovih teško čitljivih dokumenata pisanih neobičnim kvaternionskim beleženjem, i nazvali svoje zaključke **Maksvelova teorija elektromagnetskih polja** (**Vol. IV, strana 179**). Kretanje elektromagnetskog polja je opisano skupom jednakosti razvoja. U relativističkom opisu ovaj skup ima **dve** jednakosti, u nerelativističkom slučaju ima ih **četiri**. Sva posmatranja u klasičnoj elektrodinamici slede ove jednakosti. Zapravo, ako se kvantni efekti uzmu u obzir na pravilan način, opisani su **svi** elktromagnetni efekti u prirodi.

PRVA MAKSVELOVA JEDNAKOST ELEKTRODINAMIKE POLJA

Prva relativistička jednakost polja elektrodinamike je precizan iskaz da elektromagnetna polja **potiču od električnih naboja** i ni od čega drugog. Ona može da se napiše²

$$\begin{aligned} d\mathbf{F} &= j\mu_0 \quad \text{ili ekvivalentno} \\ \nabla \mathbf{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \text{i} \quad \nabla \times \mathbf{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \mu_0 j \end{aligned} \quad (28)$$

Svaki od ova dva ekvivalentna načina³ da se napiše prva Maksvelova jednakost daje jednostavan iskaz:

➤ **Električni naboji nose elektromagnetno polje.** Oni ga nose zajedno sa sobom.

Na primer, ova prva jednakost opisuje kako nanelektrisani objekti privlače prašinu kao i delovanje elektromagneta.

Ova prva jednakost polja je ekvivalentna sa tri osnovna posmatranja prikazana na **slici 42**: Kulonov zakon, Amperov zakon i način kako promena električnog polja stvara magnetski efekt. Još preciznije, ako znamo gde su električni naboji i kako se oni kreću, možemo da odredimo elektromagnetsko polje \mathbf{F} koje oni stvaraju. **Statički električni naboji**, opisana gustom ρ , stvaraju **elektrostatičko** polje, a električni naboji koji se kreću, opisani 3-strujnom gustom j , stvaraju mešavinu električnog i magnetnog polja. **Stacionarne struje** stvaraju **magnetostatička** polja. Uopšteno, električni naboji koji se kreću stvaraju pokretna polja.

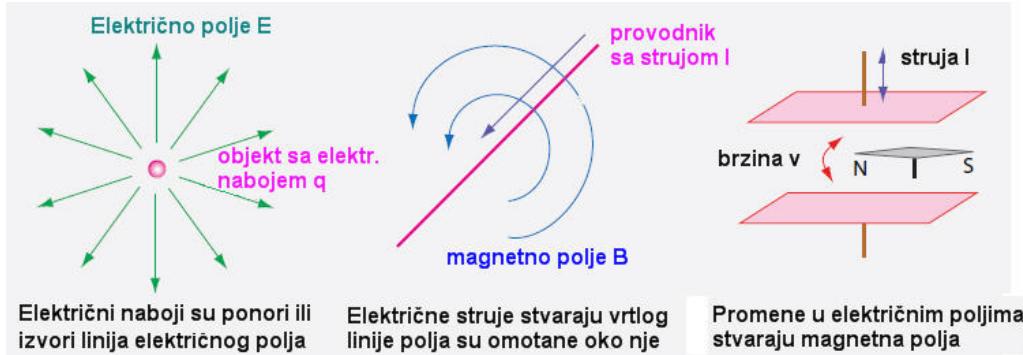
¹ Džejms Klerk Maksvel (James Clerk Maxwell, 1831. Edinburgh – 1879. Cambridge) bio je važan i uticajan fizičar. On je zanovao elektromagnetizam tako što je objedinio elektricitet i magnetizam teoretski, kao što će biti objašnjeno u ovom poglavlju. Radio je i na termodinamičkim oblicima, drugom stubu njegovih aktivnosti. Osim toga, proučavao je teoretski boje i razvio trougao boja; bio je jedan od prvih ljudi koji je izradio fotografiju u boji. Mnogi smatraju da je bio najveći fizičar svih vremena. I "Klerk" i "Maksvel" bila su njegova prezimena.

² Postoji izvesna sloboda u pisanju ove jednakosti, pošto različiti autori primenjuju različite kombinacije za konstante c i μ_0 u odrenicama za veličine F , A i j . Ova koja je data ovde predstavlja opštu verziju. Jednakost može da se uopšti u sličajevima kada električni naboji nisu okruženi vakuumom, već se nalaze unutar materije. Nećemo istraživati takve situacije tokom našeg hodanja, pošto, kako ćemo otkriti kasnije, naizgled poseban slučaj vakuuma zapravo opisuje sve u prirodi.

³ U komponentnom obliku prva jednakost može da se napiše kao

$$d_\mu \mathbf{F}^\mu = j^\nu \mu_0 = (\rho c, j) \mu_0 = (\rho_0 \gamma c, \rho_0 \gamma v) \mu_0 \quad \text{ili} \\ \left(\frac{\partial_t}{c}, \partial_x, \partial_y, \partial_z \right) \begin{pmatrix} 0 & -E_x/c & -E_y/c & -E_z/c \\ E_x/c & 0 & -B_z & B_y \\ E_y/c & B_z & 0 & -B_x \\ E_z/c & -B_y & B_x & 0 \end{pmatrix} = \mu_0 (\rho c, j) \quad (29)$$

Prva jednakost polja sadrži takođe pravilo desne ruke za magnetno polje u okolini provodnika prema pravilu vektorskog proizvoda. (**Izazov 73e**). I kao što je već bilo pomenuto, jednakost takođe izražava još jasnije u poslednjem obliku, da promena električnih polja proizvodi magnetna polja. Ovaj efekt je bitan na primarnoj strani transformatora. Mali činilac $1/c^2$ podrazumeava da je ovaj efekt mali, pa je potreban *veliki* broj navojaka ili *jaka* električna struja da bi se proizveo ili primetio ovaj efekt.



Slika 42 Prva od Maksvelovih jednakosti polja elektrodinamike prikazana sa tri crteža

DRUGA MAKSELOVA JEDNAKOST ELEKTRODINAMIKE POLJA

Druga Maksvelova jednakost polja, prikazana na *slici 43*, izražava zapažanje da u prirodi **nema** magnetnih naboja, to jest da magnetna polja nemaju izvor. Kao rezultat toga, jednakost takođe daje precizan opis kako se od promenljivih magnetnih polja stvaraju električna polja i obrnuto. Druga Maksvelova jednakost elektrodinamike može da se napiše

$$\begin{aligned} d^* \mathbf{F} = 0 & \quad \text{pri čemu je} \quad {}^* \mathbf{F}^{\rho\sigma} = \frac{1}{2} \epsilon^{\rho\sigma\mu\nu} \mathbf{F}_{\mu\nu} \quad \text{ili ekvivalentno} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 & \quad \text{i} \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \end{aligned} \quad (30)$$

Druga jednakost polja¹ prema tome izražava **nepostojanje izvora za tenzor dvojnog polja F** . Drugim rečima

➤ *U prirodi ne postoje magnetni naboji, odnosno magnetni jednopoly.*

Ne postoje izvori za magnetna polja. Druga jednakost polja prema tome izražava da ako se na bilo koji način preseče magnet koji ima severni i južni pol, uvek se dobijaju delovi sa dva pola, a nikada deo sa samo jednim polom.

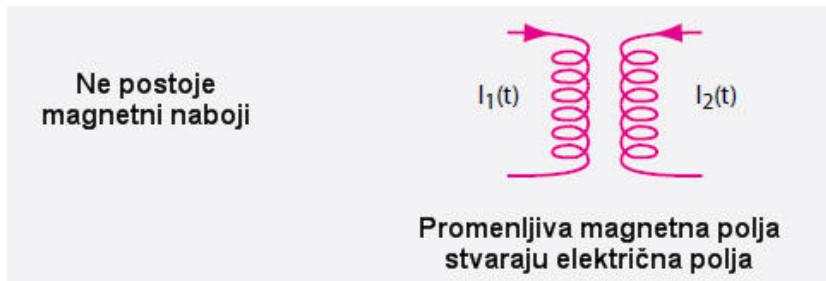
Pošto ne postoje magnetni naboji, linije magnetnog polja **nemaju ni početak ni kraj**; ne samo linije magnetnog polja koje je stvoreno od električnih naboja, već sve linije magnetnog polja nemaju ni početak ni kraj. Na primer, linije polja nastavljaju se i unutar magneta. Nepostojanje početaka i krajeva je matematički izraženo iskazom da **magneti upliv** kroz zatvorenu površinu S – kao što je lopta ili kocka – **uvek nestaje**: $\int_S \mathbf{B} dA = 0$. Drugim rečima, sve linije polja koje uđu u zatvorenu zapreminu takođe izadu iz nje.²

¹ U komponentnom obliku druga jednakost može da se napiše kao

$$d_\mu {}^* \mathbf{F}^{\mu\nu} = 0 \quad \text{ili} \\ \left(\frac{\partial}{c}, \partial_x, \partial_y, \partial_z \right) \begin{pmatrix} 0 & -B_x & -B_y & -B_z \\ B_x & 0 & E_z/c & -E_y/c \\ B_y & -E_z/c & 0 & E_x/c \\ B_z & E_y/c & -E_x/c & 0 \end{pmatrix} = (0, 0, 0, 0) \quad \text{ili} \\ \epsilon^{\sigma\mu\nu\rho} \partial_\mu F_{\nu\rho} = 0 \quad \text{ili} \quad \partial_\mu F_{\nu\rho} + \partial_\nu F_{\rho\mu} + \partial_\rho F_{\mu\nu} = 0 \quad (31)$$

Zapažamo da dvojni tenzor ${}^* \mathbf{F}$ proistiće iz tenzora polja \mathbf{F} ako se izvrše zamene E/c sa B i B sa $-E/c$. Ovo je takozvana **dvojna transformacija**. Više o tome u tekstu koji sledi. (**Strana 72**)

² Nasuprot onome što se često kaže ili piše u knigama o fizici, linije magnetnog polja uglavnom nisu zatvorene linije; one nisu uglavnom ni petlje ni vrtložne linije. (**Ref. 41**). Zatvorene linije magnetnog polja pojavljaju se samo kod pravolinjskih provodnika; one nisu čak ni petlje kod prostih helikoidalnih namotaja; u svim uobičajenim neakademskim situacijama linije počinju i završavaju se u beskraju prostora. .



Slika 43 Prikaz druge Maksvelove jednakosti polja elektrodinamike

Osim toga, druga Maksvelova jednakost polja kazuje

➤ *Promene u magnetnim poljima proizvode električna polja.*

Ovaj efekt se koristi na sekundarnoj strani transformatora i u dinamima. Unakrsni proizvod u izrazu podrazumeva da električno polje stvoreno na ovaj način – nazvano takođe **elektromotorno polje** – nema ni početnu ni krajnju tačku. Linije elektromotornog polja zato mogu da se kreću u krugovima: u većini praktičnih slučajeva one se kreću duž električnog kola. Ukratko, električno polje može da ima vrtloge (slično magnetnom polju), ali samo ako postoji promenljivo magnetno polje. Predznak minus je bitan da bi se obezbedilo očuvanje energije (Zašto?) (**Izazov 74ny**) a ima i posebno ime: **Lencovo pravilo**.

U praksi, Makvelova druga jednakost polja uvek treba da se koristi zajedno sa prvom. Možete li sagledate zbog čega? (**Izazov 75ny**).

VALJANOST I SUŠTINA MAKSELLOVIH JEDNAKOSTI POLJA

U predhodnom tekstu videli smo da Lorencova jednakost razvoja

$$m\mathbf{b} = q\mathbf{F}\mathbf{u} \quad \text{ili}$$

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

opisuje kako se nanelektrisanja kreću obzirom na kretanje polja. Zajedno sa Lorencovom jednakostu razvoja, dve jednakosti razvoja Maksvela (28) i (30) opisuju sve elektromagnetske pojave u svakodnevnim razmerama, od mobilnih telefona, akumulatora u automobilima do računara, lasera, osvetljenja, holograma i duge. Drugim rečima, ovi opisi elektromagnetskih polja potpuni su u svakodnevnom životu. Nisu obuhvaćeni samo kvantni efekti i zakrivljeno prostor-vreme.

Maksvelove jednakosti izgledaju jako složeno. Ali ne treba da zaboravimo da one sadrže samo četiri osnovne ideje:

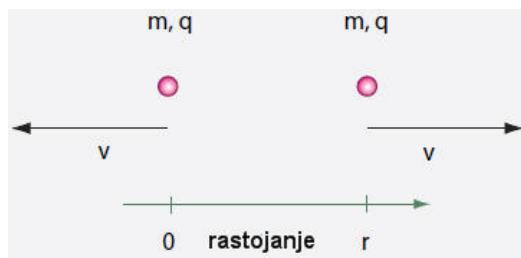
1. Električni naboji poštuju Kulonov zakon.
2. Električni naboji se kreću sporije od svetlosti.
3. Električni naboji su očuvani
4. Magnetni naboji ne postoje.

Ukoliko želimo da to uprostimo, Maksvelove jednakosti samo su relativističko izražavanje Kulonovog zakona. Ustvari, kao što smo ranije već videli, Maksvelovi zakoni potiču iz samog očuvanja električnog naboja. (**Ref. 39**).

Mi ćemo da proučavamo mnoge primene jednakosti polja. Istina, obim primena je širok: savremena medicina, transport, telekomunikacije, računari, mnoga zanimanja i mnoge zabave koje zavise od elektriciteta. Međutim, ove teme ćemo ostaviti na stranu i da nastavimo direktno prema našoj pomoći za razumevanje povezanosti elektromagnetskih polja, svakodnevnih kretanja i kretanja svetlosti. Zapravo, elektromagnetska polja imaju jednu važnu osobinu koju smo spomenuli već na početku: sama polja mogu da se kreću. Posebno, ova polja mogu da nose energiju, linearnu količinu kretanja i moment količine kretanja.

SUDAR NAELEKTRISANIH ČESTICA

Elektromagnetna polja se kreću. Jednostavan eksperiment pojašnjava značenje kretanja polja: Ako se dve nanelektrisane čestice sudare, njihova ukupna količina kretanja neće biti očuvana. Hajde da to proverimo.



Slika 44 Nanelektrisane čestice posle sudara

Zamislite dve čestice jednakih masa i jednakih nanelektrisanja neposredno posle sudara, kada se udaljavaju jedna od druge. Situacija je prikazana na *slici 44*. Isto tako zamislite da su te dve mase velike, tako da je ubrzanje usled njihovog električnog odbijanja malo. Za posmatrača u centru gravitacije dve čestice, na svaku česticu deluje ubrzanje usled električnog polja one druge. Ovo električno polje E dato je takozvanim *obrascem Hevisajda* (*Izazov 76ny*)

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

Drugim rečima, za ovog posmatrača ukupan sistem ima ukupnu količinu kretanja koja nestaje. Zamislite drugog posmatrača koji se kreće brzinom v u odnosu na prvog, tako da mu je prva nanelektrisana čestica u stanju mirovanja. Izraz (33) dovodi do dve *različite* vrednosti za električna polja, po jednu za položaj svake čestice. (*Ref. 42*). Drugim rečima, sistem od dve čestice nije u inercijskom kretanju, kao što se moglo očekivati; ukupna količina kretanja za ovog posmatrača nije očuvana. Količina kretanja koja nedostaje je mala, ali gde je nestala? (*Izazov 77s*). Ovo je prvi iznenadujući efekt koji je čak stavljen u teoremu Van Dama i Vignera. (*Ref. 43*). Oni su pokazali da za sistem čestica u interakciji na rastojanju, ukupna energija-količina kretanja čestica ne može da ostane stalna u svim inercijskim sistemima.

Ukupna količina kretanja sistema očuvana je samo zbog toga što:

- Elektromagnetno polje samo po sebi takođe nosi izvesnu količinu kretanja.

Ukratko, u eksperimentu je količina kretanja očuvana, ali jedan njen deo nosi polje. Precizna vrednost zavisi od posmatrača.

Dve nanelektrisane čestice u sudaru stoga pokazuju da elektromagnetna polja imaju količinu kretanja. Ako elektromagnetna polja imaju količinu kretanja, tada imaju sposobnost da *udare* u objekte i da objekti mogu da udare u njih. Kao što ćemo videti u daljem tekstu, svetlost predstavlja takođe elektromagnetno polje. Obe predpostavke su tačne, a neki eksperimenti će biti ubrzo prikazani. (*Strana 93*).

Zaključujemo da svaka vrsta polja koja dovodi do interakcije čestica mora da nosi i energiju i količinu kretanja, kao dokaz koji se primenjuje u svim takvim slučajima. Posebno se to odnosi na nuklearne interakcije. U stvari, u kvantnom delu naše avanture čak ćemo pronaći i dodatni rezultat: sva polja su sama po sebi sačinjena od čestica. Energija i količina kretanja polja tada postaju očigledno stanje stvari. Ukratko, to čini razumnim kada se kaže da se elektromagnetna polja kreću, pošto ona nose energiju i količinu kretanja.

ŠTA JE DODIR?

Istraživanje sudara, zajedno sa rezultatom da se materija sastoji od nanelektrisanih čestica, dopuštaju nam da zaključimo:

- Dodir u svakodnevnom životu je razmena elektromagnetnih polja.

Osim toga, mi smo naučili da stvarni dodir u svakodnevnom životu ne postoji.

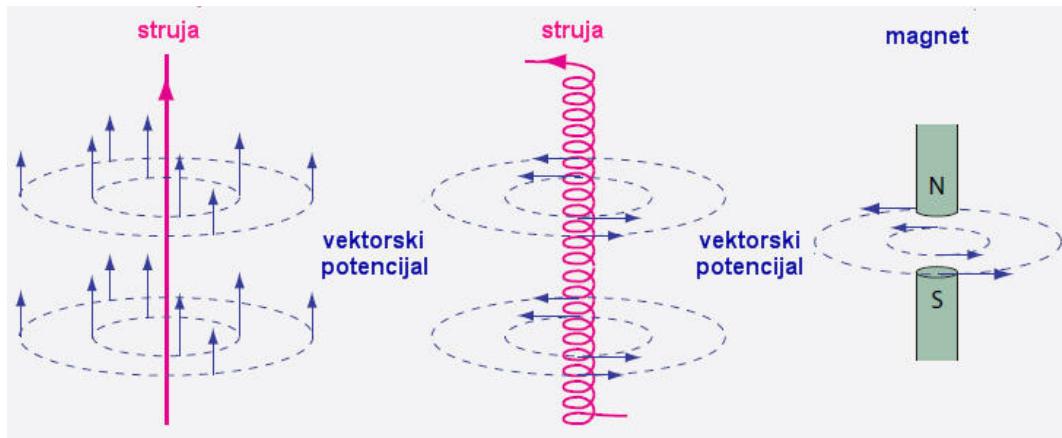
- U svakodnevnom dodiru *ništa zapravo ne dodiruje* bilo šta drugo.

Mi smo zakopali snove koji su vekovima vodili mislioce: svet nije mehanički. Svi procesi oko nas su ili električni ili gravitacijski.

MERNO POLJE – ELEKTROMAGNETNI VEKTORSKI POTENCIJAL¹

Proučavanje kretanja polja naziva se **teorija polja** i elektrodinamika je prvi primer. (Ostali klasični primeri, dinamika fluida, kretanje elektromagnetskih polja i kretanje fluida, veoma su slični u matematičkom smislu.) Teorija polja je lepa tema; linije polja, evipotencijalne linije i linije vrtloga neki su od pojmove koji će biti uvedeni u ovoj oblasti. Oni su začudili mnoge.² Međutim, u ovom penjanju na planinu mi ćemo da se zadržimo na razmatranjima usmerenim na kretanja.

Videli smo da nas polja prisiljavaju da proširimo pojam kretanja. Kretanje nije samo promena stanja objekta u prostor-vremenu, već takođe **promena stanja polja**. Prema tome, potrebno je u potpunosti i precizno opisati stanja i za polja.



Slika 45 Vektorski potencijali za odabране situacije

Posmatranja u kojima su korišćeni čilbari i magneti pokazali su da **elektromagnetna polja imaju energiju i količinu kretanja**. Polja mogu da raspodele energiju i količinu kretanja na čestice. Eksperimenti s motorima pokazala su nam i da objekti mogu da daju poljima energiju i količinu kretanja. Prema tome, potrebno nam je da odredimo funkciju stanja koja bi nam omogućila da odredimo energiju i količinu kretanja za električna i magnetna polja. A pošto električna i magnetna polja prenose energiju, njihova kretanja moraju da slede granicu brzine u prirodi.

Herc (Herz) i Hevisajd (Heavyside) odredili su funkciju polja u dva standardna koraka. Prvi korak je određivanje (magnetnog) vektorskog potencijala, koji opisuje količinu kretanja po nanelektrisanju koje se dobija od polja (**Ref. 44**)

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

Kada se nanelektrisana čestica kreće kroz magnetni potencijal $\mathbf{A}(x)$, njena količina kretanja se menja za iznos $q\Delta\mathbf{A}$; ona se menja za razliku između vrednosti potencijala u početnoj i krajnjoj tački, pomnoženo sa njenim nanelektrisanjem. Poznavanjem ove odrednice, vektor potencijala ima osobinu

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

to jest, magnetno polje je **uvojak** magnetnog potencijala. U većini drugih jezika uvojak se naziva **rotacija** i skraćeno **rot**. Da bismo odredili šta je uvojak ili rotacija, zamislite da su vektori polja vektori brzine protoka vazduha. Sada postavite mali točak sa lopaticama u neku tačku, kao što je prikazano na **slici 46**. Ako se on obrće, to znači da je rotacija različita od nule. Brzina obrtanja je maksimalna u nekom usmerenju osovine; ta maksimalna brzina određuje i jačinu i smer rotacije u toj tački. (Primenjeno je pravilo desne ruke.) Na primer, rotacija za brzine obrtanja čvrstog tela je na bilo kojem mestu 2ω , ili dvostruko veća od ugaone brzine. (**Izazov 79ny**).

¹ Ovaj odeljak može da se preskoči prilikom prvog čitanja

² Kakve su veze, sa gledišta polja, između linija polja i (ekvi-) potencijalnih površina? (**Izazov 78s**). Mogu li linije polja da prođu dva puta kroz potencijalnu površinu? Za više detalja o temama kao što su ove, pogledajte besplatni udžbenik od Bo Thide *Elektromagnetna teorija polja* na web strani pisca www.plasma.uu.se/CED/Book. Morate pogledati naravno i tekstove na engleskom od Švingera (Schwinger) i od Džeksona (Jackson). (**Ref. 1** i **Ref 24**).

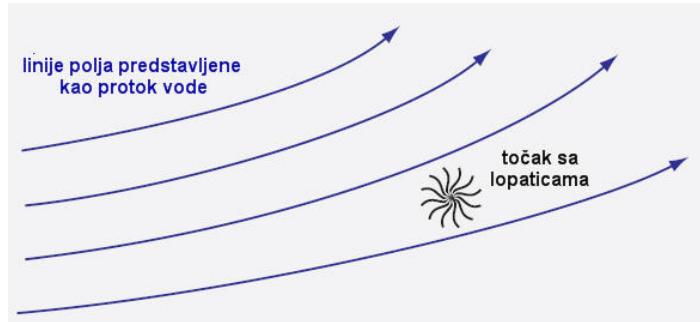
Vektorski potencijal za dug prav provodnik sa strujom paralelan je sa provodnikom. ([Ref. 45](#)). On ima jačinu ([Izazov 80ny](#))

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

koja zavisi od radijalnog rastojanja r od provodnika i konstante integriranja r_0 . Ovaj izraz za vektorski potencijal, prikazan na [slici 45](#), pokazuje kako protok struje stvara linearu količinu kretanja u (elektro-) magnetnom polju oko sebe. U slučaju namotaja, vektorski potencijal “kruži” oko namotaja. Veličina se poviňuje

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

gde je Φ magnetni upliv u namotaju. Vidimo da, u opštem slučaju, nanelektrisanja u pokretu **povlače za sobom** vektorski potencijal. Ovo povlačenje se smanjuje za velika rastojanja. To se savršeno uklapa u sliku vektorskog potencijala kao količine kretanja elektromagnetskog polja.



Slika 46 Vizualizacija rotacije vektorskog polja. Zamisli se da je polje protok vazduha i proveri se da li se mali točak sa lopaticama obrće; ako se obrće, lokalna rotacija nije nula. Smer rotacije je u smeru osovine točka za koji se dobija najveća vrednost brzine.

Ova osobina vektorskog potencijala oko nanelektrisanja podseća na način kako se med povlači zajedno sa kašikom u pokretu. U oba slučaja efekt povlačenja smanjuje se sa odstojanjem. Međutim, vektorski potencijal, za razliku od meda, ne proizvodi trenje koje usporava kretanje nanelektrisanja. Vektorski potencijal se stoga ponaša kao tečnost bez trenja. Unutar namotaja magnetno polje je konstantno i uniformno. Za takvo polje \mathbf{B} nalazimo da je vektorski potencijal ([Izazov 81e](#))

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

U ovom slučaju, magnetni potencijal prema tome raste sa povećavanjem rastojanja od izvora.¹ U osi namotaja, u centru, potencijal je nestao. Analogija da vučenim medom pokazuje isto takvo ponašanje.

Međutim, ovde je kvaka. Magnetni potencijal **nije** jedinstveno određen. Ako je $A(x)$ vektorski potencijal, tada je različit vektorski potencijal

$$A'(x) = A(x) + \nabla \Lambda \quad (39)$$

gde je $\Lambda(t, x)$ neka skalarna funkcija, takođe i vektorski potencijal u nekim slučajevima. (Mada magnetno polje \mathbf{B} kazuje isto to.) Još gore, možete li da potvedite da se odgovarajuća (apsolutna) vrednost količine kretanja takođe menja? ([Izazov 82ny](#)). Ta neizbežna dvoznačnost, nazvana **invarijanta merenja** ili **simetrija merenja**, centralna je osobina elektromagnetskog polja. Detaljnije ćemo je istražiti u daljem tekstu.

Ne samo da je dvoznačno određena količina kretanja, već je takođe i dvoznačno određena i energija elektromagnetskog polja. Zaista, drugi korak u određivanju stanja elektromagnetskog polja je određivanje električnog potencijala kao energije U po nanelektrisanju: ([Ref. 44](#))

¹ Ovo je samo moguće sve dok je polje konstantno; pošto sva polja opadaju na velikim odstojanjima – jer je energija polja uvek konačna – isto tako će i vektorski potencijal da opada na velikim odstojanjima.

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

Drugim rečima, potencijal $\varphi(x)$ u tački x je energija potrebna da se pokrene jedinični električni naboј u tačku x , počevši od tačke gde potencijal nestaje. Potencijalna energija je prema tome određena proizvodom $q\varphi$. Iz ove odrdnice, električno polje \mathbf{E} jednostavno je promena potencijala sa položajem ispravljenim vremenskom zavisnošću od količine kretanja, to jest

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

Očigledno je da postoji sloboda u izboru određivanja potencijala. Ako je $\varphi(x)$ jedan od mogućih potencijala, tada je

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

takođe funkcija potencijala u istoj situaciji. Ova sloboda je uopštavanje slobode da se energija odredi do konstante. Uprkos tome, električno polje \mathbf{E} ostaje isto za sve potencijale.

Da bismo se uverili da su potencijali zaista energija i količina kretanja elektromagnetskog polja, primetimo da za električni naboј koji se kreće imamo (*Ref. 44*) (*Izazov 83ny*)

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

što pokazuje da promene uopštene energije i količine kretanja čestica (na levoj strani) nastaju usled promene energije i količine kretanja elektromagnetskog polja (na desnoj strani).¹

U relativističkom načinu pisanja 4-vektora, energija i količina kretanja polja pojavljuju se zajedno u jednoj veličini. Funkcija stanja elektromagnetskog polja postaje

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

i naziva se **4-potencijal**. Lako je uočiti da je opis polja potpun, pošto se ima

$$\mathbf{F} = dA \quad \text{ili} \quad \mathbf{F}^{\mu\nu} = \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu \quad (\text{i } \mathbf{F}_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu) \quad (45)$$

što znači da je elektromagnetno polje F kompletno određeno preko 4-potencijala A .² Ali kao što je upravo pomenuto, 4-vektor sam za sebe nije jedinstveno određen. Zaista, svaki drugi ekvivalentni 4-potencijal A' u vezi je sa A preko **transformacije merila**

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

gde je $\Lambda = \Lambda(t, x)$ bilo koje proizvoljno odabrano skalarno polje. Novo polje A' dovodi do **istog** elektrodinamičkog polja i do istih ubrzanja i evolucija. 4-potencijal A je prema tome **previše određena** fizička situacija, pošto odabir više **različitih** merila odgovara istoj situaciji.³ Prema tome, moramo da proverimo da li su svi rezultati merenja nezavisni od transformacije merila, to jest, da li su sva zapažanja invarijantne veličine merila. Takve invarijantne veličine merila su, kao što je već rečeno, polja F i *F i uglavnom sve klasične veličine. Dodaćemo da više teorijskih fizičara koriste pojам “elektromagnetno polje” oslobođeno od obe veličine $F_{\mu\nu}$ i A_μ .

Postoji jednostavno predstavljanje, zahvaljujući Maksvelu, koje pomaže da se prevaziđu teškoće oko vektorskog potencijala. Ispada da je kružni integral A_μ po zatvorenoj liniji invarijantno merilo, pošto je (*Izazov 85e*).

¹ Ova veza pokazuje takodje zbog čega se izraz $P^\mu - qA^\mu$ tako često pojavljuje u obrascima; zaista to ima glavnu ulogu u kvantnoj teoriji čestice u elektromagnetnom polju.

² Veza između A^μ i A_μ je ista i za svaki drugi 4-vektor, kao što je već pomenuto ranije; možete li to da izrazite ponovo? (*Izazov 84e*).

³ Izbor funkcije Λ često se naziva **odabir merila**; 4-potencijal A se takodje naziva **polje merila**. Ovi čudni pojmovi koji imaju istorijske razloge i danas su uobičajeni kod svih fizičara.

$$\oint A^\mu dx_\mu = \oint (A^\mu + \partial^\mu \Lambda) dx_\mu = \oint A'^\mu dx_\mu \quad (47)$$

Drugim rečima, ako predstavimo vektorski potencijal kao veličinu koja nam dozvoljava da pridružimo brojne male prstenove u svakoj tački polja, dobijamo predstavljanje dobrog invarijantnog merila vektorskog potencijala.¹

Sada kada smo odredili funkciju stanja koja opisuje energiju i količinu kretanja elektromagnetskog polja, pogledajmo detaljnije šta se događa kada se elektromagnetno polje kreće.

LAGRANŽIJAN ELEKTROMAGNETIZMA²

Umesto da se koriste jednakosti polja i Lorenca, kretanje nanelektrisane čestice i odgovarajuća kretanja elektromagnetskog polja može da se opišu upotrebom lagranžijana. Nije teško da se sagleda kako rad S_{CED} za česticu u klasičnoj elektrodinamici može simbolično da se odredi sa (*Izazov 86ny*)³

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

što u pisanju pomoću indeksa postaje

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

ili napisano kao 3-vektor

$$S_{CED} = -c^2 m \int d\tau + \int (qvA - q\varphi) dt dV + \int \left(\frac{\varepsilon_0}{2} E^2 - \frac{1}{2\mu_0} B^2 \right) dt dV \quad (50)$$

Novi deo je merenje promene – ili rad – usled elektromagnetskog polja. Čista promena polja je data u članu $\mathbf{F} \wedge * \mathbf{F}$, a promena usled interakcije sa materijom data je u članu $j \wedge A$.

Načelo najmanjeg rada, kao i obično, izražava da su promene u sistemima uvek što je moguće manje. Rad S_{CED} dovodi do jednakosti razvoja uz zahtev da će rad bitii stacionaran pri promenama položaja δ i δ' polja koji nestaje u beskraju. Pomoću drugih pojmoveva, načelo najmanjeg rada zahteva da bude

$$\begin{aligned} \delta S = 0 & \text{ kada } x_\mu = x_\mu + \delta_\mu \quad \text{i} \quad A_\mu = A_\mu + \delta'_\mu \\ & \text{pod predpostavkom} \quad \delta x_\mu(\theta) \rightarrow 0 \quad \text{za} \quad |\theta| \rightarrow \infty \\ & \text{i} \quad \delta A_\mu(x_\nu) \rightarrow 0 \quad \text{za} \quad |x_\nu| \rightarrow \infty \end{aligned} \quad (51)$$

Na isti način kao u slučaju mehanike (*Vol. I, strana 187*), korišćenjem metoda varijacije za dve promenljive A i x , otkrićemo jednakost evolucije za položaj čestice i polja (*Izazov 87ny*)

$$b^\mu = \frac{q}{m} \mathbf{F}_v^\mu u^\nu, \quad \partial_\mu \mathbf{F}^{\mu\nu} = j^\nu \mu_0 \quad \text{i} \quad \varepsilon^{\mu\nu\rho\sigma} \partial_\nu F_{\rho\sigma} = 0 \quad (52)$$

što nam je već poznato: to su Lorencov obrazac i dve jednakosti polja. Očigledno je da su to ekvivalentni načelu varijacije zasnovanom na radu S_{CED} . Oba opisa moraju da ispunе zahteve određenih *početnih uslova* za čestice i za polja, a takođe i *uslove ograničenja* za ovo poslednje. Potrebno je prvo da se izvod izjednači sa nulom za položaj čestica, i da se izvod izjednači sa nulom za elektromagnetno polje.

Uz lagranžijan (48) može da se opiše i razume sve iz klasične elektrodinamike. U ostatku našeg israživanja u oblasti elektrodinamike, pogledaćemo neke specifične teme u ovom velikom polju.

¹ U delu teksta o kvantnoj teoriji videćemo da se izložilac ovog izraza, naime $\exp(iq\oint A_\mu dx_\mu)/\hbar$, obično naziva činilac faze, može zaista da se dobije neposrednim posmatranjem u eksperimentima. (*Ref. 46*).

² Ovaj odeljak može da se preskoči prilikom prvog čitanja.

³ Proizvodi opisani simbolom Λ , “klin” ili “kapa” i dualnim operatorom, imaju precizna matematička značenja. (*Ref. 48*). Pozadina, pojma (**matematičkih**) oblika, odvela bi nas daleko os našeg hodanja.

TENZOR ENERGIJA-KOLIČINA KRETANJA I NJEGOVE SIMETRIJE KRETANJA

Znamo iz klasične mehanike da dobijamo odrednice za energiju i količinu kretanja ako koristimo teoremu Emi Neter (Emmy Noether). Posebno obe odrednice i za očuvanje energije i za količine kretanja proističu iz Lorencove simetrije lagranžijana. Na primer, nalazimo da relativističke čestice imaju vektor energija-količina kretanja. On opisuje energiju i količinu kretanja u tački u kojoj se čestica nalazi.

Pošto elektromagnetno polje nije lokalizovan subjekt, kao što je to tačkasta čestica, već proširen subjekt, potpun opis je zamršeniji. Da bismo opisali kompletno energiju-količinu kretanja elektromagnetskog polja, moramo poznavati protoke energije i količine kretanja u svakoj tački prostora, posebno *za svaki smer*. Ovo čini neophodnim opis pomoću tenzora, takozvanog **tenzora energije-količine kretanja T** elektromagnetskog polja. (**Vol. II, strana 153**).

Električno polje pomnoženo sa električnim nabojem daje silu koja deluje na to nanelektrisanje, ili ekvivalentno tome, povećanje količine kretanja sa vremenom. Uopštavanje za vektor ukupnog elektromagnetskog polja F i vektora K ukupne snage-sile (ili 4-silu) je

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

Ova kratka jednakost, koja je mogla da se izvede i iz lagranžijana, sadrži mnogo informacija. Posebno, ona izražava da je svaka promena u energiji polja zbir energija koja se zrači van polja (preko protoka energije opisanog preko Pointingovog vektora S) i promene kinetičke energije nanelektrisanja. Jednakost takođe daje sličan iskaz o količini kretanja elektromagnetskog polja.

Detaljni delovi tenzora energija-količine kretanja T mogu se naći

$$\begin{aligned} T^{\mu\nu} &= \begin{pmatrix} \text{gustina energije} & \text{protok energije ili} \\ \text{protok energije ili} & \text{gustina količine kretanja} \\ \text{gustina količine kretanja} & \text{gustina protoka količine kretanja} \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} u & S/c = cp \\ cp & T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \epsilon_0 E^2 & \epsilon_0 c E \times B \\ \epsilon_0 c & -\epsilon_0 E_i E_j - B_i B_j / \mu_0 \\ E \times B & 1/2 \delta_{ij} (\epsilon_0 E^2 + B^2 / \mu_0) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (54)$$

gde je $S = E \times B / \mu_0$ **Pointingov vektor** koji opisuje gustinu protoka energije elektromagnetskog polja. Tenzor energija-količina kretanja T ispunjava uslov neprekidnosti: on opisuje očuvanu veličinu.

Možemo zaključiti iskazom da su u prirodi, energija i količina kretanja očuvani, ako uzmeno u obzir energiju i količinu kretanja elektromagnetsnih polja. A tenzor energija-količina kretanja ponovo pokazuje da je elektrodinamika opis invarijantnog merila: vrednost energije i količine kretanja ne zavise od izbora merila.

Tenzor energija-količina kretanja, kao i lagranžijan, pokazuje da je elektrodinamika invarijanta i pri **dvostranom kretanju**. (**Izazov 88e**). U svim promenama pravca kretanja nanelektrisanja – u situaciji koja se ponekad zbujujuće naziva “inverzija vremena” – nanelektrisanja se vraćaju po istim putanjama koje su imali pri kretanju napred. Svaki primer kretanja usled električnog ili magnetnog polja može da se dogodi i unazad.

S druge strane, svakodnevni život pokazuje više električnih i magnetnih efekata koji nisu invarijanta vremena, kao što je lom tela ili pregorevanje sijalica električnog osvetljenja. Možete li da objasnite kako se to uklapa? (**Izazov 89s**).

Isto tako zapažamo da nanelektrisanja i mase uništavaju dalju simetriju vakuma, koju smo pomenuli u specijalnoj teoriji relativnosti: vakuum je invarijanta samo pod konformnom transformacijom. (**Vol. II, strana 73**).

Posebno, samo vakuum je invarijanta pri prostornoj inverziji $r \rightarrow 1/r$. Nijedan drugi fizički sistem ne podleže konformnoj simetriji.

Da zaključimo, elektrodinamičko kretanje, slično kao i svi drugi primeri kretanja koje smo proučavali do sada, je determinističko, sporije od brzine svetlosti c , dvostrano i očuvano. Ovo nije veliko iznenađenje. Pa ipak, dve druge simetrije elektromagnetizma zaslužuju da se pomenu posebno.

ENERGIJA I KOLIČINE KRETANJA ELEKTROMAGNETNOG POLJA

Subjekti koji se kreću imaju energiju, količinu kretanja i moment količine kretanja. To se isto odnosi i na elektromagnetno polje. Zaista, opisi dati do sada, omogućavaju nam da napišemo izraz za ukupnu energiju E_{energy} elektromagnetnog polja kao

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

Energija je prema tome srazmerna kvadratima polja.

Za ukupnu linearu loličinu kretanja dobijamo

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

Iraz u integralu je ***gustina količine kretanja***. Odgovarajući vektor $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{B}/\mu_0$ naziva se ***Pointingov vektor***¹ i on opisuje protok energije; to je vektorsko polje i ima dimenziju W/m². Pointingov vektor je gustina količine kretanja podeljena sa c^2 ; zaista, specijalna teorija relativnosti podrazumeva da je za elektromagnetna polja odnos protoka količine kretanja i energije činilac c^2 . Pointingov vektor prema tome opisuje proticanje energije po površini i po vremenu, ili, drugim rečima snagu po površini. Kao što je pokazano niže, Pointingov vektor je deo tenzora energija-količina kretanja. (**Strana 69**).

Možete li napraviti grafik polja Pointingovog vektora za kabel kroz koji teče jednosmerna struja? A za transformator? (**Izazov 90s**).

Za ukupni moment količine kretanja imamo (**Ref. 47**)

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

gde je \mathbf{A} vektor magnetnog porencijala.

Ukratko, elektromagnetno polje sadrži linearu količinu kretanja, moment količine kretanja i energiju uz dobro određene vrednosti. Pa ipak, u mnogim svakodnevnim situacijama stvarne vrednosti su zanemarljivo male, što možda želite da proverite. (**Izazov 91e**).

ŠTA JE OGLEDALO? DA LI JE PRIRODA INVARIJANTA PARITETA?

Čudna ponašanja ogledala proučavali smo više puta tokom našeg hodanja. Počećemo sa najjednostavnijim, Svako može da primeti da ako svoje ruke oboji različitim bojama, ogledalo neće da zameni levo i desno, onoliko kao što zamjenjuje gore i dole; međutim, ogledalo će zamjeniti desnu i levu ruku. Zapravo, ono to čini zamjenom napred i nazad.

Elektrodinamika daje i drugačiji odgovor; ogledalo je uređaj koji menja magnetni severni i južni pol, ali ne menja znak električnih naboja. Možete li to da dokažete slikovito? (**Izazov 92s**).

Ali da li je uvek moguće razlikovati levo od desnog? To izgleda lako; ovaj tekst se razlikuje od verzije u ogledalu, kao i mnogo drugih objekata u našem okruženju. No, uzmimo jednostavan pejzaž. Možete li sada reći koja od dva prikaza je originalan na **slici 47**?

Začuđujuće je, ali stvarno je nemoguće razlikovati originalnu sliku prirode od njene slike u ogledalu ako se u njoj ne nalazi bilo koji trag ljudskog bića. Drugim rečima, svakodnevna priroda ima na neki način simetriju levo-desno. Ovo zapažanje je toliko često da se svi kandidati za izuzetke opširno proučavaju. Primeri su pomeranje vilica krava koje preživaju, helkoidalni rast biljaka, kao što je hmelj, smer spirale kućice puža, ili levi zaokret koji čine svi slepi miševi kada izlaze iz svojih pećina. (**Vol. V, strana 191**). Najpoznatiji primer je položaj srca, Mehanizam koji dovodi do ovog položaja još uvek se istražuje. Skorija

¹ Ovaj pojam uveo je 1884. godine Džon Henri Pointing (John Henry Poynting, 1852. Monton – 1914. Birmingham)

proučavanja otkrila su da usmerena kretanja cilije kod embriona u području koje se naziva **čvor**, određuju asimetriju levo-desno. (**Vol. V, strana 25**). Ovo pitanje ćemo istražiti u daljem tekstu.



Slika 47 Na kojoj slici je orginalan pejzaž (NOAA)

Mnoga ljudska tela imaju više mišića na desnoj strani kod ljudi koji se služe desnom rukom, kao što su Albert Ajnštajn i Pablo Pikaso, i odgovarajuće na levoj strani kod ljudi koji se služe levom rukom, kao što su Čarli Čaplin i Piter Ustinov. Ova asimetrija se odražava i na asimetriji ljudskog mozga, pod imenom laterizacija, što je bitno za prirodu ljudi.

Sledeća asimetrija na ljudskom telu je spirala u kosi na potiljku; većina ljudi je ima samo jednu, a u 80% slučajeva ona je usmerena ulevo. Možete li da navedete još neku asimetriju na telu? (**Izazov 93s**).

Simetrija levo-desno na ljudskom telu pojavljuje se pošto je svakodnevna priroda opisana gravitacijom i kao što ćemo videti, elektromagnetizmom. Obe interakcije dele važnu osobinu: posle zamene svih koordinata u njihovim jednakostima negativnim vrednostima, jednakosti ostaju neizmenjene. To znači da za svako rešenje ovih jednakosti, to jest, za svaki sistem koji se pojavi u prirodi, slika u ogledalu je takođe prirodna mogućnost. U svakodnevnoj prirodi zato nije moguće napraviti razliku između levog i desnog. Zapravo, postoje desnoruki i levoruki ljudi, ljudi čije je srce na levoj strani i ostali, čije je srce na desnoj strani itd.

Da bismo nastavili da istražujemo ovaj čudan hir prirode, pokušajte sledeći eksperiment: zamislite da razmenjujete radio poruke sa Marsovcem; da li imate mogućnost da mu objanite šta je levo a šta desno, tako da kada se sretnete možete da razgovarate o istoj stvari? (**Izazov 94s**).

Zapravo, simetrija u ogledalu u svakodnevnoj prirodi – nazvana takođe invarijanta pariteta – je toliko raširena da većina životinja ne može da razlikuje levo od desnog u dubljem smislu. (**Ref. 49**). Mnoge životinje reaguju na podsticaj u ogledalu sa odzivom u ogledalu. Teško je da se nauče da reaguju na drugačiji način, a to je skoro moguće samo kod sisara. Mnogi eksperimenti izvedeni u ovom području dali su rezultate da životinje imaju simetričan nervni sistem, a verovatno samo kod ljudi postoji *laterizacija*, to jest sklonost da se koristi leva ili desna ruka i drugačije korišćenje leve i desne polovine mozga.

Da zaključimo ovu digresiju, klasična elektrodinamika ima simetriju levo-desno, ili invarijantu pariteta. Možete li to da pokažete na lagranžijanu? (**Izazov 95s**).

Zašto metali daju dobra ogledala? Metali su jaki apsorberi svetlosti. Svaki dobar apsorber ima metalni sjaj. Ovo je tačno za metale, ako su dovoljno debeli, ali isto tako za kristale boja ili za mastila. Svaki materijal koji je jako apsorbuje talasnu dužinu svetlosti takođe je efikasno i odbija. Uzrok jake apsorpcije kod metala jesu elektroni unutar njih; oni mogu da se kreću skoro slobodno i zato apsorbuju većinu učestanosti vidljive svetlosti; to dovodi do prolaznih talasa u materijalu i jakog odbijanja. Jako odbijanje pojavljuje se ubrzo odmah pošto je dužina apsorpcije manja od jedne talasne dužine. To je razlog što, na primer, jaka kafa, jak čaj ili guste pare alkalija deluju kao ogledalo. (Međutim, kako odbijanje moguće je i bez jake apsorpcije, kao što pokazuju svudaprисутни višeslojni izolatori.)

Ovde postoji zagonetka: izdubljeno ogledalo daje obrnutu sliku; to čini i ravno ogledalo ako je delom prekopljeno po horizontali. (**Strana 70**). Šta se događa ako se ovo ogledalo obrće oko linije vida? (**Izazov 96s**).

KAKVA JE RAZLIKA IZMEĐU ELEKTRIČNIH I MAGNETNIH POLJA?

Očigledno, standardni odgovor je da električna polja imaju izvore, a magnetna ih nemaju; kao rezultat toga, magnetna polja su relativistički efekti manje važnosti, osim kada su brzine naelektrisanja velike ili kada se električna polja poništavaju.

U situacijama gde su sadržane materije, polja zaista mogu da se razlikuju prema njihovom izvoru. Do sadašnjih dana, čestica sa magnetnim nabojem, koja bi se nazivala **magnetni jednopol** nije bila nađena, mada je njeno postojanje moguće u nekim spekulativnim modelima fizike čestica (**Vol. V, strana 201**). Ako bi bila pronađena, morao bi da bude prerađen rad (48) i dodao bi se njegov četvrti član, naime gustina magnetne struje. Međutim, takva čestica još uvek nije zapažena, uprkos velikim istraživačkim naporima.

U praznom prostoru, kada u okolini nema materije, moguće je imati sasvim drugačije viđenje. U praznom prostoru električna i magnetna polja mogu da se posmatraju kao dva oblika iste veličine, pošto transformacija kao što je

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &\rightarrow c\mathbf{B} \\ \mathbf{B} &\rightarrow -\mathbf{E}/c \end{aligned} \tag{58}$$

koja se naziva (elektromagnetna) **dvojna** transformacija, kojom se transformiše svaka Maksvelova jednakost u vakuumu jedna u drugu. Predznak minus pritom je neophodan. (Zapravo, postoji još i mnogo više takvih transformacija, možete li da ih navedete?) (**Izazov 97s**). Alternativno, dvojna transformacija transformiše \mathbf{F} u $*\mathbf{F}$. Drugim rečima, u praznom prostoru **ne možemo** da razlikujemo električna od magnetnih polja. Osim toga, teško je reći za date linije polja u vakuumu da li su magnetne ili električne linije polja.

Materija bi bila simetrična pri dvojnosti samo kada bi magnetni naboji, nazvani takođe jednopoly, mogli da postoje. U takvom slučaju transformacija (58) mogla bi da bude proširena na

$$c\rho_e \rightarrow \rho_m, \quad \rho_m \rightarrow -c\rho_e \tag{59}$$

Dugo vreme se mislilo da se dvojnost može iskoristiti za traženje konačne, objedinjene teorije fizike. (**Ref. 50**). Međutim, ova nada je isparila. Razlog za ovaj neuspeh može se pratiti unazad do male ali ružne činjenice: dvojna transformacija menja predznak lagranžijana, pa prema tome i rada. (**Izazov 98e**). Prema tome, elektromagnetna dvojnost nije stvarna simetrija prirode, i stoga ne pomaže da se postigne dublje razumevanje elektromagnetizma.

Uzgred, dvojnost je simetrija koja funkcioniše **samo** u prostor-vremenu Minkovskog, to jest u prostor-vremenu sa 3+1 dimenzijom. Matematički, dvojnost je usko povezana sa postojanjem kvaterniona, uz mogućnost predstavljanja Lorencove podrške (boost) kao obrtanja u 3+1 dimenziji, i na kraju, ali ne i nevažno, za omogućavanje određivanja drugih milozvučnih matematičkih struktura koje su standardne u prostoru R^4 . Ove veze sa matematikom bile su zagonetne dugo vreme; one na neki način ukazuju na posebnu ulogu koju u prirodi ima prostor-vreme sa 4 dimenzije. Više detalja će postati očigledno u poslednjem delu naše avanture.

MOŽE LI ELEKTRODINAMIKA DA BUDE DRUGAČIJA?

Videli smo da se elektrodinamika oslanja na tri ideje: očuvanje električnog nabaja, granicu brzine naelektrisanja i Kulonov obrazac obrnuto srazmerne vrednosti kvadrata. (**Ref. 39**). Da li bi neka od njih mogla da bude pogrešna ili da zahteva izmenu?

Eksperimenti nagoveštavaju da je jedini kandidat za izmenu Kulonov obrazac. Zaista, bilo koja interakcija, kao što je Kulonov obrazac (4), koja za nekog datog posmatrača deluje između dve čestice nezavisno od 3-vektorske brzine, mora da zavisi od 3-brzine za drugog inercijskog posmatrača.¹ Takva interakcija mora isto tako da zavisi od 4-brzine, kako bi osigurao zahtev iz specijalne teorije relativnosti da 4-ubrzanje mora biti upravno na 4-brzinu. Najjednostavniji slučaj takve interakcije je interakcija u kojoj je ubrzanje srazmerno 4-brzini. Zajedno uz zahtev da interakcija ostavlja konstantnim mase u stanju mirovanja, mi tada otkrivamo elektrodinamiku. (**Ref. 51**). Ostale interakcije ne slažu se sa eksperimentom.

Zapravo, zahtevi simetrije merila i invarijanta relativnosti takođe čine nemogućim da se ispravi elektrodinamika. Ukratko, ne izgleda moguće da postoji osobina različita od $1/r^2$ za klasičnu interakciju.

¹ Ovo može da se zaključi iz specijalne teorije relativnosti (**strana 45**) ili iz obrasca u fusnoti na **strani 68 u Vol. II**.

Možda je moguće malo odstupanje od Kulonovog obrasca? Zavisnost od obrnute srazmre kvadrata podrazumeva nestanak mase svetlosti i čestica svetlosti, fotona. Da li je masa stvarno nula? (Ref. 52). Ovo pitanje se opširno proučava. Foton velike mase doveo bi do zavisnosti talasnu dužinu od brzine svetlosti u vakuumu, do odstupanja od zakona obrnute srazmre kvadrata, do odstupanja od Amperovog zakona, do postojanja uzdužnih elektromagnetskih talasa i više. Ne postoje dokazi da su ovi efekti ikada nadjeni. Zaključak ovih proučavanja pokazuju da je masa fotona ispod 10^{-53} kg, ili možda čak 10^{-63} kg. Neki dokazi nisu opšte prihvaćeni, pa se prema tome granica ponekad menja od jednog istraživača do drugog.

Mala masa fotona koja ne nestaje mogla bi uneškoliko da promeni elektrodinamiku. Uključenje malih masa ne predstavlja nikakve posebne probleme, i odgovarajući lagranžijan, takozvani Proka (Proca) lagranžijan, već je bio proučavan za svaki slučaj. (Ref. 52). Strogo govoreći, za masu fotona ne može da se kaže da nestaje. Posebno, foton poluprečnika Komptonove (Compton) talasne dužine u vidljivom delu svemira ne može da se razlikuje od onog sa nultom masom tokom bilo kojeg eksperimenta. Oni daju graničnu masu fotona od 10^{-69} kg. Fotoni sa tako malom vrednošću mase nebi mogli da obezvrede elektrodinamiku onakvu kakvu poznajemo. Zapažamo da su u sadašnje vreme eksperimentalne granice još uvek mnogo veće. U principu su iznenadenja još moguća.

Interesantno, nulta masa fotona mogla bi da podrazumeva nepostojanje magnetnih jednopolja, pošto bi time bila prekršena simetrija između električnih i magnetnih polja. Prema tome važno je, s jedne strane, da se pokuša poboljšanje granice eksperimentalnih masa fotona, a s druge strane, da se istraži da li granica usled veličine svemira ima bilo kakav uticaj na ovaj ishod. Pitanje je još uvek otvoreno.

Ukratko, izgleda da je neverovatno teško, ako ne i nemoguće, da se pronađu promene u elektrodinamici koje bi se slagale sa eksperimentima. Elektrodinamika je utvrđena jednom za svagda.

MOZAK – NAJTEŽI IZAZOV ZA ELEKTRODINAMIČKU

Isatraživači koji rade na klasičnoj elektrodinamici suočavaju se sa začuđujujućim eksperimentalnim i teorijskim pitanjem: razumevanje procesa razmišljanja. Istraživači se sreću sa dva izazova u ovoj oblasti. Prvo, moraju da pronađu način da se **modelira** proces razmišljanja, Drugo, tehnologija **merenja** struja u mozgu mora biti proširena. U obe oblasti nedavni napredak bio je spektakularan.

Važno istraživanje je bilo sprovedeno na više nivoa modeliranja razmišljanja. Na primer, istraživanje u kojem je korišćena računarska tomografija (CT), skeniranje PET (Positron emission tomography) (računarska tomografija) i snimanje MRI (magnetna rezonans) pokazali su da može da se izmeri razlika između **svesnog** i **nesvesnog**: to ima biološke osnove. Svesno i nesvesno razmišljane događaju se u različitim delovima mozga. Psihološki procesi, kao što je potiskivanje neprijatnih misli, mogli su zaista da se vide na snimku skeniranja mozga. Modelari mehanizma mozga su naučili da su razni pojmovi psihologije opisi stvarnih fizičkih procesa. Ovakav pristup istraživanju još uvek je u svojoj nepunoletnosti, ali veoma obećava.

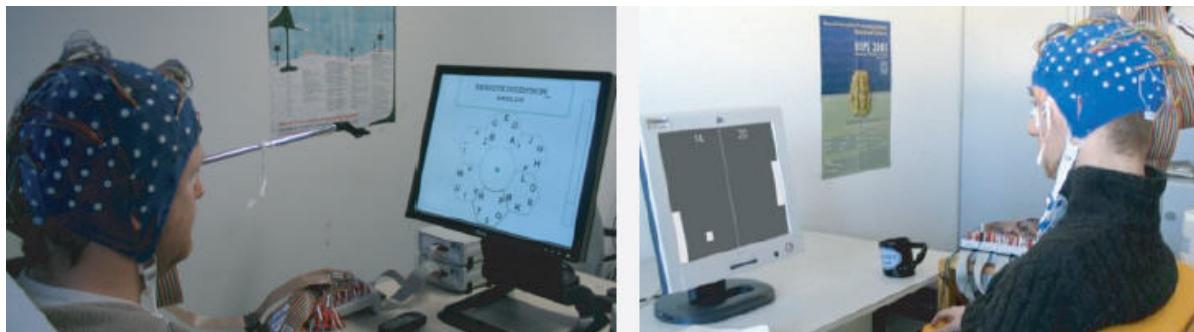
O specifičnim aspektima rada mozga, kao što su: učenje, pamćenje, prepoznavanje oblika, lokaciji izvora zvuka, ili mape formiranja, savremena neurobiologija i eksperimenti sa životiljama dopuštaju da se izvedu modeli koji čine kvantitativna predviđanja. Više o tome biće reči u daljem tekstu (strana 196).

Na eksperimentalnoj strani, istraživači sa uređajima magnetoencefalografije načinili su brz napredak, Magnetna polja koja nastaju usled struja u mozgu tako su mala, oko 10 fT , da zahtevaju senzore u tečnom helijumu i dobru ekranizaciju zbog šumova iz pozadine. Poboljšanjem osetljivosti i prostorna rezolucija kod ovih sistema predstavljaju glavne zadatke. Isto tako, u oblasti računarskih modela i algoritama načinjen je veliki napredak.

Celokupni programi biće dovršeni čim u daljoj budućnosti aparati za osetljiva merenja budu mogli da otkriju šta se događa u mozgu, pa potom da iz tih merenja mogu da zaključe ili "pročitaju" misli osobe. Čitanje misli možda je najsloženiji od svih izazova da kojima se suočava nauka i tehnologija. Jasno je da takav podvig zahteva zamršenu i skupu aparaturu, tako da ne postoji opasnost za pogrešnu upotrebu tehnologije. Postoje dobri razlozi da se veruje da potpuno čitanje misli nikada neće biti moguće na ovakav način, zbog otsustva lokalizacije spoznaja misli unutar mozga i zbog razlika spoznajnih procesa od jedne osobe do druge. Ali razumevanje i modeliranje mozga biće korisna tehnologija u brojnim aspektima svakodnevnog života, posebno za onesposobljene osobe.

Na putu prema čitanju misli mali napredak koji je bio napravljen do sada već je zadivljujući. Ako se nosi kaciga puna električnih kontakata – takozvani interfejs računara mozga – i ako se gleda u ekran računara, moguće je sada napisati pismo korišćenjem samo snage misli. Takvi sistemi su prikazani na **slici 48**.

Korisnik upravlja računarcem jednostavno razmišljajući da pokreće kurzor na ekranu vođen njegovom desnom rukom. Čitaju se struje u mozgu stvorene procesom razmišljanja i pretvaraju u naloge računaru preko elektronskog uređaja. ([Ref. 53](#)). Sistem koji je zasniva na algoritmu neuronske mreže radi već posle 20-to minutne obuke određene osobe. Na ovaj način sistem omogućava ljudima koji su potpuno paralizani da ponovo mogu da komuniciraju sa drugima. Sistem je toliko brz da omogućava igranje “misaonog video tenisa” na ekranu računara.



Slika 48 Pisanje pisma i igranje tenia samo pomoću misli (© Fraunhofer FIRST).

Kucanje teksta samo pomoću razmišljanja moguće je zbog toga što se oblast u mozgu zadužena za ruku nalazi u blizini lobanje, tako da signali za kretanje ruke mogu da se čitaju uz dovoljnu prostornu rezoluciju preko elektroda u kacigi. Istraživači znaju da zbog ograničenja rezolucije za sada nije moguće na ovakav način čitati naredbe za svaki prst posebno. Za takav zadatak visoke rezolucije elektrode još uvek moraju da se *upgrade* u odgovarajući deo mozga. Međutim, u sadašnje vreme je radni vek takvih elektroda samo nekoliko meseci, tako da san o mašinama upravljanja ili čak o veštačkim udovima na ovaj način još uvek daleko. Nedavna istraživanja sa interfejsom računara i mozga predviđaju da u ne tako dalekoj budućnosti račumari će možda biti sposobni da pročitaju tajni broj, kao što je PIN kreditne kartice, ako korisnik razmišlja o njemu. ([Ref. 54](#)). Decenije koje dolaze daće sigurno više ovakvih rezultata istraživanja.

IZAZOVI I ZABAVNE ZANIMLJIVOSTI O ELEKTRODINAMICI

Ne samo životinje, već i biljke mogu da osete električna i magnetna polja. Barem za magnetna polja senzori izgleda da koriste veoma sličan mehanizam koji koriste životinje i bakterije.

* * *

Za sisteme svakodnevnih veličina i veće, elektromagnetni motori su najefektivniji. Za mikroskopske veličine najefektivniji su elektrostatički motori. Oni se koriste u davačima i malim pokretačima. Nasuprot tome veliki energetski sistemi koriste naizmeničnu struju umesto jednosmerne.

* * *

Ako proračunavate Pointingov vektor za nanelektrisan magnet – ili jednostavnije za tačkasto nanelektrisanje u blizini magneta – dobićete iznenadjujući rezultat: elektromagnetna energija kreće se po krugovima oko magneta. Kako je to moguće? Odakle je nastao moment količine kretanja? ([Izazov 99s](#)).

Još je gore, svaki atom primer je takvog sistema – ustvari takva dva sistema. Zbog čega taj efekt nije uzet u obzir u proračunima kvantne teorije? ([Ref. 55](#)).

* * *

Savršeno loptasti elektromagnetni talasi nisu mogući u prirodi. Možete li to da pokažete korišćenjem Maksvelovih jednakosti elektromagnetizma, ili čak i bez njih? ([Izazov 100s](#)).

* * *

Ogledala postoje u mnogo oblika. Važno ogledalo za radio talase je jonosfera; posebno tokom noći, kada nestaju neki slojevi koji apsorbuju, jonosfera omogućava prijem udaljenih radio stanica. Kada su vremenski uslovi povoljni, moguće je primati signale radiostanice sa antipoda. Drugo ogledalo za radio talase je Mesec; pomoću savremenih prijemnika moguće je primati radio talase, a od pre nekoliko godina, čak i televizijske signale odbijene sa Meseca.

* * *

U prošlosti je u mnogim udžbenicima navođeno da Pointingov vektor, protok elektromagnetne energije, nije jedinstveno određen. Čak je i Ričard Fajnman (Richard Feynmann) govorio o ovom pitanju u

njegovim *Lectures on Physics* u delu 27-4. Možete li pokazati da ne postoji takva dvosmislenost kod Pointingovog vektora, a da svi takvi udžbenici greše? (**Izazov 101s**).

* * *

Ne postoje magnetni naboji. Još preciznije, ne postoje čestice sa jednim magnetnim nabojem različitim od nule. Ali ipak možemo da uvedemo matematičku veličinu “magnetni naboј” – koji se obično naziva **jacina magnetnog pola** – sve dok ne zahtevamo da svaki objekt uvek ima istu količinu magnetnog naboja suprotnog znaka. Uz ovaj uslov, magnetni naboј je odstupanje od magnetizma i zadovojava Puasonovu (Poisson) jednakost magnetostatike, u strogoj paraleli sa električnim slučajem. (**Ref. 56**).

* * *

Nedavni objekti istraživanja su rešenja za polja u vakuumu koja imaju **zamršene** linije polja. (**Ref. 57**). Takva rešenja postoje u teoriji, kako pokazuju razni autori. Međutim, niko nije bio kadar da takva rešenja realizuje u nekom eksperimentu.

* * *

Svaka električna priključnica u zidu je dvopol u radu sa naizmeničnom strujom. Zbog čega priključnica koja snabdeva sa 230 V ili 127 V na 50 Hz ili 60 Hz ne zrači elektromagnetsko polje? (**Izazov 102s**).

* * *

Zbog čega energetski transformator ima feromagnetsko jezgro? (**Izazov 103e**).

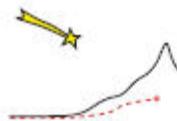
* * *

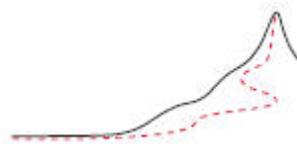
Postoje li elektromagnetski motori u biološkim sistemima? (**Izazov 104s**).

ZAKLJUČAK O KRETANJU ELEKTROMAGNETNOG POLJA

Ukratko, elektromagnetsko polje nosi energiju, linearnu količinu kretanja i moment količine kretanja. Prema tome je pogodno reći da se elektromagnetsko polje **kreće**. Kretanje elektromagnetskog polja opisano je načelom najmanjeg rada. Kretanje elektromagnetskog polja može da bude vizualno predstavljeno kao kretanje njegovih linija električnog polja i linija magnetnog polja. U kretanju su očuvane energija i količina kretanja. Kretanje elektromagnetskog polja je neprekidno, relativističko, dvostrano i invajantno u ogledalu.

To nas je direktno dovelo da se upitamo: kakva je onda priroda svetlosti?





Poglavlje 3

ŠTA JE SVETLOST?

Priroda svetlosti je očaravala istraživače prirode još od vremena antičke Grčke. ([Ref. 58](#)). Odgovor se pojavio 1848. godine, kada je Gustav Kirhof (Gustav Kirchhoff) primetio da se eksperimentalne vrednosti jednakosti

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

slažu unutar greške merenja. To je nametnulo odgovor na pitanje postavljeno 2000 godina ranije.

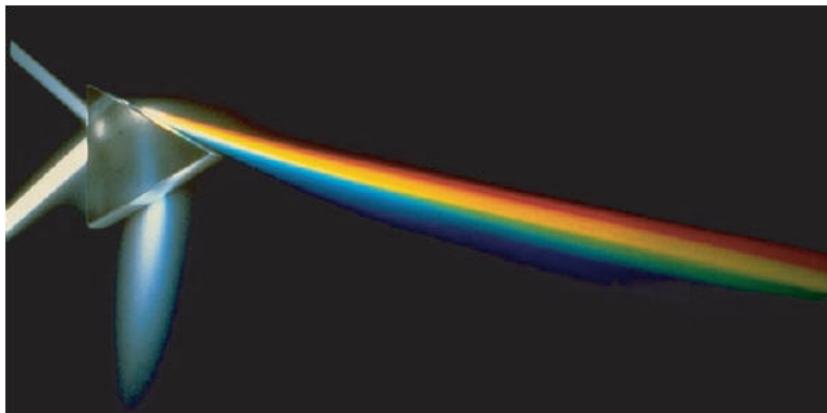
➤ Svetlost je elektromagnetni talas.

Deset godina kasnije, 1958. godine, Bernhard Riman (Bernhard Riemann)¹ dokazao je matematički da se svaki elektromagnetni talas mora kretati brzinom c datom u gornjoj jednakosti.

Treba primetiti da se u desnoj strani jednakosti nalaze električna i magnetna veličina, a da je na levoj strani optička veličina. Iskazi Kirhofs i Rimana prema tome sjedinjuju elektromagnetizam i optiku. Savremena vrednost brzine elektromagnetnih talasa, uobičajeno nazvane c , od latinske reči *celeritas - brzina*, je

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

Vrednost za c je ceo broj, pošto je metar sada određen na takav način da se dobija tačno ovaj broj. ([Strana 255](#)).



Slika 49 Bela svetlost pri prolasku kroz staklenu prizmu (fotografija Susan Schwartzenberg, © Exploratorium, veb strana www.exploratorium.edu/).

Godine 1865. Maksvel je sabrao u svoje jednakosti sve podatke o elektricitetu i magnetizmu prikupljane 2500 godina. Skoro niko nije pročitao njegov dokument, pošto ga je on napisao upotrebom kvaterniona. Jednakosti su potom, nezavisnojedan od drugog, uprostili Hajnrich Herc (Heinrich Hertz) i Oliver Hevisajd (Oliver Heaviside). Oni su izveli orginalan Rimanov rezultat: u slučaju praznog prostora jednakost za elektromagnetni potencijal može da se napiše kao

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

¹ Bernhard Riman (Bernhard Riemann, 1826. Breselenz – 1866. Selasca), značajan matematičar. Matematičar prekretnice, proučavao je takođe zakrivljen prostor, stvarajući mnoge matematičke i pojmovne osnove za opštu teoriju relativnosti, ali je umro veoma mlad.

Ova jednakost razvoja je talasna jednakost, pošto nju zadovoljavaju rešenja tipa (**Izazov 105e**)

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

što se obično naziva harmonijski **elektromagnetski talas u ravni**. Mi ćemo se podsetiti da je **talas** u fizici svaka neravnoteža koja se prostire (**Vol. I, strana 213**), a da je **harmoničan talas** talas nojeg opisuje kriva sinusoida.

Takav harmoničan elektromagnetski talas u ravni u vakuumu zadovoljava jednakost (62) za svaku vrednost **amplitudu** A_0 , **faze** δ i **ugaone učestanosti** ω , pod predpostavkom da ugaona učestanost i **talasni vektor** k zadovoljavaju odnos

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

Odnos $\omega(\mathbf{k})$ između ugaone učestanosti i talasnog vektora, takozvan **obrazac rasipanja**, glavna je osobna svakog tipa talasa, bilo da je zvučni talas, talas na vodi, elektromagnetski talas, ili talas bilo koje vrste.

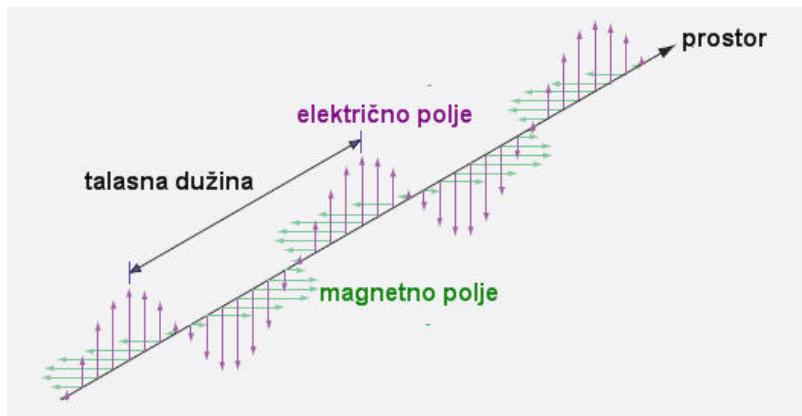
Poseban obrazac rasipanja (64) je **linearan** i podrazumeva **brzinu faze** c , brzinu kojom se kreću vrh i dolja talasa, određenu sa $c = \omega/k = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ što ponavlja rezultat Kirhofa i Rimana.

Eksperimenti u praznom prostoru potvrđuju da je brzina faze c nezavisna od učestanosti, amplitude ili faze talasa. Ova stalna brzina faze c prema tome karakteriše elektromagnetske talase i pravi razliku između njih i ostalih vrsta talasa u svakodnevnom životu.

ŠTA SU ELEKTROMAGNETNI TALASI

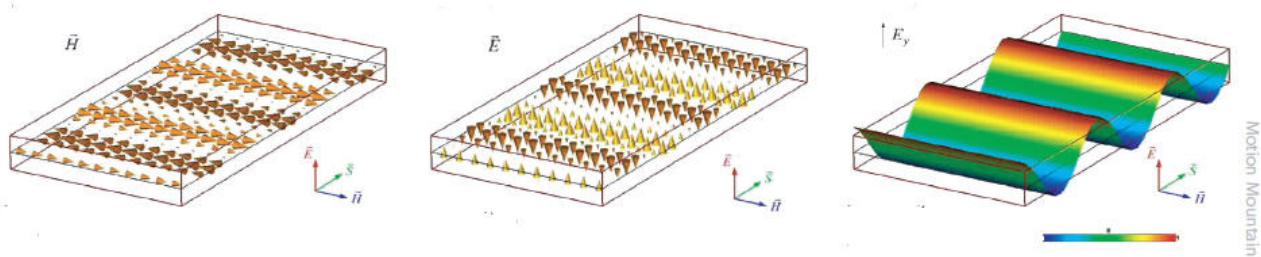
Da bi se dobila jasnija predstava o elektromagnetskim talasima, istražićemo njihove osobine. Talasna jednakost (62) za elektromagnetsko polje je **linearna** u polju; to znači da zbir dve dozvoljene situacije i sama je dozvoljena situacija. Matematički rečeno, svako **slaganje** dva rešenja takođe je rešenje. Prema tome, znamo da elektromagnetski talasi moraju ispoljavati interferenciju, kao što je to slučaj kod svih linearnih talasa.

Linearost takođe podrazumeva da dva talasa mogu da prođu jedn kroz drugi, a da se ne ometaju međusobno, kao i da elektromagnetski talasi mogu neometano da putuju kroz elektrostaticka polja.



Slika 50 Opšti sastav monohromatskog linearno polarizovanog elektromagnetskog talasa u ravni u određenom vremenskom intervalu.

Linearost isto tako znači da svaki elektromagnetski talas može da se opiše kao zbir harmoničnih, čisto sinusnih talasa, od kojih je svaki opisan jednakostu (65), sa sopstvenom učestanošću, amplitudom i fazom. Stoga ima smisla da se govori o **spektru** elektromagnetskih talasa, to jest, o opsegu učestanosti i njihovim osobinama. Najjednostavniji mogući elektromagnetski talas, harmonični talas u ravni, uz linearnu polarizaciju prikazan je na **slici 50**. Zapazite da su kod ovog najprostijeg tipa talasa električno i magnetno polje u fazi. (Možete li da dokažete ovo eksperimentalno i putem proračuna?). Površine koje stvaraju sve tačke maksimalne jačine polja paralelne su ravni, razdvojene (polovinom) talasne dužine; ove ravni se kreću duž smera prostiranja istom brzinom faze.



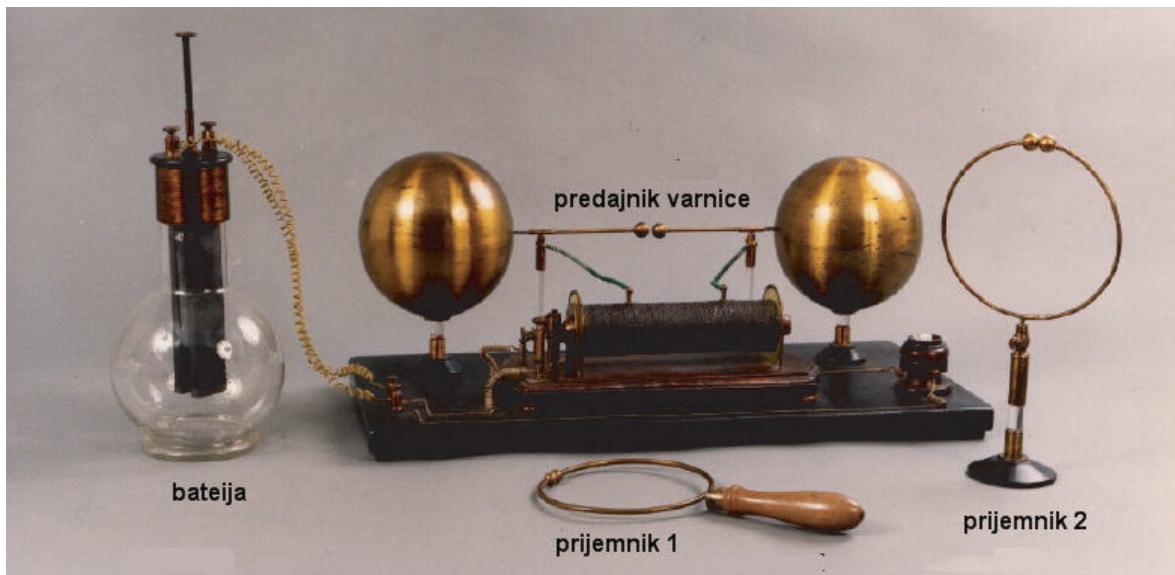
Slika 51 Monohromatski linearno polarizovani elektromagnetični talas u ravni pokazuje razvoj električnog polja, magnetnog polja i još jednom električnog polja u dodatnoj vizualizaciji. (Mpg films © Thomas Weiland)

EKSPERIMENTI SA ELEKTROMAGNETNIM TALASIMA



Slika 52 Heinrich Hertz (1857–1894).

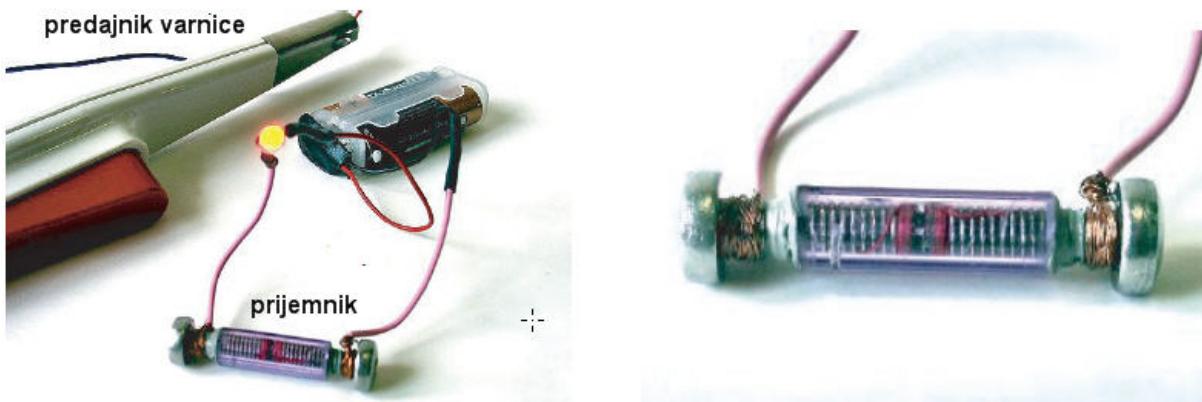
Pošto su Riman i Maksvel predvideli postojanje elektromagnetnih talasa, u godinama između 1885. i 1889., Hajnrih Herc (Heinrich Hertz¹) otkrio ih je i proučavao. On je izradio veoma jednostavan predajnik i prijemnik na 2 GHz, prikazane na *slici 53*. Takvi talasi koriste se i danas: bežični telefoni i poslednja generacija mobilnih telefona rade na ovoj učestanosti – premda u današnje vreme predajnici i prijemnici izgledaju nekako drugačije. Takvi talasi danas se nazivaju **radio talasi**, pošto fizičari obično sva polja sila koja se kreću nazivaju **radijacija**, nekako netačno preradivši ovaj pojam starih Grka, koji u originalu glasi “emisija svetlosti”.



Slika 53 Rekonstrukcija prvog predajnika i prijemnika elektromagnetnih talasa Hajnriha Hercia (© Fondazione Guglielmo Marconi).

¹ Hajnrih Rudolf Herc (Heinrich Rudolf Hertz, 1857. Hamburg – 1894 Bonn), bio je značajan teoretski i eksperimentalni fizičar. Jedinica za učestanost je nazvana po njemu. Uprkos ranoj smrti, Herc je bio centralna figura u razvoju elektromagnetizma, u objašnjavanju Maksvelove teorije i razvoju radio komunikacije. Više o njemu je navedeno u **Vol. I, strana 174**.

Danas se eksperiment Herca može ponoviti na mnogo prostiji način. Kako je prikazano na *slici 54*, sredstva od nekoliko eura dovoljna su za daljinski prekidač LED pomoću upaljača za gas. (Posle svake upotrebe treba blago kucnuti po kohereru kako bi se pripremio za sledeću upotrebu. Priklučenjem dugačke žice kao anrene i uzemljenja omogućavaju da se ovom napravom postiže prenos na rastojanje do 30 m.



Slika 54 Najjednostavniji mogući predajnik, upaljač za gas i žica, zajedno sa najjednostavnijim mogućim prijemnikom (kohererom), načinjenog od kućišta sa baterijama, LED i koherera napravljenog od držalje hemijske olovke, dva zavrtnja i malo gvozdenih opiljaka (© Guido Pegna).

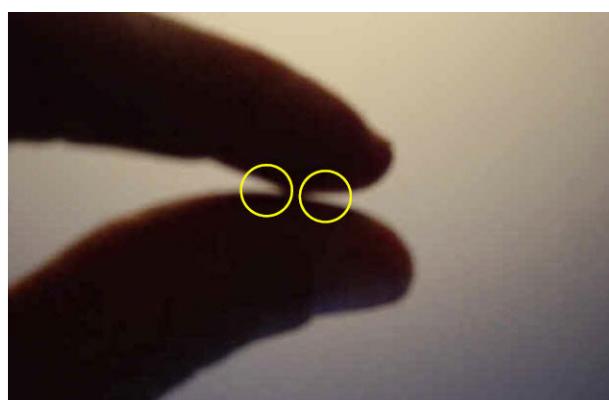
Herc je takođe izmerio i **brzinu** talasa koje je proizveo. Zapravo, vi takođe kod kuće možete da izmerite brzinu, uz pomoć rebra čokolade i (starije) kuhinjske mikrotalasne pećnice. Mikrotalasnna pećnica emituje radio talase na 2,56 GHz – ne toliko daleko od Hercove vrednosti. Unutar pećnice ovi talasi obrazuju stopeći talas. Samo stavite rebro čokolade (ili komad sira) u pećnicu i isključite prekidač čim počne topljenje. Primetićete da se čokolada topi u pravilno razmaknutim tačkama. Ove tačke su razmaknute tačno za polovinu talasne dužine. Brzina svetlosti dobija se prosti kao proizvod izmerene vrednosti talasne dužine i učestanosti i radio talasa.

Ako vas ovo nije uverilo, možete da izmerite brzinu i direktno, tako što ćete pozvati prijatelja koji se nalazi na drugom kontinentu, ako ste sigurni da da koristite satelitsku vezu (odaberite jeftinog provajdera). Postoji oko pola sekunde dodatnog kašnjenja između kraja vaše rečenice i odgovora prijatelja, u poređenju sa normalnim razgovorom. U toj polovini sekunde signal putuje do geostacionarnog satelita, ponovo dole i vraća se na isti način. Ova polovina sekunde daje brzinu $c \approx 4 \cdot 36.000 \text{ km}/0,5 \text{ s} \approx 3 \cdot 10^5 \text{ km/s}$, što je sasvim blizu preciznoj vrednosti. Radio amateri koji svoje signale šalju preko odbijanja sa Meseca mogu da ponove ovaj eksperiment i da postignu veću preciznost.

Ukratko: elektromagnetni talasi postoje i kreću se brzinom svetlosti.

SVETLOST JE TALAS

Jednakost elektromagnetskog talasa nije ograničena samo na radio talase; mora da se ispriča još zanimljivija priča. Pre svega, jednakost talasa potvrđuje raniju predpostavku da je sama svetlost elektromagnetski talas, iako uz mnogo višu učestanost i mnogo kraću talasnu dužinu nego radio talasi. Mi ćemo ovo proveriti u dva koraka: prvo ćemo pokazati da je svetlost talas, a zatim ćemo pokazati da je on elektromagnetski.



Slika 55 Linije rasipanja mogu da se vide između prstiju, ako se dovoljno pažljivo gleda (© Chuck Bueter)

Prvi koji je tvrdio da je svetlost (jedna vrsta) talasa, bio je, oko 1678.godine, značajan fizičar Kristijan Hajgens (Christiaan Huygens¹). Vi možete da dokažete da je svetlost talas sa vašim sopstvenim prstima. Jednostavno postavite vašu ruku jedan ili dva centimetra ispred vašeg oka, pogledajte prema nebu kroz procep između srednjeg prsta i kažiprsta i pustite da vam se dva prsta skoro dodirnu. Videćete da veliki broj tamnih linija prolazi kroz procep. Ove linije su uzorci interferencije koju stvara svetlost iza proreza koji prave vaši prsti. **Slika 55** prikazuje primer. **Interferencija** je ime koje je dobio ovaj efekt i uzorak amplitude koji se pojavljuje kada se više talasa saberi.² Uzorci interferencije zavise od razmaka između prstiju. Ovaj eksperiment, prema tome, omogućava vam da procenite talasnu dužinu svetlosti, pa zato, ako poznajete brzinu, i njenu učestanost. Možete li to da uradite? (**Izazov 107s**).



Slika 56 Primarna i sekundarna duga i prekobrojne duge isod primarnog luka. (© Antonio Martos i Wolfgang Hinz).

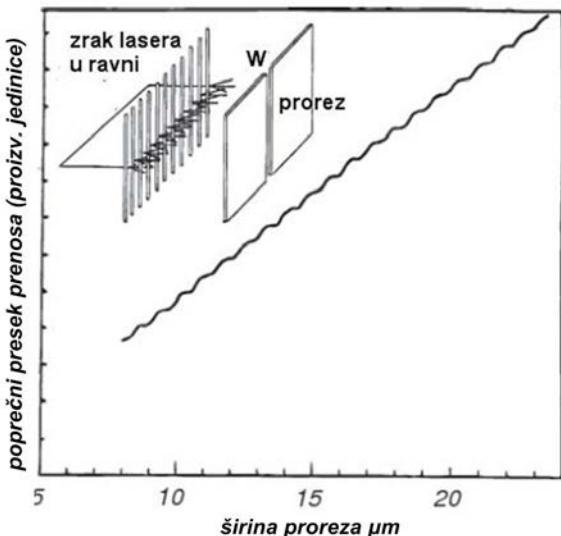
Istorijski, drugačiji efekt je bio odlučujući da uveri istraživače da je svetlost talas: veći broj duga, prekobrojne duge ispod glavne ili primarne duge. Ako pogledamo pažljivo dugu, ispod glavnog crveno-žuto-zeleno-plavo-ljubičastog luka primetićemo slabije dodatne zeleno-plavo-ljubičaste lukove. (**Ref. 59**). U zavisnosti od jačine duge, može se primetiti više ovih prekobrojnih duga. One nastaju usled interferencije svetlosti uzrokovane kapima vode, kao što je pokazao Tomas Jung (Thomas Young³) oko 1803. godine. (**Strana 102**). Zaista, rastojanje na kojoj se ponavljaju dodatne duge zavisi od poluprečnika i rasporeda prosečne kapi vode koje su je formirale. (**Ref. 60**). (Detalji o normalnim dugama biće date u daljem tekstu.) (**Strana 97**). I prekobrojne duge i Tomas Jung bili su odlučujući da uvere ljude da je svetlost talas. Izgleda da u ono vreme naučnici ili nisu verovali sopstvenim očima i prstima, ili nisu verovali bilo čemu.

Postoji mnogo drugih načina na koje se može da načini vidljivim talasni karakter svetlosti. Možda je najlepši eksperiment kojeg je izveo tim holandskih fizičara 1990. godine. (**Ref. 61**). Oni su jednostavno merili svetlost koja se prenosi kroz **prorez** u metalnoj ploči. Ispada da jačina svetlosti koja se prenosi zavisi od širine proreza. Njihov iznenadujući rezultat prikazan je na **slici 57**. Možete li objasniti poreklo neočekivanih skokova jačine u krivoj? (**Izazov 108ny**).

¹ Kristijan Hajgens (Christiaan Huygens, 1629. 's Gravenhage – 1695. Hofwyck) bio je jedan od glavnih fizičara i matematičara svog vremena. Napisao je uticajne knige iz teorije verovatnoće, mehanizmima časovnika, optike i astronomije. Između ostalih dostignuća, Hajgens je pokazao da se maglina Orion sastoje od zvezda, otkrio je Titan, mesec Saturna, i pokazao je da se prsten oko Saturna sastoje od stenja. (Što je u suprotnosti od samog Saturna čija je gustina manja od vode.)

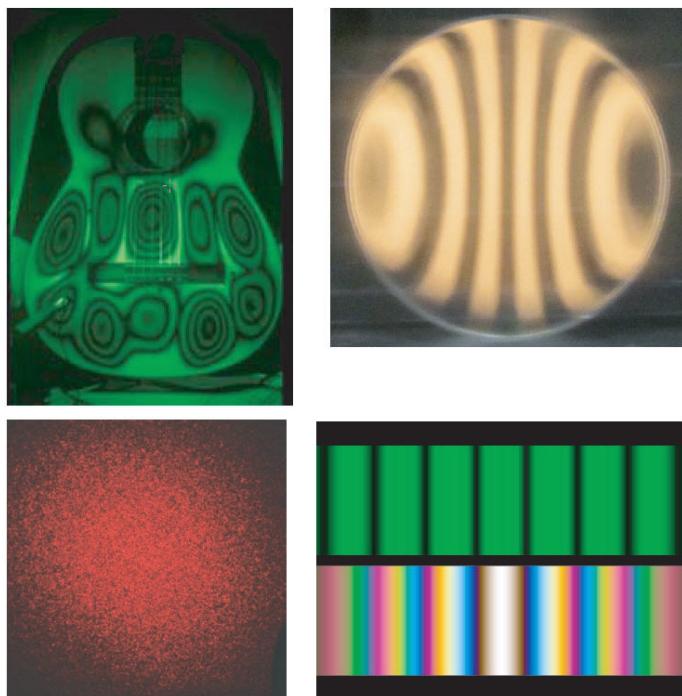
² Kuda je otisla energija u uzorku interferencije? (**Izazov 106s**)

³ Tomas Jung (Thomas Young, 1773 Milverton – 1829. London), sa dve godine je čitao bibiju, sa četiri je govorio latinski, doktor medicine, postao je profesor fizike. Uveo je pojam **interferencija** u optiku, objasnio Njutnovе prstenove i veći broj duga; bio je prva osoba koja je odredila **talasnu dužinu svetlosti**, pojam kojeg je takođe uveo, i njenu zavisnost od boje. On je bio prvi koji je izveo trobojno objašnjenje vizije oka, a posle čitanja o otkriću polarizacije, objasnio je svetlost kao transverzalni talas. Ukratko, Jung je otkrio skoro sve što se uči o svetlosti u srednjoj školi. Bio je svestrani talent: radio je takođe na dešifrovanju hijeroglifa, proučavao jezike i uveo pojam "indo-evropski", istraživao brodogradnju i mnogo inženjerskih problema. Saradivao je sa Fraunhoferom i Fresnelom. Njegove ideje u Britaniji nisu bile prihvateće sve dok Njutnovi sledbenici nisu slomili sva suprotna gledišta. Pri kraju njegovog života, Fresnel i Helmholc predstavili su konačno njegove rezultate zajednici fizičara.



Slika 57 Jačina svetlosti prenesena kroz prorez u zavisnosti od njegove širine. (© Nature).

Interferencija svetlosti je uobičajen efekt. Ona se obično sagledava kada se koiste laseri. Nekoliko primera je prikazano na *slici 58*. I interferencija bele svetlosti i laserska interferencija koristile su se za merenja; u sadašnje vreme cele industrije koriste efekte interferencije. S obzirom na uzorak interferencije kao što je ona zelena na *slici 58*, možda ćete poželeti da izračunate razmak između linija, obzirom na rastojanje s , boju i rastojanje d do ekrana. (Ovaj eksperiment je iskorišćen da se prvi put odredi talasna dužina svetlosti.) (*Izazov 109s*).



Slika 58 Neki uzorci interferencije: interferencija koju stvara sviranje na gitari u laserskom hologramu koji pokazuje kako tela osciluju, interferencija dobrog paraboličkog ogledala prećnika 27 cm u teleskopu, pegasti uzorak lasera na gruboj površini i uzorak rasipanja koji stvaraju dva paralelna uska proresa osvetljena zelenom i belom svetlošću, respektivno. (© Bernard Richardson, Cardiff University, Mel Bartels, Epzawl i Dietrich Zawischa).

Sledeći dokaz da je svetlost talas je pronalazak polarizacije svetlosti. Mi ćemo ga ukratko objasniti. Brojni drugi eksperimenti u stvaranju, otkrivanju i merenju talasa svetlosti izvedeni su između sedamnaestog i dvadesetog veka. Na primer, 1800. godine Viljem Heršel (William Herschel) otkrio je *infracrvetu svetlost* koristeći prizmu i termometar (Možete li pogoditi zbog čega?) (*Izazov 110s*). Godine 1801. Johan, Vilhelm Riter (Johann Wilhelm Ritter, 1776. Samitz – 1810. München), više no živahan lik naturalnog Romantizma, otkrio je ultraljubičastu svetlost koristeći srebrophlorid (AgCl) i prizmu. Savremene kamere mogu da snimaju infracrvenu svetlost, kao što je lepo prikazano na *slici 59*.

Kajem dvadesetog veka postala je moguća lepa potvrda oscilacija svetlosnih talasa. Korišćenjem potpuno prefinjenih eksperimenata, istraživači su neposredno izmerili učestanost osciliranja vidljivog opsega svetlosti. ([Ref. 62](#)). Oni su se zapravo snašli kako da izbroje koliko često svetlosni talas osciluje tokom jedne sekunde! Vrednost učestanosti bila je tačno prema predviđanjima, između 374 i 750 THz. Vrednost učestanosti je toliko velika da je njeno merenje dugo vreme nije bilo moguće. Ali sa ovim savremenim eksperimentom obrazac rasipanja svetlosti $\omega = ck$ bio je potvrđen u svim detaljima i uz veliku preciznost. ([Ref. 63](#)).

Rezultat ovog eksperimenta je: talas svetlosti, kao i svi ostali talasi, može da se razlikuje prema njegovoj vrednosti talasne dužine i učestanosti. Najvažnije kategorije nabrojane su u [Tabeli 14](#) na strani 85. Za vidljivi do svetlosti vrednosti talasnih dužina nalaze se između 0,4 μm, što odgovara ljubičastoj, i 0,8 μm, što odgovara crvenoj boji. Talasnu dužinu vidljive harmonične svetlosti određuje njena *boja*.

Svetlost je talas. To takođe prekida raspravu koja je dovela do žučnih rasprava u Srednjem veku: Koliko može da bude uzan zrak svetlosti.



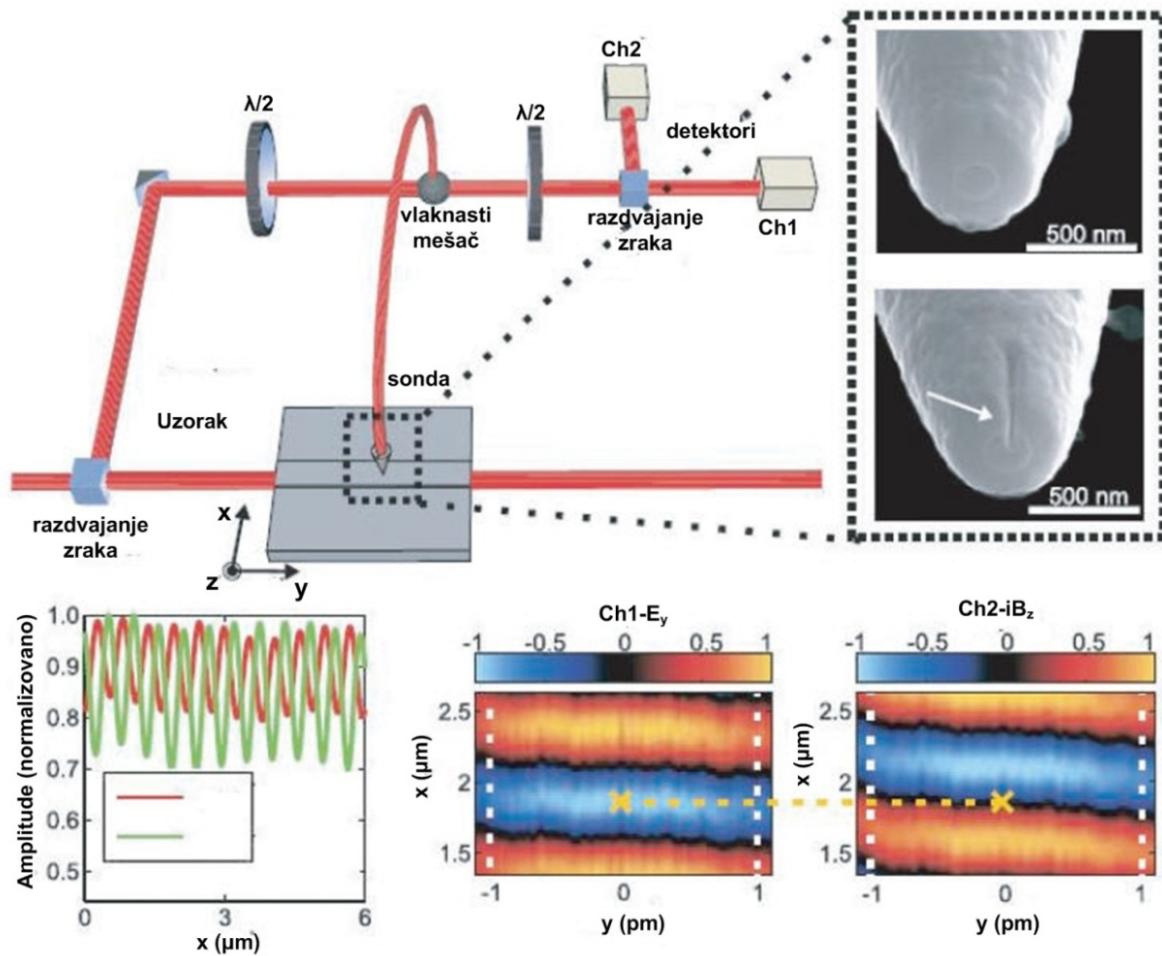
Slika 59 Ista duga u vidljivoj i infracrvenoj pokazuje kako infracrvena dolazi pre crvene. (© Stefan Zeiger).

SVETLOST I DRUGI ELEKTROMAGNETNI TALASI

Eksperimenti, pomenuti do sada, pokazuju da elektromagnetni talasi postoje, da se kreću istom brzinom kao i svetlost i da je svetlost talas. Da se dokaže da su talasi svetlosti zaista elektromagnetni, to je već malo teže. Najubedljiviji dokaz bi bio da se ponovi Hercov eksperiment za svetlost. U Hercovom eksperimentu, prikazanom na [slici 53](#) ([strana 79](#)), prijemnik je jednostavan otvoren metalni krug; kada talas – preciznije njegovo magnetno polje – stigne, stvara se varnica i talas je time otkriven.

U skoro neverovatnom podvigу miniturizacije, istraživačka grupa Kobus Kajpera (Kobus Kuiper) je 2009. godine odlučila sa napravi metalni prsten mnogo manji od mikrometra i da ponovi Hercov eksperiment za svetlost. ([Ref. 64](#)). Prikaz njihovog eksperimenta prikazan je na [slici 60](#). Oni su mogli jasno da raspoznaaju maksimum i minimum talasa, kao takođe i njegovu polarizaciju. Oni su prema tome pokazali da je svetlost elektromagnetni talas na potpuno isti način kao što je to Herc uradio za radio talase.

Naravno, ljudi u 19. veku imali su manje tehnologije na raspolaganju i nije ih bilo lako uveriti. Oni su tražili druge načine da bi pokazali da je svetlost elektromagnetne prorode. Sada, pošto su jednakosti evolucije elektrodinamičkog polja linearne samo strano električno ili magnetno polje ne utiče na kretanje svetlosti. ([Izazov 111e](#)). S druge strane, znamo da se elektromagnetni talasi emituju samo od ubrzavanih nanelektrisanja, i ova sva svetlost je emitovana iz materije. Iz toga sledi da je materija puna elektromagnetnih polja i ubrzavanih nanelektrisanja. Za uzvrat, to podrazumeva da uticaj materije na svetlost može da se razume preko njenih unutrašnjih elektromagnetnih polja, a posebno da podvrgavanje materije *spoljnom* elektromagnetnom polju treba da promeni svetlost koju materija emituje, način na koji je materija u interakciji sa svetlošću, ili uopšteno, osobine materije u celosti.



Slika 60 Eksperiment mernja električnog i magnetnog polja svetlosti. Gore levo: opšta naprava; gore desno: antena prikazana strelicom; dole: podaci merenja (© Kobus Kuipers)

Traženjem efekta elektriciteta i magnetizma na materiju bio je glavni napor fizičara preko sto godina. Na primer, električno polje utiče na prenos svetlosti u ulju, efekt koji je otkrio Džon Ker (John Kerr) 1875. godine.¹ Isto tako otkriće da izvesni gasovi promene boju kada se podvrgnu dejstvu polja, doneli su fizičarima nekoliko Nobelovih nagrada. Tokom vremena, nađeno je još više uticaja materije izložene polju na svetlosne osobine. Opširan pregled je naveden u daljem tekstu ([strana 168](#)). Pokazalo se da osim nekoliko izuzetaka, svi efekti mogu da se opišu lagranžijanom elektromagnetizma (48), ili ekvivalentno, Maksvelovim jednakostima (52) ([strana 68](#)). Ukratko, klasična elektrodinamika zaista objedinjava opise elektriciteta, magnetizma i optike; sve pojave u ovim oblastima, od duge do radija, od groma do elektromotora, nalazi se da su različiti vidovi razvoja elektromagnetskog polja.

Posle dva veka istraživanja, postalo je jasno da svetlost i radio talasi čine samo mali deo potpunog **spektra elektromagnetskih talasa**, koji sadrži talase od najmanje mogućih do najvećih talasnih dužina. Ceo spektor je dat u tablici koja sledi.

POLARIZACIJA ELEKTROMAGNETNIH TALASA

Električno polje u svetlosti ili u elektromagnetskom talasu izgleda kao amplituda talasa vode, uopšteno u tri dimenzije, kao što prikazuju [slika 50](#) na [strani 78](#) i [slika 51](#) na [strani 79](#). Isto važi i za magnetna polja, a dva polja su normalna međusobno. Tu iskršava jedno pitanje o svetu i ostalim elektromagnetskim talasima: u kojem prostornom pravcu se događaju oscilacije? Odgovor se krije u parametru A_0 u jednakosti (63) ali je prikazan na [slici 50](#) i [slici 51](#). Uopšteno govoreći, polja u elektromagnetskom talasu osciluju u smerovima koji su upravni na njegov smer kretanja. Prema tome, sledi

- Čak i pri jednakim učestanostima i fazama talasi se mogu razlikovati: oni mogu imati različite pravce polarizacije.

¹ Džon Ker (John Kerr, 1824. Ardrossan – 1907. Glasgow), bio je matematičar i fizičar, a takođe prijatelj i saradnik Vilijama Tomsona (William Thomson)

TABELA 14 Elektromagnetni spektar

Učestanost	Talasna dužina	Naziv	Glavne osobine	Pojava	Primena
$3 \cdot 10^{-18}$ Hz	10^{26} m	Donja granica učestanosti			videti u delu o kosmologiji
< 10 Hz	> 30 m	kvazistatička polja			međugalaktička, galaktička, zvezdana jata, mozak i električne rive
		rasio talasi		elektronski uređaji	
10Hz – 50 kHz	30 Mm – 6 km	ELW	obilaze Zemlju, prodiru u vodu i metal	nervne ćelije, elektromehanički uređaji	prenos snage, komunikacije kroz metalne zidove i sa podmornicama www.vlf.it
50 – 500 kHz	6 km – 0,6 km	LW	prate zakrivljenost Zemlje, osećaju je nervi (“loše vreme”)	emituju ih oluje	radio komunikacije, telegrafija, induktivno zagrevanje
500 – 1500 kHz	600 m – 200 m	MW	odbijaju se od noćnog neba		radio
1,5 – 30 MHz	200 m – 10 m	SW	obilaze Zemlju ako se odbiju od jonosfere, uništavaju balone sa toplim vazduhom	emituju ih zvezde	radio prenos, radio amateri, špajunaža
15 – 150 MHz	20 m – 2m	VHF	omogućava rad predajnika sa baterijama	emituje ih Jupiter	daljinsko upravljanje, zatvorene mreže, TV, radio amateri, radio navigacija, vojska, policija, taksi službe
150 – 1500 MHz	2m – 0,2 m	UHF	omogućavaju rad predajnika sa baterijama, linija vidnog polja		radio voki-toki, TV, mobilni telefoni, kablovski internet, satelitske komunikacije, merač brzine bicikle
Mikrotalasi					
1,5 – 15 GHz	20 cm – 2 cm	SHF	omogućavaju rad predajnika sa baterijama, linija vidnog polja, apsorbuje ih voda	noćno nebo, emituju ih atomi vodonika	radio astronomija, kuvanje (2,45 GHz), telekomunikacije, radar
15 – 150 GHz	20 mm – 2 mm	EHF	omogućavaju rad predajnika sa baterijama, linija vidnog polja, apsorbuje je voda		
Infracrvena			omogućavaju noćno osmatranje	emituje ih svaki topao objekt	satelitske fotografije Zemlje, astronomija
0,3 – 100 THz	1000 – 3 μ m	IRC ili daleka infracrvena		sunčeva svetlost, živi organizmi	gledanje kroz odeću, koverte i zube
100 – 210 THz	3 μ m – 1,4 μ m	IRB ili srednja infracrvena		sunčeva svetlost	komunikacije kroz optički kabel za telefon i kablovsku TV
210 – 384 THz	1400 – 780 nm	IRA ili bliska infracrvena	prodire mekoliko cm u ljudsku kožu	sunčeva svetlost, zračenja toplih tela	lečenje rana, reumatizma, sportska psihoterapija, skriveno osvetljenje
Vidljiva svetlost					
375 – 750THz	800 – 400 nm	Svetlost	ne apsorbuje ih vazduh (mnogo), vidi je oko (do kraja 900 nm pri dovoljnoj snagi)	grejanje (“topla svetlost”), laseri i hem. reakcije, (oksidacija fosfora), svici (hladna svetlost)	određivanje pravca, povećanje fotosinteze u poljoprivredi, fotodinamička

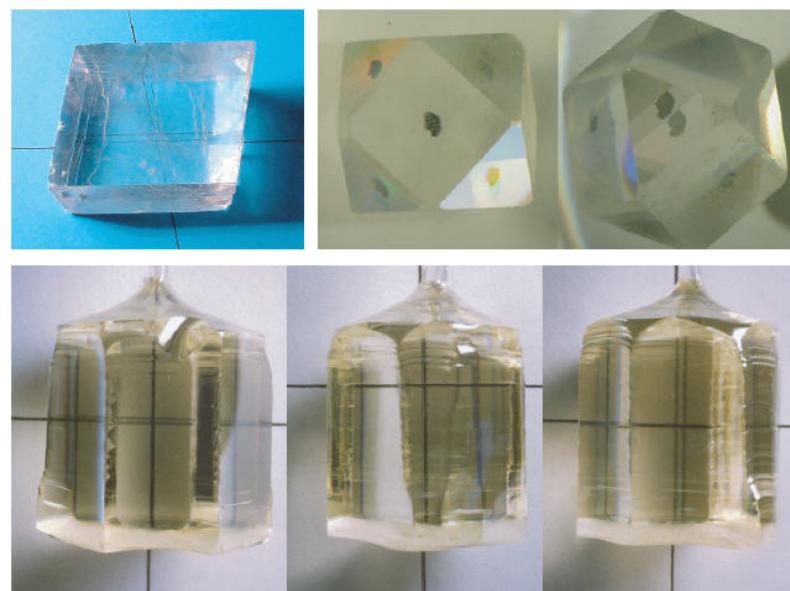
384 – 484 THz	780 – 620 nm	Crvena	prodire u meso	krv	signali alarma, koristi se za snimanje dojke (Ref. 65)
	700 nm	Laboratorija	primarno crvena	filtrirane rentgen cevi	referentna boja za štampu, bojenje, osvetljenje i prikazivanje
484 – 511 THz	620 – 587 nm	Narandžasta		razno voće	privlači ptice i insekte
511 – 525 THz	587 – 571 nm	Žuta		većina cbveća	privlači ptice i insekte, najbolja pozadina za čitanje crnog teksta
525 – 614 THz	571 – 488 nm	Zelena	maksimalna osetljivost oka	alge i biljke	najveći odziv svetlosnog osvetljaja za ljudske oči za energiju svetlosti (“osećaj osvetljenosti”)
614 – 692 THz	546,1	Laboratorija	primarna zelena	živila sijalica	referentna boja
	488 – 433 THz	Plava		živila sijalica, nebo, drago kamenje voda	referentna boja
	435,8 THz	Laboratorija	primarna plava	živila sijalics	referentna boja
692 – 789 THz	433 – 380 THz	Indigo, ljubičata		cveće, drago kamenje	
Ultraljubičasta					
789 – 952 THz	380 – 315 nm	UVA	prodire 1 mm u kožu, koža crni, proizvodi vitamin D, podržava imunološki sistem, izaziva rak kože, oštećuje soćivo oka.	emituje je Sunce, zvezde i plamen	vide je neke ptice, proizvodnja integrisanih kola
0,95 – 1,07 PHz	315 – 280 nm	UVB	prodire 1 mm u kožu, koža crni, proizvodi vitamin D, podržava imunološki sistem, izaziva rak kože, oštećuje soćivo oka, uništava DNK	emituje je Sunce, zvezde i plamen	vide je neke ptice, proizvodnja integrisanih kola
1,07 – 3,0 PHz	280 – 100 nm	UVC	obrazuje izotope kiseonika u vazduhu, uništava bakterije, prodire 10 μm u kožu	emituje je Sunce, zvezde i elektro-lučno zavarivanje	dezinfekcija, prečišćavanje vode, odlaganje otpada, proizvodnja integrisanih kola
3,0 – 24 PHz	100 – 13 nm	EUV			mape neba, silicijumska litografija
X – zraci			prodiru kroz materijale	emituju je zvezde, plazme i crne rupe	snimanje ljudskih organa
24 – 240 PHz	13 – 1,3 nm	meki X - zraci	prodiru kroz materijale	zračenje sinhrotrona	snimanje ljudskih organa
> 240 PHz ili > 1 keV	< 1,2 nm	tvrdi X – zraci	prodiru kroz materijale	emituju se kada brzi elektroni udare materiju	kristalografija, određivanje strukture
>12 EHz – ili >50 keV	< 24 pm	γ – zraci	prodiru kroz materijale	radioaktivnost, kosmički zraci	hemijske analize, dezinfekcija, astronomija
2 · 10 ⁴³ Hz	≈ 10 ⁻³⁵ m	Plankova granica		pogledati poslednji volumen ove serije	



Slika 61 Antene za vodoravno i uspravno polarizovane elektromagnetne talase (© Martin Abegglen, K. Krallis)

Na primer, polarizacija radio predajnika određuje da li će antena radio prijemnika da bude vodoravna ili uspravna, kao što prikazuje **slika 61**. Za sve elektromagnetne talase polarizacija je određena, prema dogovoru, orientacijom vektora **električnog** polja, pošto posebno svi efekti elektromagnetskog talasa nastaju usled električnog polja.

Polarizacija se lako postiže i za svetlost, na primer prosvetljavanjem kroz rastegnut plastični film, koji se naziva polarizator, ili korišćenjem stakla, vode ili naročitog kamena. Polarizaciju je otkrio 1808. godine Etjen Luj Malus (Etienne Louis Malus, 1775. Paris – 1812. Paris). Malus je otkrio polarizaciju kada je posmatrao čudne dvostrukе slike koje proizvodi kalcit, providan kristal koji se nalazi u mnogim mineralima. Na **slici 62** prikazana su dva primera. Kalcit (CaCO_3) razdvaja zrak svetlosti i na dva dela – on je dvoloman – i polarizuje ga različito. To je razlog što kalcit – ili feldspat (KAlSi_3O_8), koji ispoljava isti efekt – predstavljaju deo svake zbirke minerala. Ako budete ikada držali u ruci komad providnog kalcita, pogledajte kroz njega na nešta što je napisano na papiru, pa okrećite kristal oko uspravne ose. (**Izazov 112ny**). Njegove osobine su zanimljive. (Možete li pokazati da **trolovnost**, koja se određuje kao pojavljivanje tri slike, ne može da postoji?) (**Izazov 113d**).



Slika 62 Dvolomnost u kristalima: **kalcit** postavljen na linije koje se seku (gore levo, veličina kristala je oko 4 cm), **rutil** koji leži na tački od mastila snimljen duž optičke ose (u sredini) i pod uglom u odnosu na nju (gore desno, veličina kristala oko 1 cm) i osmougaoni kristal **natrijum vandat** dopiran manganom, koji pokazuje tri različita ponašanja (dole, prečnik kristala 1,9 cm) (© Roger Weller/Cochise College, Brad Amos, Martin Pietralla).

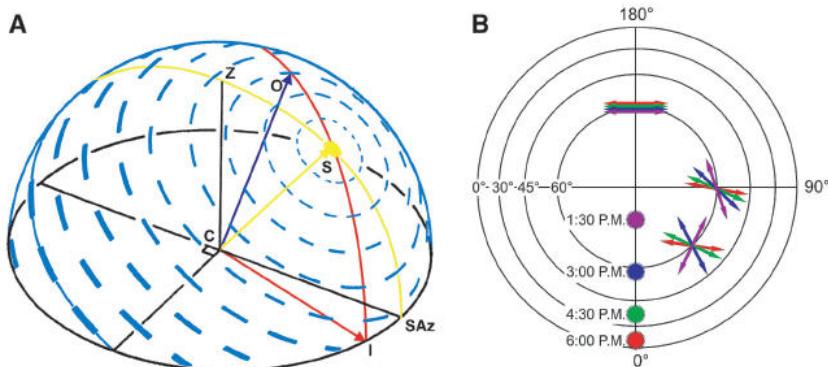
Kada je Malus otkrio polarizaciju svetlosti, još uvek nije znao da je svetlost elektromagnetne prirode. Ali je konačno postavio talasnu prirodu svetlosti.

Svetlost sa neba – ne ona sa Sunca – delimično je polarizovana. Polarizacija se dogodila kada su molekuli u vazduhu rasuli svetlost

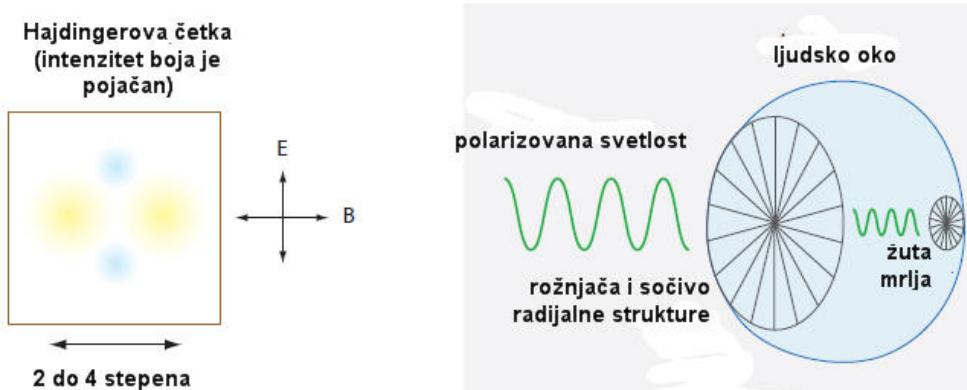
Polarizacija je upravna na smer prema Suncu, kao što prikazuje [slika 63](#). ([Ref. 66](#)). Oblik se lako pamti pomoću sledeće povezanosti: **duga je polarizovana svuda u tangencijalnom smeru**. Fotografi znaju da je nebo uglavnom polarizovano u pravcu sever-jug kada Sunce izlazi ili zalazi. Ova činjenica može da napravi crvenilo ili da digitalni časovnik izgleda crn kada se posmatra izjutra u pravcu severa ili juga – pod izvesnim uglom posmatranja. Isto tako je sunčeva svetlost ispod vode delimično polarizovana.

Mnogi insekti, pauci, neke ptice i neki račići (škampi) mogu svojim očima da osete polarizaciju. Pčele i mnogi drugi insekti koriste polarizaciju da bi odredili položaj Sunca, čak i kada je skriveno oblacima. i koriste taj efekt za navigaciju. ([Ref. 67](#)). Neki insekti iz vrste *Scarabeus* koriste čak za navigaciju i polarizovanu mesečinu kako bi razlikovale površinu vode od iluzije. (Možete li da odredite kako?) ([Izazov 114s](#)).

Godine 1844. mineralog Vlhelm Hajdinger (Wilhelm Haidinger, 1795. Vienna – 1871. Dornbach) otkrio je da postoji način da se posmatra polarizacija svetlosti ljudskim okom bez pomagala. ([Ref. 68](#)). Najbolji način da se zapazi taj efekt je da se posmatra sa daljine od otprilike dužine jedne ruke beli LCD ekran i lagano naginje glava. Primećuje se žuti ili žuto-plavi uzorak širok oko dva prsta, koji nadvišava beli ekran i izuzetno izaziva nesvesticu. Ovaj uzorak se naziva **polarizacijska četka** ili **Hajdingerova četka**. Gruba ilustracija je prikazana na [slici 64](#). Slab efekt nestaje posle nekoliko sekundi ako glava prestane da se obrće duž linije posmatranja. Hajdingerova četka nastaje usled dvolomnosti rožnjače i sočiva u ljudskom oku, zajedno uz morfologiju žute mrlje (*Macula lutea*) unutar oka. ([Ref. 69](#)) Rožnjača deluje kao radikalno orijentisan polarizator zavisan od boje, pri čemu žuta mrlja deluje kao radikalno orijentisan analizator. Ukratko, ljudsko oko je zaista sposobno da vidi smer u kome osciluju električno i magnetno polje svetlosti.



Slika 63 Polarizacija dnevnog svetla na vedrom nebu i elevaciji Sunca od 53° . Orientacija i debljina plavih crtica prikazuju orijentaciju i stepen polarizacije električnog polja kako vidi posmatrač u centru C polulopte. Orientacija je uvek upravna na veliki krug (crven) koji je određen spajanjem tačke posmatranja O na nebu sa položajem Sunca S. SAZ pokazuje solarni azimut Sunca. Desno: projekcija iz zenita solarne elevacije i orijentacije električnog polja za različite boje svetlosti u četiri vremena 1. avgusta, na $23,4^\circ$ N i $5,2^\circ$ E. Krugovi predstavljaju elevaciju, a prave linije azimut. Uzorak kružne polarizacije neba koristili su fotografi za ispravku fotografija neba i insekti i ptice za navigaciju (© Keram Pfeiffer/Elsevier).

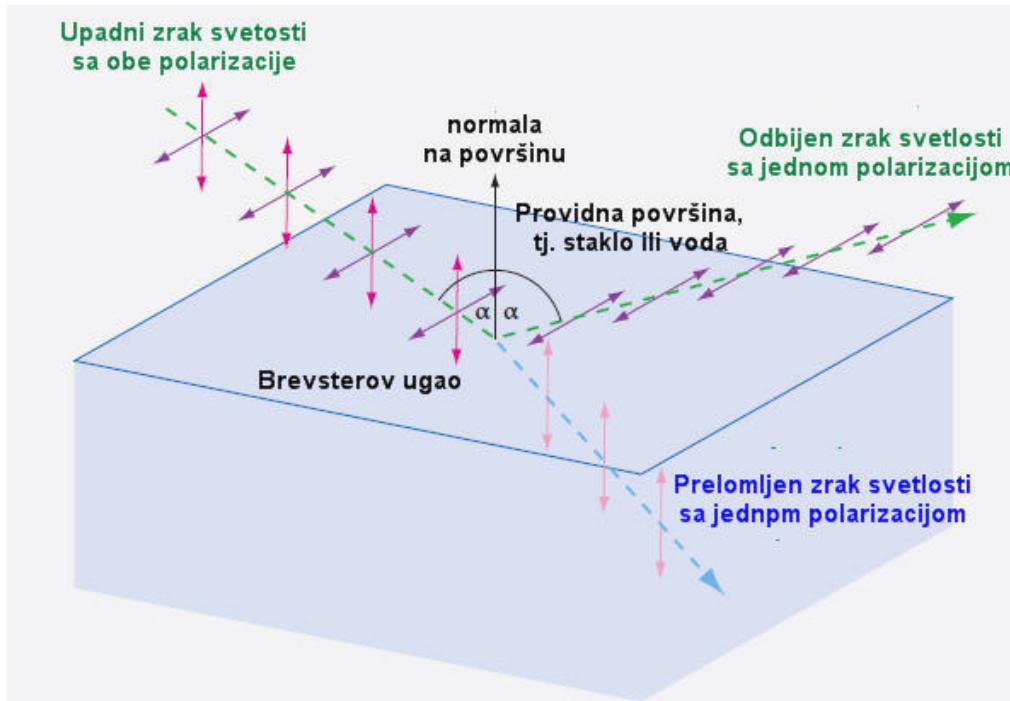


Slika 64 Hajdingerova četka i njeno stvaranje u ljudskom oku.

Obzirom da je žuta Hajdingerova četka je isto tako vidljiva i na plavom nebu, dokazujući da je vazduh čist. (Ustvari, lako se utopi višestrukim rasipanjem, pa prema tome obezbeđuje test providnosti atmosfere.) Na nebu je Hajdingerova četka jedva veličine nokta na palcu ispružene ruke. (Ugaona veličina je ista kao

ugaona veličina žute mrlje. Žuti krak krsta je visoko na nebu, usmerena ka Suncu, ako gledate oko 90° od njega. Da biste je jasno videli, postavite polarizator (ili polarizovane sunčane naočare) uspravno i gledajte kroz njega, a zatim ga obrćite oko linije pogleda.

Kada se polarizovana svetlost usmeri na providan medijum, odnos odbijene i propuštenе svetlosti jako zavisi od polarizacije. Jačina propuštenе svetlosti može da bude blizu nule za neke kritične situacije uglova i polarizacije. Kada su inženjeri automobilske kompanije Mercedes Benc zaboravili na ovo, to je kompaniju koštalo milione eura. Jedan od njihovih modela imao je iza vetrobranskog stakla sentor koji je javljaо da li je dan ili noć. Fotodiodni davač je radio ispravno, osim kada su vremenski uslovi bili izuzetno dobri, sa plavim nebom i bez oblaka; u takvom slučaju davač je javljaо na izlazu da je "noć". Misterija je rešena kada su ljudi prepoznali da kada je geometrija bila u blizini Brevsterovog (Brewster) ugla, kakav je pri ovim vremenskim uslovima, svetlost sa neba je polarizovana i sadrži malu količinu infracrvene svetlosti, na koju je – pogrešno odabrana – fotodiода najoštetljivija. Kao posledica toga, desetine hiljada automobila moralo je da bude prepravljen.

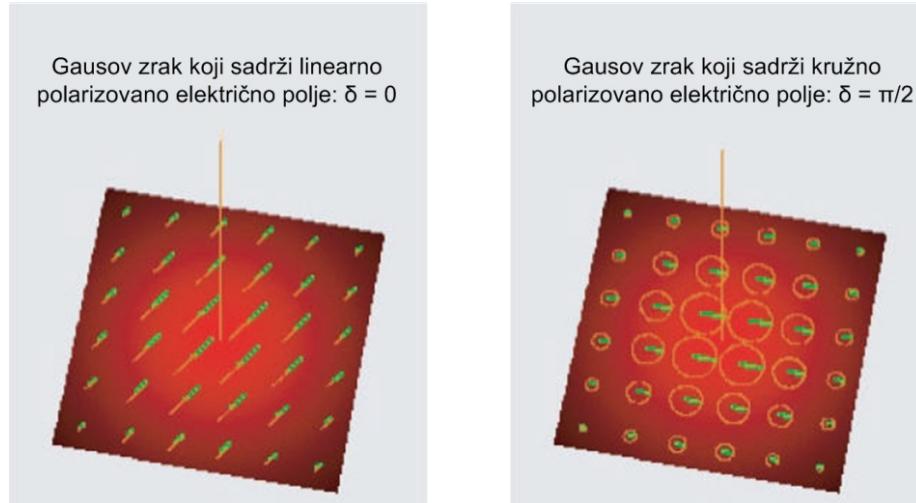


Slika 65 Kod svakog providnog materijala, pri takozvanom Brevsterovom uglu, odbija se samo horizontalno polarizovan zrak svetlosti; vertikalno polarizovan zrak tada je u potpunosti prelomljen. Brevsterov ugao je veličina koja zavisi od materijala. Za većinu talasnih dužina svetlosti on za vodu iznosi 53° , a za staklo $56(1)^\circ$, mereno od normale na površinu.

Zapazite da sve moguće polarizacije svetlosti čine kontinualni skup. Međutim, opšti talas u ravni može da se posmatra kao da je sastavljen od dva upravna, linearno polarizovana talasa različitih amplituda i različitih faza. Matematički posmatrano, svi linearno polarizovani elektromagnetični talasi koji imaju istu učestanost i isti smer mogu se posmatrati kao dvodimenzionalni prostorni vektor.

Svetlost može da bude i **nepolarizovana**. Nepolarizovana svetlost je mešavina svetlosti različitih polarizacija. Svetlost sa Sunca i od drugih toplih izvora obično je nepolarizovana, zbog Braunovog kretanja u izvoru emitovanja. **Delimično** polarizovana svetlost je mešavina polarizovane i nepolarizovane svetlosti.

Ukratko, za talase u trodimenzionalnom prostoru postoje dve osnovne vrste polarizacija. Najčešće se svrstavaju u horizontalnu i vertikalnu polarizaciju, ili, drugim pojmovima, u paralelnu i upravnu polarizaciju. Opšte polarizovan talas je složen od ova dva osnovna stanja. Ona su takozvana stanja **linearne** polarizacije. Interesantno je, ali opšti polarizovan talas u ravni može takođe da se posmatra kao da je sastavljen od desno i levo **kružno polarizovanih talasa**. Prikaz kružno polarizovanog talasa dat je na [slici 66](#). U prirodi su kružno polarizovani talasi veoma retki. Larva svica emituje kružno polarizovanu svetlost. Svetlost koja se odbija od više vrsta skarabej buba je kružno polarizovana, kao i u slučaju raznih stomatopodnih rakova, kao što je mantis škampa. ([Ref. 70](#)). Ovi poslednji – a moguće je i ostali – takođe su sposobni da osete kružno polarizovanu svetlost.

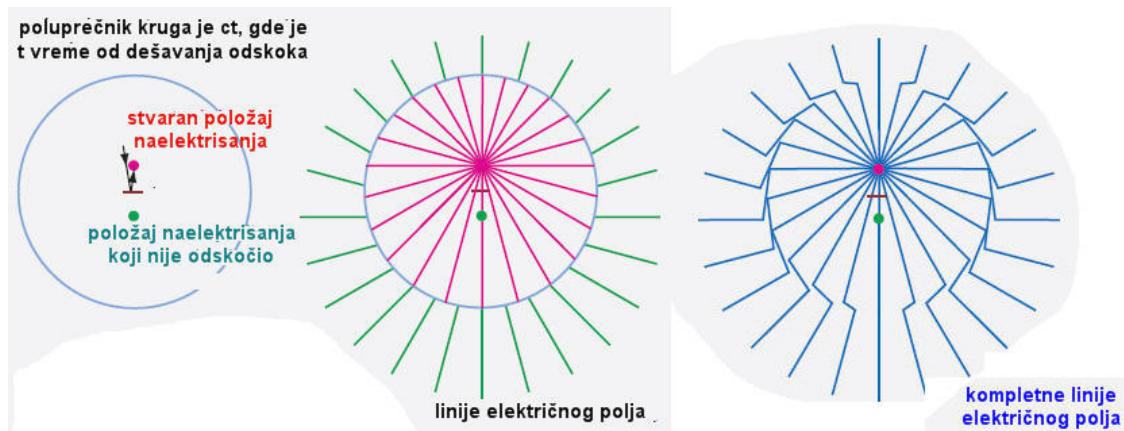


Slika 66 Levo: električno polje Gausijana, linearno polarizovan elektromagnetični talas (zrak); desno: Gausijan, kružno polarizovan zrak (QuickTime film © Jose Antonio Diaz Navas). Videti i veb stranu [youtube/8YkfEft4p-w](https://www.youtube.com/watch?v=8YkfEft4p-w)

RASPON ELEKTROMAGNETNOG ZRAČENJA

Elektromagnetni talasi niske učestanosti, ili radio talasi, obično se koriste za prenos signala mobilne telefonije kao i televizije, radio i satelitskih programa. Slično svetlosti, radio talasi nastaju usled kretanja elektrona. U svakodnevnom životu svetlost se (najčešće) proizvodi usled ubrzanih elektrona u atomu ili molekulu. Radio talasi, koji imaju nisku učestanost, pa prema tome veću talasnu dužinu, mnogo lakše se proizvode elektronima koji su ubrzani u metalnim delovima veličine približno jednake talasnoj dužini; takvi komadi metala nazivaju se **antene**.

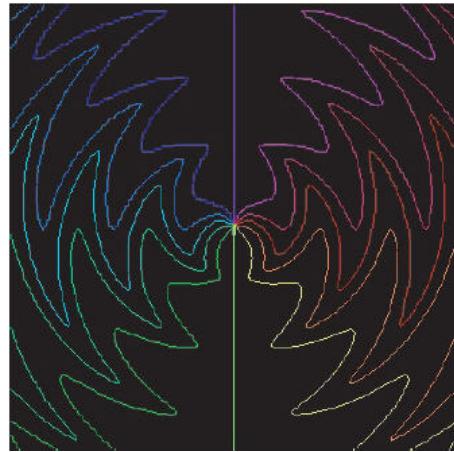
Radio talasi emitovani iz ručnih uređaja mogu da prenose signal oko Zemlje. Drugim rečima, radio talasi imaju veliki raspon. Kako je to moguće? Pre svega, statičko električno polje je obično nemerljivo na rastojanju od nekoliko metara. Pokazalo se da se jačina polja radio talasa smanjuje sa $1/r$, pri čemu je r rastojanje od izvora. Jačina polja stoga se smanjuje mnogo sporije nego ona kod statičkog polja, koja se smanjuje sa $1/r^2$. Zašto je to slučaj? (Ref. 71).



Slika 67 Tri koraka konstrukcije električnog polja u okolini nanelektrisane čestice koja se odbija od zida

Spora zavisnost $1/r$ radio talasa može da se shvati kvantitativno sa crteža prikazanog na slici 67. Tu je predstavljeno električno polje oko nanelektrisane čestice koja je podvrнутa najprostijem mogućem ubrzanim kretanjem: odbijanju od zida. Ustvari, poslednja desna slika dovoljna je da pokaže da se uzdužno polje, prikazano kao **prelom** linije električnog polja, smanjuje sa $1/r$. Možete li da izvedete zavisnost? (Izazov 115d).

Ako izvedemo konstrukciju linija polja za nanelektrisanje koje je podvrgnuto uzastopnim odskocima, dobijemo linije polja sa pravilno razmaknutim prelomima koji se udaljavaju od izvora. Za nanelektrisanje koje je podvrgnuto harmoničnim kretanjima, dobijemo polje koje je prikazano na slici 68. Slika prema tome prikazuje mehanizam najprostijih antena (ili izvora svetlosti) koji se može zamisliti.



Slika 68 Električno polje u okolini čestice koja osciluje u vertikalnom smeru (QuickTime film © Daniel Schroeder

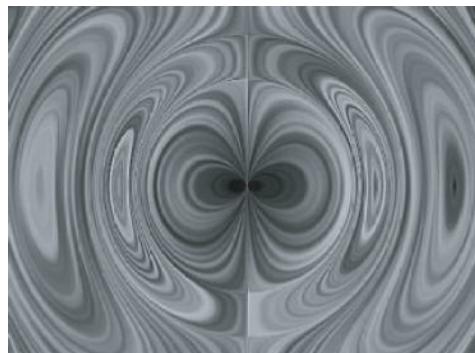
Veličina uzdužnog električnog polja može isto tako da se iskoristi za dobijanje odnosa između ubrzanja a naelektrisanja q i zračenja elektromagnetne snage P . Prvo, uzdužno električno polje (proračunato u poslednjem izazovu) mora da se podigne na kvadrat, kako bi se dobila gustina lokalne električne energije. Potom mora da se udvostruči, da bi se obuhvatila i magnetna energija. Konačno, to sve treba da se integrira po svim uglovima; to unosi sačinilac $2/3$. Na kraju se dobija

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

Ukupna snaga zračenja P prema tome zavisi od kvadrata ubrzanja i kvadrata naelektrisanja koje je bilo ubrzano. Ovo je takozvani Larmorov obrazac. On pokazuje zbog čega je radio predajnicima potrebno snabdevanje snagom i omogućava da se zaključi koliko ono treba da bude. Treba primetiti da *slika 67* i *slika 68* takođe prikazuju da antene predajnika imaju prioritetan smer emitovanja snage.

Obično je izvor elektromagnetskog zračenja tačnije opisan kao oscilirajući dipol. Vizualizacija električnog polja u takvom slučaju predstavljena je na *slici 69*. Na velikim rastojanjima deo talasa može približno da bude posmatran kao talas u ravni.

U svim slučajima nalazimo da intenzitet radio talasa polako opada sa daljinom i da je moguća radio komunikacija.



Slika 69 Električno polje oko oscilirajućeg dipola (QuickTime film © Daniel Weiskopf).

SPOROST NAPETAKA U FIZICI – I RELATIVNOSTI

Jednakost za brzinu svetlosti i druge elektromagnetne talase Gustava Kirhoffa i Bernharda Rimana iz 1850-ih godina

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

tolikoje čudna da treba da nas zaintrigira uvek kada je vidimo. Nešta bitno nedostaje. Jednakost izražava da je brzina c **nezavisna** od osobina kretanja posmatrača koji meri elektromagnetno polje i **nezavisna** od brzine izvora emitovanja. Drugim rečima, predviđeno je da je brzina svetlosti nezavisna od brzine svetiljke

i nezavisna od brzine posmatrača. Ovo je zaista i potvrđeno u svim eksperimentima, kao što je objašnjeno u delu o relativnosti. (**Vol. II, strana 22**).

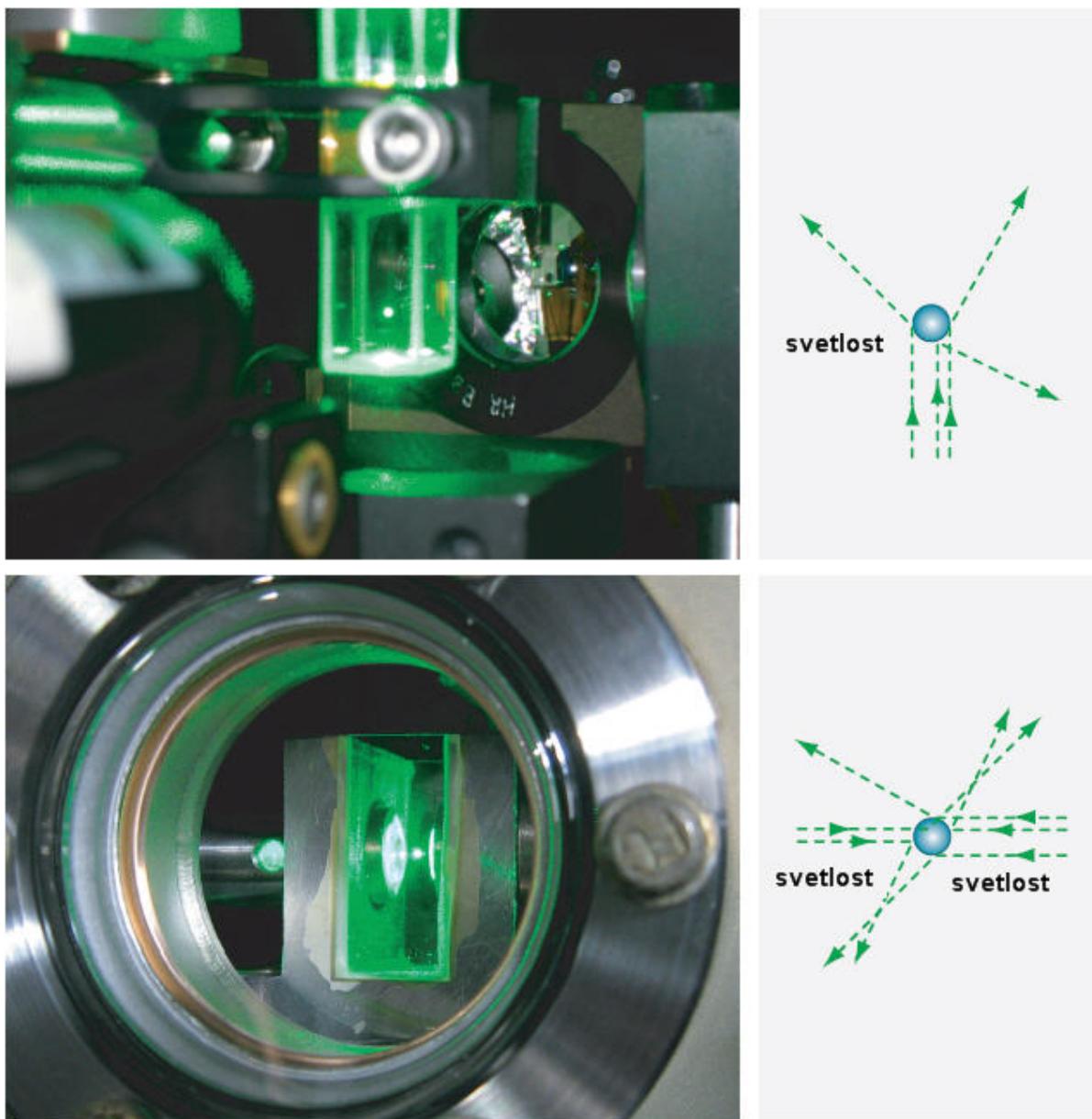
Osim toga, jednakost (66) podrazumeva da ni jedan posmatrač ne može da pobegne od svetlosti. Drugim rečima, svetlost se ne ponaša kao let metka: let metka zavisi od brzine hica iz puške i od mete. Meta uvek može da pobegne od metka, ukoliko se kreće dovoljno brzo. Brzina svetlosti je **granična brzina**.

Eksperimenti su potvrdili da su takođe brzine radio talasa, X-zraka i γ -zraka nezavisne od predajnika i od prijemnika. Eksperimenti potvrđuju da ove brzine imaju istu vrednost kao i brzina svetlosti. Sve se ovo sadrži u jednakosti (66). Ukratko

- Jednakost (66) pokazuje da je brzina c **invarijanta** i da je to **granica brzine energije u prirodi**.

Neverovatno je, ali niko nije istražio posledice ove invarijantnosti, sve dok Lorenc i drugi nisu počeli to da čine oko 1980. godine, pokrenuvši Ajnštajna koji je rešio pitanje 1905. godine. Teorija relativnosti ostala je neotkrivena tokom dve generacije! Kao i u mnogim drugim slučajevima, napredak fizike bio je mnogo sporiji nego li što je to bilo potrebno.

Invarijanta brzina svetlosti c suštinska je tačka koja čini razliku između specijalne teorije relativnosti i Galilejeve fizike. Pošto svaki elektromagnetski uređaj – kao i svaki električni motor – koriste jednakost (66), svaki elektromagnetski uređaj je radni dokaz specijalne teorije relativnosti.



Slika 70 Levitacija malih zrna stakla pomoću laserskog zraka odozdo i dva suprotna horizontalna zraka lasera. (© Mark Raizen, Tongcang Li).

KAKO IZGLEEDA SVET KADA SE PUTUJE NA ZRAKU SVETLOSTI?

Na kraju devetnaestog veka, tinejdžer Albert Ajnštajn čitao je seriju knjiga od Arona Bernštajna (Aaron Bernstein) sa raspravama o brzini svetlosti. ([Ref. 72](#)). U knjizi se postavljalo pitanje šta bi se dogodilo kada bi se posmatrač kretao brzinom koja je ista kao brzina svetlosti. Ajnštajn je mnogo razmišljao o ovoj temi, a posebno se pitao kakvu bi vrstu elektromagnetnog polja mogao da opazi u tom slučaju. Kasnije je Ajnštajn objasnio da ga je ovaj misaoni eksperiment (Gedanken eksperiment) uverio već u mладим godinama da **ništa ne može** da putuje brže od svetlosti, pošto bi opažena polja imala osobinu koja se ne može naći u prirodi. Možete li da odredite na šta je on mislio? ([Izazov 116s](#)). Situacija pri putovanju na zraku svetlosti imala bi čudne posledice:

- ne biste imali svoj lik u ogledalu, kao vampir,
- svetlost nebi oscilovala, bila bi statičko polje,
- ništa se nebi kretalo, kao u bajci o uspavanoj lepotici.

Ali bi zato pri brzini **bliskoj** brzini svetlosti opažanja bila interesntna. Mogli biste da:

- vidite mnogo svetlosti koja vam dolazi u susret, ali da skoro nema svetlosti bočno i iza vas; nebo bi bilo plavo/belo ispred vas, a crveno/crno iza vas,
- posmatrate kako se sve oko vas događa jako sporo,
- doživite najmanju česticu prašine kao smrtonosan metak.

Možete li da zamislite još neku čudnu posledicu? ([Izazov 117s](#)). Prilično je ohrabrujuće što se naša planeta kreće dosta sporije u odnosu na brzinu svetlosti kroz svoje okruženje.

MOŽEMO LI DA DODIRNEMO SVETLOST?

Ako se na vrh snažnog lasera stave mala zrna stakla, zrna će ostati da lebde u vazduhu, kao što je prikazano na **slici 70.**¹ ([Ref. 73](#)). Ovaj primer optičke levitacije dokazuje da svetlost ima količinu kretanja.. Prema tome, suprotno od onog što smo rekli na početku našeg uspona na planinu, ([Vol. I, strana 81](#)) slike mogu da se dodirnu! Zapravo, lakoća kojom objekti mogu da se guraju ima čak i posebno ime. Za planete i planetoide ona se naziva **albedo**, a za opšte objekte ona se naziva **reflektivnost**, skraćeno sa r .

Kao i svaka vrsta elektromagnetnog polja, i kao svaki oblik talasa, svetlost nosi energiju; protok energije T po površini i po vremenu je ([Izazov 118e](#))

$$\mathbf{T} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \times \mathbf{B} \quad \text{što daje srednju vrednost} \quad \langle T \rangle = \frac{1}{2\mu_0} E_{\max} B_{\max} \quad (67)$$

Očigledno je da svetlost ima količinu kretanja P . Ona je povezana sa energijom preko

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

Kao rezultat, pritisak p kojeg svetlost ispoljava na telo dat je kao ([Izazov 119e](#))

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

pri čemu je za crna tela reflektivnost $r = 0$, a za ogledala $r = 1$; ostala tela imaju vrednosti između ovih. Kakva je vaša procena o veličini pritiska usled sunčeve svetlosti na crnu površinu od jednog kvadratnog metra? ([Izazov 120s](#)). Da li je to razlog što osećamo veći pritisak tokom dana nego li tokom noći?

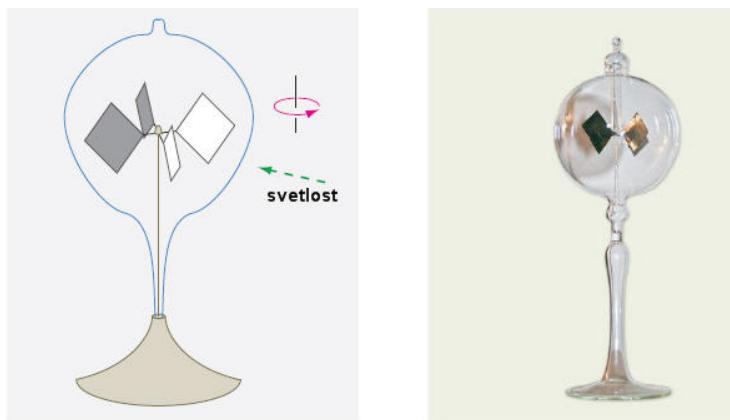
Ako nam na raspolaganju nebi bili laseri, bila bi potrebna prilično osetljiva oprema za otkrivanje količine kretanja ili pritisak zračenja svetlosti. Već je 1619. godine Johanes Kepler (Johannes Kepler) predlagao u delu *De cometis* da rep komete postoji samo stoga što Sunce pogoda male čestice prašine i da ih odbacuje od sebe. Iz tog razloga je rep komete uvek usmeren suprotno od Sunca, što možda želite da proverite u sledećoj prilici. ([Izazov 121e](#)). Danas znamo da je Kepler bio u pravu; ali dokazivanje hipoteza nikada nije lako.

¹ Najteži objekt koji je levitirao uz pomoć lasera imao je masu od 20 gr; korišćen je laser veličine zgrade, a metoda je korišćena takođe za neke dodatne efekte, kao što su unutrašnji udarni talasi, da bi se objekt održavao u vazduhu.



Slika 71 Rep komete McNota (McNaught) slikan u Australiji 2007. godine (© Flagstaffotos).

Da bi otkrio pritisak zračenja svetlosti, Vlijam Kruks (William Crookes)¹ je izmislio *svetlosni mlin radiometar*. Svetlosni mlin se sastojao od četiri tanke pločice, crne sa jedne strane, a sjajne sa druge, koje su postavljene na vertikalnu osovinu, kao što je prikazano na [slici 72](#). Međutim, kada je Kruks završio gradnju mlina – sličan njemu su oni koji se prodaju danas u prodavnicama – otkrio je, kao i svi ostali, da se on obrće u pogrešnom smeru, naime sjajnim stranama prema svetlosti! (Zašto je to pogrešno?) ([Izazov 122s](#)). Možete to proveriti sami ako ga osvetlite laserom uperentim u njega. Ponašanje je bilo zagonetka dosta dugo. Objašnjenje ovoga uključuje malu količinu gasa preostalog u staklenoj kugli, a odvelo bi nas daleko sa putanje naše avanture. ([Ref. 74](#)). Desilo se tek 1901. godine, uz primenu mnogo boljih pumpi, kada je ruski naučnik Pjotr Lebedev uspeo da ostvari dovoljno dobar vakuum, što mu je omogućilo da izmeri pritisak svetlosti pomoću takvog usavršenog stvarnog radiometra. ([Ref. 75](#)). Lebedev je takođe potvrdio predpostavljenu vrednost pritiska svetlosti i dokazao ispravnost Keplerove hipoteze u vezi repa komete. Danas je moguće čak napraviti mali propeler koji počinje da se okreće kada ga obasja svetlost, na potpuno isti način na koji vetar pokreće vetrenjaču. ([Ref. 76](#)).



Slika 72 komercijalni svetlosni mlin obrće se *nasuprot* zraku svetlosti (Wikimedia).

Ali svetlost ne samo da može da dodirne i da bude dodirnuta, ona može takođe da *uhvati*. Godine 1980. Artur Aškin (Arthur Ashkin) i njegova istraživačka grupa razvili su stvarnu *optičku pincetu* koja im je omogućila da uhvate, zadrže i premeste male providne lopte prečnika 1 do 20 μm pomoću svetlosti lasera. ([Ref. 77](#)). Bilo je moguće da se ovo uradi pomoću mikroskopa, tako da se moglo posmatrati istovremeno šta se događa. Ova tehnika danas se rutinski koristi u biološkim istraživanjima širom sveta, i korišćena je, na primer, za merenje sile jednog mišićnog vlakna, tako što je njegov kraj bio hemijski vezan za loptu od stakla ili teflona, a zatim se rastezao pomoću takve optičke pincete.

¹ Vilijam Kruks (William Crookes, 1832. London – 1919. London), hemičar i fizičar, predsednik Kraljevskog Društva (Royal Society), pronalazač talijuma, a verovao je u spiritizam.

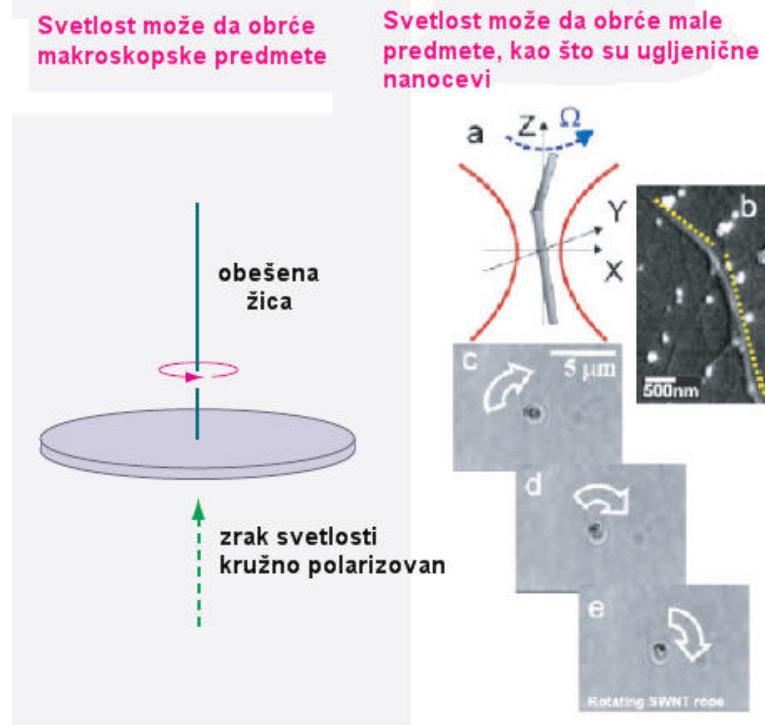
Ali ni to nije sve. Poslednjih decenija dvadesetog veka, nekoliko grupa je uspelo čak da izazove obrtanje objekata, stvarajući stvari **optički mehanički ključ**. (Ref. 77). Oni su omogućili da se čestice obrću po želji u jednom ili u drugom smeru, menjajući optičke osobine zraka lasera korišćenog da uhvati česticu.

Ustvari, ne treba mnogo da bi se zaključilo da ako svetlost ima linearnu količinu kretanja, tada kružno polarizovana svetlost ima takođe **moment** količine kretanja. Ustvari, za takav talas moment količine kretanja L dat je sa

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

gde je E energija. (Izazov 123e). Ekvivalentno tome, moment količine kretanja veći je $\lambda/2\pi$ od linearne količine kretanja p . (Ref. 78). Za svetlost je ovaj rezultat potvrđen već na početku dvadesetog veka: svetlost može da izazove obrtanje izvesnih materijala (kojih) (Izazov 124ny); u tečnosti je ovo već standardni postupak u laboratorijama. (Ref. 79). Dva primera su prikazana na *slici 73*. Naravno, efekt je mnogo jači primenom laserskog zraka. Ali tek 1960. izveden je lep prikaz pomoću mikrotalasa. Kružno polarizovan zrak mikrotalasa iz masera – mikrotalasni ekvivalent laseru – pokrenuo je obrtanje komada metala koji je apsorbovao zrak. Zapravo, za zrak sa valjkastom simetrijom, u zavisnosti od smera obrtanja, moment količine kretanja je ili paralelan ili antiparalelan u odnosu na smer prostiranja. Svi ovi eksperimenti potvrdili su da svetlost takođe nosi moment količine kretanja, efekt koji će odigrati važnu ulogu u kvantnom delu našeg uspona na planinu.

Zapažamo da za sve talase nije moment količine kretanja energija po ugaonoj učestanosti. To je samo za slučaj talasa načinjenih od onog što će u kvantnoj teoriji da bude nazvano čestica sa spinom 1. Na primer, za gravitacijske talase moment količine kretanja ima dvostruku ovu vrednost, pa se prema tome očekuje da su načinjeni od čestice sa spinom 2.



Slika 73 Svetlost može da obrće objekte (© A.C.Ferrari)

Šta bi to značilo za rep gore pomenute komete? Pitanje je konačno rešeno 1986. godine. (Ref. 80). Izbačen je satelit na visinu od 110.000 km i napravio je oblak od barijuma. Oblak se mogao videti sa Zemlje, a ubrzo je obrazovao rep koji se video sa Zemlje: to je bila prva veštačka kometa. Pokazalo se da je rep komete oblikovan delimično usled sudaranja sa fotonima, delom usled solarnog vетра i delom usled magnetnog polja.

Ukratko, svetlost može da dodirne, svetlost može da obrće i svetlost može da bude dodirnuta. Očigledno, ako svetlost može da obrće objekte, onda i ona sama može da se obrće. Možete li da zamislite kako bi se to postiglo? (Izazov 125s).

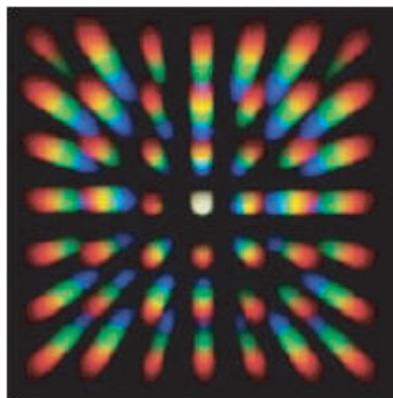
RAT, SVETLOST I LAŽI

Iz malih efekata za pritisak svetlosti iz jednakosti (69), zaključujemo da svetlost nije efikasan alat za gađanje objekata. S druge strane, svetlost je sposobna da zatrepi objekte, kao što osećamo kada smo izloženi sunčevoj svetlosti ili kada nam kožu dodirne laserski zrak od oko 100 mW, ili jači. Iz tog razloga čak je i jeftin laserski pokazivač opasan za oko. Oko 1980. godine, i ponovo 2001. godine, grupa ljudi koja je previše čitala romane naučne fantastike uspela da ubedi vojsku – koja se isto tako prepuštala ovoj navici – da se laser može iskoristiti za obaranje projektila, i da bi mnogo para iz poreza trebalo da se potroši na razvoj takvog lasera. Korišćenjem odrednice za Pointingov vektor i za vreme pogodka od oko 0,1 s, da li ste sposobni da procenite težinu i veličinu baterije potrebne za rad takvog uređaja? Šta bi se dogodilo za vreme oblačnog ili kišnog dana? (*Izazov 126ny*).

Drugi ljudi su pokušali da ubede agenciju NASA da prouči mogućnost raketnog pogona koji bi emitovao svetlost umesto izduvavanja gasova. Da li ste sposobni da procenite da li je to izvodljivo? (*Izazov 127e*)

ŠTA JE BOJA?

Videli smo da su radio talasi na nekoj učestanosti vidljivi. Unutar ovog opsega, različite učestanosti odgovaraju različitim bojama. (Jeste li sposobni da ubedite prijatelja u ovo?) (*Izazov 128s*). Međutim, priča se time ne završava. Veliki broj boja može se dobiti ili pomoći jedne talasne dužine, to jest *monohromatska* svetlost, ili pomoći *mešanja* više drugih boja. Na primer, standardna žuta može biti, ako je čista, elektromagnetni talas talasne dužine 575 nm, a može biti i mešavina standardne zelene talasne dužine 546,1 i standardne crvene talasne dužine 700 nm. Oko ne može da razlikuje ova dva slučaja, to može samo spektrometar. U svakodnevnom životu pokazalo se da su sve boje mešavina, uz jedan izuzetak žute ulične svetiljke, laserskog zraka i spektra u laboratoriji. Ovo možete i sami da proverite, ako uzmete kišobran ili kompakt disk: oni razlažu mešavinu svetlosti, ali ne razlažu čiste boje, kao što je ona sa laserskog pokazivača ili LED ekrana. (*Izazov 129e*).



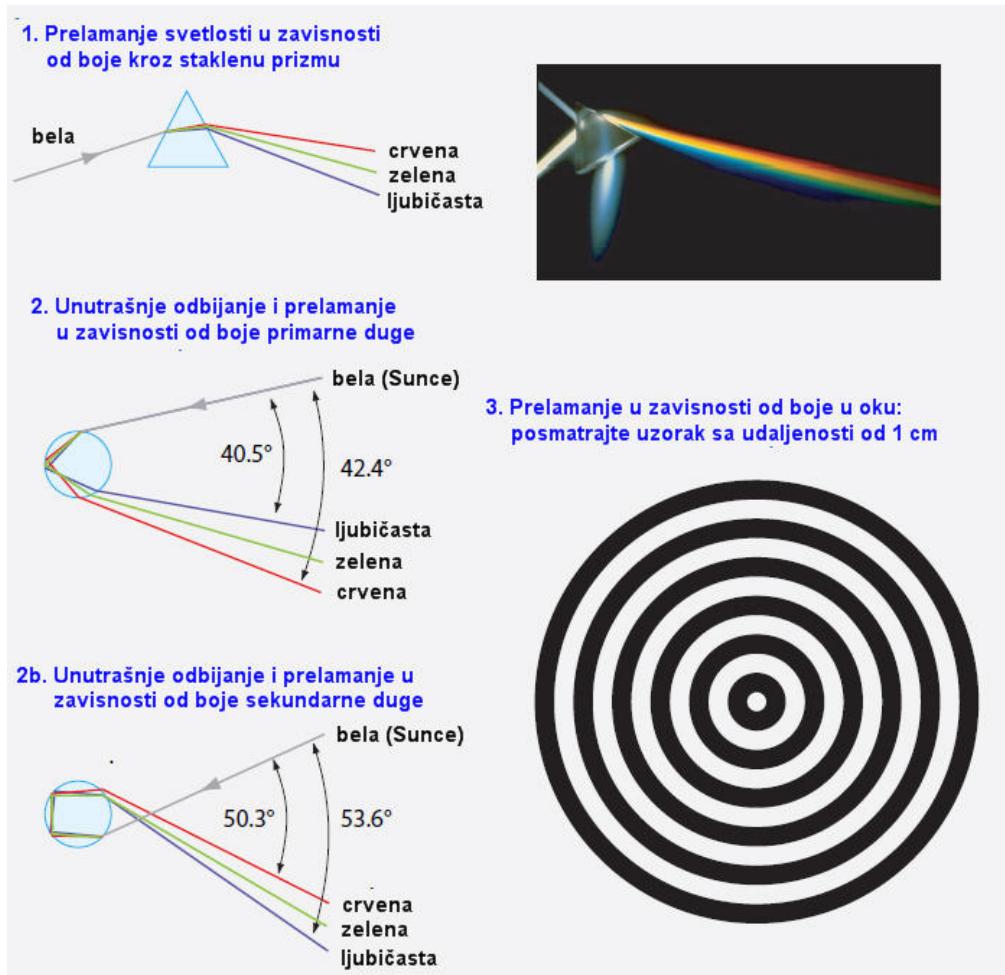
Slika 74 Kišobran razlaže belu svetlost: pogled noću na malu svetiljku kroz crni kišobran (c Wikimedia).

Posebno je bela svetlost mešavina neprekidnog opsega boja sa posebnim intenzitetom po talasnoj dužini. Ako želite da proverite bez ikakvog izvora svetlosti da je bela svetlost mešavina svih boja, jednostavno približite oko na desnu stranu *slike 75*, na takvu udaljenost da vaše oko ne može više da izoštiri trake. Neoštra granica bele trake imaće ili roze ili zelenu senku. Ove boje nastaju usled nesavršenosti ljudskog oka, takozvane *hromatske aberacije*. Aberacija ima posledicu da sve učestanosti svetlosti ne prate istu putanju kroz sočivo oka, pa zato stižu do različitih tačaka na mrežnjači. To je isti efekt koji se pojavljuje u prizmi ili u kapima kiše koje stvaraju dugu.

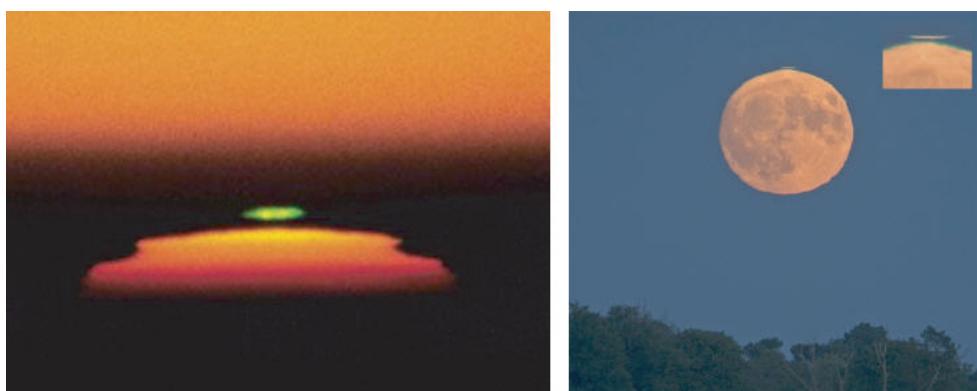
Na levoj strani *slike 75* objašnjeno je kako nastaje duga. Pre svega, unutrašnje odbijanje svetlosti u kapi vode u vazduhu odgovorno je za vraćanje svetlosti koja dolazi od Sunca, dok je prelamanje koje zavisi od talasne dužine na dodirnoj površini vazduh-voda odgovorno za različite putanje boja. Prve dve osobe koje su potvrdile ovo objašnjenje bili su Teodorik (Ditrih) fon Frajberg (Theodoricus Teutonicus de Vriberg oko 1240. - oko 1318.), godine 1304. do 1310., a u isto vreme persijski matematičar Kamāl al-Dīn Abu'l-Hasan Mohamed al-Fārisī. (*Ref. 81*). Da bi proverili objašnjenje oni su uradili nešta jednostavno i mudro, što svako može da uradi kod kuće. (*Izazov 130e*). Napravili su veliku kap vode tako što su napunili vodom tanku loptastu (ili valjkastu) staklenu posudu, a potom su propustili kroz nju zrak bele svetlosti. Teodorik i al-Farisi su našli tačno ono što je prikazano na *slici 75*. Ovim eksperimentom svaki od njih dvojice bio je sposoban da ponovi ugao otvaranja za glavnu ili *primarnu* dugu, njen redosled boja, kao i postojanje

sekundarne duge, njen prividan ugao i njen obrnut redosled boja.¹ Sve ove duge nalaze se na [slici 56](#), na [strani 81](#). Teodorikov divan eksperiment ponekad se naziva najvažnijim doprinosom prirodnih nauka u srednjem veku.

Uzgred, oblik duge govori nešta i o obliku kapi vode. Možete li da nađete povezanost? ([Izazov 132s](#)).



Slika 75 Tri dokaza da da je bela svetlost mešavina boja (ugaone razlike su preterane): razlaganje u prizmi, formiranje primarne i sekundarne duge i viđenje obojene granice crnih i belih krugova. (fotografija od Susan Schwartzberg, © Exploratorium, www.exploratorium.edu/)



Slika 76 Zeleni blesak iznad Sunca pri zalasku i iznad Meseca, pokazuje takođe promenu boje na obodu Meseca (© Andrew Young i Laurent Laveder/PixHeaven.net).

¹ Možete li da pogodite gde se mogu videti duge trećeg i četvrtog reda? ([Izazov 131s](#)). Postoje retki izveštaji o njihovom viđenju; jedva da postoji dve ili tri fotografije širom sveta. Lov da se vidi duga petog reda još uvek je u toku. ([Ref. 82](#)). (U laboratoriji su zapaženi lukovi oko kapi do trinaestog reda.) Za više detalja pogledajte lepu web stranu www.atoptics.co.uk/. Postoji više obrazaca za uglove raznih redova duge: oni proizilaze iz jednostavnih geometrijskih razmatranja, ali su previše zapetljani da bi se naveli ovde.

Uzgred, objašnjenje duge dato na [slici 75](#) nije potpuno. Ono predpostavlja da zrak svetlosti pogađa kap vode u određenoj tački njene površine. Ako zrak svetlosti pogodi kap u drugoj tački, duga će se pojaviti pod drugim uglom; međutim, sve ovakve duge su izbrisane. Ostaje samo vidljiva duga, pošto su izuzetni njeni uglovi skretanja. Primarna duga je zapravo obojena ivica belog diska. I zaista, oblast iznad primarne duge uvek je tamnija od oblasti ispod nje.

Kapi vode nisu jedine prizme koje se nalaze u prirodi. Prilikom zalaska Sunca, sama atmosfera deluje kao prizma, ili još preciznije, kao valjkasto sočivo koje deluje sferohromatizmom. Stoga, posebno pri zalasku, Sunce je podeljeno na dve različite slike, svaka za po jednu boju, koje su blago pomerene međusobno; ukupno pomeranje je oko 1% prečnika. ([Ref. 84](#)). Kao posledica toga, obod večernjeg Sunca je obojen. Ukoliko su vremenski uslovi povoljni, ako je vazduh čist iznad i ispod horizonta, i ako je prisutan u atmosferi tačan temperaturni profil, pojaviće se čarolija koja zavisi od boje: tokom od približno sekunde biće moguće da se vidi, posle skoro ili crvene, narandžaste ili žute slike Sunca na zalasku, jedna zelenoplava slika, ponekad čak i odvojena. To je poznat *zeleni blesak* kojeg je opisao Žil Vern (Jules Verne) u svom romanu *Zeleni zrak* (Le Rayon-vert). ([Ref. 83](#)) Zeleni blesak, prikazan na [slici 76](#), često se vidi sa tropskih plaža, na primer na Havajima, i sa paluba brodova na topлом moru. ([Ref. 84](#)) i ([Ref. 85](#)).



Slika 77 Mleko u vodi simulira večernje nebo (© Antonio Martos).

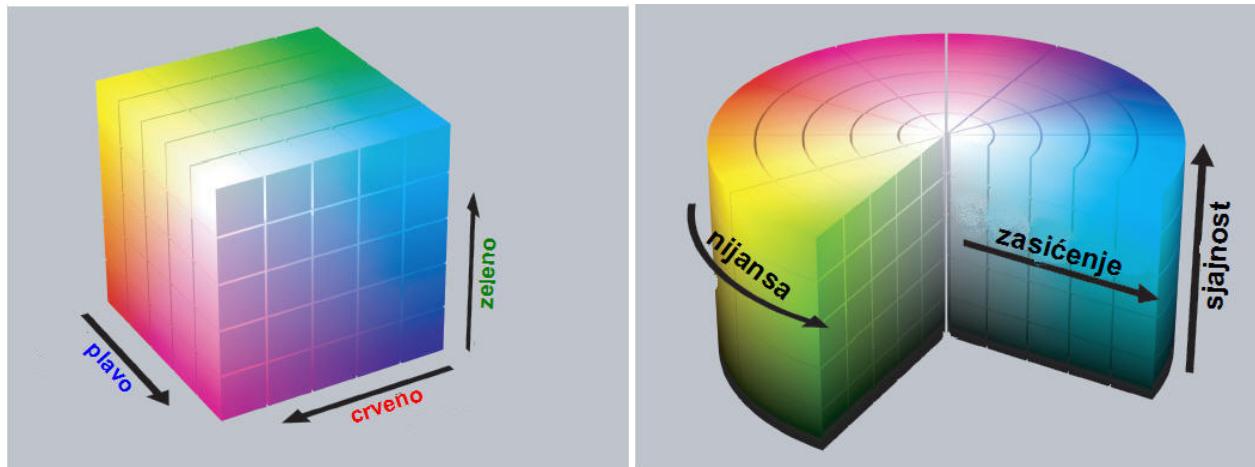
Čak i čist vazduh razdvaja belu svetlost. Međutim, ovaj efekt ne nastaje usled razlaganja, već usled rasipanja. Rasipanje koje zavisi od talasne dužine, uglavnom **Relejevo (Rayleigh) rasipanje**, razlog je što nebo i udaljene planine izgledaju plavo, a što Sunce izgleda crveno prilikom zalaska i izlaska. (Nebo izgleda crno čak i tokom dana zbog Meseca.) Možete da ponovite ovaj efekt ako gledate kroz vodu na crnu površinu ili u svetiljku. Ako dodate nekoliko kapi mleka u vodu, svetiljka će postati najpre žuta, pa potom crvena, a crna površina postaje plava (Kao i nebo posmatrano sa Zemlje i poređenju sa nebom posmatranim sa Meseca), kao što je prikazano na [slici 77](#). Dodavanjem više mleka ovaj efekt će se pojačavati. Iz istog razloga Sunce na zalasku posebno je crveno posle erupcija vulkana.

Naveće je, međutim, nebo plavo iz drugog, manje poznatog razloga: u vreme oko zalaska Sunca, nebo je plavo uglavnom zbog sloja ozona. ([Ref. 86](#)). Ozon je gas plave boje. Bez prisustva ozona nebo bi prilikom zalaska Sunca bilo žućkaste boje.

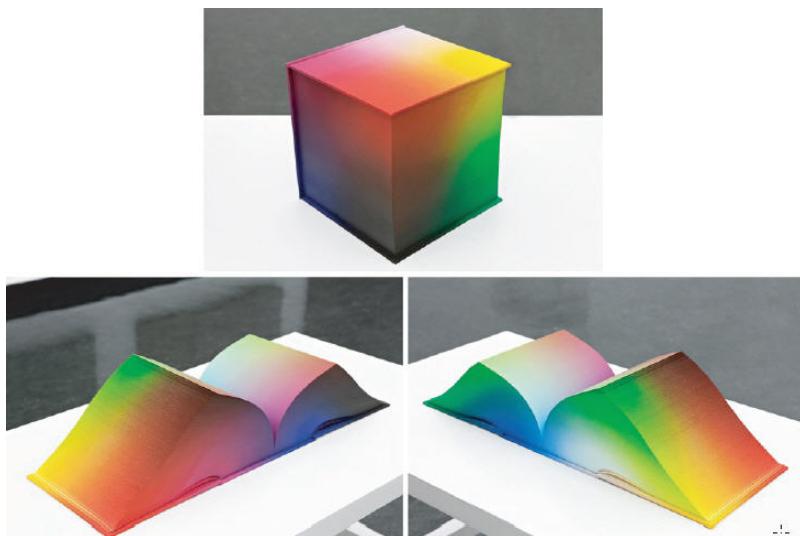
Ukratko, svetlost je uglavnom mešavina više talasnih dužina. Kao rezultat toga, talasna dužina ili učestanost svetlosti nisu dovoljni da bi se opisala boja svetlosti. Stručnjaci za boju ovaj aspekt boje nazivaju **nijansa** (hue) koji odgovara najbliže promeni promeni zbog talasne dužine. Ali svaka boja ima i dva dodatna svojstva. Na primer, svaka posmatrana boja može da bude svetla ili tamna; **sjajnost** (brightness) je druga, nezavisna osobina boje. Treća nezavisna osobina je **zasićenje** (saturation); ona pokazuje koliko se jako boja razlikuje od bele. Jako zasićena boja je suprotna od blede, slabo zasićene boje.

Ljudski prostor boja je trodimenzionalan. Ljudi su trihromatični. [Slika 78](#) prikazuje smisao. Svaka boja je određena sa tri nezavisna parametra, pošto ljudsko oko ima tri tipa čepića, odnosno tri tipa ćelija osjetljivih na boje. To je razlog što svaka šema za izbor boje, na primer na računaru, ima najmanje tri parametra koji mogu da se menjaju. Umetnik savremenik, Tuba Auerbach, čak je napravio lepu verziju za knjigu prostora boja, prikazanu na [slici 79](#). ([Ref. 87](#)). Brojka tri takođe je razlog da svaki ekran ima najmanje tri različita piksela za boje. Ova tri parametra ne moraju da budu za zasićenje, nijansa i sjajnost. Mogu da budu odabrani tako da budu jačine boja crvene, zelene i plave. Za opisivanje boje mogu da se koriste i mnogi drugi parametri, kao što su svetlina, hromatičnost, čistoća, sivi tonovi i drugi. Isto tako mogu da se koriste i

opisi sa četiri i više parametara – koji u tom slučaju više nisu međusobno nezavisni – posebno u industriji štampanja.



Slika 78 Dva, od više mogućih načina, da se prikaže skup mogućnosti viđenja boja: (levo) kao mešavine crvenih, zelenih i plavih vrednosti koje se povećavaju duž osa triju koordinata i (desno) pomoću vrednosti nijanse, zasićenja i sjajnosti (© SharkD)



Slika 79 Jedinstvena knjiga boja koja prikazuje trodimenzionalni prostor boja ljudi na svakoj strani i na svim spoljnim površinama (© Tauba Auerbach)

Mnoge ptice, reptili, ribe i razni insekti imaju prostor boja od četiri dimenzije koji uključuje i ultraljubičastu; leptiri i golubovi imaju prostor boja od pet dimenzija, a ostale vrste ptica imaju prostor boja viših dimenzija. Mantis škampi verovatno imaju najsloženije oči u životinjskom carstvu, sa dvanaest dimenzija prostora boja. (Jedna vrsta mantis škampa *Gonodyctylus smithii*, može čak da oseti kružnu i linearne polarizaciju svetlosti sa svim detaljima.) Za razliku od čoveka i primata, većina sisara ima prostor boja sa dve dimenzije. Isto tako i ljudi slepi za boje mogu imati prostor boja manjeg broja dimenzija. Drugim rečima, broj dimenzija primljenog prostora boja nije osobina svetlosti, već posebnih svojstava ljudskih očiju. **Boje u prirodi i boje koje primećuju ljudi različite su.** Ne postoji u prirodi prostor boja.

Boje u prirodi i boje ljudske percepcije razlikuju se na mnogo načina, otkrili su lingvisti. U jeziku ljudi boje imaju prirodan redosled. Svi ljudi na svetu, bilo da dolaze sa mora, iz pustinje ili sa planine, poređajaju su boje prema sledećem redosledu: 1. crna i bela, 2. crvena, 3. zelena i žuta, 4. plava, 5. smeđa, 6. boja sleza, ružičasta, narandžasta, siva i ponekad i dvanaesti pojam koji se razlikuje od jednog do drugog jezika. (Boje koje se odnose na objekte, kao što su boja plavog patlidžana ili sepija, ili boje koje se uopšteno koriste, kao što je blond, isključene su iz ovog razmatranja.) Precizno otkriće je sledeće: ako neki određeni jezik ima naziv za bilo koju od ovih boja, onda ima takođe i naziv za predhodnu boju. Rezultat takođe podrazumeva da ljudi koriste klase ovih osnovnih boja čak i kada u njihovom jeziku ne postoji reč za svaku od njih. Ovaj čvrst zakjučak je potvrđen u preko 100 jezika. (Ref. 88).

ZABAVA SA DUGAMA

Širina uobičajene primarne duge je $2,25^\circ$, za sekundarnu dugu je oko dvostrukе ove vrednosti (što je razlog da je ona manje sjajna). Širina je veća od razlike ugla rasipanja prikazanog na *slici 75*, pošto se ugaona veličina Sunca, od oko $0,5^\circ$, dodaje (približno) na vrh razlike uglova.

Konačna veličina kapi usled interferencije dovodi do prekobrojnih duga, kao što je već pomenuto. (*Strana 81*). Ako su kapi male i sve su iste veličine, povećava se broj prekobrojnih duga, kao što prikazuje *slika 80*.



Slika 80 Izuzetno mnogo prekobrojnih duga (© Denis Betsch).



Slika 81 Pet retkih vrsta duga: maglena duga (gore levo), nepravilna, rascepljena duga u situaciji s vетром usled neloptastih kišnih kapi, prikazana uz povećano zasićenje boja (gore desno), šestostruka duga (u sredini levo), crvena duga pri zalasku Sunca (u sredini desno) i mesečev luk kojeg stvara Mesec, a ne Sunce, digitalno pojačano (dole) (© Michel Tournay, Eva Seidenfaden, Terje Nordvik, Zhu XiaoJin i Laurent Laveder).



Slika 82 Složena fotografija pokazuje parheliju, svetlosne stubove, odsjaj i gornji tangentni luk kojeg stvaraju kristali leda u vazduhu, ako su usmereni u istom pravcu (© Phil Appelton).



Slika 83 Redak cirkumzenitni luk, stvaraju ga ledeni kristali u gornjim slojevima atmosfere (© Paul Gitto)

Ako su kapi izuzetno fine, duga postaje bela, često se naziva **maglena duga**. Ovakve duge se često viđaju iz aviona. Ukoliko kapi nisu okrugle, na primer zbog jakog vетра, mogi da postanu **nepravilne** ili **rascep-ljene** duge. ([Ref. 60](#)). Primer takve duge dat je na [slici 81](#).

Svetlost duge je tangentno polarizovana. To možete lako da proverite pomoću polarizovanih naočara. ([Izazov 133e](#)). Tokom unutrašnjeg odbijanja u kapi vode, pošto je ugao odbijanja veoma blizu ugla pri kojem nastaje totalno odbijanje, svetlost postaje polarizovana. (Šta to dovodi do polarizacije?) ([Izazov 134ny](#)).

Ako je vazduh pun kristala leda umesto kapi, situacija se ponovo menja. Može se dobiti dodatna slika Sunca u smeru Sunca. To se naziva **parhelia** – sporedno Sunce, a ponekad Lažno sunce (sundogs). To se događa samo ako nema veta, ako su kristali leda orijentisani u jednom smeru. U tom slučaju može da se snimi fotografija kao što je ona na [slici 82](#).

Retke vrste lukova i druge zadirajuće pojave u atmosferi najboje su objašnjene na veb strani koja daje "optičke slike dana" na www.atoptics.co.uk/opod.htm Tamo se mogu naći duge trećeg i četvrtog reda, maglene duge koje sadrže prekobrojne duge, mesečeve maglene duge čije sekundarne duge imaju prekobrojne, nepravilne duge, mesečevi lukovi, cirkumzenitalni lukovi, odsjaji Sunca, zeleni bleskovi i mnogo više. Veb strana prikazuje lepotu svetlosti u prirodi – a svi efekti takođe su detaljno objašnjeni.

KOLIKA JE BRZINA SVETLOSTI? KOLIKA JE BRZINA SIGNALA?

Fizika priča o kretanju. Pričanje je razmena zvukova; a zvuk je primer signala.

- Signal (fizički) je prenos informacije korišćenjem prenosa energije.

Ne postoji signal bez kretanja energije. (**Vol. I, strana 224**). Ustvari, ne postoji ni način da se informacije sačuvaju bez čuvanja energije. Svakom signalu možemo stoga da pripišemo brzinu prostiranja. Ovu brzinu nazivamo brzina signala. Najveća moguća brzina signala je je takođe maksimalna brzina opštih delovanja, ili prostije rečeno, maksimalna brzina kojom se prouzrokuju efekti.

Ako signal prenosi materiju, kao što je napisan tekst u pismu, brzina signala jednaka je brzini nosioca materije. Eksperimenti su pokazali da je ova brzina ograničena brzinom svetlosti.

Za nosač talasa, kao što je talas na vodi, zvuk, svetlost ili radiotalasi, situacija je manje vidljiva. Kolika je brzina talasa? Prvi odgovor koji pada na pamet je da je to brzina kojom se kreće vrh sinusnog talasa. Ova već ranije uvedena brzina faze, određena je odnosom između učestanosti i talasne dužine monohromatskog talasa, to jest sa

$$v_{\text{ph}} = \frac{\omega}{k} \quad (71)$$

Na primer, brzina faze određuje pojave interferencije. Svetlost u vakuumu ima istu brzinu faze $v_{\text{ph}} = c$ za sve učestanosti. Da li ste sposobni da zamislite eksperiment da biste ovo proverili uz veliku preciznost? (**Izazov 135s**).

S druge strane, postoje slučajevi u kojima je brzina faze **veća** od c , često viđeno kada svetlost putuje kroz supstancu koja apsorbuje i kada je istovremeno učestanost u blizini maksimalne apsorpcije. Međutim, u tim slučajevima eksperimenti pokazuju da brzina faze nije brzina signala. (**Ref. 89**). U takvim situacijama bolja približnost za brzinu signala je brzina grupe, to jest brzina kojom se kreće maksimum grupe. Ova brzina je data sa

$$v_{\text{gr}} = \left. \frac{d\omega}{dk} \right|_{k_0} \quad (72)$$

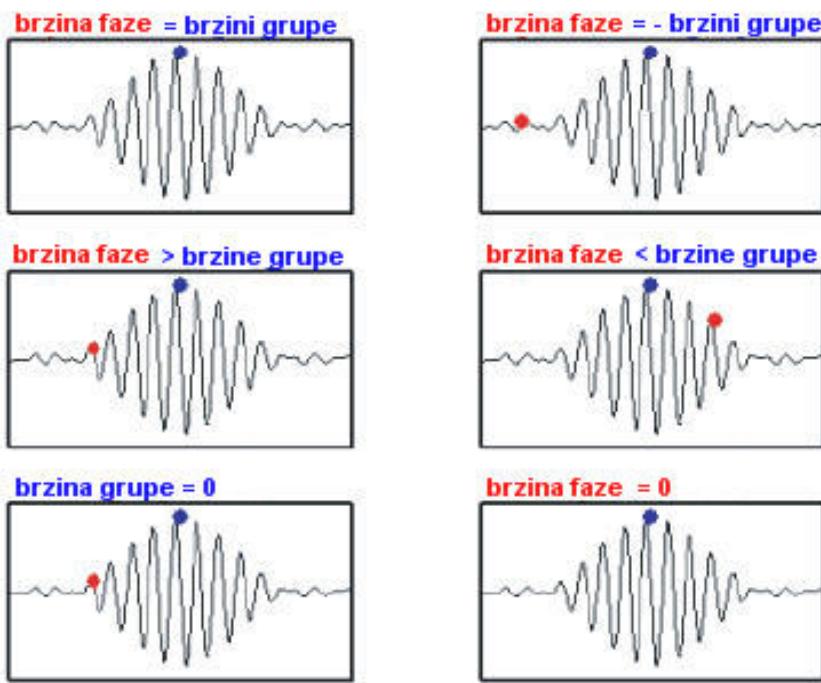
pri čemu je k_0 centralna talasna dužina paketa talasa čiji se izvod pravi. Zapažamo da $\omega = c(k)k = 2\pi v_{\text{ph}}/\lambda$ podrazumeva jednakost

$$v_{\text{gr}} = \left. \frac{d\omega}{dk} \right|_{k_0} = v_{\text{ph}} - \lambda \frac{dv_{\text{ph}}}{d\lambda} \quad (73)$$

To znači da predznak poslednjeg člana određuje da li je brzina grupe veća ili manja od brzine faze. Za grupu koja putuje, što je prikazano isprekidanim linijom na **slici 85**, to znači da se nov maksimum pojavljuje ili na kraju ili na početku druge. Eksperimenti pokazuju da je ovo samo slučaj za svetlost koja prolazi kroz materiju; za svetlost u vakuumu brzina grupe ima istu vrednost $v_{\text{gr}} = c$ za sve vrednosti vektora veličine k .

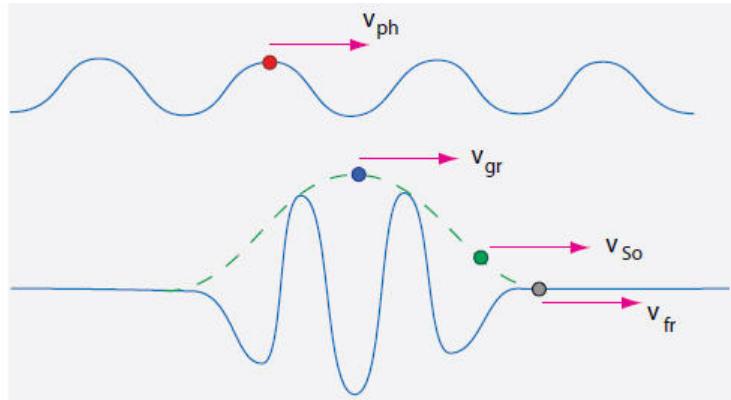
Treba da budete opomenuti da mnoga izdanja još uvek šire netačnu tvrdnju da brzina grupe **u materijalu** nikada nije veća od c , brzine svetlosti u vakuumu. Zapravo, brzina grupe u materijalu može biti nula, beskonačna ili čak i negativna, (**Izazov 136ny**) što se događa kada je impuls svetlosti veoma uzan, to jest kada sadrži širok opseg učestanosti ili opet kada je učestanost u blizini prenosa apsorpcije. U mnogim slučajevima (ali ne i u svim) utvrđeno je da je grupa znatno proširena, ili čak podeljena, što otežava da se precizno odredi maksimum grupe, pa prema tome i njena brzina. Mnogi eksperimenti su potvrdili ova predviđanja. Na primer, izmerena brzina grupe u nekim materijalima je **deset puta** veća od brzine svetlosti. (**Ref. 90**). Indeks prelamanja je tada manji od 1. Međutim, u svim ovim slučajima brzina grupe nije ista kao brzina signala.¹

¹ U kvantnoj mehanici Ervin Šredinger (Erwin Schrödinger) je dokazao da je brzina elektrona određena brzinom grupe i njegovom talasnom funkcijom. (**Vol. IV, strana 75**). Prema tome, isto ovo razmatranje biće ponovljeno u kvantnoj teoriji, kao što ćemo da ga nađemo u sledećem delu našeg uspona na planinu.



Slika 84 Vizualizacija brzine grupe (plava tačka) i brzine faze (crvena tačka) za različite tipove talasa (QuickTime film © ISVR, University of Southampton).

Kakav je onda najbolji opis brzine prostiranja signala? Arnold Zomerfeld (Arnold Sommerfeld)¹ je skoro rešio glavni problem početkom dvadesetog veka. On je odredio brzinu signala kao brzinu v_{So} **nagiba čela** impulsa. Odrednica je prikazana na *slici 85.* (*Ref. 89*). Odrednica ne može da se sumira u obrazac, ali ona ima svojstva koja opisuju prostiranje signala u skoro svim eksperimentima, posebno u onim u kojima su brzina grupe i brzina faze veće od brzine svetlosti. Kada su proučavana njena svojstva, nađeno je da bez materijala nema Zomerfeldove brzine signala veće od brzine svetlosti u vakuumu.



Slika 85 Određivanje važnih brzina u pojavi talasa: brzina faze (v_{ph}). brzina grupe (v_{gr}), Sommerfeldova brzina čela (v_{So}) i brzina predhodnika (v_{fr})

Ponekad je pojmovno lakše da se opiše prostiranje signala pomoću brzine energije. Kao što je ranije rečeno, svaki signal prenosi energiju. **Brzina energije** v_{en} određena je kao odnos gustine protoka energije S , to jest Pointingovog vektora, i gustine energije W , obe uzete u suprotnom smeru od prostiranja. Za elektromagnetno polje – jedino koje je dovoljno brzo da bi bilo interesantno za eventualne nadsvetlosne signale – ovaj odnos je

$$v_{en} = \frac{\langle \mathbf{P} \rangle}{\langle W \rangle} \quad (74)$$

¹ Arnold Zomerfeld (Arnold Sommerfeld, 1868. Königsberg – 1951. München) bio je centralna figura u širenju specijalne i opšte teorije relativnosti i njene primene. Profesor u Minhenu, izuzetan učitelj i pisac knjiga, radio je na teoriji atoma, teoriji metala i u elektrodinamici, i bio je prvi koji je razumeo važnost i misteriju u vezi "Zomerfeldove konstante strukture".

Međutim, isto kao u slučaju brzine čela, u slučaju brzine energije moramo da specificiramo postupak kojem podleže, zapisano kao $\langle \rangle$, to jest, da li mislimo na energiju prenetu glavnim impulsom, ili ispred njega. U vakuumu ne postoji brzina veća od brzine svetlosti.¹ (U opštem slučaju, brzina energije u materiji ima vrednost koja se veoma malo razlikuje od Zomerfeldove brzine signala.) ([Ref. 89](#)).

Poslednjih godina napredak tehnologije svetlosnih detektorâ, koji je omogućio da se otkriju najmanje energije, primorao je naučnike da uzmu najbržu od svih ovih brzina energije da bi opisali brzinu signala. Korišćenjem detektora sa najvećom mogućom osetljivošću možemo kao signal da koristimo prvu tačku u nizu talasa čija se amplituda razlikuje od nule, to jest prvu malu pristignutu količinu energije. Ova brzina tačke, pojmovno slična Zomerfeldovoj brzini signala, obično se naziva **brzina čela**, ili, da bi se još jasnije razlikovala od slučaja Zomerfelda, **brzina predhodnika**. Ona je jednostavno data sa ([Izazov 137s](#))

$$v_{\text{fr}} = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \frac{\omega}{k} \quad (75)$$

Brzina predhodnika **nikada nije** veća od brzine svetlosti u vakuumu, čak ni u materijalima. Ustvari, ona iznosi tačno c , pošto je, za izuzetno velike učestanosti, odnos ω/k nezavisan od materijala, a preovladavaju osobine vakuuma.

➤ Brzina predhodnika je stvarna brzina signala ili **stvarna brzina svetlosti**.

Korišćenjem brzine predhodnika, sve rasprave o brzini svetlosti postale su jasne i nedvosmislene.

Na kraju ovog odeljka stoje pred vama dva izazova. Koja je od svih brzina svetlosti izmerena u eksperimentu određivanje brzine svetlosti, to jest kada je svetlost poslata na Mesec i odbila se nazad? ([Izazov 138s](#)). A sada i jedan malo teži: zašto je brzina signala svatlosti manja unutar materije nego li brzina u vakuumu, kao što pokazuju svi eksperimenti? ([Izazov 139s](#)).

SIGNALI I PREDVIĐANJA

Kada jedna osoba čita tekst putem telefona svom susedu koji sluša i možda to ponavlja, mi govorimo o komunikaciji. Za svaku treću osobu brzina komunikacije manja je od brzine svetlosti. Ali ako sused već zna tekst, on može da ga ponavlja a da nije ni čuo glas onoga koji čita. Za treću osobu takva situacija izgleda da podrazumeva kretanje koja je brže od svetlosti. Predviđanje može zato da **imitira** komunikaciju, posebno ono može da imitira komunikaciju bržu-od-svetlosti (nadsvetlosnu). Ovakvu situaciju je prikazao najzanimljivije 1994. godine Guter Nime (Gunter Nimtz), koji je naizgled prenosio muziku – sva muzika je predvidiva u malim vremenskim razmerama – kroz sistem brži-od-svetlosti. ([Ref. 91](#)). Da bismo razlikovali ove dve situacije, zapazićemo da u slučajevima predviđanja ne postoji prenos energije, nasuprot slučaju komunikacije. Drugim rečima, odrednica signala kao prenosnika informacije beskorisna je i očigledno je da odredi signal kao **prenosnik energije**. U gore pomenutom eksperimentu nikakva energija nije preneta brže od svetlosti. Ista ova razlika između predviđanja s jedne strane i signala ili prostiranja energije s druge strane, biće korišćena kasnije da bi se razjasnili neki poznati eksperimenti u kvantnoj mehanici.

Ako bi tempo kojim bivaju objavljivani radovi iz fizike nastavio da raste, časopisi iz fizike bi uskoro popunili police u bibliotekama brže od brzine svetlosti. To nebi prekršilo teoriju relativnosti pošto nikakva korisna informacija nebi bila preneta.

David Mermin

OPROŠTAJ OD ETERA

Gama zraci, X-zraci, svetlost i radio talasi predstavljaju pokretne elektromagnetne talase. Svi postoje u praznim prostoru. Šta onda oscilira kada svetlost putuje? Sam Maksvel je nazvao “medijum” koji osciluje **eter**. Osobine medijuma koji osciluje navedene su u [Tabeli 15](#). Čudne brojčane vrednosti nastale su usled odrednica jedinice za henri i farad. ([Strana 256](#)).

¹ Signalni ne nose samo energiju, oni isto tako nose negativnu entropiju (“informaciju”). Entropija predajnika se povećava tokom emitovanja. U prijemniku se entropija smanjuje (ali manje, naravno, no što se na predajniku povećava). ([Ref. 92](#))

Zapazite da negativna brzina grupe podrazumeva prenos energije nasuprot prostiranju brzinom svetlosti. To je moguće samo u materijalima sa energetskim nabojem. ([Ref. 93](#)).

Poslednja osobina u **Tabeli 15** je najvažnija: uprkos velikim naporima niko nije mogao da otkrije bilo kakvo **kretanje** takozvanog etera. (**Ref. 94**). Posebno, ne postoji kretanje etera u odnosu na vakuum. Drugim rečima, premda se predpostavlja da eter osciluje, on se ne kreće. Zajedno uz ostale podatke, svi ovi rezultati mogu da se sumiraju u jednu rečenicu: ne postoji način da se napravi razlika između etera i vakuma. (**Izazov 140e**). Ponekad se može čuti da izvesni eksperimenti, ili čak teorija relativnosti pokazuju da eter ne postoji. Postoje mnogo istine u ovom iskazu; zapravo, eksperimenti pokazuju nešta još interesantnije:

- Eter **ne može da se razlikuje** od vakuma.

TABELA 15 Eksperimentalne vrednosti ravnog, klasičnog vakuma, stoga su odbačeni svi kvantni efekti i efekti opšte teorije relativnosti

Fizička osobina	Eksperimentalna vrednost
Propustljivost	$\mu_0 = 1,3 \text{ mH/m}$
Dielektrična konstanta	$\epsilon_0 = 8,9 \text{ pF/m}$
Talasna impedansa/otpornost	$Z_0 = 376,7 \Omega$
Konformna invarijanta	primenjena
Dimenzije u prostoru	3
Topologija	\mathbb{R}^3
Trenje prema telu u pokretu	nema
Sastojci	nema
Masa i sadržaj energije	nema
Kretanje	nema

Ovaj iskaz je tačan u svim slučajima. Na primer, nasli smo u odeljku o opštoj teoriji relativnosti da zakriveni vakuum može da se kreće; ali eter još uvek ne može da se razlikuje od njega.¹ Isto tako kvantna teorija polja potvrđuje da su eter i vakuum identični.

Pa šta onda osciluje u slučaju elektromagnetskih talasa? Sada imamo jednostavan odgovor na ovo staro pitanje: vakuum. Vakuum je nosač, ili medijum nošenja elektromagnetskih talasa. Ravan vakum Lorencu invarijantan prenosi talase, iako on sam ne može da se kreće i ne omogućava predodređen koordinatni sistem. Ravan vakuum je prema tome nešta posebno,² stoga je takođe prihvatljivo da se izbegnu pojmovi "nosač" ili "medijum". Međutim, ovo izbegavanje je nemoguće u opštoj teoriji relativnosti, kao što smo videli, a isto tako je nemoguće i u kvantnoj teoriji, kao što ćemo otkriti.³

Ukratko, eksperimenti u oblasti specijalne teorije relativnosti ukinuli su pojam eter: on je suvišanpojam; fizički vakuum ima mnoge osobine koje su nekada pripisivane eteru. (**Ref. 95**). Od sada nadalje mi ćemo izbaciti pojam eter iz našeg rečnika. S druge strane, još uvek nismo završili proučavanje vakuma; vakuum će nas zaokupljati u ostatku našeg hoda, počev od sledećeg dela naše avanture, od kvantne fizike. (**Izazov 141d**). Zapravo, kvantna fizika pokazuje da sve eksperimentalne vrednosti iz **Tabele 15** zahtevaju dopune i ispravke.

IZAZOVI I ZABAVNE ZANIMLJIVOSTI O SVETLOSTI, POLARIZACIJI I GEOMETRIJSKOJ FAZI

Pošto je svetlost talas, nešta mora da se dogodi ako je usmerimo u rupu čiji je prečnik manji od njene talasne dužine. Šta se tačno događa? (**Izazov 142s**).

¹ Istorijски, pojam "eter" koristio se da bi se irazile mnoge različite ideje, u zavisnosti od autora. (**Ref. 95**). Pre svega, on je korišćen za ideju da vakuum nije prazan, već **ispunjen**; drugo, da se njegova ispunjenost može opisati **mehaničkim modelima**, kao što su točkići, male kuglice, vrtlozi itd; treće, zamišljalo se da je eter supstanca, slična materiji. Sve ove ideje odbačene su teorijom relativnosti. Uprkos tome, ovo pitanje će se ponovo pojaviti u poslednjem delu našeg uspona na planinu, kada bude istraživan opis samog vakuma.

² Mi ćemo otkriti način da objasnimo osobine vakuma na kraju naše avanture

³ Nemačko Društvo Fizičara objavilo je 2013. godine zvanično stručno mišljenje da "elektromagnetskim talasima nije potreban vakuum kao nosač". Društvo je takođe zahtevalo od svih predavača da ovaj pogrešan iskaz prenesu svojim učenicima. Fizičari se još uvek smeju.

* * *

Po sunčanom danu na srednjoj geografskoj širini Zemlje, sunčeva svetlost ima gustinu snage od 1 kW/m^2 . Kolika je odgovarajuća gustina energije i kolika su prosečna električna i magnetna polja? (**Izazov 143s**).

* * *

Posebno čista svetlost često se naziva “monohromatska”. Zbog čega je to pogrešan naziv? (**Izazov 144s**).

* * *

Elektrodinamika pokazuje da zraci svetlosti uvek guraju; nikada ne privlače. Možete li da potvrdite da je “traktor sa zračenjem” nemoguć u prirodi? (**Izazov 145e**).

* * *

Dobro je poznato da je materijal koji se usijava u sijalici sa užarenim vlaknom žica od volframa u inertnom gasu. To je rezultat niza eksperimenata koji je započela prababa svih svetiljki, naime krastavac. Starije generacije znaju da uboden krastavac, kada se priključi u mrežu od 230 V, daje sjajnu zelenu svetlost. Budite oprezni, eksperiment je prljav i opasan.)

* * *

Zraci svetlosti imaju efikasnu temperaturu i entropiju. Iako se često ne raspravlja u današnje vreme, termodynamiku svetlosti detaljno je proučavao Maks fon Laue (Max von Laue, 1879. Koblenz – 1960. Berlin) u godinama između 1900. i 1906. Fon Laue je pokazao da je uobičajeno prostiranje svetlosti u praznom prostoru reverzibilan proces i da entropija zraka u tom slučaju zaista ostaje neizmenjena. (**Ref. 96**). Kada se svetlost prelama, rasipa ili difuzno odbija, efektivna temperatura se smanjuje a entropija raste. Najintersetantniju slučaj je interferencija, pri čemu se entropija obično povećava, ali ponekad se i smanjuje.

* * *

Videli smo da svetlost ima energiju, linearu količinu kretanja, moment količine kretanja, entropiju, temperaturu, pritisak, hemijski potencijal i da se, kao što ćemo videti u sledećem delu, sastoji od kvantona. Prema tome, to znači da se može reći

➤ Svetlost je sustanca.

Uživajte u istraživanju ovog zaključka. (**Izazov 146s**).

* * *

Talasna impedansa vakuma, koja iznosi $376,7 \Omega$, ima praktične posledice. Ukoliko elektromagnetski talas udari u veliki, tanak, otporan film duž normalnog smera, brojna vrednost otpornosti filma određuje šta će se dogoditi. Ako je otpornost filma mnogo veća od $376,7 \Omega$ po kvadratu, film je u suštini providan, pa će svetlost da bude **propuštena**. Ako je otpornost filma mnogo manja od $376,7 \Omega$ po kvadratu, film je u suštini kratak spoj za talase, pa će talas da bude **odbijen**. Najzad, ako film ima otpornost **uporedivu** sa $376,7 \Omega$ po kvadratu, impedansa filma odgovara i svetlost će biti apsorbovana.

* * *

Ako je svetlost koju emituju farovi automobila bila polarizovana od donje leve do gornje desne strane (kao što se vidi sa sedišta vozača) mogao bi kako da se popravi kvalitet vožnje tokom noći: moglo bi da se postavi vetrobransko staklo polarizovano u istom pravcu. Ka rezultat toga, vozač bi video odbijenu svetlost svojih farova, ali bi svetlost koja dolazi sa vozila iz suprotnog smera bila znatno prigušena. Zašto se to ne učini na savremenim vozilima? (**Izazov 147s**).

* * *

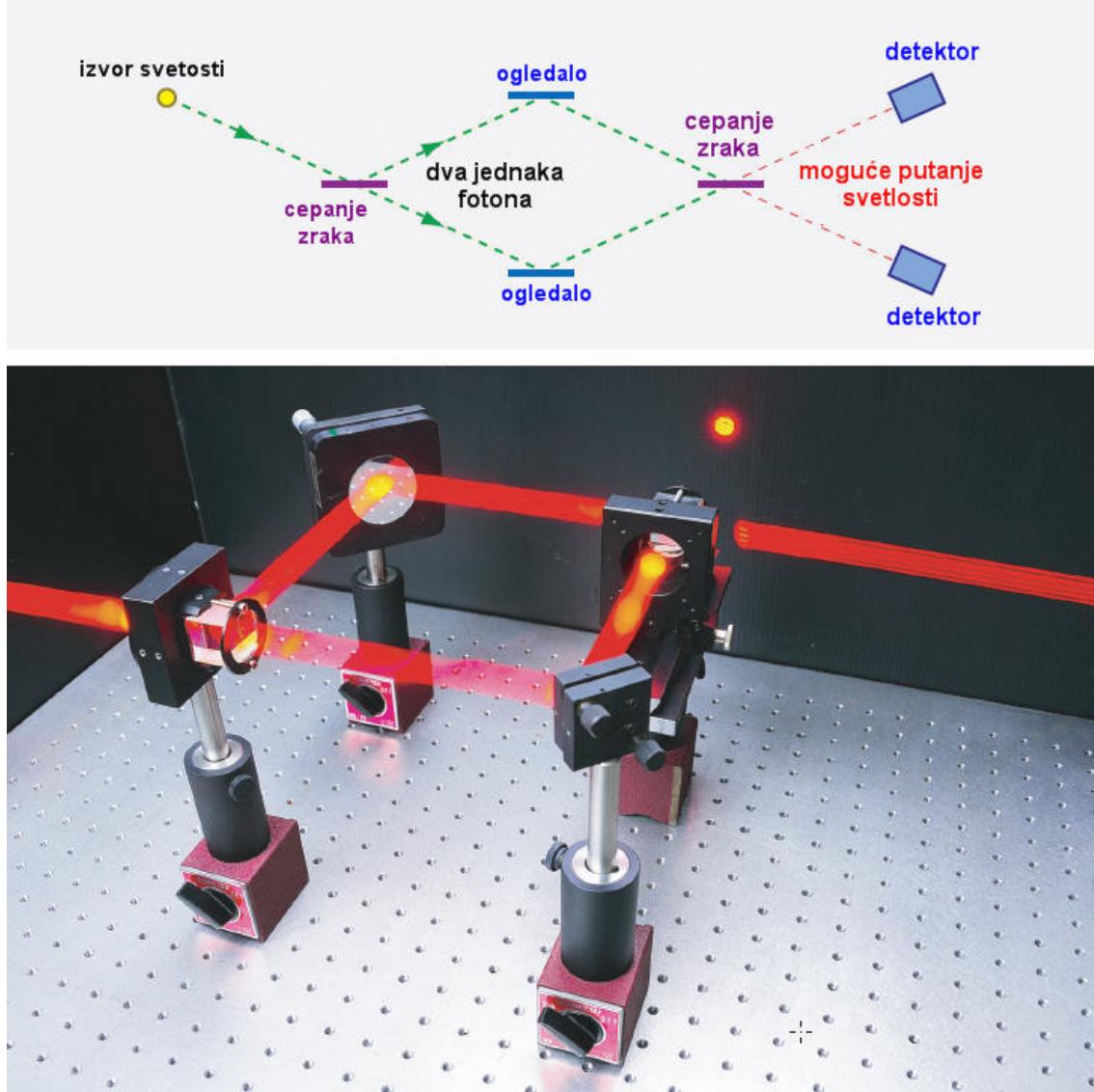
Da li je svetlost koja bi imala malu masu i kretala se brzinom sasvim мало ispod maksimalne brzine moguća u prirodi? (**Ref. 97**). Ovo pitanje je široko proučavano. Ako bi svetlost imala masu, Maksvelove jednakosti morale bi da se menjaju, brzina svetlosti bi zavisila od učestanosti i od brzine izvora i prijema svetlosti, a postojala bi uzdužna elektromagnetna zračenja. Uprkos obećanju za večnu slavu, ovakav efekt nije zapažen.

* * *

Svetlosni zrak može da se polariše. Smer polarizacije može da se menja propuštanjem svetlosti kroz dvolomne materijale, kao što su tečni kristali, kalcit ili napregnuti polimeri. Ali svetlost može takođe da se polariše uz pomoć ogledala. Da bi se postigla ovakva promena polarizacije, putanja svetlosti mora da bude uglavnom u tri dimenzije; putanja ne sme da leži u ravni.

Da bi se razumelo obrtanje polarizacije pomoću ogledala, najbolji alat je takzvana **geometrijska faza**. Geometrijska faza je ugao koji se pojavljuje u trodimenzionalnim putanjama svakog polarizovanog talasa.

Geometrijska faza je pojava koja se javlja i kod svetlosnih talasa, i kod talasnih funkcija, pa čak i kod poprečnih mehaničkih oscilacija. Da bi se vizualno prikazala geometrijska faza posmatrajmo [sliku 87](#).



Slika 86 Uobičajen dvodimenijski interferometar (Mach-Zehnderov) sa stranicama identične dužine i sa izlazima A i B. Svetlost postoji u smeru A, smeru konstruktivne interference (photo c Felix Dieu i Gael Osowiecki).

Leva strana [slike 87](#) može da bude traka papira ili kaiš od kože preklopljeni u prostoru, sa stranama obojenim u svetlu i tamnu boju. Nikakvo nije čudo da je orijentacija trake različita na kraju nego na početku. ([Ref. 98](#)) Za islite da pratite traku prstom vaše ruke položenim na nju duž putanje u tri dimenzije. Na kraju putanje vaša ruka je izvrnuta. Ova izvrnutost je **geometrijska faza** proizvedena ovom putanjom.

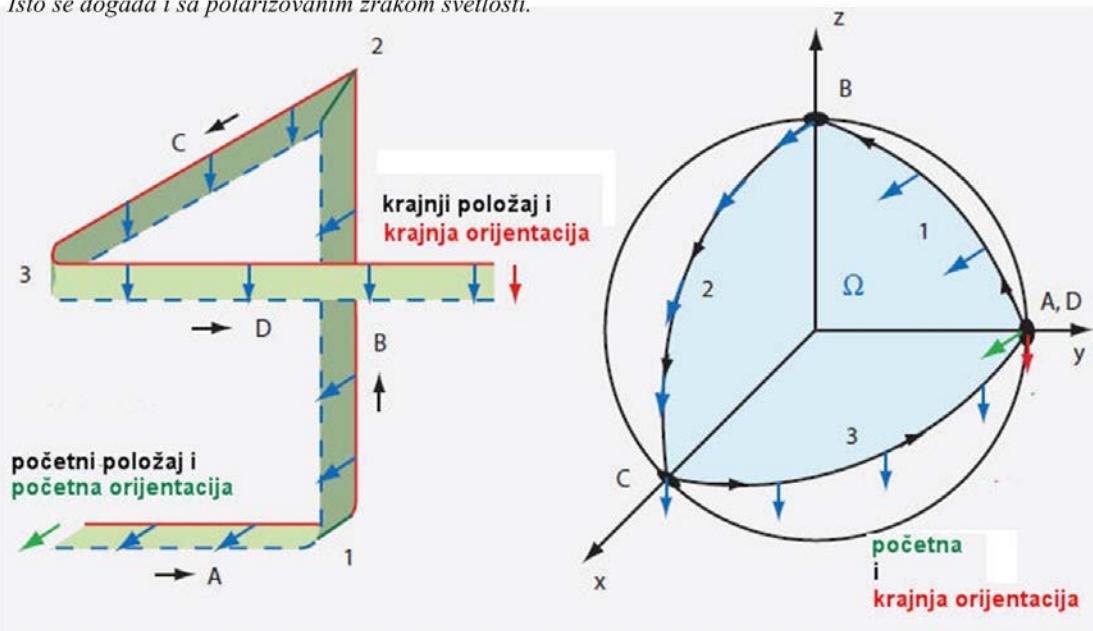
Umesto da rukom pratimo traku papira, zamislićemo sada da polarizovan zrak svetlosti prati putanju određenu centrom trake. Na savijanju ogledala menjaju smer kretanja svetlosti, ali na svakom malom napredovanju polarizacija ostaje paralelna sa predhodnom polarizacijom. Ovo se naziva **paralelni prenos**. Rezultat za svetlost je isti kao za traku. Na kraju putanje polarizacija zraka svetlosti je obrnuta. Ukratko, paralelni prenos u tri dimenzije ima za posledicu geometrijsku fazu. Osim toga, ovo je prema tome omogućilo da se obrne polarizacija svetlosti samo uz pomoć ogledala.

Na isti način deluju poprečne mehaničke oscilacije. Kada se klati Fukoovo klatno ([Vol. I, strana 109](#)), njegova putanja, deo kruga, je trodimenzionalan usled obrtanja Zemlje. Smer oscilacija – slično polarizaciji svetlosti ili orijentaciji trake papira – menja se duž putanja.

Pošto su funkcije talasa u kvantnoj mehanici takođe opisane poprečnom fazom, one pokazuju sličan efekt kada prate trodimenzionalnu putanju. Efekt Aharonov-Bom (Bohm) primer je situacije u kojoj putanja u tri dimenzije dovodi da promene fazu, ([Vol. IV, strana 78](#)).

Objekt koji se kreće duž putanje A-1-B-2-C-3-D i uvek je orijentisan upravno na putanju (pridržava se paralelnog prenosa) biva obrnut, ako je putanja trodimenzionalna: **geometrijska faza**.

Isto se događa i sa polarizovanim zrakom svetlosti.



Slika 87 Levo: trodimenzionalna putanja načinjena za predmet sa šiljkom koji se ponaša kao polarizacija svetlosti. Savijanja 1, 2 i 3 mogu biti zamjenjena ogledalima. Desno: ugao obrtanja polarizacije određen je čvrstim uglom Ω , geometrijskom fazom, okruženog putanjom.

Drugi deo **slike 87**, na desnoj strani, prikazuje takozvanu **loptu pravaca**, koja pokazuje kako da se izračuna ugao obrtanja usled određene putanje. Pokazalo se da je **geometrijska faza prostorni ugao okružen putanjom**. (**Izazov 148ny**). Ukratko, ugao geometrijske faze određen je okruženim prostornim uglom. Uz ovaj rezultat, geometrijska faza nije više zagonetka. (Za putanje koje nisu zatvorene u lopti pravaca, izračunavanja mogu još uvek da se izvedu preko pogodnog zatvaranja putanje na lopti.) Lep slučaj je eksperiment u kojem se polarizovana svetlost uvodi u helikoidalno namotano optičko vlakno. U tom slučaju geometrijska je faza je određena dužinom vlakna i dužinom nagiba namotaja. Efekti geometrijske faze takođe su zapaženi kod molekula, jezgara, neutronskih zraka, u interferometrima svake vrste, u ubrzivačima čestica, u žiroskopima, u opštoj teoriji relativnosti i mnogim drugim okolnostima. (**Ref. 99**).

Istorijski, geometrijsku fazu su nezavisno otkrile mnoge osobe u različitim oblastima fizike. Istraživač koji je razumeo opštu važnost u kvantnoj fizici bio je Majkl Beri (Michael Berry) 1983. godine, ali je faza bila poznata u kvantnoj fizici, optici i mehanici mnogo ranije, između ostalog kroz rad u nuklearnoj fizici Krisifora Longe-Higginsa (Christopher Longuet-Higgins) u godinama oko 1950., kroz rad na molekulima Aldena Mida (Alden Mead) u godinama oko 1970. i naravno, već pomenutim Fukoovim klatnom iz 1851. godine. (**Vol. I, strana 179**). Međutim, takođe i greške u kolicima usmerenim ka jugu, koje su ranije pomenuta (**Vol. I, strana 161**) nastaju usled geometrijske faze. Prema Majklu Beriju ova pojava se sada naziva geometrijska faza. (Isto tako može da se nađe – pogotovo u Vikipediji – i na naziv **Berijeva faza**.) Raniji nazivi, kao što su: adijabatska faza, topološka faza, kvantalna faza, Berijeva faza i razni drugi pojmovi više nisu u uporebi.

* * *

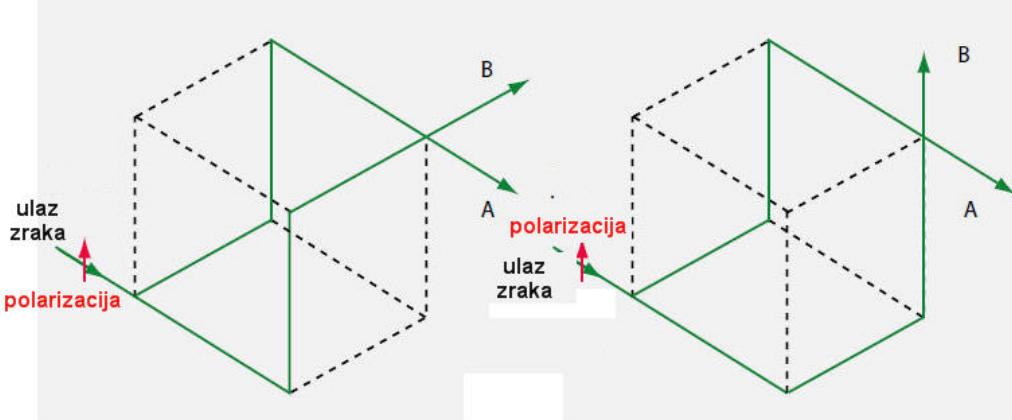
Posle ovog izleta, ovde je izazov iz stvarnog sveta. Koliko je najmanji broj ogledala potreban u uređaju da bi se promenila polarizacija svetlosti koja izlazi iz uređaja u istom smeru kakav je bio na ulazu? (**Izazov 149s**).

* * *

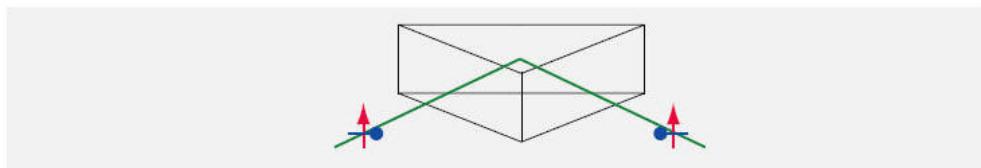
Interferometar je uređaj koji koristi interferenciju svetlosti radi proučavanja osobina zraka svetlosti. Uobičajeni iterferometar, interferometar Mah-Cendera, prikazan je na **slici 86**. Ako sve strane inaju istu dužinu, svetlost se konstruktivno meša u smeru izlaza A, a destruktivno prema drugom izlazu B. Prema tome, svetlost postoji samo u smeru A.

Tek oko 1990 godine ljudi su počeli da se pitaju šta bi se dogodilo u trodimenzionalnom interferometru, kao što je onaj prikazan na **slici 88**. (**Ref. 100**). Da bi se situacija pojasnila, potrebno je nekoliko tačaka.

Prvo, potrebno je da odredimo polarizaciju svetlosti koja se koristi i podsetiti se sa samo svetlost iste polarizacije može da se meša. Drugo, da bi se razmatranje uprostilo, predpostaviće se da su ogledala posebne vrste (naime uglovne kocke na principu totalnog skretanja) tako da ona mogu da **očuvaju** polarizaciju, za razliku od običnih ogledala. Treće, predpostavlja se da sve stranice imaju istu dužinu. Možete li da zaključite koji izlaz je svetlij u oba slučaja sa *slike 88?* (**Izazov 150s**).



Radi jednostavnosti objašnjenja, upotrebljena ogledala i mesta razdvajanja zraka očuvaju položaje ruku



Slika 88 Dva različita trodimenzionalna interferometra, sa jednakim svim stranicama, upotrebljenom ogledalima i mestima razdvajanja zraka i izlazima A i B. Gde će da izade svetlost?

* * *

U oblastima destruktivne interferencije nalaze se takozvani fazni singulariteti. Ako je svetlost koja se meša bela, takve oblasti nisu crne, već pokazuju zadržavajuće oblike u boji ako se jačina svetlosti poveča,. (**Ref. 101**). Ove boje predstavljene oko 1970. godine, bile su otkrivene eksperimentalno nekoliko decenija kasnije. One prate opšti plavo-naranđasti oblik.

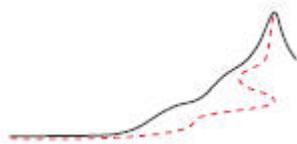
* * *

Maksvelove jednskosti za elektromagnetna polja stare su 150 godina. Da li se o njima sve zna? Verovatno ne. Na primer, tek oko 1990. godine Antonio Randa otkrio je da jednakosti imaju rešenja sa zamršenim linijama polja. Najspektakularnija rešenja do sada objavili su Arajas (Arrayas) i Trueba. (**Ref. 102**) Još iznenadujući rezultati još uvek čekaju na otkrivanje.

ZAKLJUČAK O SVETLOSTI

Ukratko, radio talasi, infracrvena svetlost, vidljiva svetlost, ultraljubičasta svetlost, X-zraci i gama zraci su elektromagnetni talasi. Njihova jednakost širenja u vakuumu je $\omega = ck$, gde je c brzina faze univerzalna konstanta, invarijanta, i iznosi $c = 299\ 792\ 458$ m/s. Elektromagnetni talasi nose energiju, linearnu količinu kretanja i moment količine kretanja, a kreću se brže od bilo kojeg materijalnog objekta. U vakuumu je brzina faze takođe brzina grupe i brzina signala.





Poglavlje 4

SLIKE I OKO – OPTIKA

Optika je oblast koja istražuje nastajanje slika. Posebno, u optici se proučava **nastajanje** svetlosti, **prenos** svetlosti i **detekcija** svetlosti i slika. Uz ovu odrednicu optike, direktno zapažamo da klasična elektrodinamika može da opiše samo prenos svetlosti. Nastajanje i otkrivanje svetlosti uvek su kvantni efekti. Svaka svetiljka je uređaj koji se zasniva na kvantnoj fizici. Svaki detektor svetlosti, uključujući i oko, bazira se na kvantnoj fizici. Prema tome, u ovom poglavlju uglavnom ćemo istraživati kretanje svetlosti i način na koji se stvaraju slika, a daćemo samo kratak uvod u izvore svetlosti i oko. ([Ref. 103](#)). Nastajanje svetlosti biće detaljnije opisano u delu o kvantnoj fizici.

NAČIN NA KOJI SE DOBIJAJU SLIKE

Dobijanje slika je važan deo savremenog društva. Kvalitet slike zavisi od mudre upotrebe optike, elektrofizike, računara i materijalnih nauka. Uprkos duge istoriji optike, postoje još uvek novi rezultati u ovoj oblasti. Slike, to jest dvodimenzionalne ili trodimenzionalne reprodukcije fizičkih situacija, mogu da se dobiju pomoću najmanje šest grupa tehnike:

- **Fotografija** koristi izvor svetlosti, objektive i film – ili druge široke oblasti detektora unutar kamere. Fotografija se može koristiti u refleksiji, u prenosu, uz zavisnost od faze, sa raznim osvetljenjima i sa izvorima svetlosti i detektorima za različite talasne dužine.
- **Optički mikroskopi** koriste izvor svetlosti, sisteme povećavajućih sočiva i film (ili drugi detektor šireg opsega). Ako osvetljenje u prenosu prođe kroz uzorak, radi se o **mikroskopu sa svetlim poljem**. (Varijante koriste filtere u boji ili polarizacione filtere.) Ako je osvetljenje sa strane, radi se o **posrednom mikroskopu**. Ako je osvetljenje ograničeno na spoljni prsten svetlosti, radi se o **mikroskopu sa tamnim poljem**. Još više razrađen sistem osvetljenja, koji koristi talase u ravni, omogućava mikroskop sa kontrastom faze. ([Ref. 104](#)). (Ovaj mikroskop je izmislio Fric Cernike 1930-ih godina i za to dobio Nobelovu nagradu za fiziku 1953. godine.) Ako se rascepi polarizovan zrak osvetljenja na dve komponente koje prodiru kroz uzorak u bliskim (ali ne istim) mestima, a onda naknadno spoje, radi se o **mikroskopu sa diferencijanim inferentnim kontrastom**. Ako se uzorak obrađuje fluorescentnom bojom, pa se svetlost koja osvetljava otkloni filterom, a vidi se samo fluorescencija, radi se o **mikroskopu sa fluorescencijom**. Kvalitet slike sa skupih mikroskopa može naknadno da se poboljšava pomoću računara, korišćenjem tehnike razlaganja.



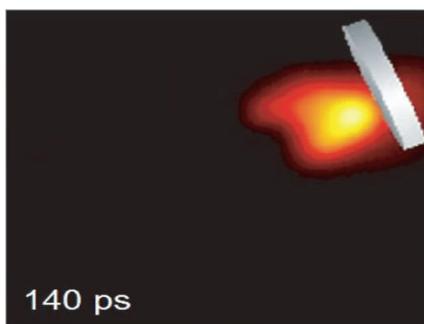
Slika 89 Slika šake dečaka starog 10 godina sa polidaktlijom (šest prstiju), fotografisana X-zracima (© Drgnu23).

- **Teleskopi** se koriste uglavnom u geodeziji i astronomiji. Najnapredniji astrononski teleskopi mogu da kompenziraju slike zvezda od efekata turbulencija u atmosferi; oni takođe mogu da snimaju slike uz različite talasne dužine, u rasponu od radio učestanosti, infra crvene svetlosti, vidljive svetlosti, ultraljubičaste i X-zraka. Jednostavniji teleskopi su na principu sočiva; teleskopi visokih performansi su obično na principu ogledala. Da bi se izbeglo apsorbovanje u vazduhu teleskopi sa X-zracima

moraju da rade izvan atmosfere, na primer u raketama, satelitima ili balonima za velike visine. Oni su svi na principu ogledala.

- **Tehnike skeniranja** stvaraju slike tačku po tačku kretanjem detektora ili izvora svetlosti ili i jednog i drugog. Postoje brojne mikroskopske tehnike skeniranja: **mikroskop sa konfokalnim lasersnim skeniranjem, optički mikroskop sa skeniranjem bliskog polja** na bazi optičkih vlakana i njihove kombinacije sa fluorescentnim tehnikama ili raznim tehnikama razlaganja. Mnoge od ovih tehnika skeniranja mikroskopom omogućavaju rezoluciju mnogo manju no što je talasna dužina svetlosti, karakteristiku koja je nemoguća sa konvencionalnim tehnikama mikroskopa. Tehnologija skeniranja koristi se takođe u posebnim oblastima fotografije.
 - **Tomografija** koja se obično izvodi u prenosu, koristi izvor i detektor koji se zajedno obrću oko objekta. Ova tehnika, koja je efektivno specijalizovana tehnika skeniranja, omogućava snimanje preseka u fizičkom telu. Na primer, svetlosna tomografija je obećavajuća tehnika, bez rizika po zdravlje, za otkrivanje kancera dojke.
 - **Holografija**, koristi lasere i široko područje detektora, a omogućava dobijanje trodimenzionalnih slika objekta. Takve slike izgledaju kao da lebde u prostoru. Holografija može da se koristi u refleksiji ili u prenosu.

Svaka metoda dobijanja slika može da se koristi sa radio talasima, infracrvenim svetlom, vidljivim svetlom, ultraljubičasim svetlom, X-zracima ili gama zracima. Ustvari, ove tehnike mogu da se koriste i sa zrakom elektrona; tada se radi o elektronskoj optici. U svom načinima snimanja, trka je dvostruka: ciljevi napretka za slike sa što je moguće većom rezolucijom i za snimke sa što je mogućim kraćim vremenom okidanja. Što je kraće vreme okidanja, rezultat daje više informacija na filmu. Upečatljiv primer filma sa pokretnim impulsima svetlosti prikazan je na **slici 90**. Započećemo naš pregled tehnika snimanja najvažnijim alatom: izvorom svetlosti.



Slika 90 Film snimljen pomoću specijalne ultrabrzne kamere prikazuje kratke impulsa svetlosti koji se odbijaju od ogledala (QuickTime film © Wang Lihong i Washington University u St. Louis).

IZVORI SVETLOSTI

Bez izvora zračenja nebi bilo slika. Svim tehnikama snimanja potreban je izvor zračenja. O oblasti optike vidljive svetlosti najvažniji izvori svetlosti su **topli** objekti, kao što su sveće, Sunce ili bljeskalice. Fizički govoreći ovi izvori svetlosti su približnost crnim telima. Pogledajmo zbog čega se ona koriste. **Hladni** izvori svetlosti, kao što je svetlost koju emituju poluprovodničke diode, svici ili laseri biće objašnjeni kasnije.

ZAŠTO MOŽEMO DA SE VIDIMO MEĐUSOBNO? CRNA TELA I TEMPERATURA BOJE

Fizičari koriste termin "crno" na čudan način. Telo koje savršeno svetli naziva se crno telo. U ovoj oblasti "savršeno" znači da površina tela **nema** uticaja na njegovu boju.

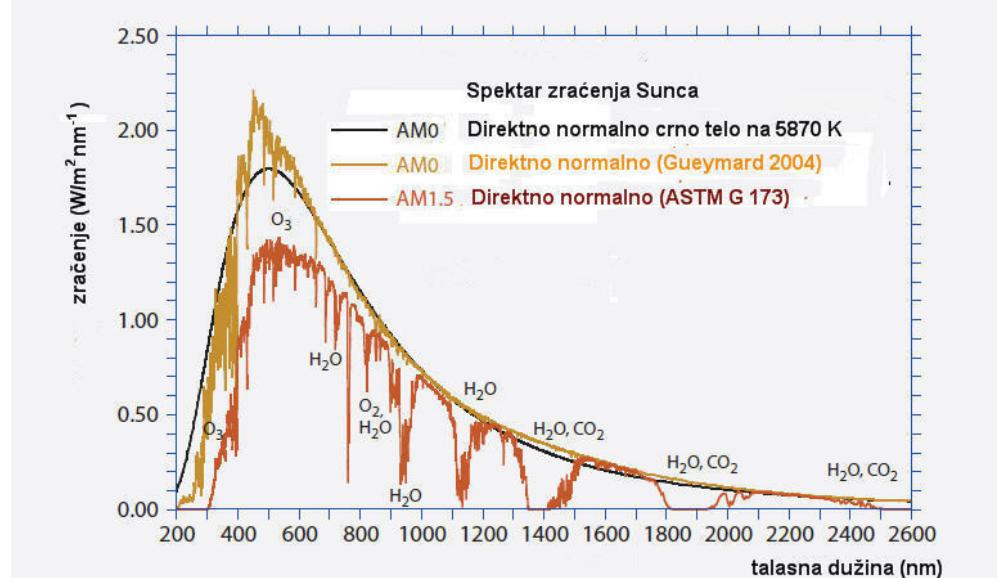
- **Crno telo** je takvo telo koje upija sva zračenja koja udaraju u njega.

Drugim rečima, crno telo je telo bez odbijanja ili propuštanja zračenja. Crna tela su idealizovana; pre svega postoje samo crna tela na niskim temperaturama. Sa porastom temperature crna tela svetle crnom, smeđom, crvenom, narandžastom, žutom, belom ili plavom svetlošću.

Bitno svojstvo crnih tela je da boja koju imaju, to jest svetlost koju zrače, ne zavisi od njihove površine. Crna tela su u tom smislu **idealna**, Stvarni objekti, koji ispoljavaju površinske efekte nogu da se svrstaju

prema svojoj sposobnosti **emitovanja - emisivnosti**. Emisivnost određuje stepen u kojem se objekt približava crnom telu. Emisivnost ogledaja iznosi oko 0,02, dok crna čađ može imati jako veliku vrednost, oko 0,95. Praktično sva tela na svakodnevnim temperaturama nisu crna tela: njihova boja nije određena emitovanjem, već uglavnom apsorpcijom i odbijanjem svetlosti sa njihovih površina.

Crna tela, kao što će nam pokazati odeljak o kvantnoj teoriji, imaju gladak spektar emisije. Primer spektra crnog tela i spektra realnog objekta – u ovom slučaju Sunca – prikazan je na [slici 91](#)



Slika 91 Spektar crnog tela na 5870 K, spektar Sunca iznad atmosfere u smeru Sunca sa 1350 W/m^2 i spektar sa 1,5 mase vazduha, ili gustine atmosfere, u sredini. sa 844 W/m^2 . Drugi grubo prikazuje spektar u tipičnom sunčanom danu na površini mora. Prikazani su i gasovi koji apsorbuju neke vrednosti talasnih dužina (© Chris Gueymard).

Crna tela se isto tako koriste za određivanje **bele** boje. Ono što obično nazivamo **čista bela** je boja koju emituje Sunce. Suncve nije dobro crno telo, kao što pokazuje [slika 91](#) (njegova efektivna temperatura je 5870 K). Zbog ovog problema čisto bela boja određena je kao boja crnog tela na 6500 K, to jest određena je od strane Međunarodne komisije za rasvetu (Commission Internationale d'Eclairage) ([Ref. 105](#)). Kao što je pomenuto, toplija crna tela su plavičasta, a hladnija žuta, narandžasta, crvena, smeđa ili crna. Na ovaj način su razvrstane zvezde na nebu. ([Vol. I, strana 192](#)).

Zbog toga su crna tela ona tela koja savršeno svetle. Većina realnih tela samo je gruba približnost crnim telima, čak i pri temperaturama pri kojima svetle žutom svetlošću. Na primer, sijalice sa užarenim vlaknom volframa (inkadescentne sijalice) na oko 2000 K imaju emisivnost od oko 0,4 za većinu talasnih dužina, tako da njihov spektar odgovara samo delu spektra crnog tela. (Međutim, staklo sijalice apsorbije zatim mnoge ultraljubičaste i infracrvene komponente, tako da konačan spektar uopšte nije kao kod crnog tela.)

Zračenje crnog tela ima dve važne osobine: prvo, emitovana svetlost raste sa četvrtim stepenom temperature. Uz sam ovaj odnos možete da proverite temperaturu Sunca, pomenuto maločas, jednostavno ako uporedite veličinu Sunca sa širinom vašeg palca kada vam je ruka ispružena prema Suncu. Da li ste u mogućnosti da to učinite? ([Izazov 151d](#)). (Savet: uzeti ispravnu približnost da je prosečna temperatura Zemlje oko 14° C usled zračenja Sunca.) ([Ref. 106](#)).

Tačan izraz za gustinu energije u po učestanosti v , koja se emitiše na temperaturi T , može se zaključiti iz zakona zračenja za crno telo, kojeg je otkrio Maks Planck (Max Planck).¹

¹ Maks Planck (Max Planck 1858. Kile – 1947 Gottingen), bio je profesor fizike u Berlinu i centralna figura u termodynamici. On je otkrio i dao ime Boltzmanove konstanti k i kvant rada h , često nazivan Plankova konstanta. Njegovo uvođenje kvantne hipoteze bilo je rođenje kvantne teorije. Takođe je radio na tome da radovi Ajnštajna postanu poznati u krugu fizičara, a potom mu je obezbedio posao u Berlinu. Dobio je Nobelovu nagradu za fiziku 1918. godine. Bio je važna figura u naučnim krugovima Nemačke; takođe je bio jedan od vrlo retkih koji je imao hrabrosti da kaže Adolfu Hitleru u lice kako je loša ideja da se otpuštaju profesori jevrejskog porekla. ([Ref. 107](#)). (Dobio je izliv besa kao odgovor.) Izuzetno skroman, uz mnogo tragedija u svom privatnom životu, bio je cenjen od svih koji su ga poznavali.

$$u(v,T) = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{v^3}{e^{\frac{hv}{kT}} - 1} \quad (76)$$

Načinio je važna otkrića, koja ćemo razmatrati detaljnije u kvantnom delu našeg uspona na planinu, jednostavno upoređujući ovu krivu sa eksperimentima. Nova konstanta h je nazvana ***kvant rada*** ili ***Plankova konstanta***, ima vrednost od $6,6 \cdot 10^{-34}$ Js i centralna je za celokupnu kvantu teoriju (**Vol. IV, strana 18**), kao što ćemo otkriti. Druga konstanta koju je uveo Plank, Boltmanova konstanta k , javlja se kao predfaktor temperature u celoj termodinamici, pošto deluje kao jedinica pretvaranja temperature u energiju.

Zakon zračenja daje za gustinu ukupne emitovane energije izraz (**Izazov 152e**)

$$u(T) = T^4 \frac{8\pi^5 k^4}{15c^3 h^3} \quad (77)$$

U daljem tekstu mi ćemo izvesti iz njega izraz za jačinu toplotnog zračenja I . Ovaj izraz, jednakost (85) (**strana 173**) izведен je korišćenjem $I = uc/4$. (Zašto) (**Izazov 153ny**).

Druga osobina zračenja crnog tela je vršna talasna dužina, to jest, talasna dužina koja se emisuje uz najveću jačinu. Ova talasna dužina određuje boju crnog tela, a izvedena iz jednakosti (76) ona iznosi (**Izazov 154ny**)

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{T} \frac{hc}{4,956k} = \frac{2,90 \text{ mm K}}{T} \quad \text{ili} \quad \hbar v_{\max} = T \cdot 2,82 \frac{k}{h} = T \cdot 5,9 \cdot 10^{10} \text{ Hz/K} \quad (78)$$

I jedna i druga jednakost nazivaju se ***Vinov zakon rasporeda boja***, prema njihovom pronalazaču.¹ Promena boje sa temperaturom koristi se u optičkim termometrima; to je takođe način na koji se meri temperatura zvezda. Za temperaturu ljudskog tela od 37°C , dobija se vršna talasna dužina od $9,3 \mu\text{m}$ ili 115 THz što je prema tome boja glavnine zračenja koje emisuje svako ljudsko biće. (Vršna talasna dužina ne odgovara vršnoj učestanosti. Zašto?) (**Izazov 155s**). S druge strane, u skladu sa zakonima telekomunikacija svake države, svaki emiter bilo kojeg zračenja mora da ima dozvolu za rad; iz toga sledi ako se strogo posmatra, da su u Nemačkoj samo mrtvi ljudi legalni, i to samo ako njihovo telo ima temperaturu apsolutne nule.

Videli smo da crno telo – ili zvezda – može da bude plavo, belo, žuto, narandžasto, crveno ili smeđe. Crno telo nije nikada zeleno. Možete li da objasnite zašto? (**Izazov 156e**).

Ranije smo pretpostavili da svaki materijal sastavljen od nanelektrisanja emisuje zračenje. Jeste li u mogućnosti da nađete prost dokaz koji pokazuje da li je toplotno zračenje to pretpostavljeno klasično zračenje ili nije? (**Izazov 157ny**).

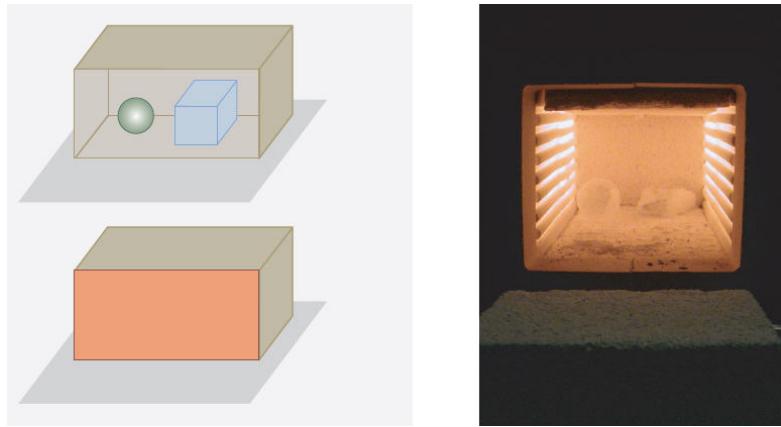
No, vratimo se na pitanje iz naslova ovog odeljka. Postojanje toplotnog zračenja podrazumeva da će svako toploto telo da se ohladi, čak i ako ga stavimo i okruženje sa najboljom izolacijom, naime u vakuum. Još preciznije, ako je vakuum okružen zidom, temperatura tela u vakuumu postepeno će se približiti temperaturi zida.

Interesantno je, ali kada temperatura zida i temperatura tela unutar zidova postane ista, događa se nešta čudno. Ovaj efekt je težak da bi se proverio kod kuće, ali upečatljive fotografije postoje u literaturi. (**Ref. 108**).

Jedan raspored u kojem su zidovi i objekt unutar njih na istoj temperaturi je peć. Pokazalo se da je nemoguće da se vidi objekt u peći uz svetlost koja dolazi od toplotnog zračenja. Na primer, ako su peć i sve što je u njoj zagrejani do crvenog usijanja, snimanje slike unutrašnjosti peći (ali bez blica!) neće dati ništa; ne postoje promene kontrasti ni sjajnosti koje bi dopustile da razlikuje objekt od zidova ili njegovog okruženja. Možete li da objasnite nalaz? (**Izazov 158s**).

Ukratko, mi smo sposobni da vidimo jedan drugog zbog toga što izvor je svetlosti koji koristimo na ***različitoj*** temperaturi od nas. Možemo da se vidimo pošto ne živimo u toplotnoj ravnoteži sa našim okruženjem.

¹ Wilhelm Vin (Wilhelm Wien, 1864. Gaffken – 1928. München) dobio je Nobelovu nagradu za fiziku 1911. godine zbog otkrića ove jednakosti. Vrednost konstante koja se pojavljuje u Vinovom zakonu može jedinstveno da se izračuna iz jednakosti (76), ali ne može da se izrazi kao obrazac. Ustvari, Vinova konstanta predstavlja rešenje jednakosti $x = 5(1 - e^{-x})$.



Slika 92 Tela koja su u peći na sobnoj temperaturi razlikuju se po boji, nasuprot telima na visokoj temperaturi (photo © Wolfgang Rueckner).

GRANICE KONCETRACIJE SVETLOSTI

Izvori svetlosti bi trebalo da budu što je moguće sjajniji. Postoji li bilo koja granica? Interesantno, za crno telo postoji važno i poučno ograničenje.

Ako napravimo veliko sočivo ili veliko krivo ogledalo, možemo da prikupimo sunčevu svetlost i usmerimo je u malu tačku. Svako je kao dete koristio sabirna sočiva da na taj način progori crne tačke na novinama ili da sprži mrave. U mestu Odeilo, u Španiji, imućniji istraživači su izgradili zakrivljeno ogledalo veliko kao kuća, kako bi proučavali upotrebu solarne energije i ponašanja materijala na visokim temperaturama. U suštini, ogledalo obezbeđuje jeftin način da u njegovu žiju (fokus) stavite peč. (A “fokus” je na latinskom reč za “ognjište”.)



Slika 93 Najnovije ogledalo solarne peći u mestu Odeilo u Francuskim Pirinejima (© Gerhard Weinrebe)

Deca brzo shvate da im velika sočiva ili ogledala omogućavaju da zapale stvari ili papir lakše nego ona mala. Mesto Odeilo prikazano na [slici 93](#) rekorder je u zahtevu za najveću moguću površinu prikupljanja. Interesantno je, ali pravljenje većeg ogledala nebi imalo smisla. Bilo kolika da je njegova veličina, temperatura takve tvorevine je ograničena. ([Ref. 109](#)).

- Efektivna temperatura svetlosti u žiji ne može da prekorači temperaturu orginalnog izvora svetlosti.

U svim praktičnim situacijama, temperatura izvora svetlosti je mnogo veća od one u žiji. Temperatura površine Sunca iznosi oko 5870 K; najviša temperatira do sada postignuta u Odeilu je oko 4000 K. Da li se u mogućnosti da pokažete da je ovo ograničenje jednak drugom načelu termodinamike, kako su pokazali Hemholc, Klausijus i Eri? ([Izazov 159s](#)).

Ukratko, priroda je obezbedila **granicu** za koncentraciju energije svetlosti. Još preciznije, možemo reći: termodinamičku granicu koja može da se dostigne putem zagrevanja toplotnih izvora svetlosti.

Termodinamička granica zagrevanja pomoću svetlosti nije sprecila ljudе da koriste koncentraciju svetlosti u cilju prikupljanja sunčeve energije. Eksperimentalne elektrane, kao što je ona prikazana na *slici 94*, obećavajući su način snabdevanja domaćinstava energijom kada cena fosilnih goriva isuviše poraste.



Slika 94 Solarna termoelektrana u mestu Sanlucar la Mayor, u blizini Sevilje, u Španiji (© Wikimedia)

Kao što smo upravo videli, zrak topote svetlosti ima entropiju. Nasuprot njemu, zrak lasera ima malu entropiju. Možemo takođe da pripšemo vrednosti temperature za bilo koji zrak; temperatura zraka lasera je “negativan” broj. To nekako i intuitivno ima smisla, pošto je zrak lasera sposoban da rashladi gasove; ili još preciznije, zrak lasera je neravnotežno stanje, a temperatura za takve slučaje nije određena.

U mnogim državama novac poreskih obveznika troši se na takozvane centre za inercijsku zatvorenu fuziju. U takvim centrima gde više snažnih lasera ciljaju malu loptu ili materijal, tipično veličine od 1 mm; postignuta je temperatura u cilju od oko 3 MK (ili ekvivalentno, 300 eV). (*Izazov 160s*).

MERENJE JAČINE SVETLOSTI

Izvori svetlosti razlikuju se po sjajnosti. Merenje onog što nazivamo “tamno” ili “svetlo” nekako je zamršeno, pošto svetlost može da bude rasuta ili usmerena. Da bi se postiglo ispravno merenje, međunarodni sistem jedinica SI (*strana 255*) odredio je specifičnu osnovnu jedinicu, kandelu:

- **kandela** je jačina svetlosti u datom smeru izvora koji emituje monohromatsko zračenje na učestanosti $540 \cdot 10^{12}$ Hz i ima intenzitet zraka u tom smeru od 1/683 vati po steradijanu.

Kandela je prema tome jedinica za snagu svetlosti po (prostornom) uglu, obično nazvana **jačina svetlosti**, osim što je ispravljena za osetljivost oka: kandela meri samo **vidljivu** snagu po uglu. Odrednica kandele jednostavno glasi da je $683 \text{ cd} = 683 \text{ lm/sr}$ što odgovara 1 W/sr . Na primer, svetleći crv proizvodi $0,01 \text{ cd}$, sveća u stvai proizvodi oko 1 cd , far automobila oko 100 cd i svetionik oko 2 Mcd . Drugi način da se sagleda kandela je sledeći: gledanje u izvor svetlosti od 1 cd sa rastojanja od 1 m je samo malo sjajnije od punog Meseca.

Ukupna snaga svetlosti, bez obzira na njen smer, izražava se u lumenima. Prema tome, $683 \text{ lm} = 683 \text{ cd} \cdot \text{sr}$ odgovara 1 W . Drugim rečima, i lumen i vat mere snagu, ili upliv svetlosti. Ova razlika se izražava dodavanjem “svetlosni” ili “izzračen” upliv: prema tome lumeni mere **svetlosni upliv**, dok vatima meri **izzračeni upliv**.

Činilac 683 koji se pojavljuje u odrednici posledica je istorije. Obična sveća emituje jačinu osvetljenja od otprilike 1 kandela. Da stavimo to u perspektivu: noću se sveća može da vidi do daljine od 10 ili 20 km. (*Izazov 161e*). Inkadescentna sijalica od 100W proizvodi 1700 lm, a najsjajnija komercijalna LED oko 20 lm, premda su uređaji u laboratoriji premašili 1000 lm. Projektor u bioskopu proizvodi 2 Mlm, a najsjajniji blesk, kao što je munja, 100 Mlm.

Sunčev zračenje je oko 1300 W/m^2 tokom sunčanog dana; s druge strane, **osvetljaj** je samo $120 \text{ klm/m}^2 = 120 \text{ klx}$ ili 170 W/m^2 . Oblačan letnji dan, ili vedar zimski dan proizvode oko 10 klx. Ove brojke pokazuju da je veliki deo energije Sunca pristigle na Zemlju izvan vidljivog dela spektra.

Osvetljaj je u suštini ono što mi nazivamo "sjaj" u svakodnevnom životu. Na glečerima, u blizini obale mora ili na vrhu planine, ili pri posebnim vremenskim uslovima, osvetljaj može da dostigne 150 klx. U muzejima se održava tama, pošto bi se slike naslikane na bazi vode degradirale pri osvetljaju iznad 100 lx, a slikane tehnikom ulja iznad 200 lx. ([Ref. 110](#)). Oči gube sposobnost razlikovanja boja negde između 0,1 lx i 0,01 lx, a funkcija im prestaje ispod 1 nlx. Tehnički uredaji koji proizvode sliku u tami, kao što su noćne naočari, počinji da rade pri 1 μ lx. Ugdred, samo ljudsko telo *sjaji* sa oko 1 plx, vrednošću koja je isuviše mala da bi je otkrile oči, ali se lako meri specijalizovanim aparatima. Poreklo ove emisije još uvek je tema istraživanja.

TABELA 16 Neke izmerene vrednosti osvetljaja

Opažanje	Osvetljaj
Sjaj ljudskog tela	1 plx
Slaba zvezda	0,1 nlx
Sirijus	10 μ lx
fot (stara jedinica osvetljaja)	10 μ lx
Jupiter	20 μ lx
Tamna noć bez mesečine	1 mlx
Pun Mesec	0,01 do 0,24 lx
ulica noću, slab saobraćaj, slabo osvetljenje	0,1 do 3 lx
ulica noću, jak saobraćaj	10 do 30 lx
Za čitanje je potrebno	50 do 100 lx
Platno u bioskopu	100 lx
Radno mesto	0,2 do 5 klx
Oblačan dan	1 klx
Najsjajnija svetiljka, u hirurgiji	120 klx
Sunčan dan	120 klx
Film u projektoru bioskopa	5 Mlx
Izaziva bol u očima	100 Mlx

Naveća postignuta jačina svetlosti, proizvedena laserom velike snage, prevazišla je 10^{18} W/m², jačinu reda većeg od 15 puta sunčeve svetlosti. (Koliko je to lx?) ([Izazov 162e](#)). Takve jačine se prozvode uskim usmeravanjem zraka impulsnog lasera. Električno polje u takvom impulsu svetlosti istog je reda kao i ono unutar atoma; prema tome, takav zrak svetlosti jonizuje svaki materijal sa kojim se sreće, uključujući i vazduh. ([Ref. 111](#)).

Svetlosna gustina je veličina koju često koriste svetlosni tehnici. Njena jedinica je 1 cd/m², nezvanično nazvan 1 Nit, a skraćeni 1 nt. Ljudsko opo koristi *štapiće* tek od 0,1 μ cd/m² do 1 mcd/m², a vide pomoću čepića tek iznad 5 cd/m². Najbolji vid postiže oči između 100 i 50.000 cd/m², a potpuno se preopterećuju na 10 Mcd/m², što je ukupan opseg jačine reda 15. Veoma malo tehničkih senzora postiže ovaj opseg.

DRUGI IZVORI SVETLOSTI I ZRAČENJA

Osim crnih tela postoje moge druge vrste izvora svetlosti. Hladni izvori svetlosti u rasponu od svetlećih riba do lasera velikih snaga. Oni su nalaze u rasponu od jednog atoma pa do veličine zgrade, a koštaju od nekoliko dela eura do stotine miliona evra, dok im je vreme trajanja od nekog dela sekunde do strotinak godina.

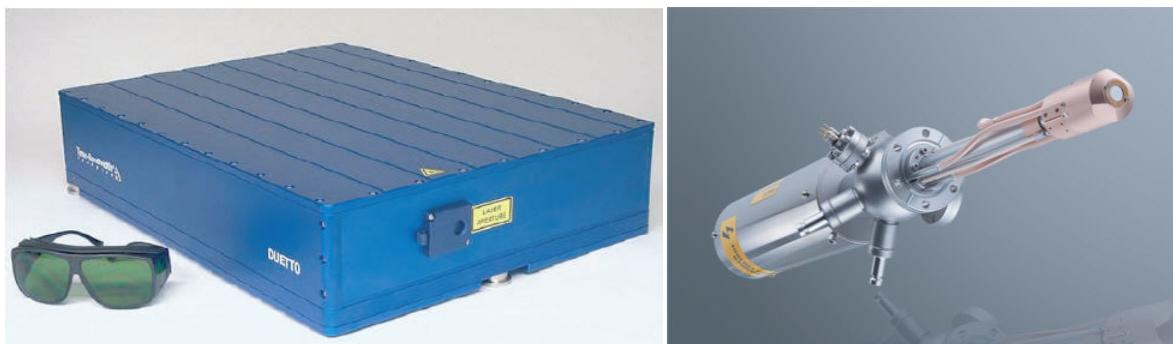
Laseri su važan izvor svetlosti za industriju, medicinu i istraživanja. Laseri mogu da emituju vidljivu, infracrvenu i ultraljubičastu svetlost, neprekidno ili kao impulse svetlosti, različitih snaga i oblika zraka; njih ćemo opisati kasnije u toku naše pustolovine. ([Vol. V, strana 84](#)). U oblasti snimanja, laseri se koriste u više tehnika mikroskopa, u sistemima snimanja skeniranjem, u tomografiji i holografiji.

Izvori radio talasa upbičajeni su u svakodnevnom životu: mobilna telefonija, radio predajnici, TV predajnici, i voki-toki izvori su radio talasa. Radio talasi se koriste za snimanje u magnetnoj rezonansu ([Vol. V, strana 123](#)), koja omogućava da se izvrše snimanja unutrašnjosti ljudskog tela, kao i u

astronomiji. Pošto su mnoge zvezde radio predajnici, može da se snimi nebo na talasnoj dužini radio talasa. (**Vol. II, strana 165**). U današnje vreme je radio astronomija važan deo savremene astronomije i dovela je do mnogih otkrića. Radio astronomija je takođe bila važan alat za precizno ispitivanje i potvrdu opšte teorije relativnosti.

Na drugom kraju elektromagnetskog spektra, takođe su uobičajeni izvori svetlosti koji emituju X-zrake i gama zrake. Oni se rutinski koriste u medicini i nauci o materijalima, a takođe i za različite tehnike snimanja.

Svi izvori elektromagnetskih zračenja potencijalno su opasni po ljude, tako da se prilikom njihovog korišćenja moraju preuzeti posebne mere opreza. To takođe dovodi do raznih neželjenih razvoja.



Slika 95 Savremen pokosekundni impulsni laser (levo) i industrijski izvor X-zraka (desno), oba veličine od oko 700 mm (© Time-Bandwidth, SPECS).

ZRAČENJE KAO ORUŽJE

Elektromagnetno zračenje velike jačine je opasno. U многим državama je više novca na raspolaganju za istraživanje oružja za ubijanje nego za podizanje nivoa obrazovanja i zdravlja njihovih građana. Istraživano je nekoliko vrsta oružja za ubijanje koje koriste elektromagnetne talase. Dve su posebno napredovale.

Prvo oružje koje koristi elektromagnetno zračenje je teretni automobil sa pokretnom paraboličnom antenom na krovu, prečnika oko 1 m, koja emituje snažan zrak mikrotalasa – od nekoliko kW na učestanosti od 95 GHz. Zrak je nevidljiv, kao i svi mikrotalasni zraci; u zavisnosti od snage i oblika on je bolan ili smrtonosan na udaljenosti od 100 m i više. Ovaj užasan uređaj, sa zvaničnim nazivom **aktivni sistem za odbijanje**, kojim operater može da načini mnogo žrtava čak i usled greške, bio je spremjan još 2006. godine. Neki ekstremni političari žezeleli su da ga predaju policiji. (Ko bi očekivao da je parabolična antena tako opasna?) Napori da se zabrani ovo oružje polako se prikupljaju širom sveta.

Druge oružje u razvoju je takođe **impulsni laser za ubijanje**. Ideja je da se primeni laser koji emituje zračenja koja ne apsorbuje vazduh, para ili slične prepreke. Primer je impulsni laser sa deuterijum fluoridom, koji emituje talasnu dužinu od 3,5 μm. Ovakav laser sagoreva svaki materijal kojeg pogodi; osim toga, isparavanje plazme pravi preko produkata sagorevanja jak udarac, tako da su ljudi koje pogodi ovaj laser istovremeno i povređeni i udareni. Na sreću, još uvek je teško da se izradi takav uređaj dovoljno robustan za praktičnu upotrebu. Uprkos tome, stručnjaci očekuju da se borbeni laser, montiran na teretni automobil, pojavi veoma brzo – posle brojnih Potemkinovih verzija.

Ukratko, verovatno je da će se oružje sa zracima pojaviti u godinama koje dolaze. Ipak, ostaje nejasno šta ljudi koji rade na takvim razvojima pričaju svojoj deci kada naveče dođu kući.

SLIKE – PRENOS SVETLOSTI

Svaka slika je sastavljena prenosom svetlosti na upotrebljiv način duž poznate putanje. Najjednostavnija moguća putanja je prava linija.

PRAVLJENJE SLIKA SA OGLEDALIMA

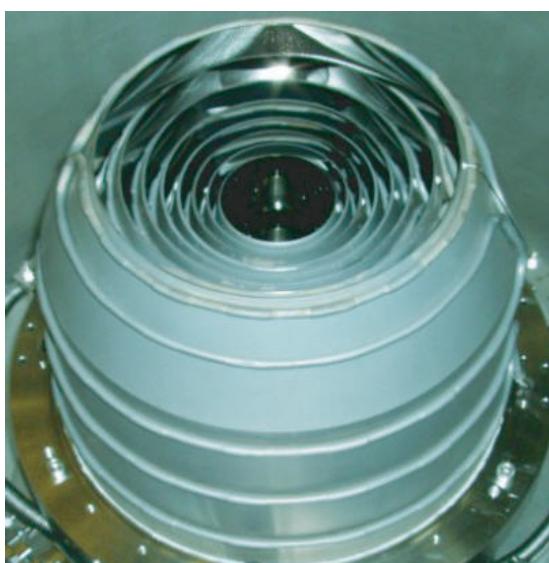
Pošto se svetlost kreće pravolinijski, ravno ogledalo pravi sliku iste veličine kao orginal. Zakriviljena ogledala mogu da se upotrebaju za povećane, umanjene ili iskrivljene slike. Na primer, skupa ogledala za spavaću sobu uvek su malo zakriviljena radi toga da bi se ljudi prikazali vitkijim.

Većina ogledala koje su napravili ljudi načinjena je od metala, obično naparenog na staklenu podlogu. u suprotnom, živi sistemi ne mogu da proizvedu čiste metale. S druge strane živi sistemi obiluju ogledalima: ona su otkrivena u tapetumu oka, u kraljušti tiba, kod insekata itd. Kako priroda napravi ogledalo, uprkos nesposobnosti da koristi čiste metale? Pokazalo se da slojevi različitih tankih providnih materijala – jednog od tipično kristalnog guanina – mogu da načine ogledalo koje je isto tako dobro kao ogledalo od metala. Takva ogledala se zasnivaju na efektima interferencije i nazivaju se dielektrična ogledala. Dielektrična ogledala se takođe koriste za izradu ogledala lasera.



Slika 96 Riba-avet (spookfish) *Dolichopteryx longipes* ima narandžasta ogledala koja joj pomažu da pravi oštret slike kako od prigušene svetlosti koja dolazi odozgo, tako i od bioluminiscentnih živih oblika ispod nje. (© Tamara Frank).

Ogledala koja stvaraju sliku koriste se u velikim teleskopima, u sistemima za X-zrake i u medicinskim uređajima koje koriste lekari. Interesantno je, ali i neka živa bića koriste ogledala za stvaranje slika. Najpoznatiji primer je riba-avet prikazana na *slici 96*. Ona je sposobna da istovremeno gleda i naviše i naniže, a to čini tako što koristi ogledalo pričvršćeno na njene oči. Uzgred, zbog čega se ogledala često koriste u teleskopima, ali ne i u mikroskopima? (*Izazov 163s*). U sistemima osvetljenja ogledala se koriste za izoštravanje svetlosnog zraka kod automobila, u džepnim svetiljkama i kod LED sijalica. Možda postoje neka stvorenja iz dubokih voda koje koriste ogledala u sličnu svrhu – ali autoru nije poznat nijedan primer.



Slika 97 Kolektor slučajnih okrznutih prolazaka tipa Wolter za zračenje od 13,5 nm izgrađen uz pomoć koncentričnih ogledala (© Media Lario Technologies)

Najzamršeniji sistemi ogledala do danas koriste se u sistemima litografije kao ekstremna ultraljubičasta maska, koji će se koristiti u budućoj proizvodnji integralnih kola. Ovi sistemi koriste talasnu dužinu od 13,5 nm, pri kojoj sočiva nisu primenljiva. Da bi se zrak koji se širi doveo tačno u paralelu (kolinacijom) potrebno je mnogo koncentričnih ogledala, kao što je prikazano na *slici 97*. Ovakvi optički sistemi su ono najviše što savremena tehnologija može da pruži; na primer, ogledala imaju rapavost površine ispod 0,4 nm. Slični sistemi optičkih ogledala koriste se takođe na satelitima u teleskopima sa X-zracima.

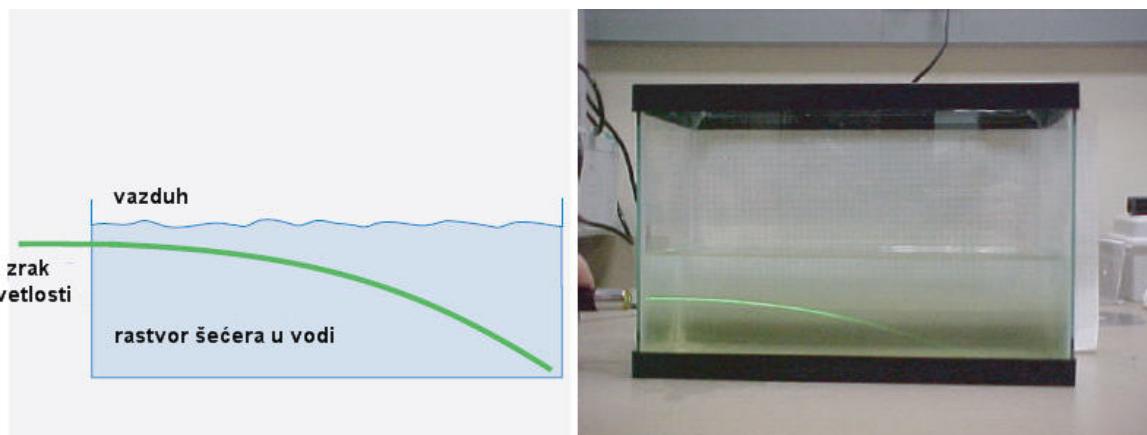
DA LI SVETLOST UVEK PUTUJE PRAVOLINIJSKI – PRELAMANJE

Svetlost se obično kreće pravolinijski. Zrak lasera u maglovitoj noći to jasno pokazuje, kao što je prikazano na [slici 98](#). Ali i svaki laserski pokazivač u magli podjednako je očaravajući. Zapravo, svetlost koristimo za određivanje “prave linije”, kao što je objašnjeno na [strani 17](#) u izlaganju o relativnosti. Ipak, postoji veliki broj situacija u kojima svetlost ne putuje po pravoj liniji, a svaki stručnjak u oblasti kretanja trebalo bi da to zna. ([Ref. 112](#)).



slika 98 Svetlost obično putuje po pravoj liniji. Na slici je zrak lasera na učestanosti natrijuma iskorišćen kao laserska zvezda vodilja da bi se obezbedio signal za izmenljivu optiku u velikom teleskopu. Sloj osvetljen laserom natrijuma nalazi se u atmosferi na visini od oko 90 km, pa predstavlja veštački stvorenu zvezdu koja se koristi za poboljšanje kvaliteta slike teleskopa podešavanjem optike. Na fotografiji je snimak stvarnih zvezda zamagljen usled dugog vremena ekspozicije, od oko 3 min. (fotografija Paul Hirst)

U rastvoru šećernog sirupa zrak svetlosti je iskrivljen, kao što pokazuje [slika 99](#). U takvom eksperimentu razlog je taj što se koncentracija šećera menja sa dubinom. Da li možete da objasnite ovaj efekt u šećernom sirupu? ([Izazov 164s](#)).



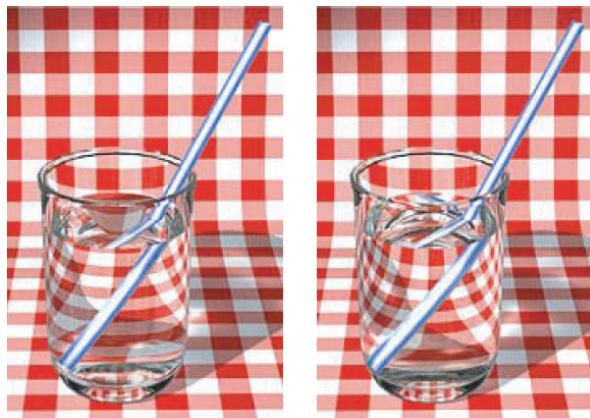
Slika 99 Rastvoren sirup šećera savija zrak svetlosti (© Jennifer Nierer).

Još detaljnija posmatranja pokazuju da se svetlost krivi pri svakoj promeni materijala kojeg sretne na svom putu. Ovaj efekt, nazvan **prelamanje** (refrakcija), veoma je uobičajen. Prelamanje menja izgled oblika naših stopala kada stojimo u kadi; prelamanje čini da voda izgleda manje duboka no što je ustvari i pravi efekti kao što su oni prikazani na [slici 100](#) i [slici 101](#). Prelamanje je posledica promene brzine faze svetlosti u različitim materijalima. ([Vol. I, strana 194](#)). Svi efekti prelamanja prema tome su objašnjeni na [slici 102](#).

Prelamanje isto tako može da se smatra posledicom načela minimalizacije za kretanje svetlosti:

- Svetlost uvek uzima putanju koja zahteva **najkraće** vreme putovanja

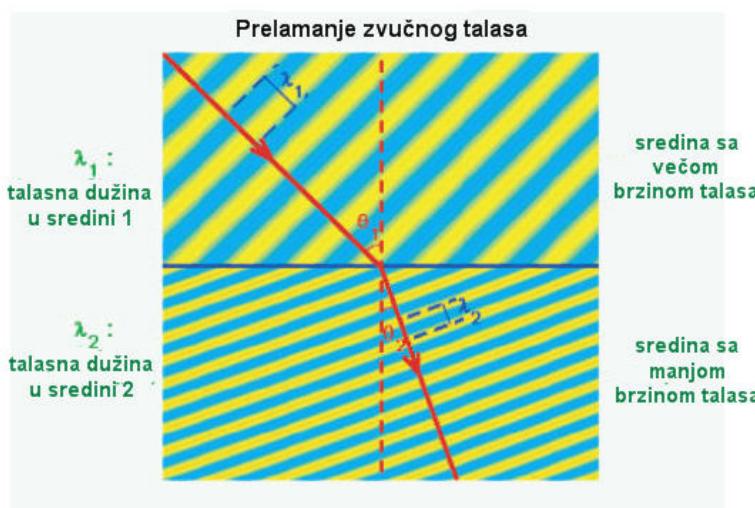
Na primer, svetlost se kreće mnogo sporije kroz vodu nego kroz vazduh; to je razlog za skretanje prikazano na [slici 103](#).



Slika 100 Realistička računarska grafika prikazuje prelamanja u vodi i u rastvoru šećernog sirupa (grafika Robin Wood) Možete li reći koja je koja? ([Izazov 165e](#))



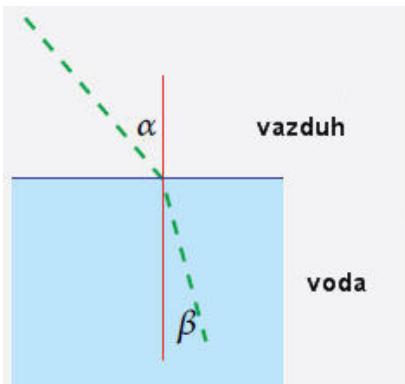
Slika 101 Lep prikaz prelamanja u interferenciji vazduh-voda koji možete da ponovite kod kuće (© Marić Vladimir)



Slika 102 Vizualizacija prelaanja (QuickTime film c ISVR, University of Southampton)

Odnos brzina kretanja u vazduhu i u vodi naziva se **indeks prelamanja** vode. Indeks prelamanja obično se obeležava sa n , a zavisi od materijala. Vrednost indeksa prelamanja za vodu je oko 1,3. Ovaj odnos brzina, uzet zajedno sa načelom najmanjeg vremena, daje zakon prelamanja, jednostavan odnos sinusa dva ugla prikazanih na [slici 103](#). Zakon strune. Možete li da izvedete ovaj obrazac? ([Izazov 166s](#)). Ustvari, tačna odrednica indeksa prelamanja je ona koja se odnosi na vakuum, a ne na vazduh. Ali razlika je neznatna, pošto su svi gasovi uglavnom sačinjeni od vakuuma i njihiv indeks prelamanja je blizak jedinici.

U mnogim tečnostima i čvrstim materijalima svetlosni signal se kreće mnogo sporije nego u vakuumu; isto tako (različite) brzine faze i grupe svetlosti unutar materijala redovno su sporije od c , brzine svetlosti u vakuumu. ([Strana 102](#)). Mi smo razlike između ovih brzina razmatrali u predhodnom tekstu. Za takve "normalne" materijale, indeks prelamanja n , odnos c prema brzini faze u materijalu, veći je od 1. Indeks prelamanja je važna osobina materijala za opisivanje optičkih efekata. Na primer, vrednost za vidljivu svetlost u vodi je oko 1,3, za staklo oko 1,5, a za dijamant 2,4. Velika vrednost indeksa prelamanja je jedan od razloga sjaja dijamanta rezanog rezom brilljanta sa 57 površina.



Slika 103 Prelamanje svetlosti nastaje usled optimizacije vremena putovanja

Indeks prelamanja takođe zavisi i od talasne dužine; ovaj efekt, nazvan **rasipanje** (disperzija), javlja se kod mnogih materijala. Za rasipanje u staklu koriste se prizme da bi podelile belu ili drugu svetlost u njihove sastavne boje. Isto tako i dijamant, a posebno njegovo brušenje u brilijant, deluju kao prizma, pa je to drugi razlog za njegov sjaj.

U suprotnosti sa "normalnim" materijalima, razni materijali imaju indeks prelamanja manji od 1, pa prema tome i brzinu faze veću od c . Na primer, zlato ima indeks prelamanja oko 0,2 za vidljivu svetlost, pa je zato za takve talase brzina faze u zlatu oko $5c$. Ustvari, skoro svi materijali, uključujući i kuhinjsku so, imaju indeks prelamanja manji od 1 za izvesne učestanosti talasa. (Ref. 113).

Ukratko, prelamanje svetlosti, promena pravca kretanja svetlosti, nastaje usled različitih brzina faze svetlosti u različitim materijalima. Materijali menjaju nagib putanje svetlosti. Prelamanje je toliko često pošto je izuzetno retko da imamo u dodiru različite materijale koji imaju isti indeks prelamanja.

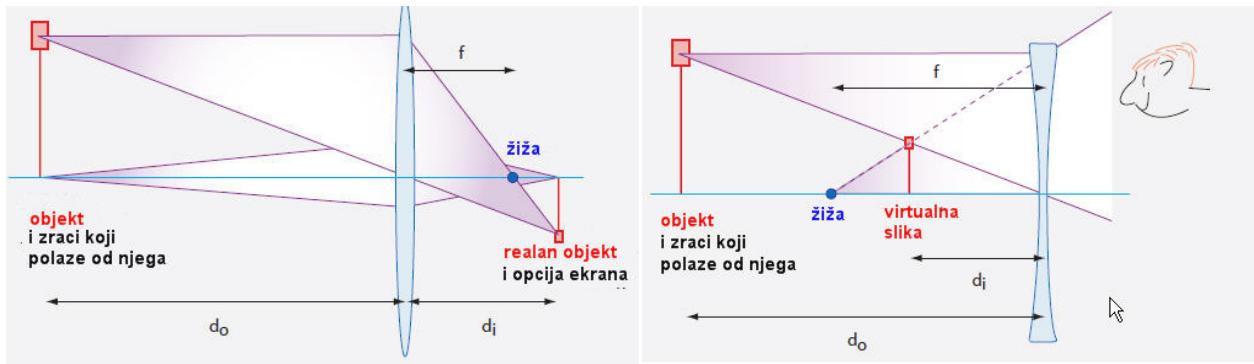
Gasovi imaju indeks prelamanja blizak vrednosti vakuuma, to jest 1. Uprkos tome, takođe i gasovi dovode do prelamanja. Osim toga, indeks prelamanja gasova zavisi od temperature. U vazduhu promenljive temperature prelamanje dovodi do krivljenja putanje svetlosti i proizvodi dobro poznat efekt: **iluziju**, poznatu i kao **fatamorgana**. Na **slici 104** prikazana je fotografija **visinske iluzije** koja se zasniva na inverziji sloja vazduha iznad objekta i posmatrača, i **nizinske iluzije**, usled toplog vazduha ispod posmatrača, tik iznad tla. (Ref. 114). **Nizinske iluzije** se mogu redovno zapaziti na autoputevima. Svi vidovi **iluzija** nastaju usled prelamanja; njihova detaljna pojava zavisi od datog temperaturnog profila u vazduhu, kao i od relativne visine položaja posmatrača, inverznog sloja i opraženog objekta. Vrlo često ulogu u tome ima i krivina Zemlje.



Slika 104 Osnova iluzije je efektivno odbijanje usled prelamanja na topom sloju vazduha; može dovesti do začuđujućih efekata, kao što obrnute **visinske iluzije** (gore levo i desno) i **nizinske iluzije** (dole levo i desno) (fotografije © Thomas Hogan i Andy Barson)

Pre svega, prelamanje se koristi u izradi **sočiva**. Sa stakлом se prave precizno zakrivljene površine koje omogućavaju da se usmeri (fokusira) svetlost u žiju (fokus). Dva osnovna tipa sočiva, sa njihovim žižama i slikama koje stvaraju, prikazana su na **slici 105**; ona se nazivaju **sabirna** (konvergentna) sočiva i **rasipna**

(divergentna) sočiva. Kada je objekt udaljeniji od žiže jednog sabirnog sočiva, sočivo proizvodi realnu sliku, to jest sliku koja može da se projektuje na ekran.



Slika 105 Levo: realna slika dobijena pomoću sabirnog sočiva (ako se koristi na prikazan način) i desno: virtualna slika dobijena pomoću rasipnog sočiva.

U svim ostalim slučajima sabirna i rasipna sočiva prave takozvane **virtualne slike**: takve slike se mogu videti okom, ali se ne mogu projektovati na ekran. Na primer, kada se neki objekt postavi između sabirnog sočiva i njegove žiže, sočivo deluje kao **povećavajuće staklo**, lupa. *Slika 105* takođe omogućava da se izvede obrazac za tanka sočiva koji povezuje duži d_o , d_i i f . Šta je to? (*Izazov 167s*).

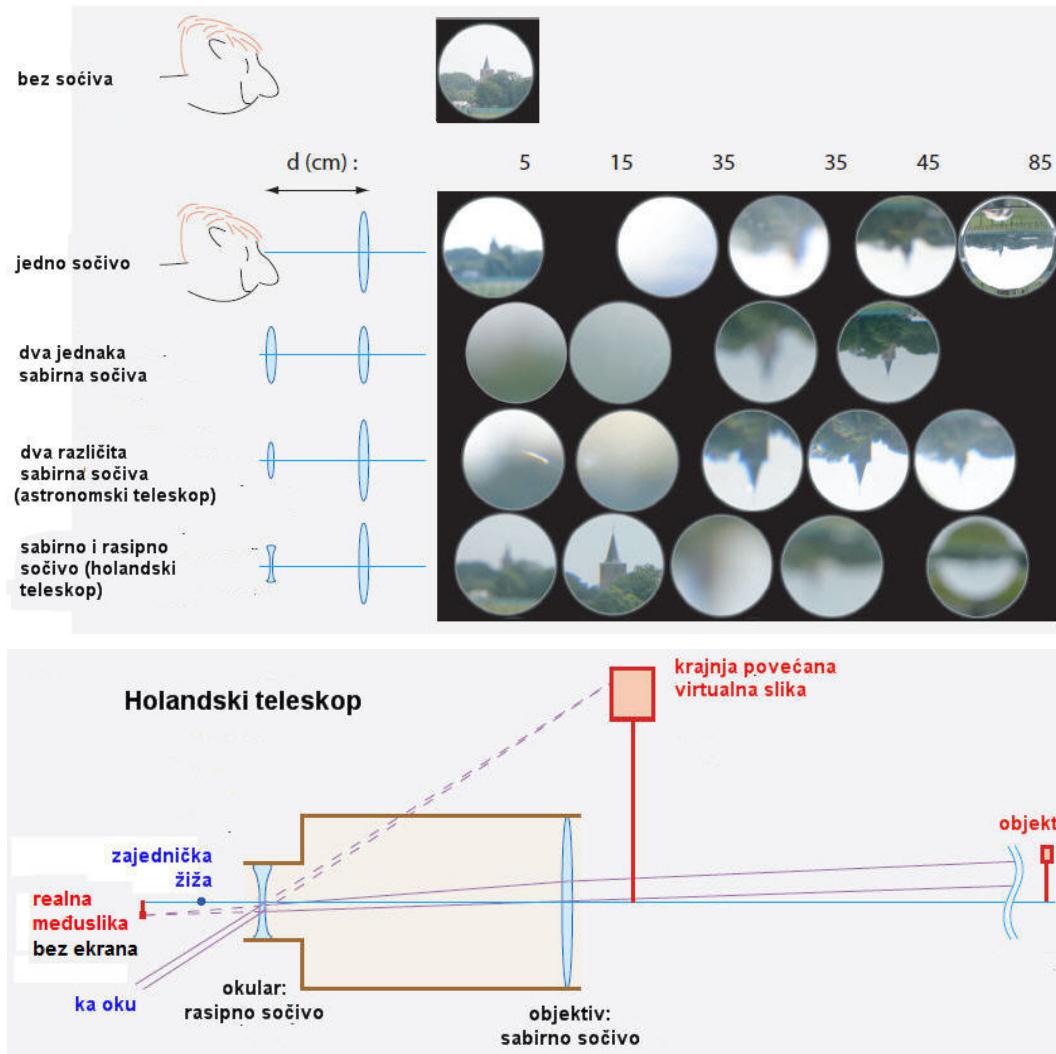
Iako su staklo i sočiva bili poznati još od antičkih vremena, ceo srednji vek je prošao pre no što su se dva sočiva spojila da bi načinila složenije optičke instrumene. (*Ref. 115*). Različiti efekti koji se mogu videti pomoću jednog ili dva sočiva prikazani su na *slici 106*. Teleskop je pronađen – posle delimičnog uspeha Giambattista della Porta u Italiji – tek posle 1608 u Holandiji. Najpoznatiji od najmanje tri istovremena pronalazača bio je izrađivač sočiva Johan Lippershey (Johannes Lippershey, oko 1570. Wesel – 1619. Middelburg) koji je imao sreće da proda teleskop holandskoj vojci. Kada je Galilej čuo za to otkriće, odmah ga je usvojio i usavršio ga. Već 1609. godine Galilej je izvršio prva astronomска osmatranja; ona su ga učinila poznatim širom sveta. U principu je **holandski teleskop** kratka cev koja daje sjajnu i uspravnu sliku, a njeno povećanje je odnos žižnih daljina dva sočiva. (*Izazov 168e*). Danas se još uvek koristi u dvogledima u operi. Tokom godina, razvijeni su mnogi drugi načini za izgradnju teleskopa; posebno, mnogo savremenih teleskopa visokih osobina koji koriste ogledala. (*Ref. 116*) Pošto su ogledala jeftinija i jednostavnija za proizvodnju, za snimanja slika velike preciznosti, mnogi veliki teleskopi imaju ogledalo umesto prvog sočiva.

Uzgred, teleskopi postoje takođe i u prirodi. Mnogo paukova ima nekoliko vrsta očiju, poneki i do 6 različitih pari. Na primer, rod pauka skakača **Portia** (*Salticidae*) ima dva posebno velika oka, pomoću kojih vidi udaljene objekte, koja imaju dva sočiva jedno iza drugog; drugo sočivo i mrežnjača iza njega mogu da se pomeraju pomoću mišića, tako da ovi pauci mogu efikasno da usmere svoj teleskop u različite pravce, a da pritom ne pomere glavu. Da bi obradili sliku iz svojih očiju, paucima skakačima je potreban veći mozak. Zapravo, masa njihovog mozga je oko 50% mase pauka skakača.

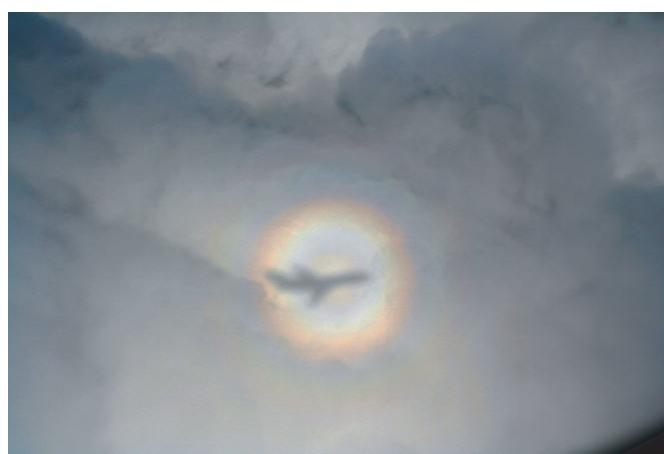
Drugi način kombinovanja sva sočiva dovelo je do otkrića **mikroskopa**. Možete li da objasnite nekom ko ne zna fiziku kako mikroskop radi? (*Izazov 169s*). Werner Hajzenberg (Werner Heisenberg) skoro da je pao na svom doktoratu pošto to nije znao. Ipak, problem nije posebno težak. Zapravo izumitelj mikroskopa je bila samouka osoba u 17. veku: trgovac i naučnik Antoni van Levenhuk (Antoni van Leeuwenhoek, 1632. Delft, – 1723. Delft), zarađivao je za život prodajom više od 500 svojih mikroskopa savremenicima. (Ovo je unekoliko neprijatna primedba: van Levenhuk je upotrebio samo jedno sočivo, a ne dva kao u savremenim mikroskopima).

Nijedna slika praćenja zraka, bilo da se radi o jednostavnom sočivu, teleskopu ili mikroskopu, ne može da se kompletira, ako nedostaje oko sa svojim sočivom i mrežnjačom. Možete li da to prihvate i da se uverite da ovi uređaji zaista rade? (*Izazov 170ny*).

Kao što je pomenuto, prelamanje svetlosti obično zavisi od boje. Iz tog razloga (a takođe radi kompenzacije greške u slici drugih sočiva, nazvana **aberacija**) mikroskopi ili fotografске kamere imaju **nekoliko** sočiva izradenih od različitih vrsti stakla. Različite vrste stakla kompenziraju rasipanje koje u suprotnom daje obojene ivice slike. Zavisnost boje od prelamanja u kapi vode takođe je osnova pojave dugih, kao što je pokazano (*strana 96*), a prelamanje u kristalima leda u atmosferi je na osnovu oreola, sunčevih stubova i mnogih drugih uzoraka svetlosti koji se često mogu videti oko Sunca ili Meseca tokom hladnih dana. (*Ref. 117*).



Slika 106 Prelamanje svetlosti u sočivima osnova je teleskopa: gore, eksperimenti sa sočivima koji su doveli do razvoja teleskopa: upoređena posmatranja objekta sa jednim sabirnim sočivom, sa dva jednakata sabirna sočiva, sa dva različita sabirna sočiva i astronomskom teleskopu i sa rasipnim i sabirim sočivom u holandskom teleskopu na različitim rastojanjima od oka; dole, objašnjenje principa rada holandskog teleskopa (fotografije © Eric Kirchner)



Slika 107 Nebeski sjaj proizведен kapima u oblaku (© Broken Inaglory)

Isto tako i ljudske oči pokazuju prelamanje zavisno od boje, to jest rasipanje. Na sreću, taj efekt je mali. U stvari, za funkciju očiju zakrivljenost rožnjače je mnogo važnija od moći prelamanja sočiva, pošto je sočivo ugrađeno u sredinu uz skoro isti indeks prelamanja, stoga ograničava efekt prelamanja. Mali efekt prelamanja zavisnog od boje ne ispravlja se u oku, već u mozgu. Prema tome, rasipanje sočiva u oku moglo bi da se zapazi ako bi se sprečilo ispravljanje u mozgu, na primer kada su crvena ili plava slova

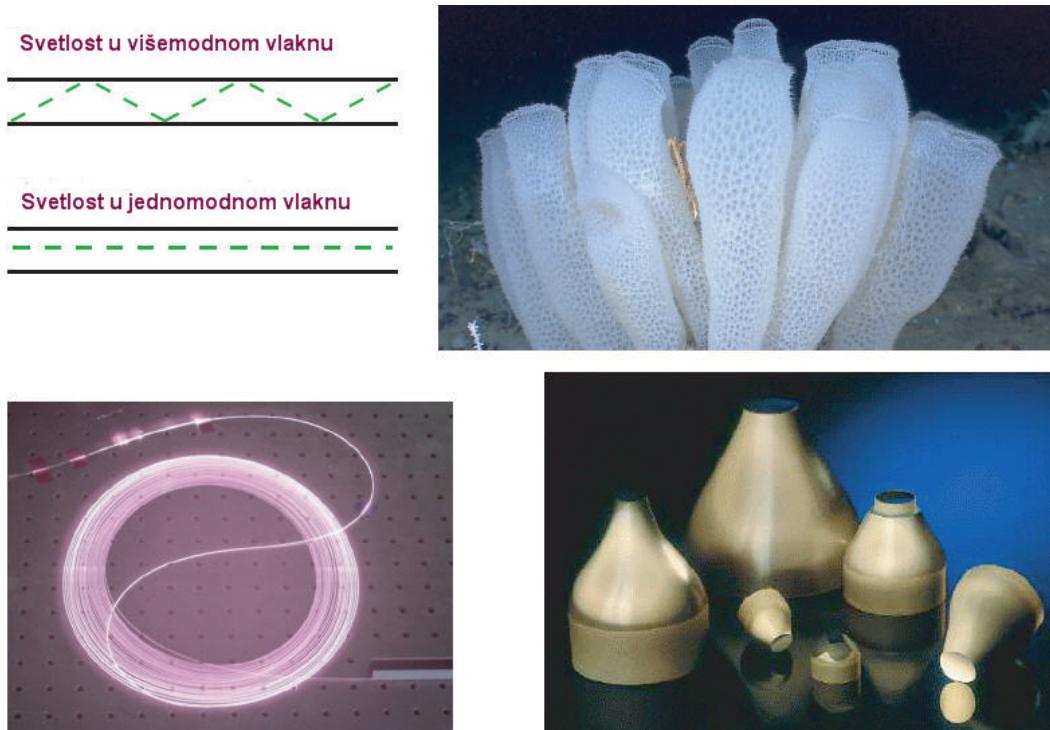
odštampana na crnoj pozadini, kao što je prikazano na **slici 108**. Dobijamo utisak da crvena slova lebde ispred plavih slova. Možete li da objasnite kako je rasipanje dovelo do ovog efekta? (**Izazov 171s**).



Slika 108 Posmatranje ove slike uz veliko povećanje pokazuje rasipanje u ljudskom oku; slova plove na različitoj dubini

SAVIJANJE SVETLOSTI POMOĆU CEVI – OPTIČKO VLAKNO

Drugačiji način da se savije svetlost, koji se takođe zasniva na prelamanju, koriste mnoge životinje i mnogi tehnički uređaji, kao što je optičko vlakno. Optička vlakna se zasnivaju na unutrašnjem totalnom odbjanju; pregled njihove upotrebe dat je na **slici 109**.



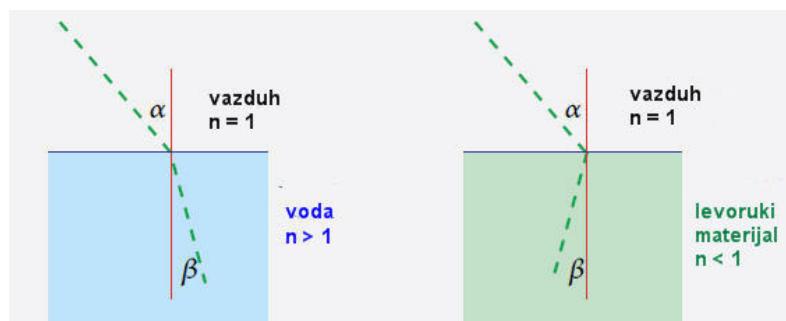
Slika 109 Optička vlakna: princip rada dve krajnje vrste vlakna, zaprepaščujući morski sunđer *Euplectella aspergillum* (visine preko 30 cm) koji sadrži silicijumska optička vlakna sa sočivima na kraju i sintetizovana na temperaturi vode da pomognu simbiozi algi, savremeni laser sa vlaknima koji se koristi u ispitivanju materijala i u medicini i kupe od velikog broja slepljenih vlakana za promenu veličina slike (maksimalni prečnik oko 20 cm) (c NOAA, Hochschule Mittweida, Schott).

U prirodi se optička vlakna pojavljuju u najmanje tri sistema. U očima insekata, kao što su oči kućne muve ili oči medonosne pčele, svetlost iz svake tačke na oku prenosi se duž strukture koja deluje kao kupasto optičko vlakno. (**strana 144**). Kod nekih morskih životinja, kao što je staklasti sunđer *Euplectella aspergillum* i brojni drugi sunđeri, stvarna silicijumska vlakna koriste se u svrhu obezbeđenja stabilnosti strukture i za prenos signala do foto senzora. (**Ref. 118**). Konačno sve oči kičmenjaka, uključujući i ljudske, sadrže veliki broj optičkih vlakana iznad mrežnjače kako bi se izbegli problemi sa slikom koji bi bili možda izazvani usled krvnih sudova koji se kod svih kičmenjaka nalaze iznad mrežnjače. (**Ref. 119**) Uzgred, često se čuje tvrdnja da i belo krvno polarnih medveda funkcioniše kao optičko vlakno za ultra-ljubičastu svetlost, ali to nije tačno. (**Ref. 120**).

U tehničkim primenama, optička vlakna su suština rada mreže telefona i interneta, za raspodelu signala unutar aviona i automobila, za prenos svetlosti lasera u medicini, za lasere velikih snaga i u mnogim drugim uređajima. Šuplja staklena vlakna uspešno se koriste za vođenje X-zraka u sistemima za snimanje X-zracima.

ZAKASNILO 200 GODINA – NEGATIVNI INDEKSI PRELAMANJA

Viktor Veselago je 1967. godine načinio čudnu predpostavku, a da nije povredio nijedan poznati zakon fizike: indeks prelamanja mogao bi da ima i negativnu vrednost. Negativan indeks prelamanja znači da bi zraci bili preolmljeni na istu stranu vertikale, kao što je pokazano na *slici 110*. Kao rezultat toga, izdubljena (rasipna) sočiva izrađena od tog materijala prikuplja bi paralelne zrake u žihu, dok bi ispučena (sabirna) sočiva njih rasipala, u suprotnosti sa uobičajenim materijalima sočiva.



Slika 110 Pozitivan i negativan indeks prelamanja i posledice

Džon Pendri (John Pendry) i njegov tim su 1996. godine predložili način da se stvori takav materijal. Godine 2000. objavljene su prve eksperimentalne potvrde prelamanja mikrotalasa, ali su se susrele sa jakom nevericom. (*Ref. 121*). Rasprava je u 2002. godini bila u punom zamahu. Trvrdilo se da negativno prelamanje podrazumeva brzine veće od svetlosti, a one su moguće samo ili za brzinu faze ili za brzinu grupe, ali ne i za brzinu energije ili brzinu signala. Pojavili su se problemi u pojmovima, pošto su se u nekim fizičkim sistemima razlikovali uglovi prelamanja za kretanje faze i za kretanje energije.

U međuvremenu je rasprava završena. Negativni indeksi prelamanja zaista su često opaženi; odgovarajući sistemi su bili opširno istraživani širom sveta. (*Ref. 122*) . Sistemi u kojima je indeks prelamanja negativan postoje. Prema Veselagu, materijali koji pokazuju ovo svojstvo nazvani su *levoruki*. Razlog za ovo je što vektor električnog polja, vektor magnetnog polja i vektor talasa formiraju trojku leve ruke, u suprotnosti sa vakuumom i uobičajenim materijalima, gde je ova trojka desne ruke. Levoruki materijali imaju *negativnu* magnetnu provodnost μ_r i negativnu dielektrični koeficijent, to jest negativnu dielektričnu konstantu ϵ_r . (*Ref. 123*). Međutim, u stvarnim sistemima ovi efekti pojavljuju se samo u uskom području učestanosti, obično u opsegu mikrotalasa.

Osim neuobičajenih osobina prelamanja, levoruki materijali imaju negativnu brzinu faze, to jest brzina faze je suprotna brzini energije i ispoljava obrnut Doplerov efekt. Ove osobine su potvrđene eksperimentalno. Levoruki materijali treba takođe da daju tupe uglove u efektu Vavilov-Cerenkov, stoga emituju Vavilov-Cerenkove zrake unazad umesto u pravcu napred, za njih je predpostavljeno da imaju obrnut *Gus-Hanhenov* (Goos-Hänchen) efekt i da će da pokazuju odbijajući Kazimirov (Casimir) efekt. Međutim, ove predpostavke još uvek nisu potvrđene.

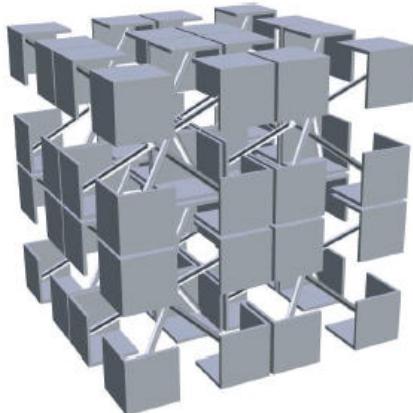
Još zanimljivije, predviđa se da će negativan indeks prelamanja materijala omogućiti izradi sočiva koja će biti potpuno ravna. (*Ref. 124*). Osim toga, Džon Pendri (John Pendry) pridobio je pažnju celokupne fizičke zajednice širom sveta predviđanjem da bi sočiva izrađena od takvog materijala, posebno sa indeksom prelamanja $n = -1$, mogla da budu *savršena*, pa da prevaziđu uobičajenu granicu rasipanja. To bi moglo da se dogodi pošto bi takva savršena sočiva takođe prikazivala sliku nepostojanih delova talasa – to jest onih koji nastaju eksponencijalno – tako što bi ih na ogdovarajući način pojačavali. (*Ref. 123*). Prvi eksperimenti obećavaju potvrdu predpostavke. Ispitivanje ove pojave još su u punom zamahu.

Do sada su levoruli materijali bili realizovani samo za mikrotalasne i teraherc učestanosti. Objavljeni su prvi nagoveštaji u opsegu vidljive svetlosti, ali ih treba prihvatića sa rezervom. Treba da se napomene da jedna vrsta sistema sa negativnim prelamanjem poznata već duže vreme: rasipne rešetke. Mogli bismo da se raspravljamo oko toga da li su levoruki materijali rešetke koje nastoje da deluju u svim pravcima prostora. Zapravo, svi levoruki materijali do sada realizovani periodični su rasporedi elektromagnetnih kola.

METAMATERIJALI

Najjednostavnija realizacija levorukih sistema su metamaterijali. **Metamaterijali** su inženjerske strukture metal-izolator sa periodičnošću ispod talasne dužine zračenja za koju su projektovani, tako da im se struktura ponaša kao homogen materijal. Metamaterijali imaju negativnu dielektričnu konstantu ili provodnost u određenom opsegu talasnih dužina ili neuobičajene osobine na drugi način, obično u području mikrotalasa; neki metamaterijali su levoruki.

Trenutno, postoje dva osnovna pristupa da se načine metamaterijali. ([Ref. 125](#)). Prvi je da se metamaterijal načini od velikog niza kompaktnih rezonantnih podstruktura, kao što su kapacitivno-induktivna (LC) kola ili od dielektričnih lopti. Drugi pristup je da se metamaterijal izgradi od prenosnih vodova. ([Ref. 126](#)). Ovaj poslednji pristup ima manje gubitke i širi spektralni opseg; jedan primer ovog tipa prikazan je na [slici 111](#). Upoređivanje i istraživanje drugačijih ostvarenja predmet su opsežnih istraživanja.



Slika 111 Primer izotropnog metamaterijala (M. Zedler et al., c 2007 IEEE).

Većina metamaterijala smišljena je za mikrotalase ili teraherc talase. Industrijska primena se očekuje za izradu antena, na primer dipol antene mogao bi da se postavi neposredno iznad metamaterijala i stoga da se omogući da se izrađuju pljosnate usmerene antene. Mogle bi da se pojave primene u teraherc tehnologiji.

Manje ozbiljni radnici u ovoj oblasti tvrde da se mogu načiniti **nevidljivi ogrtaci** pomoću metamaterijala. Dok je to izvrsan marketinški slogan za privlačenje sredstava i da se stavi u novine, san nije realan zbog neizbežnih gubitaka signala u materijalu, rasipanja, prelamanja, konačne veličine celije, potrebnog prozora da se gleda napolje iz unutrašnjosti i nemogućnosti da se nevidljivost postigne za sve talasne dužine. Do sada za sve avione za koje se tvrdi da su nevidljivi čak i za posebne učestanosti radara, pokazalo se da su pre svega vidljivi na radaru. Ali izvori finansiranja vojske poznati su po tome da imaju udaljene odnose sa stvarnošću.

Metamaterijali za zvuk i za talase nižih učestanosti takođe su objekt istraživanja. Ovakvi akustični ili mehanički metamaterijali još uvek nisu našli tehničku primenu.

SVETLOST OKO UGLOVA – DIFRAKCIJA

Svetlost ide i oko uglova. Ovaj efekt je Frančesko Grimaldi (Francesco Grimaldi) u svom tekstu *Psychomathesis de lumine*, iz 1665. godine, nazvao **difrakcija**. ([Ref. 127](#)). Grimaldi je veoma pažljivo proučavao senke. On je pronašao ono što sada uče svi u srednjoj školi: svetlost ide oko uglova na isti način kako to čini zvuk, a difrakcija (skretanje) svetlosti nastaje usled talasne prirode svetlosti. (Njutn se zainteresovao za optiku pošto je čitao tekstove Grimaldija; potom je Njutn pogrešno odbacio zaključke Grimaldija.)

Usled prelamanja nemoguće je da se proizvedu strogo paralelni zraci svetlosti. Na primer, zrak svakog lasera divergira (razilazi se) u nekom minimalnom iznosu, koji se naziva **granica difrakcije**. Možda vam je poznato da su najskuplje mačje oči na svetu one postavljene na Mesecu, prilikom misija Lunohod i Apolo. ([Ref. 128](#)). Možete li da odredite kolika je širina zraka lasera uz minimalno neslaganje dobijena kada je stigao na Mesec i kada se vratio na Zemlju, pod pretpostavkom da je bio širok 1 m kada je napustio Zemlju? ([Izazov 172s](#)). Koliko bi bio širok pri povratku ako je bio širok 1 mm na polasku? Ukratko, difrakcija i nemogućnost nedivergentnih zraka potvrđuju da je svetlost talas.

Difrakcija podrazumeva da ne postoje perfektno oštре slike: postoji **granica rezolucije**. Ovo važi za svaki optički instrument, uključujući i oči. Rezolucija oka je između 1 i 2 lučna minuta, to jest 0,3 do 0,6 mrad.

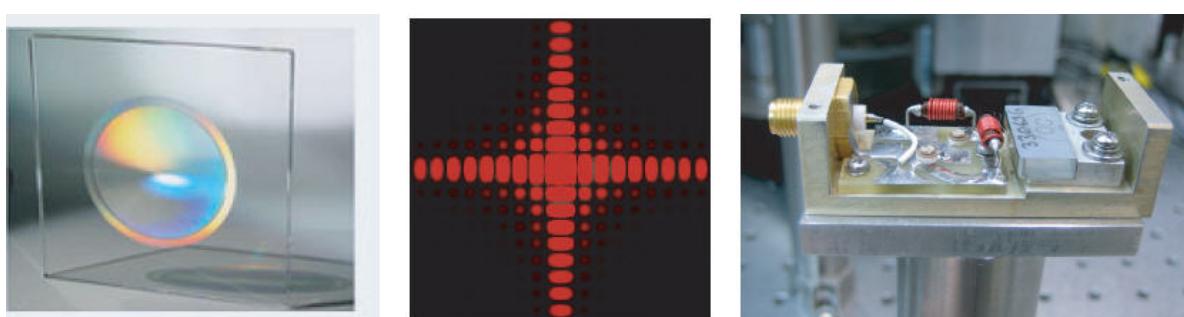
Granica je delom zbog konačne veličine zenice. (To je ono zbog čega žmirenje pomaže da se gleda oštrije.) U praksi je rezolucija oka često ograničena hromatskom aberacijom i nepravilnošću oblika rožnjače i sočiva. (Možete li da proverite brojeve i njihovo prikazivanje proračunom? Da li je istina da je broj štapića u oku podešen tačno za rezoluciju oka?) (**Izazov 173s**). Prema tome, na primer, postoji maksimalna udaljenost na kojoj ljudi mogu da razlikuju dva fara na automobilu. Da li možete da je procenite? (**Izazov 174s**).

Granica rezolucije takođe onemogućava da se vidi Veliki Zid u severnoj Kini sa Meseca, nasuprot onome što se često tvrdi. U nekoliko delova koje još nisu ruševina, zid je širok oko 6 metara, a čak iako baca široku senku tokom jutra ili večeri, ugao koji se zatvara na taj način je ispod 1 lučne sekunde, tako da je u potpunosti nevidljiv za ljudsko oko. Zapravo sva tri kosmonauta koji su putovali na Mesec izvršila su pažljivo istraživanje i potvrdili su da je ova tvrdnja besmislena. (**Ref. 129**). Priča je jedna od onih urbanih legendi koje se najviše ponavljaju. (Da li je moguće da se Zid vidi iz spejs-šatla?) (**Izazov 175ny**). Najveći objekt kojeg su napravili ljudi su mnogougaonici osvojene zemlje u Holandiji; oni mogu da se vide iz spoljnog svemira. Isto tako tokom noći i većina velikih gradova kao i autoputevi u Belgiji; njihova sjajna rasveta čini ih jasno raspoznatljivim od tamne strane Zemlje.



Slika 112 Senke potvređuju da je svetlost talas: levo naivno predviđanje odbacuje ideju talasa, i u sredini i desno stvarno opažanje senke kružnog oblika (fotografija © Christopher Jones).

Diftakcija ima posledicu da se iza malog diska, osvetljenog duž njegove ose, u centru senke prikazuje svetla tačka, kao što je prikazano na [slici 112](#). Ovu “rupu” u senci predvideo je 1819. godine Deni Puason (Denis Poisson, 1781. Pithiviers – 1840. Paris) da bi pokazao do kakvih čudnih posledica bi dovela talasna teorija svetlosti. On je samo pročitao matematički opis difrakcije kojeg je razvio Ogisten Frenel (Augustin Fresnel)¹ na osnovu talasnog opisa svetlosti. Ali ubrzo posle toga, Fransoa Arago (Francois Arago) zapravo posmatrajući Puasonovu tačku, ispravio je Puasona, načinio Frenela slavnim i ubrzao opšte prihvatanje talasnih osobina svetlosti.



Slika 113 Primeri difrakcijske optike: difrakcijsko asferično sočivo, rezultat osvetljavanja crvenim laserom kroz plastičnu foliju sa difrakcijskim krstastim generatorom i akustičko-optički modulator koji se koristi za modulaciju laserskog zraka koji se prenosi kroz ugrađen kristal (© Jenoptic, Wikimedia, Jeff Sherman)

¹ Ogist-Žan Frenel (Augustin Jean Fresnel, 1788. Broglie – 1827. Ville d'Avray), inženjer i fizičar i honorarni fizičar. Slovo “s” u njegovom imenu se ne čita. Godine 1818. objavio je svoj veliki rad o talasnoj teoriji za koji je dobio nagradu Francuske Akademije Nauka 1819. godine. Da bi popravio svoje finansijsko stanje radio je u komisiji odgovornoj za svetionike, za koje je izmislio dobro poznata Frenelova sočiva. Umro je prerano, delimično i zbog isčpljenosti usled prekomernog rada.

Difrakcija se isto tako može iskoristiti za stvaranje slika u nekim posebnim primenama. Nekoliko primjera primene difrakcije u optici prikazano je na [slici 113](#). Od toga se koristi akustičko-optički modulator u mnogim sistemima lasera, na primer u predstavama sa laserom. Isto tako hologrami, o kojima će biti izlagano detaljnije u daljem tekstu ([strana 131](#)), mogu da se posmatraju kao poseban oblik slika dobijenih difrakcijom.

Ukratko, difrakcija se ponekad koristi za stvaranje slike ili za uticanje na nju; ali pre svega, difrakcija svetlosti određuje rezoluciju u svakoj slici, odnosno utiče na kvalitet slike.

SAVLADAVANJE GRANICE DIFRAKCIJE

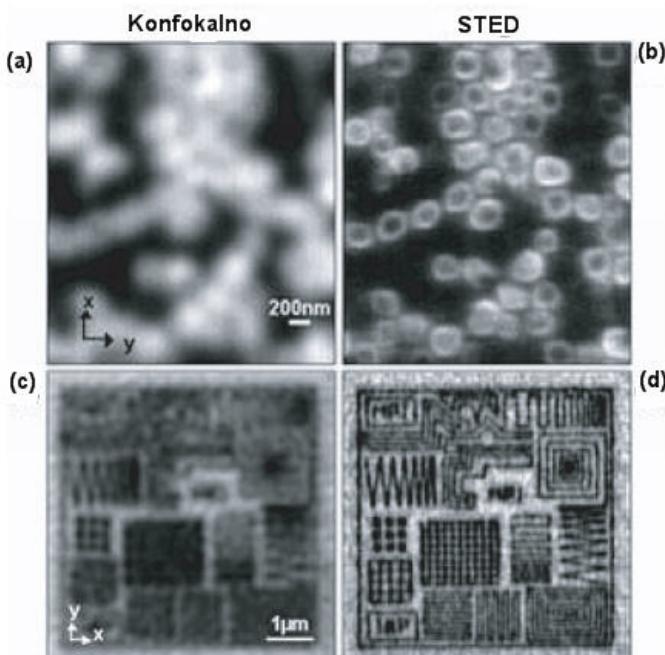
U svim metodama snimanja postoji trka za slikom koja ima što veću rezoluciju. Savršena sočiva pomenuta gore nisu izrađena za vidljivu svetlost. ([Strana 126](#)) Međutim, ostale tehnike pravljenja snimaka, uz rezoluciju *manju* od talasne dužine svetlosti, napravile su veliki napredak poslednjih godina.

U današnje vreme, izvanredne slike mogu da se naprave uz prerađene komercijalne mikroskope sa svetlom. Uobičajena granica difrakcije za mikroskope je

$$d \geq \frac{\lambda}{2n \sin \alpha} \quad (79)$$

gde je λ talasna dužina, n indeks prelamanja i α ugao posmatranja. Postoje tri osnovna načina da se ova granica prevaziđe. Prvi je da se radi u "bliskom polju", gde granica difrakcije (prelamanja) ne važi, drugi je da se zapazi i izmeri efekt difrakcije, a zatim da se koriste računari da obradom slike da ovaj efekt smanje, treći način je da se koriste efekti koji proizvode emisiju svetlosti iz uzorka koji je manji od talasne dužine svetlosti i četvrti je način da se koristi rezolucija u vremenu da bi se povećala rezolucija u vremenu.

Dobro poznata tehnika bliskog polja je skeniranje bliskog polja optičkim mikroskopom. Svetlost se šalje kroz konusno stakleno vlakno sa malim providnim otvorom na kraju, do 15 nm; vrh se skenira preko uzorka, tako da se slika dobija tačku po tačku. Od svih optičkih mikroskopa ovakvi mikroskopi postižu najveću rezoluciju. Međutim, teško je da se postigne potrebna praktična količina svetlosti kroz mali otvor na vrhu. Mnoge računarske tehnike mogu da daju sliku koja je postigla rezoluciju manju od granice difrakcije. Najjednostavniji tip ovakvih mikroskopskih tehnika razlaganja već su dostupni komercijalno.



Slika 114 Optički mikroskopi sa rezolucijom manjom od talasne dužine koriste tehniku STED (desno) u poređenju sa uobičajenom konfokalnom mikroskopijom (levo). (© MPI fur biophysikalische Chemie/Stefan Hell).

Jedna od prvih tehnika koja je savladala granicu difrakcije u znatnom iznosu korišćenjem uobičajenih mikroskopa je *stimulisana mikroskopija smanjenjem emisije* (STED - *Stimulated Emission Depletion Microscopy*). Koristi se pametan sistem osvetljenja zasnovan na dva laserska zraka, a tehnika omogućava

veličinu tačke skoro jednake veličini molekula. Nova tehnika, posebni fluorescentni mikroskopi koje je razvio Stefan Hel, koristi osvetljavajući laserski zrak sa kružnom tačkom i drugi laserski zrak oblika prstena. Rezultat ovakve kombinacije je tehničko popravljanje granice prelamanja do

$$d \geq \frac{\lambda}{2n \sin \alpha \sqrt{I/I_{sat}}} \quad (80)$$

tako da pogodno odabrana jačina zasićenja I_{sat} omogućava da se smanji granica difrakcije do proizvoljno male vrednosti. Do sada je dobijena rezolucija od 16 nm pomoću optičkih mikroskopa. (**Ref. 130**). Primer toga je prikazan na *slici 114*. Ova i slične tehnike šokirale su polje mikroskopije; one su sada našle mesto u nauci o materijalima, medicini i biologiji. Stefan Hal je dobio 2014. godine za ovo dostignuće Nobelovu nagradu.

Istraživanja za nove tehnike mikroskopije još uvek su u toku, a takođe i brojni pokušaji da se rezolucija u vremenu prebaci u rezoluciju u prostoru. Druga važna oblast istraživanja je razvoj mikroskopa koji bi bili sastavni deo endoskopa, tako da lekari mogu da ispituju ljudsko telo bez potrebe velikih hirurških intervencija. Mikroskopija je još uvek oblast u punom zamahu.

OSTALI NAČINI DA SE SAVIJE SVETLOST

Optička tehnologija može da se odredi kao nauka o savijanju svetlosti. Refleksija, refrakcija i difrakcija najvažnije su metode da se to postigne. Ali ima smisla da se ovo pitanje istraži malo opštije: koji drugi načini postoje da se zrak svetlosti savije?

Jedan od načina savijanja svetlosti je gravitacija, kao što je već razmatrano u poglavljima o univerzalnoj gravitaciji (**Vol. I, strana 151**) i poglavljima o opštoj teoriji relativnosti. (**Vol. II, strana 127**). Pošto je efekt gravitacije slab, on ima važnost samo u astronomiji. Gravitacijska sočiva se koriste u raznim projektima za merenje veličina, masa i udaljenosti galaksija i grupa galaksija. Isto tako je ranije već razmatran zanemarljiv uticaj gravitacije između dva zraka svetlosti. (**Vol. II, strana 202**).

U praksi ne postoje postupci srazmerni laboratoriji da se savije svetlost osim refleksije, refrakcije i difrakcije. Svi poznati postupci samo su posebni slučajevi ove tri mogućnosti.

Važan način u kojem se mogu koristiti materijali za savijanje svetlosti su *akustično-optički odbojnici*. (**Strana 129**). Oni deluju slično akustično-optičkim modulatorima, to jest, zvuk koji prolazi kroz kristal proizvodi difrakcijsku rešetku koja se koristi za odbijanje zraka lasera. Takvi modulatori stoga koriste difrakciju za savijanje svetlosti.

Osim toga, električno polje obično nema direktni uticaj na svetlost, pošto svetlost nema nanelektrisanja i zbog toga što su Maksvelove jednakosti linearne. Ali u nekim materijalima važeće jednakosti nisu linearne, i priča se menja. Na primer, u izvesnim fotorefraktivnim materijalima dva bliska zraka svetlosti mogu čak i da se uvijaju međusobno, kao što su to pokazao Segev sa saradnicima 1997. godine. (**Ref. 131**). Ovo je prikazano na *slici 115*. Ovaj efekt je prema tome jedan od oblika refrakcije.



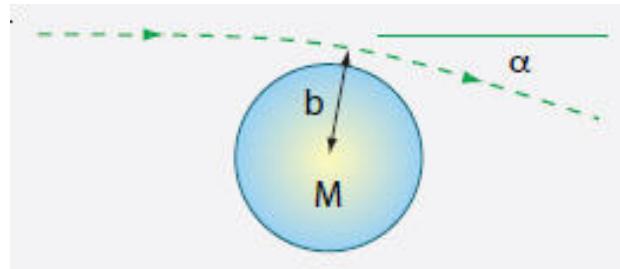
Slika 115 U nekim materijalima zraci svetlosti prave spirale međusobno

Drugi uobičajeni način da se odbije svetlost koristi njenu polarizaciju. Mnogi materijali, na primer, tečni kristali ili elektro-optički materijali savijaju zrake svetlosti i zavisnosti od njihove polarizacije. Takvi materijali mogu da se upotrebe za upravljanje zraka lasera ili čak i da ih zaustave. Modulatori na bazi tečnih kristala i elektro-optički modulatori imaju u osnovi prelamanje svetlosti.

Rasuta svetlost takođe menje smer. Može se raspravljati da li je prigodno taj proces nazivati primerom savijanja svetlosti. (**Vol. IV, strana 56**) U svakom slučaju, rasipanje je važno: bez rasipanja ne bismo mogli da vidimo skoro ništa oko nas. Pre svega, ono što svakog dana vidimo je osećanje rasute svetlosti. Ali, takođe je i rasipanje vrsta difrakcije.

Naredno pitanje je: koji postupci postoje za *pomeranje* zraka svetlosti? Iako fotoni imaju nultu masu, a elektroni imaju masu različitu od nule, skeniranje zraka elektrona jednostavno se postiže uz učestanost veću od 10 GHz, pri čemu je zrak svetlosti jači za više od 10 kHz.

Pomeranje zraka svetlosti – a posebno zraka lasera – vrlo je važno: rešenja su osnova za značajne industrijske grane. Pomeranje zraka lasera koristi se za lasersko lečenje očiju, za obeležavanja pomoću lasera, za rezanje laserom, za čitanje barkodova u prodavnicama, za brzu izradu prototipova, za lasersko sinterovanje trodimenzionalnih delova, za merenje rastojanja pomoću lasera, za LIDAR (*Light Detection And Ranging*) za već pomenute tehnike u mikroskopiji ([strana 111](#)) i za razne procese u industriji pri proizvodnji elektronskih štampanih kola, poluprovodnika i displeja za mobilne telefone. Većina laserskih skenera se zasniva na pomicnim ogledalima, prizmama i sočivima, premda se akustično-optički skeneri elektro-optički skeneri, koji postižu stepen skeniranja od nekoliko MHz za zrake malih snaga, takođe koriste u posebnim primenama. Mnoge primene željno očekuju izume koji bi omogućili brže skeniranje pomoću lasera.



Slika 116 Masa savija svetlost

Ukratko, pokretni zraci svetlosti iziskuju pokretnu materiju, obično u obliku ogledala ili sočiva. Svetlost putuje pravolinijski jedino kada putuje ***udaljena od materije***. U svakodnevnom životu “daleko” prosto znači više od nekoliko milimetara, pošto su elektromagneti efekti zanemarljivi na ovim udaljenostima, uglavnom stoga što svetlost ima zaista nadzvučnu brzinu. Međutim, kao što smo videli, u nekim slučajima koji uključuju gravitaciju, veća rastojanja od materije su neophodna da bi se osiguralo neometano pomeranje svetlosti.

UPOTREBA INTERFERENCIJE ZA SNIMANJE

Kao što smo već videli u slučaju snimka gitare ([strana 82](#)), slike načinjene pomoću interferencije mogu da budu korisne. Pre svega, efekti interferencije mogu da se iskoriste za merenje izobličenja i za kretanje objekata.

Interferencija može takođe da se upotrebi i da se snimak poboljša. [Slika 117](#) prikazuje poboljšanje koje je moguće kada se u posebnom slučaju uz snimanje pomoću X-zraka koristi interferomear, takozvani **Talbot-Lau interferometar**. ([Ref. 132](#)). Posebno se ovom tehnikom poboljšava osetljivost X-zraka na meka tkiva.

Interferencija je takođe osnova holografije, važne tehnike za pravljenje trodimenzionalnih slika.



Slika 117 Tri vrste snimaka palca pomoću X-zraka: ubičajeni snimak (levo) i dva snimka za koje su upotrebljeni efekti interferencije. (© Momose Atsushi).

KAKO SE PRAVE HOLOGRAMI I DRUGE SLIKE U TRI DIMENZIJE

Naše čulo vida daje nam slike sveta oko nas u koje je uključen i utisak dubine. Neprekidno doživljavamo naše okruženje kao **trodimenzionalno**. Stereotipija, doživljavanje dubine, pojavljuje se usled tri glavna efekta. Prvo, naša dva oka vide **različite slike**. Drugo, slike koje se obrazuju u svakom oku **zavise od položaja**: kada pomerimo glavu zapažamo efekte paralakse za tela koja su nam u blizini i udaljena od nas. Treće, za različita rastojanja našim očima je potrebno različito izoštravanje i da konvergiraju manje ili više, u zavisnosti od položaja objekta.

Obična fotografija na papiru nije zabeležila nijedan ovaj trodimenzionalni efekt: fotografija na papiru odgovara slici koju vidi jedno oko sa neke određene tačke i za neku određenu žižnu dužinu. (**Izazov 176e**). Ustvari, sve fotografске kamere u suštini su kopije jednog nepomičnog oka sa jednom žarišnom dužinom.

Svaki sistem koji nastoji da stvori kod posmatrača osećaj dubine mora da uključi bar jedan od tri trodimenzionalna efekta, upravo pomenuta. Ustvari, treći efekt, promena žižne dužine sa promenom rastojanja je najslabiji efekt, tako da se većina sistema usmerila na prva dva efekta, različite slike za dva oka i sliku koja zavisi od položaja glave. Stereo fotografija i stereo filmovi izuzetno koriste prvi efekt tako da očima šalju dve različite slike, ponekad i uz pomoć obojenih naočara. Isto tako neke poštanske razglednice i ekran računara pokriveni su cilindričnim sočivima koja omogućavaju da se pošalju dve različite slike za dva oka, te na taj način proizvode utisak o dubini.

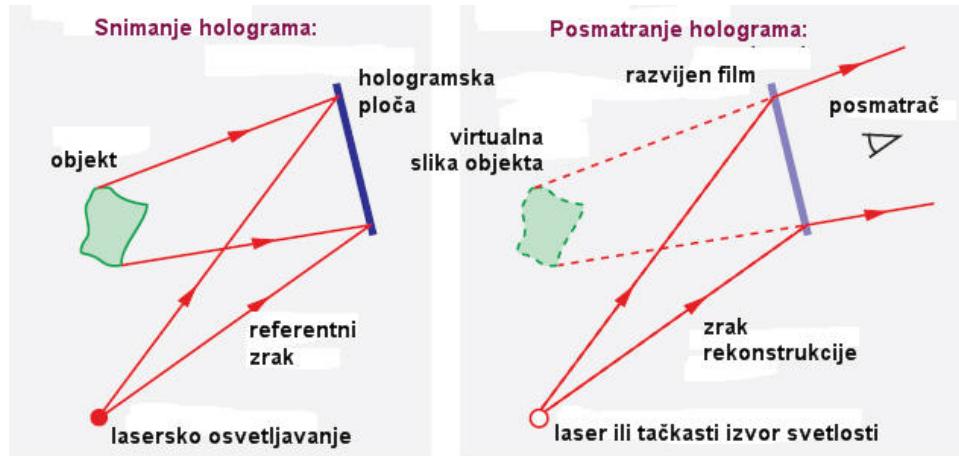
Međutim, očigledno je da bi se najspektakularniji efekt dubine dobio kada bi se stvorila slika koja zavisi od položaja. Savremeni sistemi virtualne stvarnosti proizvode ovaj efekt upotrebom senzora pričvršćenog na glavu, a proizvode računarske slike koje zavise od položaja glave. Međutim, takvi sistemi su ograničeni grafikom računara; oni nisu u stanju da prikažu stvarnost.



Slka 118 Najkvalitetnije holograme na svetu načinjene do sada, napravio je Yves Gentet, a oni se mogu naći na veb strani www.ultimate-holography.com. To su Denisjuk hologrami. Posmatrač je obmanut da misli da su to pravi leptiri iza staklene ploče (© Yves Gentet)

Jedini postupak koji postiže sva tri efekta dubine je **holografija**. Dobijene slike nazivaju se **hologrami**. Primer holograma prikazan je na **slici 118**. Iako je hologram samo film debljine nekoliko delova milimetra, posmatrač ima utisak da postoje objekti iza njega. U zavisnosti od detalja geometrije objekti mogu da izgledaju kao da lebde ispred filma.

Hologram prikazuje sve podatke koji se mogu videti iz svake tačke područja u prostoru. **Hologram** je stoga memorisan skup slika objekta zavisnih od položaja. U prvom koraku hologram je snimljen tako što su memorisani amplituda i faza svetlosti koju emituje ili rasipa objekt, kao što je prikazano na *slici 119* i *slici 121*. Da bi se postiglo memorisanje celog polja svetlosti, objekt je osvetljen koherentnim¹ svetлом, kao što je svetlo lasera, a memoriše se uzorak interferencije između svetlosti koja osvetljava i koja se rasipa; obično se snima na fotografiski film. Ovaj postupak je šematski prikazan na *slici 119*. U drugom koraku razvijen film osvetljava se koherentnim svetлом – iz lasera ili po mogućnosti iz tačkaste svetiljke – i omogućava da se sagleda kompletna trodimenzionalna slika.

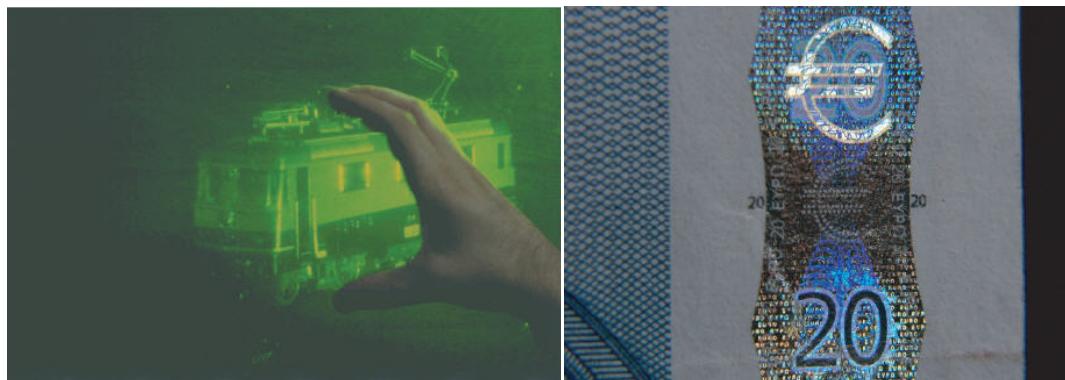


Slika 119 Snimanje (levo) i posmatranje (desno) jednobojnog holograma (u ovom slučaju u prenosu). Pravi hologrami u boji koriste tri posebna lasera, za crvenu, zelenu i plavu boju

Osim toga, usled reprodukcije situacije, slika izgleda kao da lebdi u prostoru.

Nekoliko primera holograma prikazano je na *slici 129*. Holograme je razvio 1947. godne poznati fizičar Denis Gabor (1900. Budapest – 1979. London) koji je za svoj rad dobio 1971. godine Nobelovu nagradu za fiziku. Lep izum Gabora tada je bio samo teoretski, pošto laseri u ono vreme još uvek nisu bili dostupni.

Hologrami mogu da budu **prividni hologrami**, kao oni koji se viđaju u muzejima, ili **refleksni hologrami**, kao oni koji se nalaze na kreditnim karticama ili na novčanicama. Hologrami mogu biti laserski hologrami ili hologrami bele svetlosti. Većina holograma u boji su na principu duge, prikazujući lažne boje koje nisu u vezi sa orginalnim objektom. Pravi hologrami u boji načinjeni i prikazivani pomoću tri različita lasera, mogući si, ali su skupi.

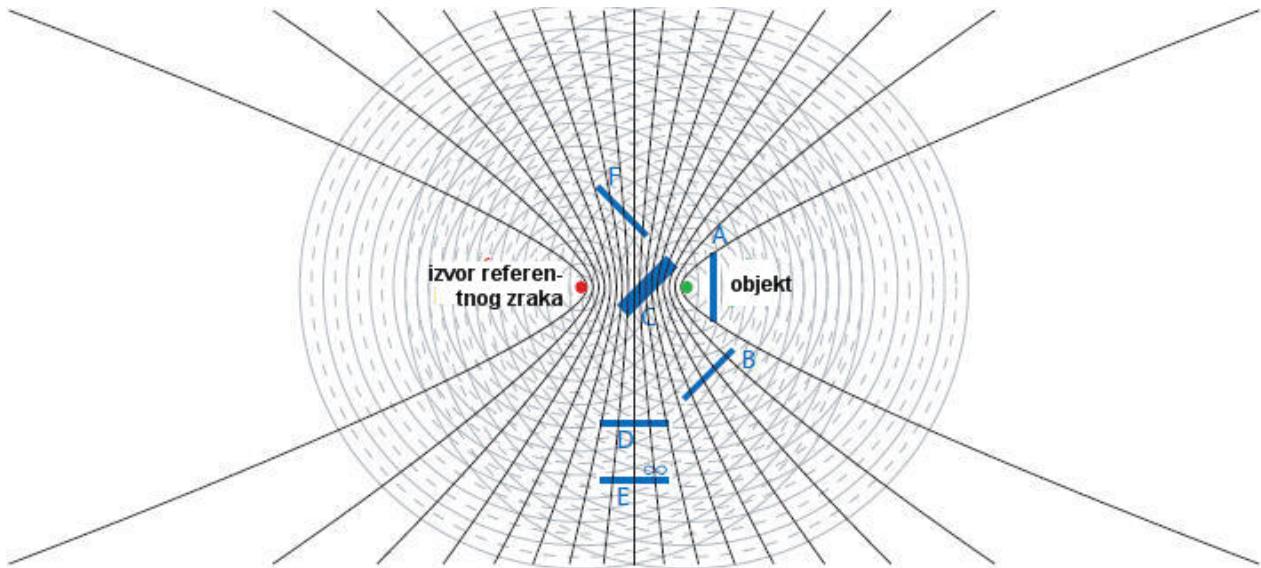


Slika 120 Hologram voza i refleksivni hologram na novčanici eura (© Anonimus, Hans-Urlich Potsch)

Hologrami se zasnivaju na interferenciji. Slike na osnovu interferencije takođe mogu da se upotrebe i na drugi način. Pomoću dvostrukog osvetljavanja u dva različita trenutka dobija se takozvani **interferogram**, koji omogućava sagledavanje i merenje izobličenja objekta. Interferogrami se koriste za posmatranja i merenja izobličenja, oscilacija ili uticaja temperature.

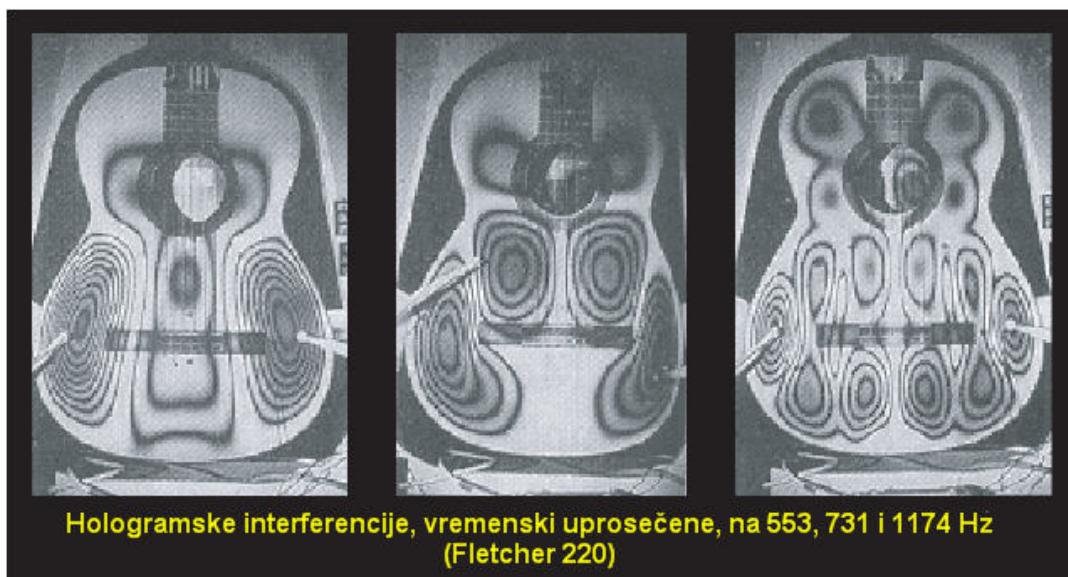
¹ Uopšteno govoreći, dva zraka svetlosti ili dva dela istog zraka – ili drugih talasa – nazivaju se **koherentnim** ako imaju stalnu faznu razliku i učestanost. U praksi, usled neizbežnih smetnji, to se događa u nekoj na izvesni način ograničenoj zapremini, koja se naziva **zapremina koherencije**. Koherencija omogućava i neophodna je za interferenciju.

Da li je moguće da se naprave **pokretni** hologrami? Moguće je, međutim, tehički sistemi još uvek su predmeti istraživanja. Do sada takvi sistemi postoje samo u nekoliko laboratorija (na primer, pogledati veb stranu www.optics.arizona.edu/pstg/index.html) i jako su skupi. Uzgred, možete li da opišete kako biste razlikovali pokretni hologram visokog kvaliteta od stvarnog tela, a da ih ne dodirnete? (**Izazov 177s**).



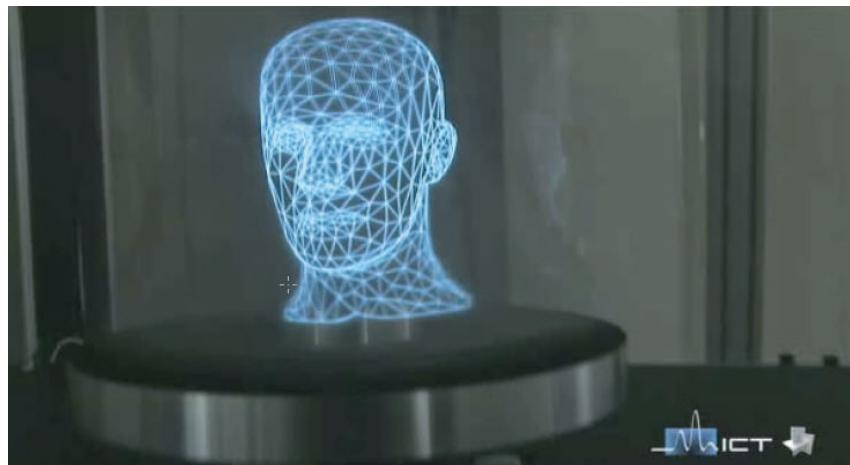
Slika 121 Različite vrste holograma nastaju pomoću različitih relativnih položaja objekta (zelena tačka), hologramskih ploča (plavo) i referentnog zraka (crvena tačka). Poloaj A opisuje tanak providan hologram u redu kakav je predložio Gabor, B je tanak providan nepovezan hologram prema Leith i Upatnieks, C je tanak refleksni hologram ili hologram bele svetlosti, prema Denisjuku, D je Furijeov hologram na velikoj udaljenosti, E je Fraunhoferov hologram na beskonačnoj udaljenosti i F dvodimenzionalni hologram sa obrnutim talasnim vozom (© DGH)

U početku računarske industrije, bio je cilj da prikazivanje oblika bude **fotorealističan** ekran, to jest ekran koji se nebi mogao da razlikuje od fotografije. Ovaj cilj je postignut 1912. godine, vizionari tehnologije predložili su da sledeći cilj industrije treba da bude stvaranje ekrana **realističnog prozora**, to jest **ekrana** koji se nebi razlikovao od prozora. To bi trebalo da da uključi efekt tri dimenzije svega što se nalazi na takvom ekranu. Da li je takav ekran ikako moguć? (**Izazov 178s**).



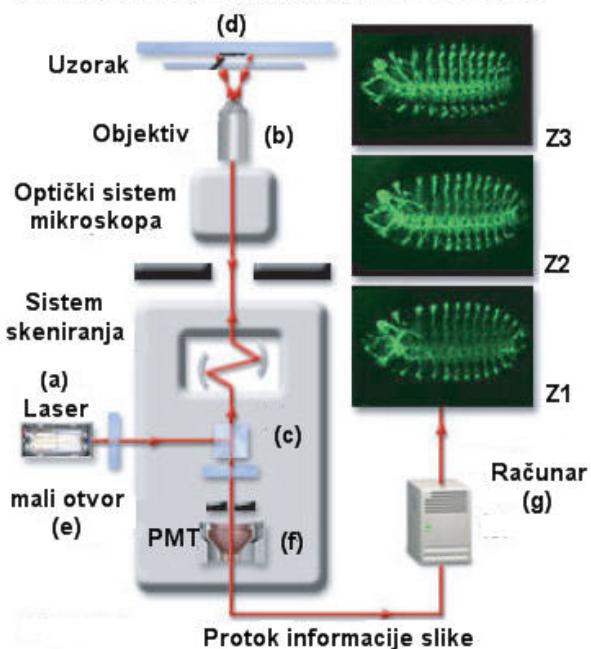
Slika 122 Interferogram gitare (© Wikimedia)

Nisu sve trodimenzionalne slike hologrami. Upotreboom obrtnih prikaza, obrtnih ogledala ili obrtnih ekrana, moguće je da se naprave zadivljujuće trodimenzionalne slike. Upečatljiv primer takve tehnološkoh prikaza dat je na **slici 123**. Možete li da zaključite zbog čega nije postignut komercijalni uspeh? (**Izazov 179e**).



Slika 123 Sistem trodimenzionalnog snimanja zasnovan na obrtnom ogledalu, na Univerzitetetu Južne Kalifornije, na veb strani gl.ict.usc.edu/Research/3DDisplay (© USC Stevens Institute for Innovation).

3-D snimanje konfokalnom mikroskopijom

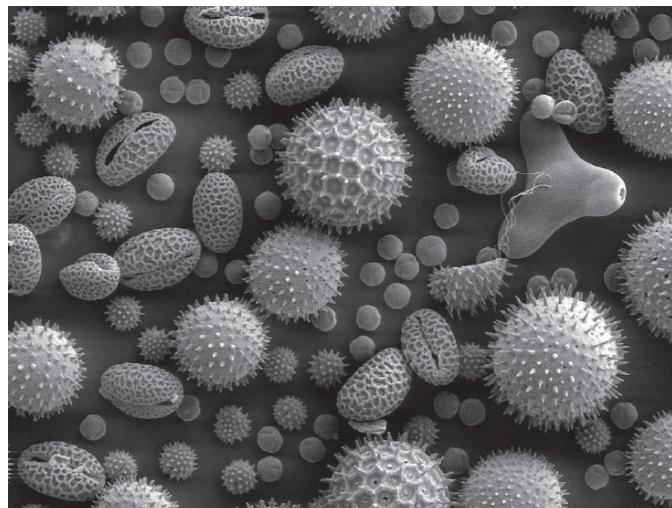


Slika 124 Dve tehnike skeniranja slika: mikroskop sa konfokalnim laserskim skeniranjem i multifotonski mikroskop (© Nikon, Carl Zeiss)

SLIKE POMOĆU SKENIRANJA

Kada se slike prave pomoću sočiva ili ogledala, sve tačke na slici su napravljene u paraleli. Nasuprot tome, u tehnikama skeniranja tačke na slici se konstruišu redno, tačka po tačka. Iako je skeniranje znatno sporije od bilo koje paralelne tehnike, ono ima svoje prednosti: skeniranje prikazuje snimak u tri dimenzije, a postignute rezolucije veće su od granice difrakcije. Tehnike skeniranja uglavnom se primenjuju u mikroskopiji.

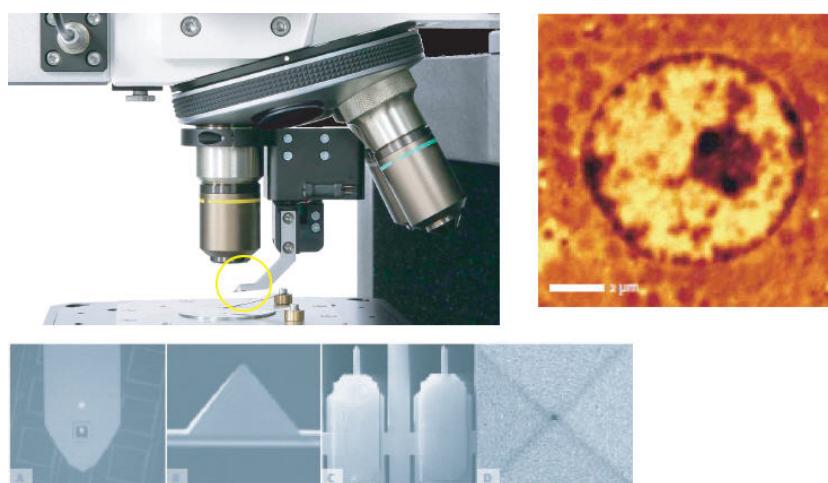
Najpoznatija tehnika skeniranja ne koristi zrake svetlosti, već elektrone: **elektronski skenirajući mikroskop**. Kao što je prikazano na *slici 125*, takvi mikroskopi mogu da naprave zadirajuće slike. Međutim, stvorene slike su dvodimenzionalne.



Slika 125 Savremen elektronski mikroskop za skeniranje i slika polena – veličina polja oko 0,3 mm – prikazuje rezoluciju i dubinu u polju koja se postiže ovom tehnikom (© Zeiss, Wikimedia)

Tipičan primer savremene trodimenzionalne tehnike snimanja je na osnovu **laserskog konfokalnog skeniranja** mikroskopom. Tehnika se zasniva na otklanjanju svih signala svetlosti koji su izvan žiže mikroskopa. Ova tehnika uvek napravi sliku više ili manje providnih uzoraka na određenoj dubini ispod ispod njihove površine, do maksimalne dubine od oko 500 µm. Konfokalni mikroskopi danas se mogu nabaviti kod raznih proizvođača.

Primer tehnike za visoku rezoluciju je **multifotonska mikroskopija**. U ovoj tehnici fluorescencija uzorka se pobuđuje upotreborom dva ili tri fotona velikih talasnih dužina. Kao i u svim fluorescentnim tehnikama, slika se stvara od fluorescentne svetlosti koju emituju izvesne hemijske supstance koje se nalaze u živim organizmima. Nasuprot uobičajenoj fluorescentnoj mikroskopiji, multifotonsko snimanje zasniva se na nelinearnim efektima, tako da je područje emitovanja izuzetno usko, pa se usled toga postiže visoka rezolucija.



Slika 126 Mikroskop skeniranja u bliskom polju (SNOM – Scanning Near-field Optical Microscope) kombinovana sa optičkim mikroskopom, detalji sonde za skeniranje i slika jedra ćelije jetre snimljena pomoću njega (© WITec)

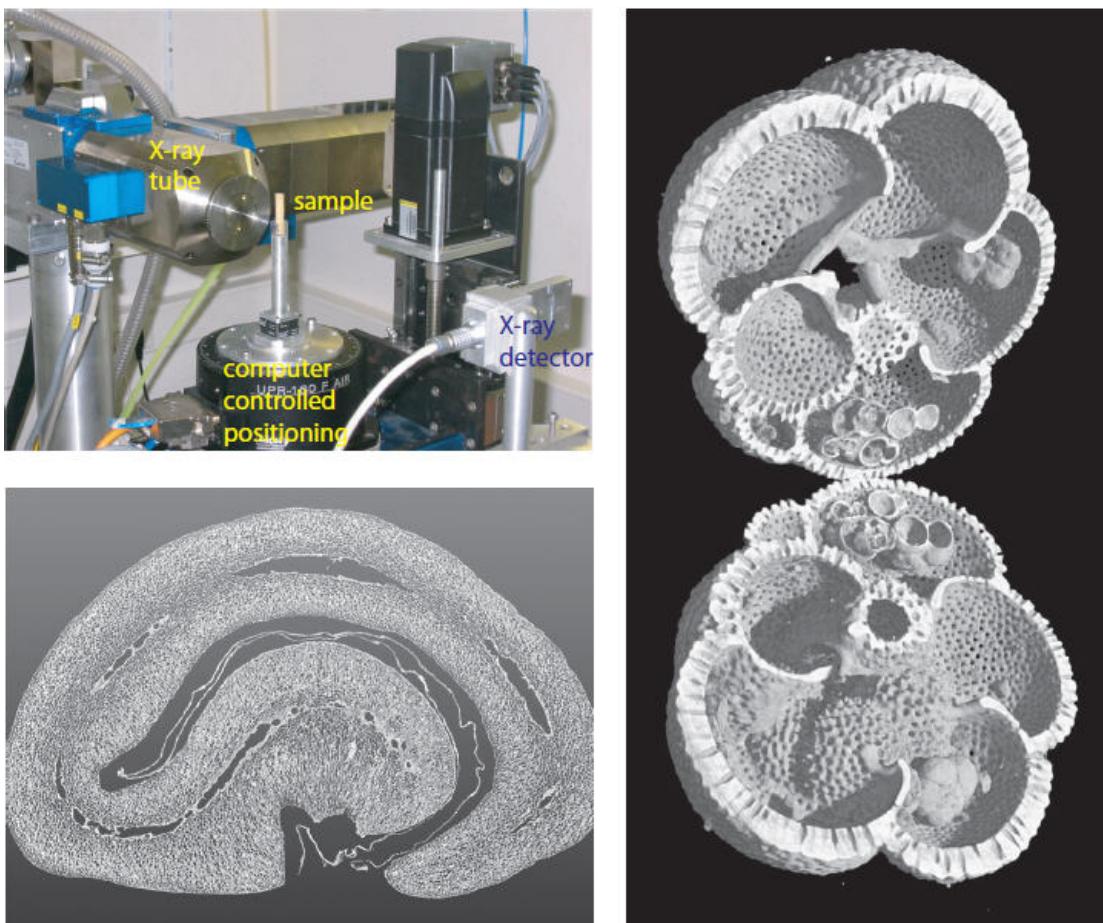
Za najvišu moguću optičku rezoluciju nezaobilazni su optički mikroskopi sa skeniranjem u bliskom polju. Obično se malom optičkom sondom skenira po površini, kao što je prikazano na [slici 126](#). Rad u bliskom polju nadmudruje granicu difrakcije, pa se postiže rezolucija reda nanometra.

Druga grupa mikroskopa za skeniranje koristi elektromagnetizam radi stvaranja slika najviše rezolucije, prema tome oni ne koriste svetlost. Najpoznatiji primjeri su **mikroskopi sa tunelskim skeniranjem**, ili STM (Scanning Tunelling Microscope), **mikroskopi atomske sile** ili AFM (Atomic Force Microscope) i **mikroskopi magnetne sile** ili MFM (Magnetic Force Microscope). ([Vol. I, strana 250](#)). Ovi instrumenti, iako su mali i jednostavni za izradu, načinili su revoluciju u nauci o materijalima u poslednjih nekoliko decenija, pošto su dostigli rezoluciju reda atoma u vazduhu na običnom stolu u laboratoriji.

Ukratko, tehnološki napredak u današnje vreme omogučava prefinjene sisteme za snimanje zasnovane na skeniranju, posebno u polju mikroskopije. Pošto je ovo područje još uvek toku istraživanja, očekuje se da će tehnike skeniranja postići još upečatljivije rezultate u godinama koje predstoje. Ovaj napredak u tehnikama skeniranja podseća na jedan od prošlih napretka poboljšanja principa koji stvara sliku na još zapetljaniji način: tomografiju.

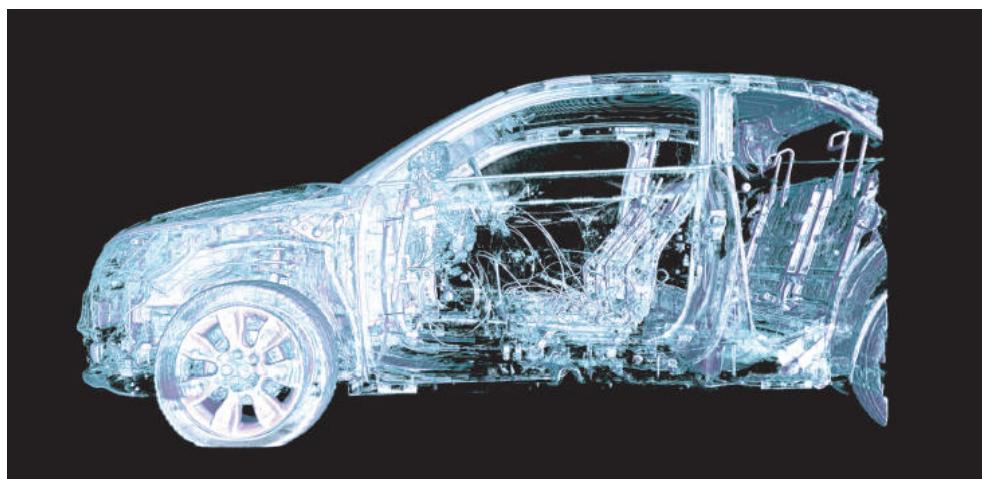
TOMOGRAFIJA

Zadivljujuća vrsta snimanja, koja je postala moguća tek pošto su računari velikih brzina postali jeftini je: **tomografija**. U tomografiji se izvor zračenja obrće oko objekta snimanja; otkriva se zračenje koje je rasuto i/ili preneto, a pomoću posebnih programa računara rekonstruišu se preseci objekta. Moguća je isto tako i trodimenzionalna rekonstrukcija. Tomografija može da se uradi svakom vrstom zračenja koje može da bude emitovano uz dovoljno dobro određene zrake, kao što su gama zraci, X-zraci, svetlost, radio talasi, mlaz neutrona, zvuk, pa čak i zemljotresi. Tomografija pomoću X-zraka je standardni postupak u zdravstvu; tomografija pomoći vidljive svetlosti, koja nema neželjene efekte po ljude, razvijena je za otkrivanje raka dojke. Ostale specijalizovane tehnike su elektrootporna tomografija, tomografija magnetnom indukcijom i krioelektronska tomografija.



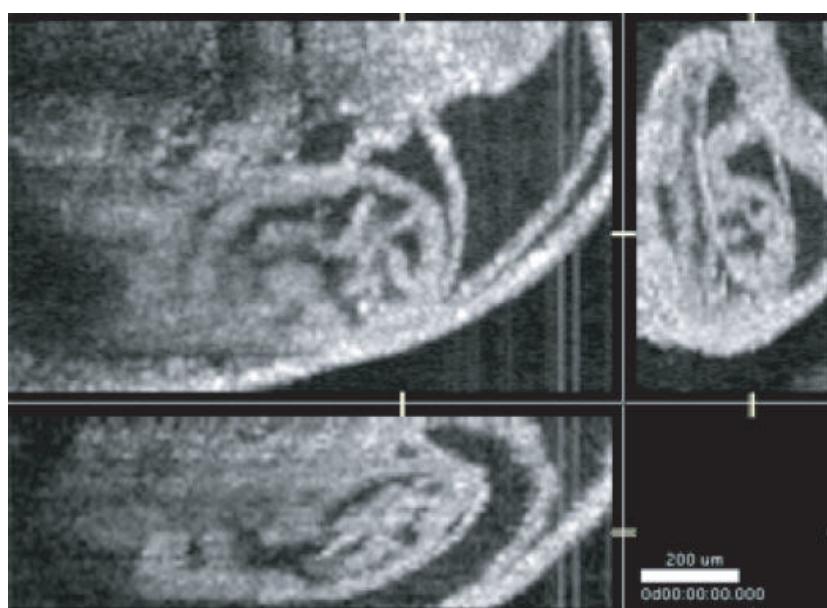
slika 127 Uredaj za tomografiju velike rezolucije i dva primera snimka načinjenih pomoću njega: presek zrna kafe (dole levo) veličine 8 mm i trodimenzionalna rekonstrukcija egzoskeleta krednjaka, prečnika 0,5 mm (desno) (© Manuel Dierick)

U mnogim vrstama tomografije postignute rezolucije zaustavljaju dah. Primer za savremenu tomografiju velike rezolucije sa X-zracima zaista malih objekata prikazan je na *slici 127*. Primer tomografije sa X-zracima velikog objekta prikazan je na *slici 128*. Izgradnja naprava koje daju takve slike veliki su projekti i impresivni izazovi. Isto tako snimanje magnetnom rezonansom, široko rasprostranjeno u zdravstvu radi snimanja unutrašnjosti ljudskog tela, jedna je vrsta tomografije, zasnovana na radio talasima; to će biti predstavljeno kasnije tokom naše pustolovine. (*Vol. V, strana 123*). Razne vrste sistema tomografije – uključujući *optičko-akustičnu tomografiju*, koja se zasniva na zvuku kojeg proizvodi pulsirajuća svetlost, tomografiju sa emisijom pozitrona, tomografiju sa optičkom koherencijom i uobičajeno ultrazvučno snimanje, omogućavaju takođe snimanje filmskih sekvenci.



Slika 128 Računarska tomografija (CT) savremenog automobila pomoću X-zraka, uz rezoluciju manju od 1 mm (© Fraunhofer IIS)

Primer tehnike koja omogućava kako snimanje u tri dimenzije, tako i visoku rezoluciju, je tomografija sa optičkom koherencijom. Tehnika je bezopasna za pacijenta ili za uzorak, omogućava dubinu od nekoliko milimetara u životinjsko ili ljudsko tkivo i omogućava rezoluciju do 500 nm. Savremeni sistemi omogućavaju snimanje sa 10 GVoxel/s (zapreminske element slike) i više, tako da filmovi o biološkim procesima mogu da se snime uživo, kao što je protok krvi kroz ljudski prst. Ako se upotrebi Doplerov efekt može takođe da se odredi smer protoka krvi. Sledeći zadivljujući primer prikazan je na *slici 129*. OCT (Optical Coherence Tomography) uobičajeno se koristi u oftalmologiji (*strana 145*); isto tako se istražuje mogućnost primene OCT u dermatologiji. Endoskopski OCT, to jest izvođenje OCT kroz mali kateter umetnut u ljudsko telo, postaje u bliskoj budućnosti bitan alat u onkologiji i kardiologiji. OCT se takođe koristi u istraživanjima materijala za snimanje u zamućenim sredinama ili da se naprave topografski profili.



Slika 129 OCT (Optical Coherence Tomography) film otkrivajući srce embriona miša, snimak Kyrill Larin. Tri snimka odgovaraju trima koordinatnim osama (QuickTime film © Kyrill Larin)

Neuobičajen postupak snimanja je mionska tomografija, postupak snimanja koji koristi mione u kosmičkom zračenju da se otkriju teški metali u kutijama, prtljagu ili teretnim automobilima. Ovaj postupak je posebno interesantan za traženje sakrivenih teških metala, kao što je plutonijum, koji rasipa mione mnogo jače nego ostali materijali, kao što je gvožđe.

OČI I MOZAK: BIOLOŠKO DOBIJANJE SLIKE I NJIHOVA OBRADA

Sistem za obradu slika dobija slike a zatim iz njih izdvaja informaciju. U tehničkim sistemima za obradu slika dobijaju se slike pomoću kamere a izdvajanje informacije obavlja softver koji radi u računaru. Interesantan sistem obrade slike ugrađen je u svakog od nas: kombinacija oka i mozga. Oko i mozak su povezani uređaji. Počećemo sa objašnjavanjem konstrukcije i osobina naših očiju.

DA LI VIDIMO SVE ŠTO POSTOJI

Ponekad vidimo *manje* no što postoji. Zatvorite svoje levo oko, pa pogledajte belu tačku na *slici 130*, pomaknite lagano stranicu ka vašem desnom oku i obratite pažnju na srednju liniju. Sa udaljenosti od oko 15 do 20 cm srednja linija ne izgleda da ima prekid. Zašto? (*Izazov 180s*). Pogledajte jednim okom ceo ekran računara koji treperi crno i plavo jednom ili dva puta u sekundi. (*Ref. 133*) Potom pogledajte isti ekran kroz plavi filter (Balzers K45 ili Kodak BG12). Videćete tačku. (Zašto? (*Izazov 181s*)).



Slika 130 Ograničenje vida oka (videti tekst)

Ponekad vidimo *više* no što postoji, kao što nam prikazuju *slika 131* i *slika 132*. Na prvoj slici paralelne linije izgledaju kao iskrivljene, a na drugoj slici je prikazana takozvana *Hermanova rešetka*, nazvana tako po svom pronalazaču.¹ Hermanova rešetka sa *slike 132*, koju je 1995. godine otkrila Elke Lingelbach, posebno je upadljiva. Varijacije ovih rešetaka sada se koriste za razumevanje mehanizama na kojima počiva ljudski vid. (*Ref. 134*). Na primer, one mogu da se koriste za određivanje koliko je ćelija osjetljivih na svetlost na mrežnjači ujedinjeno u jednu stazu signala prema mozgu. Iluzija zavisi od ugla, pošto ovaj broj takođe zavisi od ugla.

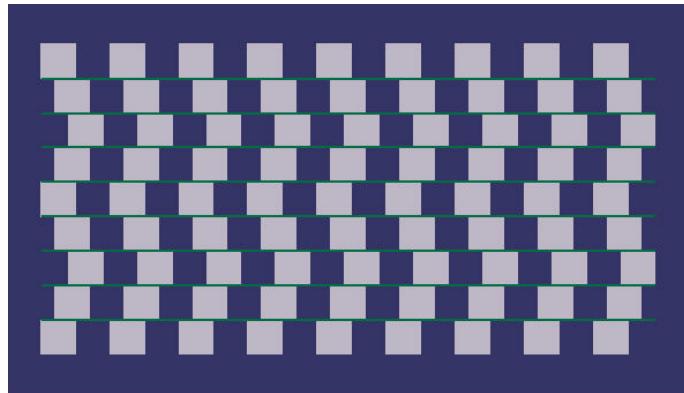
Naše oči takođe "vide" stvari *različito*: na mrežnjači je slika sveta *obrnuta*. Postoji jednostavan postupak da se to ustanovi, zahvaljujući Helmholcu.² Potrebna vam je samo igla i komad papira, to jest ova stranica teksta. Upotrebite iglu da napravite dve rupice u dva slova "oo". Potom držite papir najbliže što je moguće uz vaše oko, pogledajte kroz rupice prema zidu, držeći iglu uspravno, nekoliko centimetara iza papira.

Videćete dve slike igle. Ako sada zatvorite prstom *levu* rupicu, nestaje *desna* igla i obrnuto. To je dokaz da je slika unutar oka, na mrežnjači, obrnuta. Jeste li sposobni da kompletirate dokaz? (*Izazov 182ny*).

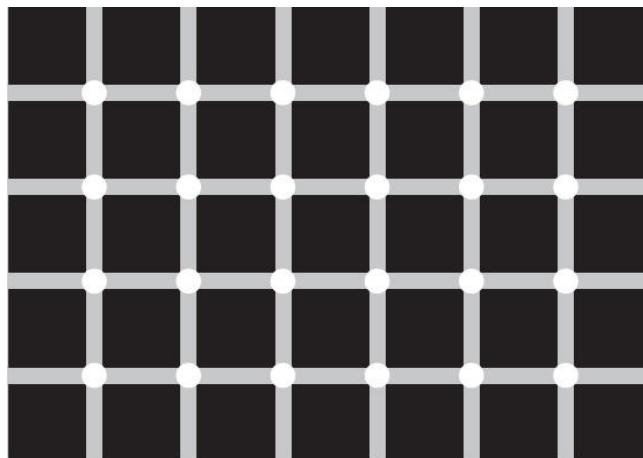
Urbana legenda, raširena među mnogim lekarima i bobicama do današnjih dana, tvrdi da novorođene bebe vide sve okrenuto naglavačke. Možete li da objasnite zbog čega je ova ideja pogrešna? (*Izazov 183s*).

¹ Ludimar Herman (Ludimar Hermann, 1838. Berlin – 1914. Königsberg), bio je značajan psiholog. Rešetka se često pogrešno naziva "Heringova rešetka", po čoveku koji je učinio da Hermanovo otkriće postane čuveno.

² Videti knjigu od Hermana fon Helmholca *Handbuch der physiologischen Optik*, 1867. godina. Ova poznata klasika može se nabaviti na engleskom kao *Handbook of Physiological Optics*, Dover, 1962. Lekar, fizičar i naučni političar, rođen kao Herman Helmholc (Hermann Helmholtz, 1821. Potsdam – 1894. Charlottenburg) bio je čuvan po svom radu u oblasti optike, akustike, elektrodinamike, termodinamike, epistemologije i geometrije. Osnovao je nekoliko instituta fizike širom Nemačke. Bio je jedan od prvih koji su širili ideju o očuvanju energije, Njegova druga značajna knjiga, *Die Lehre von den Tonempfindungen*, objavljena 1863. godine opisuje osnove akustike i još uvek je vredna za čitanje kao priručnik.



Slika 131 Koliki je ugao među tankim linijama između kvadrata?



Slika 132 Lingelbachova rešetka: da li vidite bele, crne ili sive tačke na preseku linija?

Još dva dodatna eksperimenta mogu da pokažu da mrežnjača dobija obrnutu sliku. Ako pritisnete veoma lagano **unutar** svog oka (pažljivo!) videćete crnu tačku koja se pojavljuje *izvan* vašeg vidnog polja. I ako stojite u mračnoj sobi, pa zamolite prijatelja da poleda u upaljenu sveću, pogledajte u njegove oči: videćete tri odbijene slike, dve upravne, koje se odbijaju od rožnjače i sočiva i treću zamućenu i **obrnutu** koja se odbija od mrežnjače.



Slika 133 Primer infracrvene fotografije, slabo pomešane sa fotografijom u boji (© Serge Augustin)

Naše oči ne stvaraju vernu sliku prirode: one imaju ograničenu osetljivost prema talasnim dužinama. Ova osetljivost je najveća pri 560 nm; izvan crvene i ljubičaste naše oči ne mogu da osećete zračenje. Stoga vidimo samo deo prirode. Kao rezultat toga infracrvene fotografije prirode, kao što je ona prikazana na *slici 133*, interesantne su zato jer nam pokazuju nešta različito od onog što možemo da vidimo. Isto se dešava i sa ultraljubičastim fotografijama, kao što je prikazano na *slici 134*. (*Ref. 135*) Takođe se i slike neba razlikuju uz promenu talasne dužine; veb strana www.chromoscope.net prikazuje to detaljnije.



Slika 134 Kako se izgled cveta suncokreta menja sa talasnom dužinom: kako ga vidi ljudsko oko, kako ga vide ptice i kako užgleda u ultraljubičastom opsegu (© Andrew Davidhazy)

Oči vide najoštrije u oblasti centralnog ulegnuća na mrežnjači, makule (*fovea*). Ali najveća osetljivost na svetlost nije u tom području. Kao rezultat toga, mi često ne vidimo udaljenu zvezdu u noći ako gledamo direktno u nju, ali je vidimo ako pogledamo malo **pored** nje. Ovaj efekt postoji usled naročitog rasporeda štapića, koji imaju maksimalnu gustinu na 20° pomereno od ose najoštrijeg vida.

Mnoge druge optičke iluzije nalaze se u ovom tekstu. Ukratko, moramo biti obazrivi uvek kada smatramo da gledanje znači opažanje. Naše čulo vida ima ograničenja. Postoje li druga ograničenja naših čula koja su manje zapažena? Naša pustolovina će zaista razotkriti nekoliko njih. Ali osvrnimo se sada da vidimo šta oko **može** da uradi.

LJUDSKO OKO

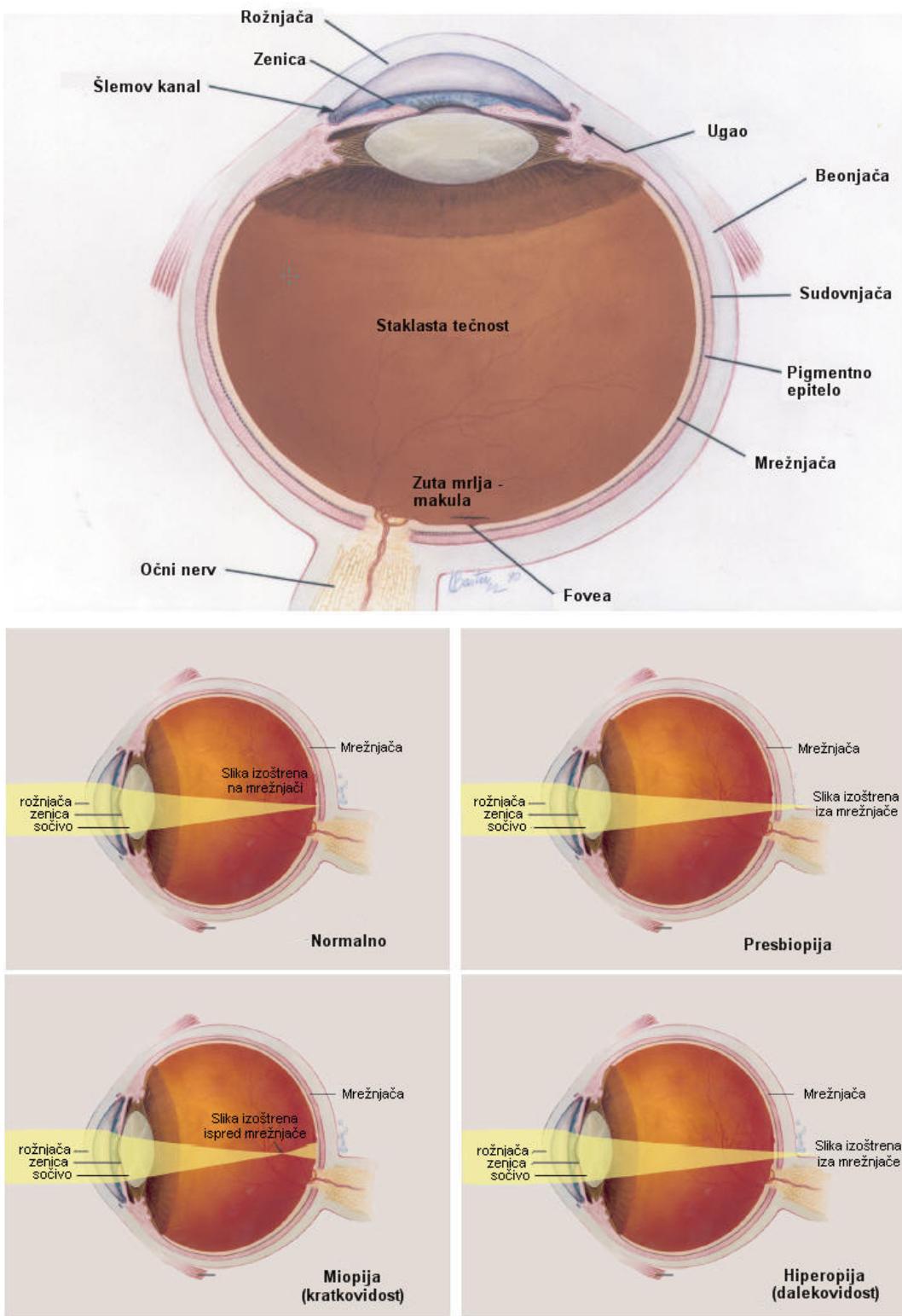
Oko je deo tela koji se najčešće pokreće – čak više i od srca. Procenjuje se da oko izvede oko 200 miliona sakada (skretanja pogleda) svake godine. Prema tome kretanje i mehanizam podmazivanja oka posebno su povezani. Postoje različite vrste kretanja oka: osim sakada, oči vrše kretanje radi praćenja, kretanja koja kompenziraju okretanje glave, nazvana vestibulo-okularni refleks i očna mikropodrhtavanja.

Ljudsko oko je takozvana ***očna kamera***. Isto kao fotografска kamera, a u suprotnosti sa očima insekata i drugim složenim očima, očne kamere kičmenjaka rade tako što prave sliku spoljnog sveta na površinu koja se sastoji od senzora svetlosti, ***mrežnjaču***. Mrežnjača pokriva više od polovine unutrašnjosti očne jabučice, koja kod odraslih osoba ima prečnik oko 16,7 mm. Zenica ima prečnik od 2 mm – ispod toga ima problema sa difrakcijom – i 7 mm – za koji je još uvek prihvatljiva aberacija sočiva. Slika na mrežnjači ima malo rasipanje, malu hromatsku aberaciju (oko 1 dioptrije između plavog i crvenog) i malu komu; oči postižu ove osobine tako što koriste nesferično sočivo sa gradijentnim indeksom i rožnjaču čiji je oblik uvek u blizini idealnog oblika unutar $30 \mu\text{m}$ – izuzetno dobru vrednost za telo koje menja oblik. Oči, zajedno sa mozgom, poseduju snažno auto-izoštravanje – još uvek malo razumljivo – i izuzetnu kompenzaciju kretanja kao i ugrađen sistem stabilizacije slike, Presek ovog začuđujućeg uredaja prikazan je na **slici 135**.

Mrežnjača je produžetak mozga. Na njoj se nalazi 120 miliona **štapića** ili tačaka za crno-belo opažanje i 6 miliona čepića, tačaka za opažanje boja. Svaka tačka može da oseti oko 300 do 500 nivoa jačine svetlosti (9 bita). Oko funkcioniše preko opsega jačine reda 8 do 10 veličine; mehanizam koji sadrži je neverovatno složen, događa se već u receptorima koji sadrže jone kalcijuma i poznat je tek od pre nekoliko godina. Popdruče na kojem je rezolucija najveća, fovea, ima ugaonu veličinu od 1° . Rezolucija oka je oko $1'$. Vreme integriranja mrežnjače je oko 100 ms – uprkos tome, nikakvi artefakti ne primećuju se tokom sakade. Sama mrežnjača je debljine $200 \mu\text{m}$ i providna je, što znači i da su sve veze koje vode do receptora takođe providne.

Mrežnjača ima jako malu potrošnju energije i koristi sasvim različitu vrstu neurona u odnosu na ostale nerve: Neuroni u mrežnjači koriste potencijale elektrona, ne potencijale rada ili vrhove koji se koriste u ostalim nervima, koji bi mogli da izazovu interferenciju, a koja bi mogla da uzrokuje nemogućnost vida. Na fovei svaka tačka ima vezu sa mozgom. Na granici mrežnjače oko 10.000 tačaka je kombinovano u jedan kanal signala. (Kada bi sve tačke bile povezane s mozgom 1:1, mozak bi morao da bude veličine obične učionice.) Kao rezultat toga, signali sa fovee, čija je površina oko 0,3% mrežnjače, koriste 50% procesuiranja u kori mozga mozga. Da bi se izbegla hromatska aberacija u fovei se ne nalaze receptori za

plavu boju. Mrežnjača je isto tako grafički preprocesor: ona sadrži tri neuronska sloja koji se završavaju kao 1,3 miliona kanala do kore mozga, pri čemu oni namiruju 5 miliona aksona, što odgovara vezi od 500 miliona neurona.



Slika 135 Gore: uprošćen presek ljudskog oka; dole: upoređenja optičkog viđenja zdravog oka i uobičajenih poremećaja vida, miopije, hiperopije i presbiopije (© NEI u NIH)

Postupak komprimovanja između 125 miliona tačaka na mrežnjači i 1,3 miliona kanala do kore mozga još uvek su predmet proučavanja. Poznato je da signali ne prenose podatke sa tačaka, ali da se tok podataka obrađuje na desetak različitih načina. Tok podataka ne prenosi vrednost sjajnosti, već samo kontrast i ne prenosi crveno-zeleno-plavu vrednost, već samo razliku boja. Tok podataka prenosi signale pokreta u komresovanom obliku, a podaci prostorne učestanosti su uprošćeni. Istraživanja su pokazala kako ganglioni u mrežnjači obezbeđuju horizont za navigaciju, kako otkrivaju pokrete objekta u odnosu na

pozadinu u vidnom polju i kako oni poništavaju pokretanje glave. Godine i dekade koje dolaze pružiće mnoge dodatne rezultata; mnogi kanali podataka između oka i mozga još uvek su nepoznati. ([Ref. 136](#))

Osim štapića i čepića ljudsko oko sadrži i treću vrstu receptora. Ova vrsta receptora, *fotoosetljive ćelije ganglionia* ili *inherentno fotoosetljiva ćelija ganglionia mrežnjače*, bila je otkrivena tek ranih 1990-ih godina, pokrećući potpuno novo polje istraživanja. ([Ref. 137](#)). Fotoosetljive ćelije ganglionia osetljive su uglavnom na plavu svetlost, koriste melanopsin kao fotopigment i izuzetno su spore. One su povezane sa suprahiazmatičkim jezgrom u mozgu, malom strukturonu veličine zrna pirinča koja upravlja našim dnevnim hormonalnim ciklusima. Iz tog razloga treba puno da hodate tamo gde je na raspolaganju puno plave svetlosti, kako biste resetovali telesni časovnik i oslobođili se stresa. Ćelije fotoosetljivih ganglionia takođe stvaraju signal koji upravlja prečnikom zenice.

Vredno je da se podsetimo da su crteži, kao što je onaj na *slici 135, uprošćeni*. Na njima nije prikazana struktura u providnom delu oka, u staklastom telu, kao što je hijaloidni kanal, koji ima važnu ulogu tokom rasta oka u fazi embriona. Zapravo, rast oka unutar materice je čak interesantniji od njegove stvarne funkcije – ali ta priča ostaje izvan razmatranja u ovom tekstu.

LJUDSKO OKO NASPRAM DRUGIH OČIJU

Ljudske oči i mnoge druge oči životinja bolji su uređaji od većine savremenih fotografskih ili video kamera. Ne samo da imaju veći broj slikovnih tačaka od većine kamera, već su takođe neosetljive na greške slikovnih tačaka, na krvne sudove ispred senzora. Nijedna kamera ne može da pokrije isto područje promene jačine svetlosti. Nijedna kamera koji su napravili ljudi nema sistem sočiva uporedivog kvaliteta i mogućnosti: veliki vidni ugao, malo rasipanje u polju – takođe zbog loptastog oblika mrežnjače – i tako malu hromatičnu aberaciju. Nijedan tehnički sistem samoizoštravanja, stabilizator slike ili sistem za kompenzaciju kretanja nisu ravni onom u oku.

Jedno od ograničenja oka je brzina. Ljudsko oko pravi efektivan broj od 30 slika u sekundi, a do 120 slika tek u najidealnijim uslovima; psi i ptice dostižu dvostruku osnovnu stopu, a insekti i više od 10 puta veću. Savremene video kamere mogu da naprave više od 10.000 slika u sekundi. U razvoju oka evolucija je zamenila brzinu za rezoluciju. Da bi se postigla velika rezolucija oko neprestano vrši mala kretanja, nazvana *mikronistagmija*. Detaljnije, oko neprestano oscilira oko pravca posmatranja sa oko 40 do 50 Hz; ono neprestano uprosećuje jednu slikovnu tačku na 30 do 50 receptora, ali ovaj mehanizam izoštravanja još uvek nije poznat. Ovo kretanje povećava efektivan broj slikovnih tačaka, izbegavajući delove sa mrtvim slikovnim tačkama i omogućava štapićima i čepićima da se rasterete.

Sve oči kičmenjaka imaju *štapiće*, vrstu slikovnih tačaka koji stvaraju crno-bele slike tokom noći. Osim toga, mrežnjača ljudskog oka sadrži tri vrste čepića, za crvenu, zelenu i plavu boju. Kako je već pomenuto, mnogo bolje oči mogu da se nađu kod ptica, više reptila i riba; one imaju četiri ili više tipa čepića, ugrađene filtere boja i providno sočivo za ultraljubičastu svetlost. Četvrta vrsta čepića i posebno sočivo oka čine oči ptica i reptila osjetljivim na svetlost blisku ultraljubičastoj; ptice koriste svoje ultraljubičasto čulo da bi našle hrancu i da razlikuju mužjaka od ženki. Zaista, većina ptica kod kojih mužjak i ženka za ljude izgledaju jednaki, razlikuju se značajno u području ultraljubičaste svetlosti.

Ptice i reptili imaju takođe obojenu kapljicu ulja ugrađenu na vrh njihovih čepića, uz koje svaka vrsta čepića sadrži drugačiju boju ulja. Ove kapljice deluju kao filteri boje. Na taj način je spektralna rezolucija njihovih čepića mnogo izoštrenija nego kod sisara. Čulo vida, posebno za boje, kod ptica je razvijenije nego kod ljudi – bili bismo iznenadeni kada bismo pogledali svet ptičjim očima. Ptice sveukupno najbolje od svih vide boje. One imaju receptore za crvenu, plavu, zelenu, ultraljubičastu i u zavisnosti od vrste ptica, još bar tri dodatna skupa za boje.

Orlovi i još neki broj ptica (ali ne sve) takođe imaju bolju rezoluciju oka od ljudi. One to postižu na dva načina. Prvo, njihovi fotoreceptori su manji; drugim rečima veličina njihove slikovne tačke je najmanja u odnosu na prečnik oka, do 16 μm. Drugo, u njihovim očima su uključene i kosti. Ove kosti učvršćuju relativne položaje sočiva i mrežnjače, slično telu grubih kamera. Uz ovo tehničko rešenje jasno je da su oči orla bolje od ljudskih očiju.

U toku evolucije oko sisara je izgubilo dva tipa čepića koji su bili nasleđeni od kičmenjaka, a zadržale su se samo dve vrste čepića. Primati (iz praistorije) kasnije su vratili jedan tip, kako bi mogli da razlikuju jasno plodove na drveću u odnosu na lišće koje ih okružuje, što je takođe važno kao hrana za mozak primata. No uprkos ovoj promeni, primati nikada nisu postigli sposobnost najboljih očiju ptica. Prema

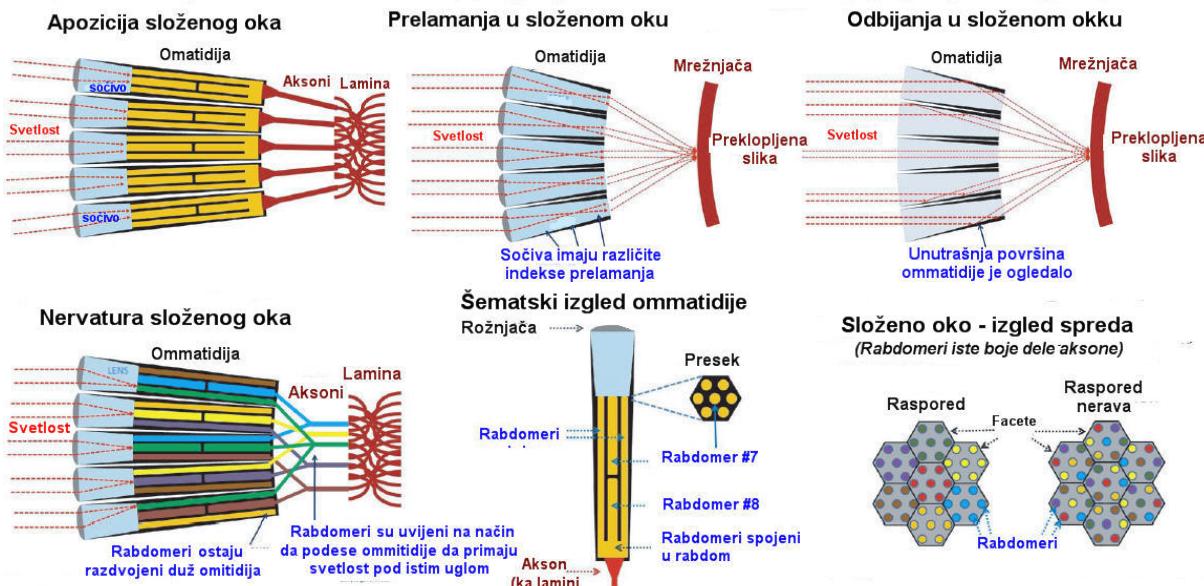
tome, od svih sisara, samo primati mogu da vide boje onakve kakve ih vide ljudi. Bikovi, na primer, ne mogu; oni ne razlikuju crvenu od plave boje.

Uobičajeno je da su ljudi **trihromatični**: imaju tri tipa čepića koji primaju crvenu, zelenu i plavu boju. Međutim, oko 1% žena je (nekako) **tetrahromatičan**. Ovo je moguće stoga što ljudi mogu da imaju dva različita crvena pigmenta. Crveni pigment je kodiran u X hromozomu. Dakle, kod nekih žena postoje dva koda X hromozoma za dva različita crvena pigmenta. Kod jednog dela ovih žena oba pigmenta mogu da se nađu u čepićima njihovih očiju. Ove žene izgleda da imaju nešta kao RRGB (crveno, crveno – zeleno, plavo) oči. Ispitivanja pokazuju da one mogu da razlikuju više crvenih senki no što to mogu muškarci i većina drugih žena. (Ref. 138).

Svaki stručnjak za kretanje treba takođe da zna da najveća osetljivost ljudskih očiju ne odgovara najsjajnijem delu sunčeve svetlosti. (Ref. 139). Ovaj mit je bio raširen po svetu kroz brojne udžbenike koji su kopirani jedni iz drugih. U zavisnosti od toga da li je korišćena učestanost ili talasna dužina ili logaritam talasne dužine, vršnih vrednosti na 500 nm, 880 nm ili 720 nm. Ljudsko oko je osetljivo na spektar, što je potpuno suprotno osetljivosti ptica ili žaba, zbog toga što se koriste drugačije hemikalije za detekciju. Ukratko, ljudsko oko jedino može da se razume ako se pažljivo analizira njegova posebna istorija razvoja.

Oči-kamere nalaze se kod svih kičmenjaka. Sisari imaju slične oči ljudskim očima, sa promenljivim sočivom; nasuprot tome, zmije imaju oči sa krutim sočivima koja se pomeraju u odnosu na mrežnjaču kako bi se slika postavila u žiju. Oči-kamere razvijale su se nezavisno više puta kod drugih grupa životinja. Najpoznatiji iz ove grupe životinja su glavonošci, kao što su hobotnice, koje zaista imaju najveće poznate oči, do 30 cm u prečniku.

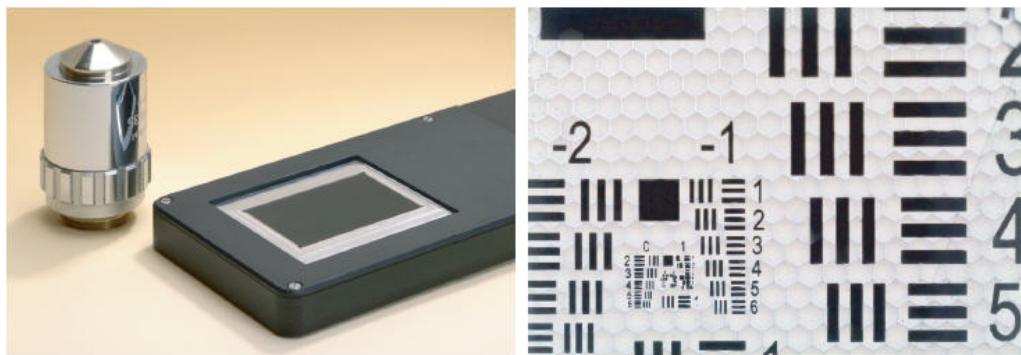
Uzgred, sistem ljudsko oko – mozak obrađuje boje uglavnom u okolini pravca gledanja. To omogućava zabavni trik: ako sistem posmatranja sledi pravac vašeg pogleda, on može da upravlja ekranom računara da bi prikazao boje samo u oblasti koju gledate, a da ostatak slike bude crno-beli. Ukoliko bi naredba bila dovoljno brza, dobili biste utisak da je cela slika u boji, dok bi svaki posmatrač sa strane primećivao da je slika uglavnom crno-bela, a da se boje pojavljuju samo u jednoj tački koja se neprestano kreće po ekranu.



Slika 136 Složene oči: apozicija složenog oka nađenog kod pčele i vilinog konjica, prelamanje u složenom oku moljca, odbijanje u složenom oku jastoga (nije prikazano parabolično dodatno oko kod nekih rakova) i nervatura složenog oka kućne muve. (© Watcher, preuzeto sa veb strane watchingtheworldwakeup.blogspot.com)

Većina očiju u prirodi nisu kamera-oči, već **složene oči**, kakve se nalaze na pčelama, vilinim konjicima i kućnim muvama. Složene oči imaju po jedno sočivo za svaki akson. Ove jedinice su obično šetougaone u obliku koji se naziva **ommatidija** i obično sadrže pregršt fotoreceptora koji su spojeni za odlazne aksone. Ommatidija je maleno oko; u zavisnosti od vrste, složene oči sastoje se od najmanje sto a najviše 30.000 ommatidija (kod nekih vilinskih konjicima). Većina složenih očiju je takođe červoro - ili petohromatska. Složene oči imaju malu rezoluciju – postoji sumnja da nijedan insekt ne vidi zvezde – ali takve oči imaju brojne prednosti. Složenim očima nije potreban mehanizam izoštravanja, mogu da pokriju veće vidno polje, a pre svega, one su posebno brze. Ove prednosti su toliko interesantne da su u upotrebi elektronske

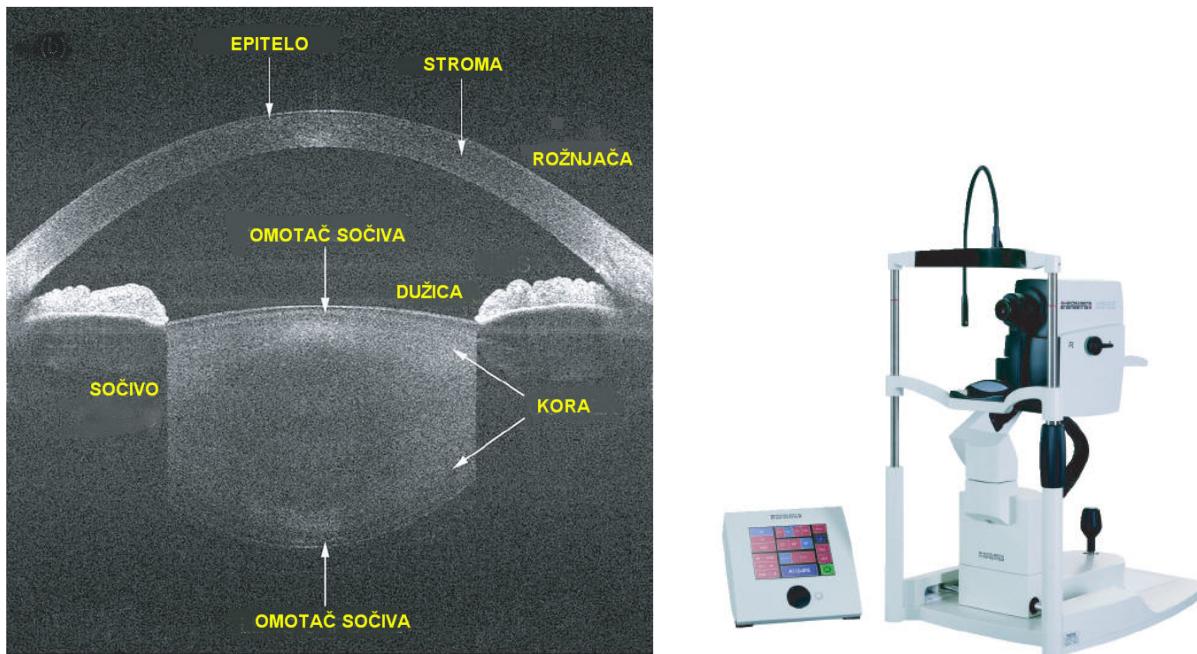
kamere sa optikom složenih očiju, kao alternativa uobičajenim kamerama sa jednim sočivom i jednim senzorom.



Slika 137 Ravan mikroskop na principu složenih nizova mikrosočiva – ispred uobičajenog objektiva – i slika koju on daje (©Frank Wippermann)

Korišćenje ideje od očiju insekata interesantno je i za druge primene. Na primer, savremena tehnologija predviđa mogućnost da se ponovo razmisli kako bi trebalo da izgleda mikroskop. **Slika 137** prikazuje mikroskop koji je ustvari niz hiljada malih mihroskopa. Sočiva stvaraju sliku na CMOS čipu za snimanje od 16 miliona tačaka slike. (**Ref. 140**).

Ukratko, mikroskopske strukture unutar oka su važne i zaprepašćujuće. Ali tu se srećemo sa pitanjem;



Slika 138 Levo: snimak prednje strane ljudskog oka dobijen optičkom koherentnom tomografijom, prikazuje rožnjaču, zenicu i sočivo. Desno: tipičan aparat koji koriste oftalmolozi (preuzeto sa veb strane www.zmpbmt.meduniwien.ac.at) (© Heiderberg Engineering)

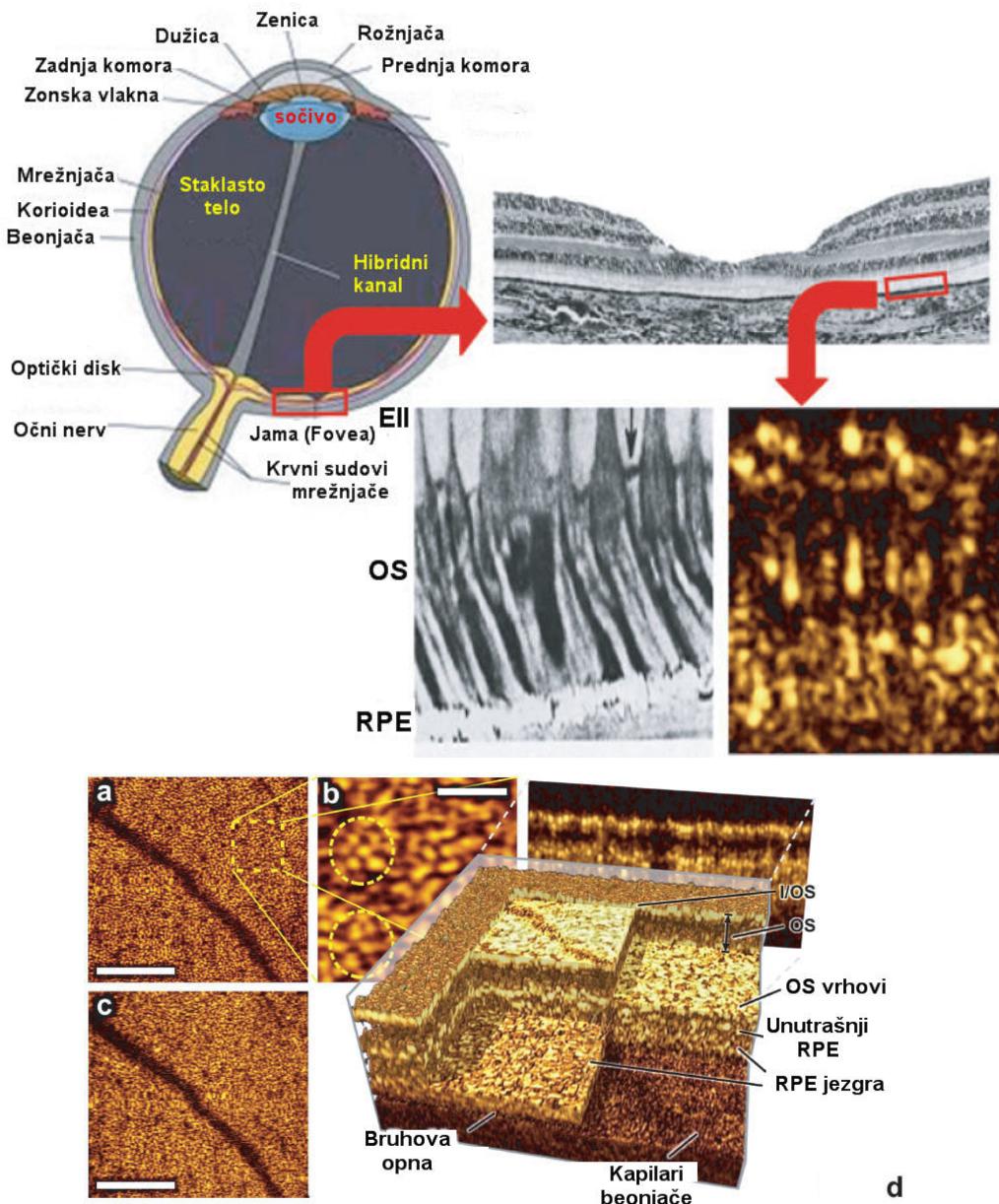
KAKO MOŽEMO DA NAPRAVIMO SLIKU UNUTRAŠNOSTI OKA

Kada gledamo kroz mali otvor prema svetloj površini, možemo da vidimo krvne sudove u našem oku. Naročito možemo da vidimo da centralna jama (fovea) uopšte nema krvnih sudova. Ali kako možemo da posmatramo mikroskopski sastav oka kod drugih osoba?

Snimanje detalja u unutrašnjosti živog oka nije lako. Mrežnjača je udaljena od površine oka, tako da se ne može koristiti normalan mikroskop. Osim toga, neprestano kretanje sočiva i samog oka ometa svaki sistem snimanja. Konačno su dva odvojena otkrića promenila situaciju 1990-ih godina.

Prvi prodor u snimanje oka bila je tehnika koju smo pomenuli (**strana 137**), **tehnika optičke koherentne tomografije** (OCT – Optical Coherence Tomography). Ova metoda snimanja koristi skenirani zrak lasera male snage i omogućava snimanje sredine koja rasipa do dubine od nekoliko milimetara uz rezoluciju reda

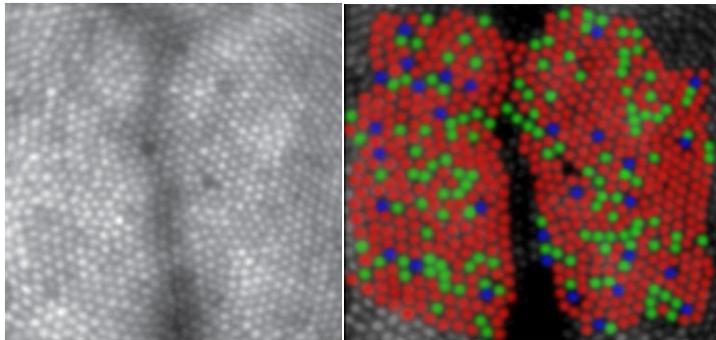
nekoliko μm . Ova mikroskopska tehnika, razvijena 1990-ih godina, omogućava detaljno posmatranje mrežnjače ljudskog oka i oblasti ispod nje; ona takođe dopušta snimanje preseka rožnjače i sočiva. Kroz detaljan snimak koji daje za nekoliko milisekundi, prikazan na *slici 138*, optička koherentna tomografija omogućava izuzetno precizne dijagnoze; Ona je temeljno izmenila savremenu oftalmologiju. Začuđujući snimci grupe istraživača optičke koherentne tomografije na Univerzitetu u Beču prikazani su na *slici 139*.



Slika 139 Slike žive ljudske mrežnjače snimljene adaptivnom optičkom koherentnom tomografijom. Gore: Presek ljudskog oka uključujući posebnu oblast mrežnjače, jame (fovea) u dnu oka, histologija tog područja koja pokazuje spoljni segment OS (Outer Segment) ćelija prijemnika svetlosti, povećanu sliku histologije OS; uživo ćelijska rezolucija OCT živih ćelija prijemnika svetlosti; Ell prikazuje elipsoidnost prijemnika svetlosti; RPE je epitel pigmenta mrežnjače (Retinal Pigment Epithelium). Dole: OCT tomogram unutarnjeg/spoljnog spoja ljudskih prijemnika svetlosti (a), njihov spoljni segment (c) sa povećanim vidnim poljem (b). Svetle tačke u krugovima prikazuju pojedine ćelije prijemnike svetlosti. Prikaz (d) sa različitim dubinama otkriva unutrašnju mikrostrukturu unutar mrežnjače pri rezoluciju reda ćelije (© preuzeto sa veb strane zmpbmt.meduniwien.ac.at/)

Optička koherentna tomografija takođe omogućava snimanje kože do dubine od oko 8 mm; što je već popravilo dijagnosticiranje kancera kože. U budućnosti će ova tehnika snimanja pojednostaviti davanje dijagnoze ginekolozima i specijalistima za uho, grlo i nos. Sistemi endoskopije takođe su unapravljeni. Optička koherenta tomografija postala je standard takođe u raznim industrijskim primenama.

Drugi prodor u snimanje oka bila je tehnika **adaptivne optike**; tehnika koja se takođe koristi i u astronomiji, koja neprestano i brzo menja oblik sočiva za snimanje. Najlepši snimak do sada je onaj žive ljudske mrežnjače, kao što je onaj na *slici 140*, načinila je grupa pod rukovodstvom Dejvida Vilijamsa (David Williams) i Ostin Rurda (Austin Roorda) na Univerzitetu u Ročesteru u Njujorku, koristeći ovu savremenu tehniku. (*Ref. 141*). Oni su koristili adaptivnu optiku u cilju da suzbiju promenu oblika sočiva oka pacijenta.



Slika 140 Levo: kvalitetna fotografija žive ljudske mrežnjače načinjena adaptivnom optikom; desno: ista slika sa prekopljenim izmerenim prikazom osetljivosti svake ćelije čepića. (© Austin Roorda)

Ljudsko oko proizvodi osećaj boja tako što uprosečava intenzitet koji dolazi na na čepiće osetljive na crvenu, plavu i zelenu boju. To objašnjava mogućnost pomenutu u predhodnom tekstu, da se postiže isti osećaj za boje, to jest, žutu, ili čisto žutog zraka lasera, ili pogodnom mešavinom crvene i zelene svetlosti. (*Strana 96*).

Ali ako je svetlost usmerena samo na jedan čepić, oko pravi grešku. Korišćenjem adaptivne optike moguće je da se usmeri zrak crvenog lasera takav da pogaća samo čepić osetljiv na zelenu boju. U tom slučaju događa se nešta čudno: premda je svetlost **crvena**, oko vidi **zelenu** boju!

Uzgred, *slika 140* je prava zagonetka. U ljudskom oku, kao i u očima svih kičmenjaka, krvni sudovi su postavljeni *ispred* čepića. Zbog čega se ne pojavljuju na slici? I zbog čega nas ne ometaju u svakodnevnom životu? (*Izazov 184s*). (Slika ne prikazuje drugi tip ćelija osetljivih na svetlost, štapiće, pošto je predmet bio na dnevnom svetlu; štapići dolaze ispred mrežnjače samo u mraku i tada stvaraju crno-belu sliku.) (*Ref. 142*).

Ukratko, evolucija nas je snabdela sistemom za gledanje koji ima neverovatne osobine. Vodite računa o svojim očima.

KAKO DA DOKAŽETE DA STE SVETAC

Odbijanje i prelamanje svetlosti odgovorni su za više upečatljivih efekata. Izvoran indijski simbol za svetu osobu, a koji se se u današnje vreme koristi u celom svetu, je **oreol**, poznat takođe i pod imenom **halo** ili **Heiligschein** krug svetlosti koji okružuje glavu. Veoma lako možete da ga vidite i oko sopstvene glave. Potrebno je samo da ustanete rano izjutra i da pogledate na vlažnu travu dok ste leđima okrenuti suncu. Videćete oreol oko senke vaše glave. Efekt nastaje usled jutarnje rose na travi, koja odbija svetlost nazad pretežno u smeru izvora svetlosti, kao što je prikazano na *slici 141*. Zabavno je ako to učinite u grupi, vi ćete da vidite oreol samo oko vaše glave. (*Ref. 143*)



Slika 141 Putanja svetlosti od rose na travi odgovorna je za oreol ili Heiligschein, a fotografija pokazuje da se on vidi samo oko vaše glave. (© Bernt Rostad)

Retroreflektivne slike deluju na isti način: one sadrže male staklene lopte koje imaju ulogu rose. Velika površina retroreflektivne slike, saobraćajni znak, na primer, može takođe da prikaže vaš oreol samo ako je izvor svetlosti dovoljno daleko. ([Ref. 144](#)). Takođe takozvani “slaj” očiju mačke u noći nastaje usled istog efekta; on je vidljiv samo ako gledate u mačku sa izvorom svetlosti iza vas. Uzgred rečeno da li “mačje oči” (u saobraćaju) deluju kao oči mačke. ([Izazov 185s](#)).

PRIKAZIVANJE SLIKA

Sistemi koji prikazuju sliku važni su u tehničkim uređajima, a u manjem stepenu u prirodi. U prirodi su ovi prikazi dve vrste: prvi tip koriste lignje koje žive u plitkoj vodi; one su sposobne da naprave pokretne oblike u boji na svojoj koži, a te oblike koriste da bi zbulile žrtvu. Druga vrsta sreće se u dubokim morima, gde ne postoji osvetljenje u okruženju: tamo većina živih bića proizvodi prikaz pokretnog svetla da bi privukle žrtvu ili da zbune grabljivca.

Ukratko, slike mogu da se prave promenom boja na površini – pasivan prikaz – ili emitovanjem svetlosti. Isto tako sistemi koje je napravio čovek mogu da se podele na ove dve vrste, U ovom trenutku najrašireniji pasivni ekrani su sa sa tečnim kristalima – ili LCD (Liquid Crystal Display) – i ekrani sa elektronskim mastilom. Ovi prvi koriste se u digitalnim časovnicima i mobilnim telefonima, a drugi u elektronskim knjigama.

Najopštiji ekrani sa emitovanjem svetlosti su zastarele katodne cevi, plazma ekrani, diode koje emituju svetlost i ekrani projektorata. Ovi ekrani se koriste uglavnom u uređajima za zabavu.

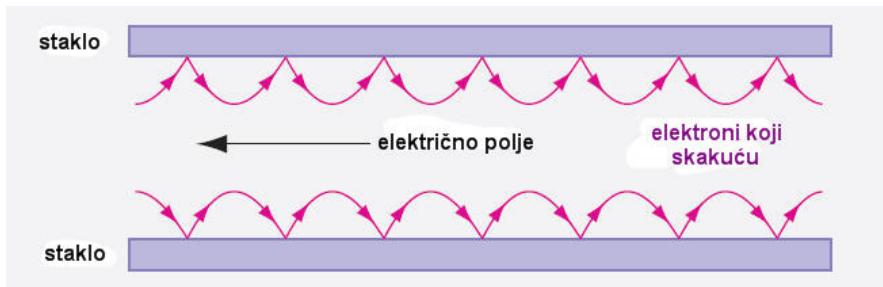


Slika 142 Katodna cev kod starijih TV aparata: prvi način – danas odbačen – da se proizvedu slike promenljivih boja korišćenjem elektronskog signala. TV cevi emituju elektronski zrak, skreću ga i proizvode svetlost elektroluminiscencijom na ekranu u boji prekrivenog uzorkovanim fosforom.

ELEKTRONI KOJI SKAKUĆU I NAJVEĆE RAZOČARANJE TV INDUSTRIJE

Dobro je poznato da kada se električno polje u vakuumu usmeri duž staklene površine, elektroni mogu da skakuću duž površine stakla. Uopšteni efekt je prikazan na [slici 143](#); ovaj efekt obično nije dobrodošao. Između ostalog, ovaj efekt je odgovoran za varničenja u sistemima vakuma koji sadrže visok napon. Da bi se ovaj efekt izbegao, stakleni izolatori za vodove visokih napona imaju složene oblike.

Kada se ovaj efekt prouči detaljnije, pokazuje se da razumno niska električna polja mogu biti dovoljna da stvore znatne struje preskoka u praznim staklenim cevima sa unutrašnjim prečnikom oko milimetra. Mala električna polja takođe mogu da vode elektrione na skretanjima i oko uglova. Osim toga, mogu da se konstruišu prekidači koji menjaju smer skakutanja. Ukratko, efekt skakutanja mogao bi da se koristi za izradu izuzetno jeftinih TV ekrana sa slikom visokog kvaliteta. Ideja je da se postavi niz izvora elektrona – u suštini oštrih metalnih šiljaka – na početak više bliskih staklenih kanala. Svaki kanal bi prenosio emitovane elektrone duž linije ekrana. Korišćenjem pogodnih prekidača na svakoj svetlosnoj tački, elektroni bi pogadali fosforecentne emitere boje. ([Ref. 145](#)). Ovo su iste slikovne tačke koje su se koristile u uobičajenim – glomaznim i teškim – TV cevima i koji se koriste u ravnim plazma ekranim. Pošto efekt skakutanja radi takođe oko skretanja i oko uglova, i pošto je za njega potrebno samo staklo i malo metala, ceo sistem bi mogao da se izradi izuzetno tanak i male težine; štaviše naprava je jeftina, dobitak je visok, a troškovi proizvodnje mali. Već u toku ranih 1990-ih godina laboratorijski uzorci ekrana sa elektronima koji skakuću bili su začuđujuće dobri; mali ekrani su bili sjajni, oštре slike i jeftiniji od plazma ekrana. Pojava povoljnijih TV prijemnika sa ravnim ekransom bila je na horizontu.



Slika 143 Slobodni elektroni mogu da skaču duž staklenog zida

Onda je došlo razočaranje. Vreme trajanja ovakvih ekrana bilo je reda samo nekoliko stotina sati. Ograničenje je nastalo zbog neophodnosti da se helijum koristi unutar ekrana, a koji nije mogao duže vreme da se drži u vakuumskom sistemu. Uprkos najvećim istraživanjima materijala, pokazalo se da je nemoguće postizanje dužeg vremena trajanja. Uprkos svim izvanrednim osobinama, uprkos ogromnim ulaganjima u tehnologiju, uprkos najboljim istraživačima materijala koji su radili na razvoju, ekrani sa elektronima koji skakuću nisu se probili na tržište. Nikada nije prodat nijedan jedini ekran.

IZAZOVI I ZABAVNE ZANIMLJIVOSTI O SLIKAMA I OKU

Senzor za sliku ne iziskuje sočiva. Hramska zmija (ili Vaglerova otrovna zmija) ima dva infracrvena senzora – jedan je prikazan na *slici 144* – uz rezoluciju od 40 puta 40 slikevenih tačaka svaki i ima samo otvor umesto sočiva. Ova zmija koristi te senzore da hvata miševe čak i u mraku. Funkcionisanje ovih infracrvenih senzora istraživale su i simulirale mnoge grupe istraživača. Sada je poznato kako ovi senzori dobijaju podatke, kako mozak zmije pretvara njih u slike i kako se postiže visoka rezolucija. (*Ref. 146*)

* * *

Najjednostavniji sistem snimanja su naočari. Dete koje ima neodgovarajuće naočare propušta važno iskustvo: gledanje zvezda. Takvo dete neće da razume čuvenu izreku Imanuela Kanta: "Dve stvari ispunjavaju mi um uvek sa novim i rastućim divljenjem i strahopoštovanjem, što češće i istrajnije mislim i razmišljam o njima: zvezdano nebi iznad mene i moralni zakoni u meni." Uvek proveravajte da li deca vide zvezde. Dva sočiva od po 40 centi svako, dovoljni su da promene život deteta ili odraslog. Pogledajte veb stranu www.onedollarglasses.org za uspešan način da se to učini širom sveta.

* * *

Kako oči popravljaju grešku slikovne tačke (fotoreceptora)? Koliko je loših slikovnih tačaka u tipičnom oku? (*Izazov 186ny*)

* * *

Infracrvena svetlost može da se vidi ako ima dovoljnju jačinu. (Nikada ne isprobavajte to sami!) Ljudi koji su posmatrali takav izvor svetlosti – poluprovodnički laser, na primer – vide to kao belu tačku sa nekim crvenim obimom. U drugim slučajima, moguće je takođe da se vide kratki infracrveni impulsi preko dvostrukе apsorpcije fotona u mrežnjači; na taj način, infracrvena svetlost od 1000 nm uzrokuje zelene bleskove u oku.

* * *

Među kičmenjacima najveće oko ima plavi kit; prečnik njegovog oka je 150 mm. (Samo lignje imaju veće oči.) Najmanje oko kod kičmenjaka izgleda da je ono kod mladog malog kameleona, *Brookesia micra*, čija je glava kao polovina glave šibice i čije je oko prečnika 0,3 mm.

Oči su predivan organ. Da naučite više o njima, pročitajte divnu knjigu od Sajmona Ajgna *Oko – prirodna istorija*, Bloomsbery, 2007.

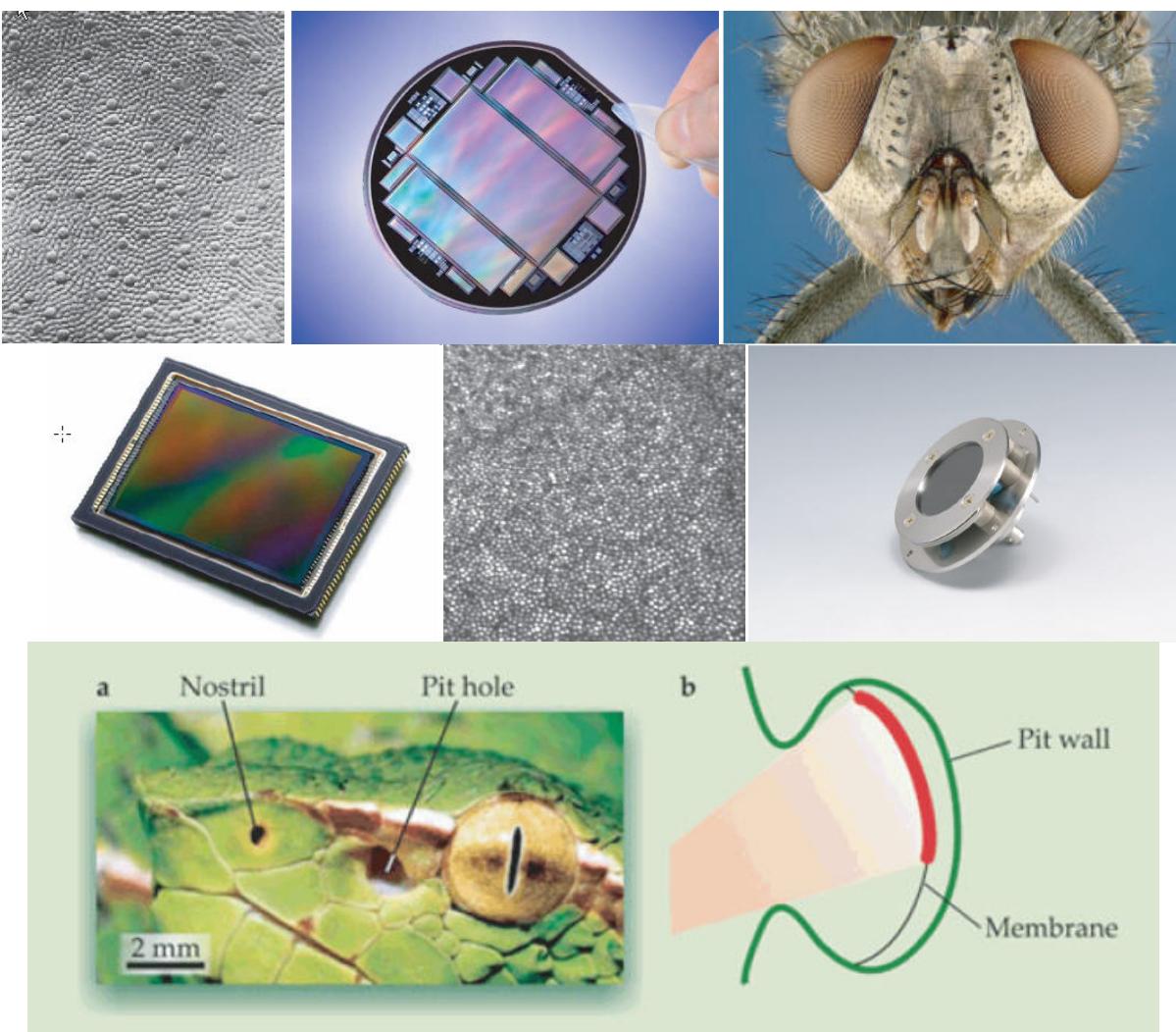
* * *

U mnogim primenama važno je da se izbegne odbijanje svetlosti. Protivrefleksni slojevi koriste se na staklima prozora prodavnica i na sistemima sočiva koji treba da rade u uslovima zatamnjivanja kada je svetlost oskudna. Isto tako živa bića imaju protivrefleksne slojeve; poznato je da su oči moljaca crne čak pri jasnoj dnevnoj svetlosti, pošto one ne odbijaju svetlost. Razne kompanije pokušavaju da naprave taj takozvani **efekt očiju moljca** za komercijalne primene.

* * *

Savremena tehnologija dopušta da se mikroskopi naprave po niskoj ceni. Za zadivljujući primer pogledajte mikroskop cene od 1 euro koji može da se preklopi jednim listom papira, pojačan nekim dodatim

uređajima i prikazan na *slici 145*. (*Ref. 147*) Uredaj se koristi tako što se drži ispred očiju ili drži ispred svetiljke, a posmatra projektovana slika na zaslonu.



Slika 144 Zbirka senzora za slike – prema tome sistema slikovnih tačaka: mrežnjača mačke, CCD senzor još uvek na podlozi, oči kućne muve, CMOS senzor, mrežnjača ljudi, višekanalna ploča i infracrvena rupica hramske zmije (©Wikimedia, Austin Roorda, Hamamatsu Photonics, Guido Westhoff/Leo van Hemmen)

* * *

Ako je na raspolaganju dovoljan broj snimaka, moguće je da se identificuje kamera kojom je one snimane. Svaka kamera ima poseban uzorak šuma; ako se izdvoje preko pametnog nalaženja proseka, softver računara kojim su obrađivani snimci u mogućnosti je da pomogne policiji u istrazi.

* * *

Fatamorgana često ima iznenađujuće efekte. Godine 1597., grupa mornara ostala je na ostrvu Novaja Zemla tokom zime. (*Ref. 148*). Na dan 26 januara oni su spazili Sunce – otprilike dve sedmice pre no što bi trebalo da bude vidljivo. Takav neuobičajen efekt se sada naziva efekt Novaja Zemla.

* * *

Da li je moguće izmeriti debeljinu vlasa kose pomoću laserskog pokazivača? Kako? (*Izazov 187s*).

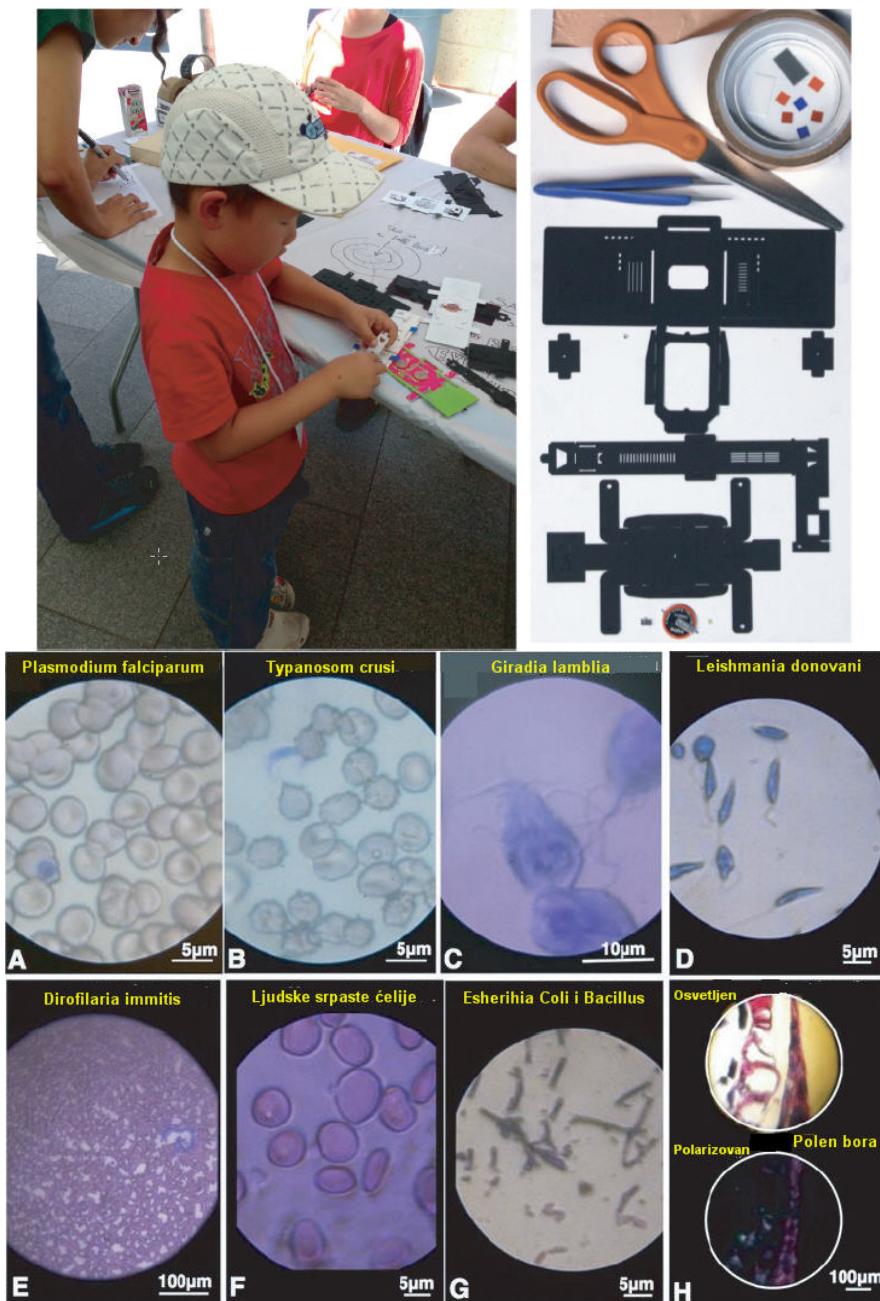
* * *

Savremene tehnike snimanja omogućavaju visoku osjetljivost i veliku prostornu rezoluciju. Kao što prikazuje *slika 146*, upotrebom Frenelovog sočiva, rashlađenog CCD senzora i lasera kao izvora svetlosti. moguće je čak da se fotografise senka jednog jona koji pluta. (*Ref. 149*)

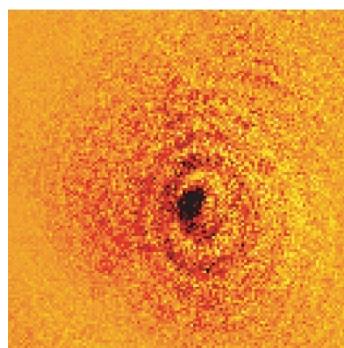
* * *

Važan uređaj u medicini je endoskop. Endoskop, prikazan na *slici 147*, omogućava posmatranje telesnih šupljina kroz vrlo male otvore. To je metalna cev, obično prečnika oko 5 mm i dužine oko 300 mm. Kako biste vi napravili jedan? (*Izazov 188e*). (Uredaj mora da bude otporan na najmanje 150 ciklusa dezinfekcije

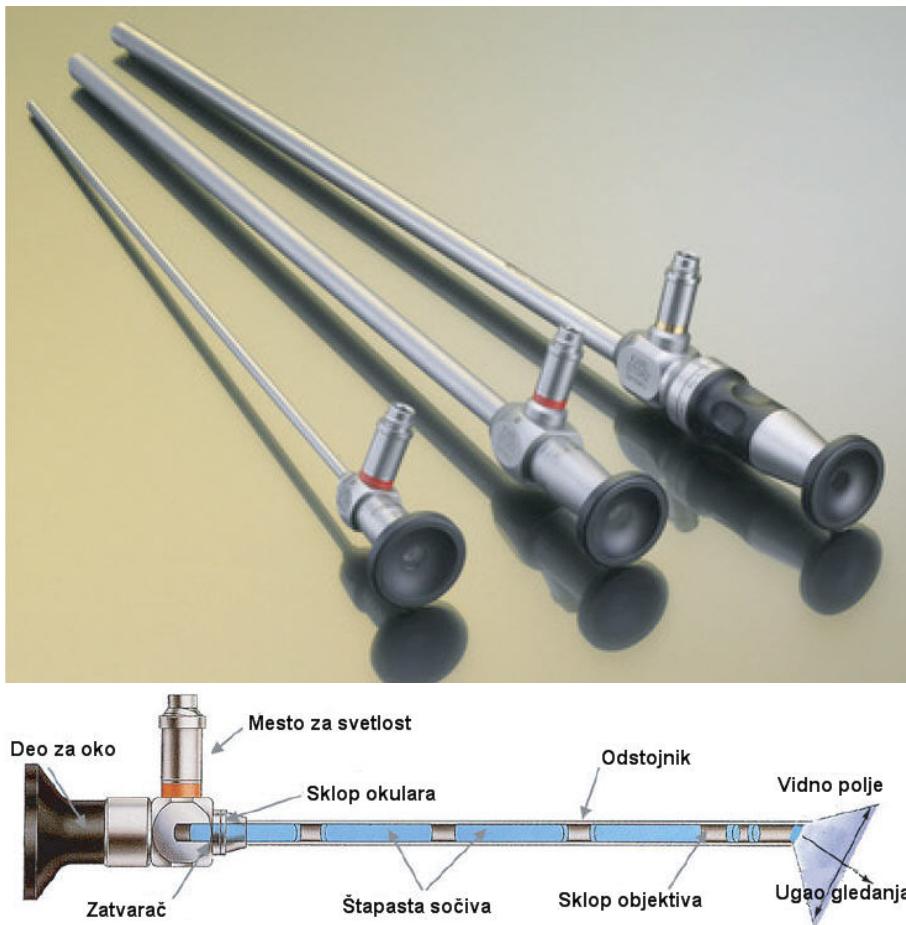
u autoklavu; svaki ciklus se sastoji od stajanja na 134° C i 3 bara u trajanju od 3 sata.) Izrađen od niza pažljivo izrađenih cilindričnih sočiva, endoskop omogućava hirurzima da posmatraju unutrašnjost ljudskog tela kroz mali otvor, čime se izbegavaju dugački rezovi i opasne operacije. Endoskopi su spasli mnoge živote, a njihova proizvodnja i razvoj uposlili su veliku industriju.



Slika 145 Gore: izrada i delovi ravnog mikroskopa za medicinske svrhe u zemljama u razvoju izrađenog od lista papira; dole: Slike dobijene pomoću njega (© Foldscope na www.foldscope.com)



Slika 146 Senka usamljenog jona iterbijuma koji lebdi u klopcu za jone i osvetljenog laserom; veličina slike je oko 16 µm u obe dimenzije (© Dave Kielpinski)



Slika 147 Endoskop, izum Hopkina, u kojem štapasta sočiva omogućavaju veliko vidno polje i veliku osvetljenost – koji su utoliko veći što je veći odnos staklo/vazduh (© Karl Storz)

* * *

Sunce se može videti golim okom samo do udaljenosti od 50 svetlosnih godina. Da li je to tačno? (**Izazov 189s**).

* * *

Trava je obično zelenija sa jedne strane ograde. (**Ref. 150**). Možete li da date objašnjenje za ovaj iskaz zasnovan na posmatranjima? (**Izazov 190s**).

* * *

Kaže se da astronomi imaju toliko jake teleskope da mogu da vide da li je neko telo na Mesecu upalilo šibicu. Može li to da bude tačno? (**Izazov 191s**).

* * *

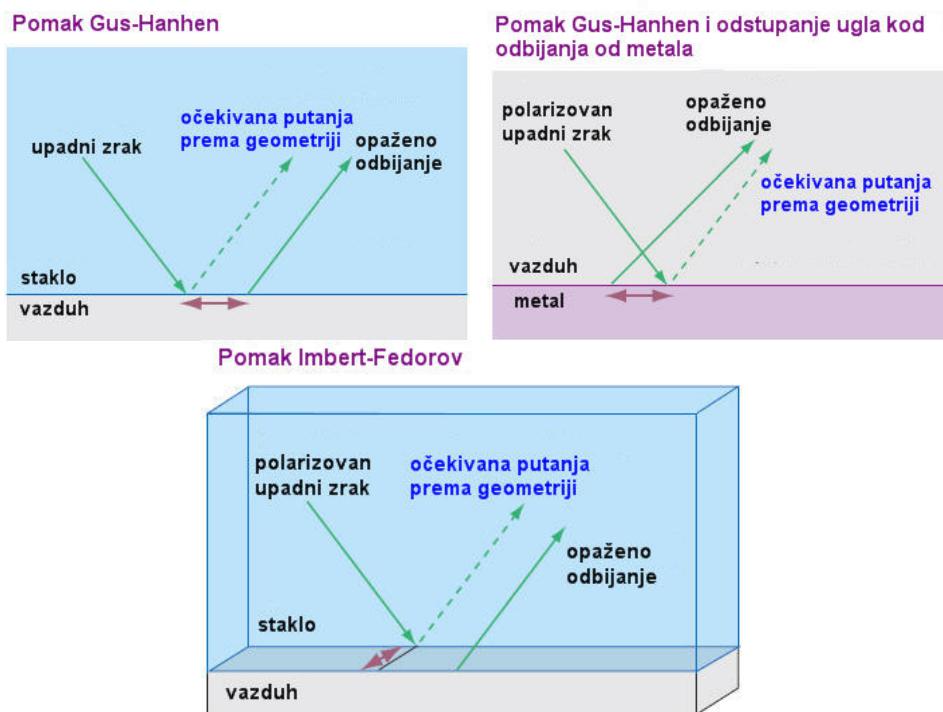
Totalno odbijanje svetlosti je interesantna pojava sama po sebi; ali njegovi detalji još zanimljiviji. Godine 1943. Fric Gus (Fritz Goos) i Hilda Hanhen (Hilda Hänchen) pokazali su da je odbijeni zrak neznatno pomaknut; drugim rečima, odbijeni zrak je efektivno odbijen sa ravni koja leži neznatno *iza* materijalnog pristupa. Ovaj takozvani **Gus-Hanhen pomak** može da bude velik kao nekoliko talasnih dužina, a nastaje usled nepostojanih talasa u ređoj sredini. Ustvari, skorija istraživanja ove teme otkrila su nešto još interesantnije. (**Ref. 151**). Kada se odbijanje istraži uz veliku preciznost, otkriva se da nijedan odbijeni zrak nije tačno na mestu na kojem se očekuje: postoji takođe i **bočni pomak**, pomak **Imbert-Fedorov**, pa čak i ugao odbijene svetlosti može da odstupa od očekivanog. Začuđujući detalji zavise od polarizacije zraka, od neslaganja zraka i od osobina materijala na sloju odbijanja. Ova posmatranja mogu da se sagledaju kao efekti višeg reda u kvantnoj teoriji polja; njihovi detalji još su uvek tema istraživanja.

* * *

Materijali koji jako upijaju, takođe jako emituju. Zbog čega onda vrata sa crnim premazom postanu na suncu toplija od vrata sa belim premazom? Razlog je što se emitovanje događa na mnogo manjim talasnim dužinama nego one za vidljivu svetlost; u svakodnevnim situacijama i temperaturama emisija je oko 10

um. A na toj talsnoj dužini skoro svi premazi su efektivno crni, uz emitivnost reda 0,9, bez obzira na njihovu boju. Iz istog raloga, kada budete bojili radijator kod kuće, boja nije važna.

* * *



Slika 148 Pomak Gus-Hanhen i druga odstupanja od očekivane geometrije odbijanja: u totalnom odbijanju odbijeni zrak je neznatno pomeren od položaja gde se očekuje; kod odbijanja od metala zapaženo je i više odstupanja.

* * *

Kada se dva zraka lasera presecaju pod malim uglom, oni mogu da naprave svetlosne impulse koji izgledaju da su brži od svetlosti. ([Ref. 152](#)). Da li je to u suprotnosti sa specijalnom teorijom relativnosti? ([Izazov 192s](#)).

* * *

Slepilo za boje otkrio je veliki naučnik Džon Dalton (John Dalton, 1766. Eaglesfield – 1844. Manchester) na sebi. Možete li da zamislite kako je to pronašao? ([Izazov 193s](#)). To pogoda jednog od 20 muškaraca u svim njegovim oblicima. U mnogim jezicima, čovek koji je slep za boje, naziva se daltonista. Žene skoro nikada nisu daltonisti ili slepe za boje, pošto je ta osobina povezana sa X hromozomom. ([Ref. 153](#)). Ako ste i vi slepi za boje možete da proverite kome tipu pripadate uz pomoć [slike 149](#). (X-hromozom je takođe uzrok retkih četvorohromatskih žena koje smo ranije pomenuli) ([Strana 143](#)).

* * *

Veštačko slepilo za boje je izazvano kod nekih vrsti svetlosti. Na primer, ljubičasta svetlost koristi se za smanjenje intravenozne upotrebe droga, pošto ljubičasta svetlost ne dopušta da se nađe vena pod kožom.

Veštačko povećavanje kontrasta pomoću svetlosti je takođe korisno. Ružičasta svetlost koristi se za naglašavanje nedostataka, tako da koža može da se očisti što je moguće bolje. Godine 2007. policajac Majk Pauvis iz Notingema otkrio je da ova "svetlost za akne" može da se iskoristi za smanjenje stope kriminala; pošto akne nisu u modi, ružičasta svetlost odvraća omladinu od okupljanja u grupe, pa se toga smiruje okruženje gde je ona postavljena.

Žučasta svetlost se koristi u supermarketima da poveća prodaju voća i povrća. Na žutoj svetlosti paradajz izgleda crveniji, a salata izgleda zelenija. Proverite sami: nećete naći nijedan supermarket bez takvog osvetljenja postavljenog iznad voća i povrća ([Izazov 194e](#)).

* * *

Zraci svetlosti, kao što su oni koje emituje laser, obično se zamišljaju kao tanke linije. Međutim, zraci svetlosti mogu biti i *cevi*, sa jačinom svetlosti manjom u centru nego u omotaču. Cevasti zraci lasera, to jest, Beselovi zraci višeg reda, koriste se u savremenim eksperimentalnim istraživanjima za vođenje kanala plazme i varnica.



Slika 149 Kako se prirodne boje (prva levo) menaju kod tri tipa slepila za boje (s leva udesno): deutan, protan i tritan (© Michael Douma)

* * *

Da li je moguće posmatranje zvezda sa dna duboke jame ili iz bunara, čak i tokom dana, kako se obično tvrdi? (*Izazov 195s*).

* * *

Ljudi su jedini primati koji imaju **bele** oči. (*Ref. 154*) Svi majmuni imaju **smeđe** oči, tako da je nemoguće da se vidi u koju stranu gledaju. Majmuni koriste izuzetno ovu nemogućnost: oni često okrenu glavu u jednom pravcu, praveći se da negde gledaju, ali oči okrenu u drugu stranu. Drugim rečima, smeđe oči su korisne za prevaru. Isti efekt postižu ljudi kada nose naočare za sunce. Tako ako vidite nekog sa sunčanim naočarima u situaciji gde nema sunčeva svetlosti, žnaćete da se on ili ona ponašaju kao majmun.

Majmuni koriste ovu prevaru za flert sa suprotnim polom, a da to ne primeti njihov stalni partner. Naočare za sunce su alat za nevernost.

* * *

Kako možete da izmerite snagu Sunca zatvorenih očiju? (*Izazov 196s*).

* * *

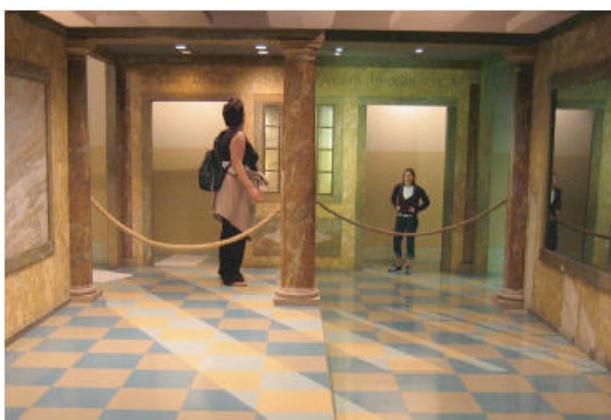
Čak ni u mraku, u noći bez mesečine i zvezda, šuma nije mračna. Možete videti luminiscentne gljive (kojih je preko 70 različitih vrsta), luminiscentnu plesan, možete videti varnice dok svlačite pulover, ili kada vam prijatelj ponudi mentol bombonu, ili kada razmotavate lepljivu traku, ili otvarate pismo.

* * *

Kako možete da proizvedete X-zrake pomoću rolne lepljive trake? (*Izazov 197d*).

* * *

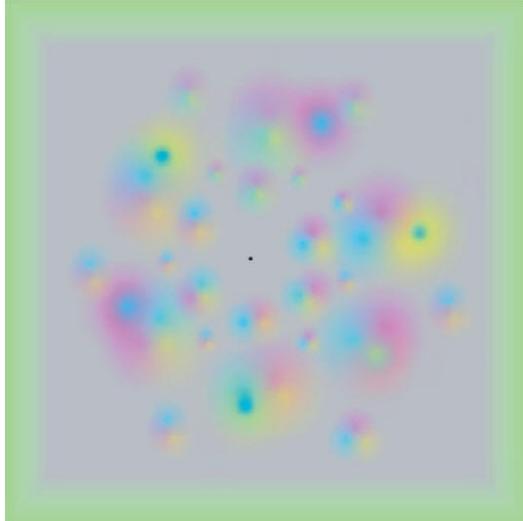
Broj optičkih iluzija je ogroman, a postoje i mnoge veb strane za traćenje vremena posvećene ovoj temi. U filmovima često se koriste takozvani efekti **Ejmsove sobe** za pretvaranje glumaca u patuljke. To je prikazano na *slici 150*.



Slika 150 Ejmijeva soba u Parizu i San Francisku (© Sergio Davini, David Darling)

* * *

Mozak je važan u mnogim vidovima posmatranja. Događa se da mozak, zajedno sa okom, učini da boje nestanu, kao što je prikazano na *slici 151*, (Ovaj efekt postoji jedino u verziji slike u boji.) Primer je uzet iz lepe zbirke iluzija vida www.psy.ritsumei.ac.jp/~akitaoka/color9e.html. Nekoliko sličnih iluzija zasnovanih na ovoj, koriste pokretne tačke u boji.

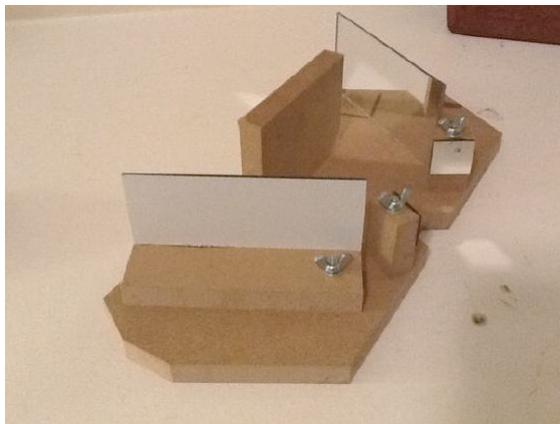


Slika 151 Ako budete gledali tačku u centru dvadeset sekundi boje će nestati (© Kitaoka Akiyoshi)

Isto tako, za nekoliko minuta, mozak može da popravi **deformacije** u vidnom polju, kao što su one koje, na primer, uzrokuju naočare. Još impresivnija je sposobnost mozga da ispravi **ciklotorziju**; ciklotorzija je obrtanje očiju duž ose napred-nazad; kada ležemo ovo obrtanje ima vrednost između 2 i 14 stepeni, u poređenju sa orientacijom dok stojimo. Vrednost ugla zavisi od godima i stresa; ona okreće svako oko u suprotnom smeru.

* * *

Ako želite da doživite kakav je mozak u suštini za stereo efekte, napravite i potom gledajte kroz takozvani pseudoskop. Tu se koriste 4 ogledala ili dve prizme kako bi se razdvojile slike za levo i desno oko. Primer je prikazan na [slici 152](#). Videćete izdubljene stvari kao ispuščene, a vaš osećaj za dubinu postaće potpuno pogrešan. ([Izazov 198e](#)) Uživajte.



Slika 152 Gledanje kroz pseudoskop menja naš osećaj dubine (© Joshua Foer)

* * *

Još začuđujući su uređaji koji okreću naglavačke sve što posmatrate. Oni mogu da se naprave pomoću ogledala ili sa dve Dove prizme. Interesantno je da posle nekog vremena nošenja ovih uređaja, mozak će obrnuti sliku nazad u ispravan položaj.

* * *

Snimanje X-zracima je toliko impresivno da je postalo vrsta umetnosti. Jedan od najistaknutijih umetnika sa X-zracima je Nik Visej (Nick Veasey), a dva njegova rada su prikazana na [slici 152](#). Među mnogim primerima on je sa X-zracima načinio slike celih autobusa i aviona.

* * *

Sočiva su bitni sastavni deo u većini optičkih sistema. Približno su rastojanje f žiže sočiva, rastojanje o objekta koji se snima i rastojanje i njegove slike povezani u **jednakost tankog sočiva**

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{o} + \frac{1}{i} \quad (81)$$

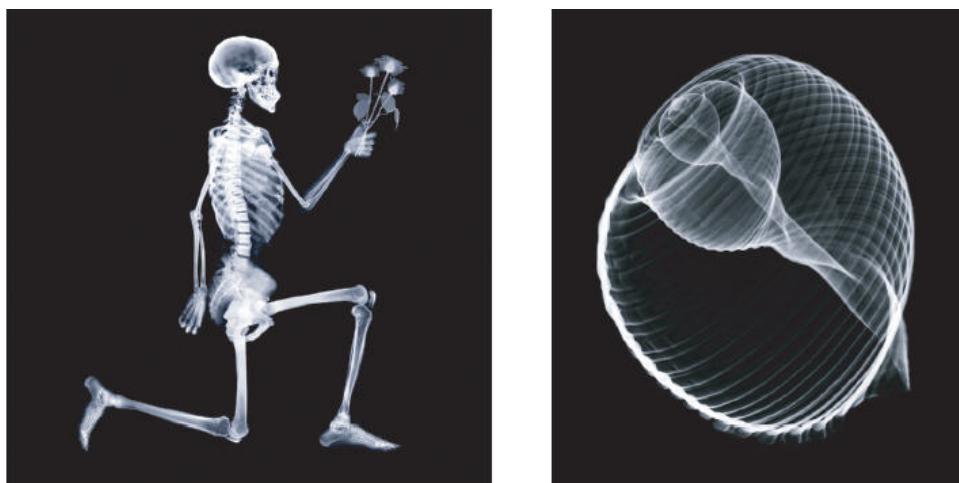
Nije teško da se izvede uz pomoć praćenja putanja zraka. ([Izazov 199e](#)).

Ako ikada budete u situaciji da projektujete sočivo, želećete da znate odnos između oblika sočiva i njegove žižne dužine. Pokazalo se da postoje dve vrste sočiva. Prva vrsta su **sferična** sočiva koja su jednostavna i stoga jeftine izrade, ali njihove slike nisu idealne. Druga vrsta sočiva su **asferična** sočiva, koja su teška za izradu, mnogo skuplja, ali daju mnogo bolji kvalitet slike. Optički sistemi visokog kvaliteta uvek koriste asferična sočiva.

Iz istorijskih razloga, većina knjiga iz optike uči čitaoce približnom odnosu između geometrijskih poluprečnika R_1 i R_2 tankog sferičnog sočiva, njegovog indeksa prelamanja n i njegove žižne daline f : (**Izazov 200e**)

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (82)$$

Ovo je takozvana **formula izrade sočiva**. Većina asferičnih sočiva su približno sferična, tako da ovaj obrazac pomaže kao gruba procena i takvom slučaju.



Slika 153 Lepota X-zraka: Slika osobe (snimljeno sa lešom) i morske školjke (© Nick Veasey)

* * *

Snimanje je bitan deo savremene industrije. Bez laserskih štampača, aparata za fotokopiranje, CD plejera, DVD plejera, mikroskopa, digitalnih fotografiskih kamera, filma i video kamera, litografskih mašina za izradu integralnih kola, teleskopa, projektoru za film, naš život bi bio još dosadniji. U današnje vreme, optički sistemi se projektuju uz pomoć posebnih softverskih paketa. Oni omogućavaju da se uz veliku preciznost proračuna kvalitet slike, temperaturni efekti i mehaničke tolerancije. Uprkos lepoti projektovanja optike, postoji širom sveta nedostatak stručnjaka u ovoj zadivljujućoj oblasti. (**Ref. 109**).

* * *

Posebne vrste video kamere još uvek su u razvoju. Primer su kamere vreme-preleta, kamere sa laserskim skeniranjem, ultraljubičaste video kamere, video kamere koje mere polarizaciju i infracrvene kamere. Ove poslednje kamere ubrzano će da se pojave u automobilima radi prepoznavanja ljudi i životinja preko zračenja topote koje emituju, tako da se izbegnu nezgode.

* * *

Kakva je najbolja slika u boji koja danas može da se snimi. U današnje vreme dostupan kvalitet slike na papiru iznosi oko 400 tačaka/mm, ili jedna tačka na $2\mu\text{m}$. Koliko je teoretski maksimum? (**Izazov 201e**). Naći ćete mnogo neozbiljnih istraživačkih grupa koje tvrde da su napravile sliku u boji uz rezoluciju koja je veća od teoretskog maksimuma.

* * *

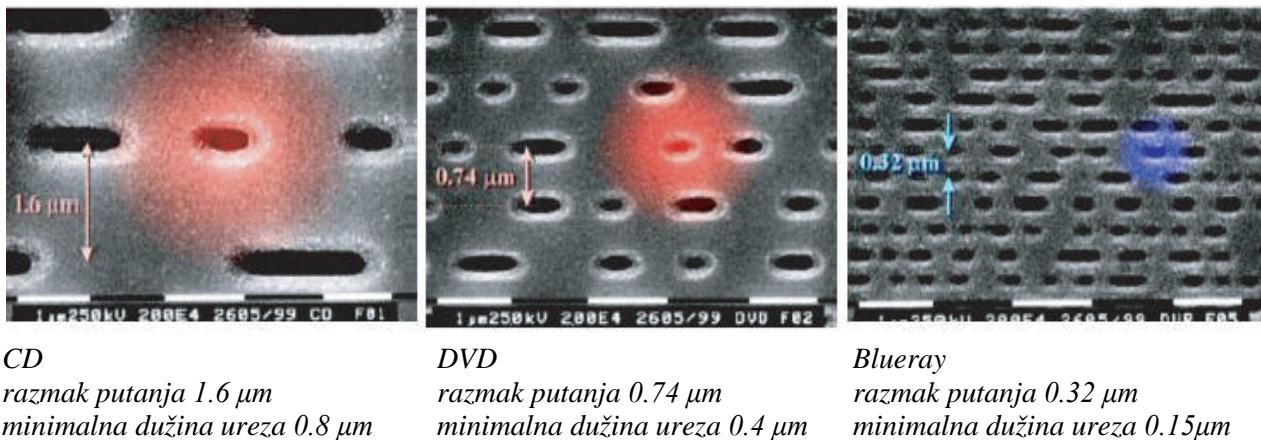
Ultrazvuk se redovno koristi za primenu u medicini. Kao što smo u predhodnom tekstu pomenuli (**Vol. I, strana 228**), nažalost on nije bezbedan za snimanja u trudnoći. Da li je snimanje ultrazvukom, ili nije način snimanja optikom, vrsta tomografije? (**Izazov 202e**).

* * *

CMOS kamere, baterije i radio predajnici postali su tako mali da mogu da se upgrade u paket veličine tablete. Takva kamera može da se proguta, i uz elektrode priključene na stomak osobe može da se snimi film trakta varenja dok osoba obavlja svakodnevne poslove.

* * *

Najčešće sretani optički sistemi su oni koji se nalaze unutar CD i DVD pogona. Ako ikada budete imali mogućnost da jednog rastavite, učinite to. To je zadirajući komad tehnologije u kojem je svaki kubni milimetar unapredovalo stotine inženjera. Možete li da predpostavite kako rade CD i DVD plejeri, počev od fotografija na **slici 154**?



Slika 154 Složena slika tragova i laserske tačke u čitaču CD, DVD i Blueray diska (© Wikimedia)

* * *

Najskuplji optički sistemi nisu oni koji se nalaze na špijunskim satelitima – koji mogu iz svemira da pročitaju naslove i novinama – već se nalaze na steperima. Steperi su mašine koje se koriste za proizvodnju elektronskih integrisanih kola. U takvim steperima snimljena je metalna maska, upotreboom svetla iz ultraljubičastog lasera na 193 nm, na fotootpornu silicijumom prevučenu oblandu. Optički sistem koji se koristi veličine je prosečnog čoveka, uz preciznost od nekoliko nanometara i košta više od šeststotina eura po komadu. Objektivi za izuzetnu ultraljubičastu svetlost bili bi najmanje deset puta skuplji.

* * *

Možete da napravite providno prozorsko okno koje može preklapanjem električnog prekidača da se menja u poluprovidno i nazad – prema tome od providnog stakla u mlečno staklo i nazad. Kako to radi? (**Izazov 203e**).



Slika 155 Jedan od mnogih vidova Benemovog točka. Ako ga obrćete na CD plejeri ili bušilici, najjednostavniji je način da se proizvede Fehnerove (Fechner) boje, to jest lažne boje koje se pojavljuju od crno-belih uzoraka koji se brzo menjaju.

* * *

Točak koji se obrće, obojen prema posebnom crno-belom uzorku, **Benemov** (Benham) **točak** proizvodi u oku efekt lažne boje. Nažalost, video ovog efekta ne radi u pdf. datatekama, kakva je ova u ovoj knjigi; umesto toga pogledajte veb stranu lite.bu.edu/vision/applets/Color/Benham/Benham.html Keneta Brehera ili edu/vision-flash10/applets/Color/Benham/Benham.html. Lažne boje mogu da se proizvedu takođe treperenjem jednobojne slike na ekranu računara. Sve ove lažve boje nastaju uglavnom usled drugačijih vremena odziva crvenih, zelenih i plavih štapića.

* * *

Veličina oka kod sisara zavisi od njihove maksimalne brzine. Ova zavisnost je proverena za 50 različitih vrsta. (**Ref. 155**). Interesantno je da ovaj odnos ne zavisi od brzine leta ptica.

* * *

Deca koja plivaju mnogo ispod vode mogu da nauče da vide oštro za oko 10 seansi – za razliku od odraslih. Deca iz plemena Moken u Tajlandu proučavana su u pogledu ove spretnosti. Proučavanja su potvrdila da sva deca imaju ovu sposobnost, ali da većina dece ne provodi dovoljno vremena u moru.

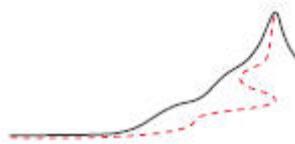
* * *

Da li ste ikada zapazili senku na ogledalu ili na površini mirne vode? Zašto niste? (**Izazov 204e**).

ZAKLJUČAK O PRIMENJENOJ OPTICI

Umetnost i nauka o pravljenju slika centralne su teme savremene zdravstvene zaštite, industrije, nauke, zabave i telekomunikacija. Dobijanje slika je veliki deo rezultata savijanja svetlosti na predhodno određen način, a zatim njenog opažanja. Sistemi dobijanja slike, biološki ili oni koje su načinili ljudi, zasnovani su na odbijanju, prelamanju ili difrakciji svetlosti, u kombinaciji sa detektorom slikovnih tačaka. Svi sistemi snimanja koji daju ili prikazuju slike visokog kvaliteta – biooški ili oni koje su načinili ljudi – koriste pametne kombinacije materijalne nauke, senzore, pokretače i obrade signala. Ovo zadivljujuće polje još uvek se ubrzano razvija.





Poglavlje 5

ELEKTROMAGNETNI EFEKTI

Ako se pažljivo pogleda, atmosfera je puna električnih efekata. Najupečatljivije je su munje, koje su sada, razumljivo, dobro shvaćene. (Ref. 156). Međutim, bile su potrebne decenije i veliki broj istraživanja da bi se otkrili i složili svi delovi ove slagalice. Isto tako i ispod naših nogu postoji nešta važno što se događa: vrela magma ispod kontinentalne kore stvara magnetno polje Zemlje i ostalih planeta. Jaka magnetna polja su zanimljiva iz trećeg razloga: ona se mogu iskoristiti za levitaciju. Mi ćemo prvo istražiti ove tri teme, a potom dati pregled mnogih efekata koje elektromagnetno polje stvara i zaključiti sa nekim zanimljivostima i izazovima u vezi električnog naboja.

DA LI JE MUNJA PRAŽNJENJE – ELEKTRICITET U ATMOSFERI

Unutar olujnih oblaka, posebno unutar *kumulonimbus* oblaka,¹ naelektrisanja su razdvojena između velikih kristala leda (“krupa”) koji padaju usled sopstvene težine i malih kristala leda (“grad”) koji se penju usled uzlaznih strujanja. (Ref. 158). Pošto sudari učestvuju u stvaranju električnog polja, naelektrisanja su razdvojena na način sličan mehanizmu u Kelvinovom generatoru (strana 20). Pražnjenje se događa kada električno polje postane previsoko, i uzima čudan pravac na koji utiču joni koje su u vazduhu načinili kosmički zraci. Postoji međutim najmanje još deset drugačijih konkurentskih objašnjenja za razdvajanje naelektrisanja u oblacima.) (Ref. 159). Izgleda da su kosmički zraci barem malo odgovorni za cik-cak oblik munje. Za primer udara groma pogledajte sliku 156.



Slika 156 Retka fotografija udara groma u drvo (© Niklas Montonen)

¹ Oblaci imaju latinske nazive. Njih je uveo 1802. godine Luk Hauard (Luke Howard, 1772. London – 1864. Tottenham), koji je primetio da se svi oblaci mogu posmatrati kao varijacije tri tipa, koje nazvao *cirus*, *kumulus* i *stratus*. On je nazvao kombinaciju sva tri tipa, kišni oblak, *nimbus* (od latinskog “veliki oblak”) (Ref. 157). Današnji međunarodno usvojen sistem malo je doteran i oblake razlikuje po visini njihove donje ivice. Oblaci počevši odozgo na visini od 6 km su cirusi, cirokumulusi i cirostratusi; oni koji počinju na visini od 2 do 4 km su altokumulusi, altostratusi i nimbostratusi; oblaci koji počinju ispod visine od 2 i 4 km su altokumulusi, stratusi i kumulusi. Kišni ili olujni oblak, koji prolazi sve visine, u današnje vreme se naziva kumulonimbus. Za lepe slike oblaka pogledati veb strane www.goes.noaa.gov i www.osei.noaa.gov.

Blesak munje obično prenosi 20 do 30 C naboja, uz vršnu struju do 20 kA. Ali blesak munje ima isto tako čudna svojstva. Prvo, munja se pojavljuje pri polju od oko 200 kV/m (na manjim visinama) umesto na oko 2 MV/m za običnu varnicu. Drugo, **munja emituje radio impulse**. Treće, munja emitiše X-zrake i gama zrake. Ruski istraživači, počev od 1992. godine naovamo, objasnili su sva tri efekta preko novootkrivenog mehanizma pražnjenja. ([Ref. 160](#)). Pri dužini od 50 m i više, kosmički zraci mogu izazvati pojavu munje; relativistička energija ovih zraka omogućava mehanizam pražnjenja koji ne postoji za elektrone male energije. Relativistička energija, takozvani proboj odbeglih elektrona (runaway breakdown), dovodi do pražnjenja pri mnogo manjim električnim poljima nego što potrebno za uobičajenu varnicu u laboratoriji. Umnožavanje ovih relativističkih elektrona dovodi takođe do zapaženih emisija radio i gama zraka.



Slika 157 Oblaci kumulonimbusi videni sa zemlje i iz svemira (NASA)

Oko 1990-ih. godina postalo je poznato više električnih detalja o olujama. Piloti u vazdušnom saobraćaju i putnici ponekad su videli slabu obojenu svetlost koja se širi od vrha olujnih oblaka. To su različite vrste takvih emisija: plavi **mlazevi** i redi crveni **duhovi** i vilenjaci, koji nekako nastaju usled električnog polja između vrha oblaka i jonosfere. Ovi detalji se još uvek istražuju, a mehanizam nije još uvek jasan.¹

Emisija X-zraka iz munje poznata je od ranih godina dvadesetog veka. ([Ref. 163](#)). Eksperimentalna potvrda ipak nije laka; potrebno je postaviti detektor u blizinu bleska munje. Da bi se to postiglo, munja mora da bude usmerena u datu oblast, gde je postavljen detektor. To je omogućeno korišćenjem rakete koja vuče metalnu žicu, čiji je drugi kraj vezan za zemlju. Ovi eksperimentalni rezultati sada će biti uvršteni u nov opis munje koji takođe objašnjava crveno-plave duhove iznad olujnih oblaka. Osim toga, procesi takođe podrazumevaju da i unutar oblaka elektroni mogu da budu ubrzani do energija od nekoliko MeV. Olujni oblaci su ubrzivači elektrona. ([Ref. 164](#))..

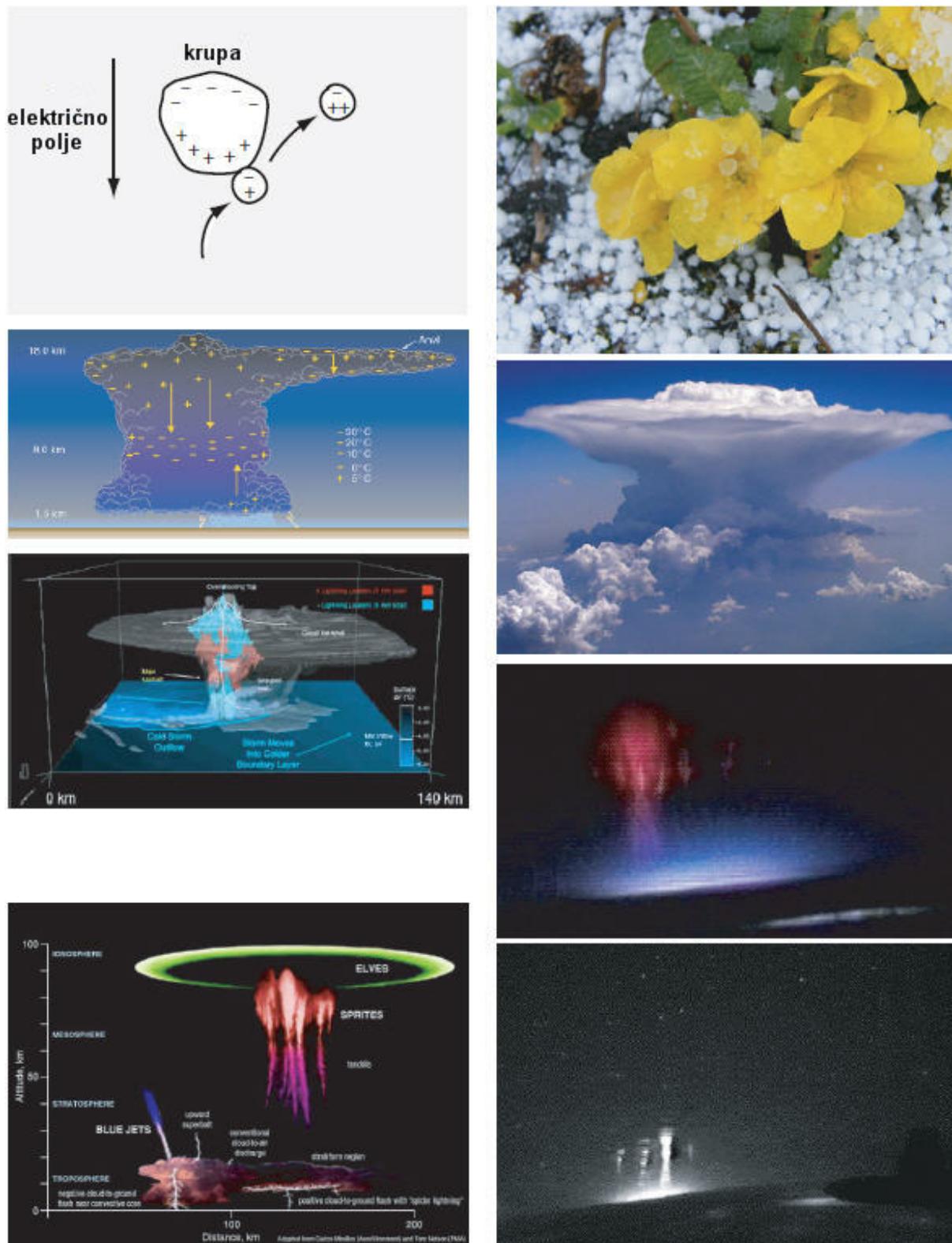
Usput, imate 75% verovatnoće da preživite pošto vas je udario grom, posebno ako ste potpuno mokri, pošto u tom slučaju struja teče uglavnom po spoljašnosti kože. Obično ljudi koji su pogodjeni izgube svu odeću, pošto je iskida voda koja je isparila. Brza reanimacija je suština da se pomogne nekom da se oporavi od udara groma. Ako vas je pogodio grom i preživeli ste idite u bolnicu! Mnogi ljudi su umrli tri dana kasnije jer su propustili da to učine. Udar groma često dovodi do efekta zgrušnjavanja krvi. Ovi ugrušci blokiraju bubrege, pa se može umreti tri dana kasnije zbog otkazivanja bubrega. Jednostavno sredstvo je primena postupka dijalize.

Kao primedba, mogli biste znati kako da izmerite udaljenost udara groma odbrojavanjem sekundi između bleska i grmljavine i množenjem sa brzinom zvuka, 330 m/s; manje je poznato da se isto tako može proceniti dužina strele groma merenjem trajanja grmljavine i množenjem istim činiocem.

Munje su deo električnog kola oko Zemlje. Ovaj zadržavajući deo geofizike odveo bi nas daleko od cilja naše pustolovine. Ali svaki fizičar bi trebalo da zna da postoji vertikano električno polje od između 100 V/m i 300 V/m tokom vedrog dana, kao što je otkriveno 1752. godine. (Možete li da pogodite zbog čega se to ne primećuje u svakodnevnom životu? I zbog čega uprkos toj vrednosti to ne može da se iskoristi za dobijanje velikih količina energije?) ([Izazov 205s](#)). Polje je usmereno od jonosfere pravo ka zemlji; ustvari, Zemlja je neprestano negativno nanelektrisana, a tokom vedrog vremena struja teče naniže (elektroni idu naviše) kroz vedru atmosferu, težeći da **rasterete** planetu. Struja od 1 do 2 kA raširena je oko cele planete; to je omogućeno usled jona koji su obrazovani kosmičkim zračenjem. (Otpornost između zemlje i jonosfere je oko 200Ω , tako da je pad napona oko 200 kV.) U isto vreme, Zemlja se nanelektriše usled raznih uticaja: postoji dinamo efekt usled plima atmosfere i postoje struje koje su indukovane usled magnetosfere. Ali najbitniji efekt nanelektrisanja je munja.

¹ Za slike treba da pogledate interesantne web strane: elf.gi.alaska.edu/, www.fma-research.com/spriteres.htm i pasko.ee.psu.edu/Nature.

Drugim rečima, surotno onome što mnogi misle, gromovi ne rasterećiju zemlju, oni je ustvari nabijaju nanelektrisanjem! (Ref. 161). U stvari, zemlja je nanelektrisana sa oko – 1MC. Možete li to da potvrdite? (Izazov 206s). Naravno, grom isprazni oblak na razliku potencijala zemlje; ali kada to učini, on je poslao u celosti (obično) negativno nanelektrisanje dole na Zemlju. Olujni oblaci su baterije; energija iz baterija nastaje od već pomenutih termičkih strujanja naviše, koja prenose naboj nasuprot ukupnom električnom polju sredine.



Slika 158 Nanelektrisanje i pražnjenje oblaka: najverovatniji mikroskopski mehanizam, naime nanelektrisanje usled sudara čestica krupe sa kristalima leda, raspored nanelektrisanja oblaka, trodimenzionalna struktura i proces velikih razmara otkriven poslednjih dekada iz aviona (© nordique, NASA, NOAA)

Korišćenje nekoliko stanica za električna merenja koje su merile odstupanja električnog polja Zemlje omoguilo je da se odredе mesta na kojima gromovi udaraju u zemlju u datom trenutku. Raspodelom oko sveta postoji oko **sto bleskova munja svake sekunde**. ([Ref. 162](#)). Sadašnja ispitivanja takođe pomažu da se na taj način izmeri aktivnost duhova i vilenjaka koji su u vezi.

Joni u vazduhu imaju ulogu pri nanelektrisanju olujnih oblaka preko nanelektrisanja kristala leda i kišnih kapi. Uopšteno, sve male čestice u vazduhu nabijene su elektricitetom. Kada lete avioni i helikopteri, oni se obično sudsaraju sa više čestica sa jednim nanelektrisanjem no sa drugim. Kao rezultat toga, avioni i helikopteri se tokom leta nanelektrišu. Kada se koristi helikopter za spasavanje ljudi sa splavova na otvorenom moru, uže kojim će se izvući ljudi mora prvo da bude uzemljeno potapanjem u vodu, a ako se to ne učini, ljudi na splavu bi mogli biti ubijeni električnim udarom kada bi dodirnuli uže, kao što se već više puta događalo prošlosti.

Zašto su varnice i munje plave? Pokazalo se da je to osobina materijala: boja dolazi od materijala koja se pobudio energijom pražnjenja, a to je obično vazduh. Ovo pobudivanje nastaje usled temperature unutar kanala tipične munje, koja je 30 kK. U svakodnevnim varnicama temperatura je mnogo niža. U zavisnosti od situacije, boja može da se pojavi od gasa između dve elektrode, kao što su kiseonik ili azot, ili može nastati usled isparavanja materijala iz elektrode pri pražnjenju. Za objašnjenje takvih boja, kao i za objašnjenja svih boja usled materijala, potrebno je da sačekamo sledeći deo našeg hodanja, kvantnu teoriju.

DA LI POSTOJE LOPTASTE MUNJE?

Već stotinama godina ljudi javljaju da su videli takozvanu **loptastu munju**. Viđenja su retka, ali se ponavljaju. Obično se loptasta munja javlja tokom oluje, često pošto je udario običan grom. ([Ref. 165](#)). Uz nekoliko izuzetaka niko takva obaveštenja nije shvatao ozbiljno, pošto nisu postojali ponovljivi podaci.

Kada su postale popularne mikrovalne pećnice, postalo je poznato nekoliko postupaka da se proizvede loptasto pražnjenje. Da biste videli jedno, potrebno je samo da stavite čačkalicu za zube u sveću, da zapalite čačkalicu i da je stavite (bolje neko drugi) u mikrotalasnu pećnicu pri maksimalnoj snazi. Ova naprava će stvoriti lepo loptasto pražnjenje. Međutim, ljudi ne žive u mikrovalnim pećnicama, pa prema tome ovaj mehanizam nije u vezi sa loptastom munjom.

Eksperimentalna situacija kompletno se izmenila u godinama od 1999. do 2001. Tih godina su ruski naučnici Anton Jegorov i Genadij Šabanov otkrili način da proizvedu oblak plazme, ili **plazmoid**, koli lebdi u vazduhu, upotreboom tri glavna sastojka: vode, metala i visokog napona. ([Ref. 166](#)). Ako se visoki napon dovede na elektrode određenog oblika i izrade, koje su potopljene u vodu, oblak plazme, veličine 10 do 20 cm pojaviće se iz vode, lebdati iunad njene površine i nestati posle oko pola sekunde. Dva primera se mogu videti na [slici 159](#). Pojava plazmoidsa koji lebdi još uvek se proučava. Postoje razlike u obliku, boji, veličini i dužini trajanja. Spektar posmatranja i tehnike sigurno e napredovati u godinama koje dolaze.



Slika 159 Oblak plazme koja lebdi stvoren u laboratoriji (© Sergei Emelin and Alexei Pirozerski).

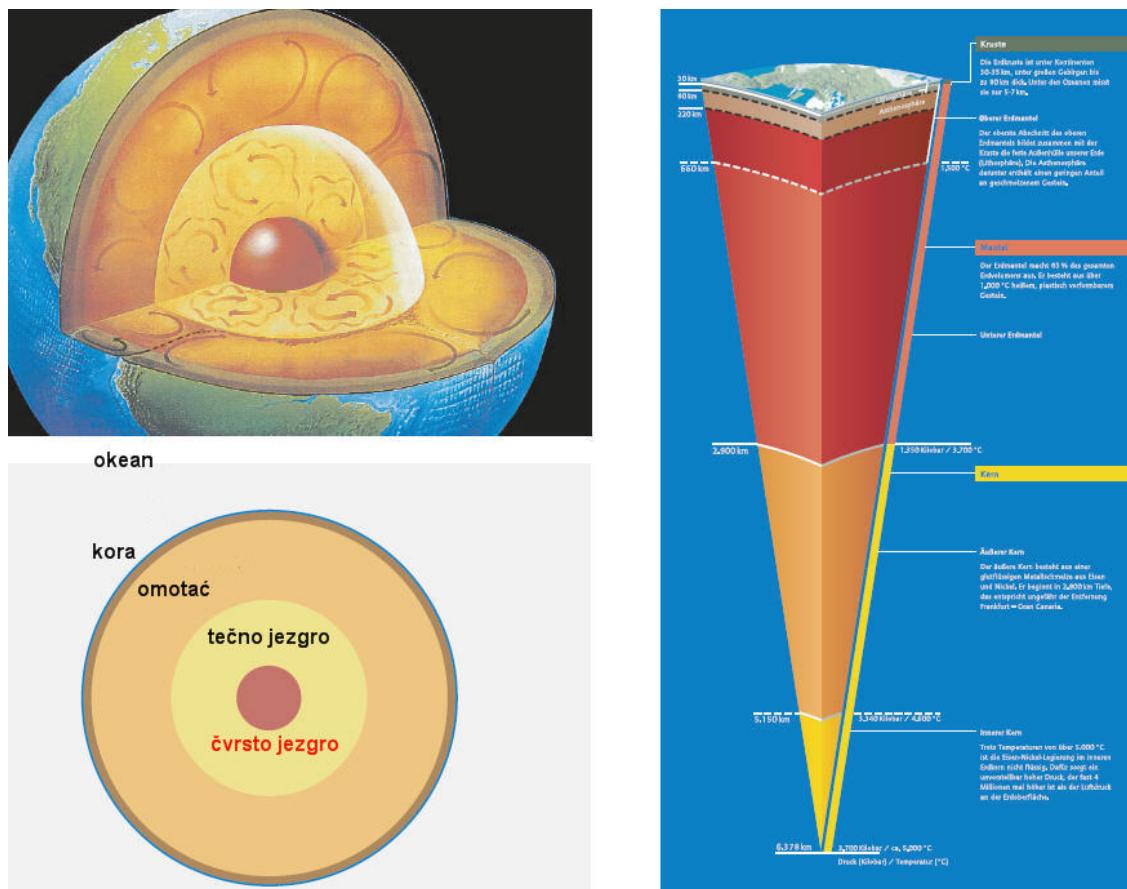
Još začuđujući efekt objavljen je 2007. godine. Tim istraživača iz Brazilia našao je način da napravi pražnjenje veličine loptice za golf koja se izgleda kotrljaja po podu tokom 8 sekunde. ([Ref. 167](#)). Njihov postupak je veličanstveno lep: pomoću izvora napona od 25 V koji je stvarao struju od 140 A kroz luk na površini silicijumske kocke. Oni su otkrili da se male čestice silicijuma odvajaju i odaze, pri čemu su okružene svetlećim sjajem. Ovi svetleći oblaci su mogli da lutaju po stolu ili podu laboratorije, sve dok se ne ugase.

Izgleda da bi ove pojave mogle da objasne brojna opažanja loptastih munja. Ali isto tako je moguće da će se u budućnosti otkriti u prirodi i dodatne pojave.

PLANETARNA MAGNETNA POLJA

Klasičan opis elektrodinamike dosledan je i kompletan; pa ipak, postoje mnogi predmati za ispitivanje. Začuđujući primer je poreklo magnetnog polja Zemlje, drugih planeta, Sunca i galaksija. Način na koji provodnost fluida unutar planete stvara magnetno polje, u suštini je trodimenzionalan problem, uticaj turbulencije, nelinearnost i haos čine ovo pitanje iznenadjuće kompleksnim.

Detalj stvaranja magnetnog polja Zemlje, obično nazivan geodinamo, počeo je da se pojavljuje u drugoj polovini dvadesetog veka, kada je poznavanje unutrašnjosti Zemlje dostiglo dovoljan nivo. ([Ref. 33](#)) Unutrašnjost Zemlje počinje ispod Zemljine kore. Debljina kora je obično 30 do 40 km (ispod kontinenata), premda je deblja ispod velikih planina, a tanja u blizini vulkana pod okeanima. Kao što je već pomenuto, kora se sastoji od velikih delova, **ploča**, koje plove po magmi i pomeraju se jedna u odnosu na drugu. Unutrašnjost Zemlje je podeljena na omotač – prvih 2900 km od površine – i jezgro. Jezgro se sastoji od tečnog **spoljnog jezgra**, debelog 2210 km, i čvrstog **unutrašnjeg jezgra** poluprečnika 1280 km. (Temperatura jezgra nije pouzdano poznata, veruje se da dostiže 6 ± 1 kK. Možete li da nađete način da je odredite. ([Izazov 207s](#)). Temperatura se čak smanjila za nekoliko stotina stepeni kelvina tokom poslednjih 3000 miliona godina.)



Slika 160 Struktura naše planete (© MPI-Chemie, Mainz/GEO)

Zemljina kora se sastoji uglavnom od gvožđa koji je bio sakupljan od asteroida sa kojima se Zemlja sudarala u svojoj mladosti. Izgleda da tečno stanje i elektricitet kojeg sprovodi spoljne jezgro deluju kao dinamo koji održava magnetno polje. Magnetna energija dolazi od kinetičke energije spoljnog jezgra koje se obrće u odnosu na površinu Zemlje, tečno stanje može da deluje kao dinamo, pošto, osim obrtanja, ono

konvektuje iz dubine unutrašnjosti Zemlje do plićih dubina, pokrenuto temperaturnim gradijentom između unutrašnjeg jezgra i hladnijeg omotača. Velike električne struje teku na komplikovan način kroz ove tečne slojeve, održavane trenjem, te obrazuju električno polje. Zašto ovo polje menja usmerenost u pravilnim vremenskim razmacima od između nekoliko desetina hiljada i nekoliko miliona godina, jedno je od centralnih pitanja. Odgovor je težak; eksperimenti još uvek nisu mogući, 150 godina merenja je kratko vreme kada se uporedi sa poslednom promenom – od pre oko 730.000 godina – a simulacije na računarama izuzetno se primenjuju. Pošto je započeto merenje polja, moment dipola magnetnog polja stalno se smanjuje, trenutno od 5% godišnje, a moment kvadripola stalno se povećava. Možda se krećemo prema iznenadenju.¹ (Uzgred, proučavanje magnetnog polja galaksije još je složenije, i još uvek je u svom detinjstvu).

LEVITACIJA

Videli smo da je moguće pomeriti izvesan objekt a da ga ne dodirnemo, ako koristimo magnetno ili električno polje ili, naravno, gravitaciju. Da li je isto tako moguće, ne dodirujući objekt, da ga držimo u vazduhu? Da li takav tip mirovanja postoji?

Pokazalo se da postoji nekoiko metoda za levitaciju objekta, One su obično podeljene u dve grupe: metode levitacije u kojima se *troši energija* i one gde se *ne troši*. ([Ref. 171](#)). Među metodama koje troše energiju je lebdenje predmeta na mlazu vode ili vazduha, lebdenje objekta pomoću zvučnih talasa, to jest na vrhu sirene, ili preko zraka lasera koji dolazi odozdo, ili lebdenje provodnog materijala, čak i tečnosti, u jakom polju radio učestanosti. Sada je levitacija tečnosti ili čvrstog tela pomoću jakih ultrazvučnih talasa postala popularna u istraživačkim laboratorijama. ([Ref. 172](#)). Sve ove metode daju *stacionarnu* levitaciju. (objekti sa sopstvenim pogonom, kao što su dronovi, ne uračunavaju se u primere levitacije.)

Druga grupa metode levitacije uz utrošak energije je da se oseti način na koji telo pada, a zatim ga ponovo odbaciti naviše na pravi način preko petlje povratne sprege; ova metoda je nestacionarna i običko koristi magnetno polje za državanje objekta da ne padne. Magnetni voz (MAGLEV – Magnetic Levitation) izgradilo ga je u Šangaju nemački konzorcijum, levitira na ovaj način. ([Ref. 173](#)). Kompletan voz, uključujući i putnike, levitira i pokreće se napred koristeći elektromagete. Prema tome, moguće je uz upotrebu magneta da levitira više desetina tona materijala.

Za metode levitacije koje ne troše energiju – sve takve metode su obavezno stacionarne – najpoznatija levitacija može da se nađe proučavanjem Kulonovog zakona ili elektrostatike.

- Nijedan statički raspored električnog polja ne može da levitira *nanelektrisan* objekt u slobodnom prostoru ili u vazduhu.

Isti rezultat važi i za gravitacijsko polje i objekte sa *masom*:²

- Nijedan statički raspored masa ne može da levitira objekt sa *masom*.

Drugim rečima, ne možemo da stvorimo lokalni minimum potencijalne energije i sredini kutije koristeći električna ili gravitacijska polja. Ova nemogućnost se naziva *Ernšova* (Thomas Earnshaw) teorema. ([Ref. 174](#)). Matematički govoreći, rešenje Laplasove jednakosti $\Delta\varphi = 0$, takozvana *harmonična funkcija*, ima minimum i maksimum samo na granici, a nikada unutar oblasti definisanja. (Ovo možete da proverite sami u [Vol. I, strana 140](#).) Ernšova teorema može takođe da se dokaže obzirom na minimum potencijala u slobodnom prostoru, Gausova teorema za loptu oko tog minimuma zahteva da je izvor polja prisutan unutra, što je u suprotnosti sa početnom predpostavkom.

Možemo zaključiti da je isto tako nemoguće da se koristi električno polje da bi električki *neutralno* telo levitiralo u vazduhu: potencijalna energija U takvog tela, zapremine V i dielektrične konstante ϵ , u okruženju sa dielektričnom konstantom ϵ_0 , data je kao

$$\frac{U}{V} = -\frac{1}{2}(\epsilon - \epsilon_0)E^2 \quad (83)$$

¹ Godine 2005. objavljeno je da se unutrašnje jezgro Zemlje izgleda obrće brže od zemljine kore za do pola stepena godišnje. ([Ref. 170](#))

² Na razočaranje mnogih zavisnika od naučne fantastike, ovo bi bilo tačno čak i kada bi postojale negativne mase. Iako gravitacija nije nastala usled polja, već od zakrivljenosti prostor-vremena, rezultat još uvek ostaje u oblasti opšte teorije relativnosti. ([Vol. I, strana 86](#)).

Pošto električno polje E nikada nema maksimum u odsustvu prostornog električnog naboja, i pošto je za sve materijale $\varepsilon > \varepsilon_0$, ne može da postoji minimum potencijalne energije za neutralno telo u slobodnom prostoru.¹ (*Izazov 208ny*)

Da zaključimo, korišćenjem **statičkog električnog polja** ili **statičkog gravitacijskog polja** nije moguće sprečiti da telo padne; ovaj osnovni rezultat ne mogu promeniti niti kvantna mehanika, koja uključuje fenomen kao što je antimaterija, niti opšta teorija relativnosti koja uključuje fenomen kao što je crna rupa.

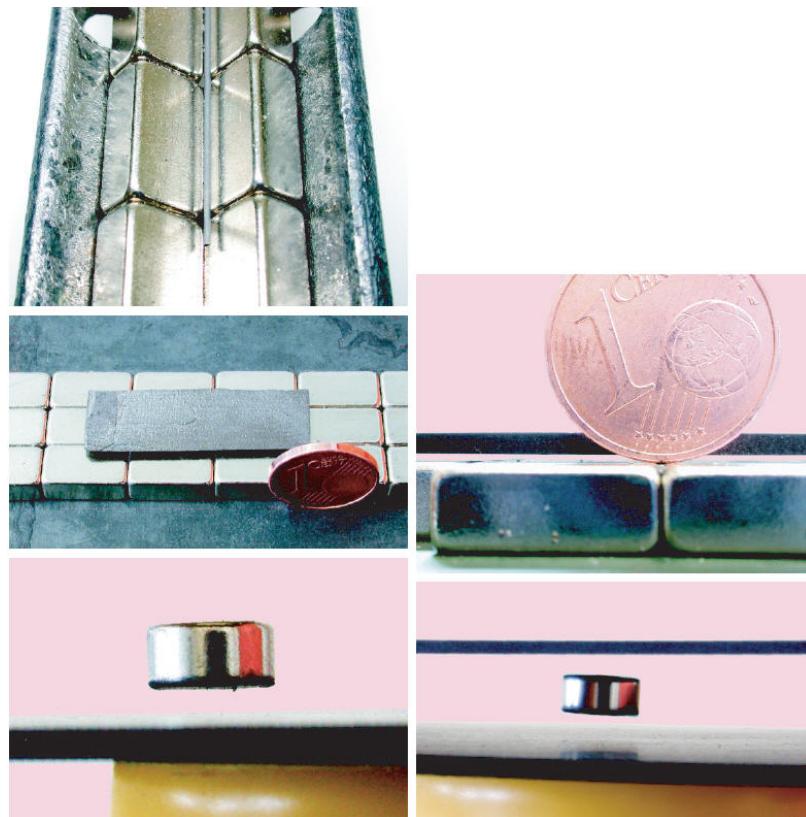
Za statička magnetna polja razmatranje je analogno onom za električna polja: potencijalna energija U tela zapremine V koje se može namagnetiti i magnetne propustljivosti μ , u okruženju čija je magetna propusljivost μ_0 i ne sadrži struju, data je kao (*Izazov 210ny*)

$$\frac{U}{V} = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{\mu} - \frac{1}{\mu_0} \right) B^2 \quad (84)$$

Zbog nejednakosti $\Delta B^2 \geq 0$ za magnetno polje, izolovan maksimum statičkog magnetnog polja B nije mogić, već samo izolovan minimum. Prema tome, nije moguće levitiranje paramagnetenog ($\mu > \mu_0$) ili feromagnetenog ($\mu \gg \mu_0$) materijala kao što je čelik, uključujući i šipkaste magnete, koji se svi privlače, a ne odbijaju se pri maksimalnom magnetnom polju. (*Izazov 211e*).

Moguća su dva načina da se ostvari magnetna levitacija: **levitacija dijamagneta** ili korišćenje **promenljivog magnetnog polja** zavisnog od vremena.

Dijamagnetični materijali ($\mu < \mu_0$ ili $\mu/\mu_0 < 1$) bili su otkriveni ubrzano posle objavljanja Ernšooove teoreme, i omogućili da se ona zaobiđe. (*Strana 35*). Zaista, dijamagnetični materijali, kao što su grafit ili voda, mogu da levitiraju u statičkim magnetnim poljima ako se koristi kombinacija koja sadrži dijamagnete. (*Ref. 177*). Nekoliko slučajeva, koji jednostavno mogu da se ponove na kuhinjskom stolu, prikazani su na *slici 161*.



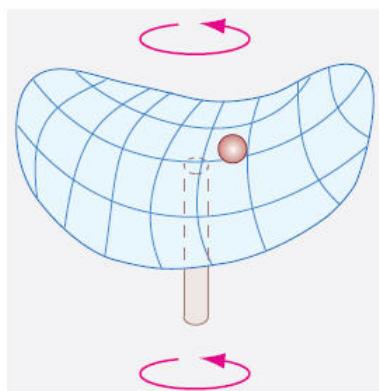
Slika 161 Stabilna magnetna levitacija grafitne šipke iznad pravougaonih stalnih magneta (gore) i od dve grafitne pločice, jedne viđene odozgo i druge viđene sa strane (u centru); dole, levitacija stajnog magneta od NdFeB iznad grafitne pločice i ispod dve grafitne pločice u blizini prstenastog magneta (koji nije prikazan) (© Joachim Schichting iz *Ref. 176*)

¹ Međutim, moguće je da mehurići gase "levitiraju" u tečnoj "klopci", koja ih sprečava da isplivaju, što je bolje rečeno – pošto je u tom slučaju dielektrična konstanta okruženja veća od dielektrične konstante gase. (*Ref. 175*). Možete li naći kombinaciju tečnosti i gasa u kojoj mehurići tonu umesto da isplivavaju? (*Izazov 209ny*).

Drugi poznat primer dijamagnetne levitacije je levitacija superprovodnika. Zapravo, superprovodnici, bar oni tipa 1, predstavljaju perfektne dijamagnete ($\mu = 0$). u nekim slučajima superprovodnici mogu da budu *obešeni* u vazduhu, ispod magneta. Isto tako pojedinačni atomi sa magnetnim momentom su dijamagnetični; oni redovno levitiraju na ovaj način, a takođe su i fotografisani u tom stanju. (Ref. 178). Pojedinačni neutroni, koji imaju magnetni moment dipola, mogu da se drže u magnetnim bocama pomoću magnetne levitacije, sve do njihovog raspada.

Dijamagneti levitiraju ako je $\nabla B^2 > 2\mu_0\rho g/\chi$, gde je ρ gustina mase objekta a $\chi = 1 - \mu/\mu_0$ njegova magnetna osetljivost. Pošto je χ obično reda 10^{-6} , a ρ reda 10^3 kg/m^3 , potreban je gradijent polja od oko $1000 \text{ T}^2/\text{m}$. Drugim rečima, za levitaciju je neophodna promena polja od 10 T na 10 cm , što je danas uobičajena vrednost za magnete u laboratoriji.

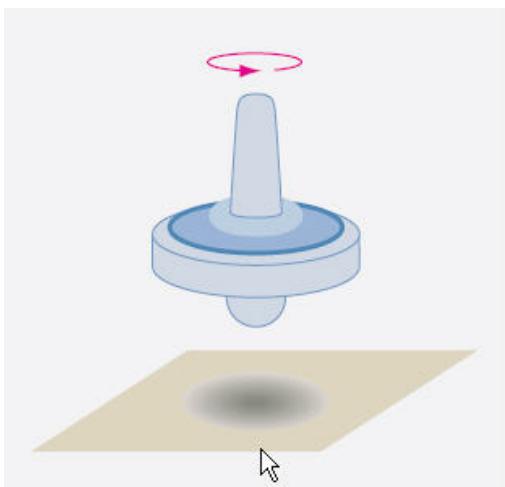
Od nedavno, naučnici levitiraju komade drva i plastike, jagode, kapi vode, kapi tečnog helijuma veličine do 2 cm , skakovce, ribe i žabe (svi su živi i bez ikakve povrede) koristeći magnetnu levitaciju. Zaita, životinje su, kao i ljudi, sastavljeni od dijamagnetskog materijala (Ref. 179). Sami ljudi još uvek nisu bili levitirani, ali se za taj planirani poduhvat, na kojem se radi, zahteva 40 T i veliku količinu električne energije. Ustvari, sličan poduhvat je već bio ostvaren: dijamagnetna levitacija je ispitana za levitaciju putničkog voza, posebno u Japanu, mada uz mali komercijalni uspeh. (Ref. 173).



Slika 162 Zarobljena metalna lopta korišćenjem bušilice sa promenljivom brzinom i plastičnog sedla

Električna i magnetna polja promenljiva u vremenu, to jest periodična polja, mogu da omoguće levitaciju na više različitih načina bez potrošnje energije. (Ref. 171). To je jedan od načina koji se koristi kod magnetnih ležajeva turbomolekularnih vakuumskih pupi. Isto tako pojedinačne nanelektrisane čestice, kao što su joni i elektroni, sada redovno levitiraju u Paulovoj klopcu i Peningovoj klopcu. (Ref. 171). Mehanička analogija je prikazana na *slici 162*.

Slika 163 prikazuje igračku koja vam omogućava sopstvenu levitaciju čigre ili magnetične lopte koje se obrću iznad prstenastog magneta, veoma upečatljiv prikaz levitacije za svakog ko ga gleda. (Ref. 180) Na fotografiji je prikazano da nije teško da takvu napravu izradite sami. (Ref. 181)



Slika 163 Magije sa levitacijom danas se mogu kupiti u prodavnici igračaka, levo sa čigrom, desno sa namagnetisanom loptom koja levitira iznad veliog prstenastog magneta (© Kay Kublenz)

Čak i slobodni elektroni mogu da levitaju, ako se stave da teku iznad površine tečnog helijuma. ([Ref. 182](#)) U nedavnom obrtu nauke o levitaciji, 1995. godine Stiven Halej (Stephen Haley) predviđao je da ukidanje visine malih magnetnih čestica iznad superprovdnog prstena treba da bude kvantizovano. Međutim, ovo predviđanje još uvek nije potvrđeno eksperimentom.

Radi potpunosti, pomenimo da u svakodnevnom životu nuklearne sile ne mogu da se koriste za levitaciju, pošto je njihov domet ograničen na nekoliko femtometara. Međutim, kasnije ćemo videti da je materija površine Sunca sprečena ovom interakcijom da padne u centar; prema tome možemo reći da ona zaista levitira usled nuklearnih iterakcija. ([Vol. V, strana 155](#)).

DA LI GRAVITACIJA ČINI DA NABOJI ZRAČE?

U odeljku o opštoj teoriji relativnosti naučili smo da gravitacija ima isti efekt kao ubrzanje. To znači da je nanelektrisanje zadržano na izvesnoj visini, ekvivalentno sa nanelektrisanjem ubrzanim sa $9,8 \text{ m/s}^2$, što podrazumeva da ono elektromagnetno zrači, pošto sva ubrzana nanelektrisanja zrače. Međutim, svet oko nas je prepun nanelektrisanja na stalnim visinama, a takvog zračenja nema. Kako je to moguće?

Ovo pitanje je bilo omiljena tema tokom mnogo godina. ([Ref. 168](#)). Uopšteno govoreći, pojам zračenja nije invarijanta posmatrača: ako jedan posmatrač oseti zračenje, oseti je obavezno i drugi posmatrač. Tačan način promene polja zračenja od jednog do drugog posmatrača zavisi od tipa relativnog kretanja i od samog polja.

Detaljno istraživanje problema pokazuje da za česticu sa jednoličnim ubrzanjem posmatrač koji je podlegao istom ubrzanju oseća samo elektrostaticko polje. Nasuprot njemu, posmatrač spolja oseća polje zračenja. ([Ref. 169](#)). Pošto je gravitacija (do krajnje preciznosti) ekvivalentna jednoličnom ubrzanju, dobijamo jednostavan rezultat: gravitacija ne čini da električni naboj zrači za posmatrača koji miruje u odnosu na naboj – kao što je zaista opaženo. Ovaj rezultat ostaje istinit takođe i u kvantnom teoretskom opisu.

MATERIJA, LEVITACIJA I ELEKTROMAGNETNI EFEKTI.

Levitacija koju koriste mađioničari uglavnom spada u druge vrste. Kada mađioničar Dejvid Koperfield (David Copperfield) izvodi na kraju dvadesetog veka da mlade devojke “lete” tokom njegove predstave, on to čini tako uz vešanje na tanke niti strune koje su učinjene nevidljivim pametnim rasporedom svetiljki. (Kako se to može proveriti?) ([Izazov 213s](#)). Nasuprot našem utisku, obešen ili ležeći objekt nije zaista u kontaktu sa potporom, ako gledamo kritičnu tačku kroz mikroskop. Dokaz o odsustvu dodira pojaviće se u kvantnom delu našeg hodanja.¹

Međutim, ako objekt koji leži nije u kontaktu sa njegovom potporom, zbog čega onda mi ne propadamo kroz sto ili kroz pod? Izučavanje mehanike započeli smo iskazom da je ključna osobina materije **čvrstoća**, to jest da je nemoguće da se dva tela nađu na istom mestu u isto vreme. Ali šta je to čvrstoća? Čvrstoća nastaje usled elektriciteta unutar materije. I opet, sve detalje ćemo otkriti tek u narednom, kvantnom delu naše pustolovine ([Vol V, strana 55](#)), ali već sada možemo da sakupimo prve tragove o ovom pojmu.

Ne samo da je elektricitet uzrok čvrstoće. Mnogi drugi – zapravo svi – eksperimenti pokazuju da je materija sastavljena od nanelektrisanih čestica. Ustvari, materija može da se pomera i da se na nju utiče elektromagnetskim poljem na mnogo načina. Tokom godina naučnici su o materiji napravili dug popis takvih efekata, od kojih su svi zasnovani na postojanju nanelektrisanih sastojaka u materiji. ([Ref. 183](#)). Pregled je dat u [Tabeli 17](#). Možete li da nađete ili da zamislite nov efekt? ([Izazov 215r](#)). Na primer, može li električni naboj da promeni boju objekata?

Sve osobine materijala navedene u popisu pod uticajem su elektromagnetskih polja ili zavise neposredno od njih. To detaljno pokazuje

- Priroda svakodnevnih osobina materijala je elektromagnetna.

¹ Zagonetka je daleko od jednostavnosti: koji od načina levitacije, opisan u predhodnom tekstu, je korišćen za stolove i stolice? ([Izazov 214ny](#))

Drugim rečima, električni naboji i njihove interakcije suština su i osnovni deo strukture objekta. Tabela pokazuje koliko mnogih različitih elektromagnetskih osobina, tako da kretanje nanelektrisanja unutar materijala mora zaista da bude složeno. Većina efekata tema su fizike čvrstih tela¹ fizike fluida i plazme.

Fizika čvrstih tela daleko je najvažniji deo fizike, kada se upoređuje sa njenim uticajem na društvo. Skoro svi njeni efekti imaju primenu u tehničkim proizvodima i zapošljava mnogo ljudi. Možete li da imenujete proizvod ili primenu u zaposlenju za svaki nasumično odabran efekt iz tabele? (*Izazov 218e*).

Međutim, u našem penjanju na planinu mi ćemo pogledati samo jedan primer iz popisa: topotno zračenje, emisiju svetlosti iz toplih tela.

TABELA 17 Odabране osobine materijala koje se odnose na elektromagnetizam, koje između ostalog pokazuju ulogu u sastavu materije i istovremeno kratak pregled fizike atoma čvrstih tela, tečnosti i radne fizike

Osobina	Primer	Odrednica
topotno zračenje, zračenje toplotne ili usijanje	svaki objekt	emisija zračenja zavisi od temperature i svake makroskopske količine materije
emisivnost	sva tela	sposobnost da emituju topotnu svetlost
Interakcije sa nanelektrisanjima i strujama (efekti povezani sa pomeranjem)		
elektrifikacija	razdvajanje metala od izolatora	spontano nanelektrisanje
triboelektričnost	staklo trljano o mačije krvzno	nanelektrisanje trenjem
barometarsko svetlo	raspored žive duž stakla	ispuštanje gasa usled triboelektričnosti (<i>Ref. 184</i>)
izolacija	vazduh	struje ne teče samo kada je materijal nije čist (dopiranje)
poluprovodnost	dijamant, silicijum, galijumarsenid	strija teče samo kada je materijal nije čist (dopiranje)
provodnost	bakar, metali	lako proticanje struje
superprovodnost	niobijum ispod 9 K	neodređeno proticanje struje
jonizacija	plamen vatre	lako proticanje struje
lokализacija (slaba, <i>Anderson</i>)	metal u neredu	otpornost metala u neredu
otpornost, Džulov efekt	grafit, W	zagrevanje pri protoka struje
termoelektrični efekt pri kontaktu, <i>Seebeck</i> efekt, <i>Peltier</i> efekt	ZnSb, PbTe, PbSe, BiSeTe, Bi ₂ Te ₃ i drugi	struja teče usled razlika temperatura, ili hlađenje usled proticanja struje
termoelektrični efekt u zapremini, <i>Thomson</i> efekt	Fe, Bi, Co, Sb, Cu, Ag i drugi	hlađenje usled gradijenta temperature
akustično-električni efekt	CdS	proizvodi zvuk pri proticanju struje i obrnuto
magnetna otpornost (nekoliko različitih efekata)	permaloj, perovskit, višeslojni metali	električna otpornost se menja primenom magnetnog polja (<i>Ref. 185</i>)
rekombinacija	detekcija dima	nosioci nanelektrisanja se kombinuju da naprave neutralne atome ili molekule
poništavanje	pozitronska tomografija	čestica i antičestica, to jest elektron i pozitron se pohištavaju u foton
<i>Penning</i> efekt	H, Ne, Ar	neutralni metastabilni pobuđeni atomi ioniziraju druge atome pri sudaru
<i>Richardson</i> efekt, emisija toplotne	BaO ₂ , W, Mo, koristi se i TV aparatima i elektronskim mikroskopima	emisija elektrona iz vrelih metala
površinski efekt	Cu i provodnici	velika gustina struje na spoljašnosti žice pri velikim učestanostima.
efekt stezanja	InSb, plazme	velika gustina struje u unutrašnosti žice
<i>Josephson</i> efekt	Nb-oksid-Nb	tunelska struja teče kroz izolator između dva superprovodnika

¹ Najverovatnije najbolji, a sigurno naizabavniji uvod je knjiga na engleskom jeziku je ona od Neil Ashcroft & David Mermin, *Solid State Physics*, Holt Rinehart & Winston, 1976.

Sasaki-Shibuya efekt	n-Ge, n-Si	anizotropija provodnosti primenom električnog polja
prekretni magnetizam	InAs: Mn	napon menja magnetizam (Ref. 186)
Hall efekt	silicijum i drugi poluprovodnici, koriste se za merenje magnetnog polja	napon upravan na protok struje u primjenjenom magnetnom polju
Ettinghausen-Nernst efekt	Bi	pojava električnog polja u materijalima sa temperaturnim gradijentom u magnetnom polju
optičko-grafički efekt	plazme	naboj ili pražnjenje struje usled izrađivanja svetlosti
Interakcija sa magnetnim poljem		
feromagnetizam	Fe, Ni, Co, Gd	spontana magnetizacija; materijali su jako privučeni u magnetno polje
paramagnetizam	Fe, Al, Mg, Mn, Cr	indukovan magnetizam saglasan sa privedenim poljem, privučen u magnetno polje
diamagnetizam	voda, Au, grafit, NaCl, O	indukovan magnetizam suprotan sa privedenim poljem, odbijen od magnetnog polja
magnetostrikcija (i odnosni Joule efekt, Villari efekt, Wiedmann efekt, Matteucci efekt, Barett efekt, i Nagaoka-Honds efekt)	CeB ₆ , CePd ₂ , Al ₃ , TbDyFe	promena oblika ili zapremine usled privedenog magnetnog polja
magnetoelastični efekt	Fe, Ni	promena magnetizma usled naprezanja ili pritiska
akustično-magnetni efekti	legure metala, nalepnice protiv krađe	pokretanje mehaničkih oscilacija usled magnetnog polja
efekt centrifugalnog ventila	višeslojni metal	električni otpor zavisi od spina elektrona u odnosu na privedeno magnetno polje
Zeeman efekt	atomi, to jest Cd	promena učestanosti emisije sa magnetnim poljem
optička orijentacija	paramagnetni gasovi	kružno polarizovana svetlost i magnetno polje poravnavaju spin atoma usled Zemanovog efekta
Hanle efekt	Hg, paramagnetni gasovi	promena polarizacije fluorescencije usled magnetnog polja
Paschen-Back efekt Back-Goudsmiit efekt	atomski gasovi	promena učestanosti emitovanja u jakim magnetnim poljima
magnetooptička aktivnost ili Faradey efekt ili Faradejevo obrtanje	optičko staklo	ugao polarizacije se obrće sa magnetnim poljem; različit indeks prelamanja za desno i levo kružno polarizovanu svetlost, kao pri magnetooptičkom snimanju
magneti kružni dihroizam	gasovi	različita apsorpcija za desno i levo kružnu polarizovanu svetlost; u suštini isto kao predhodno
Majorana efekt	koloidni rastvori	poseban magneto-optički efekt
fotoelektromagnetni efekt	InSb	struja teče usled slabog ozračivanja poluprovodnika u magnetnom polju
Obrnuti Faradejev efekt	GdFeCo	menja magnetizaciju usled laserskog impulsa od femtosekunde
Voigt efekt	pare	dvolomnost izazvana primenom magnetnog polja
Cotton-Mouton efekt	tečnosti	dvolomnost izazvana primenom magnetnog polja

Shubnikov-de Haas efekt	Bi	periodična promena otpornosti izazvana primenom magnetnog polja
termomagnetični efekti: <i>Ettinghausen</i> -efekt, <i>Righi-Leduc</i> efekt, <i>Nernst</i> efekt, magneto- <i>Seebeck</i> efekt	legure BiSb	zavisnost između teperature, primjenjene polja i električne struje
fotonski <i>Hall</i> efekt	CeFe ₃	poprečna jačina svetlosti zavisi od primjenjenog magnetnog polja (Ref. 187)
magnetokalorični efekt	Gadolnijum, legure GdSiGe	materijal se hlađi kada se magnetno polje isključi (Ref. 188)
rezonansa ciklotrona	poluprovodnici, metali	selektivna apsorpcija radio talasa u magnetnom polju
magnetozvučni efekt	poluprovodnici, metali	selektivna apsorpcija zvučnih talasa u magnetnom polju
magnetna rezonansa (više vrsti)	više materijala koji se koriste u medicini za snimanje i za određivanje sastava molekula	selektivna apsorpcija radio talasa u magnetnom polju, uključujući NMR, EPR i dr.
magnetoohološki efekt	tečnosti koje se koriste u vešnjima kod savremenih automobila	menja se viskoznost sa primjenjenim magnetnim poljem
<i>Meissner</i> efekt	tip 1: superprovodnici korišćeni za levitaciju	isključenje magnetnog polja od superprovodnika
Interakcije sa električnim poljem		
polarizacija	svi materijali	polarizacija se menja sa primjenjenim električnim poljem
jonizacija, emisija polja, <i>Schottky</i> efekt	svi materijali, TV	nanelektrisanja se izdvajaju pri jakim poljima
paraelektricitet	BaTiO ₃	primjeno polje dovodi do polarizacije u istom smeru
dielektricitet	dejonizovana voda, izolatori	primjeno polje dovodi do polarizacije u suprotnom smeru
feroelektricitet	BaTiO ₃	spontana polarizacija ispod kritične temperature
piezoelektricitet	kvarcni upaljači koji se koriste u kuhinjama, ljudske kosti, LiNbO ₃	polarizacija se pojavljuje usled pritiska, naprezanja ili napora
elektrostrikcija	sunderaста platina u kiselinama	oblik se menja sa dovedenim naponom (Ref. 189)
piroelektricitet	CsNO ₃ turmalin, kristali sa polarnim osama; koristi se za otkrivanje infracrvenog zračenja	promena temperature uzrokuje razdvajanje nanelektrisanja
elektroosmoza ili elektrokinetički efekt	više jonskih tečnosti	tečnost se kreće usled primjenjenog električnog polja (Ref. 190)
električno sušenje	rastvori soli na zlatu	sušenje površine zavisi od dovedenog napona
elektrolitička aktivnost	sumporna kiselina	prenos nanelektrisanja kroz tečnost
efekt tečnih kristala	brojčanici digitalnih časovnika	molekuli se okrenu usled primjenjenog električnog polja.
elektrooptička aktivnost, <i>Pockels</i> efekt, <i>Kerr</i> efekt	kristalna čvrsta tela (LiNbO ₃) tečnosti (to jest ulje)	električno polje obrće polarizaciju svetlosti, to jest pravi dvolomnost
<i>Frederichs</i> efekt, <i>Schadt-Helfrichs</i> efekt	nematički tečni kristali	elektricitet uzrokuje dvolomnost
<i>Stark</i> efekt	vodonik, živa	menja se boja emitovane svetlosti u električnom pojusu
jonizacija polja	helijum u blizini šiljaka volframa u polju jonskog mikroskopa	jonizacija atoma gasa u jakom električnom polju
<i>Zener</i> efekt	Si	prenos elektrona bez utroška energije u provodnom sloju kod jakih polja

isparavanje polja	W	isparavanje pod uticajem primene jakog električnog polja
Linearne interakcije sa svetlošću		
apsorpcija	ugalj, grafit	pretvaranje svetlosti u toplotu ili neku drugu vrstu energije (Koju?) (Izazov 216s)
zatmnenje	ugalj, grafit	kompletna apsorpcija vidljivog opsega
boja	rubin	apsorpcija zavisi od učestanosti svetlosti
metalni sjaj	metali, dopirani kristali	sposobnost da bude "dobro" obledalo
hromatska disperzija	svi materijali	brzina faze zavisi od talasne dužine
fotostrikcija	PbLaZrTi	svetlost uzrokuje poiezoelektricitet
fotografija	AgBr, AgI	svetlost menja metalno srebro
fotoelektricitet, fotoefekt	Cs	struja teče kroz vakuum usled zračenja svetlosti
unutrašnji fotoelektrični efekt	p-n spoj Si, solarne čelije	pojava napona i tok struje usled zračenja svetlosti
efekt vučenja fotona	p-De	struja stvorena količinom kretanja fotona
providnost	staklo, kvarc, dijamant	malo odbijanja, mala apsorpcija malo rasipanje
odbijanje	metali	svetlo odskače od površine
polarizacija	istegnuto srebro, nanočestice u staklu	propuštanje svetlosti zavisi od ugla polarizacije
optička aktivnost	šećer rastvoren u vodi, kvarc	obrtanje polarizacije
dvolomnost, linearni dihroizam	kalcit, rožnjača, tanki listovi polimera	indeks prelamanja zavisi od smera linearne polarizacije, svetlosni zrak se cepta na dva zraka
kružni dihroizam	aminokiseline, andaluzit	apsorpcija zavisi od kružne polarizacije
optički izazvana anizotropija, Weigert efekt	AgCl	optički izazvana dvolomnost i dihroizam
Komptonov efekt	merenje količine kretanja	promena talasne dužine X-zraka i gama zraka u sudaru sa elektronima
elektrohromizam	volframat	promena boje sa primjenjenim električnim poljem
rasipanje	gasovi, tečnosti	svetlost menja smer
Mie rasipanje	prašina i gasovima	svetlost menja smer
Raleigh rasipanje	nebo	svetlost menja smer, plavetnilo neba
Raman efekt ili Smekal-Raman efekt	molekularni gasovi	rasuta svetlost menja učestanost
promenljivo ogledalo	LaH	promena od odbijanja do providnosti kojim se upravlja naponom (Ref. 191)
radiometarski efekr	dvobojna vetrenjača	zračenje pokreće mlin (strana 93)
pritisak osvetljenja	dvobojna vetrenjača	zračenje direktno pokreće mlin
efekt sunčanog jedrenja	sateliti u budućnosti	kretanje usled solarnog vетра.
akustičnooptički efekt	TeO ₂ , LiNbO ₃	difrakcija svetlosti u providnim materijalima usled zvuka
fotorefraktivni materijali	Bi ₁₂ SiO ₂₀ , LiNbO ₃ , GaAs, InP	zračenje svetlosti menja indeks prelamanja
Auger efekt	Augerova elektronska spektroskopija	emisija elektrona usled reorganizacije atoma posle ionizacije X-zracima
Bragg odbijanje	određivanje strukture kristala	difrakcija X-zraka sa površine atoma
Mößbauer efekt	³⁷ Fe koristi se u spektroskopiji	rezonantna apsorpcija gama zračenja bez odskakanja
stvaranje para	Pb	promena fotona u par naelektrisanja čestica - antičestica

fotoprovodnost	Se, CdS	promena otpornosti usled zračenja svetlosti
optoakustični efekt, fotoakustični efekt	gasovi, čvrsta tela	stvaranje zvuka usled apsorpcije impulsa svetlosti; koristi se za snimanje tkiva životinja i ljudi
Emisija svetlosti		
luminiscencija: opšti pojam za suprotno od usijanja	GaAs, TV	emisija svetlosti od hladnog tela
fluoroscencija	CaF ₂ , proizvodnja X-zraka, svetleće cevi, katodne cevi, TV cevi, boje, obojeni polimeri, dopirani kristali	emisija svetlosti tokom i nakon apsorpcije svetlosti ili drugog energetskog ulaza
fosforescencija	TbCl ₃ , kristali dopirani teškim metalima	emisija svetlosti usled svetlosti, električnog ili hemijskog uticaja koja traje dugo posle stimulacije
poluprovodnička luminiscencija	diode sa emisijom svetlosti (LED), laserski pokazivači	emisija svetlosti usled rekombinacije šupljina elektrona u p-n spojevima
elektroluminiscencija	prah ZnS	emisija svetlosti usled menjanja električnog polja
fotoluminiscencija	ZnS: Gu, SrAlO ₄ : Eu, Dy, hijamin	emisija svetlosti pokrenuta ultraljubičastom svetlošću, koristi se u signalima sigurnosti
hemoluminiscencija	H ₂ O ₂ , ester oksalata fenila rastvor i boja	hemijski pokrenuta emisija hladne svetlosti, koristi se za svetleće štapove za roniće i za zabavu
bioluminiscencija	svitac, ribe iz dubine mora	emisija hladne svetlosti kod životinja, poseban slučaj hemoluminiscencije
triboluminiscencija	šećer	emisija svetlosti tokom trenja ili lomljenja, nepraktično za osvetljenje
termoluminiscencija	kvarc, feldspat, metastabilni joni primesa u kristalima	emisija svetlosti tokom zagrevanja, često pokazuje pamćenje zračenja, koristi se za određivanje starosti u arheologiji i grnčariji. (Ref. 192)
sonoluminiscencija	vazduh u vodi	emisija svetlosti tokom kavitacije
gravitoluminiscencija	ne postoji; zašto? (Izazov 217s)	
zračenje kočenja	proizvodnja X-zraka	emisija zračenja usled naglog kočenja elektrona
Čerenkov efekt	voda, detektori čestica polimera	emisija svetlosti u sredini usled čestica, to jest, emitovano pri radioaktivnom procesu, kreće se brže od svetlosti u toj sredini
prenos zračenja	bilo koji materijal	emisija svetlosti usled brzih čestica koje se kreću iz jedne sredine u drugu sa različitim indeksima prelamanja
Nelinearne interakcije sa svetlošću		
aktivnost lasera, superzračenje	pivo, rubin, He-Ne	emisija stimulisanog zračenja
kvantni kaskadni laser	višeslojni poluprovodnik	emisija stimulisanog infracrvenog zračenja usled međupodzonskog pomeranja
stvaranje drugog, trećeg, n-tog harmonika	LiNbO ₃ , KH ₂ PO ₄	svetlost delimično pretvorena u dvosstruku, trostruku, n-struku učestanost
aktivnost ogledala objedinjavanja faze	gasovit CS ₂ , čvrst Bi ₁₂ SiO ₂₀	odbijanje svetlosti sa lokalno suprotnim fazama
ostali optički nelinearni efekti: paraagnetno pojačavanje, mešanje učestanosti, zasićena apsorpcija, stvaranje n-tog harmonika, optički Kerr efekt, Raman pojačanje, stimulisano Brillouin rasipanje		
Interakcije sa vakuumom		
Kazimir efekt	metali	privlačenje nenaelektrisanih provodnih tela

Opšte mehaničke i topotne osobine materijala		
čvrstina, neprobojnost	podovi, stubovi, konopci, kofe	samo jedan objekt može biti na jednom mestu i datom vremenu
plastičnost	metali	trajno izobličenje pri naprezanju
elastičnost	čvrsta tela	vraćanje oblika posle deformacije pri naprezanju
deroelastičnost	legure Ni-Ti	spontano istezanje
viskoznost	tečnosti, čvrsta tela	izobličenje pri naprezanju usled kretanja jednog sastojka
toplotni kapacitet i provođenje topline	srebro, mermer, vazduh	sposobnost da se uskladišti i prenese haotično kretanje atoma
bilo koja druga osobina svakodnevnih materijala	svaki materijal	

SVA TELA EMITUJU ZRAČENJE

Ernšoova (Earnshaw) teorema o nemogućnosti stabilne ravnoteže nanelektrisanih čestica u stanju mirovanja podrazumeva da nanelektrisanja unutar materije moraju da se kreću. Za svaku nanelektrisanu česticu koja se kreće Maksvelove jednakosti za elektromagnetna polja pokazuju da one zrače energiju putem emitovanja elektromagnetskih talasa. Ukratko, predviđamo da svaka materija mora da zrači elektromagnetnu energiju.

Zanimljivo je, ali iz iskustva znamo da je to zaista slučaj. Svetlost toplog tela zavisi od njegove temperature; delovanje sijalice stoga dokazuje da su metali sastavljeni od nanelektrisanih čestica. **Usijanje**, kako se to naziva, zahteva nanelektrisanja. Ustvari, svako telo emituje zračenje, čak i na sobnoj temperaturi. Ovo zračenje nazvano je **toplotno zračenje**; na sobnoj temperaturi ono je u infracrvenom opsegu. Njegova jačina je prilično mala u svakodnevnom životu; data je opštim izrazom: ([Ref. 193](#))

$$I(T) = fT^4 \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} \quad \text{ili} \quad I(T) = f\sigma T^4 \quad \text{pri čemu je: } \sigma = 56.7 \text{ nW/K}^4 \text{m}^2 \quad (85)$$

gde je f činilac koji zavisi od materijala, oblika i temperature i ima vrednost između nule i jedan, a naziva se **emitivnost**. Konstanta σ se naziva **Štefan-Bolzmanova konstanta zračenja crnog tela** ili **konstanta zračenja crnog tela**. Telo čija je emitivnost u idealnom slučaju data sa $f = 1$ naziva se **crno telo**, pošto takvo telo na sobnoj temperaturi ima takođe idealan koeficijent absorpcije i zato se pojavljuje kao crno. (Možete li sagledati zbog čega?) ([Izazov 219s](#)). Zračenje toplote koju emitiše takvo telo naziva se **zračenje crnog tela**.

Uzgred, koji objekt zrači više energije: ljudsko telo ili prosečan komad Sunca iste mase? ([Izazov 220s](#)). ([Ref. 194](#))

IZAZOVI I ZANIMLJIVOSTI O ELEKTROMAGNETNIM EFEKTIMA

“Unutar provodnika ne postoji električno polje.” Ovu rečenicu često nalazimo. Ustvari, istina nije tako jednostavna. Zaista, statičko polje ili statičko nanelektrisanje na površini tela ne izaziva polja i nanelektrisanja u njemu. Zatvorena metalna površina prema tome stvara štit prema električnom polju. Možete li dati objašnjenje? ([Izazov 221s](#)). Zapravo, nije potreban ni tanak metalni sloj da bi se dobio taj efekt, dovoljan je kavez. U pitanju je **Faradejev kavez**.

Detaljni mehanizam dopušta da se postavi sledeće pitanje: da li postoji Faradejev kavez i protiv gravitacije? Zašto?

Za spoljašnja polja ili nanelektrisanja koja se kreću, ovo pitanje je mnogo složenije. Usled ubrzavanih spoljašnjih nanelektrisanja – polja zračenja – polja se eksponencijalno raspadaju usled štita. Polja nastala od spoljnih nanelektrisanja koja se kreću stalnom brzinom jako su smanjena, ali nisu nestala. Smanjenje zavisi od debljine i otpornosti upotrebljenog metalnog okruženja. Za listove metala je smanjivanje polja veoma veliko; polje nije neminovno veliko za metale prevučene plastikom. Plastični štitovi neće dovoljno zaštiti uređaj od bliskog atmosferskog pražnjenja. ([Ref. 195](#))

U praksi ne postoji opasnost ako grom udari u avion ili automobil, sve dok su izrađeni od metala. (Postoji film na internetu sa automobilom u koji je udario grom: vozač to čak nije ni primetio.) Međutim, ako u vaš

automobil udari grom tokom suvog vremena, treba da sačekate nekoliko minuta pre no što izadete. Možete li zamisliti zbog čega?

Faradejevi kavezi takođe deluju i obratno. (Postepena) promena električnih polja koja su unutar Faradejevog kaveza ne oseća se izvan njega. Iz tog razloga, radio aparati, mobilni telefoni i računari okruženi su kutijom izrađenom od metala ili metala prevučenog plastikom. Metal održava takozvano **elektromagnetno zagađenje** na minimumu.

Prema tome, postoje tri razloga da se električne naprave okruže štitom: da se naprava zaštiti od spoljnih polja, da se zaštite ljudi i ostale mašine od elektromagnetskog zagađenja i da se ljudi zaštite od mrežnog napona koji bi se greškom uveo u kutiju (na primer, ako dođe do probroja izolacije). U eksperimentima visoke preciznosti ove tri funkcije se ostvaruju pomoću tri posebna kaveza.

Za čisto magnetna polja situacija je još složenija. Sasvim je teško oklopiti unutrašnjost mašine od spoljnih magnetnih polja. Kako biste vi to ostvarili? U praksi se koriste legure takozvanog μ -metaala; možete li da pogodite šta taj materijal čini? (**Izazov 222s**)

* * *

Nisu opasna samo električna polja. Isto tako opasna mogu da budu promenljiva elektromagnetna polja. Godine 1997., po lepom tihom vremenu, holandski balon sa toplim vazduhom približio se jakom radio predajniku u Hilversumu. Pošto je putovao nekoliko minuta u blizini antene, gondola se iznenada otkačila od balona i svi putnici u njoj su poginuli.

Istraživački tim je rekonstruisao događaj nekoliko nedelja kasnije. Kod savremenih balona sa gasom gondola je obešena putem najlonskih užadi visokog kvaliteta. Da bi se izbeglo oštećenje od munja i da bi se izbegli problemi nanelektrisanja, sva ta užad sadrže tanku metalnu žicu koja čini veliku ekvipotencijalnu površinu oko celog balona. Na nesreću, u prisustvu radio predajnika, ove tanke metalne žice apsorbovale su radio energiju od predajnika, zagrejale su se i istopile najljonsku užad. To je bio prvi put da je ovo bilo zapaženo.

* * *

Neki istraživači nastoje da otkriju raspadanje zuba uz pomoć električne struje, koristeći zapažanje da su zdravi zubi loši provodnici nasuprot kvarnih zuba. (**Ref. 196**). Kako biste vi koristili ovaj efekt u ovom slučaju? (**Izazov 223ny**). (Uzgred, mogli bi se dobiti slični rezultati pomoću potpuno različitih tehnika snimanja, sa teraherc talasima ili sa tomografijom optičke koherencije.)

* * *

Ljudsko telo je piezoelektrično: ono stvara električne signale kada je pod opterećenjem (**Ref. 197**). Kada se krećemo ili rastemo, telo koristi električne signale za ojačavanje kosti i području gde je to potrebno. Piezoelektricitet kostiju prema tome upravlja i vodi njihov rast. Ova povezanost se koristi da bi se postiglo da polomljene kosti brže srastaju: primenom pulsirajućih magnetskih polja na slomljenu kost stimulisano je i ubrzano izlečenje. (Statičko magnetno polje očigledno ne postiže ovaj cilj.) Isto tako su zubi piezoelektrični, pa taj efekt igra ulogu u njihovom rastu.

* * *

U prodavnica se mogu kupiti piezoelektrični uređaji – slični upaljačima sa gasom – koji se primenjuju kod komaraca i kaže se da smanjuju svrab pa čak i otok. (Neki od tih proizvoda se zovu “zanza klik” i “skeeter klik”.) Mogu li ove tvrdnje da budu tačne? (**Izazov 224e**).

* * *

Tim snimatelja je usred Sahare koristio uređaje za snimanje zvuka sa baterijskim napajanjem. Uvek kada je kabel mikrofona bio dug nekoliko desetina metara, začuo bi se zvuk napajanja od 50 Hz, iako je najbliže snabdevanje energijim bilo udaljeno stotine kilometara. Istraživanje je objavilo da visokonaponski vodovi u Evropi gube značajan deo energije zračenjem; njihovi talasi od 50 Hz odbijaju se od jonsfere koja okružuje Zemlju i stoga ometaju snimanje usred pustinje. Možete li da procenite da li ta zapažanja znače da je život u neposrednoj blizini voda visokog napona opasan? (**Izazov 225s**).

* * *

Kada se zapaze struje plazme na Suncu, astronomi prvo telefoniraju snabdevačima električnom energijom. Oni znaju da će 24 do 48 časova kasnije do Zemlje stići nanelektrisane čestice izbačene mlazom struje i učiniti da se magnetno polje na površini koleba. Pošto enetgetska mreža obično ima zatvorene petlje od hiljadu kilometara, indukovace se dodatne struje koje bi mogle da preopterete transformatore u mreži i da ih izbace iz pogona. Drugi transformatori bi tada preuzeli dodatna opterećenja koja bi pak izazvala njihovo

pregrevanje itd. U nekoliko slučaja u prošlosti, milioni ljudi je ostalo bez električne energije zbog solarnih struja. U današnje vreme snabdevači električnom energijom prevazilaze ovaj problem tako što isključuju različite delove mreže, kako bi se izbegle velike petlje, smanjenjem napona napajanja da bi se izbeglo zasićenje transformatora i onemogućavanjem prenosa opterećenja iz kola u kvaru u druge delove.

* * *

Ako je električno polje opisano kao zbir komponenti različitih učestanosti, takozvanim Furijeovim komponentama, amplitude su date sa: ([Ref. 198](#))

$$\hat{\mathbf{E}}(k,t) = \frac{1}{2\pi^3/2} \int \mathbf{E}(x,t) e^{-ikx} d^3x \quad (86)$$

a slično tome iza magnetno polje. Pokazalo seda je Lorencova invarijantna veličina N , koja opisuje energiju po kružnoj učestanosti ω , može da se definiše;

$$N = \frac{1}{8\pi} \int \frac{|\mathbf{E}(k,t)|^2 + |\mathbf{B}(k,t)|^2}{c|\mathbf{k}|} d^3k \quad (87)$$

Možete li pogoditi šta je N u fizičkom smislu? ([Izazov 226s](#)). (Savet: razmislite o kvantnoj teoriji.)

* * *

Faradej je otkrio, kao što je rečeno ranije ([strana 41](#)), kako se menja magnetizam u elektricitet, znajući da se elektricitet može pretvoriti u magnetizam. Pitanje je prefinjeno. Faradejev zakon nije dvojnik Amperovom zakonu pošto bi mogao da podrazumeva korišćenje magnetnih jednopola; niti mu je u suprotnosti, pošto bi mogao da podrazumeva premeštanje struje. Ali on se posmatra kao spona i on je našao način da poveže dva posmatranja – na nov način, kako se pokazalo. Faradej je takođe otkrio kako da se pretvori elektricitet u svetlost i hemiju. On zatim pokušao da promeni gravitaciju u elektricitet. Ali u tome nije imao uspeha. Zašto? ([Izazov 227s](#)).

* * *

Na velikim visinama (60 km do 1000 km) iznad Zemlje, gasovi su u potpunosti jonizovani; nijedan atom nije neutralan. ([Vol. I, strana 260](#)). Reč je o jonusferi, jer je prostor pun pozitivnih jona i slobodnih elektrona. Iako se oba nanelektrisanja pojavljaju u istom broju, sateliti koji se kreću kroz jonusferu dobijaju negativno nanelektrisanje. Zašto? Kako se može zaustaviti nanelektrisanje? ([Izazov 228s](#)).

* * *

Kondenzator kapaciteta C napunjen je naponom U . Uskladištena elektrostatička energija je $E = CU^2/2$. Potom je kondenzator odvojen od izvora napona i vezan u granu sa praznim kondenzatorom istog kapaciteta. Posle nekog vremena napon je očigledno pao na $U/2$. Međutim uskladištena energija je $C(U/2)^2$ što je polovina početne vrednosti. Gde je energija otisla? ([Izazov 229s](#)).

* * *

Kako možete dati nekom električni šok ako koristite bateriju od 4,5 V i nešto malo žice? ([Izazov 230s](#)).

* * *

Jedna stara zagonetka o elektricitetu potiče od ekvivalentnosti mase i energije. Poznato je iz eksperimenta da je veličina prečnika d elektrona sigurno manja od 10^{-22} m. ([Ref. 199](#)) To znači da električno polje koje ga okružuje ima sadržaj energije E najmanje ([Izazov 231e](#))

$$E_{\text{negr.}} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \int E_{\text{el.polje}}^2 dV = \frac{1}{2} \epsilon_0 \int_d^\infty \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \right) 4\pi r^2 dr = \frac{q^2}{8\pi\epsilon_0} \frac{1}{d} > 1,2 \mu J \quad (88)$$

S druge strane, **masa** elektrona, obično izražena kao $511 \text{ keV}/c^2$ odgovara energiji od samo 82 fJ , to jest deset miliona **manje** od izračunate vrednosti. Drugim rečima, klasična elektrodinamika ima značajne teškoće u opisu elektrona. U stvari, nemoguće je dosledan opis nanelektrisane tačkaste čestice unutar klasične elektrodinamike. ([Ref. 200](#)). Ovoj temi u današnje vreme posvećuje se samo retko značaj – ali zato često strastven, pošto se zagonetka rešava na drugačiji način u kvantnom delu naše avanture.

* * *

Iako su prošla zlatna vremena nauke o materijalima, razne elektromagnetne osobine materije i njene primene u uređajima izgleda da još nisu u potpunosti objašnjene. Otrprilike jednom godišnje otkriva se nov efekt, što znači da ga treba obuhvatiti popisom elektromagnetnih osobina materije u [Tabeli 17](#) na [strani 168](#). Između ostalih, neke nove tehnologije poluprovodnika imaju uticaj na elektroniku, kao što je skorašnje uvođenje jeftinje svetlosne detekcije integralnih kola u tehnologiji CMOS (Complementary Metal Oxide Silicon)

* * *

Izrada izvora svetlosti visokog kvaliteta bila je izazov tokom više vekova i ostaće i u budućnosti. Izvori svetlosti koji su jaki, podesivi i velike koherentne dužine ili izvori koji emituju posebne talasne dužine, bili su cetalne teme istraživanja. Kao jedan primer od svih, prvi laseri sa X-zracima bili su tek nedavno napravljen; međutim, oni su dugački nekoliko stotina metara i koriste prepravljene ubrzivače čestica (acceleratore). Konstrukcija kompaktnog lasera sa X-zracima je još uvek u zaostatku od više godina – ukoliko je uopšte moguća.

* * *

U mnogim materijalima različite su apsorpcije levo i desno kružno polarizovane svetlosti. Ovaj efekt, koji se naziva **kružni dihroizam**, otkrio je Aime Koton (Aime Cotton) 1896. godine. Pošto se kružni dihroizam javlja u oprički aktivnim hiralnim molekulima, merenje spektra kružnog dihroizma je jednostavna i važna metoda za određivanje sastava bioloških molekula.

* * *

Efekti atmosferskog elektriciteta takođe su opaženi oko vodopada. Razna proučavanja su pokazala da veliki vodopadi oko sebe proizvode negativno nanelektrisane kapljice vode u vazduhu. Čak se pokazalo da je zdravo udisanje ovih kapljica, posebno kod ljudi koji imaju astmu.

* * *

Ali možda najveća zagonetka, nezamisliva u klasičnoj elektrodinamici, je dekodiranje struha unutar mozga. Da li je to moguće pomoći aparata koji je postavljen izvan glave?

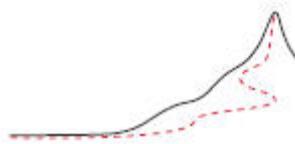
Moglo bi se početi sa jednostavnim izazovom: Da li bi bilo moguće razlikovati misao "da" od misli "ne" uz pomoć merenja elektromagnetskog polja oko glave? (**Izazov 232r**). Drugim rečima, da li je moguće čitanje jednostavnih misli? Odgovor je da, pošto je ovaj poduhvat već postignut. Još više, korišćenjem snimka mozga već je moguće razlikovanje jednostavnih pojmoveva koje ima osoba na umu. (**Ref. 201**).

Kao što smo videli u predhodnom tekstu (**strana 73**) delimično čitanje misli takođe je moguće za zadatke koji su povezani sa kretnjama, uključujući neke video igre.

U stvari, sada je već moguće koristiti kapu sa električnim kontaktima i upotrebiti lozinku na koju prosto mislite kao zaštitu vašeg sistema računara. Prednost takve lozinke je ta što je teška za kradu. (Da li je takav sistem siguran?) (**Izazov 233s**).

Dvadesetprvi vek sigurno će doneti mnogo novih rezultata takođe i za čitanje misli za spoznajne zadatke. Tim koji postigne takav poduhvat postaće u trenutku čuven.





Poglavlje 6

ZAKLJUČCI I GRANICE KLASIČNE ELEKTRODINAMIKE

Sve iz klasične elektrodinamike može da se obuhvati u tri načela. Njih treba da zna svaki pustolov, pošto će mu oni pomoći kasnije, kada se budemo približili vrhu Planine Kretanja. Otkrićemo da možemo da dospemo do vrha jedino ako stvari izrazimo što je moguće jednostavnije. Ova tri načela klasične elektrodinamike su:

- **Odrednica:** Električni naboji ispoljavaju silu na druga naelektrisanja; za naelektrisanje u stanju mirovanja, sila opada obrnuto сразмерно kvadratu rastojanja. Ekvivalentno tome, naelektrisanja su okružena **elektromagnetskim poljem**.
- **Očuvanje:** Električni naboji su očuvani.
- **Invarijanta od c:** Naelektrisanja se kreću sporije od svetlosti. Ekvivalentno tome, sve naelektrisane čestice imaju masu.

Iz ova tri načela možemo da izvedemo sve iz oblasti elektrodinamike. ([Ref. 39](#)). Posebno, možemo da izvedemo sledeće **osnovne iskaze**:

- Elektromagnetno polje fizički je vidljivo, kao što pokazuje, na primer, igla kompasa.
- Izvori elektromagnetnih polja su (pokretna) naelektrisanja, što pokazuje čilibar, magnet ili mobilni telefon.
- Elektromagnetno polje menja kretanje električno nabijenih objekata preko Lorencove jednakosti, kao što pokazuje, na primer, električni motor.
- Elektromagnetno polje može da postoji u praznom prostoru i da se kreće u njemu kao talas, kao što, na primer, pokazuje svetlost sa zvezda.
- Elektromagnetno polje se ponaša kao kontinualna veličina i opisano je Maksvelovim jednakostima razvoja, kao što pokazuju, na primer, radio, internet i električna četkica za zube.

Još preciznije, kretanje električnog polja E i magnetnog polja B opisuje gustina lagranžijana

$$L = \frac{\epsilon_0}{2} E^2 - \frac{1}{2\mu_0} B^2 \quad (89)$$

Kao i kod svakog kretanja opisanog lagranžijanom, kretanje elektromagnetnog polja je dvosmerno, neprekidno, očuvano i determinističko. Međutim, postoji tu još malo zabave u bliskoj budućnosti; iako je ovaj opis korektan u svakodnevnom životu, tokom ostatka našeg penjanja na planinu zapazićemo da poslednji osnovni iskaz mora da bude pogrešan: polja ne prate uvek Maksvelove jednakosti. Jednostavan primer to pokazuje.

Na temperaturi od 0 K, kada materija nema više toplotno zračenje, imamo paradoksalnu situaciju da naelektrisanja unutar materije ne mogu da se kreću, pošto se ne opaža nikakvo emitovano zračenje, ali i ne mogu da budu u stanju mirovanja, usled Ernšooove teoreme. Ukratko, samo postojanje materije – sa njenim naelektrisanim sastavnim delovima – pokazuje da je klasična elektrodinamika pogrešna.

Ukratko, pregled brojnih osobina materijala i elektromagnetni efekti dati u [Tabeli 17](#) na strani 168 pojačava istu tačku; klasična elektrodinamika može da opiše većinu nabrojanih efekata, *ali ne može da objasni poreklo i brojne vrednosti ni jednog od njih*. Iako ćemo nekoliko tih efekta da proučavamo tokom našeg hodanja – oni nisu suština u našoj pustolovini – opšti pojmovi neophodni za njihov opis biće tema sledećeg dela našeg uspona na planinu, onog o kvantnoj fizici.

Zapravo, klasična elektrodinamika ne važi u **dve** oblasti.

PROSTOR JE ZAKRIVLJEN, NIJE RAVAN

Pre svega, klasična elektrodinamika otkazuje u oblastima sa ***izuzetno jakim poljima***. Kada su elektromagnetna polja izuzetno jaka, njihova gustina energije ***zakriviljuje*** prostor-vreme. Klasična elektrodinamika, koja predpostavlja ravno prostor-vreme, u takvim situacijama ne važi.

Greška klasične elektrodinamike još je vidljivija u još ekstremnijem slučaju od svih: kada su polja izuzetno jaka, ona dovode do stvaranja crnih rupa. Postojanje crnih rupa, zajedno sa diskretnošću naelektrisanja, podrezumeva maksimalne vrednosti električnog i magnetnog polja (***strana 25***). Njihova gornja granica već je pomenuta u ***Tabeli 3*** u kojoj su nabrojane vrednosti raznih električnih polja koja se nalaze u prirodi, kao i u ***Tabeli 8 (strana 34)*** u kojoj su nabrojane vrednosti magnetnih polja. Možete li da zaključite kolika je vrednost takozvanih ***Plankovih polja?*** (***Izazov 234s***).

Uzajamno dejstvo između zakriviljenosti prostora i elektrodinamike ima više aspekata. Na primer, maksimalna sila u prirodi (***Vol. II, strana 87***) ograničava maksimalni naboј koji može da nosi crna rupa. Možete li da nadete odnos? (***Izazov 235ny***). Kao drugi primer, čini se da magnetna polja efektivno povećavaju čvrstinu praznog prostora, to jest, ona povećavaju teškoću da se prazan prostor zakrivi. (***Ref. 202***). Do sada nisu nisu proučena sva međusobna dejstva između gravitacije i elektrodinamike; u budućnosti treba da se pojavi još više primera,

Ukratko, klasična elektrodinamika ne funkcioniše kod izuzetno velikih vrednosti polja, kada opšta teorija relativnosti ima ulogu.

VREDNOSTI NABOJA SU DISKRETNE, NISU NEPREKIDNE

Klasična elektrodinamika zataji i kada treba da opiše tačno prirodu takođe u slučaju ***izuzetno slabih polja***. To se događa isto tako u ravnom prostor-vremenu, a to je iz razloga koji je pomenut bezbroj puta: ***električni naboji su diskretni***. Električni naboji ne menjaju se neprekidno, već su promene u određenim koracima. (***Vol. I, strana 285***). Ne samo da priroda ispoljava najmanju vrednost entropije – kao što smo otkrili u našem proučavanju topote (***Vol. I, strana 286***) – i najmanju količinu materije, priroda takođe ispoljava i najmanje naelektrisanje.

- Vrednosti električnih nabojia su kvantizovane.

U metalima je kvantifikacija naelektrisanja primetna u toku elektrona. U elektrolitima, to jest tečnostima koje provode električnu struju, kvantifikacija naelektrisanja se pojavljuje u toku naelektrisanih atoma, obično nazvanim ***joni***. Sve baterije imaju u sebi elektrolit; isto tako je i voda elektrolit, premda veoma loše provodnosti. U plazmama, kao što je vatrica ili u fluorescentnim sijalicama, pomeraju se i joni i elektroni i pokazuju diskretnost naelektrisanja. Takođe i u svim poznatim vrstama zračenja čestica – od zraka elektrona unutar katodne cevi u televizijskim aparatima, kanalnih zraka koji se stvaraju u posebnim cevima niskog pritiska, kosmičkog zračenja koje nas pogađa sve vreme, pa do svuda prisutne radioaktivnosti – naelektrisanja su kvantizovana.

U svim poznatim eksperimentima pronađena je ***ista*** najmanja vrednost e za električni naboј. Najprecizniji rezultat je

$$e = 0,160\ 217\ 656\ 5(35) \text{ aC} \quad (90)$$

oko šestog dela atokulona. Svi ostalali zapaženi električni naboji u prirodi samo su umnošći ovog takozvanog ***elementarnog naelektrisanja***.

Ukratko, kao i svi protoci u prirodi, takođe i protok elektriciteta tok je diskretnih čestica. Ustvari, priroda naelektrisnih čestica razlikuje se od situacije do situacije: one mogu da budu elektroni, joni, mioni i mnoge druge vrste čestica. Međutim, stope naelektrisanja uvek su tačno jednake. Ustvari, na ovom mestu u našoj pustolovini jednakost elementarnog naboјa za sve materijalne čestice nije objašnjena. Mi ćemo otkriti razlog skoro na kraju naše avanture.

Pre svega, ova najmanja promena naelektrisanja ima jednostavnu posledicu:

- Klasična elektrodinamika je ***pogrešna***.

Klasična elektrodinamika samo je dobra približnost za vrednosti polja ***srednje veličine***. Zaista, najmanji električni naboј podrazumeva da ne postoji beskonačno malo ispitno naelektrisanje. Ali takvo beskrajno malo ispitno naelektrisanje neophodno je da se ***odrede*** električna i magnetna polja (***strana 25***). Za ***konačno*** ispitno naelektrisanje, smetnja od polja nastalog od samog ispitnog naelektrisanja, učinila bi nemogućim

precizno merenje polja, a time i preciznu odrednicu polja. Kao posledica toga, vrednosti električnog i magnetnog polja izmerene uz konačna ispitna naelektrisanja uvek su pomalo nejasne. Ova nejasnost je naročito ispoljena kod malih vrednosti polja. Na primer, za malu jačinu svetlosti eksperimenti su otkrili fotone, diskretne čestice svetlosti. Sve male jačine svetlosti su vremenski prosečan mali broj fotona, oni nisu kontinualno polje.

Najniža granica veličine naelektrisanja podrazumeva takođe da u kasičnoj elektrodimanici ne postoji potpuno tačan način za definisanje trenutne vrednosti električne struje. Zaista, položaj i količina kretanja naelektrisanja uvek su pomalo nejasni, kao što ćemo videti. (**Vol. IV, strana 133**).

Ukratko,

- Maksvelove jednakosti razvoja samo su **približne**.

Klasičan elektromagnetizam ne funkcioniše za izuzetno male vrednosti polja, kada ulogu imaju kvantni efekti, a ne funkcioniše ni kod izuzetno velikih vrednosti polja, kada ulogu ima gravitacija. Ova dva krajnja slučaja biće objašnjena u ostalim etapama naše pustolovine, etapi o kvantnoj teoriji i etapi o objedinjavanju. Samo neki efekti diskretnosti naelektrisanja mogu da se obrađuju u klasičnoj fizici; nekoliko poučnih primera sledi.

KOLIKO BRZO SE KREĆU NABOJI?

U vakuumu, kakav je i katodnoj cevi kolor televizora ili unutar elektronskog mikroskopa, naelektrisane čestice ubrzane naponom od 30 kV kreću se trećinom brzine svetlosti. (**Izazov 236s**). Na višim napomima brzina je čak i veća. U savremenim ubrzivačima čestica električni naboji se kreću toliko brzo da se njihova brzina ne razlikuje od brzine svetlosti za sve praktične svrhe.

U metalima se električni signali kreću brzinom koja je reda brzine svetlosti. Precizna vrednost zavisi od kapacitivnosti i impedanse kabla, a brzina je obično u opsegu 0,3c do 0,5c. Ova velika brzina nastaje usled sposobnosti metala da lako primi električne naboje koji dolaze i da dopusti da drugi odu. Sposobnost brzog reagovanja je usled velike pokretljivosti naboja unutar metala, što je uzrokovano osobinama metalnih veza i malih masa i veličina čestica koje učestvuju – elektrona.

Brzina signala u metalima naizgled je u suprotnosti sa dugom odrednicom. Brzina pomeranja v elektrona u metalnoj žici, odnosno prosečna brzina električnih naboja, očigledno se pridržava

$$v = \frac{I}{Ane} \quad (91)$$

gde je I struja, A površina preseka žice, e naelektrisanje jednog elektrona i n broj koji predstavlja gustinu elektrona. Gustina elektrona u bakru je $8,5 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$. Ako uzmemo tipičnu struju od 0,5 A i tipičan poprečni presek žice od 1 mm^2 , dobijemo brzinu pomeranja od $0,37 \mu\text{m/s}$. Drugim rečima, elektroni se kreću oko hiljadu puta sporije od kečapa u boci. Još gore, ako sobna svetiljka koristi jednosmernu struju umesto naizmenične, elektronima će biti potrebno nekoliko dana da stignu od prekidača do sijalice. Uprkos tome, svetiljka će se uključiti ili isključiti skoro trenutno posle delovanja prekidača. Slično tome, elektroni elektronske pošte poslate jednosmernom strujom stići će mnogo kasnije nego li pismo na papiru koje je poslato istovremeno. Uprkos tome e-pošta stiže brzo. Zašto?

Slavina na vodi pokazuje sličan efekt. Dugčko crevo toči vodu skoro u istom trenutku kada se otvorí slavina, iako vodi treba duže vreme da dođe od početka do kraja creva. Brzina reakcije vode, brzina signala, određena je brzinom talasa pritiska, ili zvučnog talasa, u vodi. Kod creva sa vodom brzina signala je mnogo veća od brzine protoka vode, a mnogo brža od brzine kretanja molekula.

Isto tako svakodnevni život pruža slične efekte. Zamislite dug red automobila (oni predstavljaju elektrone) koji čekaju ispred crvenog svetla na semaforu. U nekom idealnom svetu svi vozači gledaju semafor. Čim se na semaforu promeni svetlo u zeleno, svi počinju da voze. Čak i ako brzina vožnje možda iznosi jedva 10 km/h, brzina protoka saobraćaja je ista kao brzina svetlosti. To je poslednja brzina koju ima signal. Brzina signala je mnogo veća od brzine automobila.

Ukratko, unutar metala elektroni se kreću sporo: brzina signala nije određena brzinom elektrona, već brzinom gustine elektrona, za koji se pokazuje da je usled elektromagnetnog polja. Ustvari, uobičajeno domaćinstvo snabdeveno je samo naizmeničnom strujom. U tom tipičnom slučaju u bakarnom provodniku elektroni samo osciliraju napred i nazad na veoma malom rastojanju, što verovatno želite da provetite. (**Izazov 237e**).

U tečnostima se električni naboji kreću brzinom koja se razlikuje od one u metalima, a njihov odnos nanelektrisanja prema masi je takođe različit. Svi to znamo iz iskustva. Naši **nervi** funkcionišu tako što koriste električne signale i potrebno im je da protekne samo nekoiko milisekundi da odgovore na nadražaj, čak i kada im je dužina (samo) metarska. Slična brzina se opaža unutar baterija. U svim takvim sistemima kretanje električnih naboja vrše joni. **Joni** su nanelektrisani atomi. Joni su, isto kao atomi, veliki, složeni i teški subjekti, u poređenju sa malim i lakin elektronima. Kao posledica toga, joni se kreću mnogo sporije no što to čine elektroni. Naše ograničeno vreme reagovanja je posledica kretanja jona,

U još nekim sistemima materije nanelektrisanja se kreći i kao elektroni i kao joni. Primeri toga su neonske cevi, vatrica, plazma i Sunce. To nas dovodi da se zapitamo:

KOJA KRETANJA SE DOGAĐAJU UNUTAR ATOMA?

U atomima elektroni se ponašaju čudno. Mi nastojimo da zamislimo da elektroni kruže oko jezgra (kao što ćemo kanje videti) prilično velikom brzinom, pošto je poluprečnik kruženja jako mali. Međutim, pokazalo se da kod većine atoma mnogo elektrona uopšte ne kruži oko jezgra: mnogo elektrona nema moment količine kretanja pri kruženju oko jezgra. Kako je to moguće?

Još gore, neki elektroni imaju moment količine kretanja. Ali ako ovi elektroni kruže oko jezgra kao planete oko Sunca, oni bi se kretali uz neprestano ubrzanje. Prema tome oni bi emitovali elektromagnetsko zračenje sve dok nebi pali u jezgro. Međutim, to se ne događa: atomi su stabilni! Kako je to moguće? I zbog čega su atomi iste veličine u svakom slučaju? Veličina atoma trebalo bi da zavisi od količine kretanja elektrona u njima. Ali šta određuje moment količine kretanja elektrona oko jezgra?

Uskoro ćemo otkriti da u prirodi postoji minimalna vrednost momenta količine kretanja. Ova vrednost određuje veličinu atoma. Isto tako ćemo otkriti da kretanje elektrona, u suprotnosti sa svakodnevnim objektima, nije opisano putanjom u prostoru, pa to omogućava da atomi budu stabilni. Čudna priča o atomima i njihovoj strukturi biće ispričana u kvantnoj etapi naše pustolovine (**Vol. IV, strana 140**), u delu knjige koji sledi posle ovog.

IZAZOVI I ZANIMLJIVOSTI O DISKRETNOSTI NABOJA

Kako biste eksperimentalno pokazali da električni naboji dolaze i malim delovima? (**Izazov 238s**).

* * *

Diskretnost električnih naboja podrazumeva da možemo da procenimo veličinu atoma posmatranjem galvanskog položenja metala? Kako? (**Izazov 239ny**).

* * *

Klasična elektrodinamika izražava da ne mogu postojati tačkasti električni naboji. Kako objašnjavate ovaj stav? Zatim, možete li da date odgovor da li se takvo razmišljanje može primeniti u prirodi? (**Izazov 240s**).

* * *

Kosmičko zračenje sastoji se od nanelektrisanih čestica koje pogadaju Zemlju. (Mi ćemo razmatrati ovo mnogo detaljnije u daljem tekstu.) (**Vol. V, strana 123**). Astrofizičari objašnjavaju da su ove čestice ubrzane usled magnetnog polja oko galaksije. (**Ref. 203**). Međutim, izraz za Lorencovo ubrzanje pokazuje da magnetno polje može samo da pomeni smer vektora brzine naboja, ne i veličinu. Kako priroda postiže ubrzanje uprkos tome? (**Izazov 241ny**).

* * *

Koliko bi bio potencijal Zemlje izražen u voltima ako bismo mogli da odstranimo sve elektrone iz kapi vode? (**Izazov 242s**).

* * *

Kada se napon dovede na otpornik koliko treba vremena dok se ne postigne krajnja vrednost struje, date Omovim zakonom? Prvi koji je dao odgovor na ovo pitanje bio je Pol Drude u oko 1900. godine. On je razmišljao da kada se ukluci struja, brzina elektrona poraste na $v = (eE/m)t$, gde je E električno polje, e električni naboј i m masa elektrona.¹ Model Drudea predpostavlja da porast brzine elektrona prestaje kada

¹ Pol Karl Ludvig Drude (Paul Karl Ludwig Drude, 1863. Braunschweig – 1906. Berlin) bio je fizičar, predvodio je u svom modelu elektronskog gasa u metalima – da je odnos između topotne provodnosti i električne provodnosti date na određenoj temperaturi jednak za sve metale; ovo je otprilike tačno. Drude je izmislio elipsometriju i uveo simbol c za brzinu svetlosti.

elektron udari u atom, izgubi energiju i ponovo počne da se ubrzava. Drude je zaključio da se prosečno vreme τ do sudara odnosi prema specifičnoj otpornosti kao

$$\rho = \frac{E}{j} = \frac{E}{e n v} = \frac{2m}{\tau e^2 n} \quad (92)$$

pri čemu je n gustina broja elektrona. Desna strana jednakosti ne zavisi više od E ; ona je konstantna. Drude je stoga objasnio **Omov zakon $U = RI$** (ili $\mathbf{E} = j\rho$) preko osobina materijala, predpostavljajući da je otpornost nastala usled elektrona u kretanju koji se neprestano sudaraju i ponovo ubrzavaju. Ako se uvrste brojne vrednosti za bakar ($n = 8,5 \cdot 10^{28} / \text{m}^3$ i $\rho = 0,16 \cdot 10^{-7} \Omega\text{m}$), dobija se vreme $\tau = 51 \text{ ps}$. Ovo vreme je tako kratko tako da proces uključenja prekidača može da se zanemari.

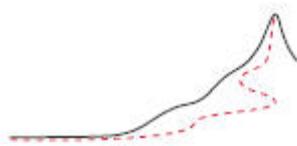
* * *

Ima li smisla da se napišu Maksvelove jednakosti ***u vakuumu?*** I električna i magnetna polja zahtevaju električne naboje da bi bila izmerena. Ali u vakuumu uopšte nema električnih naboja. A polja su definisana primenom beskrajno malih ispitnih naboja. Međutim, kao što smo već pomenuli, beskrajno mali naboji ne postoje. Zapravo, samo kvantna teorija može da reši ovu zagonetku. Jeste li sposobni da zamislite kako? (**Izazov 243d.**)

* * *

Videli smo da je u slučaju polja srednjih veličina klasična elektrodinamika dobra približnost, uprkos diskretnosti električnih naboja. Jedan sistem u praksi koristi diskrete naboje, ali se uprkos tome većina njegovih aspekata ne može opisati klasičnom elektrodinamikom. On zaslužuje posebno razmatranje: **naš mozak.**





Poglavlje 7

PRIČA O MOZGU

*Alles was überhaupt gedacht werden kann,
kann klar gedacht werden.¹*

Ludvig Vitgenštajn (Ludwig Wittgenstein),
Tractatus, 4.116

U našem nastojanju da povećamo preciznost opisa svih kretanja oko nas, vreme je da se napravi pauza, da se sedne i da se pogleda unazad. U našem hodanju do sada, koje nas je vodilo da istražimo mehaniku, opštu teoriju relativnosti i elektrodinamiku, mi smo koristili razne pojmove a da ih pritom nismo odredili. Primeri su "informacija", "memorija", "merenje", "skup", "broj", "beskrajno", postojanje", "svemir" i "objašnjenje". Svaki od njih je uobičajen, ali i važan pojam. U ovom uvodu mi ćemo pogledati sve ove pojmove i pokušati da damo neki jednostavnu, ali dovoljno preciznu odrednicu, održavajući temu što je više moguće izazovnom i zanimljivom. Na primer, možete li da objasnite vašim roditeljima šta je to pojam? (*Izazov 244e*)



Slika 164 Ludvig Vitgenštajn (Ludwig Wittgenstein, 1889–1951)

Razlog za proučavanje odrednica pojmove je prost. Potrebno nam je pojašnjavanje u svrhu dostizanja vrha Planine Kretanja, to jest potpunog opisa kretanja. Mnogi su u prošlosti izgubili svoj put usled nedostataka jasnih pojmoveva. U cilju da se izbegnu ovakve teškoće, fizika ima vodeću ulogu. Svi naučnici dele jedan rezultat; svaka *vrsta promene zapažene u prirodi oblik je kretanja*. U tom smislu, ali *samo* u tom smislu, fizičari su, posmatrajući samo kretanje, stvorili osnove za sve ostale nauke. Drugim rečima, potraga za čuvenom "teorijom o svačem" arogantan je i pogrešan izraz za traženje *konačne teorije kretanja*. Iako je poznavanje kretanja osnovno, njegov precizan opis ne podrazumeva opis "svačeg": da biste uočili razliku, pokušajte samo da rešite bračne probleme tako što ćete koristiti Šredingerovu (Schrödinger) jednakost.

S obzirom na osnovnu važnost kretanja, potrebno je da u fizici svi iskazi budu *precizni* što je više moguće. Iz tog razloga mnogi su mislioci proveravali iskaze u fizici uz posebnu pažnju, koristeći sve zamislive kriterijume. *Fizika je precizno klepetanje radoznalih ljudi o stvarima koje se kreću*. Šta uopšte znači preciznost? Značenje se pojavljuje pošto pitamo: koje sposobnosti zahteva takvo klepetanje? Možda želite da dopunite popis pre no što pročitate. (*Izazov 245e*)

Sposobnost potrebna da se govori predmet je istraživanja još i danas. Način na koji je ljudska vrsta postigla sposobnost čakanja o kretanju proučavaju biolozi evoucije. Dečji psiholozi proučavaju kako se sposobnost razvijala kod pojedinaca ljudskog roda.

Psiholozi, neurolozi i naučnici za računare bave se načinom na koji mozak i čula to omogućavaju; lingvisti su zaokupljeni svojstvima jezika kojeg koristimo, matematičari i filozofi nauke proučavaju opšte osobine

¹ "Sve što se uopšte može zamisliti može se zamisliti jasno." Ovaj i drugi citati Ludviga Vitgenštajna (Ludwig Wittgenstein) je iz podjednako kratke i čuvene knjige *Tractatus logico-philosophicus*, napisane 1918. godine, prvi put objavljene 1921. godine; ona je otada prevedena na mnoge druge jezike

iskaza o prirodi. Svi ovi alati iz polja istraživanja bitni su za razvoj fizike, razumevanje kretanja i specifikaciju neodredjenih gore nabrojanih pojmoveva. Polja istraživanja uobličavaju sledeća istraživanja.

RAZVOJ

Kokoška je samo način na koji jaje pravi druga jaja.

Semjuel Batler, *Life and Habit.*

Razvoj ljudske vrste rezultat je dugačke priče koja je ispričana u mnogom izanrednim knjigama. ([Ref. 204](#)) Sažeta tabela istotije svemira u koju je bio uključen razvoj je data u objašnjavanju opšte teorije relativnosti ([Vol. II, strana 179](#)). Skoro neverovatan lanac događaja koji je doveo do našeg postojanja uključuje stvaranje atoma, stvaranje galaksija, zvezda, planeta, Meseca, atmosfere, okeana, prvih ćelija, vodenih životinja, kopnenih životinja, sisara, primata, ljudi, predaka, porodice i na kraju nas samih. ([Ref. 205](#)).

Način na koji smo stvoreni po ovom redosledu, od atoma koji su bili rasipani po prostoru, bili sakupljeni na Zemlji, postajali organizovani da stvore organske materije, a potom čoveka, jedan je od primera kretanja koji nadahnjuju strahopoštovanje. Sećanje i razmišljanje o ovom kosmičkom redosledu kretanja s vremena na vreme može da bude iskustvo koje obogaćuje. ([Izazov 246e](#)).

Osim toga, bez biološkog razvoja mi ne bismo mogli da govorimo o kretanju uopšte; samo tela koja se kreću mogu da proučavaju kretanje tela. Bez razvoja mi ne bismo imali mišiće, čula, nerve ni mozak. A bez mozga mi ne bismo bili sposobni da mislimo i govorimo. Razvoj je bio takođe izvor detinjstva i rsdoznalosti. U ovom poglavljju i onima koja slede mi ćemo otkriti da mnoge pojmove klasične fizike prihvata već svako malo dete, u iskustvima koje ono stiče tokom odrastanja.

DECA, ZAKONI I FIZIKA

Fizičari takođe imaju zajedničku stvarnost. Osim toga, stvarno ne postoji mnogo razlika između fizičara i šizofreničara.

Rihard Bandler (Richard Bandler) ([Ref. 206](#))

Tokom detinjstva svako je fizičar. Kada pratimo svoja sećanja unazad kroz vreme što više možemo, dostići ćemo izvesnu fazu, koja se nalazi pre rođenja, koji predstavlja polaznu tačku ljudskog iskustva. ([Ref. 207](#)). U tom magičnom trenutku osetili smo nešto da osim nas samih postoji i nešta drugo. Prvo opažanje koja smo načinili o svetu, tokom vremena dok smo još u materici, spoznaja je da možemo da razlikujemo dva dela: sebe samog i ostatak sveta. Ovo razlikovanje je primer – verovatno prvi – od velikog broja “zakona” prirode na koje ćemo se spoticati tokom našeg života. Biti fizičar je počelo tada. I nastavilo se. Otkrivanjem sve više različitosti, mi unosimo sistem u haos iskustava. Brzo otkrivamo da je svet načinjen od povezanih delova, kao što su mama, tata, mleko, zemlja, igračke itd. Delimo delove na objekte i na slike.

Kasnije, kada naučimo da govorimo, uživamo u korišćenju težih reči, pa okolinu nazivamo okruženje. ([Vol. I, strana 27](#)). U zavisnosti od konteksta, nazivamo celinu koju smo sami stvorili zajedno sa okruženjem (fizički) **svet**, (fizički) **svemir**, **priroda** ili **kosmos**. Ovi pojmovi međusobno se ne razlikuju u ovom hodanju;¹ oni su svi uzeti da bi označili zbir svih delova i njihove odnose. Oni su prosto uzeti ovde da bi označili **celinu**.

Otkrićem prvih razlika u prirodi započinje niz sličnih otkrića koje traje tokom celog našeg života. Mi izdvajamo brojne različitosti koje su moguće u našem okruženju, u našem telu i u raznim vrstama njihovog međusobnog delovanja. Sposobnost razlikovanja bitna je sposobnost koja nam omogućava da menjamo naše viđenje od onog da je svet **haos**, to jest veliki nered, do onog da je svet **sistem**, to jest uređen skup, u kojem su delovi povezani na posebne načine. ([Izazov 247s](#)). (Ako volite preciznost, možete razmišljati da li je izbor dve mogućnosti “haos” i “sistem” jedini moguć.)

¹ Razlika u njihovoj upotrebi može se zaključiti iz njihovog jezičkog porekla. “World” je izveden iz staronemačkog “wer” – osoba i “ald” – star – i u početku je značilo “životni vek”. “Universe” je iz latinskog i označava jednog - “unum”- koji vidi da se obrće – “vertere”, a odnosi se na zvezdano noćno nebo koje se obrće oko polarne zvezde. “Natiue” je došlo takodje iz latinskog, i znači “ono što je rodjeno”. “Kosmos” je od grčkog “κόσμος” i početno značenje označava “red”. (Ovo se odnosi samo na reči u engleskom originalu).

Osim toga, zapažanje razlika između sebe samog i okruženja ide ruku pod ruku sa prepoznavanjem da ne samo da nismo nezavisni od okruženja, već da smo čvrsto povezani sa njim na razne i neočekivane načine: možemo padati, možemo biti povređeni, osećamo toplotu, hladnoću itd. Ovakve povezanosti nazivaju se **interakcija**. Interakcije izražavaju opažanja da iako se delovi prirode mogu razlikovati, oni nisu izolovani. (**Strana 233**). Drugim rečima, interakcije opisuju razlike između celine i zbira njenih delova. Nijedan deo ne može da bude određen bez njegove povezanosti sa okruženjem. (Da li se slažete?) (**Izazov 248e**).

Interakcije nisu proizvoljne; uzmite samo za primer dodir, miris ili vid. Ovi se razlikuju po dohvatu, jačini i posledicama. Karakteristične spoljašnosti interakcija nazivamo **uzorak prirode** ili **osobina prirode** ili **pravilo prirode** ili ekvivalentno tome, njihovim istorijskim, ali nesretnim imenom, “**zakoni**” **prirode**. Pojam “zakon” naglašava njegovu opštu valjanost; na nesreću, on takođe podrazumeva oblikovanje, cilj, prinudu i kažnjavanje zbog nepridržavanja. Međutim nikakvo oblikovanje, cilj ili prinuda nisu sadržani u osobinama prirode, niti je moguće nepridržavanje. Dvomislen pojam “zakoni prirode” popularisao je Rene Dekart (Rene Decartes, 1596, La Haye en Touraine – 1650. Stockholm) i bio je prihvaćen sa oduševljenjem pošto je davao težinu zakona države – koji su bili u ono vreme daleko od savršenih – i onima iz drugih organizacija – koji su bili retki. Izraz je antropomorfizam skovan u jednom autorativnom pogledu na svet, sugerše da priroda “upravlja”. Prema tome, ovaj pojam ćemo koristiti što je moguće redje u našem hodanju, a ako to i učinimo, biće uvek pod “ironičnim” znacima navoda. Priroda se ne može prisiliti ni na koji način. “Zakoni” prirode nisu obavezni ni za prirodu ni za njene delove, oni su obavezni ne samo za fizičare, već i za sve ostale ljudе; uzorci prirode primoravaju nas da izvesne opise koristimo, a da druge odbacimo. Uvek kada se kaže da “zakoni upravljaju prirodom” kazana je besmislica (ili se traže pare); pravi izraz je da **pravila opisuju prirodu**.

Tokom detinjstva naučimo da razlikujemo interakcije sa okruženjem (ili **percepcije**); neke su zajedničke sa drugima i nazivaju se **opažanja**, druge su jednoznačno lične i i nazivaju se **osećaji**.¹ Još strožiji prilaz ovom “zajedništvu” koristi se za podelu sveta na “stvarnost” i “mašt” (ili “snove”). Naše hodanje će pokazati – skoro pri kraju – da ova razlika nije suštinska, pod uslovom da ostanemo verni u potrazi za za sve većom preciznošću: naći ćemo, na iznenadenje, da opis kretanja kojeg tražimo ne zavisi od toga da li je svet “stvaran” ili “iz mašte”, “lični” ili “opšti”. (**Vol. VI, strana 305**). Osnovni principi kretanja isti su na javi i u snu. Uprkos tome, isti ti principi omogućavaju nam da ih razlikujem.o

Ljudi uživaju u svojoj sposobnosti da razlikuju delove, koji se u drugom kontekstu nazivaju takođe **detalji**, **aspekti** ili **entiteti**, i uživaju u svojoj sposobnosti da ih povezuju ili da opažaju **povezanosti** između njih. (**Ref. 209**). Ovu aktivnost ljudi nazivaju **klasifikacija** ili **razvrstavanje**. Boje, oblici, objekti, majka, mesta, ljudi i dete neki su od detalja koje čovek prve otkriva.

Naša anatomija snabdela nas je praktičnim alatom koji čini efikasnim korišćenje ovih otkrića: **pamćenjem**. Ono skladišti veliku količinu unosa što se kasnije naziva **iskustvo**. Pamćenje je je alat kojeg koriste kako mlađa, tako i starija deca radi organizovanja sopstvenog sveta i da postignu izvesnu sigurnost u haosu života.

Upamćena razvrstavanja nazivaju se **pojmovi**. Žan Pijaže² (Jean Piaget) bio je prvi istraživač koji je opisao uticaj okruženja na pojmove koje stvara svako dete. Korak po korak, deca uče da su objekti postavljeni u

¹ Dete koje nije sposobno da načini ovu razliku izmedju percepcija – i koje je stoga nesposobno da laže – skoro sigurno se razvija ka **autizmu**, ili već pati od njega, kao su pokazala poslednja psihološka istraživanja. (**Ref. 208**)

² Pregled porekla psihologije razvoja dao je J. H. Flavell, *The Developmental Psychology of Jean Piaget*, 1963. Ovaj rad objedinjuje sva opažanja Žana Pijaže (Jean Piaget, 1896. Neushatel – 1980. Geneva), centralne ličnosti u ovom polju. On je bio prvi istraživač koji je posmatrao razvoj deteta kao što fizičar posmatra prirodu: pažljivo posmatranje, pravljenje beležaka, izvodjenje eksperimenata, izdvajanje hipoteza, njihova provera, izvodjenje teorija. Zadivljujući broj njegovih radova, zasnovanih na opširnim posmatranjima, obuhvataju skoro sve stepene razvoja deteta. Njegov glavni doprinos je detaljan opis stepena razvoja sposobnosti spoznaje ljudi. On je pokazao da sve sposobnosti spoznaja dece, formisanje osnovnih pojmoveva, njihov način razmišljanja, njihova sposobnost govora itd, potiče od neprestane interakcije izmedju dece i okruženja.

Osim toga, Pijaže opisuje način na koji deca prvo nauče da su različiti od spoljnog okruženja i kako zatim uče o fizičkim osobinama sveta. Od njegovih mnogih knjiga koje se odnose na fizičke pojmove, dve koje se posebno odnose na teme iz našeg hodanja su J. Piaget, *Les notions de mouvement et de vitesse chez l'enfant*, Presses Universitaires de France, 1972 i *Le développement de la notion de temps chez l'enfant*, Presses Universitaires de France, 1981. Ova poslednja je rođena posle sugestije Alberta Ajnštajna. Ove tekstove trebalo bi da budu deo čitanja svakog fizičara i filozofa nauke koje interesuju ova pitanja.

prostoru, da prostor ima tri dimenzije, da objekti padaju, da sudar proizvodi zvuk itd. Pijaže je pokazao da prostor i vreme nisu *a priori* pojmovi, već da potiču iz interakcija svakog deteta sa njegovim okruženjem.

Oko vremena kada dete polazi u školu, ono počinje da shvata pojmove **neprekidnost supstance**, to jest tečnosti i pojam **nasuprot**. Samo na ovom stepenu razvoja njegovo subjektivno iskustvo postaje **objektivno**, uz apstraktno razumevanje. (*Ref. 211*). Još kasnije, dečji opis sveta prestaje da bude animistički; pre ovog koraka Sunce, potok i oblak su **živi**. Ukratko, tek posle puberteta ljudi postaju spremni za fiziku, nauku o kretanju.

Premda je svako bio fizičar u svojim mladim danima, većina ljudi ostaje na **Galilejevoj** fizici, u kojoj je predpostavljeno da je materija neprekidna i da je prostor ravan. U postojecoj avanturi ni čemo oticiti mnogo dalje, korišćenjem svih mogućnosti igračke kojim nas je proroda obdarila: mozgom.

*Iskustvo je ime kojeg svako daje svojim greškama
Oskar Vajld, Lepeza gospode Vindermere.*

TABELA 18 Neki aspekti ljudskog mozga

Aspekt	Detalji	Ekvivalent računara
Hardver		
Jako kratko pamćenje	5 do 9 pojmove	keš memorija
Hipokampus	otkriće novina, prostorno pamćenje učenje	RAM i fleš memorija
Amigdala	osećanja, učenje	prioritetni raspored operativnog sistema
Ventral stratum, snabdevač dopaminom i opioidom	sistem nagrađivanja	prioritetni raspored operativnog sistema
Suprachiasmatic nucleus	kontrola dan-noć	kontroler "sleep moda"
Neuroni u moždanoj kori	žene oko $19 \cdot 10^{19}$, muškarci oko $23 \cdot 10^9$	hard disk i procesor
Glialne ćelije u mozgu	otprilike isto koliko i neurona	napojna jedinica i struktura
Broj raspadnutih neurona	žene $e^{3,05-0,00145 \text{ starost}/}$ muškarci: $e^{3,2-0,00145 \text{ starost}/}$	ogrebotine na hard disku
Razmena impulsa između obe polovine mozga	$4 \cdot 10^9$ imp/s	interna brzina sabirnice
Sinapse po neuronu	10^4	
Ukupna veza sinapsi	oko $2 \cdot 10^{14}$	memorijska ćelija
Ulazne putanje od oka	oko $2 \cdot 10^6$	veza sa kamerom
Ulazne putanje od uha	oko $2 \cdot 3000$	veza sa mikrofonom
Ulazne putanje od kože, usta i nosa	oko $0,5 \cdot 10^6$	iterfejs sa davačima
Izlazne putanje (mišići, organi)	oko $1,5 \cdot 10^6$	iterfejs pogona
Kapacitet izlaznih signala (ukupno 500 impulsa po putanji)	oko 50 MB/s	izlazni opseg
Neozbiljni – verovatno preslabi – procena kapaciteta obrade	10 PFlop	nekoliko desetina super računara
Tipična masa (Ajnštajnov mozak)	1,230 kg menja se od 0,7 do 2,0 kg	1 do 5000 kg
Potrošnja snage (prosek)	1600 do 2200 kJ/dan ili 18 do 25 W (uz snabdevanje krvlju od 750 ml/min)	20 W do 20 kW

Pijaže je takođe opisao kako se kod dece razvija matematička i govorna inteligencija iz senzomotorne, praktične inteligencije, koja sama potiče iz navika i stečenih povezanosti za konstrukciju novih pojmoveva. Praktična inteligencija zahteva sistem refleksa koje obezbeđuje anatomski i morfološki sastav našeg organizma. Stoga njegov rad detaljno pokazuje da je naša moć matematičkih opisa sveta zasnovana, iako indirektno, na fizičkoj interakciji našeg organizma sa svetom. Neka od njegovih mišljenja o važnosti jezika prilikom razvoja u današnje vreme su izmenjena, naročito kroz ponovljeno istraživanje Lava Vigotskog (*Ref. 210*), koji tvrdi da sve više mentalne sposobnosti, osećanja, kolektivno pamćenje, racionalno razmišljanje, dobrovoljna pažnja i samosvesnost, nisu urodjene, već naučene. Ovo učenje se događa kroz jezik i kulturu, a posebno kroz sam razgovor. Na web strani www.piaget.org, koju održava Jean Piaget Society možete naći detalje.

Vek trajanja	130 godina	često samo 2 godine
Veličina	0,14 m do 0,17 m 0,09 m	od nekoliko cm ³ do 1 m ³
Softver i obrada		
Učenje	zamena jačine sinapsi dugotrajnim potenciranjem	aktiviranje, klasifikacija, memorisanje
Dubok san i čuvanje podataka	struktorno zapisivanje iz hipotalamus u moždanu koru	čišćenje i rezervna kopija hard diska
REM spavanje (brzo kretanje očiju i snovi)	procesuiranje offline	sabijanje podataka u batch procesu

ELEKTRONIKA POLIMERA

Mozak je električni uređaj. To je konačno pokazano 1924. godine kada je neurolog Hans Berger (1873. Neuses – 1941. Jena) snimio prvi **elektroencefalogram** i nazvao ga tako. Savremen elektroencefalogram prikazan je na *slici 167*.¹ Uz više detalja, mozak je elastičan, bez prisustva metala, kratkog života, nepouzdani uređaj od polimera. Slučajno je, ali sve te osobine su mu zajedničke sa svim elektronskim uređajima od polimera, bili oni živi ili ne. Veća pouzdanost je glavni razlog da je umesto toga komercijalna elektronika izrađena na bazi silicijuma.

Elektronika polimera koja obrazuje mozak organizovana je slično računaru. Neki detalji su prikazani u **Tabeli 18**, na *slici 165* i *slici 166*. ([Ref. 212](#)). Premda su funkcionalni blokovi mozga i računara začuđujuće slični, specifični mehanizmi koje oni koriste potpuno su različiti.

Mozak se sastoji od mnogobrojnih delova koji su **namenjeni** za posebne zadatke i od **zajedničkog** računarskog dela, sive mase. ([Ref. 213](#)). Podela između namenskog i posebnog je skoro pola – pola. Isto tako je moć računara u savremenim računarima podeljena na takav način; na primer, grafička kartica je često snažna isto kao i centralna procesna jedinica (CPU).

Za jednu ili dve generacije ovaj odeljak bio bi naslovljen “Kako da se napravi mozak”. Nažalost, ne postoji još uvek dovoljno znanja da bi se ovaj cilj realizovao. Možda vi možete da pomognete u toj potrazi.

ZAŠTO MOZAK?

*Denken ist bereits Plastik.*²

Joseph Beuys ([Ref. 214](#))

Mozak postoji da bi upravljao kretanjem organizma. Što je kretanje organizma složenije, to je mozak veći. Živa bića koja se ne kreću unaokolo, kao što je drveće ili maslačak, nemaju mozak. Živa bića koja prestanu da se kreću unaokolo, kao što su morske prskalice (*Ascidiae* ili *Asidiaceae*) svare svoj mozak kada se pričvrste na stenu u moru.

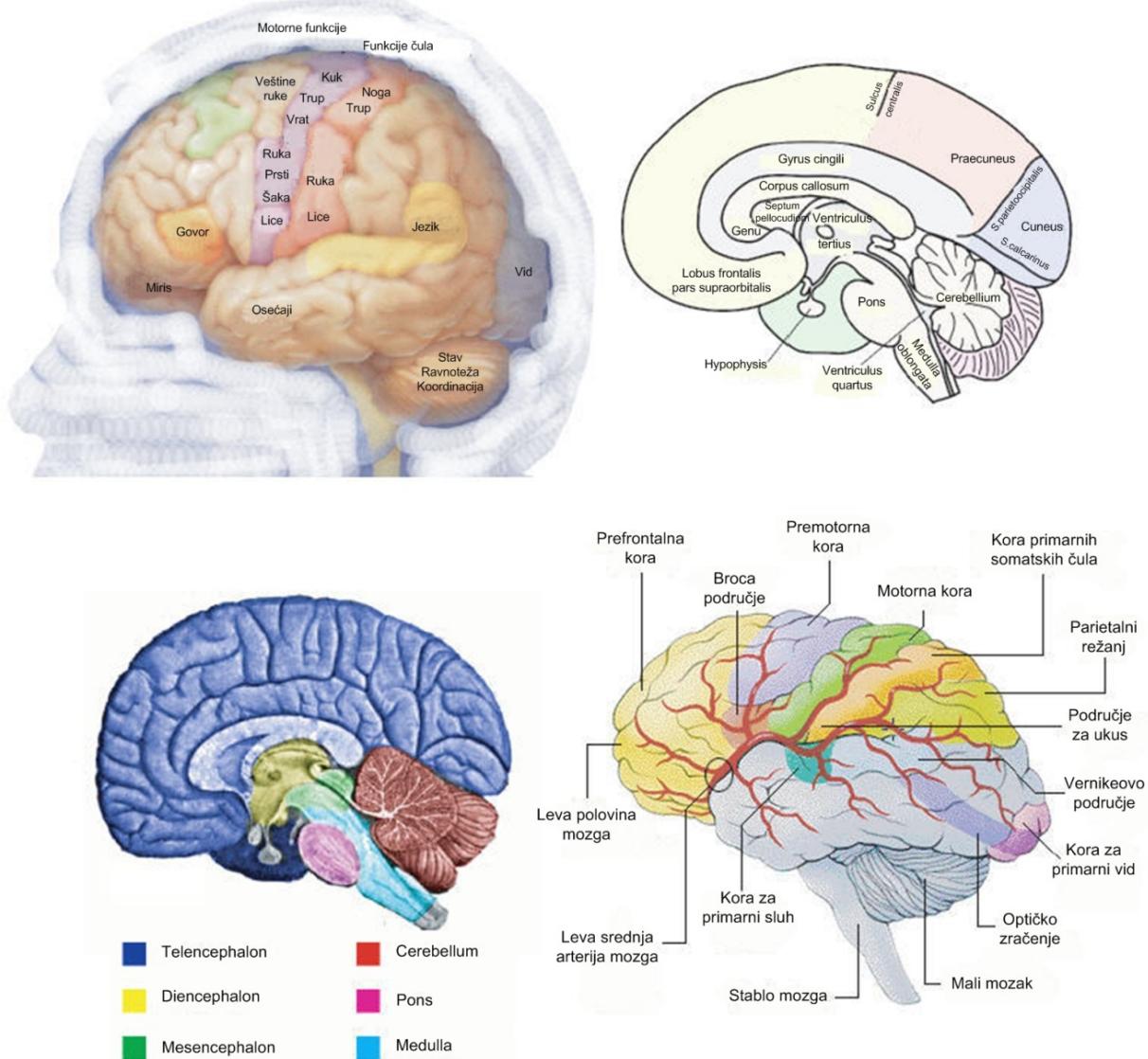
Mozak – zajedno sa nekim delovima centralnog nervnog sistema – upravlja kretanjem tako što obrađuje ulaze koje mu daju različita čula i šalje rezultat obrade do raznih mišića u telu. Brojna posmatranja pokazala su da se ulazi iz čula u mozgu obrađuju, odnosno razvrstavaju, skladište i ponovo dobijaju. Znatne ozlede mozga mogu da uzrokuju da se izgubi ove funkcije delimično ili u potpunosti. ([Ref. 215](#)). Među najvažnijim posledicama ovih osnovnih sposobnosti mozga su razmišljanje i govor. Sve sposobnosti mozga potiču od konstrukcije, to jest od “hardvera” mozga. ([Ref. 216](#)).

Sistem koji je sposoban da izvrši razvrstavanje podataka iz primljenih ulaza naziva se **klasifikator** i za njega se kaže da ima sposobnost da **uči**. ([Ref. 217](#)). Naš mozak ima tu sposobnost zajedničku sa mnogim složenim sistemima; mozak većine životinja, ali takođe i izvesni algoritmi za računare, kao što je tazozvana “neutralna mreža”, primjeri su takvih klasifikatora. Klasifikatori se proučavaju u mnogim poljima nauke, od biologije do neurologije, od matematike do nauke o računarima. ([Ref. 218](#)). Svi

¹ U električnim signalima koje stvara mozak razlikujemo **nepravilne signale** nastale usled obrade podataka, **teta talase**, uglavnom tokom pažnje uz učestanost 14 do 30 Hz, **alfa talase** tokom opuštenosti uz učestanost izmedju 8 i 13 Hz, beta talase tokom početka spavanja i tokom brzih pokreta očiju (REM faza sna), uz učestanost 3 do 7 Hz i delta talase nastale tokom dubokog sna, uz učestanost izmedju 0,5 i 2 Hz.

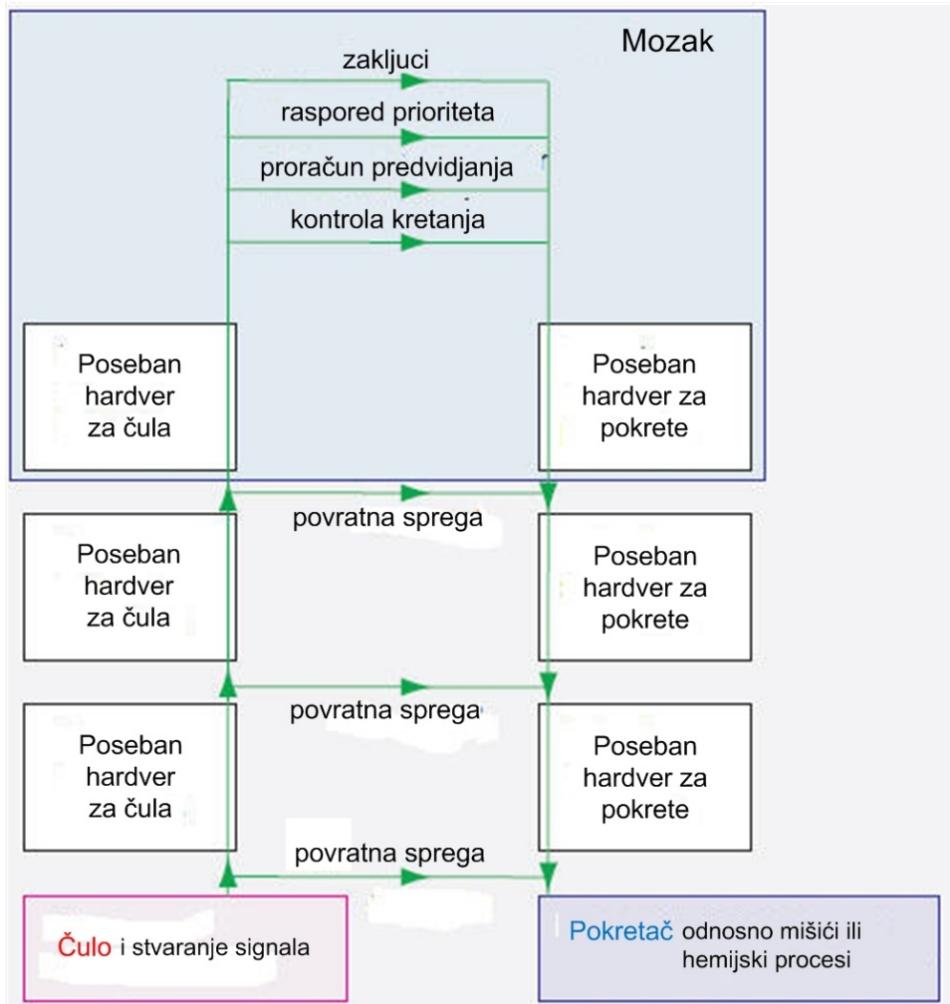
² “Razmišljanje je već skulptura.” Jozef Bojs (Joseph Beuys, 1920. Krefeld – 1986. Dusseldorf) bio je poznat vajar.

klasifikatori imaju dvostruku sposobnost, da razdvajaju i da spajaju: i obe sposobnosti osnovne su za razmišljanje.



Slika 165 Delovi i bočni vid ljudskog mozga, sve u lažnim bojama (slike WikiCommons)

Svi klasifikatori su sastavljeni od malih **jedinica razvrstavanja**, ponekad od njihovog velikog broja. Obično najmanja jedinica može da razvrsta ulaz samo u dve različite grupe. Veći broj ovakvih jedinica, često se nazivaju "neuroni" prema analogiji sa mozgom, omogućava da klasifikator izvršava mnogo složenija razvrstavanja. ([Ref. 220](#)). Klasifikatori prema tome rade koristeći manje ili više prefinjene kombinacije pojmove "isto" i "različito". Takvu kasifikaciju predstavlja kada dete razlikuje crven i plav objekt; razlikovanje kompaktne i nekompaktne grupe merila simetrije u kvantnoj teoriji je mnogo detaljnije razvrstavanje, ali počiva na istoj osnovnoj sposobnosti.



Slika 166 Opšta struktura nervnog sistema sa tipičnim petljama povratnih sprega i sa primerom njegovog posebnog hardvera za čula.



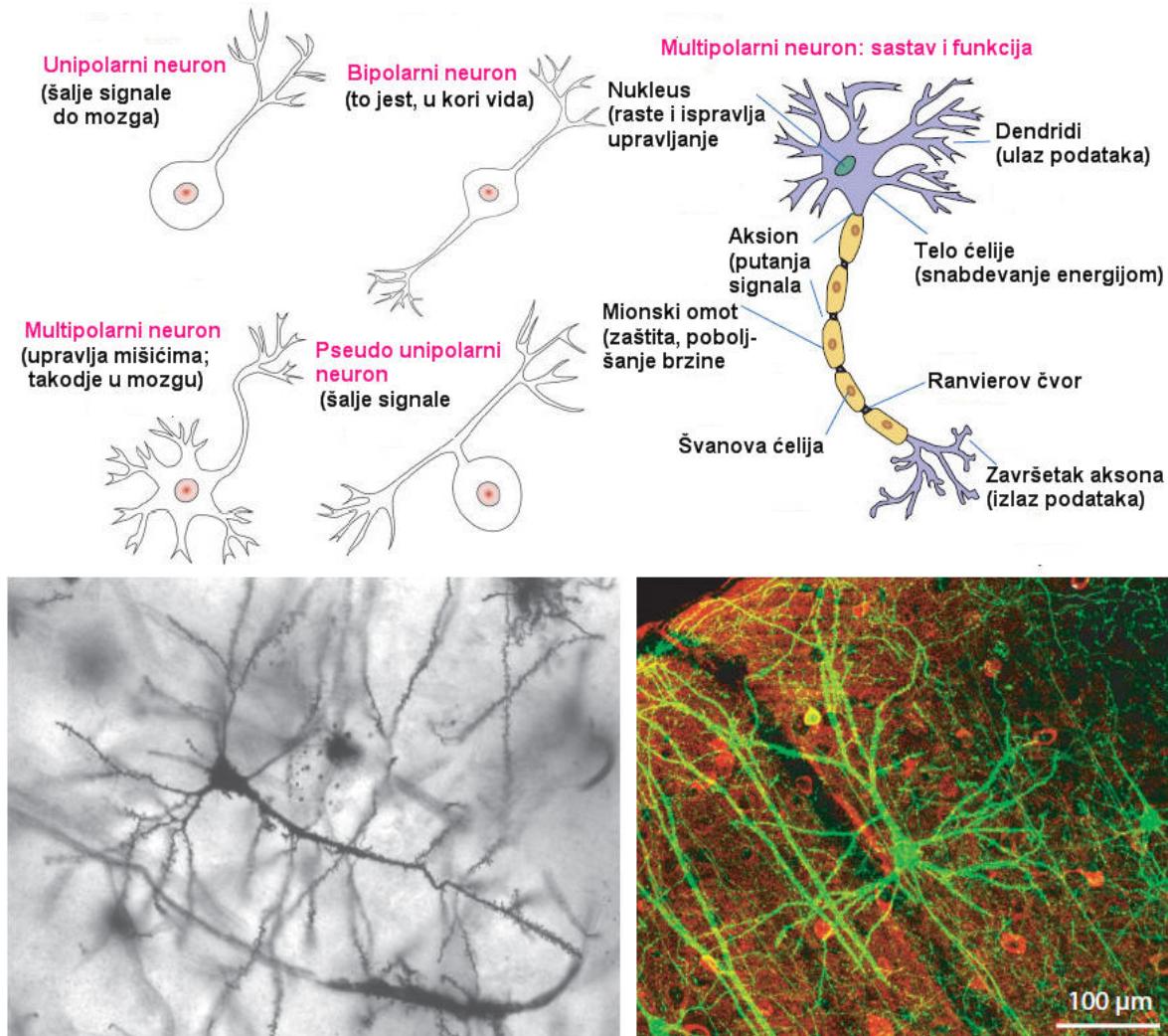
Slika 167 Savremen elektroencefalogram, snimljen sa više tačaka na glavi. Izmereni naponi iznose oko 0,1 mV (© Wikimedia).

NEURONI I MREŽA

Jedinice razvrstavanja u mozgu nazivaju se **neuroni**. Neuroni su posebne ćelije koje proizvode, obrađuju i prenose električne signale. Većina jedinica razvrstavanja u mozgu su **višepolarni** neutoni. Kao i svaka jedinica razvrstavanja i oni imaju ulazne i izlazne kanale. I kao svaka jedinica klasifikacije, takvi neuroni proizvode samo dva različita izlazna signala: ili električni šiljak određene visine i trajanja, ili ne stvaraju signal uopšte.

U svim klasifikatorima najmanje jedinice razvrstavanja međusobno sarađuju sa svim ostalim. Obično, ali ne i uvek, ove interakcije su kanaliseane preko veza. Veze kod neurona su dendriti i aksioni. Potpuna konfiguracija klasifikatora, prema tome, čini **mrežu**. U takvim vezama signali se razmenjuju putem pokretnih objekata, kao što su elektroni ili fotonii. Stoga dolazimo do zaključka da sposobnost mozga da razvrstava fizički svet – na primer da razlikuje objekte u pokretu koji su u interakciji međusobno – potiče usled toga što se i sam mozak sastoji od objekata u pokretu, a koji su u interakciji međusobno. Ljudi ne bi postali tako uspešna životinska vrsta bez ugrađenog snažnog klasifikatora. A samo zbog kretanja unutar našeg mozga omogućemo nam je da uopšte govorimo o kretanju.

Mnogi istraživači odredili su delove mozga koji se koriste za izvođenje različitih intelektualnih zadataka. Takvi eksperimenti su bili mogući korišćenjem snimanja magnetnom rezonansom i sličnim tehnikama snimanja. (**Vol. V, strana 123**). Drugi istraživači su proučavali kako iz strukture mozga može da se modelira proces razmišljanja. Savremena neurologija još uvek redovno pravi napretke. Osim toga, neurolozi su ukinuli verovanje da je razmišljanje više od fizičkog procesa. Pogrešno verovanje nastalo je od različitih ličnih strahova, što možda želite da proverite samoispitivanjem. Strah i verovanje će nestati tokom vremena. Kako biste se vi razmatrali da li je razmišljanje samo fizički proces? (**Izazov 249s**).



Slika 168 Pregled četiri glavne vrste neurona, šematski dijagram multipolarnog neurona i dve fotografije obojenog tkiva mozga (© Wikimedia, Wikimedia, MethoxyRoxy, Wei-Chung Allen Lee & al.)

Evolucija je razvila mozak sa svim njegovim mogućnostima kao alat koji pomaže svakoj osobi da pronađe sopstven put kroz izazove koje priređuje život. Ljudski mozak ima takvu veličinu iz dva razloga: ulazi iz čula su ogromni i njihova obrada je komplikovana. Još sažetije, mozak ima toliku veličinu da bi obradio sve ono što vidimo. Količina informacija koju dobija od očiju zaista je velika.

ŠTA JE INFORMACIJA

Ove misli nisu dolazile ni u kakvom verbalnom obliku. Ja uopšte retko razmišljam u rečima. Misao dođe, a ja ću pokušati da je izrazim rečima kasnije.

Albert Einstein ([Ref. 221](#))

Mi smo započeli našu pustolovinu iskazom da proučavanje fizike znači govoriti o kretanju. **Gоворити** znači prenositi informaciju. Može li informacija da se izmeri? Možemo li izmeriti napredak fizike na takav način? Da li je svemir sastavljen od informacija? Da bismo odgovorili na ovo pitanje, započećemo sa odrednicom.

- Informacija je rezultat razvrstavanja.

Razvrstavanje je odgovor na jedno ili na više da-ne pitanja. Takva pitanja da-ne najjednostavnija su moguća razvrstavanja; njih obezbeđuje osnovna **jedinica** razvrstavanja, od koje mogu da se izgrade sve ostale. Prema tome,

- Informacija se meri prebrojavanjem sadržanih da-ne pitanja, to jest brojem **bitova** koji dovode do njih

Primeri vrednosti informacija dati su u **Tabeli 19**.

Da li ste u mogućnosti da kažete koliko je bitova potrebno da se odredi mesto u kojem živite? Očigledno je da broj bitova zavisi od skupa pitanja kojim se počinje; to mogu biti imena svih ulica u gradu, skup svih koordinata na površini Zemlje, imena svih galaksija u svemiru, skup svih kombinacija slova iz adrese. Šta mislite, koji je metod najefikasniji? (**Izazov 250s**). Varijacije metoda kombinacije koristi se u računaru. Na primer, priča o ovoj pustolovini zahteva oko devet hiljada miliona bitova u informaciji. Ali pošto sadržaj informacije u priči zavisi od skupa pitanja kojima se počinje, to je nemoguće da se na takav način odredi precizno merenje informacije.

TABELA 19 Neke izmerene vrednosti informacija

Vrsta informacije	Količina
Prosečan broj reči koje izgovori muškarac tokom dana	oko 5000
Prosečan broj reči koje izgovori žena tokom dana	oko 7000
Bitovi koje obrade uši	1 do 10 Mbit/s
Ćelije osetljive na svetlost po mrežnjači (120 miliona štapića i 6 miliona čepića	$126 \cdot 10^6$
Bitovi koje obrade oči	1·10 Gbit/s
Broj reči izgovorenih tokom života	10^9
Slova (osnovni parovi) u haploidu DNA čoveka	$3 \cdot 10^9$
Broj impulsa koji se razmenjuje između obe polovine mozga	$4 \cdot 10^9$
Bitovi na kompakt disku	$6,1 \cdot 10^9$
Neuroni u ljudskom mozgu	10^{10} do 10^{11}
Odštampane reči u (različitim) knjigama na svetu (oko $100 \cdot 10^6$ knjiga sa po 50000 reči)	oko $5 \cdot 10^{12}$
Bitovi u memoriji ljudskog mozga	$> 10^{16}$
Slikovne tačke (pixeli) viđene tokom života $3 \cdot 10^9$ (vek trajanja) $\times 2/3$ (budan) $\times 10^6$ (vezu s mozgom)/15 (brzina oka). (Ref.252).	
Bitovi informacija obrađenih tokom života (sve navedeno \times oko 32)	10^{19}

Jedini način da se informacija precizno izmeri je da se uzme najveći mogući skup pitanja koji se može postaviti o sistemu, pa da se uporedi sa onim što već znamo o tom sistemu. U tom slučaju količina nepoznatih informacija naziva se entropija, pojam sa kojim smo sreli ranije. (**Vol. I, strana 283**). Pomoću ovog pojma možete da zaključujete sami, na primer, da li je moguće izmeriti napredak fizike. (**Izazov 251s**).

Pošto je razvrstavanje ili kategorizacija aktivnost mozga i drugih sličnih klasifikatora, informacija, kako je ovde definisana, je pojam koji se odnosi na rezultat aktivnosti ljudi i ostalih klasifikatora. Ukratko, informacija se stvara kada se govori o svemiru.

Informacija je rezultat razvrstavanja. To podrazumeva da sam svemir **nije isto** što i informacija. Postoji rastući broj publikacija koje se zasnivaju na suprotnom gledištu; međutim, to je pojmovni kratak spoj. Svaki prenos informacije podrazumeva interakciju; govoreći fizički, to znači da je svakoj informaciji potrebna energija za prenos i materija za čuvanje. Bez bilo čega od ta dva, informacija ne postoji. Drugim rečima, svemir sa svojom materijom i energijom, morao je da postoji pre no što je bio moguć prenos informacije. Reći da je svemir načinjen od informacije, ili da je on informacija, toliko je smisleno i tačno kao da se kaže da je svemir sastavljen od paste za zube.

Cilj fizike je da se pruži kompletno razvrstavanje svih vrsta i primera kretanja, drugim rečima, da se sazna sve o kretanju. Da li je to moguće? Odnosno, jeste li vi sposobni da nađete dokaz protiv ovog nastojanja? (**Izazov 252s**)

ŠTA JE PAMĆENJE?

Mozak je moj drugi omiljeni organ

Vudi Alen

Pamćenje je zbirkica zapisa percepcija. Proizvod takvih zapisa je suštinski aspekt opažanja. Zapis može da se sačuva u ljudskom pamćenju, to jest u mozgu, ili u mašinskom pamćenju, kao u slučaju računara, ili u oblektu pamćenja, kao što su beleške na papiru. Bez pamćenja nebi postojala nauka, niti život – pošto je život zasnovan na zapisima unutar DNK – a posebno nije zabavno, što dokazuje tužan život onih koji su izgubili pamćenje. (**Ref. 215**)

Većina životinja i ljudi imaju pamćenje, pošto pamćenje pomaže da se kreću na način koji obezbeđuje maksimalno razmnožavanje i preživljavanje. Pamćenje je pronađeno kod svih sisara, ali isto tako i kod insekata i puževa. Dobro poznati morski puž *Aplysia californica* ima pamćenje – on to pokazuje uslovljavanjem, kao pas Pavlova – premda ima samo 20.000 neurona. Eksperimenti potvrđuju da je individualno **dugotrajno** pamćenje uskladišteno u snazi neuronskih veza, sinapsama. Ovaj iskaz je dao kanadski psiholog Donald Heb (Donald Hebb) 1949. godine. Te godine je Heb je odredio fizičko izvođenje opažanja psihologa Zigmunda Froyda (Sigmund Freud) i Vilijama Džemsa (William James) iz 1890-ih godina, koji su već tada zaključili da je pamćenje nešto kao jačanje ili slabljenje veza unutar mozga. Ukratko, zapažanje i učenje, i sve ono što nazivamo pamćenje, zabeleženo je u sinapsama.¹

Očigledno je svaki zapis jedan objekt. Ali pod kojim uslovima se neki objekt karakteriše kao zapis? Potpis može biti zapis u sporazumu o komercijalnim transakcijama. Mala usamljena tačka mastila nije zapis, jer se ona može pojaviti i greškom, na primer kao slučajna mrlja. Nasuprot tome, malo je verovatno da mastilo treba da padne na papir tačno sa oblikom potpisa. (Uprošćeni potpisi fizičara obično su izuzeci.) Jednostavno govoreći, **zapis** je svaki objekt koji se ne zaboravlja, kako bi mogao da bude ponovljen. Još preciznije, zapis je objekt ili situacija koja se ne može ni pojaviti ni nestati usled greške. Naše lično pamćenje, bilo da su to slike ili glasovi, ima iste osobine; obično možemo da se pouzdamo u njega, pošto je toliko detaljno da ne može pojaviti slučajno ili usled nekontrolisanog procesa u mozgu.

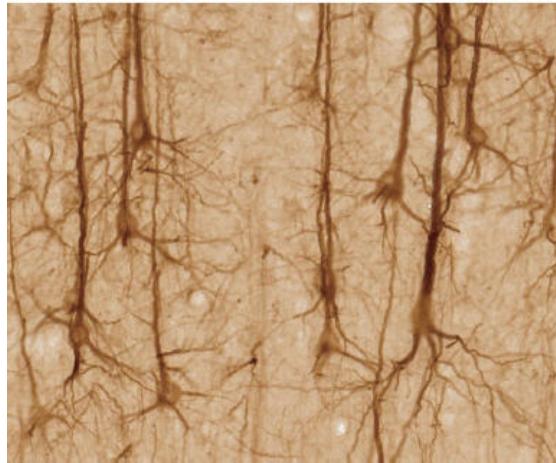
Možemo li da odredimo verovatnoću za zapise koji se slučajno pojavljuju ili nestaju? Da, možemo. Svaki zapis se sastoji od karakterističnog broja N malih subjekata, na primer broja mogućih tačaka mastila na

¹ Mozak ima različite modele učenja, odnosno čuvanja u dugotrajanom pamćenju, koji zavise od njegovog hardvera. Dugotrajno pamćenje uvek je povezano sa promenama jačine sinapsa ili od rasta novih sinapsi. U traumatskim dogadjajima mozak nauči unutar nekoliko sekundi da slične situacije izbegava u ostatku svog života. Nasuprot tome, učenje u školi za jednostavan pojam može da traje i nekoliko meseci. Ustvari, svako može da utiče na olakšavanje i brzinu učenja; uz misaono povezivanje sa slikama, glasovima, osećanjima, fantazijama pamćenjima o temi ili situacijama, može da se ubrza učenje i znatno smanji napor.

Istraživači su pokazali (**Ref. 222**) da su u amigdali, u kojoj se kombinuju emocije i pamćenja, enzim kalcineurin i regulator gena Zif268 važni za traumatsko pamćenje: nizak nivo kalcineurina dovodi do povećanja izražaja regulatora gena i do dugotrajnog traumatskog pamćenja, visok nivo umanjuje traumatski efekt.

Za uobičajeno dugotrajno učenje, proteini CPEB, a posebno Orb2a i Orb2b izgleda da odlučuju koje sinapse će povećati snagu.

papiru, broja kristala gvožđa na traci kasetofona, elektrona u bitu memorije računara, zrna srebrojodida na fotografском negativu. Šanse za smetnje u svakom pamćenju nastaju usled unutrašnjih promena, takođe nazvanih **šum**. Šumovi čine za je zapis nečitljiv; to može biti prljavština na potpisu, termičke promene magnetisanja kristala gvožđa, elektromagnetni šimovi u čvrstim sredstvima pamćenja itd. Šumovi se nalaze u svim klasifikatorima, pošto su svojstveni svim interakcijama, pa prema tome i u svim informacijskim procesuiranjima.



Slika 169 Fotografija obijenih piramidalnih neurona u moždanoj kori ljudskog mozga, prikazuje njihovu interkonekciju (© Medlat.)

Opšta je osobina da se unutrašnje promene usled šumova povećavaju kada se povećava veličina, to jest broj sastojaka u zapisu. Zapravo, verovatnoća p_{mis} za pogrešno zapisivanje ili pogrešno čitanje zapisa menja se kao (*Izazov 253ny*)

$$p_{\text{mis}} \sim \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (93)$$

gde je N broj čestica u podsistemu koji se koristi za njihovo pamćenje. Ovaj odnos sa pojavljuje pošto je za velike brojeve dobra približnost za skoro sve procese takozvana **normalna distribucija**. Osim toga, širina normalne distribucije, koja određuje verovatnoću greške zapisa, raste manjom brzinom od njenog integrala, kada se broj subjekata povećava; za velike brojeve takvi iskazi postaju još precizniji. Zaključujemo da svaki dobar zapis mora da se satoji od **velikog** broja subjekata. Što je taj broj veći, to je pamćenje manje osetljivo na promene. Dakle, sistem sa velikom veličinom uz male promene naziva se (*fizičko*) **kupatilo**. Samo kupatila omogućavaju pamćenje. Drugim rečima, svaki zapis ima kupatilo.

Zaključujemo da je svako **posmatranje** sistema interakcija takvog sistema sa kupatilom. Ova povezanost će se koristiti više puta u tekstu koji sledi, posebno i kvantnoj teoriji. Kada je zapis načinila mašina, "opažanje" se obično naziva (*uopšteno*) **merenje**. Da li možete da odredite kupatilo u slučaju kada neka osoba posmatra pejzaž? (*Izazov 254s*).

Iz predhodnog razmatranja možemo da usvojimo efikasan zaključak: pošto imamo na raspolaganju tako dobro pamćenje, možemo da zaključimo da smo sastavljeni od mnogo malih delova. Nikakav mikroskop bilo koje vrste nije potreban da bi se potvrdilo postojanje molekula ili sličnih malih subjekata; takav alat je samo neophodan da bi se odredila **veličina** ovih čestica. Njihovo postojanje može prosto da se zaključi iz posmatranja da imamo pamćenje. (Naravno, drugi dokaz koji potvrđuje da je materija sastavljena od malih čestica je stalna prisutnost šuma.) (*Vol. I, strana 248*).

Sledeći zaključak je popularizovao kasnih 1920-ih godina Leo Silard (Leo Szilard). Zapisivanje pamćenja ne proizvodi neizbežno entropiju; moguće je sačuvati informaciju u pamćenju bez porasta entropije. Međutim, entropija se proizvodi u svakom slučaju kada se **briše** iz pamćenja. Pokazalo se da je (minimalna) entropija stvorena brisanjem jednog bita data sa (*Izazov 255e*)

$$S_{\text{za brisan bit}} = k \ln 2 \quad (94)$$

a broj $\ln 2 \approx 0,69$ predstavlja prirodan logaritam broja 2. Brisanje prema tome u jednu ruku smanjuje nered u podacima – lokalnu entropiju – ali s druge strane povećava ukupnu entropiju. Kako je dobro poznato, energija je potrebna da se smanji entropija lokalnog sistema. Ukratko, svaki sistem u kojem se briše

pamćenje zahteva energiju. Na primer, logičko I-kolo uspešno briše jedan bit po operaciji. Logičko razmišljanje iziskuje energiju.

Isto tako je poznato da su *snovi* povezani sa brisanjem i reorganizovanjem informacija. Da li to može da bude razlog da kada smo veoma umorni, kada nam nije preostalo nimalo energije, ne sanjamo toliko mnogo kao obično? (*Izazov 256s*). Snovi nam govore šta zapošljava naše nesvesno stanje. Svaka osoba mora sama da odluci šta će da učini sa snovima kojih se seća. Ukratko, snovi nemaju nikakvo značenje – značenje im dajemo mi. U svakom slučaju, san je jedan od načina na koji mozak efikasno koristi pamćenje.

Entropija je stoga neophodnost koja se stvara kada zaboravljamo. Ovo je očigledno ako se setimo da je zaboravljanje slično kvarenju antičkih rukopisa. (*Ref. 223*). Entropija raste kada rukopisi više nisu čitljivi, pošto je taj proces nepovratan i disipativan.¹ Drugi način da se ovo prepozna da se za čišćenje pamćenja, na primer, magnetne trake, treba na nju dodati energiju, a to povećava entropiju. Nasuprot tome, *zapisivanje* i pamćenje može često da *smanji* entropiju; sećamo se da signali, subjekti koji se zapisuju u pamćenje, nose negativnu entropiju. Na primer, zapisivanje na magnetnu traku obično smanji njenu entropiju.

KAPACITET MOZGA

Računari su dosadni. Oni samo daju odgovore
pripisuje se (pogrešno) Pablou Pikasu

Ljudski mozak je napravljen na takav način da promene u njemu ne mogu da unište njegov sadržaj. Mozak je zaštićen lobanjom upravo iz tog razloga. Osim toga, mozak doslovno povećava veze, koje se nazivaju *sinapse*, između različitih *neurona*, ćelija koje rade na obradi signala. Neuron je osnovni element obrade u mozgu, koji izvršava osnovno razvrstavanje. On može da uradi samo dve stvari: da se aktivira ili da se ne aktivira. (Moguće je da za vreme u kojem je neuron aktiviran takođe nosi informaciju; ovo pitanje nije još razjašnjeno.) (*Ref. 226* i *Ref. 227*). Aktiviranje neurona zavisi od njegovog ulaza, koji dolazi preko sinapsi sa stotinama drugih neurona. Neuron je prema tome element koji može da razlikuje ulaze koje dobija u dva slučaja: one koji će izazvati aktiviranje i one koji ga neće izazvati. Neuroni su prema tome klasifikatori najjednostavnije vrste, oni mogu da naprave razliku samo između dve situacije.

Svaki put kada smeštamo nešto u naše dugotrajno pamćenje, kao što je telefonski broj, jačina veza postojećih sinapsi menja se ili se pojavljuju nove sinapse. Povezanost između neurona mnogo je jača od promena u mozgu. Jedino jaki poremećaji, kao što je začepljenje krvnih sudova ili oštećenje mozga, mogu da unište neurone i da dovedu do gubitka pamćenja.

U celini, mozak obezbeđuje izuzetno efikasno pamćenje. Uprkos izuzetnim naporima inženjeri još uvek nisu sposobni da naprave pamćenje kapaciteta mozga i iste zapremine. Procenimo njegov kapacitet. Ako pomnožimo broj neurona², koji iznosi oko 10^{11} , sa prosečnim brojem sinapsi po neuronu, što iznosi oko 100, a takođe i sa predpostavljenim prosečnim brojem bitova sačuvanih u svakoj sinapsi, što je oko 10^3 , dolazimo konzervativne procene za kapacitet pamćenja mozga od oko

$$M_{\text{upisa}} \approx 10^{14} \text{bita} \approx 10^4 \text{GB} \quad (95)$$

(Jedan bajt, skraćenica je B, uobičajen je naziv za 8 bita informacije.) Zapazite da je evolucija uspela da stavi više neurona u mozak no što postoji zvezda u galaksiji, a da ako se saberi dužine svih dendrida, dobija se dužina od 10^{11} m, što odgovara rastojanju od Zemlje do Sunca. Naš mozak je zaista astronomska celina.

¹ Kako je Vojčeh Žurek (Wojciech Zurek) jasno objasnio, (*Ref. 224*) entropija stvorena unutar pamćenja glavni je razlog što čak ni Maksvelov demon ne može da smanji entropiju dve zapremine gase otvaranjem vrata izmedju njih na takav način da se brzi molekuli sakupe na jednoj strani, a sporii molekuli na drugoj. (Maksvel je uveo pojam "demon" 1871. godine, kako bi bogovima pojasnilo ograničenja postavljena prirodom.) To je samo drugačiji način da se ponovi stari rezultat Lea Silarda (Leo Szilard) koji je pokazao da merenja demona stvaraju više entropije no što mogu da je sačuvaju. (*Ref. 225*). A svaki merni aparat sadrži pamćenje.

Da biste igrali igru "budi Maksvelov demon", potražite na internetu jednu od mnogih računarskih igara

² Izgleda da je broj neurona stalан и одредјен прilikом рођења. Пораст интерконекција највећи је између прве и треће године, када се каže да достиже до 10^7 нових конекција сваке секунде.

³ Ово је proseк. За неке врсте синапси у мозгу, у хипокампу, познато је чувају само један бит.

Međutim, ova standardna procena od 10^{14} bita nije u potpunosti tačna. U njoj je predpostavljeno da samo čuvanje komponenti informacija predstavljaju snagu sinapsi. Prema tome, ona je merilo samo kapaciteta šačuvanih podataka u mozgu koji mogu da budu *izbrisani*. Zapravo, informacije se takođe čuvaju u strukturi mozga, to jest u tačnoj konfiguraciji u kojoj je svaka ćelija spojena sa drugom ćelijom. Većina ovih struktura je određena u starosti od oko dve godine, ali one nastavljaju da se razvijaju u manjoj meri i u toku ostatka ljudskog života. Pod predpostavkom da za svaku od N ćelija sa n spojeva postoji f_n mogućnosti spajanja, ovaj kapacitet jednokratnog zapisa u mozgu procenjen je na otprilike $N\sqrt{f_n} f_n \log f_n$ bitova. (**Izazov 257e**). Za $N = 10^{11}$, $n = 10^2$ i $f = 6$ dobija se

$$M_{\text{jedn.zapis}} \approx 10^{16} \text{ bit} \approx 10^6 \text{ GB} \quad (96)$$

Strukturne promene u mozgu mogu da se izmere. (**Ref. 228**). Skorašnja merenja potvrđuju da dvojezične osobe, posebno one koji su dvojezične u ranom dobu, imaju veću gustinu sive mase u maloj paretijalnoj moždanoj kori u levoj polovini mozga. To je deo mozga koji se uglavnom bavi obradom jezika. Prema tome, mozak tako koristi strukturalne promene za optimizaciju pamćenja i obradu. Strukturne promene isto tako su poznate i kod ostalih populacija, kao što su autistične osobe, homofili ili hiperaktivna deca. Intenzivna i produžena iskustva tokom trudnoće ili detinjstva izgleda da pokreću ove strukturalne razvoje.

Ponekad se tvrdi da ljudi koriste samo između 5% ili 10% kapaciteta svog mozga. Ovaj mit, koji se proteže unazad do devetnaestog veka, podrazumevao bi da je moguće izmeriti stvarno sačuvane podatke i da se mogu uporediti sa raspoloživim maksimumom. Mit isto tako podrazumeva da je priroda mogla da razvije i da održava organ sa 90% izlišnog kapaciteta, da troši svu energiju i materijal za njegovu izgradnju, održavanje i popravke. Taj mit je netačan. U današnje vreme kapacitet pamćenja mozga i kapacitet obrade mozga ne mogu da se izmere već samo da se procene.

Veliki kapacitet čuvanja u mozgu takođe pokazuje da ljudsko pamćenje popunjava okolina i da nije urođena: jedna ljudska jajna ćelija plus jedan spermatozoid imaju masu od oko 1 mg, čemu odgovara oko $3 \cdot 10^6$ atoma. Očigledno, kolebanja onemogućavaju da se sačuva 10^6 bitova u tom sistemu. Ustvari, priroda čuva samo oko $6 \cdot 10^9$ osnovnih parova DNK ili $12 \cdot 10^9$ bitova u genima oplođene jajne ćelije, uz korišćenje $3 \cdot 10^{26}$ atoma po bitu. Nasuprot tome, tipičan mozak ima masu od 1,5 do 2,0 kg i sadrži oko 5 do $7 \cdot 10^{26}$ atoma, što ga čini da je efikasan u pamćenju kao jajna ćelija. Razlika između broja bitova u ljudskoj DNK i onog u mozgu, lepo pokazuje da su skoro sve informacije smeštene u mozgu uzete iz okruženja; one ne mogu biti genetskog porekla, čak i kada se dopusti pametna dekompresija čuvajih informacija.

Ukupno, iz svih trikova koje je priroda koristila, nastao je najjači klasifikator do sada poznat.¹ Postoji li bilo koja granica kapaciteta mozga da pamti i razvrstava? Uz alate koje su razvili ljudi da bi proširili mogućnosti mozga, kao što su papir, pisanje i štampanje radi podrške pamćenju, i uz brojne pristupačne alate za uprošćavanje i skraćivanje razvrstavanja, koje su istražili matematičari, razvrstavanje u mozgu ograničeno je samo vremenom koje se utroši za njegovo izvršavanje. (**Ref. 229**). Bez alata, naravno da postoji jasna granica. Moždana kora debljine dva milimetra ima površinu kao otprilike četiri lista veličine A4, kod šimpanze je kao jedan list, a kod ostalih majmuna je veličine poštanske dopisnice. Procenjeno je da je ukupno intelektualno pristupačno pamćenje reda od

$$M_{\text{intel.}} \approx 1 \text{ GB} \quad (97)$$

premda uz veliku grešku u eksperimentu.

Mozak je takođe neuporediv u njegovom kapacitetu obrade. To je najbolje predstavljeno u najvažnijoj posledici izvedenoj iz pamćenja i razvrstavanja: razmišljanju i jezicima. Zapravo, mi koristimo mnogo vrsta razmišljanja ili jezika, kao što su upoređivanje, razlikovanje, sećanje, prepoznavanje, spajanje, opisivanje, zaključivanje, objašnjavanje, zamišljanje itd., svako opisano različitim načinom klasifikacije pamćenja ili opažanja. Konačno, svaka vrsta razmišljanja ili govora direktno ili indirektno razvrstava opažanja. No, koliko daleko su računari od postizanja toga? Prvi pokušaj, godine 1966. bila je programska šala od Jozefa Vajcenbauma (Joseph Weizenbaum): poznat program za stimulisanje razgovora sa ljudima, Eliza; (probajte je na web strani www.manifestation.com/neurotoys/eliza.php3) to je parodija na psihoterapiju. Čak i danas, 40 godina kasnije, razgovor sa računarskim programom, kao što je Friendbot

¹ Isto tako je važna i potrošnja energije u mozgu: iako on sadrži svega oko 2% mase tela, on utroši 25% energije unete hranom. Mozak je razlog što ljudi vole da jedu voće.

(naći ćete ga na veb strani www.friendbot.co.uk), još uvek je razočaravajuće iskustvo. Veliki kapacitet ljudskog mozga glavni je razlog za to razočaranje.

Uzgred, iako mozgovi glavatih ulješura i slonova mogu biti pet do deset puta teži od ljudskih, broj neurona i spojeva, pa prema tome i kapacitet, manji su no kod ljudi. Puževi, mravi, male ribe imaju broj neurona reda 10.000; dobro proučavana glista *Caenorhabditis elegans* ima samo 302, mada ostale životinje imaju još manje.

ZANIMLJIVOSTI O MOZGU

Svi nastavnici bi trebalo da budu stručnjaci za mozak. Mozak uči najbolje kada ima cilj. Bez cilja, kako priprema nastave, tako i izvođenje nastave, izgubiće većinu svojih mogućih efekata. Koliko nastavnika u početku postavi cilj u svom razredu? Mozak takođe najbolje uči kada je motivisan. Različitim učenicima potrebne su različite motivacije; potencijalne aplikacije, radoznalost, takmičenje, aktiviranje već stičenog znanja, impresioniranje soprotnog pola ili otkrivanje nepoznatog. Isto tako učenicima je potrebna motivacija na različitim nivoima težine. Koji od nastavnika je obezbedio ovaku mešavinu? Najzad, mozgovi kod učenika imaju različite načine da stvore pojам: korišćenje reči, zvukova, slike, osećanja, telesnih čula, itd. Koji nastavnik obrađuje sve to u svojoj nastavi.

* * *

Mozak igra čudne igre sa ljudima koji ga nose. Na primer, mozak je neprestano u potrazi za nečim što bi radio. Mnogo navika i mnogo predanosti nastalo je na taj način.

* * *

Mozak često upravlja osobom koja ga nosi. Savremena istraživanja su pokazala da se učenici u školama mogu podeliti u pet grupa. ([Ref. 230](#))

1. Pametni učenici
2. Nezainteresovani učenici
3. Učenici koji precenjuju sebe (najčešće dečaci, ali ne uvek)
4. Učenici koji podcenjuju sebe (najčešće devojčice, ali ne uvek)
5. Učenici koji se bore ili su slabici.

Ovo treba imati na umu dok se predaje u učionici. Kojoj grupi pripadate ili ste pripadali?

* * *

Većina spoznajnih aktivnosti mozga postavljeno je u posebnim delovima **moždane kore**, nazvane takođe i **siva materija** (videti [sliku 165](#)). Poznato je da je celokupna siva materija sačinjena od velikog broja paralelnih, ali u velikoj meri nezavisnih struktura, takozvanih **neokortičkih kolona**; one su slične mikroprocesorima. Svaka neokortička kolona ima ulaz i izlaz, ali radi netzavisno od ostalih; ona je visoka oko 2 mm, 0,5 mm u prečniku i sadrži oko 1000 neurona različitih vrsta. (Radi pregleda spiska, pogledajte veb stranu neurolex.org/wiki/Category:Neuron) Ljudska moždana kora sadrži nekoliko miliona takvih kolona razmeštenih u šest slojeva. U današnje vreme istraživači imaju mogućnost da simuliraju **jednu** neokortičku kolonu pomoću **jednog** superračunara. Pogledajte veb stranu bluebrain.epfl.ch radi detaljnijeg sagledavanja. Ukratko, vaš mozak odgovara nekoliko miliona superračunara. Vodite računa o njemu.

* * *

Lep atlas mozga može da se nađe na veb strani bigbrain.loris.ca. Na toj veb strani istraživači širom sveta prikupljali su slike mozga koje obezbeđuju savremena istraživanja. ([Ref. 231](#)).

* * *

Mozak ima puno interesantnih strana. Tehnika **neurološke povratne sprege** jedan je primer. Nekoliko elektroda bilo je postavljeno na kožu glave, a petlja povratne sprege načinjena je pomoću vizualizacije na ekranu. Takva vizualizacija pomaže da se stavi osoba u visoko teta stanje – koje odgovara dubokoj opuštenosti – odosno SMR stanje (sensorimotor rhythm) – koje odgovara mirovanju i koncentraciji ili u pretežno alfa stanje – koje odgovara opuštenosti zatvorenih očiju. Poznavanje da se brzo prebacuju između ovih stanja pomaže atletičarima, hirurzima, igračima, muzičarima, pevačima i deci sa sindromom odsustva pažnje. Posle nekoliko seansi efekti ostaju prisutni više od godinu dana. Za sindrom odsustva pažnje rezultati su isto tako dobri kao sa lekovima. ([Ref. 232](#))

* * *

Jedna od interesantnih strana ljudskog mozga je širok opseg strasti koje on stvara. Na primer, postoje ljudi koje strast natera da ceo svoj život posvete pevanju. postoje ljudi čija je doživotna strast da izmišljaju jezike; najpoznatiji primer je Džon Ronald Tolkin¹ (John Ronald Tolkien). Posroje i drugi ljudi čija je posvećenost pomoći ubicama da u umu pronađu mir. Neki ljudi posvete čitav život da podižu hendikepiranu decu koju ne žele roditelji. Drugi ljudi posvete čitav život na uvođenje brzih rešenja za infrastrukturne probleme – snabdevanje vodom, gasom i električnom energijom – u gradove tokom ratnih stanja. Začuđujući su primeri koji se mogu naći.

* * *

Mnoge funkcije u mozgu ne izvode se iz moždane kore, dela mozga koji se može programirati, već iz specijalizovanih hardvera. Spisak delova sa poznatim specijalizovanim hardverima mozga neprestano se povećava, pošto se čine nova otkrića.

Slika 165 prikazuje samo osnovna područja. Istraživači su otkrili namenske neurone za upravljanje obema nogama pri hodanju, ([Ref. 233](#)), namenske neurone – takozvane **neuroni ogledala** – koji ponavljaju ono što ljudi koje vidimo osećaju ili rade, namenske neurone od oka do mozga koji upravljaju ciklusom dan – noć, Ova skorašnja otkrića dopunjavaju ona starija da u sistemu neurona postoje specijalizovani hardveri za svako čulo, od dodira do mirisa i osećaja kretanja i prostora. Ukratko, mnoge osnovne funkcije u sistemu neurona su umrežene, a isto tako i mnoge složenije funkcije. Potpun popis umreženih sistema nije još uvek poznat. Na primer, samo istraživanja u budućnosti pomoći će nam da razumememo koliko je naša podsvest usled hardvera, a koliko usled softvera u moždanoj kori.

* * *

Mačke su pametne životinje i svako ko je u dodiru sa njima zna koliko je njihovo ponašanje složeno i koliki je spektar njihovih aktivnosti. Sve je to organizovano u mozgu veličine oraha, sa oko 300 miliona neurona.

Interesantno je da svako ljudsko biće ima približno isti broj neurona koji su u glavi mačke, ali na mestu koje je izvan mozga: u stomaku. Ova grupa neurona zove se **enterični nervni sistem**. Ovaj veliki skup neurona upravlja ponašanjem ćelija creva – posebno prvim slojem ćelija creva koji dolazi u kontakt sa hranom – i upravlja stvaranjem većine enzima i neurotransmitera za koje se pokazalo da imaju uticaj na naše raspoloženje. Oko 95% serotonina koji je proizведен u našem telu proizvodi se u crevima. Moglo bi se ispostaviti da lečenje depresivnih stanja zahteva najpre lečenje crevnog trakta. ([Vol. V, strana 45](#)). Enterički nervni sistem takođe određuje da li je ili nije potrebno povraćanje, on aktivira opstipaciju ili dijareju, utiče na nivo napetosti, reguliše naš imunološki sistem i upravlja još mnogim drugim procesima. Ukratko, enterički nervni sistem predstavlja anatomsku osnovu za naše “dobro raspoloženje”, a verovatno i naš osećaj opštег blagostanja. Istraživanja ove oblasti još uvek su u toku. ([Ref. 234](#)).

* * *

Naučićemo bolje ako ponavljamo ono što smo naučili. Eksperimenti su pokazali da podsećanje pojačava sinapse, pa time pojačava i naše pamćenje. Naučićemo bolje ako znamo razlog za stvari koje učimo. Eksperimenti pokazuju da uzročnost pojačava sinapse.

* * *

Učimo i dok spavamo. Mozak pamti mnoge stvari koje smo doživeli tokom dana u delu koji se zove **hipokampus**. U toku dubokog sna, to jest u toku spavanja bez snova, mozak bira koji od tih doživljaja treba da bude upamćen u dugotrajnoj memoriji, u **neokorteksu**. Izbor se zasniva na osećaju koji prati pamćenje, posebno uzbudjenje, strah ili bes. Ali isto tako i očekivanje nagrade – kao što je poklon ili mogućnost da se napravi dobar utisak na pitanje o ovoj temi – izuzetno su efektivni u prenošenju sadržaja u neokorteks, kao što je pokazao Jan Born u svojim istraživanjima. Ako se prati ovo pravilo, najbolji način za učenje je da se zaspi odmah posle učenja, a posebno da se spava dubokim snom. Najbolji način da se nauči jezik, da se nauči nova tema ili da se upamtí prezentacija, je da se odmah posle učenja ili vežbanja zaspi.

Dubok san pomaže učenju. Dubok san se može postići na više načina. Napor, sport, pa čak i električni nadražaji pojačavaju dubok san. Farmaceutska industrija nastoji da preonađe tabletu za spavanje koja bi pojačala dubok san. Alkohol, većina tableta za spavanje, televizija, internet i traumatski događaji smanjuju

¹ Dž. R. Tolkin (John Ronald Reuel Tolkien) je pisac *Hobita* i *Gospodara prstena*. Posle njegove smrti, njegov sin je, na osnovu očevih beležaka objavio i *Silmarilion* (prim.prev)

dubok san. Jan Born se izrazio kako je veoma verovatno da san i postoji da bi nam omogućio da učimo; nema drugog ubedljivog objašnjenja za gubljenje svesti tokom spavanja.

Kako spavamo? Kada smo budni, svi ulazi čula šalju se u **talamus**, koji ih filtrira i šalje u neokorteks. Tokom sna neokorteks zamenjuje veliki deo talamus-a, tako da nijedan ulaz čula ne dolazi u neokorteks. Modeliranjem ovog procesa dopušta čak da se razume kako spavanje počinje i da se ponove moždani talasi koji se vide na početku spavanja. (**Ref. 235**)

* * *

Mnogi rezultati istraživanja na životinjskim i ljudskim mozgovima mogu se naći na veb strani Brain Map, koja je dostupna na www.brain-map.org/.

* * *

Mozgovi i računari razlikuju se znatno u načinu njihovog rada. Mozgovi su analogni, a računari su digitalni. A kako zapravo rade računari? Opšti odgovor je: računari su pametan i organizovan skup električnih prekidača. Da bi se materija načinila što je moguće jednostavnijom, mašina za izračunavanje u računaru – takozvana centralna procesna jedinica (CPU – Central Processing Unit), srce svakog računara – za izračunavanja koristi binarne brojeve. Stanje prekidača “uključeno” i “isključeno” pridruženo je ciframa “1” i “0”. Možete li da smislite jednostavan skup prekidača koji će sabrati dva binarna jednocifrena broja? Ili više cifara? Ili da pomnoži dva broja? Pokušajte, - to je zanimljiva vežba.

Računari se nazivaju digitalni pošto se njihov rad zasniva na prekidačima. Zapravo, sva integrisana kola u džepnom računaru ili unutar laptopa samo su skup električnih prekidača; savremen primerak može da sadrži nekoliko miliona njih za svaki prekidač sa određenom funkcijom.

* * *

Tokom trudnoće mozak embriona raste po stopi od 250.000 neurona svakog minuta. Ovaj stepen pokazuje kako je život začuđujuć proces.

* * *

Veza signala između mozga i ruku različita je od veze između mozga i nogu. Kada mozak pošalje kroz kičmenu moždinu naredbu za neku ruku ili nogu, kičmena moždina je potom šalje u ruke ili noge. Za ruke (i šake) – ali ne i za noge – kičmena moždina šalje kopiju poslate naredbe ponovo u mozak. Ova povratna sprega izgleda da omogućava mozgu da odredi mnogo preciznije sledeću komandi za pokret. Prema tome, telo i mozak su jako umreženi u fine motoričke sposobnosti koje nam pomažu da naše prste koristimo najpreciznije moguće. Važnost finih motoričkih sposobnosti bila je poznata još drevnim Grcima; Anaksagora je rekao da su ljudi najpametnija živa bića zato što imaju ruke.

* * *

Epilepsija je grupa moždanih poremećaja koja pogađa veliko deo ljudske populacije. Epilepsija je pogrešno električno funkcionisanje mozga. Ona dovodi do pravilnih električnih oscilacija unutar mozga, tokom kojih osoba gubi svest ili čak dobija napade.

Epilepsija je isto tako jedan od razloga za autistično ponašanje. Epilepsiju mogu da izazovu genetički defekt, poveda ili drugi uzroci. Istraživanje epilepsije široka je oblast. Mnogo genetskih tipova epilepsije je usled mutacija u genima koji kodiraju jonske kanale. Kada jonski kanal ne radi pravilno, koncentracija katjona, kao što je natrijum, ne ponaša se pravilno, što dovodi do električnih kvarova. Istraživanja porekla epilepsije pokazala su da se neke genetičke mutacije ne nasleđuju od roditelja, već su **de novo**: one se pojavljuju samo kod deteta.

* * *

Istraživači su uslovno povezali defekte gena sa sklonosću da se u svakodnevnom životu zaboravljuju stvari. Međutim, može se postaviti pitanje da li je greška u genu DRD2 zaista uzrok da se zaboravi gde su ključevi automobila?

* * *

Mnogi prekidači imaju tri stanja; oni se mogu nazvati “-1”, “0”, “1”. Prema tome, realna mogućnost je gradnja računara na osnovu “tritova” umesto “bitova”. Zbog čega ne postoji 27-tritski računari? (**Izazov 258s**).

* * *

Neurotransmiteri koji utiču na raspoloženje još uvek su tema opširnih istraživanja. Takva istraživanja su pokazala da specifični peptidi pod nazivom **hipokretin** ili takođe **oreksin** dovode do visoke budnosti, da

povećavaju apetit, a pre svega do dobrog raspoloženja. Da li su to zaista "hormoni sreće", kako to mnogi tvrde, još uvek mora da se ispita.

* * *

Prvi put su 2015. godine u mozgu pronađeni limfni sudovi; postoje kako ulaz tako i izlaz limfne tečnosti. Ovo začuđujuće otkriće Atoan Luvoa (Antoin Louveau) i njegovih saradnika možda bi načinilo dobru promenu u načinu kako da se usmere istraživači Alchajmerove bolesti, autizma, multipleskleroze i mnogih drugih neuro-imunoloških bolesti. ([Ref. 236](#))

* * *

Godine 2015. u mozgu su otkrivene "ćelije brzine". Ove ćelije su deo navigacijskog sistema mozga, a aktivira ih učestanost koja je srazmerna sopstvenoj brzini organizma. ([Ref. 237](#)). Ove ćelije prema tome imaju istu ulogu kao brzinomer u automobilu. Upotpunjavanje razumevanja navigacijskog sistema mozga jedno je od sadašnjih izazova za neurologe.

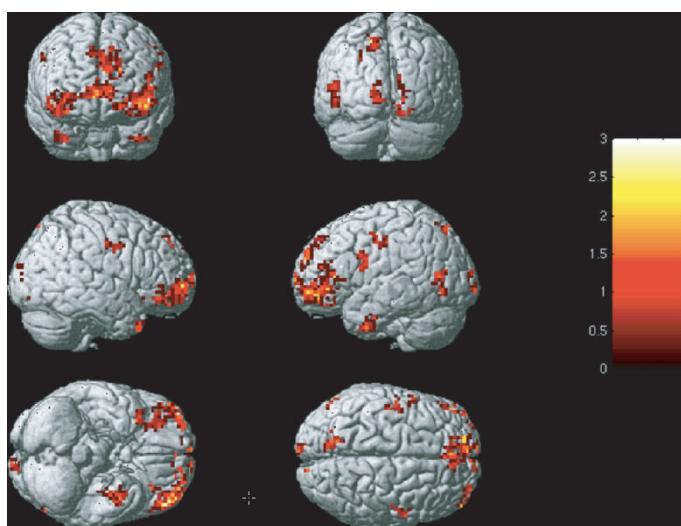
* * *

Zadivljujući aspekt mozga je način na koji upravlja kretnjama. Mnoge istraživačke grupe istražuju kako se u mozgu uče kretanje ruke, noge i tela, kako se stvaraju, pamte i upravlja njima. Mozak upravlja kretnjama tako što stvara svoje komande za mišiće iz malog skupa **primitivnih pokreta**.

Druge istraživačke grupe istražuju kako tokom govora mozak koordinira pokrete usana, jezika i glasnih žica. Takođe i u tom slučaju izgleda da su pokreti pri govoru upravljeni kao niz naučenih primitivnih pokreta; ova primitivnost izgleda slično ili je tesno povezana sa sloganima.

* * *

Cilj da se čitaju nečije misli je još uvek daleko. Ali da se pročitaju nečija osećanja već je moguće uz uredjaje magnetne rezonanse. ([Vol. V, strana 123](#)). Uvid u pristup prikazan je na [slici 70](#). Pravilnim odmređivanjem aktivnosti neurona u pojedinim delovima mozga postalo je moguće razlikovanje besa, gnušanja, zavisti, straha, sreće, požude, ponosa, tuge i sramote – uz pouzdanost reda od 85%. ([Ref. 238](#)).

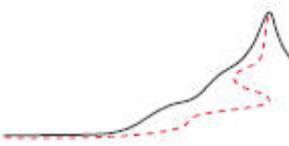


Slika 170 Slojevi mozga skenirani funkcionalnom magnetnom rezonansom preklopljениh u slike mozga omogućavaju da se odrede emocije koje se osećaju, ako se pravilno odmere pokazane oblasti (© Karim S. Kassan)

* * *

Skorašnja istraživanja pokazuju da je redovno kretanje daleko najbolji način da se sačuva zdrav mozak. Na primer, redovno kretanje je mnogo delotvornije nego li bilo koje poznato medicinsko sredstvo za sprečavanje kako arterioskleroze, tako i Alchajmerove bolesti.





Poglavlje 8

GOVORNI JEZIK I POJMOVI

Zadržite svoje pravo da mislite, jer čak i ako pogrešno mislite bolje je nego da ne mislite uopšte

Hipatija iz Aleksandrije

Jezik je možda najdivniji dar prirode čoveku. Sve o njemu naučili smo od nekog ko se brinuo o nama. Uprkos tome, poreklo jezika je sakriveno u dalekoj prošlosti čovečanstva. Jezici su stvoreni i prenošeni od jednog mozga do drugog. Međutim, mi moramo da istražimo jezik, pošto neprestano ponavljamo da je fizika razgovor o kretanju. Fizika je precizan jezik specijalizovan za opisivanje kretanja. Otkrićemo tokom našeg hodanja da ova posebna odrednica jezika nije ograničavajuća, pošto se na ovom svetu sve kreće. U svakom slučaju, naša potraga za preciznošću zahteva da istražimo značenje, upotrebu i ograničenja jezika.

ŠTA JE GOVORNI JEZIK?

Ein Satz kann nur sagen, wie ein Ding ist, nicht was es ist.¹

Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 3.221

Korišćenjem sposobnosti da stvara zvuk i da stavlja mastilo na papir, ljudi su usvojili izvesne simbole², nazvane u ovom kontekstu *reči* ili *izrazi*, za mnoge oblasti koje su odredili uz pomoć svojih razmišljanja. Za takvu podelu tada se kaže da je odredila *pojam*, a u ovom tekstu pojmovi su napisani *italik bold*. Standardni skup pojmoveva formira jezik.³ Drugim rečima, imamo: (*Ref. 239*)

- *Jezik (ljudi)* je standardan način međusobnih ljudskih veza.

Postoje jezici ljudi koji se zasnivaju na izrazima lica, na pokretima, na izgovorenim rečima, na zvižducima, na pisanim rečima i drugim. Korišćenje govornog jezika je znatno mlađe od ljudske vrste; izgleda da se pojavio pre oko dve stotine hiljada godina. Pisani jezik je još mlađi, naime star je samo oko šest hiljada godina. Ali skup pojmoveva koji se koristi, to jest rečnik, još uvek se širi. Razumevanje jezika kod ljudi počinje skoro odmah po rođenju (možda čak i ranije), aktivna upotreba jezika počinje oko prve godine, sposobnost čitanja može početi oko druge godine, a sopstveni rečnik nastavlja da se povećava sve dok traje radoznalost.

Budući da je fizika lenj način da govori o kretanju, njoj je potreban jezik kao bitan alat. Od mnogih aspekata jezika, od literature do poezije, od viceva do naredbi u vojsci, od izraza ohrabrenja, snova, ljubavi i osećanja, fizika koristi mali i prilično poseban segment. Ovaj segment je određen nerazdvojivim ograničenjem na govor o kretanju. Pošto je kretanje opažanje, odnosno interakcija sa okruženjem kojeg više ljudi doživljava na isti način, ovaj izbor prilikom razmatranja postavlja brojna ograničenja u sadržaju – rečnik – i u oblicima – gramatiku.

Na primer, iz odrednice da su posmatranja zajednička sa drugima, dobijamo sledeći zahtev:

¹ Rečenica može samo da mi kaže kakva je stvar, ne i šta je stvar.

² Simbol je vrsta znaka, to jest pojam koji je nekim dogovorom povezan sa objektom na koji se odnosi. Prema Čarlu Persiju (Charles Sanders Peirce, 1839. Cambridge – 1914. Milford) - videti veb stranu www.peirce.org – najoriginalnijem filozofu rođenom u SAD, simbol se razlikuje od *ikone* (ili *slike*) i od *indeksa* koji se takođe priključuje dogovorno uz objekt, po tome što on ne nalikuje objektu, kao što to čini ikona, i po tome što nije u dodiru sa objektom, kao u slučaju indeksa.

³ Prepoznavanje da je jezik zasnovan na podeli ideja, koristeći razlike među njima da bi se razlikovale međusobno, vraća nas do Ferdinanda de Sosira (Ferdinand de Saussure, 1857. Geneva – 1913. Vufflens) koji se smatra osnivačem lingvistike. Njegov udžbenik *Cours de linguistique générale*, Editions Payot, 1985. bio je referentni rad na ovom polju skoro polovinu veka. Treba zapaziti da je Sosir, za razliku od Persija, više voleo pojam “znak” od “simbola” i da odrednica pojma “znak” uključuje takođe i objekt na koji se odnosi.

- Iskazi koji opisuju posmatranja moraju da mogu da se prevedu na sve jezike.

Međutim, kada može iskaz da bude preveden? Po ovom pitanju moguće su dve krajnje tačke gledišta: prva tvrdi da svi iskazi mogu da se prevedu, pošto oni potiču od osobina ljudskih jezika da na svakom od njih može da se izrazi svaki moguć iskaz. Na taj način možemo da kažemo:

- Samo sistem znakova koji izražava celokupan spektar poruka ljudi formira ***ljudski jezik***.
- Ova odrednica jezika razlikuje ljudski govor i jezik znakova od jezika životinja, kakvi su znakovi koje koriste majmuni, ptice, pčele, a takođe i od računarskih jezika, kakvi su Packal ili C. Uz ovo značenje jezika svi iskazi mogu da se prevedu prema odrednici.
- Još izazovnije je prema razmatranju koje prati suprotno gledište, naime da je precizan prevod moguć jedino za one iskaze koji koriste pojmove, vrstu reči i gramatičke strukture koji se nalaze u svim jezicima. Lingvistički istraživači uložili su značajan napor u prečišćavanje fonoloških, gramatičkih i semantičkih ***univerzala***, kako su ih oni nazvali, iz 6000 ili više jezika za koje mislimo da danas postoje¹.

TABELA 20 Osnove jezika

Gledište	Vrednost
Ljudski fonemi	oko 70
Engleski fonemi	44
Nemački fonemi	40
Italijanski fonemi	30
Srpski fonemi	30
Reči u engleskom jeziku (veći no u svim drugim jezicima, uz moguć izuzetak nemačkog jezika)	oko 350.000
Broj jezika na Zemlji u godini 2000.	oko 6000

SASTOJCI GOVORNOG JEZIKA I NJIHOVA HIJERARHIJA

Jedes Wort ist ein Vorurteil².

Friedrich Nietzsche

Istraživanja jezika u ***fonoličkom*** pogledu pokazala su na primerima da svaki jezik ljudi ima najmanje dva suglasnika i dva samoglasnika i da je broj fonema na svetu ograničen. Međutim, takva proučavanja ne obezbeđuju bilo kakav materijal za razmatranje prevođenja.³

Proučavanja u pogledu ***gramatike*** (ili ***sintakse***) pokazala su da svi jezici koriste najmanje elemente, nazvane "reč", koje su grupisane u rečenicu. Svi oni imaju izgovor za prvo i drugo lice, "ja" i "ti" i uvek sadrže imenice i glagole. Svi jezici koriste ***subjekte*** i ***predikate***, ili kako se obično kaže, tri entiteta ***subjekt***, ***glagol*** i ***objekt***, premda ne uvek po tom redosledu. Samo proverite ovo u jezicima koje znate. (***Izazov 259e***).

Istraživanja u pogledu semantike, dugačkog popisa leksičkih univerzala, to jest, reči koje se pojavljuju u svim jezicima, kao što su "majka" i "Sunce", nedavno su dobila strukturu. Lingvistkinja Ana Veržicka

¹ Profesionalna baza podataka od lingviste Merit Rulen (Merritt Ruhlen) sa 5700 jezika i mnogo detalja za svaki jezik, može da se nađe na veb strani ehl.santafe.edu/intro1.htm. Dugačak, ali i neprofesionalan popis sa 6000 jezika (i sa 39.000 naziva na jezicima i dijalektima) može da se nađe na veb strani www.ethnologue.com/. Obratite pažnju da je to uredila marginalna religionzna grupa čiji je cilj da poveća broj jezika što je više moguće. Procenjuje se da je u prošlosti postojalo 15.000 ± 5.000 jezika.

Ipak, u današnjem svetu, a sigurno i u naukama, dovoljno je poznavati sopstveni jezik plus engleski. Obzirom da je engleski jezik jezik sa najvećim brojem reči, dobro naučiti njega veći je izazov od učenja većine drugih jezika. (***Ref. 240***).

² "Svaka reč je predrasuda", Fridrik Niče (Friedrich Nietzsche, 1844. Rocken – 1900. Weimar) bio je uticajan filolog i filozof.

³ Fonološke studije takođe istražuju teme kao što je zapažanje da u mnogim jezicima na svetu pojam „mali“ sadrži glas „i“ (ili visoko naglašeno „e“): petit, piccolo, klein, tiny, pequeno, chiisai; izuzeci su: small, parvus.

(Anna Wierzbicka) izvršila je istraživanje sastavnih blokova od kojih se grade svi pojmovi. Ona je tražila odrednice za svaki pojam uz pomoć jednostavnijeg, a nastavila to da čini dok nije dostigla osnovni nivo koji više nije mogao da se uprosti. Skup pojmove koji je preostao su **primitivi**. Ponavljanjem postupka u više jezika Veržbicka je našla da je popis isti u svim slučajevima. Prema tome, ona je otkrila univerzalne semantičke primitive. U novembru 1992. godine ovaj popis je sadržao pojmove navedene u **Tabeli 21**.

TABELA 21 Semantički primitivi, prema Ani Veržbickoj

ja, ti, neko, nešto, ljudi	[zamenica ili imenica]
to, isto, jedan, dva, sve, mnogo	[određivanje i vrednovanje]
znati, želeti, misliti, osetiti, reći	[mentalni predikati]
činiti, desiti se	[posrednik, strpljiv]
dobro, loše	[ocenjivanje]
veliko, malo	[opisivanje]
moći, ako (bih)	[mogućnost, nerealnost]
pošto	[uzročnost]
ne (ništa)	[negacija]
kada, gde, posle (pre) ispod (iznad)	[vreme i mesto]
vrsta od, deo od	[razvrstavanje, patronomi]
kao (slično)	[ogradivanje/prototip]

Sledeći dugotrajno istraživanje Ane Veržbicke i njenu istraživačku školu, svi ovi pojmovi postoje u jezicima koji su do sada proučavani.¹. Oni su odredili značenje svakog primitiva u detaljima, vršeći proveru doslednosti i odbacujući drugačije pristupe. Oni su proverili ovu listu u jezicima iz svih jezičkih grupa, u jezicima sa svih kontinenata, te pokazali da rezultati važe bilo gde. U svakom jeziku svi ostali pojmovi mogu da se odrede uz pomoć semantičkih primitiva. (**Ref. 241**). Jednostavno rečeno, učenje da se govori znači naučiti ove osnovne pojmove, naučiti kako da se oni kombinuju i naučiti nazive ovih složenica. Navedene odrednice jezika, naime kao značenja komuniciranja koji omogućava da se izrazi sve što želi da se kaže, stoga može da se preradi:

- Samo skup koji sadrži univerzalne semantičke primitive čini **jezik ljudi**.

Za fizičare – čiji je cilj da se izražavaju sa što je moguće manje reči – popis semantičkih primitiva ima tri gledišta. Prvo, pristup je sličan samom cilju fizike: ideja primitiva daje struktuiran zaključak svega što se može iskazati, baš kao što atomski elementi struktuiraju sve materijalne objekate koji se mogu dodirnuti. Drugo, popis primitiva može da se podeli u dve grupe: jedna grupa sadržavala bi sve pojmove koji opisuju kretanje (činiti, desiti se, kada, gde, osetiti, mali itd – verovatno bi trebalo dodati pomove iz polja semantike oko svetlosti i boja – a druga grupa sadržavala bi sve pojmove neophodbe za razgovor o zaključcima i odnosima (to, sve, vrsta od, ne, ako itd.) Čak i za lingviste, aspekti o kretanju i logičko pojmovi predstavljaju osnovne entitete ljudskih iskustava i razmišljanja ljudi. Da bi se problem istakao,

- Semantički primitivi sadrže osnovne elemente fizike i osnovne elemente matematike

Svi ljudi su zato kako fizičari, tako i matematičari.

Treća tačka je da je popis primitiva Veržbicke predugačak. Podela spiska na dve grupe direktno sugerira kraću listu; moramo samo da zamolimo fizičare i matematičare za sažet zaključak njihovih respektivnih oblasti. Da biste više cenili ovaj cilj, pokušajte da odredite šta znači “ako”, ili šta je “suprotno” – i istražite vaš sopstven način da se popis smanji. (**Izazov 260d**).

Smanjenje popisa primitiva takođe je jedan od naših ciljeva u ovoj pustolovini. U ovom poglavlju mi ćemo istražiti matematičke grupe primitiva. Fizičke grupe će nas okupirati u ostatku naše pustolovine. Međutim, kraći popis primitiva nije dovoljan.

- Naš cilj je da dođemo do opisa prirode koji se sastoji samo od jednog osnovnog pojma.

¹ Lako je zamisliti da su ova istraživanja hodala na prstima kod mnogih ljudi. Popis koji tvrdi da imamo samo trideset osnovnih pojmove u našim glavama smatra se uvredljivim od strane mnogih malih umova. Osim toga, popis koji tvrdi da su složenice „istina“, „dobro“, „stvaranje“, „život“, „majka“, „ili“, „bog“, pokrenuće nasilničke reakcije uprkos tačnosti iskaza. U stvari, neki od ovih pojmovea dodato je na popis 1996. godine, koji je unekoliko duži.

Fizičari žele da govore kao stumpfovi: da koriste samo jedan pojam. Premda nije jednostavno da se taj cilj postigne. Prvo, potrebno je da se proveri da li je **kompletan** skup klasičnih fizičkih pojmoveva koje smo do sada otkrili. Mogu li klasični fizički pojmovi da opisu sva zapažanja? Deo o kvantnoj fizici u našoj pustolovini posvećen je ovom pitanju. (**Vol. IV, strana 17**). Drugi zadatak je da se popis smanji. Ovaj zadatak nije jednostavan; već smo otkrili da se fizika zasniva na kružnim odrednicama: u Galilejevoj fizici prostor i vreme su određeni pomoću materije, a materija je određena preko prostora i vremena. (**Vol. I, strana 313**). Biće nam potrebno dosta napora da prevaziđemo ovu prepreku. U konačnom delu ovog teksta biće ispričana precizna priča. Posle brojnih pustolovina mi čemo ustvari otkriti osnovne pojmove na kojima se zasnivaju svi drugi pojmovi. (**Vol. VI, strana 117**)

Možemo sabrati sve napred pomenute rezultate u lingvistici na sledeći način. Kada se iskaz sastavi samo sa subjektom, glagolom i objektom, koristeći samo pojmove sastavljeni od semantičkih primitiva, možemo biti sigurni da će on moći da se prevede na sve jezike. Ovo objašnjava zbog čega su udžbenici fizike vrlo često dosadni: pisci su često jako uplašeni da odu od ove osnovne šeme. S druge strane, istraživači su pokazali da takvi jednostavnii iskazi nisu ograničavajući. **Pomoću imenica i glagola možemo da kažemo sve što može da se kaže.**

Svaka reč je nekad bila pesma.

Ralf Valdo Emerson (Ralph Waldo Emerson)¹

DA LI JE MATEMATIKA JEZIK?

Die Sätze der Mathematik sind Gleichungen, also Scheinsätze. Der Satz der Mathematik drückt keinen Gedanken aus.²

Ludwig Vitgenštajna (Ludwig Wittgenstein),
Tractatus, 6.2, 6.21

Postoji grupa ljudi koja je zauzela krajnje čvrsto gledište u vezi prevođenja i preciznosti. Oni su sve pojmove izgradili od čak i manjeg skupa primitiva, naime samo dva: "skup" i "odnos", i objašnjavaju brojne moguće kombinacije ova dva pojma, proučavajući njihova brojna razvrstavanja. Korak po korak, ova radikalna grupa, obično nazivana **matematičari**, uspela je da uz potpunu preciznost opiše pojmove kao što su brojevi, tačke, krive, jednakosti, grupe simetrija i više. Konstrukcija ovih pojmoveva sabrana je delimično u narednom tekstu i delom u sledećem delu ove pustolovine. (**Vol. IV, strana 173**).

Matematika je rečnik koji nam pomaže da razgovaramo uz preciznost. Matematika može da bude posmatrana kao istraživanje svih mogućih pojmoveva koji mogu da se konstruišu od dva osnovna građevinska bloka: "skup" i "odnos" (ili nekog drugog, ali ekvivalentnog para).

➤ **Matematika** je nauka simbolične neophodnosti.

Da ponovimo još jednom, matematika je objašnjenje svih mogućih vrsta klasifikacija. Ili, uz manje humora: matematika je istraživanje tautologije. Ovakvo gledište objašnjava korisnost matematike u svim situacijama gde su potrebna kompleksna, ali precizna razvrstavanja opažanja, takva kao što su u fizici.

Međutim, matematika ne može da izrazi sve što ljudi žele kada komuniciraju, kao što su želje, ideje i osećanja. Pokušajte da izrazite zadovoljstvo pri plivanju koristeći matematiku. Ustvari, matematika je nauka o simboličnim **neophodnostima**; stoga matematika nije jezik, niti ga sadrži. Matematički pojmovi, budući da se zasnivaju na **sažetom** skupu i odnosima, ne pripadaju prirodi. Uprkos njene lepote, matematika ne omogućava da se govori o prirodi ili o zapažanjima kretanja. Matematika nam ne govori **šta** da se kaže o prirodi, ona nam govori **kako** da to kažemo.

Ukratko, preciznost matematike, posebno u aksiomskoj strukturi, ima jednu neželjenu posledicu: nijedan matematički pojam ne govori o prirodi ili zapažanjima.³

¹ Ralf Valdo Emerson (Ralph Waldo Emerson, 1803. Boston – 1882. Concord) bio je uticajan esejist i filozof

² „Rečenice matematike su jednakosti, pa prema tome prividne su rečenice. Rečenice u matematici ne mogu da izraze mišljenje.“

³ U meri u kojoj možemo da kažemo da se matematika zasniva na pojmovima "skup" i "odnos", koji su zasnovani na iskustvu, možemo da kažemo da matematika istražuje te realnosti, a da su njeni pojmovi izvedeni iz iskustva. Ovo i

➤ Matematika nije jezik

Prema tome, za proučavanje kretanja potrebni su drugi, mnogo upotrebljiviji pojmovi.

U svom čuvenom predavanju u Parizu, održanog 1900. godine, čuveni matematičar David Hilbert¹ izneo je popis od 23 velikih izazova sa kojima se suočava matematika, Šuština problema Hilberta bila je kako pronaći matematičke postupke za aksiome u fizici. Naša pustolovina je do sada pokazala da je fizika započela uz *kružne odrednice* koje nisu uklonjene ni posle 2500 godina istraživanja: prostor-vreme određeno je je pomoću objekata, a objekti su određeni uz pomoć prostora i vremena. (*Vol. I, strana 313*). Budući da se zasniva na kružnim odrednicama, fizika nije modelirana prema matematici, premda su mnogi fizičari i matematičari, uključujući Hilberta, voleli da je tako. (*Ref. 256*). Fizičari moraju da žive sa logičkim problemima i moraju da hodaju po nesigurnom terenu kako bi postigli napredak. Ustvari oni to čine već 1500 godina.

Ukratko, matematika nije jezik; fizika jeste. Matematika je aksiomski sistem. Fizika nije. Kada bi fizika bila aksiomski sistem, nebi sadržavala kružne odrednice; u tom slučaju prestala bi da bude jezik i prestala bi da opisuje prirodu. Mi ćemo se vratiti na ovo centralno pitanje u poslednjem delu naše pustolovine. (*Vol. VI, strana 89*). Za sada, zapazićemo da pojmovi zahtevaju da precizan opis kretanja mora da bude fizički, pošto matematički koncept nije dovoljan

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.²

Albert Ajnštajn (Albert Einstein)

ŠTA JE POJAM

Pojmovi su samo rezultati, izvedeni trajno iz jezika, prema predhodnom procesu upoređivanja

Vilijam Hamilton (William Hamilton)

Koje osobine mora da ima upotrebljiv pojam? Na primer šta je “strast” i šta su “štapići za uši”? Očigledno je da upotrebljiv pojam podrazumeva popis njegovih delova, njihov aspekt i njihov unutrašnji odnos., a takođe i njihov odnos prema spoljnem svetu. Mislioci u raznim oblastima, od matematičara do fizičara, čak i od filozofa do političara saglasni su da odrednica glasi

➤ **Pojam** imai:

1. jasan i određen **sadržaj**
2. jasne i određene **granice**
3. jasnu i određenu **oblast primene**.

Nemogućnost da se navedu ove osobine ili zadržati ih utvrđenim, često je najlakši put da se razlikuju ludaci od pouzdanih mislioca. Nejasno određen pojam, koji stoga ne može da bude pojam, redovno se

slična gledišta matematike nazivaju se **platonizam**. Još tačnije, platonizam je pogled po kojem pojmovi u matematici postoje **nezavisno** od ljudi, a da su ih matematičari otkrili, međutim, nisu ih oni stvorili.

U stvari, pošto matematičari koriste mozak, koji je fizički sistem, zapravo je **matematika primenjena fizika**.

Međutim, mi ćemo otkriti da pojam “skup” ne pripada prirodi, što u potpunosti menja raspravu. (*Vol. VI, strana 86*).

¹ David Hilbert (David Hilbert, 1862. Konigsberg – 1943. Gottingen) bio je profesor matematike u Gotingenu i veliki matematičar u njegovo vreme. Bio je centralna ličnost u mnogim oblastima matematike, a takođe je odigrao važnu ulogu u radanju opšte teorije relativnosti i kvantne teorije. Njegovi udžbenici još uvek se štampaju. Njegovo poznati lični kredo je bio “Wir müssen wissen, wir werden wissen” (“Mi moramo znati, mi ćemo znati.”) Njegovo čuveno predavanje u Parizu je objavljeno na primer u *Die Hilbertschen Probleme*, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, 1983. Predavanje je preokrenulo sve u matematici. (Uprkos naporima i obećanjima večne slave, niko na svetu nije imao sličan uvid u matematiku koji bi omogućio njemu ili njoj da ponovi podvig u 2000. godini.) U njegovoj zadnjoj deceniji života pretrpeo je progon od strane nacističkog režima; progon je izbacio Göttingen iz popisa važnih naučnih univerziteta, a da do današnjih dana nije vraćen na njegovo mesto.

² “Ukoliko se matematički izrazi odnose na stvarnost, oni nisu sigurni, a ukoliko su sigurni, oni nisu stvarnost.”

pojavljuje u mitovima, na primer, "zmaj" ili "sfinga", ili u ideologijama, na primer, "radnik", "duša" ili "primer". Čak ni fizičari nisu imuni na to. Na primer, otkrićemo kasnije da ni "svemir" ni "stvaranje" nisu pojmovi. Da li ste sposobni da razmatrate ovaj slučaj? (**Izazov 261s**).

Međutim, tri osobine koje određuju svaki pojam interesantne su sane po sebi. Jasan sadržaj znači da su pojmovi izgrađeni jedan na drugom. Posebno, većina osnovnih pojmoveva izgleda da su oni koji nemaju ni delove ni osnose sa spoljašnjosti, već samo unutrašnje odnose. Možete li da zamislite jedan? (**Izazov 262s**). Tek će poslednji deo ovog hodanja da otkrije poslednju reč ove teme.

Zahtevi za određenim granicama i određenim sadržajima takođe podrazumevaju da su svi pojmovi koji opisuju prirodu ili *skupovi* ili *odnosi* ili oboje – pošto se skupovi i odnosi podvrgavaju zahtevima za pojam.¹ Pošto se matematika zasniva na pojmovima "skup" i "odnos", zaključujemo da matematika može da obezbedi *oblik* za svaki pojam, posebno uvek kada se zahteva velika preciznost, kao u slučaju proučavanja kretanja. Očigledno, sadržaj opisa jedino obezbeđuje proučavanje same prirode; jedino tada pojam postaje upotrebljiv.

Fizika je precizan opis kretanja. Traženje dovoljno preciznog pojma u fizici može da se posmatra kao posebna tema koja je stvorila istoriju u ovom polju. Novi pojmovi su redovno predlagani, istraživani po svim osobinama, i proveravani. Konačno, pojam bi bio prihvacen ili odbačen, na isti način na koji deca odbace ili prihvate novu igračku. Deca to učine nesvesno, naučnici to urade svesno, koristeći jezik.² Iz tog razloga u fizici su pojmovi razumljivi, pa prema tome i svi pojmovi.

Treba primetiti da pojam "pojam" sam z sebe nije moguć da se odredi nezavisno od iskustva, pojam je nešto što nam pomaže da delujemo i da reagujemo u svetu u kojem živimo. Više od toga, pojmovi ne žive u svetu odvojeni od onih fizičkih: svaki pojam zahteva pamćenje kod onog koji ga koristi, pošto korisnik mora da upamti način na koji je pojam načinjen; prema tome, svakom pojmu potrebna je materijalna podrška za njegovo korišćenje i primenu. Stoga su svako razmišljanje i celokupna nauka utemeljeni na osnovu iskustva.

Kao zaključak, svi pojmovi se zasnivaju na ideji da je priroda načinjena od povezanih delova. Ova ideja nas dovodi do parova koji se dopunjaju: "imenica – glagol" u lingvistici, "skup – odnos" ili "odrednica – teorema" u matematici ili "vid prirode – uzorak prirode" u fizici. Ovi parovi neprestano vode ljudsko razmišljanje, od detinjstva nadalje, kao što to može da potvrdi psihologija razvoja. Mi ćemo sada da istražimo neke posebne pojmove koji su od važnosti u našoj pustolovini.

ŠTA SU SKUPOVI? ŠTA SU ODNOSI?

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.³

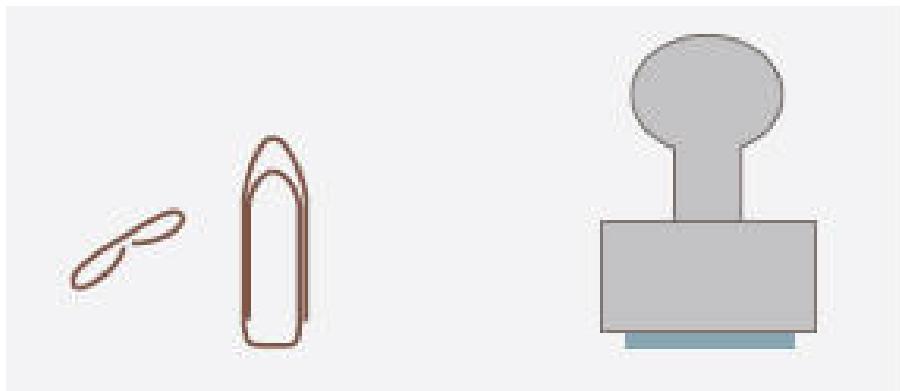
Ludwig Vitgenštajn (Ludwig Wittgenstein),
Tractatus, 5.634

Određivanje skupova i određivanje odnosa dva su osnovna delovanja našeg razmišljanja. Ovo može da se vidi još jasnije u svakoj knjizi iz matematike, pošto su takve knjige obično podeljene na paragrafe označene sa "odrednica" s jedne strane, i "teorema", "lema" ili "posledica" s druge strane. Prvi tip paragrafa upoznaje nas sa nekim skupovima, a druge vrste paragrafa izražavaju odnose, to jest povezanosti ovih skupova ili njihovih elemenata. *Matematika* stoga istražuje moguće simboličke pojmove i njihove veze. Kao što smo već pomenuli matematika je nauka o neophodnosti simbola..

¹ Vidimo da je svaki fizički pojam primer (matematičke) *kategorije*, to jest kombinacija objekta i mapiranja/odnosa. Za više detalja o kategorijama, uz preciznu odrednicu termina, pogledajte **stranu 209**.

² Pojmovi oblikovani u ranoj mладости najtežu su da se precizno odrede, to jest pomoću jezika. Neko ko je bio nemoćan da ih odredi, kakav je bio uticajan filozof Immanuel Kant (Immanuel Kant, 1724. Königsberg, - 1804 Königsberg), nazivao ih je "*a priori*" pojmovi (kakvi su "prostor" i "vreme"), nasuprot onima koji su jasnije određeni "*a posteriori*" pojmovi. Danas se pokazalo da je ovo razlikovanje neosnovano, kako pri proučavanju dečje psihologije (videti fusnote na **strani 185**), tako i u samoj fizici, te zato ovo vrednovanje nije korišćeno u našem hodanju.

³ „Sve što vidimo, moglo bi da bude takođe i drugačije. Šve što uopšte možemo da opišemo može takođe da bude i drugačije. Ne postoji a priori red stvari.“



Slika 171 Predmeti za određivanje skupa (levo) i odnos (desno)

Skupovi i odnosi su alati za razvrstavanje; to je ono zbog čega su oni isto tako alati svakog birokrata. (Videti [sliku 171](#).) Ovu vrstu ljudskih bića karakteriše velika upotreba papira, spajalica, podataka, metalnih ormana, arhiva – od kojih svaki određuje različitu vrstu skupova – i velika upotreba brojeva, kao što su referentni brojevi, broj kupca, broj pasoša, broj računa, broj pravnog akta, - od kojih svaki određuje drugaćiju vrstu odnosa između predmeta, to jest između elemenata skupa.

Ukratko, u najgorem slučaju matematika je birokratizacija fizike. U najboljem slučaju matematika nas vodi kroz nova saznanja.

I pojam skup i pojam odnos izražavaju na različite načina činjenicu da priroda može da se opiše, to jest, da može da se *razvrsta* po delovima koji sačinjavaju celinu. Čin grupisanja u celinu vidova iskustva, to jest čin njihovog razvrstavanja, izražen je u formalnom jeziku tako što se kaže da je skup određen. Drugim rečima, *skup* je zbirka *elemenata* iz našeg razmišljanja. U svakom skupu razlikuju se elementi jedan od drugog i od samog skupa. Ovakva odrednica skupa naziva se *naivna* odrednica. Za fiziku je odrednica dovoljna, ali nećete naći mnogo njih koji će to da priznaju. Zapravo, matematičari su više puta prerađivali odrednicu pojma “skup”, pošto se naivna odrednica nije nije dobro uklapala u beskonačne skupove. Poznati primer je priča o skupu koji ne sadrži sam sebe. Očigledno, bilo koji skup jedan je od dve vrste; ili sadrži sebe samog ili ne sadrži. Ako uzmemos skup iz svih skupova koji ne sadrže sami sebe, kojoj vrsti takav skup pripada? ([Izazov 263s](#)).

Da bi se izbegli problemi sa pojmom “skup”. matematika zahteva preciznu odrednicu. Prvu takvu odrednicu dali su matematičari Erns Cermelo (Erns Zermelo, 1871. Berlin, – 1951 . Freiburg i.B.) i Adolf/Abraham Frenkel (Adolf/Abraham Fraenkel, 1891. München – 1965. Jerusalem). Kasnije je bila dodana takozvana teorma *aksiom izbora*, kako bi bilo moguće da se radi sa većom klasom beskonačnih skupova. Rezultat takvih dostignuća nazvan je ZFC odrednica:¹ Iz ove osnovne odrednice možemo da konstruišemo sve matematičke pojmove koji se koriste u fizici. Sa praktične tačke gledišta, dovoljno je da se ima na umu da je za celu fiziku naivna odrednica skupa ekvivalentna preciznoj ZFC odrednici, zapravo čak i pojednostavljenoj ZFC odrednici. Podnaslovi se pojavljuju samo kod specijalnih vrsta beskonačnih skupova, ali se oni u fizici ne koriste. Ukratko, iz osnovne naivne odrednice skupa možemo da konstruišemo sve pojmove koji se koriste u fizici.

Naivna odrednica skupa daleko je od dosadne. ([Ref. 243](#)). Da bi dva čoveka bila zadovoljna kada dele kolač, pratimo pravilo: ja sećem, ti biraš. Metoda ima dva svojstva: ona je *pravedna*, jer svako misli da ima ideo koji zaslžuje, i *potpuno je zadovoljavajuća*, jer svako ima osećaj da ima najmanje onoliko koliko i drugi. Kakvo pravilo je potrebno za tri čoveka? A za četiri? ([Izazov 265d](#)).

¹ Opšti pregled teorije aksiomskih skupova dali su Pol J. Koen (Paul J. Cohen) i Rojben Herš (Reuben Hersch) u *Non-Cantorian set theory*, ScientificAmerican 217, strane. 104–116, 1967. To su bila vremena kada je Scientific American još uvek bio kvalitetan časopis.

Za dobar uvod u aksiom izbora videti veb stranu math.vanderbilt.edu/schectex/ccc/choice.html.

Ostale vrste subjekata, mnogo opštijih od standardnih skupova, koji se povezuju drugim svojstvima, takođe mogu da se odrede, i oni su takođe predmet (neuporedivo manje) matematičkih istraživanja. ([Ref. 242](#)). Da bi se našao primer, pogledajte odeljak o kardinalnosti koji sledi ([strana 209](#)). Takvi, opštiji subjekti nazivaju se klase uvek kada sadrže najmanje jedan skup. Možete li da navedete primer? ([Izazov 264s](#)). U poslednjem delu uspona na planinu mi ćemo se sresti sa fizičkim pojmovima koji nisu opisani niti skupovima niti klasama, jer ne sadrže skup uopšte. To je mesto gde počinje stvarna zabava.

TABELA 22 Osobine koje određuju skup – ZFC aksiomi

Aksiomi teorije skupa ZFC	
Dva skupa su jednaka ako i samo ako imaju jednakе elemente	(Aksiom o ekstenzionalnosti)
Prazan skup je skup	(Aksiom o nultom skupu)
Ako su x i y skupovi, tada je i neuređen par $\{x, y\}$ takođe skup	(Aksiom o neuređenom paru)
Ako je x skup iz skupova, unija svih njihivih elmenata je skup	(Aksiom o uniji ili zbiru)
Subjekt $\{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\{\emptyset\}\}, \{\{\{\emptyset\}\}\}, \dots\}$ je skup ^{a)} – drugim rečima, beskonačna kolekcija, kao što su prirodni brojevi, takođe je skup	(Aksiom o beskonačnosti)
Subjekt koji je određen elementima koji imaju data svojstva je skup, pod uslovom da su ova svojstva razumna; neophodne su neki tehnički zahvati da bi se odredilo “razumno”	(Aksiom o razdvajaju)
Ako je oblast funkcije skup, onda je to i njena oblast	(Aksiom o zameni)
Subjekt y iz svih podskupova x je takođe skup i naziva se delimičan skup ^{b)} .	(Aksiom o partitivnom skupu)
Skup nije sopstveni element – plus neki tehnički zahvati	(Aksiom o pravilnosti)
Proizvod familije skupova koji nisu prazni nije prazan skup. Ekvivalentno tome, izbor elemenata iz popisa skupova omogućava da se načini nov skup – plus neki tehnički zahvati	(Aksiom izbora)

^{a)} Uobičajena formulacija (mada je ista kao gornja) je: subjekt $\{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\{\emptyset\}\}, \{\{\{\emptyset\}\}\}, \dots\}$ je skup

^{b)} Skup $\{a, b, c\}$ je podskup skupa $\{a, b, c\}$. Popis svih podskupova $S = \{a, b, c\}$ čini delimične skupove $\{a, b, c\}$:
 $P(S) = \{\{\}, \{a\}, \{b\}, \{c\}, \{a, b\}, \{a, c\}, \{b, c\}, \{a, b, c\}\}$

Osim određivanja skupova, svako dete i svaki mozak stvara veze između različitih vidova iskustva. Na primer, kada začuje glas, ono automatski pravi vezu sa prisutnom osobom. Na formalnom jeziku, veze ovakvog tipa nazivaju se *odnosi*. Odnosi spajaju i razdvajaju elemente po drugim linijama no skupovi: ova dva su par koji se dopunjaju. Određivanje skupa objedinjuje mnoge objekte a u isto vreme ih razdvaja: na one koji pripadaju skupu i na one koji ne pripadaju; određivanje (binarnog) odnosa objedinjuje elemente dva po dva i deli ih, naime na mnogo parova koje određuje.

Skupovi i odnosi su usko međusobno povezani pojmovi. Zapravo, može da se odredi (matematički) odnos uz pomoć skupova. (*Binarni odnos*) između dva skupa X i Y je podskup od skupa proizvoda, pri čemu je *skup proizvoda*, ili *Kartezijanski proizvod* $X \times Y$ skup svih uređenih parova (x, y) uz $x \in X$ i $y \in Y$. *Uređen par* (x, y) može jednostavno da se odredi uz pomoć skupova. Možete li da nađete kako? (*Izazov 266s*). Na primer, za slučaj “je žena od”, skup X predstavlja skup svih žena, a skup Y predstavlja skup svih muškaraca; veza je data kroz popis svih uređenih parova na odgovarajući način, koji je mnogo manji od partitivnog skupa, to jest skupa svih mogućih kombinacija žena-muškarac.

Treba zapaziti da upravo data odrednica odnosa nije zaista kompletan, pošto svaka konstrukcija pojma “skup” već sadrži izvesne odnose, kao što je odnos “je element od”. Čini se da nije moguće da se smanji bilo koji od pojmove “skup” ili “odnos” u potpunosti onim drugim. Ova situacija se odražava u slučajima skupa i odnos u fizici, kao što je prostor (kao skup tačaka) i rastojanja, za koje isto tako izgleda da nije moguće da se u potpunosti međusobno razlikuju. Drugim rečima, iako matematika ne pripada prirodi, njeni dva osnovna pojma, skupovi i odnosi, preuzeti su iz prirode. Osim toga, dva pojma, kao što su oni prostor-vreme i čestica određeni su svaki uz pomoć onog drugog.

BESKONAČNOST – I NJENE OSOBINE

Matematičari su ubrzo otkrili da je pojam “skup” jedino upotrebljiv ako se može nazvati kao “skup” zbirka, kao što je $\{0, 1, 2, 3, \dots\}$, to jest broj 0 i svi njeni sledbenici. Da bi se to postiglo, jedna osobina iz popisa Cermelo-Frenkel koji određuje izraz “skup” izričito navodi da ovakva beskonana zbirka može da se nazova skup. (zapravo, isto tako i aksiom o zameni izražava da skupovi mogu da budu beskonačni.) Beskonačnost je ubaćena u matematiku i dodana u alate našeg razmišljanja već od samog početka, u odrednici pojma skup. Kada se priroda opisuje, uz matematiku ili bez nje, nikada ne smemo da zaboravimo ovu činjenicu. Nekoliko dopunskih tačaka o beskonačnosti trebalo bi da budu opšte znanje svakog poznavaoца kretanja.

Skup je beskonačan ako postoji funkcija koja je *injektivna* (to jest različiti elementi mapiraju različite retultate) ali ne *prema* (to jest neki elementi se ne pojavljuju kao slike mapiranja); na primer, $n \mapsto 2n$ pokazuje da je skup celih brojeva beskonačan. Beskonačnost se može proveriti i na drugi način: skup je

beskonačan ako ostaje takav i posle odstranjivanja jednog elementa, čak i više puta. Treba samo da upamtimo da je prazan skup **konačan**.

Samo skupovi mogu da budu beskonačni. Ali skupovi imaju delove, naime njihove elemente. Kada se stvar ili pojam nazovu beskonačnim, uvek se zapita i odredi kakvi su to delovi: za prostor delovi su tačke, za vreme to su trenuci, za skup celih brojeva to je ceo broj itd. Subjekt koji se ne može podeliti, ili da se deli na konačan broj delova, ne može da se nazove beskonačnim.¹

Postoji mnogo vrsta beskonačnosti, svi su različitih veličina². Ovaj važan rezultat otkrio je matematičar Georg Kantor (Georg Cantor, 1845. Saint Petersburg – 1918. Halle an der Saale). On je pokazao da se iz prebrojivog skupa prirodnih brojeva mogu konstruisati drugi beskonačni skupovi koji nisu prebrojivi. On je pokazao da je delimični skup $P(\omega)$, naime skup svih podskupova od prebrojivog beskonačnog skupa, beskonačan, ali da nije i prebrojivo beskonačan. Površno govoreći, delimičan skup je “više beskonačan” nego li originalni skup. Realni brojevi \mathbb{R} da bi se ukratko odredili, predstavljaju primer neprebrojivog beskonačnog skupa; postoji ih mnogo više no što postoji prirodnih brojeva. (Možete li to da pokažete?) (**Izazov 267s**) Međutim, svaka vrsta beskonačnog skupa sadrži bar jedan podskup koji je prebrojivo beskonačan.

Čak i za bekonačan skup može da se odredi veličina kao broj njegovih elemenata. Kantor je nazvao ovaj pojam veličine kao **kardinalnost** skupa. Kardinalnost je za konačan skup data prosto kao broj njegovih elemenata. Kardinalnost skupa celih brojeva naziva se \aleph_0 (izgovara se “alef nula”) prema prvom slovu hebrejske azbuke. (**Vol. I, strana 318**). Najmanja neprebrojna kardinalnost je \aleph_1 . Sledeća kardinalnost je \aleph_2 itd. Cela grana matematike bavi se manipulacijama sa ovim beskonačnim “brojevima”: sabiranje, množenje, stepenovanje lako se određuju. Za neke od njih imaju smisla čak i logaritmi i druge funkcije.³

Kardinalnost je određena na ovakav način, uključujući \aleph_n , \aleph_ω , \aleph_{\aleph_κ} nazivaju se **dostupnpm**, pošto je Kantor nazvao **nedostupnim** veće vrste beskonačnosti koje su odredili ljudi. Za ove brojeve (nedostupne kardinalnosti, merljive kardinalnosti superkompatne kardinalnosti itd.) porebne su nove aksiome, prošiten ZFC sistem. Isto kao ordinalnost i kardinalnost čini primer koji se nazivaju **transkonačni** brojevi.

Realni brojevi imaju kardinalnost partitivnog skupa celih brojeva, naime 2^{\aleph_0} . Možete li to da dokažete? (**Izazov 268s**). Rezultat dovodi do čuvenog pitanja: Da li je $\aleph_1 = 2^{\aleph_0}$ ili nije? Iskaz da je to tako, naziva se **hipoteza kontinuuma** i nije bila dokazana tokom mnogo generacija. Iznenadujući rezultat nađen je 1963. godine: uobičajena odrednica pojma skup nije dovoljno specificirana da bi se utvrdio odgovor. (**Ref. 244**). Specificiranjem pojma sa više detalja, uz dodatne aksiome – upamtili smo da aksiomi određuju svojstva – može se hipoteza o kontinuumu načiniti ili tačnom ili netačnom, kako nam je po volji.

Naredni rezultat istraživanja transkonačnosti je važan: za svaku odrednicu tipa beskonačne kardinalnosti izgleda da bi bilo moguće da se pronađe najveća. U svakodnevnom životu ideja o beskonačnosti obično se koristi da bi se prekinulo raspravljanje o veličini: “Moj veliki brat je jači od tvog.” “Ali moj je beskrajno jači od tvog!” Matematika je pokazala da se pitanja o snazi nastavljaju posle: “Snaga mog brata je delimični skup snage tvog brata!” (**Ref. 245**). Ruker izveštava da matematičari predpostavljaju da niti je moguć niti je zamisliv kraj ovakvim raspravama.

Za fizičare se direktno pojavljuje pitanje. Da li beskonačne veličine postoje u prirodi? Ili bolje, da ji je potrebno da se koriste beskonačne veličine u opisu prirode? Možda želite da pojasnite vaše mišljenje po ovom pitanju. (**Izazov 269e**). Ono će biti rešeno u toku ostatka naše pustolovine.

FUNKCIJE I STRUKTURE

Koji odnosi su korisni da bi se opisali obrasci u prirodi? Tipičan primer je “veći kamen je teži”. Ovakav odnos je posebnog tipa: on povezuje specifičnu zapreminu posmatranja “zapremine” i specifičnu vrednost posmatranja “težina”. Takav jedan-na-jedan odnos naziva se (**matematička**) **funkcija** ili **mapiranje**.

¹ Prema tome, većina bogova, budući da su pojmovi, pa prema tome i skupovi, ili su konačni, ili su deljivi u slučaju da su beskonačni. Izgleda da ovaj zaključak ne smeta samo mnogobrošcima i panteistima.

² Ustvari postoji takav veliki broj vrsta beskonačnosti od kojih ni jedna beskonačnost sama zapravo ne opisuje taj broj. Tehnički govoreći, postoji onoliko beskonačnosti koliko ima rednih brojeva.

³ Više rezultata je sabrani u odličnoj i očaravajućoj knjižici od Rudi Rukera (Rudy Rucker) *Infinity and the Mind - the Science and Philosophy of the Infinite*, Bantam, Toronto, 1983.

Funkcije su najspecifičnije vrste odnosa; stoga one prenose maksimum informacija. Na isti način kao brojevi koji se koriste za posmatranja, funkcije omogućavaju laku i preciznu komunikaciju odnosa između posmatranja. Sva pravila u fizici i "zakoni" prema tome su izraženi uz pomoć funkcija, a pošto je fizički "zakon" poput merenja, funkcije brojeva su njihov najmanji građevinski blok.

Funkcija f ili preslikavanje je prema tome binarni odnos, to jest skup $f = \{(x, y)\}$ je uređen par, u kojem za svaku vrednost prvog elementa x , koji se naziva **argument**, postoji samo jedan par (x, y) . Drugi element y naziva se **vrednost funkcije** za argumet x . Skup X svih argumenata x naziva se **oblast određenosti**, a skup Y svih drugih argumenata y naziva se **oblast** funkcije. Unesto da se piše $f = \{(x, y)\}$ piše se

$$f : X \rightarrow Y \quad \text{ili} \quad f : x \mapsto y \quad \text{ili} \quad y = f(x) \quad (98)$$

gde vrsta strelice – sa crticom na početku ili bez nje – pokazuje da li se radi o skupu ili o elementima.

Primetili smo da je moguće da se koristi par "skup" i "preslikavanje" da bi se odredili svi matematički pojmovi.; u tom slučaju odnos je određen uz pomoć preslikavanja. Savremena škola matematičke misli formalizovala je ovaj pristup korišćenjem (matematičkih) **kategorija**, pojma koji uključuje kako skupove tako i preslikavanje u ravноправnim stopama u njihovoj odrednici.¹

Da se jasnije razmišlja i razgovara o prirodi, potrebno je da odredimo specijalnije pojmove od skupova, odnosa i funkcija, pošto su ovi osnovni pojmovi isuviše uopšteni. Najvažniji pojmovi izvedeni iz njih su operacije, algebarske strukture i brojevi.

(Binarna) operacija je funkcija koja preslikava Kartezijanski proizvod u dve kopije skupa X u sebe. Drugim rečima, operacija w uzima uređeni par argumenata $x \in X$ i dodeljuje ga u vrednost $y \in X$:

$$w : X \times X \rightarrow X \quad \text{i} \quad w : (x, x) \mapsto y \quad (99)$$

Da li je deljenje brojeva operacija u smislu koji je upravo određen? (**Izazov 270s**)

Sada smo spremni da odredimo prvi od tri osnovna pojma matematike. **Algebarska struktura**, takođe nazvana i **algebarski sistem**, je (u najograničenijem smislu) skup zajedno sa izvesnim operacijama. Najvažnije algebarske strukture koje se javljaju u fizici su grupe, vektorski prostori i algebra. (**Vol. IV, strana 182**).

Pored algebarskih struktura, matematika se zasniva na **uređenim skupovima** i na **topološkim strukturama**. Uređeni skupovi su izgrađeni od blokova brojeva i potrebni su da bi se odredila upoređivanja svake vrste. Topološke strukture (razvrstavanja) izgrađene su, preko podskupova, na poju susedstva. One su potrebne da se odrede kontinuitet, granice, dimenzionalnost, topološki prostori i mnogostrukost (**Vol. V, strana 275**).

Očigledno, većina matematičkih struktura su kombinacije raznih primera ove tri vrste osnovnih struktura. Na primer, **sistem** realnih brojeva dat je kao **skup** realnih brojeva sa **operacijama** sabiranja i množenja, **odnosom reda** "veći od" i osobinom **neprekidnosti**. Prema tome, oni su izgrađeni kombinacijom algebarske strukture, uređenim skupom topološkom strukturom. (**Ref. 247**). Zadubimo se u detalje.

BROJEVI

*Koji broj je pomnožen sa šest ako mu se odstrani zadnja cifra i premesti na početak? (**Izazov 271s**)*

Brojevi su najstariji matematički pojам i mogu se nači u svim kulturama. Pisanje brojeva, od grčke reči ἀριθμός, menjalo se više puta. Svaki put cilj je bio da se uključi šira klasa objekata, ali je uvek očuvana opšta ideja da su brojevi subjekti koji mogu da se sabiraju, oduzimaju, množe i dele.

¹ Kategorija je određena kao zbirka objekata i zbirka „morfizma“ ili preslikavanja. Morfizam može da bude složen; kompozicija je asocijativna i postoji morfizam identiteta. Više detalja se može naći u literaturi. (**Ref. 246**)

Treba zapaziti da svaka kategorija sadrži skup: pošto je nejasno da li priroda sadrži skupove, o čemu ćemo raspravljati u tekstu koji sledi (**strana 237**), upitno je da li će kategorije biti korisne u objedinjavanju fizikr, uprkos njihovom intenzitetu i apstraktnom šarmu.

Savremen način pisanja brojeva, na primer u $12\ 345\ 679 \cdot 54 = 666\ 666\ 666$ bitan je za nauku.¹ Može se raspravljati da li je nepostojanje dobrog sistema zapisivanja i računanja usporilo razvoj nauke tokom više vekova. (Uzgred, isto može da se kaže za dostupne masovno umnožavane pisane tekstove.)

Najjednostavniji brojevi: 0, 1, 2, 3, 4, ...obično se posmatraju kao da su uzeti neposredno iz iskustva. Međutim, oni su takođe konstruisani iz pisanja "odnosa" i "skupa", na više mogućih načina da se to uradi (možete li naći drugačiji način?) (**Izazov 272s**). Najdelotvornija je identifikacija prirodnog broja preko skupa njegovog predhodnika. Uz odnos "sledbenik od", ili skraćeno S , ova odrednica može da se napiše kao:

$$0 := \emptyset, \quad 1 := S0 = \{0\} = \{\emptyset\} \quad 2 := S1 = \{0, 1\} = \{\emptyset, \{\emptyset\}\} \quad n+1 := Sn = \{0, \dots, n\} \quad (100)$$

Ovaj skup, uz binarne operacije "sabiranje" i "množenje", sačinjava algebarski sistem $N = (N, +, \cdot, 1)$ prirodnih brojeva. Za sve sisteme brojeva algebarski sistem i skup često su površno načinjeni od istog simbola. Algebarski sistem N je ono što matematičari nazivaju srednji prsten. (**Vol. IV, strana 173**). (Neki autori više vole da broj nula ne uračunavaju u prirodne brojeve.) Prirodni brojevi se koriste u velikom stepenu.

TABELA 23 Neki veliki brojevi

Broj	Primer iz prirode
<i>U našem okruženju</i>	
1	broj anđela koji mogu da budu na istom mestu u isto vreme, prema Tomi Akvinskom (Thomas Aquinski) (Ref. 249)
8	toliko puta može da bude presavijen novinski papir u naizmeničnim upravnim pravcima
12	toliko puta može da bude presavijena traka papira u istom pravcu (Ref. 250)
20	decimalna mesta pri preciznim merenjima koji verovatno nikada neće biti postignut
21, 34, 55, 89	broj latica obične vrste cveta bele rade i sunokreta (Ref. 251)
57	površina dijamanta rezanog kao brilijant
2000 do 6000	vidljive zvezde na noćnom nebnu
15 000	prosečan broj objekata u evropskom domaćinstvu
10^5	broj listova na drvetu (bukva visine 10 m)
6 do $7 \cdot 10^9$	ljudi na svetu u godini 2000.
10^{17}	mrvava na svetu
oko 10^{20}	pahulje snega koje padnu na zemlju tokom godine
oko 10^{24}	zrna peska u pustinji Sahara
10^{22}	zvezde u svemiru
$10^{25 \pm 1}$	ćelija na Zemlji
$1,1 \cdot 10^{50}$	atoma koji sačinjavaju Zemlju ($6370^3 \text{ m}^3 \cdot 4 \cdot 3,14 / 3 \cdot 5500 \text{ kg/m}^3 \cdot 30 \text{ mol/kg} \cdot 6 \cdot 10^{23} \text{ atom/mol}$)
10^{81}	atoma u vidljivom delu svemira
10^{90}	fotona u vidljivom delu svemira
10^{169}	broj atoma koji ispunjava vidljivi deo svemira
10^{244}	broj tačaka prostor-vremena u vidljivom delu svemira
<i>Informatika</i>	
51	rekordan broj jezika koje govori jedna osoba
oko 5000	reči koje izgovori muškarac tokom prosečnog dana
oko 7000	reči koje izgovori žena tokom prosečnog dana
oko 2 000 000	broj naučnika u svetu oko godine 2000.
$3 \cdot 10^8$	izgovorene reči tokom života (2/3 budno stanje 30 reči u minutu)
10^9	reči slušanih ili pročitanih tokom ivota.
$4 \cdot 10^9$	impulsi koje razmene leva i desna polovina mozga svake sekunde
$3 \cdot 10^{12}$	broj drveća na Zemlji

¹ Međutim, nije neophodno da se pišu brojevi kako bi se radila matematika, kao što je pokazala Marsija Ašer (Marcia Ascher) u svojoj knjizi *Ethnomathematics – A Multicultural View of Mathematical Ideas*, Brooks/Cole, 1991.

10^{17}	slikovne tačke (pixeli) koje vidimo tokom života ($3 \cdot 10^9$ s (1/15 ms) · 2/3 (budno stanje) · 10^6 nerva do mozga (Ref. 252))
10^{19}	bitovi informacija obrađenih tokom života (gore navedeno puta 32)
oko $5 \cdot 10^{12}$	odštampane reči dostupne u (raznim) knjigama širom sveta (oko $100 \cdot 10^6$ knjiga sa 50 000 reči)
$2^{10} \cdot 3^7 \cdot 8! \cdot 12 = = 4,3 \cdot 10^{19}$	mogući položaji Rubikove kocke $3 \times 3 \times 3$ (Ref. 253)
$5,8 \cdot 10^{78}$	mogući položaji Rubikove kocke $4 \times 4 \times 4$
$5,6 \cdot 10^{117}$	mogući položaji Rubikove kocke $5 \times 5 \times 5$
oko 10^{200}	mogući potezi u šahu
oko 10^{800}	mogući potezi u igri go
10^{10^7}	moguća stanja personalnog računara
Delovi našeg tela	
600	mišića u ljudskom telu, od toga većina na licu
$150\ 000 \pm 50\ 000$	vlati kose na zdravoj koži glave
900 000	neurona u mozgu skakavca
$126 \cdot 10^6$	osetljivih ćelija na svetlost u mrežnjači (120 miliona štapića i 6 miliona čepića)
10^{10} do 10^{11}	neurona u ljudskom mozgu
$500 \cdot 10^6$	treptaja oka u toku života (otprilike jednom svakih četiri sekunde u budnom stanju)
$300 \cdot 10^6$	udisaja tokom ljudskog života
$3 \cdot 10^9$	otkucaja srca tokom ljudskog života
$3 \cdot 10^9$	slova (osnovni parovi) u haploidi ljudske DNK
$10^{15 \pm 1}$	ćelija u ljudskom telu
$10^{16 \pm 1}$	bakterija koje nosi ljudsko telo

Sistem **celih brojeva** $Z = (\dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots +, \cdot, 0, 1)$ je najmanji prsten kojim su prošireni prirodni brojevi. Sistem **racionalnih brojeva** $Q = (Q, +, \cdot, 0, 1)$ je najmanje polje kojim je produžen prsten celih brojeva. (Pojmovi "prsten" i "polje" određeni su sa svim detaljima u delu koji sledi.) (Vol. IV, strana 173) Sistem **realnih brojeva** $R = (R, +, \cdot, 0, 1, >)$ je najmanji produžetak racionalnih brojeva koji je neprekidan i potpuno uređen. (Za odrednicu "neprekidnost" pogledajte Vol. IV, strana 173 i Vol. V, strana 276). Ekvivalentno tome, realni brojevi su najmanje produženje racionalnih brojeva koje oblikuje potpuno, potpuno strogo Arhimedovo uređeno polje. To je istorijska konstrukcija – ili odrednica – celih, racionalnih i realnih brojeva brojeva iz prirodnih brojeva. Međutim, nije samo jedna konstrukcija moguća. Najlepšu odrednicu svih vrsta brojeva je ona koji je 1969. godine otkrio Džon Konvej (John Conway), a popularizovali je Donald Knut (Donald Knuth) i Martin Kruskal (Martin Kruskal) (Ref. 254).

➤ Broj je niz bitova.

Dva bita se obično nazivaju "gore" i "dole". Primer brojeva i način njihovog zapisivanja prikazan je na *slici 172*.

Prazan niz je broj nula. Krajnji niz od n gornjih je ceo broj n , a krajnji niz donjih je ceo broj $-n$. Krajnji nizovi pomešanih gornjih i donjih daju **binarno-racionalne brojeve**. Primeri su 1, 2, 3, -7, $19/4$, $37/256$ itd. Svi oni imaju imenilac koji je stepen broja 2. Ostali **racionalni brojevi** su oni koji se završavaju beskonačno ponavljanim nizom gornjih i donjih, kakvi su **realni brojevi**, **infinitizemali** i prosti beskonačni brojevi. Duži prebrojivi nizovi daju čak i još luđe brojeve.

Kompletan klasa brojeva koji su određeni nizom bitova nazivaju se klase **surrealnih** brojeva.¹

Postoji i drugi način da se zapisuju surrealni brojevi. Prvi je upravo pomenut niz bitova. Ali da bi se odredilo sabiranje i množenje, koristi se obično drugi način zapisivanja izveden iz *slike 172*. Surrealni broj α određen je kao najraniji broj od onih između dva niza ranijih surrealnih brojeva, levim ili desnim nizom.

¹ Surrealni brojevi ne čine skup pošto oni sadrže sve **redne brojeve**, koji sami za sebe ne čine skup, iako oni naravno **sadrže** skupove. Ukratko, redni i surrealni brojevi klase su **veće** od skupova.

$$\alpha = \{a, b, c, \dots | A, B, C, \dots\} \quad \text{uz} \quad a, b, c < \alpha < A, B, C \quad (101)$$

Na primer, imamo:

$$\begin{aligned} \{0|\} &= 1, \quad \{0, 1|\} = 2, \quad \{|0\} = -1, \quad \{|-1, 0\} = -2 \\ \{0|1\} &= \frac{1}{2}, \quad \left\{0 \left| \frac{1}{2}, \frac{1}{4}\right.\right\} = 1, \quad \left\{0, 1, \frac{3}{2}, \frac{25}{16} \left| \frac{41}{16}, \frac{13}{8}, \frac{7}{4}, 2\right.\right\} = 1 + \frac{37}{64} \end{aligned} \quad (102)$$

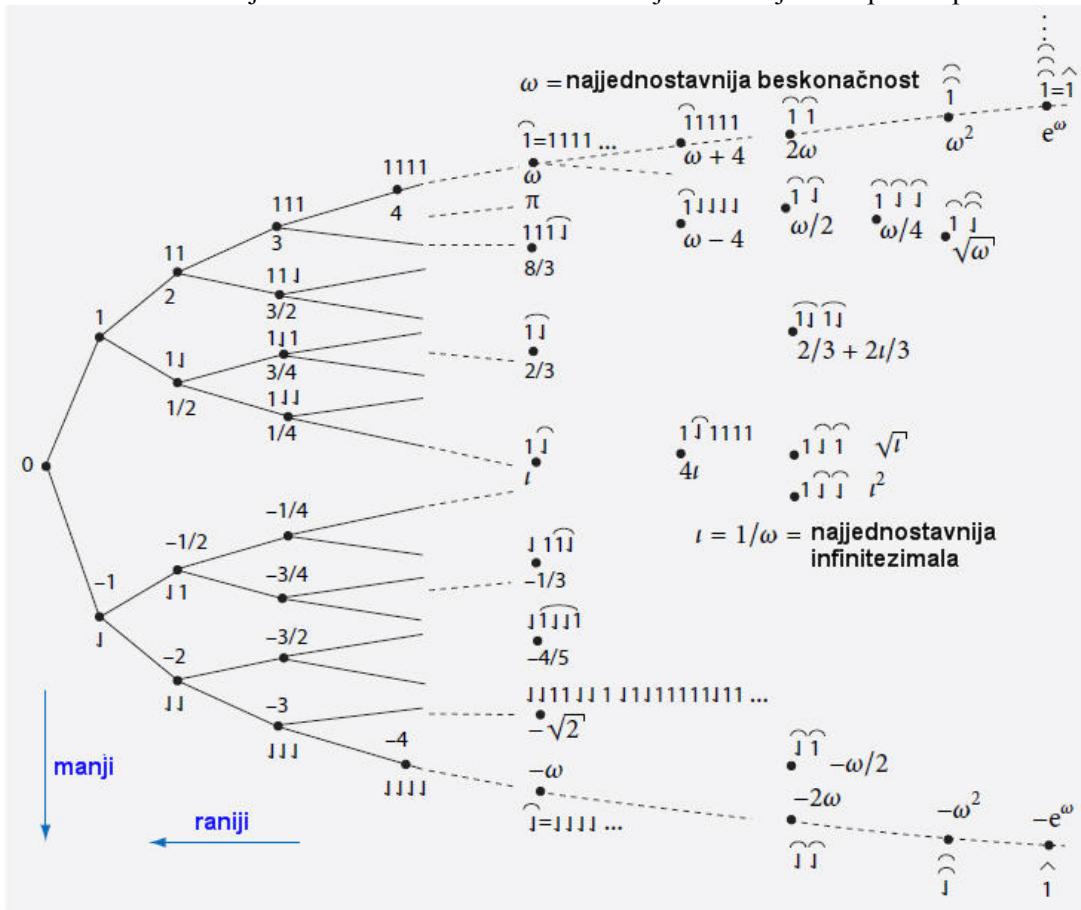
što pokazuje da su konačni surrealni brojevi binarni brojevi $m/2^n$ (n i m su celi brojevi). Za dva surrealna broja $\alpha = \{\dots, a \dots | \dots, A, \dots\}$ uz $a < \alpha < A$ i $\beta = \{\dots, b \dots | \dots, B, \dots\}$ uz $b < \beta < B$ sabiranje je određeno rekurzivno, uz korišćenje ranije određenih brojeva, kao

$$\alpha + \beta = \{\dots, a + \beta, \dots, \alpha + b, \dots | \dots, A + \beta, \dots, \alpha + B, \dots\} \quad (103)$$

Ova odrednica se koristi jednostavno obzirom da daje iste rezultate kao uobičajeno sabiranje celih brojeva i realnih brojeva. Možete li to da potvrdite? Uzgred, sabiranje nije uvek komutativno. Da li možete da nađete izuzetak, kao i da nađete odrednicu za oduzimanje? (Izazov 273s) Množenje je takođe određeno rekurzivno, naime preko izraza

$$\alpha\beta = \{\dots, a\beta + \alpha b - ab, \dots, A\beta + \alpha B - AB, \dots | \dots, a\beta + \alpha B - aB, \dots, A\beta + \alpha B - Ab, \dots\} \quad (104)$$

Ove odrednice dopuštaju da se napiše $\iota = 1/\omega$ i da se razgovara o brojevima kao što je $\sqrt{\omega}$, to jest kvadratni koren iz beskonačnosti, o brojevima $\omega+4$, $\omega-1$, 2ω , e^ω i drugim čudnim brojevima sa slike 172. (Ref. 254). Međutim surrealni brojevi se ne koriste. Koristi se češće jedan od njihovih podskupova.



Slika 172 Surrealni brojevi u uobičajenom načinu pisanja i pomoću bitova

Realni brojevi su takav podskup surrealnih brojeva čiji decimalni izrazi nisu veći od beskonačnosti, a osim toga izjednačuju se brojevi kakvi su 0,999999... i 1,000000, kao u svim sličnim slučajevima. Drugim rečima, surrealni brojevi razlikuju broj 0,999999... i broj 1, dok u realnim brojevima nema razlike. Zaista, između ova dva surrealna broja postoji beskomačno mnogo drugih surrealnih brojeva. Možete li da imenujete nekoliko? (Izazov 274s).

Realni brojevi su mnogo korisniji za opisivanje prirode od surrealnih, prvo, pošto oni obrazuju *skup* – dok to nije slučaj kod surrealnih brojeva – i drugo, pošto oni omogućavaju određivanje *integrisanja*. Ostali brojevi koji se određuju uz pomoć realnih, na primer kompleksni brojevi \mathbb{C} , kvaternioni \mathbb{H} i mnogo drugih razrađenih sistema brojeva, predstavljeni su u sledećem delu. (**Vol. IV, strana 178**).

Da zaključimo, u fizici je uobičajeno da se nazovu brojevi elementi iz bilo kojeg skupa poluprstena (na primer, \mathbb{N}) prstena (na primer, \mathbb{Z}) ili polja ($\mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{C}$ ili \mathbb{H}). Pošto brojevi omogućavaju da se upoređuju veličine i da se prema tome meri, ovakvi brojevi imaju glavnu ulogu u opisivanju posmatranja.

Niz jednakih lopti pakovano je na takav način da je površina papira potrebnog za zavijanje minimalna. (Ref. 255). Za mali broj lopti u linijskom pakovanju sa loptama u jednom redu, to je najefikasnije. Za koji broj lopti u linijskom pakovanju to više nije minimum? (Izazov 275s)

DA LI JE MATEMATIKA UVEK KORISNA?

Die Forderung der Möglichkeit der einfachen Zeichen ist die Forderung der Bestimmtheit des Sinnes.¹

Ludwig Vitgenštajn (Ludwig Wittgenstein),
Tractatus, 3.23

Brojevi, isto kao većina drugih matematičkih pojmoveva, razvijani su precizno sa ciljem da opišu prirodu.

- Brojevi i matematički pojmovi razvijani su odmah od početka da bi obezbedili što je moguće sažetije opise.

Ova osobina je posledica budući da je matematika nauka *simboličkih* poteba. Matematički pojmovi su alatke koje nam pomažu u razmišljanju. To je razlog zbog kojeg se matematika koristi u fizici, nauci o kretanju.

Mnogi dobro poznati fizičari često su se pitali *zašto* je matematika tako korisna. Na primer, Nils Bor je citiran kada je rekao: "Mi ne znamo zbog čega je jezik matematike bio tako delotvoran u oblikovanju onih zakona u njihovom suštinskom obliku." (**Ref. 257**) Judžin Vigner (Eugen Wigner) je napisao često citiran dokument pod naslovom: "*The unreasonable effectiveness of mathematics*"² (**Ref. 258**) Od početka nauke, mnogo vekova ranije, Pitagora i njegovi savremenici bili su toliko preplavljeni korisnošću brojeva u opisivanju prirode, da je Pitagora bio u mogućnosti da osnuje sekstu zasnovanu na ovoj povezanosti. Članovi u unutrašnjem krugu ove sekete nazivali su se "ljudi koji uče", ili na grčkom "matematičari" od grčkog naziva *μάθημα* (učiti). Ovaj naziv sekete postao je ime savremene profesije. Međutim pitati o efikasnosti matematike slično je kao da se pita o efikasnosti alata tesara.

Možda smo bili isuviše negativni. Možda su pomenuti mislioci uglavnom želeli da izraze svoje osećanje čuđenja kada su iskusili da taj jezik deluje, da razmišljamo i naš mozak radi i da su život i priroda tako lepi. To bi stavilo naglasak bliže dobro poznatoj izjavi Alberta Ajnštajna: "Najnerazumljivija činjenica o svemiru je da je on razumljiv." Razumevanje je sledeća reč za opisivanje, to jest za razvrstavanje. Očigledno, svaki odvojiv sistem je razumljiv i ne postoji ništa čudno u tome. Ali da li je svemir odvojiv? Sve dok je on opisan da je od čestica i vakuma to jeste slučaj.

Osnovna predpostavka koju smo načinili na našem početku bila je razdvojivost prirode. To je bila centralna misao koju je Pitagorina sekta izražavala u svojoj srži verovanja

- Sve u prirodi je broj.

Ali Pitagora i njegova sekta nisu bili u pravu. Kao i za mnoga verovanja posmatranja su pokazala suprotno. Brojevi su zaista korisni u svakodnevnom životu; ali brojevi nisu osnova prirode. Mi ćemo dospeti do ovog zaključka u poslednjem delu naše pustolovine. Zaista, predpostavka da posmatranja u prirodi mogu da se odvoje samo je približnost. Ukratko:

¹ Zahtev za mogućnost jednostavnih znakova je zahtev određenja smisla

² „Nerazumljiva efikasnost matematike“

➤ Brojanje je približnost.

Osnove fizike koje smo do sada koristili bile su izgrađene na pesku. Potrebni su bolji temelji. Citirana “nerazumljivost” prirode tada postaje iznenađenje za preciznost približnosti brojanja. Matematika je beskorisna za dostizanje objedinjenog opisa prirode. Ovo iskustvo će biti vrhunac naše pustolovine.

*Die Physik ist für Physiker viel zu schwer.*¹

David Hilbert

ZANIMLJIVOSTI I ZABAVNI IZAZOVI O MATEMATICI

Koji je najveći broj koji može da se napiše sa četiri cifre 2 i bez i jednog drugog znaka? (**Izazov 276s**) A sa četiti cifre 4?

* * *

Pitagorine trojke su celi brojevi koji zadovoljavaju $a^2 + b^2 = c^2$. Navedite barem deser primera. Zatim pokažite sledeće tri osobine: barem jedan broj u trojci je umnožak 3; barem jedan broj u trojci je umnožak 4; barem jedan broj u trojci je umnožak 5. (**Izazov 277e**).

* * *

Koliko nula postoji na kraju broja 1000! ? (**Izazov 278e**).

* * *

Majka je 21 godinu starija od deteta, a za 6 godina biće dete 5 puta mlađe od majke. Gde je otac? Ovo je **zagonetka mlađe majke**. (**Izazov 279s**).

* * *

Broj $1/n$ kada se napiše kao decimalan zapis, ima periodični red cifara. Period mora da bude uglavnom dužine $n - 1$, kao za $1/7 = 0, \overline{142857}$ $142857 \ 1428\dots$ Koji drugi brojevi $1/n$ imaju perode dužine $n - 1$? (**Izazov 280s**)

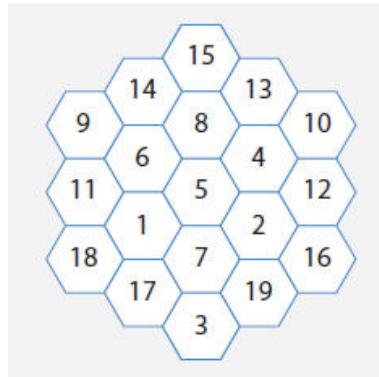
* * *

Feliks Klajn (Felix Klein) bio je čuven profesor matematike na Univerzitetu u Göttingenu, Postojale su dve vrste matematičara na toj katedri: oni koji su istraživali ono šta su želeli i oni kojima je Klajn davao teme za istraživanje. Kojoj vrsti je pripadao Klajn? (**Izazov 281s**).

Očigledno je da je ovo varijanta druge poznate zagonetke. Berberin je brijao sve one ljude koji nisu brijali sebe. Da li je berberin brijao sebe? (**Izazov 282s**).

* * *

Svi znaju šta je **magičan kvadrat**: kvadratno područje brojeva, u najprostijem slučaju od 1 do 9 koji su raspoređeni na takav način da je sabiranje u svim redovima, kolonama (i po mogućству u dijagonalama) daje isti zbir. Možete li da napišete najjednostavniju $3 \times 3 \times 3$ magičnu kocku? (**Izazov 283s**)



Slika 173 Jedini magični šestougaonik koji počinje brojem 1 (do refleksije i obrtanja)

* * *

U istoriji zabavne matematike više ljudi je nezavisno našlo dobro poznati magični šestougao prikazan na **slici 173**. Ptvj pronalazač bio je 1887. godine Ernst von Haselberg. Šestougao je nazvan magičnim pošto

¹ Fizika je previše teška fizičarima.

zbir po sve linijama daje broj 38, Haselberg je isto tako dokazao skoro neverovatan rezultat da ne postoji nijedan drugi magični šestougaonik. Možete li to da potvrdite? (*Izazov 284d*)

* * *

Cifre 0 do 9 nalaze se na tastaturama na dva različita načina. Kalkulatori i tastature imaju 7 gore levo, dok telefoni i automati za izdavanje novca (ATM – Automatic Teller Machine) umaju cifru 1 gore levo. Dva standarda, jedan organizacije International Standards Organization (ISO) i drugi International Telecommunication Union (ITU, ranije CCITT), razvijani su odvojeno i nikada nisu uspeli da se spoje. (*Ref. 259*)

* * *

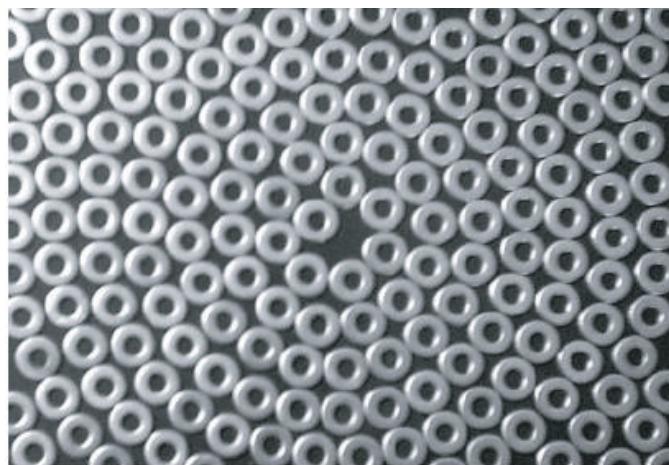
Leonard Ojler je u svoju belećnicu ponekad zapisivao jednakosti kao što je sledeća

$$1 + 2^2 + 2^4 + 2^6 + \dots = -\frac{1}{3} \quad (105)$$

Može li ovo da ima smisao? (*Izazov 285s*)

* * *

Kod većine cvetova pojavljuju se brojevi iz Fibonačijevog reda 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, ... itd. *Slika 177* daje nekoliko primera. Često se sugeriše da je to rezultat nekog dubokog smisla lepote u prirodi. To nije slučaj, kao što prikazuje *slika 174*. (*strana 175*). Napravite tačku na površini i postavite rukom podloške oko nje u vidu spirale; naći ćete istu spiralu koju nalazite kod mnogo cvetova, a time, na njihovoj granici, iste Fibonačijeve brojeve. Ovim dokazom je Donald Simanek pokazao da nema ničeg dubokog, komplikovanog, pa čak ni misterioznog u pojavi Fibonačijevih brojeva kod biljaka. Za suprotno mišljenje, pogledajte *Ref. 251*.



Slika 174 Fibonačijevi brojevi i spirala od podložaka (© Donald Simanek).

* * *

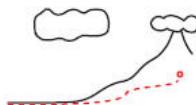
Prosti brojevi su omiljeno igralište za matematičare. Čuveni rezultat za sve proste brojeve p_i glasi

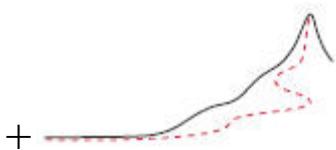
$$\prod_{i=1}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{p_i^2}\right) = \frac{6}{\pi^2} \quad (106)$$

Možete li da zamislite kako je ovaj rezultat dokazan? (*Izazov 286s*)

* * *

Cifre (engl. *digits*) duguju ime latinskoj reči za prst “digitum”. U vreme kada je pisanje na papiru bilo skupo, bilo je već moguće da se broji do 9999 korišćenjem obe ruke, sistemom koji je razvio Beda Venerabilis, a popularizovao ga je, na primer, Luka Pacioli. Možete li da razvijete sličan sistem? (*Izazov 287e*).





Poglavlje 9

LAŽI I OBRASCI PRIRODE

Die Grenzen meiner Sprache bedeuten die Grenzen meiner Welt.¹

Ludvig Vitgenštajn (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.²

Ludvig Vitgenštajn (Ludwig Wittgenstein),
Tractatus, 4.01

Nasuprot matematici, fizika ima cilj da bude jezik. ([Ref. 260](#)). Ali to je preambiciozno: ona ima za cilj da sve izrazi uz *potpunu* preciznost, a posebno sve primere i mogućnosti promena.³ Kao i svaki jezik, fizika se sastoji od pojmove i rečenica. Da bi bila sposobna da izrazi sve, ona mora da ima cilj da koristi malo reči uz mnogo činjenica.⁴ Fizičari su u suštini lenji ljudi: oni teže da smanje napor u svemu što rade. Pojmovi koji se danas koriste bili su optimizirani kombinovanim naporima mnogo ljudi kako bi bili što praktičniji, to jest što je moguće jači. Pojam se naziva jakim kada omogućava da se na kompaktan način izrazi velika količina informacija, što znači da on brzo prenosi veliki broj detalja o opažanjima.

Opšti izrazi o više primera kretanja nazivaju se *pravila* ili obrasci. U prošlosti se često govorilo da “prirodom upravljuju zakoni”, korišćenjem stare i nepodesne ideologije. Fizički “zakon” je samo način da se kaže što je moguće više uz što je moguće manje reči. Kada se kaže da “prirodom upravljuju zakoni”, mi smo zapravo mislili da kažemo “budući da smo lenji, mi opisujemo prirodu obrascima”. Zakoni su sažet prikaz lenosti. Formulacija zakona je čista lenost. Zapravo, tačan izraz je

➤ Obrasci opisuju prirodu.

Fizičari su pisali o neophodnosti lenosti koja je potrebna da bi se obrasci odredili što detaljnije. U cilju da se postane master lenosti, potrebno je da se napravi razlika između obrazaca lenosti od onih koji to nisu, kao što su laži, verovanja, iskaza koji nisu o posmatranjima i iskaza koji nisu o kretanju.. To ćemo učiniti u tekstu koji sledi. ([Strana 220](#))

Potraga za lenjošću je poreklo, između ostalog, za upotrebu brojeva u fizici. Posmatranja se često najbolje opisuju uz pomoć brojeva, pošto brojevi omogućavaju lako i precizno komuniciranje i specificiranje. Dužina, brzina, uglovi, temperatura, naponi ili jačine polja predstavljaju ove vrste. Zapisivanje “brojeva”,

¹ “Granice mog jezika označavaju granice mog sveta.”

² “Rečenica je slika stvarnosti. Rečenica je model stvarnosti kako je mi zamišljamo.”

³ Sva posmatranja su u vezi promena, Različite vrste promena proučavaju raličite nauke; one su obično grupisane u tri kategorije, u humanističke nauke, formalne nauke i prirodne nauke. Među poslednjoj vrsti, najstarije su astronomija i metalurgija. Potom, uz porast radoznalosti u ranoj prošlosti, dolaze prirodna nauka koje se bavi temom kretanja: fizika. U toku našeg hodanja postaće jasno da neobična odrednica fizike kao proučavanje promena ustvari pokriva čitav skup tema koje se proučavaju u fizici. Posebno, to uključuje češtu odrednicu fizike kao nauke koja proučava materiju, njene osobine, njene sastavne delove i njene interakcije.

⁴ Posebna, specifična posmatranja, to jest specifičan primer ulaza koji je zajednički sa ostalima, naziva se *činjenica*, ili u drugom kontekstu, *događaj*. Iznenadujuća i redovno opažena činjenica naziva se fenomen, a opšte zapažanje načinjeno u mnogo različitim situacijama naziva se (fizičko) načelo (princip). (Često, kada se pojam uvodi, kada se koristi uz drugo značenje u dugim poljima, u ovom hodanju će mu predhoditi označaka „fizički“ ili „matematički“ stavljena u zagrade.) Radnje izvršene u cilju prikupljanja posmatranja nazivaju se *eksperimenti*. Pojam eksperiment upotrebljava se od 16. veka; u evoluciji deteta najbolje ga je uporediti sa onim radnjama koje imaju isti cilj da prikupe iskustva: *igranjem*.

koji se koriste prilikom svih merenja, je konstrukcija, često nesvesna, za zapisivanje “skupa” ili “odnosa”, kao što je prikazano u predhodnom tekstu. Odvojeno od zapisivanja brojeva, ostali pojmovi su redovno određeni tako da je omogućena brza i kompaktna komunikacija “zakona” prirode; sve su to “alati za skraćivanje”. U tom smislu, iskaz “*nivo Kac-Mudijeve algebre lagranžijana heterotičnog modela superstringa jednak je jedinici*” sadrži preciznu informaciju koja je objasnjava za svakog, međutim, bilo bi potrebno desetine strana da se on objasni samo uz korišćenje pojmoveva “skup” i “odnos”. Ukratko, u fizici *preciznost* je često posledica njenog *traganja za lenjošću*.

*Es ist besser, das die Leute nicht wissen, wie
Gesetze und Wurst zustande kommen. Sonst könnten
sie nachts nicht ruhig schlafen.¹*

Oto von Bismarck (Otto von Bismarck)

DA LI SU FIZIČKI POJMOVI OTKRIVENI ILI SU KONSTRUISANI?

Das logische Bild der Tatsachen ist der Gedanke.²

Ludwig Vitgenštajn (Ludwig Wittgenstein),
Tractatus, 3

Pitanje iz naslova često se preoblikuje kao: da li su fizički pojmovi oslobođeni ubedenja, ukusa i ličnog izbora? Ovo pitanje je toliko puta razmatrano da se pojavilo čak i u holivudskim filmovima. Mi ćemo dati kratak zaključak koji može da pomogne pri razlikovanju poštenih od nepoštenih nastavnika.

Kreiranje pojma, u suprotnosti sa njegovim otkrivanjem, podrazumevalo bi slobodan izbor između mnogih alternativnih mogućnosti. Izbor alternative za određivanje pojma bila bi posledica korišćenih ubedjenja ili ukusa. U fizici (uz očiglednu suprotnost sa ostalim, više ideoškim poljima traganja) znamo da različiti fizički opisi opažanja su ili ekvivalentni, ili su, u suprotnom slučaju, neprecizni ili pogrešni. Fizički opis opažanja je prema tome suštinski jedinstven; svaki izbor pojma je samo prividan. Ne postoji stvarna sloboda pri određivanju fizičkog pojma. Po toj osobini, fizika je u jakoj suprotnosti sa umetničkim delovanjem.

Ako dva fizička pojma mogu da se upotrebe da bi se opisao isti oblik opažanja, oni moraju da budu ekvivalentni, čak i ako odnos koji dovodi do ekvivalentnosti nije odmah jasan. Zapravo, zahtev da ljudi sa različitim tačkama gledišta i posmatranja istog događaja mogu da zaključe ekvivalentne opise, postavljen je u same osnove fizike. To izražava zahtev da su opažanja nezavisna od posmatrača. Ukratko, strogi zahtevi za nezavisnost tačke gledišta čine logički nemogućim slobodan izbor pojmoveva.

Zaključak da su opisi pojmoveva opažanja otkriveni umesto da su stvoreni, takođe izražava da je postignuta nezavisnost na polju lingvistike uz napred pomenuto istraživanje semantičkih primitiva,³ na polju psihologije preko posmatranja oblikovanja pojmoveva pri razvoju male dece, kao i na polju ekologije preko posmatranja razvoja životinja, posebno sisara. U sve tri oblasti detaljnim posmatranjima načinjena su detaljna opažanja o tome kako interakcije između pojedinca i njegovog okruženja dovode do pojma, od kojih su najosnovniji, kao što su prostor, vreme, objekt ili interakcija, uobičajeni kod svih polova, kultura, rasa i kod mnogih životinjskih vrsta koje nastanjuju ovaj svet. Zanimljivost i način kako priroda deluje, dovodi do istih pojmoveva za sve ljude, pa čak i za životinje; svet nudi samo jednu mogućnost, bez ikakvog prostora za izmišljanja. Zamišljanje da fizički pojmovi mogu da se načine kao naša razonoda – ili korisna vežba, uvek je neuspešno.

Fizički pojmovi su klasifikovanje posmatranja. Sam postupak razvrstavanja dovodi do obrazaca prirode; to je mehanički proces kojeg mogu isto tako da urade i mašine. To znači da je svako razlikovanje, to jest svaka izjava da je A različito od B, teoretski slobodan iskaz. Nijedan sistem ubedenja nije potreban da bi se u prirodi razlikovali drugačiji subjekti. Mačke i svinje mogu to takođe da urade. Fizičare **mogu** da zamene životinje, čak i mašine. Naš uspon na planinu u više navrata će potvrditi ovu tačku.

¹ “Bolje je da ljudi ne znaju kako su napravljeni zakoni i kobasice. U suprotnom nebi mogli dobro da spavaju tokom noći.”

² Logična slika činjenice je razmišljanje.

³ Ana Veržbicka zaključila da su njena istraživanja jasno pokazala da u semantički primitivi *otkriveni*, posebno da su zaključeni iz osnova ljudskog iskustva, a ne da su uvedeni. (*Ref. 241*).

Kao što je već pomenuto, najpopularniji fizički pojmovi omogućavaju nam da opišemo posmatranja što je moguće sažetiće i preciznije. Oni su oblikovani u cilju da se postigne najveća moguć obim razumevanja uz što je manju moguću veličinu napora. Kako Okamova britva¹ – zahtev da se ne uvode nepotrebni pojmovi – tako i pokret za objedinjavanje automatski su umanjili broj i vrstu pojmoveva koji su u upotrebi u fizici, (**Vol. VI, strana 104**). Drugim rečima, napredak nauke u fizici bio je i jeste osnova programa koji najdrastičnije smanjuje moguć izbor pojmoveva.

Ukratko, odredili smo da su fizički pojmovi jednaki za svakoga i da su oslobođeni ubeđenja i ličnog izbora: pre svega, svi oni su ***dosadni***. Osim toga, pošto bi oni mogli da nastanu od mašina umesto od ljudi, pojmovi su ***rođeni iz lenjosti***. Ova ljudska analogija – ne znači da treba da se shvati ozbiljno – potvrđuje da fizički pojmovi ***nisu*** stvoreni, oni su otkriveni. Ako vam predavač kaže suprotno, on ne govori istinu. Na nesreću, postoji mnogo lažova takve vrste.

Pošto je rešen slučaj fizičkih pojmoveva, okrenimo se na fizičke iskaze. Situacija je po nečemu slična: fizički iskazi moraju da budu ***tačni, lenji, arogantni i dosadni***. Pogledajmo zbog čega.

TABELA 24 “Naučne metode”

Normalan opis Radoznalost	Opis lobiste Naučni metod
1, gledajte mnogo okolo	1. radite uzajamno sa prirodom
2. ne verujte u sve što se kaže	2. zaboravite neproverene izjave
3. izaberite nešta zanimljivo i objasni to sebi	3. posmatrajte i merite
4. izgradite sopstveno mišljenje i opišite precizno ono što ste videli	4. upotrebite razlog, pravite hipoteze
5. proverite da li možete da opišete slične situacije na isti način	5. analizirajte hipoteze
6. povećavajte preciznost posmatranja sve dok ne proverite da li nešta nedostaje ili je potpuna	6. izvodite eksperimente da biste potvrdili hipoteze
7. u zavisnosti d situacije, nastavite od koraka 4 ili od 1	7. tražite od vlasti još para

Wo der Glaube anfängt, hört die Wissenschaft auf.²

Erns Hekel (Ernst Haeckel), *Natürliche Schöpfungsgeschichte*

KAKO NALAZIMO FIZIČKE POJMOVE, OBRASCE I PRAVILA?

Grau, theurer Freund, ist alle Theorie, Und grün des Lebens goldner Baum.³

Johan Wolfgang fon Gete (J.W. v. Goethe), *Faust*.

Fizika je obično predstavljana kao objektivna nauka, ali ja primećujem da se fizika menja, a da svet ostaje isti, tako da mora da postoji nešto subjektivno u fizici.

Ričard Bandler (Richard Bandler)

Napredak kroz poučavanje kretanja odražava se kao odnos male dece prema životu: decu pokreće radoznalost. Napredak prati prost program na levoj strani **Tabele 24**. Odrasli naučnici čine isto to, osim što oni koriste modernije pojmove, koji su navedeni u desnoj strani tabele. Odrasli takođe imaju specijalizovane profesije za pravljenje novca preko svoje radoznalosti. Stručnjaci iz koraka 7, koji traže više para, nazivaju

¹ Viljem od Okama (William of Ockham) bio je engleski franjevački sveštenik. Okamova britva govori da količina pretpostavki treba biti što je moguće manja. U svakodnevnom jeziku, glasila bi: "Ako imate dve teorije koje predviđaju isto, odaberite jednostavniju."

² “Gde počinje ubeđenje, prestaje nauka.” Ernst Haeckel, *Natürliche Schöpfungsgeschichte (Prirodno stvaranje priča)*

³ “Sivo, dragi prijatelju, je sve teorija, a zeleno zlatno drvo života” Johan Wolfgang fon Gete (Johann Wolfgang von Goethe, 1749. Frankfurt am Main – 1832. Weimar), uticajan nemački pesnik.

se različito, **lobisti** ili **punioci fonda**; umesto da se ovaj program zove **radoznalost**, oni su ga nazvali **naučna metoda**.

Fizika je priča o kretanju,¹ a kretanje je velika tema, mnogo toga može da se ispita i ispriča. Stručnjaci iz koraka 6 nazivaju se **eksperimentalni fizičari** ili jednostavno **eksperimentalisti**, naziv izведен od latinskog “experire”, što znači “isprobati”. Mnogi od njih su deo iz kategorije “postdiplomski studenti”. Stručnjaci iz koraka 5 i 4 nazivaju se **teoretski fizičari** ili jednostavno **teoretičari**.² To je prilično savremen naziv; prvi profesori teoretske fizike bili su imenovani oko početka 20. veka. Naziv “teorija” izведен je iz grčkog θεωρία, što znači “posmatranje, razmišljanje”. Konačno, postoje ljudi koji su usmereni na korake 1 do 3 i koji podstiču druge da rade na koracima 4 do 6: oni se nazivaju **geniji**. Geniji su oni ljudi koji uvođe pojmove koji najviše pomažu u opisu prirode.

Očigledno, jedna važna tačka se krije u koraku 6: kako svi ti ljudi znaju da li njihove provere ne uspevaju? Kako oni znaju da li se pojma ili iskaz primenjuje na prirodu? Kako prepoznačaju istinu?

Sve profesije su zavere protiv laika.

Džordž Bernard Šo (George Bernard Shaw)

ŠTA JE LAŽ?

Držite se čvrsto svojih činjenica, a onda možete da ih razorite u slobodno vreme

Mark Tven (Mark Twain)

U većini zemalja svaka osoba mora da zna šta je “istina”, pošto na suđenju, na primer, iznošenje neistina može dovesti do zatvorske kazne. A sudovi su puni stručnjaka da otkrivanje laži.³

Na sudu je laž izjava koja je svesno u suprotnosti sa opažanjem.⁴ Istinitost izjave stoga se proverava posmatranjem. Samo proveravanje ponekad se naziva dokaz izjave. Za sudove i za fiziku stoga imamo

- **Istina** je slaganje sa činjenicama.
- **Činjenice** su opažanja zajednička za ostale ljude ili mašine.

Prema tome,

- Laž je iskaz koji je u suprotnosti sa činjenicama.

Osim na sudu, laži su zabavne izjave, pošto iz njih možemo izvući svaki zamišljen zaključak. Dobro je poznata rasprava između dva profesora sa Kembridža na početku dvadesetog veka. McTagart je postavio pitanje: “Ako su $2 + 2 = 5$, kako ćete vi dokazati da sam ja papa.” Godfri Hardi: “Ako su $2 + 2 = 5$, onda je $4 = 5$; oduzmimo 3, pa je $1 = 2$; ali pošto su McTagart i papa dva, prema tome su McTagart i papa jedan”. Kao što je davno primećeno, *ex falso quodlibet*; iz onoga što je pogrešno može se zaključiti sve zamislivo. Prema tome, u našem uspou na planinu potrebno je da izgradimo predhodno zaključene rezultate, a naše putovanje nebi moglo da se završi ako bismo bilo gde u našem lancu dokaza imali pogrešan iskaz.

¹ Više nauka ima kao deo svog imena pojan „govor“, naime sve one čije se ime završava sa „-logija“, kakva je na primer, biologija. Završetak potiče iz drevne Grčke i izведен je iz λόγην što znači “reći, govoriti”. Fizika, kao nauka o kretanju trebalo bi da se prema tome zove “kineziologija”, od κίνησις, što znači “kretanje”, ali iz istorijskih razloga ovaj naziv ima drugačije značenje, naime proučavanje rada ljudskih mišića – i takođe, nažalost, mnogo ezoteričnih besmislica. Naziv “fizika” je izведен ili iz grčkog φύσικη (τέχνη je razumeti) što znači “(umetnost) prirode”, ili iz naslova Aristotelovog rada τά φυσικά, što znači “prirodne stvari”. Oba izraza su izvedena iz φύσις, što znači “priroda”.

² Ako vam se svida teoretska fizika pogledajte osvežavajuće otvorenu veb stranu dobitnika Nobelove nagrade Gerarda 't Hoofta pod nazivom *Kako da postanem dobar teoretski fizičar*. Videti veb stranu www.staff.science.uu.nl/~hooft101/theorist.html

³ Neki naučnici su utrošili većinu svojih istraživačkih karijera na laž i laganje. Dobro poznat primer je Pol Ekman (Paul Ekman) na čijoj začuđujućoj veb strani www.paulekman.com se govori kako otkriti laž iz ponašanja osobe koja je izgovorila laž.

⁴ Izjave koje još nisu proverene različito se nazivaju **spekulacije, predpostavke, hipoteze**, ili – pogrešno – prosto **teze**. Izjave koje su u skladu sa opažanjima nazivaju se **ispravne** ili **tačne**; izjave koje su u suprotnosti sa opažanjima nazivaju se **pogrešne** ili **netačne**.

Uprkos tome, laganje je takva dobra radnja da bi trebalo da se nauči kako se izvodi dobro – kako bi se naučilo kako da se otkrije kod drugih. Vrste laganja imaju tri stepena: životinjski stepen, dečiji stepen i stepen odlaslih. Mnoge životinje su pokazale da varaju svoje roditelje. ([Ref. 208](#)). Deca počinju da lažu pre svog trećeg rođendana, skrivanjem iskustava. Psihološka istraživanja čak su otkrila da deca koja nemaju sposobnost da lažu ne mogu da završe svoj lični razvoj u smislu zdravog ljudskog bića.

Odrasli su obični lažovi. Mnogi ljudi varaju sa porezima. Drugi lažu da bi sakrili svoje nepodopštine. Ako ste ikada lagali na sudu, vi to znate mnogo bolje; ustvari iskustva pokazuju da ćete možda nastaviti sa više kriminalnih deja. Najgori primer lažova su ovi nasilni savremenici – često političari ili intelektualci – koji tvrde da istina “ne postoji”.

ŠTA JE DOBRA LAŽ?

Čista istina ie uvek laž.

Bert Helinger (Bert Hellinger)

Pošto je laž iskaz suprotan činjenicama – ili zajedničkim opažanjima – **dobra** laž je ona laž čija suprotnost sa činjenicama teško može da se otkrije. Uspešna laž je iskaz koji vam omogućava da zaradite novac. Mi nećemo ovde da istražujemo ovu vrstu; istražićemo samo vrstu dobrih laži.

Prvi način laganja je da se samo naglašava zajedništvo. Populisti i polemičari redovno to rade. (“Svaki stranac je opasnost za vrednost naše države.”) Pošto skoro svako zamislivo mišljenje, ma koliko čudno, vodi neku grupu – i zbog toga je zajedničko – može se uvek tvrditi da je tačno.¹ Nažalost, nije tajna da se ideje isto tako dele pošto su moderne, nametnute ili suprostavljene nekome ko ih uopšteno ne voli. Često u porodici braće i sestre imaju tu ulogu – setite se Kasandre.² Za dobru laž nam zato treba više od zajedništva, više od same **intersubjektivnosti**.

Dobra laž treba da bude, isto kao tačan iskaz, zaista nezavisna od onog ko sluša i od posmatrača, a posebno nezavisna od njihovih godina, njihovog pola, njihove civilizacije ili grupe kojoj pripadaju. Na primer, posebno je teško – ali ne i nemoguće – laganje uz matematiku. Razlog je što su osnovni pojmovi u matematici, bilo oni “skup”, “odnos” ili “broj”, uzeti iz posmatranja i intersubjektivni su, tako da iskazi u vezi njih mogu lako da se provere. Prema tome, dobre laži izbegavaju matematiku.³

Treće, “dobra” laž treba da izbegava iskaze o opažanjima i da koristi umesto toga **interpretacije**. Na primer, neki ljudi vole da govore o drugim svemirima, što podrazumeva priču o fantazijama, a ne o opažanjima. Međutim, stvarno dobra laž mora da izbegne pravljenje iskaza koji su besmisleni; najdes-truktivniji komentar koji može da se kaže o iskazima je potekao je od velikog fizičara Wolfganga Paulija (Wolfgang Pauli): “To čak nije ni pogrešno.” ([Vol. IV, strana 83](#)).

Četvrti, dobra laž izbegava da govori o opažanjima, ali se usredsređuje na zamišljanja. Samo istina mora da bude **empirijska**; Spekulativni iskazi razlikuju se od istine, jer ne vode računa o opažanjima. Ako želite da lažete “dobro” čak i uz empirijske iskaze, morate da obratite pažnju. Postoje dve vrste empirijskih iskaza: **posebni** iskazi i **opšti** iskazi. Na primer: “2. juna 1960. godine video sam zelenog labuda da pliva uz severnu obalu jezera Vareze” je poseban iskaz, dok je “Svi gavrani su crni” je opšti iskaz pošto sadrži pojam “svi”. Postoji dobro poznata razlika izmenju njih dva, koja je potrebna da bi se dobro lagalo:

- Posebni iskazi ne mogu da se falsifikuju, oni se samo proveravaju.
- Opšti iskazi ne mogu da budu potvrđeni, oni su samo falsifikovani.

Objasnimo razlog. ([Ref. 261](#))

¹ Rad sociologa Gabrijela Tarda (Gabriel Tarde, 1843. Sarlat – 1903. Paris), posebno njegove pojmove imitacije i grupne svesti, već povezuju sa ovom činjenicom.

² Uticaj redosleda rađanja na stvaralaštvo u nauci i prihvatanju novih ideja proučavao je u očaravajućoj knizi Frank J. Salovej, - *Born to Rebel – Birth Order, Family Dynamics and Creative Lives (Rodjen za buntovnika – redosled rađanja, dinamika porodice i stvaralački život)*, Pathon Books 1996. Ova izuzetna knjiga iznosi rezultat proučavanja tokom životnog veka povezanih sa ličnim situacijama u porodicama hiljada ljudi i njihovo prihvatanje oko dvadeset revolucionara u skorašnjoj istoriji. Knjiga takođe sadrži test iz kojeg čitalac može da zaključi sopstvene naklonosti ka buntovništvu, u stepenima od 0 do 100%. Darwinov rezultat na toj skali je 96%.

³ U matematici je “istina” obično određeno kao “izvodivo” ili “dokazivo”; to je zapravo poseban slučaj uobičajene odrednice za istinu, naime “u saglasnosti sa činjenicama”, ako se pamti da matematika proučava osobine klasifikacije.

Opšti iskazi, kao što je “brzina svetlosti je stalna”, ne može da bude proveren za sve moguće slučaje. (Zapaziti da i kada bi mogli, oni nebi bili opšti iskazi, već samo popis onih posebnih.) Međutim, oni mogu da se obrnu u protivprimere. Drugi primer vrste opšteg iskaza je: “Jabuke padaju naviše.” Pošto je falsifikovao posmatranje koje sproveo Njutn pre mnogo godina, ili svakodnevno iskustvo, taj iskaz se kvalificuje kao (lako otkrivena) laž. Uopšteno gledajući, laganje izražavanjem suprotnog teoriji je obično neuspešan. Ako neko istrajava u tome, laž postaje *praznoverje, verovanje, predrasuda ili doktrina*. To su najniže tačke u vrstama laganja. Čuveni slučaj insistiranja na laži je onaj kod Galilejevih kolega, za koje se kaže da su odbili da pogledaju kroz njegov teleskop da bi se uverili da Jupiter ima mesece, posmatranje koje bi uzdrmalo njihovo ubeđenje da se sve obrće oko Zemlje. Očigledno ovi astronomi su bili amateri u svojoj vrsti laganja. Dobra opšta laž je ona čiji protivprimer ne može lako da se primeti.

Ne treba insistirati na lažima u fizici. Nažalost, klasična fizika je puna laži. Mi ćemo ih razvejavati tokom našeg hodanja.

Laganje uz davanje posebnih umesto opštih iskaza mnogo je lakše. (“Ne mogu da se setim.”) Čak i posebni iskazi, kao što je: “Juče je Mesec bio zelen, četvrtast i mirisao je na sir” nikada ne mogu biti u potpunosti falsifikovani: ne postoji način da se pokaže uz potpunu sigurnost da su pogrešni. Jedina stvar koju možemo da uradimo je da proverimo da li je iskaz u saglasnosti sa opažanjima, kao što su: da li je drugačiji oblik uticaja na plimu koja se očekivala, da li se miris mogao naći u vazduhu prikupljenom tog dana itd. Dobra posebna laž prema tome nije u očiglednoj suprotnosti sa drugim opažanjima.¹

Uzgred, opšti i posebni iskazi su povezani: *suprotnost* opštem iskazu uvek je poseban iskaz i obrnuto. Na primer, suprotnost optem iskazu “jabuke padaju naviše”, naime “neke jabuke padaju naniže”, je poseban iskaz. Slično tome, poseban iskaz “Mesec je načinjen od zelenog sira” je u suprotnom, opštem iskazu “Mesec je čvrsto telo već milionima godina i skoro da nema ni atmosferu ni mirisa.”

Drugim rečima, pravni sudovi i filozofi se ne slažu. Sudovi nemaju problem sa prizivanjem teoretske istine i lažima u posebnim iskazima. Mnogi filozofi to izbegavaju. Na primer, izjava “zločudni gasoviti kičmenjaci ne postoje” je izjava opšte vrste. Ako je opšta izjava u skladu sa posmatranjima i ako se može proveriti, pravni sudovi je nazivaju *istinom*. Suprotan iskaz, naime, “zločudni gasoviti kičmenjaci postoje” je iskaz *posebne* vrste, pošto on znači: “Osoba X je opazila zločudne gasovite kičmenjake na nekom mestu Y u neko vreme Z”. Da bismo to proverili, potreban nam je zapis događaja, Ako takav zapis, na primer fotografija ili svedočenje ne postoje, i ako izjava *može* da se falsifikuje drugim opažanjima, pravni sudovi nazivaju iskaz kao *laž*. Iako postoje pravila za svakodnevni život i za pravo, ne postoji saglasnost među filozofima i naučnicima da je ovo prihvatljivo. Zašto? Intelektualci su mnogo pažljiviji, jer su mnogi od njih izgubili živote kao posledicu izlažući otvoreno javno previše laži.

Ukratko, posebne laži, kao i svi posebni iskazi, nikada ne mogu da se falsifikuju sa sigurnošću. To je ono što ih čini popularnim. Deca prvo nauče posebne laži. (“Nisam pojeo marmeladu.”) Opšte laži, kao i opšti iskazi, uvek mogu da se potkrepe primerima. To je razlog uspesima raznih ideologija. Ali merila za prepoznavanje laži, čak i opštih laži, postale su tako često mesto da verovanja i laži pokušavaju da idu u korak sa njima. Postalo je moderno da se koriste izrazi kao što su “naučne činjenice” – ne postoje nenaučne činjenice – ili “naučno je dokazano” – opažanja i ne mogu da se dokažu na drugi način – i druge slične prazne fraze. To nisu “dobre” laži; uvek kada najdemo na rečenicu koja počinje sa “naučnici kažu...” ili

¹ Često je teško ili dosadno da se potvrdi iskaz koji se tiče prošlosti, a teškoća se povećava sa vremenskim razmakom. To je ono zbog čega ljudi mogu da nastoje na pojavi događaja za koje se predpostavlja da su izuzeci obrazaca prirode („čuda“). Od pojave brzih sredstava komuniciranja, ove provere su postale sve lakše, pa nije preostalo ni jedno čudo. To može da se vidi u Lurdu u Francuskoj, gde je čak danas broj posetilaca mnogo veći nego li u prošlosti, a da nijedno čudo nije viđeno već decenijama. (Ustaru postoji jedan izuzetak kojem je prisustvovalo nekoliko svedoka. Godine 1998., čovek u invalidskim kolicima gurnut je u svetu vodu. Kada je ponovo izašao iz nje, čudom, točkovi njegovih invalidskih kolica imali su nove gume.)

Ustvari, sva savremena takozvana čuda opstaju samo uz neprestano izbegavanje provera, kao što su navodno godišnje ukapavanje krvi u Napolju, mleko koje navodno piju kipovi u hramovima, navodni iscelitelji u evangelizmu na televiziji itd. ([Ref. 262](#)). Mnoga čuda samo opstaju i zbog toga što mnoge organizacije zarađuju novac na teškoći ili falsifikovanju posebnih iskaza. Na primer, kada je britanska princeza Dajana poginula u automobilskoj nesreći 1997. godine, iako su događaji istraženi izuzetno detaljno, žuta štampa je nastavila skoro bez kraja da piše o „misterijama“ udesa.

nauka i religija čine...” treba samo zameniti reč “nauka” sa “znanjem” ili iskustvom” da bi se proverilo da li takva rečenica može da se prihvati kao ozbiljna ili ne.¹

Laži se razlikuju od istinite izjave u njihovom emotivnom pogledu. Posebne izjave su obično dosadne i krhke, dok su posebne laži često senzacionalne i nasilne. Nasuprot tome, opšte izjave su često smelete i krhke, dok su opšte laži obično dosadne i nasilne. Istina je krhka. Istinite izjave iziskuju od autora da podmetne vrat kritici. Istraživači znaju da ako se vrat ne podmetne to neće biti posmatranje ili teorija. (Teorija je drugo ime za jedan ili više povezanih, još nedokazanih opštih iskaza o posmatrancima).² Iznošenje istine čini ranjivim. Iz tog razloga teorije su često *smele, arogantne* ili *izazovne*; istovremeno one moraju da budu *krhke i ranjive*. Za mnoge ljude teorije zato podsećaju na ono što misle o ženama. Darvinovo delo *O poreklu vrsta* oslikava jaku suprotnost između brojnih dosadnih i čvrstih činjenica koje je Darwin prikupio i smelete teorije koju je izveo. Gnjavača čunjenicama je signal istinitosti.

Nasuprot tome, “stvaralaštvo” ili takozvani “inteligentni dizajn” koje su širili lovci na veštice, primeri su laži. Posebna laž koju su širili, “svet je stvoren oktobra 4004. godine pre nove ere”, bila je senzacionalna, dok su opšte laži koje su širili, kao što je “nije bilo velikih promena u prošlosti”, bile dosadne. To je u potpunoj suprotnosti sa zdravim razumom. Štaviše, laži, nasuprot istinitim iskazima, činile su ljude besnima. Što je laž gora, utoliko su ljudi besniji. Ova povezanost može da se zapaža redovno u vestima. Drugim rečima, “stvaralaštvo” i “intelligentan dizajn” nisu samo laži, to su loše laži. Dobra *opšta laž*, slično dobroj fizičkoj teoriji, izgleda ludo i izgleda ranjivo, kao što je “ljudi imaju slobodnu volju”. Dobra *posebna laž* je dosadna, kao što je “ovo liči na hleb, ali za deset minuta nije to”. Dobra laž ne izaziva bes. Osećanja mogu zato da budu kriterijum za prosuđivanje kvaliteta laži, ako obratimo pažnju na vrstu iskaza. Brojne uobičajene laži razmatrane su kasnije u ovom poglavljiju.

Važan aspekt svake “dobre” laži je da se pravi što je moguće manje *javnih* iskaza, tako da je kritičari mogu da proveravaju što je moguće manje. (Za svaku poslatu ispravku grešaka u ovom tekstu, obezbedio sam malu naknadu.) Da bi se laž otkrila, važno je javno preispitivanje, premda nije uvek pouzdano. Ponekad čak i naučnici načine iskaze koji nisu u saglasnosti sa posmatrancima. Međutim, “dobra” laž je uvek dobro pripremljena i odgovara nameni; slučajne laži zabranjuju stručnjaci. Primeri dobrih laži u nauci su “eter”, “NLO”, “stvaranje nauke” ili “hladna fuzija” Ponekad je potrebno više decenija da se otkriju laži u ovim oblastima.

Da zaključimo, centralne tačke veštine laganja a da se ne mogu uhvatiti, su dve: ne otkrivajte detalje i dopustite da neka određena grupa zaradi novac na vašoj laži. Budite *nejasni*. Svi postupci koji se koriste za potvrdu iskaza radi *preciznosti* zahtevaju detalje. Za svaki iskaz, njegov stepen preciznosti omogućava da se izmeri stepen u kojem je autor podmetnuo svoj vrat. Što je veća preciznost zahtevana, time iskaz postaje slabiji i verovatno će se pronaći greška, ukoliko postoji. To je glavni razlog koji smo za povećanje preciznosti odabrali kao vodič za naš uspon na planinu; želimo da izbegnemo laži u potpunosti. (I pored toga, mi za ovo putovanje ne tražimo novac.) Uzgred, isti postupci se koriste i u istragama kriminala. Za otkrivanje istine istražitelji obično postave pitanja velikom broju svedoka, dopuštajući da na svetlost izade što je moguće više *detalja*. Kada se prikupi dovoljno podataka, a preciznost je dovoljno velika, situacija postaje jasnija. Iznošenje “dobrih” laži je mnogo teže nego iznošenje istine; zahteva izuzetnu maštu.

Istina je ponor.

Demokrit

¹ Da bi pojasnili korišćenje rečnika u ovom tekstu: *religija* je duhovnost plus različit stepen verovanja i zloupotrebe moći. Mešavina zavisi od istorijata, pozadine i okruženja svake osobe. *Duhovnost* je otvoreno učestvovanje i celokupnosti prirode. Većina, a verovatno svi ljudi sa strašću za fiziku su duhovni. Većina nije religiozna.

² Drugim rečima, skup još uvek nepotvrđenih uzoraka posmatranja iste teme naziva se (*fizička teorija*). Pojam “teorija” uvek će se koristiti u ovom smislu tokom našeg hodanja, to jest kao “skup tačnih opštih iskaza”. Ovo korišćenje potiče od grčkog orginala “*theoria*”, što znači “posmatranje”; orginalno značenje “strastveno i naglašeno posmatranje objedinjuje celokupnost fizike u jednu reč. (“Teorija”, kao i “teatar” oblikovani su iz korena θέα, što znači “čin razmišljanja.”) Ponekad, međutim, pojam “teorija” se koristi – budući da se zamenuje sa “hipotezom” – sa značenjem “predpostavka”, kao u “vaša teorija je pogrešna”, ponekad sa značenjem “model”, kao u Čern-Simonsovoj teoriji, a ponekad sa značenjem standardne procedure, kao u “teorija perturbacije”. Ove netačne upotrebe ovde su izbegнуте. Da bi se pitanje dovelo do kraja: *teorija razvoja* nije predpostavka, nego skup tačnih iskaza zasnovanih na opažanjima.

Učiti sujeverja kao istinu je najstrašnija stvar

Hipatija iz Aleksandrije (c. 355-415)

[Apsolutna istina:] ...je ono što kažu naučnici kada dođu do kraja svog rada.

Čarls Pers (Charles Peirce) ([Ref. 263](#))

DA LI JE OVAJ ISKAZ TAČAN? – MALO O BESMISLICAMA

Postoje tri vrste ljudi: oni koji veruju u Božić-Batu, oni koji ne veruju u Božić-Batu i oni koji su Božić-Bata.

Anonimus

Istina je retorički koncept

Pol Foyerabend (Paul Feyerabend)

Ne mogu svi iskazi da se svrstaju kao tačni i pogrešni. Postoji i treća mogućnost: iskazi mogu da budu **besmisleni**. Postoje čak takvi iskazi i u matematici, gde se nazivaju **neodređeni**. Međutim, “neodređeni” i besmisleni” zaista su ista stvar! Primer su hipoteze neprekidnosti. Ove hipoteze su neodređene zato što one prave iskaz koji zavisi od preciznog značenja pojma “skup”; u standardnij upotrebi matematike upotreba pojma nije dovoljno precizno određena, tako da bi se vrednovanje istine moglo pridružiti hipotezama neprekidnosti. Ukratko, iskazi mogu biti neodređeni pošto sadržani pojmovi u njima nisu dovoljno oštro određeni.

Iziskazi isto tako mogu biti neodređeni iz drugih razloga. Fraze kao što je “Ovaj iskaz nije tačan” oslikavaju situaciju. Fraza je neodređena pošto se odnosi sama na sebe. Kurt Gödel¹ je čak izmislio način da se izgrade takvi neodređeni iskazi u oblasti logike i matematike. Posebna varijanta ovih **samoreferentnih** iskaza, posebno omiljenih kako u oblasti logike tako i u nauci računara, prihvatala je široka publika.² Slični neodređeni iskazi mogu da se naprave pomoću pojnova kao što su “izračunljivo”, “dokazivo” i “izvodljivo”. ([Ref. 264](#)).

Ustvari, samoreferentni iskazi su neodređeni usled toga što su besmisleni. Ako se uobičajena odrednica za “istinu”, naime ona koja odgovara činjenicama, zameni u rečanici “Ovaj iskaz nije tačan”, odmah ćemo zapaziti da ona ima sadržaj bez smisla. Najčuveniju rečenicu bez smisla načinio je lingvista Noam Čomski (Noam Chomsky)

➤ *Bezbojne zelene ideje spavaju besno.*

Ona se često koristi kao primer osobine mozga pri obradi jezika, ali nikо razuman nije je podigao na status paradoksa i napisao filozofsku raspravu o njоj. ([Ref. 216](#)). Da biste to učinili sa naslovom ovog odeljka, sličan je gubitku energije.

Glavni razlog za popularni uspeh samoreferentnih iskaza jeste teškoća da se sagleda izostanak značenja.³

Dobar primer je iskaz

➤ *Ovaj iskaz je lažan ili ste vi anđeo.*

¹ Kurt Gödel (1906. Brunn – 1978. Princeton), poznati logičar.

² Opšti uvog je dat u lepim knjigama od Rejmomda Smalijana (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, i *The Lady or the Tiger? And Other Puzzles*, Times Books, 1982. Isto tako odrednica može da bude bez sadržaja kao ona Davida Hilberta (David Kilbert) “najmanji broj koji još nije pomenut u ovom veku” ili “najmanji niz brojeva koji je opisan sa više znakova no u ovoj rečenici.

³ Dobro poznata žrtva ove teškoće je Pavle iz Tarsusa. Paradoks kritskog pesnika Epimenedesa (6. vek pne), koji je rekao „Svi Krićani lažu“ je isuviše težak za poznatog za humor neprilagođenog Pavla, koji je u svom pismu Titu (glava 1, stihovi 12 i 13 u hrišćanskoj Bibliji) naziva Epimenedesovim proročanstvим, dodaje neke rasističke komentare i navodi da su ova „svedočenja“ istinita. ([Ref. 265](#)). Ali čekajte! To nije krajnji obrт u priči. Iskaz „Svi Krićani lažu“ nije uopšte paradoks; može zapravo da joj se pripiše vrednost istine, pošto rečenica nije zaista samoreferentna. Da li možete to da potvrdite? ([Izazov 288s](#)) Jedini orginalni paradoks je „Ja sam lažov“, kojem je zaista nemoguće pripisati vrednost istine.

Iz nje možemo zapravo da zaključimo da “ste vi andeo”. Možete li da vidite kako? (**Izazov 289s**) Ako želite, možete da promenite drugu polovinu i da dobijete čak i još interesantnije iskaze. Takvi primeri pokazuju da sa takvim izjavama koje se odnose same na sebe mora da se postupa sa velikom pažnjom kada se ispituju. Ukratko, uvek kada sretnete nekog ko pokušava da koristi samoreferentne tvorevine Kurta Gödela da bi izveo zaključak iz drugog iskaza, napravite korak unazad, ili još bolje, nekoliko više. Samoreferentni iskazi, posebno vrsta koji je odredio Gödel – težak je i zajednički put – posebno među nazovinaintelektualcima – da se misli, izgovara i piše **besmislica**. Ništa korisno ne može da se zaključi iz besmislice. Dobro, ne baš sasvim, one pomažu da se redovno posećuje psihiatar.

U fizici, u drugim prirodnim naukama i u pravnim presudama ovaj problem se ne pojavljuje, pošto se ne koriste samoreferentni iskazi,¹ Ustvari, rad logičara potvrđuje, često prilično spektakularno, da ne postoji način da se pojma “istina” proširi iza odrednice “u saglasnosti sa činjenicama”.

Ein Satz kann unmöglich von sich selbst aussagen, das er wahr ist.²

Ludvig Vitgenštajna (Ludwig Wittgenstein),
Tractatus, 4.42

ZANIMLJIVOSTI I ZABAVNI IZAZOVI O LAŽIMA I BESMISLICAMA

Čovek najlakše nasamari sam sebe, za ono što želi da bude istina, on generalno i veruje da je istina

Demosten (Demosthenes, 349 bce) (**Ref. 266**)

Quator vero sunt maxima comprehendendae veritatis offendicula, 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.³

Rodžer Bejkon (Roger Bacon), *Opus majus*, 1267.

Es ist ja nicht alles, was ich den Bürgern sage, gelogen.⁴

Konrad Adenauer, 1962, kancelar Zap. Nemačke

Laži su ponekad zabavne i smešne – i radije se nazivaju vicevima – neke su znak psihičkih smetnji, aneke su stvorene sa kriminalnim namerama. Neli iskazi nisu laži, već samo besmislice. Zabavljamte se tražeći razliku.

* * *

Tokom crkvene ceremonije jedan čovek je zaspao. Sanjao je o francuskoj revoluciji: bio je doveden do gilotine. U tom trenutku, njegova žena ga primetila da je on zaspao. U istom trenutku u kojem je čovek sanjao da ga je pogodilo sečivo, njegova žena ga je udarila po vratu svojom lepezom. Od šoka je čovek trenutno umro. Da li je ova priča istinita ili je laž? (**Izazov 291e**).

* * *

Dobro poznata loša laž je “Juče sam se udavio”.

* * *

Počevši od 1990-ih godina takozvane krugove u žitu pravili su ljudi koji su hodali na štulama, sa komadom drveta i malo kanapa kroz polja useva. Uprkos tome, mnogi su se pretvarali, a još više verovali da su te krugove napravila vanzemaljska bića. Možete li naći neki razlog zbog čega je to nemoguće? (**Izazov 292s**).

¹ Zašto kružni iskazi, kao što su oni u Galilejevoj fizici, nisu samoreferentni? (**Izazov 290s**).

² Sasvim je nemoguće za rečenicu navesti da je sama za sebe istinita.

³ Postoje četiri kamena spoticanja u prihvatanju istine ..., naime potčinenost lošoj i nedostojnoj vlasti, uticaj običajnih, popilarnih predrasuda i prikrivanje sopstvenog neznanja praćenog razmetljivim prikazivanjem znanja.

⁴ Ustvari, nije sve što sam rekao građanima bila laž.

* * *

Ćesto se čuje ili pročita iskaz kao: "um (ili duh) je jači od materije".¹ Čuvajte se svih koji to izgovore; oni žele nešto od vas. Možete li da pokažete da su takvi iskazi svi i uvek netačni? (*Izazov 293e*).

* * *

U nekim zemljama dve su laži posebno učestale ranih godina 21. veka. Prva: globalno zagrevanje ne postoji. Druga: globalno zagrevanje nije zbog ljudskih uzroka. Da li su ovo dobre ili loše laži? (*Izazov 294s*).

* * *

Ponekad se čuje da će umreti čovek čija je koža potpuno prekrivena najfinijim prahom metala, pošto je onemogućeno da koža diše. Možete li pokazati sopstvenim posmatranjem da je to pogrešno? (*Izazov 295s*).

* * *

Čuvena mešavina obmane i uverenja je da je Zemlja stvorena pre oko 6000 godina. (Poneki vernici čak koriste ovu laž kao opravdanje nasilja nad nevernicima.) Možete li da objasnite zbog čega je ovaj broj pogrešan? (*Izazov 296s*).

* * *

Poznata provokacija: svet je stvoren prošle subote. Možete li da se odlučite da li je ovo pogrešno? (*Izazov 297s*).

* * *

Stotine obmana se nalaze na veb strani www.museumofhoaxes.com. Na njoj je dat izuzetan uvod u umetnost laganja; naravno na njoj su prikazane samo one laži koje su otkrivene. Uživajte u naučnim pričama, posebno u onima o arheologiji. Na internetu se mogu naći mnoge druge veb strane sa sličnim sadržajem.

* * *

U godinama oko 1990. mnogo takozvanih "iscelitelja" na Filipinima zaradilo je velike količine novca ubedivanjem pacijenata da su sposobni da odstrane objekt iz njihovog tela bez operacije. Zbog čega je ovo nemoguće? (*Izazov 298e*). (Za više informacija o laži za ovakvu vrstu lečenja pogledajte veb stranu www.quackwatch.com.)

* * *

Da li je homeopatija laž? (*Izazov 299s*).

* * *

"Čilibar pomaže protiv zubobolje." "Bračni partneri treba da imaju podudarne krvne grupe ili znake zodijaka." "Otvaranje kišobrana u kući donosi nesreću." Broj 8 donosi nesreću." Ovo su uobičajene besmislice širom sveta.

* * *

Od 1980-ih godina izvesne osobe su tvrdile da je moguće dobiti znanje jednostavno od nekog ko je udaljen 1000 km, bez ikakve komunikacije između te dve osobe. Međutim, predpostavljena "morfogenetska polja" koja omogućavaju ovaj poduhvat ne mogu da postoje. Zašto ne? (*Izazov 300e*).

* * *

Tvrdi se da u zgradili Vatrogasne brigade u jednom gradu u SAD postoji sijalica koja gori neprestano od 1901. godine (barem je to bio slučaj 2005. godine). Može li to da bude istina? (*Izazov 301s*). Stotine takvih priča, često nazivane "urbane legende", mogu da se nađu na veb strani www.snopes.com. Međutim, neke od tih priča nisu urbane legende, već su istinite, kako pokazuje veb strana.

* * *

"Ovaj iskaz je bio preveden sa francuskog na engleski." Da li je iskaz istina, laž ili nijedno?

* * *

U avionima ne postoji 13. red. Mnogi visoki hoteli nemaju oznaku za 13. sprat. Kakva se laž krije iza ove navike? Kakva je istina iza toga? (*Izazov 302s*). Jednom prilikom je autor zamolio pevača u Napulju da otpeva "Fenesta che lucive", divnu pesmu koju je pevao Enriko Karuzo i mnogi drugi kasnije. Pevač je odbio uz objašnjenje da bi lokalna publika pobesnela, a da bi vlasnik sale bio prinuđen da očisti celu salu sa solju, kako bi oterao nesreću. Mnogo sličnih stvari sreće se širom sveta.

¹ U srpskom jeziku postoji poslovica: "Um caruje, snaga klade valja." (Prim.prev.)

* * *

Već oko hiljadu godina neki ljudi se pretvaraju da su “stigmatizovani”, to jest da su pretrpeli “čudesne rane koje su slične onima sa Hristovog raspeća. Kako može da se proveri posmatranjem u toku jedne sekunde da svi takvi ljudi, bez izuzetka, prave rane sami sebi? (*Izazov 303s*).

* * *

“U srednjem i starom veku ljudi su verovali da je Zemlja ravna.” Ovo je poznata laž koja se retko ispituje. Istorija Rajnhard Kruger (Reinhard Kruger) je pokazao da za ovu laž pre svega dugujemo piscu Tomasu Pejnu (Thomas Paine, 1794.) i Vašington Irvingu (Washington Irving, 1928.). Činjenica je da su posle Aristotela svi verovali da je Zemlja okrugla.

* * *

Da li je pojam “multiverse” (višestruki svemir) kako se tvrdi suprotan od “universe” (svemir), laž ili verovanje (*Izazov 304s*).

* * *

Ovo što sledi nije laž. Dobar način da se suzbije radoznanost kod dece koristi se u mnogim okruženjima: pustite dete da gleda televiziju! Ubija radoznanost kada god se to poželi. Učinite to tokom nekoliko sedmica i nećete više moći da prepozname dete. Učinite li to tokom nekoliko godina i njegova radoznanost se neće uopšte vratiti. Internet i pametni mobilni telefoni imaju isti učinak.

* * *

Kako biste dokazali da su “Zemaljski zraci” laž? (*Izazov 305e*).

* * *

Kako biste pokazali da je laž iskaz “zakoni prirode bi mogli da se menjaju svaki put.” (*Izazov 306s*).

* * *

“Ja mogu da proizvedem energiju iz vakuma.” Dokažite da je to laž. (*Izazov 307e*).

* * *

“Ne može da se izmeri sve što postoji.” “Postoje stvari koje ne mogu da budu izmerene.” Dokažite da su ovi česti iskazi laži – bez izuzetaka. (*Izazov 308e*).

* * *

“Nije sve poznato.” Ovaj izraz je jako interesantan: savremena fizika zaista tvrdi suprotno u mnogim oblastima. Na primer, svi oblici energije su poznati; isto tako i svi oblici kretanja subjekata. Ukratko, iako je ovaj iskaz tačan – zaista, nije sve poznato – njega često koriste lažovi. Budite oprezni kada to čujete; ako je iskaz načinjem bez dokaza, njega je načinila varalica.

* * *

Ovde je posredi laž koji koriste matematičari, preuzetu od novinara: “Na vašem univerzitetu ispiti ženskih kandidata tretirani su lošije nego muških; vaša statistika pokazuje da je primljeno samo 41% od svih ženskih, ali 57% od svih muških kandidata.” Univerzitet je mali i ima samo dva fakulteta. tako da se lako proveravaju ovi brojevi,

Fakultet 1 primio je 60% od svih muških (60 od 100 kandidata) i 65% od svih ženskih kandidata (13 od 20 kandidata). Fakultet 2 primio je 30% od svih muških (3 od 10 kandidata) i 32% od svih ženskih kandidata (16 od 50 kandidata)

Ukupno, na univerzitet je primljeno 63 od 110 muških kandidata (ili 57%) i 29 od 70 ženskih kandidata (ili 41%). Drugim rečima, iako je na svakom od fakulteta procenat primljenih ženskih kandidata *veći*, procent ukupno primljenih ženskih kandidata je *manji*. Zašto? (*Izazov 309e*) Ustvari, ovo je istinita priča; u ovoj verziji su brojevi uprošćeni, da bi se situacija što je više moguće načinila jasnijom. Ali veliki univerziteti su na ovaj način jednom imali problem sa novinarima, uprkos radije primanju ženskih kandidata na svaki odsek. Neki novinari su izvanredni lažovi.

* * *

Mnoge laži se sastoje od samo jednog pojma, ponekad od smo jedne reči. Primeri su: “laserski mač”, “eter”, “transsupstancija” (pretvaranje u drugu supstanciju), “svemirski brod”. Pre mnogo vremena svaka reč je bila pesma – u današnje vreme mnoge reči su laž (*Strana 203*).

* * *

Područje u kojem su laži uobičajene je proizvodnja hrane. Sada je moguće da se kupi veštačko jaje, veštački paradajz ili veštački račići. Mnogi proizvedeni hlebovi sadrže cistein; već decenijama se cistein

izdvaja iz ljudske kose! U Evropi na mnogim prehrambenim proizvodima takođe nije navedena zemlja porekla niti sadržaj genetski modifikovanih sastojaka. Većina bavarskih pereca je proizvedena u Kini, na primer.

* * *

Poznata laž: genetski modifikovani usevi su dobri radi snabdevanja hranom. Zapravo oni povećavaju upotrebu pesticida, imaju smanjenu plodnost, koštaju više i povećavaju probleme sa hranom. Bio-goriva za automobile izazivaju iste razarajuće efekte.

* * *

“Nauka X je najstarija.” Ova rečenica se redovno čuje kada se za X uzima da je metalurgija, astronomija, geografija, matematika ili neka druga oblast. Očigledno, sve su to laži ili besmislice.

* * *

Fizičari su pomogli da se mnogi uobičajeni izrazi otkriju kao laž. Primeri su: - “asrolozi smatraju” – “stvaranje se dogodilo” – perpetuum mobile je moguć” – “vakuum je izvor energije” – munje baca Zevs” – “neke radnje donose nesreću” – “postoji brzina energije veća od brzine svetlosti” – “moguća je telepatija” – “postoji više od tri dimenzije prostora” – “postoje stvari koje ne mogu da se izmene” – “čuda su u suprotnosti sa zakonima i pravilima prirode” – “postoje izuzeci od pravila u prirodi” – “kvantna fizika podrazumeva više svetova” – “ne postoje granice u merenju” - u prirodi postoje beskrajne veličine” – “supersimetrija važi” – “čestice su opne” – “postoji višestruki svemir” – “um je jači od materije”. Ostale laži i predubeđenja biće pomenuti tokom naše pustolovine.

* * *

BBC (British Broadcasting Corporation) poznat je po šalama za 1. april. Jedna od najboljih od njih je dokumentarac o letećim pingvinima. Potražite jednostavno na internetu prelep film kako jedna vrsta pingvina poleće i leti. (*Izazov 310e*)

OPAŽANJA I NIHOVA ZBIRKA

Znanje je prefijnen izraz za neznanje

Pripisuje se Karl Poperu

Zbirka velikog broja istinitih iskaza o nekj vrsti opažanja, to jest, velikog broja činjenica, naziva se **znanje**, Gde je oblast posmatranja dovoljno proširen, govori se o **nauci**. (*Ref. 267*). **Naučnik** je stoga neko ko prikuplja znanje.¹ Osim toga, naći ćemo da je posmatranje razvrstan ulaz u pamćenje većine ljudi. Pošto kretanje postoji svud unaokolo, da bi se opisala sva takva opažanja predstavlju mamutski posao. Kao i za svaki veliki zadatak, velike širine, upotreba odgovarajućih alata određuje stepen uspešnosti koja se može dostići. Ovi alati, u fizici i u svim drugim naukama, spadaju u tri grupe: alati za prikupljanje opažanja, alate za komuniciranje opažanjima i alati za komunikaciju odnosa između opažanja. Poslednja grupa je već razmatrana u odeljku jezika i matematike. Mi ćemo se dotaći ostale dve.

DA LI JE PRIKUPLJENO DOVOLJNO OPAŽANJA?

Svaka je generacija sklona da odredi “kraj fizike”

što je slučajno i kraj njihovog naučnog doprinosa.

Džulijan Švinger (Julian Schwinger)²

¹ Pojam „naučnik“ („scientist“) je pogrešan naziv koji je osobenost engleskog jezika. Pravilno govoreći „scientist“ je poklonik škole „*sajentizma*“, ekstremističke filozofske škole koja pokušava da reši sve probleme pomoću nauke. Iz tog razloga neke religijske sekte imaju taj pojam u svom nazivu. Pošto engleski jezik nije imao kraći pojam za označavanje „naučne osobe“ („scientific person“), kako su se nazivali, pojam „scientist“ pojavio se u SAD, od osamnaestog veka nadalje. U današnje vreme ovaj pojam se koristi u svim zemljama engleskog govora – ali ne i izvan njih, srećom.

² Džulijan Sejmor Švinger (Julian Seymour Schwinger, 1918. New York City – 1994. Los Angeles), čudo od deteta i fizičar, bio je čuven zbog svog jasnog razmišljanja i izvanrednih predavanja. Radio je na vođenju talasa i radijaciji sinhrotona, dao je doprinos atomskoj fizici i razvoju kvantne elektrodinamike. Za ovo poslednje dobio je 1965. godine Nobelovu nagradu za fiziku zajedno sa Tomonagom i Fajnmanom. Bio je mentor za teze mnogim poznatim fizičarima i napisao je nekoliko izvanrednih i uticajnih udžbenika. (*Ref. 268*). Uprkos tome, na kraju života postao je čudno zainteresovan za prevaru: hladnu fuziju.

Fizika je eksperimentalna nauka; ona počiva na *zbirci* posmatranja. Da bi se tal posao efikasno obavio, razvijene su i izrađene sve vrste *instrumenata*, to jest alata koji omogućavaju posmatranja. Mikroskopi, teleskopi, osciloskopi, kao i termometri, higrometri, manometri, pirometri i spektrometri poznati su primeri između ostalih. Preciznost većine ovih alata neprestano se povećava čak i u današnje vreme, njihova proizvodnja je značajan deo savremene industrijske proizvodnje, primeri bi bili aparati za merenja u elektrotehnici i aparati za dijagnozu u medicini, hemiji i biologiji. Instrumenti mogu biti tako mali što je vrh od nekoliko atoma volframa koji proizvodi snop elektrona od nekoliko volti, ali i tako veliki kao što je 27 km u obimu koji proizvodi snop elektrona sa više od 100 GV efektivnog napona ubrzavanja. Instrumenti su pravljeni da sadrže i da mere najhladnije poznate materije u svemiru. Ostali instrumenti mogu da mere različite dužine mnogo manje od prečnika protona, pa do razdaljina većih od kilometra. Instrumenti su postavljeni duboko u Zemlju, na Mesecu, na nekoliko planeta, a poslati su i izvan sunčanog sistema.

Tokom ovog hodanja instrumenti neće biti opisivani u detalje, na raspolaganju je mnogo dobrih udžbenika na ovu temu. ([Ref. 269](#) i [Ref. 270](#)). Mnoga posmatranja prikupljena pomoću instrumenata nisu pomenuta u našoj pustolovini. Većina najvažnijih rezultata merenja u fizici zapisana je u standardnim izdanjima, kakve su Landolt-Bornštan serije i u časopisima iz fizike. ([Ref. 271](#)). (U **Dodatku E** dat je opšti pregled izvora informacija.)

Hoće li biti značajnih budućih posmatranja u oblasti osnova kretanja? U sadašnjosti, u ovoj posebnoj oblasti, uprkos velikom broju fizičara i objavljenih radova, najvećim ikada, broj novih eksperimentalnih otkrića neprestano se smanjuje već više godina i trenutno je dosta mali. Potrebna prefinjenost i ulaganja sredstava neophodnih za dobijanje novih rezultata postali su izuzetno veliki. U mnogim slučajima merni instrumenti su dostigli granice tehnologije, ograničenja budžeta pa čak i onih u prirodi. Povećava se broj novih eksperimenata koji daju rezultate a ne pokazuju odstupanja od teoretskih predviđanja. Povećava se broj istorijskih dokumenta koji pokušavaju da ožive dosadne i zastarele oblasti istraživanja. Tvrđnje o novim efektima i otkrićima pokazuju se da su lažne, usled grešaka merenja, samoobmana pa čak i prevara, postale su toliko učestane da je nepoverenje u nove rezultate postalo uobičajeno reagovanje.

Još važnije, nije poznata razlika između opažanja i teorije o kretanju, kao što ćemo otkriti u dva sledeća dela. Premda se još uvek očekuju otkrića u mnogim oblastima nauke, uključujući fiziku, nova posmatranja u osnovima kretanja samo su daleka mogućnost.

Ukratko, zadatak prikupljanja opažanja iz oblasti osnova kretanja (premda ne i u ostalim temama iz fizike) izgleda da je **završen**. Zaista, velika većina posmatranja opisana u ovoj pustolovini dobijena je pre završetka dvadesetog veka. Mi nismo isuviše poranili sa našim hodanjem.

Izmerite ono što je merljivo; učinite merljivim i ono što nije

Pogrešno pripisano Galileju, ([Ref. 272](#)).

DA LI SU POZNATA SVA OPAŽANJA U FIZICI?

Naučnici imaju gadno ponašanje osim kada podržavate njihovu teoriju; tada možete od njih i da dobijete novac na zajam.

Mark Tven (Mark Twain)

Najpraktičniji način da se **komunicira** opažanjima razvijen je pre mnogo vremena: putem merenja. Merenje omogućava efektnu komunikaciju nekog opažanja sa drugim mestom i u drugo vreme. To nije uvek tako jednostavno kako zvuči; na primer, u Srednjem veku ljudi nisu bili u stanju da uporede precizno "hladnoću" zime u dve različite godine! Otkriće termometra obezbedilo je pouzdano rešenje ove potrebe. Merenje je prema tome razvrstavanje opažanja u standardni skup opažanja. Prosto rečeno

➤ Merenje je **upoređivanje sa standardom**.

Ova odrednica merenja precizna je i praktična, i bila je prema tome opšte prihvaćena. Na primer, kada se meri dužina kuće, taj vid kuće se razvrstava u izvesan skup standardnih dužina, naime u skup dužina određen umnoškom jedinice dužine. **Jedinica** je apstraktan naziv za standard nekog opažanja. Brojčana vrednost jedinica omogućava najprecizniju i najefektivniju komunikaciju rezultata merenja.

Za veličine koje se mogu izmeriti određene su praktične standardne merne jedinice i postupak merenja; glavne su navedene i određene u **Dodatku A**. Sve merne jedinice izvedene su onih osnovnih; to je konačno zbog našeg ograničenog broja čula: dužina, vreme i masa povezani su sa vidom, slušom i dodjom. Za

uzvrat, naš ograničeni broj čula je zbog malog broja opažanja u prirodi. Životinje i maštine dele ista osnovna čula.

Opažanjima nazivamo različite vidove merenja u sistemu. Većina opažanja, kao što su veličina, brzina, položaj i slično, mogu da se opišu brojevima, pa su i takvom slučaju **količine**, to jest umnošci neke standardne merne jedinice. Opažanja su obično skraćena (**matematičkim**) **simbolom**, obično slovom iz neke azbuke. Na primer, simbol c obično označava brzinu svetlosti. Za većinu opažanja određeni su standardni simboli koje je odredila neka međunarodna organizacija.¹ Simboli za opažanja koji opisuju stanje objekta nazivaju se **promenljive**. Promenljive od kojih zavise druga opažanja nazivaju se **parametri**. (Upamtite: parametar je konstanta promenljive.) Na primer, brzina svetlosti je stalna, položaj je promenljiva, a temperatuta je često parametar od kojeg može da zavisi, na primer, dužina objekta. Zapazite da nisu sva opažanja količine; posebno pariteti nisu umnožak nijedne merne jedinice.

Fizička opažanja su alat za komuniciranje opažanjima. Da li je moguće da se govori uopšte o opažanjima? Jeste, kao što to činimo svakodneno. Ali mnogo je filozofskih hobija da se raspravlja da li zaista postoji primer za "Elementarsatz" – čijeniku iz atomske fizike – koju pominje Vitgenštajn u svom *Traktatusu*. Izgleda da postoji najmanje jedna koja odgovara: **Razlike postoje**. To je jednostavna rečenica; ona će u poslednjem delu našeg hodanja da odigra centralnu ulogu.

U današnje vreme poznate su sva fizička opažanja. Zadatak za određivanje alata za komuniciranje opažanja može da se smatra da je izvršen. To je jednostavan i jak iskaz. On pokazuje da je razumevanje osnova kretanja skoro dovršeno.

Ustvari, BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) prekinuo je dodavanje novih mernih jedinica. Poslednja jedinica, katal, uvedena je 1999. godine kao skraćenica za ili mol/s. Potpun pregled fizičkih mernih jedinica predstavljen je u **Dodatku A**.

Ne očekuje se da će biti pronađeno novo opažanje. U prošlosti je važnost fizičara mogla da se svrsta prema broju opažanja koje su otkrili on ili ona. Otkriće opažanja bilo je uvek manje uobičajeno nego li otkriće novih obrazaca ili "zakona" prirode. Čak i veliki naučnik, kao što je Ajnštajn, koji je otkrio mnoge obrasce prirode, uveo je samo jedno opažanje, naime tenzor metrike za opis gravitacije. Sledeći taj kriterijum – kao i mnogo drugih – Maksvel bi verovatno bio najznačajniji fizičar, pošto je uveo nekoliko opažanja koja zavise od materijala. Za Šredingera (Schrödinger), talasna funkcija koja opisuje kretanje elektrona, mogla bi da se ubroji u opažanja (iako je ta količina neophodna da se izračunaju rezultati merenja, a ne i samo opažanje.) Slučajno, uvođenje **svakog** pojma kojeg su prihvatili i ostali, redak je događaj; "gas", "entropija" ili "kinetička energija" takvi su primeri. Obično opažanja razvija više ljudi koji rade zajedno. Zapravo, skoro da ne postoji opažanje koje nosi ime osobe, dok većina "zakona" nosi.

S obzirom na popis opažanja neophodnih da se u potpunosti opiše priroda, da li to znači da su poznati svi obrasci ili pravila prirode? Nije neophodno; u istoriji fizike opažanja su bila određena i izmerena mnogo ranije no što su pronađena precizna pravila koja ih povezuju. Na primer, sva opažanja koja se koriste za opis samog kretanja – kao što su vreme, položaj, i iz njih izvedeni količina kretanja, energija i sve količine u termodynamici – bile su određene i izmerene pre ili tokom devetnaestog veka, dok su najpreciznije verzije obrazaca ili "zakona" prirode koji ih povezuju, **specijalna teorija relativnosti i neravnoteža termodinamike**, bile otkrivene mnogo posle odgovarajućih opažanja. Poslednja opažanja koja su otkrivena bila su jako i slabo polje nuklearnih interakcija. Takođe i u tom slučaju, obrasci prirode bili su opisani mnogo kasnije.

Ukratko, sva opažanja o osnovama kretanja kretanja bila su otkrivena. Mi smo, u ovom istorijskom trenutku, u srećnoj situaciji: možemo precizno da govorimo sa o svim kretanjima opaženim u prirodi. Poslednji deo naše pustolovine će objasniti malu mogućnost za greške ili šupljine u ovom iskazu.

¹ Svi matematički simboli koji se koriste u ovom hodanju, zajedno sa alfabetom iz kojeg su uzeti, navedeni su u **Dodatku A**. Oni su usklađeni sa međunarodnim standardima uvek kada se određuju. Standardni simboli fizičkih veličina određeni od strane International Standards Organization (ISO), International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP) i International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), mogu da se nađu na primer u bibliografiji, to jest *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press, 1992.

TREBA LI VREMENA ZA OPAŽANJA?

Opažanje je interakcija sa nekim delom prirode koja dovodi do pravljenja zapisa, kao što je pamćenje u mozgu, podatak na traci, mastilo na papiru, ili bilo koji drugi utvrđen oblik koji se primenjuje kao podrška. Neophodan nepovratan proces interakcije često se naziva **pisanje** zapisa. Očigledno, za pisanje je potrebno izvesno vreme; nulto vreme interakcije nebi dalo uopšte nikakav zapis. Prema tome, svaki uređaj zapisivanja, uključujući naš mozak, uvek zapisuje uz neko prosečno vreme opažanja, ma koliko da je ono kratko. Ukratko, ono što nazivamo utvrđenom slikom, bilo da je mentalna slika ili fotografija, uvek je prosečno vremena situacije kretanja. Bez prosečnog vremena ne bismo imali utvrđeno pamćenje. S druge strane, svako uprosečavanje vremena uvodi zamućenje koje sakriva izvesne detalje; a u našoj potrazi za preciznošću, u nekim trenucima, ovi detalji će sigurno da postanu važni. Otkrivanje ovih detalja počeće od narednog dela našeg hodanja, u poglavljiju koji istražuje kvantnu teoriju.

U poslednjem delu našeg uspona na planinu otkrićemo da postoji najkraće moguće prosečno vreme. Opažanja u ovom kratkom trajanju pokazaće toliko puno detalja da će se izgubiti čak i u razlikovanju čestica i praznog prostora. Nasuprot tome, naši pojmovi iz svakodnevnog života pojavljuju se tek posle relativno dugog prosečnog vremena. Traženje opisa prirode koji je nezavisan od proseka jedan je od velikih izazova u našoj pustolovini.

DA LI JE INDUKCIJA PROBLEM U FIZICI?

Nur gesetzmäßige Zusammenhänge sind denkbar.¹

Ludwig Vitgenštajna (Ludwig Wittgenstein),
Tractatus, 6.361

Postoji tradicija protivljenja između pristalica indukcije i dedukcije. Po mom viđenju to bi bilo isto tako razumno kao da se svadaju dva kraja crva.

Alfred Nort Vajthed (Alfred North Whitehead)

Indukcija je uobičajen naziv za čin donošenja opštih zaključaka iz malog i konačnog broja eksperimenata o ishodu **svih** mogućih eksperimenata izvedenih na drugim mestima ili u drugo vreme. U nekom smislu, to je tehnički izraz za podmetanje vrata, što je neophodno u svakom naučnom iskazu. Univerzalni iskazi, uključujući i takozvane "zakone" i obrasce prirode oslanjaju se na indukciju. Indukcija je bila velika tema rasprave za naučne komentatore. Često se nalazi na primedbu da se znanje u opštem smislu, a posebno fizika, oslanjaju na indukciju za svoje iskaze. Prema nekima, indukcija je vrsta skrivenog verovanja kojoj su podložni svi naučnici ali je istovremeno u suprotnosti sa njim.

Da bi se izbeglo gubljenje energije, načinićemo samo nekoliko primedbi. Prva može da bude zaključena iz jednostavnog eksperimenta. Pokušajte da ubedite kritičare indukcije da stave jednu ruku u vatru. Niko ko indukciju iskreno naziva verom nebi trebalo da zaključi iz malo nesrećnih eksperimenata u prošlosti da bi takav čin bio isto tako opasan u budućnosti... Ukratko, na neki način indukcija deluje.

Druga tačka je da su opšti iskazi u fizici uvek izraženi otvoreno, oni ništa ne kriju. Odbijanje da se stavi ruka u vatru posledica je invarijante posmatranja u pomeranju prostora i vremena. Zapravo, opšti iskazi ovakve vrste oblikuju same osnove fizike. Međutim, nijednom iskazu u fizici ne veruje se samo zato što je opšti; on uvek ostaje otvoren za eksperimentalnu proveru. Indukcija u fizici nije skriven postupak ili dokazivanje, ona je izričit deo eksperimentalnih iskaza. Ustvari, dobro je poznat kompetan pregled "indukovanih" iskaza koji se u fizici koriste; naveden je u prvom delu naše pustolovine. (**Vol. I, strana 208**). Ovi iskazi su toliko važni da su oni dobili posebno ime: nazivaju se **simetrije**. Pregled svih poznatih simetrija u prirodi je pregled svih indukovanih iskaza koji se koriste u fizici.

Možda najbolji dokaz za upotrebu indukcije je da ne postoji način da se ona izbegne kada se razmišlja. Ne postoji način da se razmišlja, da se govori ili da se pamti bez upotrebe pojmove, to jest, da se ne predpostavlja da će većina objekata ili entiteta ili procesa imati iste osobine u vremenu. Isto tako ne postoji način da se komunicira sa drugima bez predpostavke da su opažanja sa tačke gledišta onog drugog slična kao i naša. Ne postoji način ni da se razmišlja bez simetrije i indukcije. Zaista, pojmovi povezani sa simetrijom i indukcijom, kao što su prostor i vreme, pripadaju osnovnim pojmovima jezika. (**Strana 202**). Zapravo, jedine rečenice u kojima se ne koristi indukcija, rečenice logike, nemaju nikakav pojam. (Trac-

¹ „Mogu se zamisliti samo zakonske povezanosti.“

tatus, 6.11) ([Ref. 267](#)). Bez indukcije uopšte ne bismo mogli da razvrstamo zapažanja. ([Izazov 311s](#)) Evolucija nam je podarila pamćenje i mozak zato što deluje indukcija. Kritika indukcije nije samo kritika prirodnih nauka, to je kritika korišćenja razmišljanja uopšte. Nikada ne treba da uzmemo za ozbiljno ljude koji lično rade ono što kritikuju kod drugih; povremeno ističući ismejavanje ovog nastojanja je prava mera pažnje koju zaslužuju.

Tema ovde nebi mogla da se zaključi, da li se radi o nekim interesantnim razvojima u savremenoj fizici koji bi dodali dva dodatna eksera u mrtvački sanduk dokaza protiv indukcije.

Prvo, uvek kada u fizici pravimo iskaz o svim eksperimentima, svim vremenima ili svim brzinama, takvi iskazi su zapravo o **konačnom broju** slučaja. Danas znamo da se u prirodi ne pojavljuje beskonačnost, niti u veličini, niti u broju. Beskonačan broj slučaja prisutnih u iskazima klasične fizike u kvantne mehanike samo su prividni, ne i stvarni, usled ljudskog uprošćavanja i približnosti. Iskazi koji u neki eksperimentima daju isti rezultat “bilo gde” ili oni koji daju jednakosti tačne “za sva vremena” uvek obuhvataju samo konačan broj primera. Na ovaj način se izbegava instinktivno odbacivanje takvih iskaza. U nauci, a isto tako i u ovom tekstu, “sve” **nikada** ne znači beskonačan broj slučaja.

Drugo, dobro je poznato da je porešno izvođenje vrednosti od nekoliko slučaja do mnogih kada su nekoliko slučaja nezavisni međusobno. Međutim, ovaj zaključak je tačan ako su slučaji međuzavisni. Iz zapažanja da je neko našao na ulici hiljadu dinara u dva uzastopna meseca, ne može da sledi da će on naći novac i u sledećem mesecu. Indukcija je ispravna samo ako znamo da će svi slučaji imati isto ponašanje koje pratimo od samog početka. Na primer, ako komšija čiji džep ima rupu nosi svoju platu jednom mesečno preko ulice, a rupa se otvorи uvek na istom mestu, jer se penje, recimo, uz stepenice, tada bi zaključak mogao da bude ispravan. Rezultati u savremenoj fizici sa kojima ćemo se sresti u poslednjem delu našeg hodanja, pokazuju da sve situacije u prirodi zaista nisu nezavisne, pa ćemo stoga da dokažemo da je ono što nazivamo “indukcijom” ustvari logički ispravno razmišljanje.

U napretku fizike izuzetak se često pokaže kao opšti slučaj.

POTRAGA ZA PRECIZNOŠĆU I NJENE POSLEDICE

Der Zweck der Philosophie ist die logische Klärung der Gedanken.¹

Ludwig Vitgenštajna (Ludwig Wittgenstein),
Tractatus, 4.112

Dobar razgovor o kretanju znači govoriti precizno. Preciznost zahteva da se izbegnu tri uobičajene greške u opisu prirode.

Prvo, pojmovi moraju da budu **dosledni**. Pojmovi nikada nebi trebalo da imaju u svojoj odrednici ugrađene suprotnosti. Na primer, svaka pojava koja se javlja u prirodi očigledno je “prirodna” pojava; prema tome, govoriti o “natprirodnoj” ili “neprirodnoj” pojavi jeste greška koji nikao ko je zainteresovan za kretanje nebi trebalo da ostavi neosporavanu, pošto pojam sadrži logičku suprotnost. Prirodno, sva zapažanja su prirodna. ([Ref. 273](#)). Slučajno, postoji nagrada veća od milion dolara za svakog ko dokaže suprotno. Tokom više od dvadeset godina nikao još nije uspeo da je osvoji.

Drugo, pojmovi moraju da bude **utvrđeni**. Pojmovi nebi trebalo da imaju nejasne ili neprestano promenljive odrednice. Njihov sadržaj i njihove granice moraju da budu stalni i izričiti. Suprotno od toga četso se sreće u slomovima popularnih političara; to razlikuje njih od mnogo pouzdanijih mislioca. ([Ref. 274](#)). Fizičari takođe upadaju u tu klopku; na primer, postoji naravno samo **jedinstven** (fizički) svemir što govoriti i sam njegov naziv (engleski: *universe*). Govoriti o više od jednog svemira sve je češća greška.

Treće, pojmovi moraju da se **koriste prema odrednicu**. Pojmovi nebi trebalo da se koriste izvan njihove oblasti primene. Lako je podleći iskušenju da se rezultati, bez provere njihovog sadržaja, prenesu iz fizike u filozofiju. Primer je pitanje: “Zbog čega ćestice prate zakone prirode?” Pukotina u pitanju je usled nerazumevanja pojmova “zakoni prirode” i na zabunu usled zakona države. Ako bi se u prirodi upravljalo “zakonima”, oni bi mogli da se menjaju u skupštini. Ako se upamti da “zakoni prirode” prosto znače “obrasce”, “osobine” ili “opise ponašanja”, pa se pitanje preradi u ispravno: “Zbog čega se ćestice ponašaju na način koji opisuje njihovo ponašanje?” može se prepoznati besmislenost pitanja.

¹ “Svrha filozofije je logičko pojašnjenje misli.”

U toku našeg hodanja često će nas u iskušenje dovesti ove tri greške. Sledi nekoliko takvih situacija, uz načine kako da se izbegnu.

Doslednost je poslednje pribrežište nezamislivog.

Oskar Vajld (Oscar Wilde)

ŠTA SU INTERAKCIJE? – NEMA POJAVE

Celina je uvek više od zbiru njenih delova,

Aristotel (Aristotle), *Metaphysica*, 10f–1045a.

U fizičkom opisivanju prirode celina je uvek više od od zbiru njenih delova. Zapravo, ova razlika ima i svoje ime:

- Razlika između celine i zbiru njenih delova naziva se *interakcija između delova*.

Na primer, energija celine umanjema za zbir energija njenih delova naziva se energija interakcije. Proučavanje interakcija glavna je tema fizike. Drugim rečima, fizičari su zainteresovani naročito za razliku između delova i celine, nasuprot onome što često navode loši novinari ili drugi površni mislioci.

Treba zapaziti da je pojam “interakcija” zasnovan na opštim posmatranjima da sve što utiče na bilo šta drugo, za uzvrat je i pod uticajem od toga.

- Interakcija je uzajamna.

Na primer, ako neko telo promeni količinu kretanja drugog tela, tada drugo promeni količinu kretanja prvog za istu (ali negativnu) količinu. Uzajamnost interakcije rezultat je “zakona” očuvanja. Uzajamnost je takođe razlog da neko ko koristi pojam “interakcija” bude smatran jeretikom od jednobožačkih vera, što teolozi stalno ističu. (*Ref. 275*). Ovo verovanje stručnjaci redovno naglašavaju da takva uzajamnost podrazumeva odbacivanje nepromenljivosti božanstva. (Da li su u pravu?) (*Izazov 312s*).

Gore navedena jednostavna odrednica interakcije zvuči elementarno, ali dovodi do začudujućih zaključaka. Uzmimo Demokritovu ideju o atomima u njenom savremenom obliku: priroda je sastavljena od vakuuma i čestica. Prvi zaključak je *paradoks nekompletног opisa*: eksperimenti pokazuju da postoji interakcija između vakuuma i čestica. Međutim, interakcije su različite između čestica i celine, u ovom slučaju između vakuuma i čestica na jednoj i celine na drugoj strani. Stoga smo zaključili da priroda nije sastavljena samo od vakuuma i čestica.

Druga posledica je *paradoks prekomernog opisa*. Ona potiče iz rezultata koji je kasnije zaključen (*Vol. IV, strana 153*).

- Eksperimenti takođe pokazuju da se interakcije događaju kroz razmenu čestica.

Međutim, mi smo već uračunali čestice kao osnovne građevinske blokove prirode. Da li to znači da je opis prirode vakuuumom i česticama previše određen, uračunavajući stvari dva puta? (*Izazov 313s*). Oba paradoksa ćemo rešiti u poslednjem delu našeg uspona na planinu. (*Vol. VI, strana 69*).

Primena pojma interakcije isto tako daje odgovor na često postavljano pitanje da li u prirodi postoje osobine koje “iskrsavaju”, to jest osobine sistema koje se ne mogu zaključiti iz osobina njegovih delova i interakcija. Po toj odrednici ne postoje osobine koje iskrasavaju. “Iskrasavajuće” osobine mogu da se pojave ako su interakcije približne ili zanemarene. Ideja o “iskrsavajućim” osobinama proizvod je uma sa skučenim horizontima (*Vol. I, strana 304*) onemogućenog da sagleda ili prihvati bogatstvo posledica koje modu da proizvedu opšta načela. (*Ref. 276*). U odrednici ideje o iskrasavanju umanjuje se važnost interakcija radeći nešto naizgled neškodljivo, možda i nesvesno, ali zapravo na šokantan način protiv upotrebe razuma u proučavanju prirode. “Iskrasavanje” je praznoverje.

ŠTA JE POSTOJANJE?

Znaš li šta ja najviše volim?

Retoričko pitanje

Predpostavite da vam pijatelj kaže: "danas sam video **grampus**!"¹ Prirodno, vi ćete ga zapitati kako to izgleda. (**Ref. 277**). Kakav odgovor očekujete? Mi očekujemo nešta kao "To je životinja sa izvesnim brojem glava sličnih sa X, postavljenih na telo kao kod Y, sa krilima kao Z, ispušta krike kao U, a oseća se kao V – pri čemu slova označavaju neku drugu životinju ili objekt. Uopšteno govoreći, u slučaju objekta, ova scena iz Darwinovog putovanja u Južnu Ameriku pokazuje da u cilju međusobnog razgovora, moramo prvo da imamo neke osnovne zajedničke pojmove ("životinja", "glava", "krilo" itd.). Osim toga, za određivanje novog subjekta potrebna nam je karakterizacija njegovih delova ("veličina", "boja"), za način na koji su ovi delovi povezani međusobno, kao i način kako ta celina uzajamno deluje sa spoljnim svetom ("oseća se", "ispušta krikove"). Drugim rečima, da bi neki objekt postojao, moramo imati mogućnost da damo pregled povezanosti sa spoljnjim svetom.

- Objek **postoji** ako možemo da budemo u interakciji sa njim.

Da li je zapažanje dovoljno da se odredi postojanje? (**Izazov 314s**).

Za neki apstraktни pojam kao što je "vreme" ili "superstruna", odrednica postojanja mora da se poboljša samo neznatno:

- **(Fizičko) postojanje** je uspešnost da se interakcije opišu pouzdano.

Ova odrednica primenjuje se na drveće, vreme, virtualne čestice, imaginarnе brojeve, entropiju itd. Stoga je besmisleno raspravljati da li fizički pojam "postoji" ili da li je on "samo" apstrakcija koja se koristi kao alat za opisivanje zapažanja. Podudaraju se dve mogućnosti. Sporna tačka može biti da li je za pojam predviđen **precizan** opis, ili nije.

Za matematičke pojmove postojanje ima nešto različitiji smisao: za matematički pojam kaže se da postoji ako ne sadrži protivrečnosti. To je mnogo blaži zahtev nego za fizičko postojanje. Stoga nije ispravno zaključivati fizička postojanja iz matematičkih postojanja. To je česta greška; od Pitagorinih vremena nadalje često je konstatovano da pošto postoji matematički pojam, mora da postoji i fizički pojam. Istoriski, ova se greška pojavljuje u iskazima da orbite planeta "moraju" da budu kružne, da oblici planeta "moraju" da budu lopte ili da fizički prostor "mora" da bude Euklidski. U današnje vreme još uvek se događa u iskazima da prostor i vreme "moraju" da budu neprekidni i da priroda "mora" da može da se opiše pomoću skupova. U svim ovim slučajevima razmišljanja su pogrešna. Ustvari, neprekidnost pokušava da izvede fizičko postojanje iz matematičkog postojanja, skrivajući da je suprotno tačno: kratak osvrt pokazuje da je matematičko postojanje poseban slučaj fizičkog postojanja. (**Izazov 315s**).

Zapažamo da takođe postoji i različita vrsta postojanja, naime **psihološko postojanje**. Može se reći da pojam postoji psihološki ako on opisuje ljudsko unutrašnje doživljavanje. Stoga, pojam može da postoji psihološki čak i kada ne postoji fizički. Lako je naći primere u religijama ili u sistemima koji opisuju unutrašnja doživljavanja. Isto tako mitovi, legende i komični stripovi određuju pojmove koji postoje samo psihološki, ali ne i fizički. (**Izazov 316s**). U našem hodanju, uvek kada se bude govorilo o postojanju, podrazumeva se fizičko postojanje

DA LI STVARI POSTOJE?

*Wer Wissenschaft und Kunst besitzt,
Hat auch Religion;
Wer jene beiden nicht besitzt,
Der habe Religion.²*

Johan Wolfgang fon Gete (Johann Wolfgang von Goethe), Zahme Xenien, IX

Korišćenjem iznete odrednice o postojanju, pitanje postaje ili beznačajno ili neprecizno. Ono je beznačajno u smislu da stvari obavezno postoje ako ih opisuju opažanja, pošto su na taj način bila opisana. Međutim, onaj koji je postavio pitanje mislio je da pita: "Da li zaista postoje nezavisno od posmatrača?"

¹ Uzgred, *grampus* je staro ime za ono što se naziva „orka“.

² Onaj koji poseduje nauku i umetnost, ima takođe i religiju; onaj koji ne poseduje njih dve, ima religiju

Ako se upotrebi gornje, ovo pitanje može da se prepravi: “Da li stvari koje opažamo postoje nezavisno od posmatranja?” Posle hiljada godina obimnih rasprava profesionalnih filozofa, logičara, sofista i amatera odgovor je isti: “Da”, pošto se svet nije promenio posle babine smrti. Nestanak posmatrača izgleda da ne menja svemir. Ovi eksperimentalni nalazi mogu da budu potkrepljeni umetanjem u pitanje odrednice “postojanja”, koje tada postaje: “Da li su stvari koje zapažamo u interakciji sa drugim subjektima u prirodi i kada nisu u interakciji sa ljudima.” Odgovor je očigledan. Više popularnih knjiga iz kvantne mehanike fantazira o važnosti “uma” posmatrača – štagod da bi ovaj pojam mogao da znači; u njima su obezbeđeni lepi primeri autora koji smatraju sebe nezamenljivim, očigledno izgubivši sposobnost da vide sebe kao deo veće zajednice.

Naravno da postoji i drugo mišljenje o postojanju stvari, Najčuvenije je ono neoženjenog Džordža Berklija (George Berkeley, 1685. Kilkennys – 1753. Oxford) koji je ispravno shvatio da bi misli utemeljene samo na posmatranju, mogle da potkopaju osnove religijske organizacije u kojoj je on bio jedan od vrhunskih upravitelja. Da bi se odupro ovoj sklonosti, on je 1710. godine objavio *A Treatise Concerning the Principles of Human Knowledge (Rasprava o principima ljudskog znanja)*, knjigu koja odbacuje postojanje materijalnog sveta. Ova reakcionarna knjiga postala je široko poznata u krugu istimisljenika (bilo je to vreme kada je pisano malo knjiga) iako je zasnovana na manjkavim idejama: on je predpostavio da pojma “postojanje” i pojma “svet” mogu da se odrede odvojeno. (Možda bi bili radoznali da pokušate ovaj poduhvat?) (**Izazov 317e**).

Berkli je imao dva cilja kada je pisao svoju knjigu. Prvi, on je pokušao da porekne kapacitet ljudi da dodu do presude o prirodi ili o bilo kojoj drugoj materiji **na osnovu ličnog iskustva**. Drugi, on je isto tako pokušao da porekne **ontološki domaćaj nauke**, to jest, zaključke koji se mogu izvlačiti iz iskustava o pitanjima o ljudskom postojanju. (Univerzitet se kasnije nije postideo da koristi njegovo ime.) Iako je Berkli u današnje vreme uglavnom prezren, on je zapravo postigao svoj glavni cilj u iskazu da nauka i religija nisu u protivrečnosti, već da se **dopunjaju** međusobno. Pod religijom Berkli nije mislio na moralnost i duhovnost, svaki naučnik je prijatelj i jedne i druge. Pod religijom je Berkli podrazumevao da je standardni skup verovanja iza kojeg je stajao, iznad razumnih zaključaka. Naširoko citiranog iskaza o dopunjavanjima nauke i religije, i same vere, mnogi se i u današnje vreme rado pridržavaju. Međutim, kada se traži poreklo kretanja, sva verovanja mu stoje na putu, uključujući i ovo. Nositi verovanja je slično nošenju prevelikog prtljaga: on sprečava da se stigne na vrh Planine Kretanja.

DA LI PRAZNINA POSTOJI?

Nastavnik: “Šta se nalazi između jezgra i elektrona?

Učenik: “Ništa, samo vazduh.”

U filozofskim raspravama “praznina” je obično određena kao “nepostojanje”. To tada postaje igra reči kada se zatraži odgovor da ili ne na pitanje “Da li postoji praznina?” Izraz “postojanje nepostojanja” ili je protivrečnost pojmove ili je u najmanju ruku nejasno određeno; tema naizgled ne izgleda da je mnogo interesantna. Međutim, u fizici se pojavljuju slična pitanja, a fizičari treba da su pripremljeni da zapaze razliku predhodnog pitanja od ovih. Da li postoji vakuum? Da li postoji prazan prostor? Ili da li je svet “ispunjen” svuda, kako je izjavljivao konzervativniji biolog Aristotel? U prošlosti su ljudi ubijali za davane odgovore koje je bilo neprihvatljivo od strane vlasti.

Nije očigledno, ali je uprkos tome važno, da savremeni fizički pojmovi “vakuma” i “praznog prostora” nisu isti kao filozofski pojam “praznina”. “Vakuum” nije određen kao “nepostojanje”; nasuprot tome, on je određen kao odsustvo zračenja i materije. Vakum je subjekt sa posebnim osobinama zapažanja, kao što su njegov broj dimenzija, njegove elektromagnetne konstante, njegova zakriviljenost, njegova masa koja nestaje, njegova interakcija sa materijom preko zakriviljenosti i preko uticaja na raspad itd. (Tabela sa osobinama fizičkog vakuuma data je na **strani 105.**). Istorijски, bilo je potrebno dugo vremena da se razjasni razlika između fizičkog vakuuma i filozofske praznine. Ljude su ova dva pojma zbunjivala i razmišljali su o postojanju vakuuma više od 2000 godina. Prvi koji je izrazio da on postoji, uz hrabrost da pokuša da pogleda kroz logičku protivrečnost u osnovnoj fizičkoj stvarnosti, bili su Leukip i Demokrit, najdelotvorniji antički misluoci. Njihovo razmišljanje je zauzvrat izazvalo reakcionarni odgovor Aristotela, koji je odbacio pojam vakuuma. Aristotel i njegovi učenici širili su verovanje u “užas vakuuma” prirode.

Rasprava se u potpunosti promenila u sedamnaestom veku, kada je prvi eksperimentalni postupak da se stvori vakuum osmislio Toričeli.¹ Korišćenjem žive u staklenoj cevi on je proizveo prvi laboratorijski vakuum. (Možete li da pogodite kako?) (**Izazov 318s**). Dokazi protiv vakuma ponovo su se pojavili oko 1900. gpdine, kada se tvrdili da je za svetlost neophodan "eter" za njeno rasprostiranje, koristeći skoro iste dokaze koji su koruščeni dve stotine godina ranije, ali drugim rečima. Međutim, eksperimenti nisu uspeli da otkriju nijednu predpostavljenu osobinu ovog nejasno određenog pojma. Eksperimenti u polju opšte teorije relativnosti pokazali da se vakuum može kretati – mada na sasvim različit način od načina na koji se očekivalo da se kreće eter – da vakuum može da se krivi, ali da nastoji da se vrati u svoj oblik. Zatim, kasnije tokom dvadesetog veka, kvantna teorija polja ponovo se usprotivila postojanju pravog vakuma u korist prostora punog virtualnih parova čestica-antičestica. Pitanje je dostiglo vrhunac u raspravi oko kosmološke konstante. (**Vol. VI, strana 49**).

Ukratko, vakuum postoji. Pitanje "Da li postoji praznina?" postavljeno je konačno samo u poslednjem delu našeg hodanja, na prilično iznenađujući način. (**Vol. VI, strana 71**).

*Natura abhorret vacuum.*²

Antiquity

DA LI JE PRIRODA BESKRAJNA?

Sigurno je i evidentno za naša čula, da su na svetu neke stvari u pokretu. Zato, bilo šta da se kreće, pokrenuto je od nečeg drugog... Ako je ono čime je pokrenuto bilo i samo u kretanju, tada je i to trebalo da bude pokrenuto od drugog, a to opet pokrenuto od drugog. Ali ovo ne može da ide u nedogled, jer onda nebi bilo prvog pokretača, pa posledično tome ni drugih pokretača, posmatrajući da se naredni pokretači kreću samo onoliko koliko ih je pokrenuo predhodni pokretač, kao što se štap kreće samo zato što je pokrenut rukom. Prema tome, neophodno je da se dođe do prvog pokretača koga nije pokrenuo nikо drugi, a to je Bog što svako razume.

Toma Akvinski (Thomas Aquinas, oko 1225. Aquino – 1274. Fossanova) *Summa Theologiae*, I, q. 2.

Većina savremenih rasprava o teoriji skupa usmerene su na način da se odredi pojam "skup" za različite vrste beskonačnih zbirk. Za opisivanje kretanja to dovodi do dva pitanja: Da li je svemir beskrajan? I da li je on skup? Počećemo sa onim prvim. Osvetljavajući pitanje iz svih pravaca, ubrzo ćemo otkriti da je ono koliko jednostavno, toliko i neprecizno.

Da li su potrebne beskonačne veličine da bi se opisala priroda? Sigurno, u klasičnoj i kvantnoj fizici to činimo, to jest u slučaju prostor-vremena. Da li je to neophodno? Već možemo da kažemo nekoliko stvari.

Svaki skup može biti konačan u jednom pogledui beskonačan u drugom. Na primer: moguće je da se produži duž konačnog matematičkog rastojanja u beskonačnom iznosu vremena. Isto tako je moguće da se putuje duž bilo kojeg rastojanja u određenom iznosu matematičkog vremena, uzimajući kao opciju beskonačnu brzinu, čak i kada se teorija relativnosti uzme u obzir, kao što je objašnjeno ranije. (**Vol. II, strana 41**).

Uprkos korišćenju beskonačnosti, naučnici su još uvek ograničeni. Videli smo u predhodnom tekstu da postoji više vrsta beskonačnosti. (**Strana 208**). Međutim, nijedna beskonačnost veća od kardinalnog broja skupa realnih brojeva nema nikakvu ulogu u fizici. Nijedna oblast funkcije ili fazni prostor u klasičnoj fizici i nijedan Hilbertov prostor u kvantnoj teoriji nema veći kardinalni broj. (**Ref. 278**). Uprkos sposobnosti matematičara da odrede mnogo veći broj beskonačnosti, one nisu potrebne za opis prirode. Čak i najsloženiji opisi kretanja koriste samo beskonačnost realnih brojeva.

¹ Evangelista Toričeli (Evangelista Torricelli, 1608. Faenza – 1647. Florence), fizičar, učenik i sledbenik Galileja. Jedinica za pritisak "tor" (nije iz SI) nazvana je po njemu.

² Priroda ne podnosi vakuum

Ali da li je moguće uopšte da se kaže za **prirodu** ili za neki od njenih vidova koji su zaista **beskonačni?** (**Izazov 319s**). Može li takav iskaz da bude uporediv sa posmatranjima? Ne. Očigledno, svaki iskaz koji tvrdi da je nešta u prirodi beskonačno, predstavlja ubeđenje, i ono nije podržano posmatranjima. Mi ćemo u daljem tekstu strpljivo otklanjati ovo ubeđenje.

Mogućnost uvođenja lažnih beskonačnosti čini veona teškim bilo koje razmatranje da li je čovečanstvo blizu “kraja nauke”. (**Ref. 263**). Količina znanja i vreme potrebno da se ono otkrije nisu povezani. U zavisnosti od brzine kojom se napreduje kroz njega, kraj nauke može da bude blizu ili nedostupan. U praksi, naučnici imaju prema tome moć da načine nauku beskonačnom ili ne, na primer, smanjivanjem brzine napretka. Kako naučnicima treba finansiranje za njihov rad, može se pogoditi stav koji oni obično zauzimaju.

Ukratko, za svemir se ne može dokazati da je beskonačan. Ali može li biti **konačan**? Na prvi pogled, to bi bila jedina preostala mogućnost. (Nije, kao što ćemo videti). Ali iako su mnogi pokušavali da opišu svemir kao konačan u svim njegovim vidovima, niko nije bio uspešan. Da bi se razumeli problemi sa kojima su se oni sretali, nastavićemo sa napred pomenitim sledećim pitanjem:

DA LI SVEMIR PREDSTAVLJA SKUP?

Prosta posmatranja nas dovode do pitanja da li je svemir skup. Već 2500 godina govori se da je svemir načinjen od vakuma i čestica. (**Ref. 279**). To podrazumeva da se svemir sastoji od izvesnog **broja** čestica. Verovatno jedina osoba koja je donela ovaj zaključak za granicu, bio je astrofizičar Artur Edington (Arthur Eddington, 1882. Kendal – 1944. Cambridge), koji je napisao:

Verujem da postoji $15,747,724,136,275,002,577,605,653,961,181,555,468,044,717,914,527,116, 709,366,231,425,076,185,631,031,296$ protona u svemiru i isti broj elektrona. (**Ref. 280**).

Edington se šećačio neprestano u vezi ovog iskaza i svog ubeđenja koji ga je doveo do njega. Njegovi dokazi su bili zaista zasnovani na njegovoj ličnoj sklonosti za izvesne omiljene cifre. Međutim, nebi trebalo da se smejemo isuviše glasno. Ustvari, već 2500 godina skoro svi naučnici su razmišljali po istoj liniji, a jedina razlika bila je što su oni ostavili ovaj broj neodređen! Zapravo, svaki drugi broj ubaćen u gornji izraz bio bi podjednako smešan. Izbegavanje navođenja samo je kukavički način da se izbegne pogled kroz ovaj zamagljeni način opisa prirode pomoću čestica.

Postoji li uopšte broj čestica u prirodi? Ako ste se smejavili iskazu Edingtona, ili ako ste se udarili po glavi kada ste ga čuli, to bi možda značilo da vi instinkтивno verujete da priroda nije skup. Da li je tako? Uvek kada određujemo svemir kao ukupnost događaja, ili kao ukupnost svih tačaka u prostor-vremenu i objekata, mi podrazumevamo da se tačke prostor-vremena mogu razlikovati, da se objekti mogu razlikovati i da se i tačke i objekti mogu razlikovati međusobno. Stoga predpostavljamo da je priroda razdvojiva i da je skup. Ali da li je to ispravno? Ovo pitanje je važno. Sposobnost da se mogu međusobno razlikovati tačke prostor-vremena i čestice često se naziva **lokalitet**. Stoga je svemir razdvojiv ili je skup ako, i samo ako, je naš opis njega lokalан.¹ A u svakodnevnom životu lokalnosti se opažaju bez izuzetaka.

U svakodnevnom životu takođe opažamo da je priroda razdvojiva ali istovremeno i celina. To je “više no što se može smatrati kao jedno”: u svakodnevnom životu priroda je skup. Zaista, osnovna osobina prirode je njena raznolikost. U svetu oko nas mi opažamo promene i razlike; opažamo da je priroda razdvojiva. Osim toga, svi vidovi prirode pripadaju zajedno: postoje odnosi između ovih pojava, obično se nazivaju “zakoni”, koji izražavaju da različiti vidovi prirode oblikuju celinu, obično nazvanu svemir.

Drugim rečima, mogućnost da opišemo posmatranja uz pomoć “zakona” sledi iz našeg doživljaja razdvojivosti u prirodi. Što se preciznije odredi razdvojivost, to će preciznije moći da se formulišu “zakoni”. U stvari, ako priroda nebi bila razdvojiva ili nebi bila jedinstvena, mi ne bismo mogli da objasnimo zbog čega kamen pada naniže. Zato smo dovedeni do razmišljanja da bi trebalo da budemo sposobni da izvedemo sve “zakone” iz opažanja da je priroda razdvojiva.

Osim toga, samo razdvojivost nam omogućava da uopšte opišemo prirodu. Opis je razvrstavanje, to jest, preslikavanje između izvesnih vidova prirode i izvesnih pojmoveva. Svi pojmovi su skupovi i odnosi. Pošto je svemir razdvojiv, on može da se opiše uz pomoć skupova i odnosa. I skupovi i odnosi su entiteti sa

¹ U kvantnoj mehanici se koriste takođe i druge, detaljnije određivanje lokalnosti. Mi ćemo ih pomenuti u kvantnom delu ovog teksta. (**Vol. IV, strana 120**). Ovde iznesen pojam je različit, više osnovan, i nije povezan sa onim iz kvantne teorije.

delovima koji mogu razlikovati. Precizan opis obično se naziva razumevanje. Ukratko, svemir je razumljiv pošto je razdvojiv.

Štaviše, samo razdvojivost svemira čini naš mozak tako dobrim instrumentom. Mozak je sastavljen od velikog broja povezanih delova i samo podeljenost mozga omogućava njegov rad. Drugim rečima, razmišljanje je moguće samo zbog podeljenosti prirode.

Konačno, samo razdvojivost svemira omogućava nam da napravimo razliku referentnih sistema i da stoga odredimo sve simetrije na osnovu fizičkih opisa. I da na isti način kao što je razdvojivost neophodna za **kovarijantno** opisivanje, jedinstvo prirode je potrebno za **invarijantno** opisivanje. Drugim rečima, takozvani "zakoni" prirode zasnivaju se na doživljavanju da je priroda kako razdvojiva tako i objedinjena – to jest ona je skup.

Ovi dokazi izgledaju neodoljivo za dokaz da je svemir skup. Međutim, ovi dokazi su primenljivi samo za svakodnevno iskustvo, svakodnevne dimenzije i svakodnevnu energiju. Da li je priroda isto tako skup i *izvan* svakodnevnog života? Da li su objekti različiti pri svim energijama, čak kada se oni posmatraju uz najveći moguću preciznost? Ostala su nam tri otvorena pitanja: pitanje broja čestica u svemiru, kružna odrednica svemira, vreme i materija i pitanje da li je opis prirode kao da je načinjena od čestica i praznina prekomeren opis, nedovoljan opis ili nijedno. Ova tri pitanja teraju nas na dvoumljenje da li su objekti prebrojivi na svim energijama. Otkrićemo u poslednjem delu našeg uspona na planinu da se ustvari objekti u prirodi ne mogu prebrojati na velikoj energiji. (**Vol. VI, strana 86**). Posledice će biti opsežne i iznenadjujuće. Kao primer, pokušajte da odgovorite na sledeće pitanje: ako svemir nije skup, šta to znači za prostor i vreme? (**Izazov 320s**).

DA LI SVEMIR POSTOJI?

Svakom naprednom duhu suprostavlja se hiljadu ljudi postavljenih da sačuvaju prošlost.

Moris Meterlink (Maurice Maeterlink)

Sledeći odrednicu iznetu u predhodnom tekstu, postojanje pojma znači njegovu sposobnost da opiše interakcije. Postoje dve uobičajene odrednice "svemira". Prva je ukupnost sve materije, energije i prostora-vremena. Ali iz njenog korišćenja proističu čudne posledice: pošto ništa ne može da bude u interakciji ca ovom ukupnošću, mi ne moženo da tvrdimo da svemir postoji.

Zato uzmimo ograničeniji oblik, naime da je svenir samo ukupnost materije i energije. Ali takođe i u tom slučaju nemoguće je da postoji interakcija sa svemirom. Možete li dati nekoliko dokaza koji podržavaju ovo? (**Izazov 321s**).

Ukratko, dolazimo do zaključka da svemir ne postoji. Ustvari, mi ćemo detaljnije da potvrdimo ovaj rezultat kasnije tokom našeg hodanja. (**Vol. VI, strana 90**). Posebno, pošto svemir ne postoji, to čini besmislenim pokušaj da se odgovori na pitanje *zašto* postoji. Najbolji odgovor bi možda bio: zbog bezbojnih zelenih ideja koje spavaju besno. (**Ref. 216**).

ŠTA JE STVARANJE?

*(Gigni) De nihilo nihilum, in nihilum nil posse reverti.¹ (**Ref. 281**)*

Persije (Persius), *Satira*, III, v. 83-84.

*Anaksagora, koji je otkrio drevnu teoriju da ništa ne dolazi iz ničega, odlučio je da ukine pojam stvaranja i uveo je na njegovo mesto onaj o diskriminaciji; nije oklevao da izjavi da su ustvari sve stvari pomešane sa drugima i da diskriminacija stvara njihov rast. (**Ref. 282**)*

Nepoznat odlomak, Srednji vek

¹ Ništa (se ne stvara) iz ničeg, ništa ne može da nestane u ništa.

Pojam "stvaranje" često se čuje kada se govori o prirodi. On se koristi u raznim kontekstima i sa različitim značenjima.

Govori se o stvaranju kao opisivanju ljudskog čina, kao što su opažanja pri umetničkom slikarstvu ili kucanju teksta sekretarice. Očigledno, to su neke vrste promena. U razvrstavanju promena upoznati smo na početku našeg hodanja, navedene promene su kretanje objekata, kao što su elektroni u mozgu, molekuli u mišićima, materijala za slikanje, ili elektrona unutar računara. Ove vrste stvaranja prema tome su posebne vrste kretanja.

Može isto tako da se govori u biološkom ili socijalnom smislu, kao u "stvaranje života", ili "stvaranje poslova", ili stvaranje civilizacije. Ovi događaji su oblici rasta ili samoorganizovanja: oni su posebni slučaji kretanja.

Fizičari često kažu da svetiljka "stvara" svetlost, ili da kamen koji padne u jezero "stvara" talase na vodi. Slično tome, oni govore o "stvaranju parova" materija i antimaterija. To je bilo jedno od najvećih otkrića u fizici da su svi ovi procesi posebna vrsta kretanja, (**Vol. IV, strana 147**) naime pobuđenost polja. (**Vol. V, strana 87**).

U popularnom pisanju o kosmologiji, "stvaranje" te takođe pojmom koji se obično koristi, ili bolje rečeno zloupotrebljava za *veliki prasak*. Međutim, širenje svemira je čist primer kretanja i nasuprot čestim nesporazumima, opis velikog praska sadrži samo proces koji spada u jednu od tri predhodne kategorije, kao što je pokazano u odgovarajućem poglavljju opšte teorije relativnosti. (**Vol. II, strana 192**). Veliki prasak nije primer stvaranja. Kvantna kosmologija daje više razloga radi kojih naivan pojam "stvaranje" nije primenjiv za veliki prasak. (**Vol. II, strana 191**). Prvo, pokazalo se da veliki prasak nije događaj. Drugo, on nije bio ni početak. Treće, on nije pružio izbor iz velikog skupa mogućnosti. Veliki prasak nema nijednu osobinu koja je svojstvena pojmu "stvaranje".

Ukratko, zaključujemo da je u svim slučajima *stvaranje vrsta kretanja*. (Isto se primenjuje za pojmove "nestak" i "poništavanje".) Nijedna drugačija vrsta kretanja nije opažena u prirodi. Posebno, naivan smisao "stvaranja", naime pojavljivanje iz ničeg – na latinskom *ex nihilo* – nikada nije opaženo u prirodi. Sve opažene vrste "stvaranja" zahtevaju prostor, vreme, sile, energiju i materiju sa svoja ostvarenja. Da bi se dogodilo, stvaranje zahteva nešto što već postoji. Osim toga, precizna istraživanja pokazuju da nijedan fizički proces i nijedan primer kretanja nemaju početak. Naše hodanje će nam pokazati da nam priroda ne dopušta da odredimo tačno početke. Ova osobina sama za sebe dovoljna je da pokaže da "stvaranje" nije pojam primenljiv na ono što se događa u prirodi. Još gore, stvaranje se primenjuje samo za fizičke sisteme; otkrićemo da priroda nije sistem, a što je još gore, da sistemi uopšte ne postoje.

Suprotnost stvaranju je *očuvanje*. Centralni iskaz u fizici je teorema o očuvanju: za energiju, masu, linearnu količinu kretanja, moment količine kretanja, nanelektrisanje itd. Ustvari, svaki "zakon" očuvanja je detaljno i pouzdano odbacivanje pojma stvaranja. Ideja starih Grka o atomima već je sadržala ovo odbacivanje. Atomisti su izražavali da ne postoji nikakvo stvaranje i nikakav nestanak, već samo kretanje atoma. Svako pretvaranje materije je kretanje atoma. Drugim rečima, ideja o atomima bila je neposredna posledica negacije stvaranja. Čovečanstvu je trebalo više od 2000 godina pre no što se prestalo zatvaranje ljudi u tamnice zbog kazivanja o atomima, kao što se to dogodilo Galileju. (**Vol. I, strana 244**).

Međutim, postoji jedan izuzetak u kojem se primenjuje naivan pojam stvaranja: on opisuje ono što madžioničari rade na bini. Kada madžioničar učini da se zec pojavi niodkuda, mi zaista doživljavamo "stvaranje" ni iz čega. U najbojem slučaju magija je oblik zabave, u najgorem, zloupotreba lakovernosti. Ideja da je svemir nastao od etera ne izgleda privlačno ni u jednom od ova dva slučaja; ili ipak na onaj drugi slučaj, možda gledanje na svemir kao na vrhunsku zabavu moglo bi da otvori svežiji i stvaralački pristup životu.

Volter (Voltaire, 1694. Paris – 1778. Paris) popularizovao je dokaz protiv stvaranja koji je često korišćen u prošlosti: mi zaista ne znamo da li se stvaranje dogodilo ili ne. U današnje vreme situacija je drugačija: mi zaista znamo da se ono nije dogodilo, pošto je stvaranje vrsta kretanja, a kretanje nije postojalo u velikom prasku, kao što ćemo videti u završnom delu uspona na planinu.

Da li ste ikada čuli izraz "stvaranje po zakonima prirode"? To je jedan od najčešćih primera neobaveštenosti. Pre svega, u tom izrazu su pomešani "zakon" i sama priroda. Opis nije isto što i sama stvar; svako zna da je davanje opisa ruže njegovoj voljenoj sasvim druga stvar od davanja stvarne ruže. Drugo, izraz podrazumeva da način na koji je priroda nekako "prisiljena" da sledi "zakone" – prilično detinjast, i što je još gore, netačno je sagledavanje. I treće, izraz predpostavlja da je moguće da se "stvori" opis prirode. Međutim, već je "zakon" opis, a opis po odrednicu ne može da se stvara: tako da izraz uopšte nema smisla. Izraz "stvaranje po zakonima prirode" je ovaploćenje zbnjenog razmišljanja. Moglo bi bilo da je

nazivanje velikih umetnika “stvaraocem” ili “božanskim”, kao što je to bilo tokom Renesanse, nije bogohuljenje, već samo ohrabrvanje bogova da pokušaju isto to. Ustvari, kada god se koristi pojam “stvaranje” u smislu da znači nešta drugo no kretanje, odbacuju se i posmatranje i ljudski razlozi. To je jedan od poslednjih pseudopojmova iz naše savremenosti; nijedan stručnjak za kretanje to ne sme da zaboravi. Nije moguće postupno penjanje na Planinu Kretanja bez oslobadanja od pojma “stvaranje”. To nije lako. Mi ćemo se sresti sa ponovljenim pokušajem vraćanja “stvaranja” u proučavanju kvantne teorije. (**Vol. V, strana 242.**)

Svaki čin stvaranja je pre svega čin uništavanja

Pablo Pikaso (Pablo Picasso)

DA LI JE PRIRODA KONSTRUISANA?

U početku je stvoren svemir. To je mnoge ljude jako naljutilo i naširoko se smatralo lošim potezom.

Daglas Adams (Douglas Adams), *The Restaurant at the End of the Universe.*)

Široko je rasprostranjena sklonost da se namerno izvede stvaranje objekta od njegovog jednostavnog postojanja. Neki ljudi predaju takvu konstrukciju svaki put kada ugledaju lep predeo. Ovaj običaj potiče iz trostrukih predrasuda da lepa scena podrazumeva složen opis, što zauzvrat podrazumeva složena uputstva za građenje, pa prema tome ukazuje na osnovnu **konstrukciju**.

Ovaj lanac razmišljanja sadrži nekoliko grešaka, Pre svega, uopšteno, lepota nije posledica složenosti. Obično je obrnuto: zaista, proučavanje haosa i samoorganizovanja pokazuje kako lepi složeni oblici mogu da se proizvedu iz izuzetno jednostavne opise. (**Ref. 283.**) (**Vol. I, strana 297.**)

Istina, za većinu ljudskih tvorevina složeni opisi zaista podrazumevaju složene procese gradnje; personalni računari su dobar primer složenog objekta sa složenim procesom proizvodnje. Ali u prirodi ova veza nije primenjena. U predhodnom tekstu videli smo da je količina informacija potrebna za sačinjavanje ljudskog tela milione puta manja od informacija smeštenih samo u ljudski mozak. Slični rezultati nađeni su i arhitekturi biljaka i kod mnogo drugih primera oblika u prirodi. Jednostavni opisi nakon prividne složenosti prirode bili su i još uvek su nepotkrepljeni proučavanjima samoorganizacije, haosa, turbulencije i fraktalnih oblika. Složene strukture u prirodi izvedene su iz **jednostavnih** procesa. Čuvajte se od svakog ko kaže da priroda ima “beskonačnu” ili “veliku složenost”: pre svega, složenost nije merljiv subjekt, uprkos mnogo pokušaja da se ona vrednuje. Osim toga, svi poznati složeni sistemi mogu da budu opisani sa (relativno) malo parametara i malo jednostavnih jednakosti. Najzad, ništa u prirodi nije beskonačno.

Druga greška u dokazu za konstrukciju je povezivanje opisa sa “uputstvom”, a možda čak zamišljati da je neka nepoznata “inteligencija” nekako povlačila konce na svetskoj sceni. Proučavanje prirode dosleđeno pokazuje da ne postoje skrivena inteligencija i nikakva uputstva iza procesa u prirodi. Uputstvo je spisak naredbi za izvršioca. Ali u prirodi ne postoje naredbe i izvršioci. Ne postoje “zakoni” u prirodi, postoje jedino opisi procesa. Niko nije izgradio drvo; drvo je ishod kretanja molekula koji ga izgrađuju. Geni u drvetu sadrže informacije, ali nijednom molekulu nisu data nikava uputstva. Ono što nam izgleda da su uputstva, samo su prirodna kretanja molekula i energije, opisana istim uzorcima koji se događaju u neživim sistemima. Cela ideja o uputstvima – kao što su “zakoni” prirode – jeste ideologija, rođena iz analogije sa monarhijama ili čak sa tiranima, i tipičan antropomorfizam.

Treća greška u dokazu za konstrukciju je sugestija da složen opis za sistem podrazumeva osnovni plan. To nije ispravno. Složen opis podrazumeva samo da sistem ima iza sebe dug razvoj. Ispravno zaključivanje je: nešto velike složenosti postoji; prema tome ono je **raslo**, to jest, bilo je pretvarano putem ulaza (umerene) energije tokom vremena. Ovo izvođenje zaključka se odnosi na cveće, planine, zvezde, život, ljudе, časovnike, knjige, personalne računare i umetnička dela; ustvari, ono se odnosi na sve objekte u svemiru. Složenost našeg okruženja prema tome ukazuje na priličnu starost našeg okruženja i podseća nas na kratak sopstveni život.

Nepostojanje osnovne složenosti i nepostojanje uputstava u prirodi potvrđuje jednostavan rezultat: u prirodi ne postoji nijedno posmatranje koje podrazumeva ili zahteva konstrukciju ili stvaranje. S druge strane, raznolikost i jačina pojava u prirodi ispunjava nas dubokim strahopštovanjem. Divlja lepota

prirode pokazuje nam koliki smo zapravo mi **mali** deo deo prirode, kako u prostoru, tako i u vremenu.¹ Mi treba detaljno da ispitamo ovo doživljavanje. (**Vol. V, strana 241**). Treba da otkrijemo da je centralno u ostaku naše pustolovine ostati otvorenim za prirodne pojave u svim njihovim nadmoćnim jačinama.

*Postoji podeljenost između države i crkve, ali ne još
uvek između države i nauke.*

Pol Foyerabend (Paul Feyerabend)

ŠTA JE OPIS?

*U teoriji ne postoji razlika između teorije i prakse.
U praksi postoji.*

Sledeći standardnu upotrebu rečnika, opis opažanja je popis detalja. Primer grampusa naveden na **strani 234** jasno ovo pokazuje. Drugim rečima, opis opažanja čin je njegovog razvrstavanja, to jest, upoređivanja opažanja uz identifikaciju ili razlikovanje, u odnosu na sva ostala opažanja koja su već načinjena

- Opis je razvrstavanje.

Ukratko, **da se opiše znači sa se sagleda kao element velikog skupa.**

Opis može da se uporedi sa "Vi se nalazite ovde" označeno na turističkoj mapi grada. Iz niza mogućih položaja, oznaka "Vi se nalazite ovde" daje stvaran položaj. Slično tome, opis naglašava datu situaciju u odnosu na sve ostale druge mogućnosti. Na primer, obrazac $a = GM/r^2$ opis je opažanja relativnog kretanja usled gravitacije, pošto on razvrstava opaženo ubrzanje a u odnosu na rastojanje r od centralne mase M ; zaista takav opis sagledava svaki poseban slučaj kao primer opštег uzorka. Navika uopštavanja jedan je od razloga često uznemiravajuće odbojnosti naučnika: kada nešto posmatraju, njihovo stručno obrazovanje obično čini da ga razvrstaju kao posebni slučaj poznate pojave i tako ih sprečava da se iznenade ili da se iz njega izvuku.

Opis je zato suprotan od **metafore**; ovo poslednje je analogija koja se odnosi na opažanje sa drugaćijim **posebnim** slučajem; opis se odnosi na opažanje sa **opštim** slučajem, kao što je teorija fizike.

*Felix qui potuit rerum cognoscere causas, atque
metus omnis et inexorabile fatum subjecit pedibus
strepitumque acherontis avari.*

Vergilije (Vergilius)²

RAZLOG, SVRHA I OBJAŠNJENJE

*Der ganzen modernen Weltanschauung liegt die
Täuschung zugrunde, das die sogenannten
Naturgesetze die Erklärungen der Naturer-
scheinungen seien.³*

Ludwig Vitgenštajn (Ludwig Wittgenstein),
Tractatus, 6.371

Uporedite sledeće dve vrste pitanja i odgovora.

1. **Zašto** je lišće na većini drveća zeleno? **Zato** što apsorbuje crvenu i plavu svetlost. **Zašto** ono apsorbuje ove boje? **Zato** što sadrži hlorofil. **Zašto** je hlorofil zelen. **Zato** što sve vrste hlorofila sadrže magnezijum između četiri grupe pirola, a ova hemijska kombinacija daje zelenu boju kao rezultat njihovog energetskog nivoa kvantne mehanike. **Zašto** biljke sadrže hlorofil? **Zato** što je to ono čime kopnene biljke mogu da sintetizuju. **Zašto** samo to? **Zato** što su se sve kopnene biljke

¹ Traženje za „smisao“ u životu ili u prirodi je složen (i neophodan) način da se pokuša da se suočimo sa malenkošću ljudskog postojanja.

² "Srećan je onaj koji može da zna uzroke stvari i koji, oslobođen svih strahova, može pod noge da položi neumoljivu sudbinu i buku Aherona." *Georgica*, knjiga II, stihovi 490 ss. Publije Vergilije Maro (Publius Vergilius Maro, 70. Mantua – 19. pne Brindisi), veliki rimski pesnik, autor Eneide. Aheron je bila reka koju je prelazio onaj koji je upravo umro i bio na putu za pakao.

³ "Sav moderan pogled na svet zasniva se na zabludi da su takozvani zakoni prirode objašnjjenja prirodnih pojava"

izvorno razvile od zelenih algi, koje su jedine sposobne da sintetizuju ovo jedinjenje, a ne jedinjenje koji je nađeno u plavim i crvenim algama koje se takođe nalaze u moru.

2. **Zašto** se deca penju na drveće, a neki ljudi se penju na planine? **Zbog** osećaja kojeg doživljavaju tokom ovih aktivnosti: osećaja dostignuća, simboličkog čina odlaženja naviše, da bi se postigao širi pogled da je svet deo ove vrste pustolovine.

Dve vrste pitanja “zašto” pokazuju opštu razliku između razloga i svrhe (premda detalji ova dva pojma nisu kod svakog određeni na isti način). **Svrha** ili **namera** je razvrstavanje primenjeno na delovanja ljudi ili životinja; strogo govoreći, ono određuje potragu za osećanjima, naime za postizanje neke vrste zadovoljstva posle završetka delovanja. S druge strane **razlog** je poseban odnos činjenice sa ostatkom svemira, obično njegovom prošlosti. Ono što mi nazivamo razlog uvek se nalazi izvan samog posmatranja, dok je svrha uvek unutar njega.

Razlozi i svrhe dve su mogućnosti objašnjenja, to jest dva moguća odgovora na pitanje koje počinje sa “zašto”. Obično fizika nije zabrinuta za svrhu ili za ljudska osećanja, uglavnom pošto je njen početni cilj da govori precizno o kretanju, što izgleda da nije ostvarivo u ovoj oblasti. Prema tome, **fizička** objašnjenja činjenica nikada nisu svrhe, ali su uvek razlozi.

- **Fizičko objašnjenje** posmatranja uvek je opis njegovog odnosa sa ostatkom prirode. ([Ref. 284](#)).

Napominjemo da svrhe ili namere **nisu** stavljene na stranu pošto se one odnose na budućnost, već zato što su nedopustivi antropomorfizmi. Ustvari, za determinističke sisteme možemo jednako da kažemo da je budućnost zapravo **razlog** za sadašnjost i prošlost, činjenica koja se često zaboravlja.

Pitanja koja počinju sa “zašto” stoga su pristupačna za fizička istraživanja sve dok ona pitaju za razlog a ne za svrhu. Posebno, na pitanja, kao što su “zašto kamenje pada naniže a ne naviše?” ili “zašto elektroni imaju takvu vrednost mase, i zašto imaju masu uopšte?” ili “zašto prostor ima tri dimenzije a ne tridesetišest?” može da se odgovori, jer su to pitanja za veze između posebnih posmatranja i onih opštijih. Naravno, nije još uvek odgovoren na sve zahteve za objašnjenja i postoje još uvek problemi za rešavanje. Naša sadašnja staza uspona vodi samo od nekoliko odgovora do nekih temeljnijih pitanja o kretanju.

Najopštija potraga za objašnjenjem izvedena je iz pitanja: zašto je svemir onakav kakav je? Tema je obuhvaćena u našem usponu na planinu korišćenjem dva uobičajena pristupa, naime:

OBJEDINJAVANJE I RAZGRANIČENJE

*Tout sujet est un; et, quelque vaste qu'il soit, il peut être renfermé dans un seul discours.*¹

Bufon (Buffon), *Discours sur le style*.

U proučavanju osobina kretanja, neprestano pazeći na povećanje pouzdanosti opisa, nalazimo da su objašnjenja uglavnom dve vrste:²

1. “To je kao svi takvi slučaji; i ovaj je takođe opisan ...” Situacija se prepoznaje kao **poseban slučaj** opštег ponašanja.
2. “Ako bi situacija bila drugačija, imali bismo zaključak koji je u suprotnosti sa opažanjima.” Situacija se prepoznaje kao **jedini moguć slučaj**.³

Drugim rečima, prvi postupak za pronalaženje objašnjenja je da se formulišu obrasci, pravila ili “zakoni” koji opisuju sve veći i veći broj zapažanja i da se zapažanja uporede sa njima. Ovo nastojanje nazivaju **objedinjavanje** fizike – oni kojima se ovo dopada; oni kojima se to ne dopada nazivaju “redukcionizam”. Na primer, ista pravila opisuju let teniske lopte, kretanje plime na morskoj obali, vreme ledenih doba, i vreme u kojem planeta Venera prestaje da bude “zvezda Večernjača” i postaje “zvezda Danica”. Svi ovi

¹ Svaki predmet je jedan i koliko god da je opsežan. on može za se sadrži u jednom predavanju

² Da li su to jedine moguće? ([Izazov 322s](#)).

³ Ova dva slučaja ne smeju se mešati sa sličnim rečenicama koje **izgledaju** kao objašnjenja, ali to nisu:

- „To je kao slučaj...“ Sličnost sa drugim **pojedinačnim** slučajem **nije** objašnjenje.
- „Da je bilo drugačije, to bi bilo u suprotnosti sa idejom da...“ Suprotnost sa **idejom** ili sa teorijom **nije** objašnjenje.

procesi su posledica gravitacije. Slično tome, nije očigledno da ista pravila opisuju nastanak boje očiju, oblikovanje munje, varenje hrane i rad mozga. Ovi procesi su opisani kvantnom elektrodinamikom.

Objedinjavanje ima najupečatljiviji uspeh kada predviđa zapažanje koje ranije nije načinjeno. Čuveni primer je postojanje antimaterije, koju je predvideo Dirak kada je istraživao rešenja jednakosti koja opisuje precizno ponašanje opšte materije.

Drugi postupak u traženju objašnjenja je da se odstrane sve ostale zamislive alternative u korist stvarno tačne. Ovo nastojanje nema uobičajeno ime; mogli bi ga nazvati **razgraničenje** zakona fizike – oni kojima se dopada; ostali ga nazivaju “antropocentrizam”, ili jednostavno “drskost”.

Kada otkrijemo da svetlost putuje na takav način da utroši najkraće moguće vreme do njenog odredišta, kada opišemo kretanje pomoću načela najmanjeg rada, ili kada otkrijemo da se drveće grana na takav način da postigne najveći učinak uz najmanji napor, mi koristimo tačku gledišta razgraničenja.

Ukratko, objedinjavanje, kojim se odgovara na pitanja “zašto” i razgraničenje, kojim se odgovara na pitanje “a zašto ne”, tipični su za napredak kroz istoriju fizike. Možemo reći da dvojni vid objedinjavanja oblikuje sastavljanje i suprotne osobine fizike.

Međutim, ni razgraničenje ni objedinavanje ne mogu da objasne svemir u celosti. Možete li reći zašto? (**Izazov 323s**). U stvari, osim objedinjavanja i razgraničenja postoji i treća mogučnost koja spaja ova dva i omogućava da se kaže više o svemiru. Možete li je naći? (**Izazov 324s**). Naše hodanje će kasnije automatski da nas dovede do nje.

SVINJE, MAJMUNI I NAČELO ANTROPIJE

Das wichtigste Hilfsmittel des Wissenschaftlers ist der Papierkorb.¹

Više autora

Želja za postizanjem razgraničenja obrazaca prirode je najzanimljivija kada pratimo posledice različitih pravila prirode sve dok ne nađemo da su u suprotnosti sa najupečatljivijim zapažanjem: sopstvenim ljudskim postojanjem. U tom posebnom slučaju program razgraničenja često se naziva **antropijsko načelo** od grčkog ἄνθρωπος, što znači “čovek”.

Na primer, ako bi rastojanje Sunce-Zemlja bilo različito od onog koliko je, posledične temperaturne promene na Zemlji učinile bi nemogućom pojavu života, kojoj je potrebna voda u tečnom stanju. Slično tome, naš mozak nebi radio ako Mesec nebi kružio oko Zemlje. Isto tako dobro je poznato da ako bi bilo manje velikih planeta u sunčevom sistemu, razvoj čovečanstva bio bi nemoguć. Velike planete skreću veliki broj kometa, sprečavajući ih da udare u Zemlju. Spektakularni sudar komete Šumaker-Levi-9 sa Jupiterom, astronomski događaj u julu 1994. godine, bio je primer takvog preusmeravanja komete.²

Takođe i antropijsko načelo ima najupečatljiviji uspeh kada predviđa nepoznata zapažanja. Najčuveniji primjeri proizilaze iz proučavanja zvezda. Atomi ugljenika, kao i svi ostali atomi, izuzimajući atome vodonika, helijuma i litijuma, oblikovani su u zvezdama kroz fuziju. Kada je proučavao 1953. godine mehanizam fuzije, dobro poznati astrofizičar Fred Hojl³ (Fred Hoyle), našao je da jezgra ugljenika nisu mogla da budu oblikovana od alfa čestica koje se nalaze u zvezdama na razumnim temperaturama, osim ako nisu imala pobuđeno stanje sa povećanim presekom. Iz činjenice našeg postojanja, koje je zasnovano na ugljeniku, Hojl je prema tome predvideo postojanje predhodnog nepoznatog pobuđenog stanja jezgra

¹ Najvažnije pomoćno sredstvo naučnika je korpa za otpatke.

² Za snimak ovog događaja, pogledajte na primer, veb stranu www.youtube.com/watch?v=vxD-1RsL7gI ili druge slične veb strane koje se nalaze na youtube.

³ Fred Hojl (Fred Hoyle, 1915. Bingley – 2001. Bournemouth), poznat astronom i astrofizičar, bio je prvi, a možda i jedini fizičar koji je ikada napravio posebno predviđanje – naime postojanje pobuđenog stanja jezgra atoma ugljenika – iz proste činjenice da ljudi postoje. Kao stalni disident, on je skovao pojам “veliki prasak”, iako nije prihvatao njegovo postojanje i predložio je drugi model, “stabilno stanje”. Njegovo najvažnije i dobro poznato istraživanje bilo je o oblikovanju atoma unutar zvezda. On je takođe širio verovanje da su život na Zemlju doneli vanzemaljski mikrobi.

atoma ugljenika. ([Ref. 285](#)) I zaista, pobuđeno stanje pronašao je nekoliko meseci kasnije Vili Fauler (William “Willy” Alfred Fowler)¹

U svom ozbilnjom obliku, antropijsko načelo je prema tome traganje za izvođenje opisa prirode iz eksperimentalnih činjenica našeg sopstvenog postojanja. ([Ref. 286](#)). U popularnoj literaturi, međutim, antropijsko načelo se obično zamjenjuje jednostavnim eksperimentalnim postupkom da se zaključe obrasci prirode, sa njegovim *izopačenim* oblikom, loncem za topljenje absurdnih metafizičkih ideja u kojem svi pomešaju svoja omiljena ubeđenja. Veoma često eksperimentalno zapažanje o našem sopstvenom postojanju bilo je izopačeno da bi se ponovo uvela ideja o “konstrukciji”, to jest, da je svemir bio konstruisan sa ciljem da proizvede čovečanstvo; često je čak sugerisano da je antropijsko načelo objašnjenje – grub primer neinformisanosti.

Kako možemo da da napravimo razliku između ozbiljnog i izopačenog oblika? Počećemo zapaženjem. Dobili bismo tačno iste rezultate i obrasce prirode da smo kao polaznu tačku koristili postojanje svinja ili majmuna. Drugim rečima, ako bismo dospeli do *različitih* zaključaka korišćenjem *svinjskih načela* ili *majmunskih načela*, koristili bismo izopačeni oblik antropijskog načela, u suprotmom koristili smo ozbiljan oblik. (Priča o ugljeniku-12 je prema tome primer ozbiljnog oblika.) Ovaj test je delotvoran pošto ne postoji nijedan poznati obrazac “zakona” prirode koji je poseban za ljude, a beskorisan za majmune ili svinje.²

*Er wunderte sich, das den Katzen genau an den
Stellen Löcher in den Pelz geschnitten waren, wo sie
Augen hätten.³*

Georg Kristof Lihtenberg (Georg Christoph Lichtenberg)

DA LI SU U OBJAŠNJENJIMA POTREBNI UZROCI I EFEKTI?

Ne postoje u prirodi ni nagrade ni kazne – postoje samo posledice.

Robert Ingersol (Robert Ingersoll)

Svet ti ne duguje ništa. Bio je tamo pre tebe..

Mark Tven (Mark Twain)

Bez obzира na to koliko ste možda okrutni i gadni i zli, svaki put kada udahnete usrećujete cvet.

Morton Sal (Mort Sahl)⁴

Istorijski, dva pojma “uzrok” i “efekt” igrali su važne uloge u filozofskim raspravama. ([Ref. 287](#)). Posebno, tokom rađanja savremene mehanike, bilo je važno ukazati da svaki efekt ima uzrok, da bi se razlikovalo precizno mišljenje od mišljenja zasnovanog na ubeđenjima, kao što su “čuda”, “božanska iznenadenja” ili “evolucija ni iz čega”. Bilo je podudnako suštinski naglasiti da se efekti razlikuju od uzroka; ovim razlikovanjem izbegнута су pseudoobjašnjenja, kao što je čuveni primer kod Molijera u kojem doktor objašnjava svom pacijentu složenim pojmovima da tablete za spavanje deluju zato što sadrže svojstvo spavanja.

Ali u fizici, pojmovi uzroka i efekta uopšte se ne koriste. Ova čudesa se ne pojavljuju svaki put kada koristimo simetrije ili teoreme očuvanja. Zapažanje u kojem se uzrok i efekt razlikuju međusobno

¹ William A. Fowler (1911. Pittsbrugh – 1995. Pasadena) podelio je 1983. godine Nobelovu nagradu za fiziku sa Subramanijan Čandrakeškarom (Subramanyan Chandrasekhar) za njihova odnosna otkrića.

² Iako majmuni ne izgledaju kao dobri fizičari, kako je opisano u tekstu D. J. Povinelli, *Folk Physics for Apes: the Chimpanzee's Theory of How the World Works*, Oxford University Press, 2000.

³ „On je bio začuđen što mačke u svom krvnzu imaju izrezane rupe tačno na onim mestima gde su imale oči,“ Georg Kristof Lihtenberg (Georg Christoph Lichtenberg, 1742. Ober-Ramstadt – 1799. Göttingen) fisičar i intelektualac, profesor u Göttingenu, danas još uvek čuven po svojim brojnim i duhovitim aforizmima i satirama. Između ostalog u njedovom vremenu, Lihtenberg je zbijao šale sa svima koji su smatrali da je svemir načinjen tačno po meri čoveka, često sretanom idejom u zamagljenom svetu antropijskog načela.

⁴ Morton Sal (Morton Lyon Sahl) kanadsko-američki komičar.

svojstven je u svakoj jednakosti razvoja. Štaviše, pojmovi uzroka i efekta nisu jasno određeni; na primer, posebno je teško da se odredi šta se podrazumeva pod jednim uzrokom naspram više njih, a isto tako za jedan ili više efekata. Oba pojma je nemoguće vrednovati i izmeriti. Drugim rečima, korist od “uzroka” i “efekta” možda je potrebna u ličnom životu za razlikovanje događaja koji pravilno slede jedan drugog, nije potrebna u fizici. U fizičkim objašnjenjima oni nemaju posebnu ulogu.

Aγαθον καὶ χαρόν - ἐν καὶ ταῦτό.¹

Heraklit

Wenn ein Arzt hinter dem Sarg seines Patienten geht, so folgt manchmal tatsächlich die Ursache der Wirkung.²

Robert Koh (Robert Koch)

DA LI JE POTREBNA SVEST?

Variatio delectat.³

Ciceron

Mnogo osrednjih rasprava se događa oko svesti, ali mi čemo njih ovde da preskočimo. (**Ref. 288**). Šta je svest? Najjednostavnije i najkonkretnije, svest znači posedovanje malog dela sebe koji pazi na ono što spoznaje, misli i deluje ostatak. Ukratko, svest je sposobnost za samoposmatranje, a posebno unutrašnje mehanizme i motivacije

➤ *Svest* je sposobnost samoispitivanja.

Iz tog razloga svest nije preduslov za proučavanje kretanja. U stvari, životinje, biljke ili mašine takođe su sposobne da zapaze kretanje, zbog toga što imaju čula, to jest, uređaje za merenje. Iz istog razloga svest nije potrebna ni za opažanja kretanja u kvantnoj mehanici, iako merenja jesu. (**Vol. IV, strana 113**). S druge strane, istraživanje kretanja i istraživanje samog sebe imaju mnogo zajedničkog: potrebno je da posmatramo pažljivo, da prevladamo predrasude, da prevladamo i strah i nađemo zabavu u tome.

Uzgred, odrednica svesti objašnjava takođe zbog čega je toliko teško da se shvati precizno. Zapravo, posmatranje naše sopstvene svesti značilo bi da se posmatra deo u nama samima koji posmatra ostatak nas. To izgleda kao skoro nemoguć zadatak, nezavisno od toga da li je svest hardverski ili softverski vid našeg mozga. Ova nemogućnost je temelj tajne i očaranosti našom svesti.

Za sada smo stavili dovoljan naglasak na preciznost pojma. Govoriti o kretanju je ponekad nešto u čemu se duboko uživa. Da vidimo zbog čega.

Preciznost i jasnoća poštuju neodređeni odnos: njihov je proizvod konstantan.

Nils Bor (Niels Bohr)

RADOZNALOST

Preciznost je čedo radoznalosti

Kao i istorija svake osobe, isto tako istorija čovečanstva oslikava dugu borbu da izbegavanje zamki prihvatanja izjava vlasti kao istinitih, bez proveravanja činjenica. Zaista, uvek kada radoznalost vodi ka oblikovanju pitanja, postoje uvek dva opšta načina da se nastavi. Jedan je da se lično provere činjenice, a drugi je da se neko pita. Međutim, ovaj poslednji način je opasan: on znači odustati od jednog dela sebe. Zdravi ljudi, deca u kojima je radoznalost još uvek živa, kao i naučnici, odabiraju prvi način. Najzad, nauka je radoznalost odraslih.

Radoznalost, takođe nazvana *istraživački nagon*, igra čudne igre sa ljudima. Počev od prvobitnog iskustva sveta kao velike “supe” delova u interakciji, radoznalost može pokretati da se nadu *svi* delovi i *sve* interakcije. Bilo je zapaženo da kada pacovi pokažu radoznalo ponašanje, da izvesne celije u hipotalamusu postaju aktivne i luče hormone koji izazivaju pozitivne osećaje i emocije. Ako pacov ima mogućnost, da

¹ “Dobro i loše – jedno te isto.”

² “Kada lekar ide iza kovčega svog pacijenta prati ponekad zapravo uzrok učinka”

³ “Promene prijaju” Ciceron (Marcus Tullius Cicero, 106. Arpinum – 43. pne Formiae), značajan pravnik, govornik i političar pri kraju Rimske republike

putem nekih ugrađenih elektroda, pritiskom na taster pobudi iste ćelije, on to čini dobrovoljno: pacovi postaju **zavisni** od osećanja povezanih sa radoznalošću. ([Ref. 289](#)). Kao i pacovi, ljudi su radoznali zato što uživaju u tome. Oni to čine na najmanje četiri načina: zato što su umetnici, zato što vole zadovoljstvo, zato što su pustolovi i zato što su sanjari. Pogledajmo kako.

Prvobitno, radoznalost potiče iz želje za pozitivnom interakcijom sa okolinom. Mala deca daju dobre primere: radoznalost je prirodan sastojak njihovog života, na isti način kao kod drugih sisara i nekoliko vrsta ptica; uzgred, neke taksonomske rasodele nađene su u ponašanju igranja. Ukratko, sve životinje koje se igraju radoznale su i obrnuto. Radoznalost obezbeđuje temelje za učenje, za stvaralaštvo i stoga za svako delovanje ljudi koji ostavljaju zaveštanje, kao što su umetnost ili nauka. Vajar i teoretičar umetnosti Jozef Bojs (Joseph Beuys) imao je kao sopstvenog vodiča načelo da je **svaki** čin stvaralaštva umetnost. ([Ref. 290](#)). Ljudi, a posebno deca, uživaju u radoznalosti pošto ona osećaju njenu važnost za stvaralaštvo i da odrastanje uopšte.

Radoznalost redovno dovodi da se užvikne: "Oh!", doživljaj koji vodi do drugog razloga da se bude radoznao: osećaju uživanja u čudu i iznenađenju. Epikur (Epikurus) (341. Samos – 271. pne Athens) smatrao je da je ovaj doživljaj, θαυμάζειν (oni se čude), poreklo filozofije. Ovi osećaji, koji se u sadašnje vreme nazivaju religiozni, duhovni, nadahnjujući itd., isti su kao oni od kojih pacov postaje zavisan. Među ovim osećajima, Rudolf Oto (Rudolph Otto) uveo je sada već klasičnu razliku između očaravajućeg i zastrašujućeg. On je odgovarajuće doživljaje nazvao "*mysterium fascinans*" i "*mysterium tremendum*".¹ U okviru ovih razlika fizičari, naučnici, deca i poznavaoци zauzimaju jasan stav: oni biraju očaravajuće kao polaznu tačku za njihovo delovanje i svoj pristup svetu. Sličan osećaj očaranosti podstiče neku decu koja posmatraju noćno nebo da sanjare da će postati astronomi, neku koja gledaju kroz mikroskop da će postati biolozi ili fizičari itd. (Moglo bi biti takođe da genetika igra ulogu u ovom zadovoljstvu otkrivanja novina.) ([Ref. 291](#)).

Verovatno najlepši trenutak u proučavanju fizike je onaj koji se javlja posle novih opažanja koja su potresla naše ranije navike razmišljanja, prisile nas da se odrekнемo predhodno držanih predrasuda i izazvale osećaj izgubljenosti. Kada u tom trenutku krize konačno otkrijemo prikladnije i peciznije opise opažanja, koja obezbeđuju bolji uvid u svet, mi smo pogodeni osećajem koji se obično naziva prosvetljenje. Svako ko je doživeo osećanje i ukus ovih čarobnih trenutaka zna da ga u takvim situacijama obuzima osećaj zajedništva između njega i sveta.² Uživanje u takvim trenucima, pustolovine promene strukture razmišljanja povezane sa njima i radost uvida koji ih sledi, obezbeđuje poriv za mnoge naučnike. Malo priče i mnogo uživanja njihov je zajednički imenitelj. U tom duhu, važan fizičar Viktor Vajskopf (Victor Weisskopf, 1908. Vienna – 2002. Newton) voleo je u šali da kaže: "Postoje dve stvari koje čine život vredan življenja: Mozart i kvantna mehanika".

Izbor udaljavanja od strahopoštovanja prema fascinantnom proizilazi iz urođene želje, koja je najočiglednija kod dece, da se umanje nejasnosti i strah. Taj pokretač je otac svih pustolovina. On ima dobro poznatu paralelu u drevnoj Grčkoj, gde su prvi ljudi koji su proučavali zapažanja, kao što je Epikur, otvoreno izjavili da je njihov cilj da oslobode ljudi od nepotrebnog straha produbljivanjem znanja i pretvaranjem ljudi od zaplašenih neaktivnih žrtava u očarana, aktivna i odgovorna bića. Ovi drevni mislioci počeli su sa popularizacijom ideje da retki događaji takođe slede pravila, kao i opšti događaji u našem životu. Na primer, Epikur je istakao da je munja prirodna pojava izazvana interakcijom između oblaka i naglasio da je to prirodan proces, to jest proces koji prati pravila, na isti način kao pad kamena ili svaki poznat proces u svakodnevnom životu.

Istražujući pojave oko sebe, filozofi i kasniji naučnici uspeli su da oslobode ljudi od većine njihovih strahova uzrokovanih neizvesnošću i nedostatkom znanja o prirodi. Ovo oslobođanje odigralo je važnu ulogu u istoriji kulture čovečanstva i još uvek prožima ličnu istoriju mnogih naučnika. Cilj da se dospe do stabilnih, najdubljih istina nadahnuo je (ali takođe i omeo) mnoge od njih; Albert Ajnštajn je dorio poznat

¹ Ova razlika je osnova za knjigu Rudolf Otto. *Das Heilige – Über das Irrationale in der Idee des Göttlichen und sein Verhältnis zum Rationalen*, Beck 1991. To je novo izdanje orginala rada koji je stvorio epohu objavljenog početkom dvadeetog veka. Rudolf Oto (Rudolf Otto, 1869. Peine – 1937. Marburg) bio je jedan od najznačajnijih teologa u njegovo vreme.

² Više istraživača proučavalo je detaljnije situaciju koja dovodi do ovih čarobnih trenutaka, naročito lekar i fizičar Herman fon Helmholc (Hermann von Helmholtz, 1821, Potsdam – 1894. Charlottenburg) i matematičar Anri Poenkare (Henri Poincaré, 1854. Nancy – 1912. Paris). Oni razlikuju četiri stadijuma u pojmu ideje na osnovi takvih čarobnih trenutaka: zasićenje, inkubaciju, prosvetljenje i potvrđivanje. ([Ref. 292](#)).

primer toga, otkrivanjem teorije relativnosti, pomaganjem da se prihvati, ali zatim i negiranjem kvantne mehanike.

Zanimljivo je da se, radoznalost, a time i nauka, pojavljuju u iskustvu i razvoju svakog ljudskog bića pre magije i sujeverja. Da bi delovala magija potrebna joj je prevara, a za praznoverje je potrebna indoktrinacija; radoznalosti nije potrebno ni jedno ni drugo. Konflikti radoznalosti sa praznovjerjima, ideologijama, autoritetima ili ostatkom društva prema tome unapred su programirani.

Radoznalost je istraživanje granica. Za svaku granicu postoje dve mogućnosti: granica se može pokazati stvarnom ili prividnom. Ako je granica stvarna, najproduktivniji pristup je da se prihvati kao takva. Dostizanje granice tada daje snagu. Ako je granica samo prividna i zapravo ne postoji, najproduktivniji pristup je da se ponovo proceni pogrešno gledište, izvuče pozitivna uloga koju je izvršilo, a zatim da se granica pređe. Razlikovanje između stvarnih i prividnih granica jedino je moguće ako se granica ispitava velikom pažnjom, otvoreno i nemerno. Pre svega, za istraživanje granica potrebna je hrabrost.

Das gelüftete Geheimnis rächt sich.¹

Bert Helinger (Bert Hellinger)

HRABROST

Il est dangereux d' avoir raison dans des choses où des hommes accredités ont tort.²

Volter (Voltaire)

Manche suchen Sicherheit, wo Mut gefragt ist, und suchen Freiheit, wo das Richtige keine Wahl lässt.³

Bert Helinger (Bert Hellinger)

Većina materijala u ovom poglavljiju neophodna je u pustolovini da se dospe na vrh Polanine Kretanja. Ali nama je potrebno i više. ([Ref. 295](#)). Kao u svakoj preduzimljivosti, radoznalost takođe iziskuje hrabrost, a potpuna radoznalost, određena kao cilj u našem traganju, iziskuje potpunu hrabrost. Ustvari, lako je da se na tom putovanju hrabrost izgubi. Drugi su često odbacivali ovu potragu kao beskorisnu, nezanimljivu, detinjastu, zbumujuću, štetnu, ludu ili, iznad svega, zlu. Na primer, između Sokratove smrti 399. godine pne i Pola Tijerija, Baron d' Holbaha u devetnaestom veku, nije odštampana nijedna knjiga sa rečenicom "bogovi ne postoje", zbog pretnje smrtnom kaznom svakom ko se usudi da to kaže. Čak i danas ovakav stav je rasprostranjen, kao što to pokazuju novine.

Neprestanim eliminisanjem neizvesnosti, i radoznalost kao i naučna aktivnost prečutno se suprotstavljuju bilo kojoj ideji, osobi ili organizaciji koja pokušava da izbegne upoređivanje izjava sa opažanjima. Ovi "koji izbegavaju" zahtevaju da žive sa sujeverjem i ubedenjima. Međutim, sujeverje i ubedenja proizvode nepotreban strah. A strah je osnova svake nepravedne vladavine. Kreće se u začaranom krugu: izbegavanje upoređivanja sa opažanjima proizvodi strah – strah održava nepravedne vladavine – nepravedne vladavine izbegavaju upoređivanje sa opažanjima itd.

Kroz neprekidni nagon u pravcu sigurnih činjenica, radoznalost i nauka fundamentalno su bili suprostavljeni nepravednim vlastima, spoj koji je život činio teškim za ljude kao što je bio Anaksagora u drevnoj Grčkoj, Hipatija u hrišćanskom rimskom carstvu, Galileo Galilej u bivšoj crkvenoj državi, Antoan Lavoazije u revolucionarnoj Francuskoj i Albert Ajnštajn (i mnogi drugi) u nacističkoj Nemačkoj. U drugoj polovini dvadesetog veka žrtve su bili Robert Openhajmer, Melba Filips i Čendler Dejvis u SAD i Andrej Saharov u SSSR. Svaki od njih priča strašnu ali poučnu priču, kao i nedavno Fang Liži, Ksu Lian-ding, Liu Gang i Vang Jungtao u Kini, Kim Song-Man u Južnoj Koreji, Onazar Aripov u Uzbekistanu, Ramadan al-Hadi al Huš u Libiji, Bo Bo Htun u Burmi, Sami Kilani i Salman Salman u Palestini, Abdus Salam u Pakistanu kao i mnogo stotina drugih. U mnogim autorativnim društvima neprijateljstvo između radoznalosti i nepravde ometalo je, pa čak i potiskivalo u potpunosti razvoj fizike i drugih nauka, uz izuzetno negativne ekonomski, društvene i kulturne posledice.

¹ "Otkrivena tajna se sveti".

² "Opasno je biti u pravu u stvarima u kojima greše ljudi na položaju." ([Ref. 293](#))

³ "Neki traže sigurnost gde je potrebna hrabrost, a traže slobodu gde pravo ne ostavlja bilo kakav izbor" ([Ref. 294](#)).

Kad se upustimo u pustolovinu da shvatimo kretanje, potrebno je da budemo svesni šta radimo. Zapravo, spoljne prepreke mogu se izbeći ili bar uveliko smanjiti držanjem projekta za sebe. Druge teškoće koje preostaju, ovog puta su lične prirode. Mnogi su pokušali da se u pustolovinu upuste uz neku skrivenu ili određenu namjeru, obično ideološke prirode, a onda bi se zapetljali u njoj pre no što bi dospeli do kraja. Neki nisu bili pripremljeni da prihvate poniznost potrebnu za takav poduhvat. Drugi nisu bili spremni za potrebnu otvorenost koja može da uništi duboko usađena ubedjenja. Ostali nisu bili spremni da se okrenu prema nejasnom, mračnom i nepoznatom, suprostavljući im se u svakoj prilici.

S druge strane, opasnosti su vredne truda. Uzimajući radoznalost kao načelo, suočavajući se svom svojom hrabrošću sa dezinformacijom i strahom, postiže se sloboda od svih ubedjenja. Za uzvrat, dolazite do uživanja u punom zadovoljstvu i najdubljoj satisfakciji koje život može da ponudi.

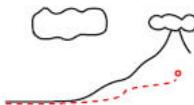
Stoga nastavljamo naš pohod. Putanja prema vrhu Planine Kretanja na ovom mestu vodi nas prema sledećoj pustolovini: otkriću porekla veličina, oblika i boja u prirodi.

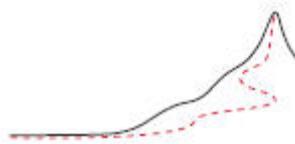
I bogovi su rekli ljudima: “Uzmite šta god želite, i platite cenu”

Popularna izreka

Teško je učiniti čovjeka bednim dok oseća da je dostojan samog sebe.

Abraham Linkoln (Abraham Lincoln)





Poglavlje 10

KLASIČNA FIZIKA U ORAHOVOJ LJUSCI

Klasična elektrodinamika, uz mehaniku, termodinamiku i teoriju relativnosti, upotpunila je naše hodanje kroz klasičnu fiziku. U strukturi fizike, klasična fizika obuhvata četiri od osam tačaka koje čine celokupnu fiziku, nauku o kretanju. Kao celina, klasična fizika opisuje kretanja tela iz svakodnevnog života (*strana 9*), kretanja toplote, kretanja izuzetno brzih tела, kretanja praznog prostora i kretanja svetlosti i električnih naboja. Zaokruženjem klasične fizike mi smo dovršili jednu polovinu naše avanture. Sumirajmo ono što smo o kretanju otkrili do sada – i šta nismo.

ŠTA MOŽE DA SE KREĆE?

U fizici mogu da se kreću četiri suštine: ***predmeti, zračenje, prostor-vreme i horizonti***. U svim slučajevima njihovo kreranje događa se na način tako da promene budu što manje. Promena se takođe naziva rad. Ukratko, sva kretanja umanjuju rad.

U svim slučajima kretanja razlikujemo stalne ili ***sopstvene osobine*** od promenljivog ***stanja***. Naučili smo i da obeležimo osobinama sva moguća sopstvena svojstva i sva moguća stanja za svaki od entiteta koji se kreću.

Za ***predmete*** smo ustanovili da u svakodnevnom životu sve dovoljno male predmete ili čestice u potpunosti opisuje njihova ***masa*** i njihov električni ***naboj***. Magnetni naboj ne postoji. Masa i električni naboj zato su samo lokalizovane unutrašnje osobine klasičnih, svakodnevnih predmeta. I masa i električni naboj određeni su preko ubrzanja kojeg proizvode oko sebe. Obe količine su očuvane, prema tome mogu se sabirati (uz izvesne preduslove). U suprotnosti od električnog naboja, masa je uvek pozitivna. Masa opisuje međusobno delovanje predmeta prilikom sudara i gravitaciji, a naboji su u interakciji sa elektromagnetskim poljem.

Svi ***promenljivi*** aspekti predmeta, to jest njihova ***stanja***, mogu da se opišu korišćenjem ***količine kretanja i položaja***, kao i takođe ***momentom količine kretanja i usmerenjem***. Ove četiri veličine mogu neprekinuto da se menjaju po iznosu i po smeru. Prema tome, skup svih mogućih stanja oblikuje prostor, takozvani ***fazni prostor***. Stanje proširenog predmeta, zavisnog od oblika, dato je stanjem svih njegovih čestica od kojih se sastoji. Od ovih čestica, njihovim međusobnim elektromagnetskim delovanjem, načinjeni su svi predmeti.

Lagranžijan određuje rad, odnosno ukupnu promenu, svake vrste kretanja. Rad, ili promena, nezavisna je od posmatrača, ali stanje nije. Stanja koja opažaju razni posmatrači povezana su: odnosi se nazivaju "zakoni" ili osobine kretanja. Za različita vremena oni se nazivaju ***jednakosti razvoja***, za različita mesta i usmerenja oni se nazivaju ***transformacije odnosa***, a za različita merila nazivaju se ***transformacije merila***. Kretanje svakog svakodnevnog predmeta u potpunosti je opisano načelom najmanjeg rada; kretanje umanjuje rad.

Zračenje se takođe kreće. Svakodnevne vrste zračenja, kao što su svetlost, radio talasi i njihovi srodnii oblici, elektromagneti su talasi. Oni su opisani istim jednakostima koje opisuju međusobna delovanja nanelektrisanih ili magnetnih predmeta. Brzina polja koje nema masu najveća je moguća brzina energije u prirodi i ona je ista za sve posmatrače. Kretanje zračenja opisuje kretanje slika. ***Unutrašnje osobine*** zračenja su njegovi odnosi rasipanja i njegov odnos energija – moment količine kretanja. ***Stanje*** zračenja opisano je jačinom njegovog elektromagnetskog polja, njegovom fazom, njegovom polarizacijom i povezanošću sa materijom. Kretanje elektromagnetskog polja i zračenja umanjuje rad i promene.

Prostor-vreme ima takođe sposobnost kretanja, promenom svoje zakrivljenosti. Stanje prostor-vremena dato je njegovom metrikom, kojom su opisana rastojanja i zakrivljenost, to jest, lokalna zakrivljenost. Zakrivljenost može da osciluje i da se širi, tako da prazan prostor može da se kreće slično talasu. Takođe i kretanje prostor-vremena umanjuje promene. Vredi načelo najmanjeg rada. Sopstvene osobine prostor-

vremena su broj dimenzija, njegovo metričko obeležje i njegova topologija. Eksperimenti pokazuju da je veliki raspon topologije prostor-vremena jednostavan.

Horizonti mogu da se posmatraju kao krajnji slučaji bilo prostor-vremena bilo materija-zračenje. Oni dele iste sopstvene osobine i stanja. Tamno noćno nebo, granica svemira, najvažniji je primer horizonta. Drugi primeri su granice crnih rupa. Svemir, kako uz prostor-vreme tako i sadržajem materije u njemu, pokazuje najveću starost i vrednosti rastojanja. Istorija svemira je duga, oko tri puta duža od istorije Zemlje. U velikim razmerama sva materija u svemiru udaljava se od sve druge materije: svemir i horizonti se šire.

OSOBINE KLASIČNOG KRETANJA

Oko nas zapažamo kretanje predmeta, zračenja, prostor-vremena i horizonta. U našim istraživanjima u klasičnoj fizici, izdvojili smo šest posebnih osobina za sva klasična – ili svakodnevna – kretanja.

1. Svakodnevno kretanje je **neprekidno**. Neprekidno kretanje omogučava određivanje prostora i vremena. Sve energije se kreću na način kojim njima zapoveda prostor-vreme, a prostor-vreme se kreće na način kojim mu zapoveda energija. Ovi odnosi opisuju kretanje zvezda, bačenog kamena, zraka svetlosti i plime. Mirovanje i slobodan pad ne razlikuju se, a gravitacija je zakrivljeno prostor-vreme. Masa prekida konformnu simetriju i stoga pravi razliku između prostora i vremena. Neprekidnost kretanja je ponekad ograničena. (Lokalna) brzina energije, mase i nanelektrisanja ograničena je na gornjoj strani univerzalnom konstantom c , a (lokalna) promena energije u vremenu ograničena je na gornjoj strani univerzalnom konstantom $c^5/4G$. Vrednost brzine c ostvaruje se pri kretanju čestica koje nemaju masu. To isto tako određuje odnos prostora i vremena. Vrednost sile $c^5/4G$ ostvarena je na horizontini. Horizonti se nalaze oko crnih rupa i na granici svemira. Vrednost najveće sile takođe povezuje zakrivljenost prostor-vremena sa protokom energije i stoga opisuje elastičnost prostor-vremena.

Neprekidnost kretanja ograničena je i na drugi način; dva predmeta ne mogu biti u istoj tački istovremeno. To je prvi iskaz u elektromagnetizmu sa kojim su se ljudi sreli. On nastaje usled odbijanja čestica istog znaka nanelektrisanja koje se nalaze u materiji. Detaljnija istraživanja pokazuju da električni naboji ubrzavaju druge naboje, ovi naboji su neophodni za određivanje intervala dužine i vremena i ti naboji izvor su elektromagnetskog polja. Takođe je i svetlost takvo polje. Svetlost putuje najvećom mogućom brzinom c . Nasuprot predmetima, svetlost i elektromagnetna polja mogu da zadiru međusono.

2. U svakodnevnom kretanjima **očuvani** su masa, električni naboј, energija, linearna količina kretanja i moment količine kretanja. Kod ovih veličina ništa ne može nastati ni iz čega. Očuvanje važi za sve vrste kretanja: za linearno kretanje, za obrtno kretanje, za kretanje materije, zračenja, prostor-vremena i horizonta. Energija i količina kretanja su slični za neprekidne supstance: one se ne mogu nikada uništiti, nikada stvoriti, ali su uvek preraspodeljene. Od očuvanja nisu izuzeti čak ni toplota, rast, pretvaranje, biološki razvoj ili trenje.
3. Svakodnevno kretanje je **relativno**: kretanje zavisi od posmatrača. Čak ni čvrst pod ispod naših stopala ne protivreči relativnosti.
4. Svakodnevno kretanje je **dvosmerno**: svakodnevno kretanje može da se dogodi unazad. Čak ni trenje, lom predmeta ili smrt nisu izuzeti od dvosmernosti.
5. Svakodnevno kretanje je **invarijantno u ogledalu**: svakodnevno kretanje može da se dogodi na način dvosmernog kretanja u ogledalu. Ukratko, ustanovili smo da klasično kretanje predmeta, zračenja i prostor-vremena ima simetriju levo-desno. Predmeti koje prave ljudi, kao što je pisanje, nisu izuzeci od invarijante u ogledalu.
6. Svakodnevna kretanja su **lenja**: kretanja se događaju na način koji umanjuje promene, to jest, rad. U Galilejevoj fizici i elektrodinamici rad je vremenski prosek razlike između kinetičke i potencijalne energije. U opštoj teoriji relativnosti rad uzima u obzir zakrivljenost i elastičnost prostor-vremena. Načelo najmanjeg rada – ili kosmičke lenjosti – postoji u svim slučajima.

Ukratko, naša istraživanja klasične fizike pokazuju nam:

- Kretanje je **lenjo**: ono je **predvidivo i ograničeno**

Drugim rečima, priroda prati **obrasce i pravila**. Kretanje je određeno. U prirodi **ne postoje** iznenađenja. Priroda **ne može** da čini ono što želi da čini.

Kasnije ćemo otkriti da neke retke primere kretanja, koja nisu iz svakodnevnog života, narušavaju dvosmernost i invarijantnost u ogledalu na vešt način. Vešto narušavanje nestaje ukoliko se pojmovi pravilno prošire u svom značenju. Isto tako se i očuvanje mase narušava posebno, ali postaje deo očuvanja energije u relativnosti. Ukratko, opšti iskazi o kretanju, uz odgovarajuće ispravke, ostaju važeće širom cele prirode.

Pre svega, videli smo da **kretanje umanjuje rad**. Ovaj temeljni rezultat ostaje takođe da važi tokom cele naše pustolovine. Drugim rečima, svemir nema slobodu da određuje šta se u njemu događa.

Posle završetka klasičnog dela naše avanture, mogli biste da pomislite da dobro poznajete klasičnu fiziku. (**Izazov 325e**). Ako ste to pomislili, pročitajte izvanrednu zbirku Fridriha Hermana (Friedrich Herrmann) *Historical Burdens on Physics* koja je dostupna za besplatno učitavanje na veb strani Univerziteta Karlsruhe: www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/index_en.html. Ako su teme predstavljene ovde jednostavne za razumevanje – i vama jasne – čak i ako se ne slažete – postali ste stvaran stručnjak u oblasti klasične fizike.

BUDUĆNOST PLANETE ZEMLJE

Možda priroda ne ispoljava iznenađenja, međutim ona ipak pruža mnogo pustolovina. Na dan 2. marta 2009. godine, mali asteroid skoro da je udario u Zemlju. Prošao je na udaljenosti od samo 63.500 km od naše planete. U sudaru on bi uništio područje veličine Londona. Ovakvi događaji dešavaju se redovno.¹ Nekoliko drugih avantura može se predvideti klasičnom fizikom; oni su nabrojani u **Tabeli 25**. Nekoliko pitanja su problemi sa kojima će se suočavati čovečanstvo u dalekoj budućnosti, ali neki, kao što su erupcije vulkana ili sudari sa asteroidima, mogu da se dogode u bilo koje vreme. Sve su to teme istraživanja. (**Ref. 296**).

TABELA 25 Primeri razarajućih kretanja od moguće važnosti u budućnosti

Kritična situacija	Godine od sada
Veliki cunamu usled erupcije vulkana na Kanarskim ostrvima	oko 10 – 200
Kraj osnovne fizike uz konačni dokaz da je priroda jednostavnija	oko 20 (oko 2030. god.)
Veliki nuklearni materijalni incident ili upotreba oružja	nepoznato
Eksplozija vulkana na Grenlandu, u Italiji ili bilo gde, što dovodi do dugog zamračenja	nepoznato
Eksplozija Jeloustona ili drugog gigantskog vulkana, što dovodi do višegodišnjih zima	0 do 100 000
Nestabilnost omotača Zemlje, što dovodi do velikih aktivnosti vulkana	nepoznato
Mini ledeno doba usled prekida Golfske struje	nepoznato
Smanjenje ozonskog omotača	oko 100
Podizanje nivoa okeana usled zagrevanja efektom staklene baštice	> 100
Kraj primenjene fizike	> 200
Pojava više magnetnih severnih i južnih polova što bi omogućilo da sunčev vetar ometa radio i komunikacije, da prekine snabdevanje električnom energijom, da poveća mutaciju životinja i da dezorientiše migracije životinja kao što su kitovi, ptice i kornjače	oko 800
Naš međuzvezdani oblak gasa se odvojio od sunčevog sistema, promenivši veličinu heliosfere i time nas izlodio jačoj aurori i sunčevom magnetnom polju.	oko 3000
Promena mesta magnetnih polova, što podrazumeva neko vreme bez ikakvog magnetnog polja, što bi povećalo nivo kosmičkog zračenja i stoga više raka kože i pobačaja.	nepoznato
Nestanak kiseonika u atmosferi zbog smanjenja površina pod šumama i povećanja potrošnje goriva	> 1000
Sledeće ledeno doba	oko 15 000
Moguć sudar sa oblakom međuzvezdanog gasa, pod predpostavkom da ga Zemlja preseca svakih 60 miliona godina, verovatno bi izazvao masovno uništenje	oko 50 000
Moguća genetska degeneracija homo sapiensa usled smanjenja Y hromozoma	oko 200 000
Afrika se sudarila sa Evropom i pretvorila Sredozemno more u jezero koje će početi da isparava	oko $3 \cdot 10^6$
Nalet gama-zraka odnekud iz naše galaksije, što prouzrokuje radioaktivna oštećenja kod mnogih živih bića	između 0 i $5 \cdot 10^6$

¹ Veb strane oko www.minorplanetcenter.net/iau/lists/Closest.html daju više informacija o takvim biskin susretima

Asteroid pogađa Zemlju, izaziva cunamije, oluje, pomračenje Sunca	između 0 i $50 \cdot 10^6$
Približavanje najbliže zvezde, početak pljuska kometa usled destabilizacije Ortovog oblaka i stoga rizik za život na Zemlji	$> 10^6$
Američki kontinent se sudario sa Azijom	$> 100 \cdot 10^6$
Molekularni oblak je progutao sunčev sistem	nepoznato
Nestabilnost sunčevog sistema	$> 100 \cdot 10^6$
Nizak sadržaj CO ₂ u atmosferi zaustavlja fotosintezu	$> 100 \cdot 10^6$
Sudar Mlečnog puta sa zvezdanim jatom ili drugom galaksijom	$> 150 \cdot 10^6$
Sunce stari, postaje toplije, isparavanje mora	$> 250 \cdot 10^6$
Porast nivoa okeana usled usporavanja ili zaustavljanja obrtanja Zemlje (ako nisu isparili već pre toga)	$> 10^9$
Porast ili smanjenje temperature (u zavisnosti od mesta) usled zaustavljanja obrtanja Zemlje	$> 10^9$
Sunce ostalo bez goriva, postalo crveni džin, progutalo Zemlju	$5 \cdot 10^9$
Sunce prestalo da sagoreva, postalo beli patuljak	$5,2 \cdot 10^9$
Jezgro Zemlje očvrslo, nema magnetnog polja, a time ni štita Zemlje od zračenja	$10,0 \cdot 10^9$
Najbliža nova (na primer Betelgez) okupala Zemlju uništavajućom radijacijom	nepoznato
Najbliža supernova (na primer Carinae - Kobilica) eksplodirala preko sunčevog sistema	nepoznato
Centar galaksije destabilizovao ostatak galaksije	nepoznato
Sažimanje svemira – ako ga bude ikad (videti Vol. II, strana 109).	$> 20 \cdot 10^9$
Materija se raspala u zračenje – ako bude ikad (videti Vol. V, Dodatak B).	$> 10^{33}$
Problemi sa golum singularitetima	samo u naučnoj fantastici
Vakuum postao nestabilan	samo u naučnoj fantastici

Uprkos fascinantnim predviđanjima (sva su načinjena oko 2000. godine), ostavićemo na stranu ova doslovno ogromna pitanja i nastavićemo našu pustolovinu.

*Ja sam star čovek i znao sam za mnoge teškoće.
Većina njih se nisu nikad dogodile.*

Anonimna mudrost

SUŠTINA KLASIČNE FIZIKE – BESKRAJNO MALO I ODSUSTVO IZNENAĐENJA

U prva tri dela našeg hodanja, u klasičnoj fizici, našli smo da kretanje umanjuje promene. Svako kretanje oko nas potvrđuje da je priroda lenja. Lenost kao klasičan opis prirode je osnova i sadrži važan iskaz.

- Klasična fizika je opis kretanja uz korišćenje pojma **beskonačno** malog.

Svi pojmovi koji su do sada korišćeni, bilo oni za kretanje, prostor, vreme ili posmatranje, predpostavljali su da postoji beskrajno malo. Specijalna teorija relativnosti, uprkos granice brzine, još uvek dopušta beskrajno male brzine; opšta teorija relativnosti, uprkos granice crnih rupa, još uvek dopušta beskrajno male vrednosti sile i snage. Slično tome, u opisu elektrodinamike i gravitacije kako integrali tako i izvodi skraćeni su matematički procesi koji koriste i predpostavljaju beskrajno mala rastojanja i vremenske intervale. Drugim rečima, klasični opis prirode uvodi i zasniva se na beskrajno malom u opisu kretanja.

Korišćenjem beskrajno malog kao atatke za istraživanje, klasičan opis kretanja otkriva da su **očuvane** energija, količina kretanja, moment količine kretanja i električni naboj. Oni su očuvani takođe i za beskrajno male dimenzije ili vremenske intervale. Detaljnijim istraživanjem očuvanosti u beskrajno malim razmerama doveo nas je do čvrstog zaključka:

- Kretanje nema iznenađenja. Kretanje je određeno, predvidivo i ograničeno.

Eksperimentima su potvrđene sve tri osobine. Eksperimenti stoga podrazumevaju

- Priroda ne predviđa čuda.

U ovom iskazu “čudo” je termin koji je iskorišćen za proces koji je protiv pravila prirode. Neki ljudi tvrde da je beskrajnost neophodan sastojak potreban da se izvedu čuda. Klasična fizika pokazuje suprotno: postojanje beskrajno malog onemogućava čuda. Lenjost, očuvanje i odsustvo iznenađena podrazumevaju takođe da kretanje i priroda nisu opisani pojmovima kao što je “kažnjavanje”, nagrađivanje” ili “poštenje”. To je takođe slučaj s katastrofama, srećom ili sretnim dogadjajima. Lenjost, očuvanje i odsustvo iznenađenja podrazumevaju takođe da kretanje i priroda **nisu konstruisani** i da **nemaju cilj**. Razni ljudi tvrde suprotno; oni greše.

Klasična fizika podrazumeva izostanak iznenađenja. S obzirom da je taj rezultat možda uverljiv, to nas ostavlja sa sumnjom. Kako specijalna tako i opšta teorija relativnosti odbacile su postojanje beskrajno velikog. Na postoje beskrajno velike sila, snaga, veličina, starost i brzina. Zbog čega treba da postoji beskrajno malo, ali ne i beskrajno veliko? I ako bi se beskrajno malo takođe odbacilo, mogu li čuda da se dogode opet? U stvari, postoji još uvek mnogo otvorenih pitanja o kretanju.

ZAKLJUČAK: ZAŠTO JOŠ UVEK NISMO DOŠLI DO VRHA PLANINE?

Najvažniji osnovni zakoni i činjenice fizičke nauke su otkriveni, i sada su toliko čvrsto postavljeni da je mogućnost njihovog izmeštanja kao posledica novih otkrića izuzetno daleko ... Naša buduća otkrića moraju se tražiti do šestog decimalnog mesta.

Albert Majkelson (Albert Michelson)¹, 1894.

Sada mislimo da poznajemo prirrodu, kao što je mislio Albert Majkelson (Albert Michelson) na kraju devetnaestog veka. On je tvrdio da elektrodinamika i Galilejeva fizika podrazumevaju da su glavni zakoni fizike bili dobro poznati. Ovaj iskaz se često navodi kao primer manjkavog predviđanja, pošto on odražava neverovatno mentalno zatvaranje od sveta oko njega. Poreklo svake veličine, oblika i boje – od atoma do ljudi i naviše do svemira – bili su nepoznati kada Majklson, koji je kasnije čak dobio i Nobelovu nagradu za fiziku, održao svoj govor. U stvari opšta teorija relativnosti još uvek je nepoznata; ne samo da je bila nepoznata, već pre svega, **kvantna teorija** treba tek da bude otkrivena.

Mnogi fizičari u doba Majklesona znali su da su potrebne bitne izmene u opisu prirode. Majkelson je prevideo tri suprotnosti između elektrodinamike i prirode, za koje nema opravdanja. Pre svega, mi smo u predhodnom tekstu našli da su časovnici i trake za merenje nužno izrađeni od materije i neophodno se zasnivaju na elektromagnetizmu. (**Strana 180**). Međutim kao što smo videli, klasična elektrodinamika ne objašnjava stabilnost i osobine materije i atoma. Materija je sastavljena od malih čestica, ali odnosi između ovih čestica, elektricitet i manje promene nisu jasne.

➤ Mi ne razumemo materiju.

Ako ne razumemo materiju, onda ne možemo još uvek da razumemo prostor i vreme, pošto prostor i vreme mi određujemo korišenjem mernih uredaja načinjenih od materije.

Drugo, Makjleson je znao da klasična elektrodinamika ne opisuje poreklo ni jedne boje koja se opaža u prirodi.

➤ Mi ne razumemo boje.

Klasična elektrodinamika može samo da objasni razliku u bojama i promenu boja, međutim, ona ne može da opiše apsolutne vrednosti boja.

Još gore, Majkelson je prevideo treću stranu: klasičan opis prirode ima i treće ograničenje:

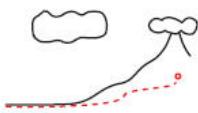
➤ Mi ne razumemo život.

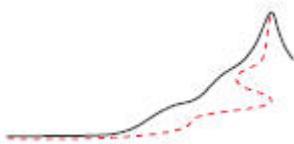
Sposobnosti živih bića – rast, vid, sluh, osećanja, razmišljanje, biti zdrav ili bolesan, razmnožavanje i smrt – sve je to neobjašnjeno u klasičnoj fizici. Zapravo, sve ove osobine u **suprotnosti** su sa klasičnom fizikom.

¹ Iz njegovog govora na svečanosti posvećenoj Ryerson Physical Laboratory na Univerzitetu Čikago. Albert Majkelson (Albert Michelson, 1852. Strelno – 1931. Pasadena) bio je značajan i uticajan fizičar; dobio je Nobelovu nagradu za fiziku 1937. godine

Na kraju devetnaestog veka napredak tehnologije usled korišćenja elektriciteta, hemije, i tehnologije vakuma, omogučio je da se izrađuju sve bolje i bolje mašine. Sve one su napravljene imajući na umu klasičnu fiziku. U godinama između 1890. i 1920. ove klasične mašine u potpunosti su razorile temelje klasične fizike. Eksperimenti izvedeni pomoću ovih aparata pokazali su da se materija sastoji od atoma konačne i nepromenljive veličine, da električni naboj dolazi u malim količinama, da postoje najmanje vrednosti entropije, vrednosti najmanjeg momenta količine kretanja i vrednosti najmanjeg rada u prirodi, a da se čestice i svetlost ponašaju nasumično. Ukratko, precizni eksperimenti su pokazali da je postojanje bekrajno malog u prirodi pogrešno u većini slučaja: mnogo zapažanja dolazi kao *kvant*. Kao i svaka stara imperija, srušila se i klasična fizika. Klasična fizika ne opisuje ispravno prirodu u malim razmerama.

Ukratko, razumevanje svetlosti, materije i njihovih međusobnih delovanja, uključujući i sam život, cilj je narednih delova našeg uspona na Planinu Kretanja. A da bismo razumeli život, potrebno je da razumemo veličinu, oblik, boju i osobine materijala svih stvari – uključujući i atome. Razumevanje će se događati u malim razmerama. Još posebnije, da bismo razumeli materiju, boju i život, potrebno je da proučimo čestice. Još mnogo toga je preostalo za istraživanje. A ova istraživanja će nas voditi od jednog do drugog čuda.





DODATAK A

JEDINICE, MERENJA I KONSTANTE

Merenje je upoređivanje sa standardom. Standardi se zasnivaju na *jedinicama*. Širom sveta su se koristili različiti sistemi mernih jedinica. Većina ovih standarda davana je moć organizaciji koja je za njih bila nadležna. Kako ova moć može da bude zloupotrebljena, kao što je slučaj danas, vidi se u primeru industrije tačunara, a isto tako je postojala i u minulim vremenima. Rešenje je isto za oba slučaja: organizovati nezavisni globalni standard. Za merne jedinice to se dogodilo u 18. veku: kako bi se izbegla zloupotreba autoritarnih institucija, da bi se isključili problemi u razlikama, promene i neponovljivi standardi, kao i – ovo nije šala – uprostilo prikupljanje poreza i da bi ih načinili još pravednijim, grupa naučnika, političara i ekonomista saglasila se sa skupom mernih jedinica. On je nazvan *Systeme International d'Unites*, ili skraćeno *SI*, a bio je određen međunarodnom ugovorom, “*Convention du Metre*”. Jedinice su čuvane u međunarodnoj organizaciji “*Conference Generale des Poids et Mesures*” i u njenim čerka-organizacijama “*Commission Inter-nationale des Poids et Mesure*” i “*Bureau International des Poids et Mesures*” (BIPM). Sve ovo je poteklo iz vremena neposredno pre Francuske revolucije. ([Ref. 297](#))

SI MERNE JEDINICE

Sve SI merne jedinice izvedene su iz sedam osnovnih mernih jedinica, čije su zvanične odrednice, prevedene sa francuskog na engleski (ovde i na srpski) navedene niže, zajedno sa datumom njihovih formulacija:

- **sekunda** je trajanje od 9 192 631 770 periode radijacije koja odgovara prelasku između dva hiperfina nivoa osnovnog stanja atoma cezijuma 133 (1967).¹
- **metar** je dužina predenog puta svetlost u vakuumu tokom vremenskog intervala od 1/299 792 458 dela sekunde (1983)¹
- **kilogram** je jedinica mase koja je jednaka masi međunarodnog prototipa kilograma (1901)¹
- **ampere** je ona konstantna struja koja u dva paralelna prava provodnika beskonačne dužine, postavljenih u vakuumu na rastojanju od 1 m, proizvede između ta dva provodnika silu jedнакu $2 \cdot 10^{-7}$ njutna po metru dužine, (1948)¹
- **kelvin**, jedinica za termodinamičku temperaturu, je razlomak 1/273,16 termodinamičke temperature trojne tačke vode (1967)¹
- **mol** je količina supstance sistema koji sadrži isto onoliko elementarnih subjekata koliko postoji atoma u 0,012 kilograma ugljenika 12 (1971)¹
- **kandela** je jačina osvetljenja u određenom pravcu iz izvora koji emituje monohromatsko zračenje učestanosti $540 \cdot 10^{12}$ herza i ima intenzitet zračenja u tom smeru od 1/683 vati po sterradijanu (1979)¹

Primetili smo da su merne jedinice i za vreme i za dužinu određene preko izvesnih osobina standardnog primera za kretanje, naime svetlosti. Drugim rečima, i “*Conference Generale des Poids et Mesures*” naglasila je da je posmatranje kretanja preduslov za određivanje i konstrukciju vremena i prostora.

¹ Simboli ovih jedinica su, respektivno: **s**, **m**, **kg**, **A**, **K**, **mol** i **cd**. Međunarodni prototip kilograma je valjak od legure platina-iridijum, koji se čuva u BIPM u Sevru, u Francuskoj. ([Vol. I, strana 82](#)). Za više detalja o nivoima atoma cezijuma, pogledati u knjigu o atomske fizici. ([Ref. 298](#)). Celzijusova skala temperature θ , određena je na ovakav način: θ (°C) = T (K) – 273,15; treba zapaziti malu razliku od broja koji se pojavljuje u odrednici kelvina. SI takođe navodi: “Kada se koristi mol, elementarni subjekti moraju biti specificirani, a mogu biti atomi, molekuli, joni, elektroni, druge čestice ili određene grupe takvih čestica.” U odrednici mola razumljivo je da atomi ugljenika 12 nisu vezani u mirovanju i u njegovom osnovnom stanju. U odrednici za kandelu, učestanost svetlosti odgovara 555,5 nm, to jest zelenoj svetlosti, oko talasne dužine na koju je ljudsko oko najosetljivije.

Kretanje je osnova svakog posmatranja i svih merenja. Uzgred, upotrebu svetlosti u odrednicama zagovarao je još 1827. godine Žak Babine (Jacques Babinet).¹

Iz ovih osnovnih jedinica, izvedene su sve ostale merne jedinice množenjem ili deljenjem. Prema tome sve SI merne jedinice imaju sledeće osobine:

- SI merne jedinice obrazuju sistem koji ima **najsavremeniju preciznost**: sve merne jedinice su određene uz preciznost koja je veća od preciznosti u uobičajenim merenjima. Štaviše, preciznost odrednica se redovno popravlja, Trenutna relativna nesigurnost za odrednicu sekunde je oko 10^{-14} , za metar oko 10^{-10} , za kilogram oko 10^{-9} , za amper 10^{-7} , za mol je manja od 10^{-6} , za kelvin 10^{-6} i za kandelu 10^{-3} .
- SI merne jedinice obrazuju **apsolutni** sistem: sve jedinice su određene na takav način da se mogu reproducirati u svakoj prigodno opremljenoj laboratoriji, nezavisno i uz veliku preciznost. Time je što je moguće više izbegnuta zloupotreba od strane organizacija koje postavljaju standarde. (Samo je još kilogram određen uz pomoć tvorevine, pa predstavlja izuzetak od ovih zahteva; vrše se intenzivna istraživanja da se nađe način da se ova tvorevina izbací iz odrednica – to je međunarodna trka koja traje već više godina. Postoje dva pristupa: brojanje čestica ili utvrđivanje \hbar . Prvo se može postići u kristalima, to jest u kristalu načinjenom od čistog silicijuma, a drugo preko upotrebe obrasca u kojem se pojavljuje \hbar , kao što je obrazac za de Brolijevu (de Broglie) talasnu dužinu ili ona za Josefsonov (Josephson) efekt.)
- SI merne jedinice obrazuju **praktičan** sistem: osnovne jedinice imaju veličine iz svakodnevnih očekivanja. Često upotrebljavane merne jedinice imaju imena i skraćenice. Kompletan popis obuhvata sedam upravo pomenutih jedinica, **dopunske** merne jedinice, **izvedene** merne jedinice i **dopuštene** jedinice za upotrebu.

Dopunske SI merne jedinice su dve: jedinica za ugao u ravni, određena je kao odnos dužine luka kružnice i poluprečnika, jedinica je **radijan** (rad). Za prostorni ugao, određena je kao površina koja se vidi i kvadrata poluprečnika, jedinica je **steradijan** (sr).

Izvedene merne jedinice sa posebnim nazivima napisane u zvaničnom engleskom pisanju², to jest bez velikih slova i akcenata su:

Naziv	Skraćenica
herc	Hz = 1/s
paskal	Pa = N/m ² = kg/m s ²
vat	W = kg m ² /s ³
volt	V = kg m ² /A s ³
om	Ω = V/A = kg m ² A ² s ²
veber	Wb = V s = kg m ² /A s ²
henri	H = V s/A = kg m ² /A ² s ²
lumen	lm = cd sr
bekerel	Bq = 1/s
sivert	Sv = 1/kg = m ² /s ²

Naziv	Skraćenica
njutn	N = kg m/s ²
džul	J = N m = kg m ² /s ²
kulon	C = A s
farad	F = A s/V = A ² s ⁴ /kg m ²
simens	S = 1/ Ω
tesla	T = Wb/m ² = kg/A s ² = kg/C s
stepen Cel.	°C (videti odrednicu za kelvin)
luks	lx = lm/m ² = cd sr/m ²
grej	Gy = J/kg = m ² /s ²
katal	kat = mol/s

Zapazili smo da se u svim odrednicama mernih jedinica pojavljuje kilogram samo sa stepenom 1, 0 i -1. Da li možete da odredite razlog? (**Izazov 326s**).

Jedinice **dozvoljene** za upotrebu izvan SI sistema su: **minut, čas, dan** (za vreme), stepen $I^\circ = \pi/180$ rad, minut $1' = 1/60 = \pi/10800$ rad, sekunda $1'' = 1'/60 = 1/360 = \pi/648000$ rad (za uglove), **litar i tona**. Sve ostale jedinice treba izbegavati

Još praktičnjim sve SI merne jedinice čini uvođenje standardnih imena i skraćenica za stepene 10, takozvani **prefksi**.³

¹ Žak Babine (Jacques Babinet, 1794–1874), bio je francuski fizičar koji je objavio poznata dela radova u optici.

² U skladu sa ostatkom teksta prevoda, nazivi će biti u obliku koji se koristi u srpskom jeziku.

³ Neki od ovih naziva su izmišljeni (yocto zvuči kao latinski *octo* – osam, zepto zvuči kap latinsko *septem*, yotta i zetta liče na njih, exa i peta zvuče kao grčke reči *έξακι* – šest puta i *πεντάκις* – pet puta, a nezvanične zvuče ka grčke reči devet, deset jedanaest i dvanaest); neke su dansko/norveške (atto od *atten* – jedanaest, femto od *femten* – petnaest); neke su iz latinskog (od *mille* – hiljadu, od *centum* – sto, od *decem* – deset, od *nanus* – patuljak);

Stepen	Naziv
10^1	deka da
10^2	hekto h
10^3	kilo k
10^6	Mega M
10^9	Giga G
10^{12}	Tera T
10^{15}	Peta P

Stepen	Naziv
10^{18}	Exa E
10^{21}	Zetta Z
10^{24}	Yotta Y
nezvanično (<i>Ref. 299</i>)	
10^{27}	Xenta X
10^{30}	Wekta W
10^{33}	Vendekta V
10^{36}	Undekta U

Stepen	Naziv
10^{-1}	deci d
10^{-2}	centi c
10^{-3}	mili m
10^{-6}	mikro μ
10^{-9}	nano n
10^{-12}	piko p
10^{-15}	femto f

Stepen	Naziv
10^{-18}	atto a
10^{-21}	zepto z
10^{-24}	yocto y
nezvanično (<i>Ref. 299</i>)	
10^{-27}	xenno x
10^{-30}	weko w
10^{-33}	vendeko v
10^{-36}	udeko u

- SI merne jedinice obrazuju **kompletan** sistem: one na sistematski način pokrivaju ceo skup opažanja u fizici. Štaviše, one određuju jedinice za merenja takođe i za ostale oblasti u nauci.
- Si merne jedinice obrazuju **univerzalni** sistem: one se mogu koristiti u trgovini, u industriji u saobraćaju, u kući, u nauci i u istraživanjima. Mogi čak i da se koriste i u vanzemaljskim civilizacijama, ukoliko postoje.
- SI merne jedinice obrazuju **samodosledan** sistem: proizvod ili količnik dve SI jedinice daju takođe SI jedinicu. To u principu znači da se ista skraćenica, to jest "SI" može koristiti za svaku jedinicu

SI merne jedinice nisu jedini mogući skup koji može da ispunjava sve ove zahteve, ali su one jedini sistem koji to čini.¹ U bliskoj budućnosti BIPM planira da ponovo odredi SI jedinice koristeći "kocku fizike", prikazane na *slici 1. (strana 9)*. To će biti ostvareno fiksiranjem, pored vrednosti za c i K_{cd} , takođe i vrednosti za: \hbar , e , k i N_A . Predložene vrednosti iznose $\hbar = 6,62606957 \cdot 10^{-34}$ Js, $e = 1,602176565 \cdot 10^{-19}$ C, $k = 1,3806488 \cdot 10^{-23}$ J/K i $N_A = 6,02214129 \cdot 10^{23}$ 1/mol. Odrednica za sekundu će se zadržati, da bi se izbegla mala preciznost u svim do sada poznatim merenjima G. Pojedinosti iz ove budućnosti, novi SI sistem, prikazan je na web stranama: www.bipm.org/en/measurement-units/new-si/, www.bipm.org/utils/common/pdf/si-brochure-draft-2016.pdf i www.bipm.org/utils/common/pdf/SI-roadmap.pdf

SMISAO MERENJA

Svako merenje je upoređivanje sa standardom. Prema tome, svako merenje iziskuje **materiju** kako bi se realizovao standard (čak i za standard brzine), kao i **zračenje** da bi se postiglo upoređenje. (*Izazov 328e*). Pojam merenja prema tome podrazumeva da postoje materija i zračenje i da su jasno međusobno razdvojeni.

Svako merenje je upoređivanje. Merenje, prema tome, podrazumeva da postoje takođe prostor i vreme i da su jasno međusobno razdvojeni.

Svako merenje proizvodi rezultate merenja. Prema tome, svako merenje podrazumeva i **čuvanje** podataka. Proces merenja stoga podrazumeva da mogu da se izdvoje situacije pre i posle merenja. Drugim pojmom rečeno, svako merenje je **nepovratan** proces.

Svako merenje je proces. Stoga svako merenje uzima izvesnu količinu vremena i izvesnu količinu prostora.

Sve ove osobine marenja su jednostavne, ali važne. Klonite se svakog ko ih negira.

neke su iz italijanskog (od *piccolo* – mali); neke iz grčkog (micro od *μικρός* – mali, deca/deka od *δέκα* – deset, hekti od *έκατόν* – sto, kilo od *χίλιοι* – hiljadu, mega od *μέγας* – veliki, giga od *γίγα* – džin, tera od *τέρας* – monstrum).

Prevedite: Bio sam zarobljen u takvoj saobraćajnoj gužvi da mi je bilo potrebno mikrostoleće da pređem pikoparsek a potrošnja goriva je bila dve desetine kvadratnog milimetra. (*Izazov 327e*)

¹ Osim internacionalnih mernih jedinica, postoje i takozvane **provincijske** jedinice. Većina ovih jedinica je u upotrebi još iz doba starog Rima. Milja je došla od "milia passum", što je bilo hiljadu (dvostrukih) koraka, svaki od po oko 1480 mm; današnja nautička milja, nekada određena je kao dužina luka ugla od 1 minura na površini Zemlje, određena je tačno kao 1852 m, Inč je došao od "uncia/onzia" (dvanaest – današnja stopa), Funta (pound) od "pondere to weight" korišćena je kao prevod za *libra* – vaga – što je i poreklo njene skraćenice lb. Čak je i navika da se nešta razbraja na *tuce* (dvanaest) umesto deset rimskog porekla. Ove i sve ostale slične smešne jedinice – kao što je sistem u kojem sve jedinice počinju na "f", a koje koriste furlong/fortnight za jedinicu brzine – sada su zvanično određene kao umnožak SI jedinica.

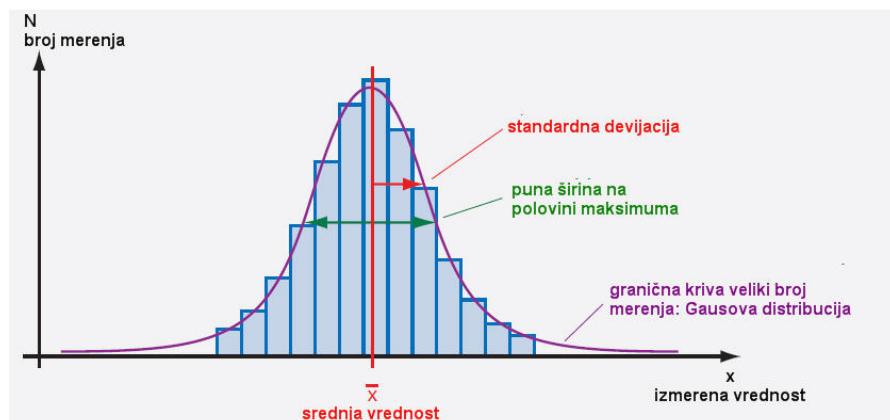
PRECIZNOST I TAČNOST MERENJA

Merenje je osnova fizike. Svako merenje ima **grešku**. Greške nastaju usled nedostatka preciznosti ili usled nedostatka tačnosti. **Preciznost** znači koliko uspešno je rezultat ponovljen kada se merenje ponovi; **tačnost** je stepen u kojem merenje odgovara stvarnoj vrednosti.

Nedostatak preciznosti je usled slučajnih **nasumičnih grešaka**; to se najbolje meri pomoću **standardne devijacije**, obično prikazane skraćeno kao σ ; ona je određena kao:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (107)$$

gde je \bar{x} srednja vrednost merenja x_i . (Da li možete da predpostavite zašto je u obrascu korišćeno $n - 1$ umesto n ? ([Izazov 329s](#)).



Slika 175 Precizan eksperiment i distribucija merenja. Preciznost je veća ako je širina distribucije manja, tačnost je veća ako je centar distribucije slaže sa stvarnom vrednošću.

Za više eksperimenata, uvek kada je rastao broj merenja, distribucija izmerenih vrednosti teži prema normalnoj distribuciji, takođe nazvanom **Gausova distribucija**. Ova distribucija je prikazana na [slici 175](#), a opisana je izrazom:

$$N(x) = e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} \quad (108)$$

kvadrat σ^2 standardne devijacije naziva se takođe **varijansa**. Za $2,35\sigma$ Gausove distribucije izmernih vrednosti ima se puna širina na polovini maksimuma. ([Izazov 330e](#)).

Nedostatak tačnosti je usled **sistematskih grešaka**; obično se one mogu samo proceniti. Ove procene se često dodaju nasumičnim greškama da bi se dobila ukupna greška eksperimenta, ponekad nazvana i **totalna nepouzdanost**. ([Ref. 300](#)). **Relativna greška** je odnos između greške i izmerne vrednosti.

Na primer, profesionalno merenje će dati rezultat kao što je $0,312(6)$ m. Broj u zagradi prikazuje standardnu devijaciju σ , u jedinicama poslednjeg decimala. Kao i gore, predpostavljena je Gausova distribucija za rezultate mernja. Prema tome, vrednost $0,312(6)$ m podrazumeva da se očekuje da stvarna vrednost leži: ([Izazov 331e](#))

- unutar 1σ uz verovatnoću 68,3%, stoga u ovom primeru unutar $0,312 \pm 0,006$ m
- unutar 2σ uz verovatnoću 95,4%, stoga u ovom primeru unutar $0,312 \pm 0,012$ m
- unutar 3σ uz verovatnoću 99,73%, stoga u ovom primeru unutar $0,312 \pm 0,018$ m
- unutar 4σ uz verovatnoću 99,993 7%, stoga u ovom primeru unutar $0,312 \pm 0,024$ m
- unutar 5σ uz verovatnoću 99,9937, %, stoga u ovom primeru unutar $0,312 \pm 0,030$ m
- unutar 6σ uz verovatnoću 99,999 943%, stoga u ovom primeru unutar $0,312 \pm 0,036$ m
- unutar 7σ uz verovatnoću 99,999 999 999 74%, stoga u ovom primeru unutar $0,312 \pm 0,042$ m

(Imaju li naredni brojevi smisla? ([Izazov 332s](#)).

Treba zapaziti da standardna devijacija ima jednu decimalu; morali bi da budete stručnjak svetskog ranga da biste koristili dve, a ludak ako želite da koristite i više. Ako nije navedena standardna devijacija, podrazumeva se (1). Kao rezultat, kod profesionalaca 1 km i 1000 m **nisu** iste dužine.

Šta se događa sa greškom kada se dve izmerene vrednosti A i B sabiraju ili oduzimaju? Ukoliko su sva merenja nezavisna – ili nepovezana – standardna devijacija za zbir i za razliku je data kao:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2}$$

Za proizvod i za količnik dve izmerene i nepovezane vrednosti C i D , rezultat je:

$$\rho = \sqrt{\rho_C^2 + \rho_D^2}$$

gde je ρ pojam za **relativnu** standardnu devijaciju.

Predpostavimo da ste izmerili da se neki objekt kreće 1,0 m za 3,0 s: kolika je vrednost izmerene brzine? (**Izazov 33s**).

GRANICE PRECIZNOSTI

Kolike su granice preciznosti i tačnosti? Ne postoji način, čak ni u principu, da se dužina x izmeri uz preciznost veću od oko 61 decimalne, pošto je u prirodi odnos između najmanje i najveće dužine koja se može izmeriti: $\Delta x/x > l_{\text{Pl}}/d_{\text{horiz}} = 10^{-61}$. (Da li taj odnos važi i za silu ili zapreminu? (**Izazov 334e**). U poslednjem volumenu našeg teksta, proučavanja časovnika i metarske trake još više sužavaju ovu teorijsku granicu. (**Vol. VI, strana 77**).

Međutim, nije teško da se zaključi da postoje još uže praktične granice. Nikakva zamišljena mašina ne može da izmeri veličinu uz veću preciznost nego što je merenje prečnika Zemlje unutar najmanje ikada izmerene dužine, od oko 10^{-19} m; to je oko 26 decimala preciznosti. Korišćenje realističnijeg ograničenja sa mašinom od 1000 m podrazumeva granicu od 22 decimalne. Ako je merenjem vremena, kako je prevideno gore, postignuta preciznost od 17 decimala, onda je ona u blizini praktičnih granica, pošto odvojeno od veličine, postoji još jedno praktično ograničenje: cena. Zapravo, svako decimalno mesto u preciznosti merenja često znači još jednu cifru u ceni uređaja,

FIZIČKE KONSTANTE

Opšta zapažanja u fizici izvedena su iz onih osnovnih. Kao posledica toga i većina merenja može da se izvede iz onih osnovnih. Najosnovnija merenja su merenja fizičkih konstanti.

U tablicama koje slede date su najtačnije svetske vrednosti najvažnijih konstanti u fizici i osobina čestica – u SI jedinicama i nekoliko drugih uobičajenih jedinica – koje su objavljene u referencama standarda. (**Ref. 301**). Date su srednje svetske vrednosti najboljih merenja izvršenih do sada. Kao i obično, eksperimentalne greške, uključujući kako nasumične tako i sistematske, izražene su navedenom standardnom devijacijom u poslednjoj cifri. Zapravo, iza svakog broja u tablicama koje slede postoji duga priča koja zaslužuje da bude ispričana, ali za koje ovde nema dovoljno mesta. (**Ref. 302**).

U principu, sve kvalitativne osobine materijala mogu da se izračunaju kvantom teorijom, (**Ref. 301**) kao i vrednosti izvesnih fizičkih konstanti. Na primer, boja, gustina i osobine elastičnosti mogu da budu predviđene korišćenjem jednakosti za standardni model fizike čestica i vrednosti osnovnih konstanti koje slede. (**Vol. V, strana 195**).

TABELA 27 Osnovne fizičke konstante

Veličina	Simbol	SI vrednost	Nepouz. ^a
<i>Konstante koje određuju SI jedinice merenja</i>			
Brzina svetlosti u vakuumu ^c	c	299 792 458 m/s	0
Magnetna provodnost vakuma ^c	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m} = 1,256 637 061 435 \dots \mu\text{H/m}$	0
Dielektrična konstanta vakuma ^c	$\epsilon_0 = 1/\mu_0 c^2$	8,854 187 817 620 ... pF/m	0
Orginalna Plankova konstanta	h	$6,626 069 57(52) \cdot 10^{-34} \text{ Js}$	$4,4 \cdot 10^{-8}$
Redukovana Plankova konstanta, kvant energije	\hbar	$1,054 571 726(47 \cdot 10^{-34}) \text{ Js}$	$4,4 \cdot 10^{-8}$
Naelektrisanje pozitrona	e	$0,160 217 656 5(35) \text{ aC}$	$2,2 \cdot 10^{-8}$

Bolcmanova konstanta	k	$1,380\,6488(13) \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$	$9,1 \cdot 10^{-7}$
Gravitacijska konstanta	G	$6,673\,84(80) \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$	$1,2 \cdot 10^{-4}$
Gravitacijska konstanta veze	$k = 8\pi G/c^4$	$2,076\,50(25) \cdot 10^{-43} \text{ s}^2/\text{kg m}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$
Osnovne konstante (ili nepoznatog porekla)			
Broj dimenzija prostor-vreme		3+1	0^b
Konstanta fine strukture α ili	$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c}$	1/137,035 999 074(44)	$3,2 \cdot 10^{-10}$
elektromagnetna konstanta veze	$= g_{em}(m_e^2 c^2)$	$= 0,007\,297\,352\,5698(24)$	$3,2 \cdot 10^{-10}$
Fermijeva konstanta veze G_F ili	$G_F/(\hbar c)^2$	$1,166\,364(5) \cdot 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$	$4,3 \cdot 10^6$
konstanta slabe veze	$\alpha_w(M_Z) = g_w^2/4\pi$	1/30,1(3)	$1 \cdot 10^{-2}$
Ugao slabog mešanja	$\sin^2 \theta_W(\overline{MS})$	0,23124(24)	$1,0 \cdot 10^{-3}$
	$\sin^2 \theta_W \text{ na ljsci}$	0,2224(19)	$8,7 \cdot 10^{-3}$
	$= 1 - (m_w/m_Z)^2$		
Konstanta jake veze ^d	$\alpha_s(M_Z) = g_s^2/4\pi$	0,118(3)	$25 \cdot 10^{-3}$
Matrica CKM (Cabibbo–Kobajashi–Masakava) mešanja kvarka	$ V $	$\begin{pmatrix} 0,67428(15) & 0,2253(7) & 0,00347(16) \\ 0,2252(7) & 0,97345(16) & 0,0410(11) \\ 0,00862(26) & 0,0403(11) & 0,999152(45) \end{pmatrix}$	
Invarijanta Jarlskog	J	$2,96(20) \cdot 10^{-5}$	
Matrica PMNS (Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata) mešanja neutrina	P	$\begin{pmatrix} 0,82 & 0,55 & 015 + 0,038i \\ -036 + 0,020i & 0,70 + 0,013i & 0,61 \\ 0,44 + 0,26i & -0,45 + 0,017i & 0,77 \end{pmatrix}$	
Mase elementarnih čestica (nepoznatog porekla)			
Masa ečlektrona	m_e	$9,109\,382\,91(40) \cdot 10^{-31} \text{ kg}$	$4,4 \cdot 10^{-8}$
Masa miona	m_μ	$5,458\,799\,0946(22) \cdot 10^{-24} \text{ u}$	$4,0 \cdot 10^{-10}$
		$0,510\,998\,928(11) \text{ MeV}$	$2,2 \cdot 10^{-8}$
		$1,883\,531\,475(96) \cdot 10^{-28} \text{ kg}$	$5,1 \cdot 10^{-8}$
		$0,113\,248\,9267(29) \text{ u}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$
		$105,658\,3715(35) \text{ MeV}$	$3,4 \cdot 10^{-8}$
Tau masa	m_τ	$1,776\,82(16) \text{ GeV}/c^2$	$\cdot 10^{-x}$
Masa el. neutrina	m_{ν_e}	$< 2 \text{ eV}/c^2$	$\cdot 10^{-x}$
Masa muon neutrina	m_{ν_μ}	$< 2 \text{ eV}/c^2$	$\cdot 10^{-x}$
Masa tau neutrina	m_{ν_τ}	$< 2 \text{ eV}/c^2$	
Masa gornjeg kvarka	u	$1,8 \text{ do } 3,0 \text{ MeV}/c^2$	
Masa donjeg kvarka	d	$4,5 \text{ do } 5,5 \text{ MeV}/c^2$	
Masa čudnog kvarka	s	$95(5) \text{ MeV}/c^2$	
Masa čarobnog kvarka	c	$1,275(25) \text{ GeV}/c^2$	
Masa dubinskog kvarka	b	$4,18(17) \text{ GeV}/c^2$	
Masa vršnog kvarka	t	$173,5(1,4) \text{ GeV}/c^2$	
Masa fotona	γ	$< 2 \cdot 10^{-54} \text{ kg}$	
Masa W bozona	W^\pm	$80,385(15) \text{ GeV}/c^2$	
Masa Z bozona	Z^0	$91,1876(21) \text{ GeV}/c^2$	
Higsova masa	H	$126(1) \text{ GeV}/c^2$	
Masa gluona	$g_{1\dots 8}$	oko $0 \text{ MeV}/c^2$	
Mase složenih čestica			
Masa protona	m_p	$1,672\,621\,777(74) \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	$4,4 \cdot 10^{-8}$
		$1,007\,276\,466\,812(90) \text{ u}$	$8,9 \cdot 10^{-11}$
		$938,272\,046(21) \text{ MeV}$	$2,2 \cdot 10^{-8}$
Masa neutrona	m_n	$1,674,927,351(74) \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	$4,4 \cdot 10^{-8}$
		$1,008\,664\,916\,00(43) \text{ u}$	$4,2 \cdot 10^{-10}$
		$939,565\,379(21) \text{ MeV}$	$2,2 \cdot 10^{-8}$
Jedinica atomske mase	$m_u = m_{^{12}\text{C}}/12 = 1 \text{ u}$	$1,660\,538\,921(73) \text{ yg}$	$4,4 \cdot 10^{-8}$

- a. Nepouzdanost: standardna devijacija greške merenja.
- b. Mereno samo od 10^{-19} do 10^{28} m
- c. Odrednica konstante
- d. Sve konstante veza zavise od prenosa četverca količine kretanja, kao što je objašnjeno u odeljku za renormalizaciju. **Konstanta fine strukture** je tradicionalni naziv za konstantu elektromagnetne veze g_{em} za slučaj prenosa četverca količine kretanja $Q^2 = c^2 m_e^2$ koji je najmanji moguć. Kod većih prenosa količine kretanja ona ima veću vrednost, to jest $g_{\text{em}}(Q^2 = c^2 M_W^2) \approx 1/128$. Nasuprot tome, konstanta jake veze ima manju vrednost na višim prenosima količine kretanja, to jest, $\alpha_s(34 \text{ GeV} = 0,14(2)$

Zašto sve ove osnovne konstante imaju ovakve vrednosti? Za svaku osnovnu konstantu **sa dimenzijom**, kao što je kvant energije \hbar numerička vrednost ima samo istorijsko značenje. Ona je $1,054 \cdot 10^{-34}$ Js zato što je SI odredio džul i sekundu. Pitanje zašto vrednost konstante sa dimenzijom nije veća ili manja stoga uvek zahteva da se razume poreklo neimenovanog broja koji određuje odnos između konstante i odgovarajuće **prirodne jedinice** koja je određena pomoću c , G , \hbar i α . Više detalja i vrednosti prirodnih jedinica biće dato kasnije. (**Vol. IV, strana 161**). Shvatanje veličine atoma, ljudi, drveća i zvezda, trajanje procesa u molekulima i atomima, ili mase stomskog jezgra i planina, podrezumeva shvatanje odnosa između ovih vrednosti i odgovarajuće jedinice u prirodi. Ključ za razumevanje prirode je prema tome razumevanje svih odnosa, pa prema tome i svih konstanti bez dimenzije. Traganje za razumevanjem svih odnosa, uključujući i samu konstantu fine strukture α , kompletno je samo u poslednjem volumenu naše avanture.

Osnovne konstante daju naredna korisna zapažanja velike preciznosti.

TABELA 28 Izvedene fizičke konstante

Veličina	Simbol	Vrednost u SI jedinicama	Nepouz.
Talasni otpor vakuma	$Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$	376,730 313 461 77... Ω	0
Avogadrov broj	N_A	6.022 141 29(227) $\cdot 10^{23}$	$4,4 \cdot 10^{-8}$
Lošmitov broj (273,16 K i 101325 Pa)	N_L	2,686 7805(24) $\cdot 10^{23}$	$9,1 \cdot 10^{-7}$
Faradejeva konstanta	$F = N_A e$	96 485,3365(21) C/mol	$2,2 \cdot 10^{-8}$
Univerzalna gasna konstanta	$R = N_A k$	8,314 4621(75) J/mol K	$9,1 \cdot 10^{-7}$
Molarna zapr. ideal. gasa (273,15 K i 101325 Pa)	$V = RT/p$	22,413 968(20) l/mol	$9,1 \cdot 10^{-7}$
Ridbergova konstanta	$R_\infty = m_e c^2 / 2h$	10 973 731,568 539 m ⁻¹	$5 \cdot 10^{-12}$
Kvant provodnosti	$G_0 = 2e^2/h$	77,480 917 346(25) μS	$3,2 \cdot 10^{-10}$
Kvant magnetnog upliva	$\varphi_0 = h/2e$	2,067 833 758(46) pWb	$2,2 \cdot 10^{-8}$
Odnos Jozefsonove učestanosti	$2e/h$	483,597 870(11) T Hz/V	$2,2 \cdot 10^{-8}$
Fon Kicingova konstanta	$h/e^2 = \mu_0 c/2\alpha$	25 812,807 4434(84) Ω	$3,2 \cdot 10^{-10}$
Borov magnetron	$\mu_B = e\hbar/2m_e$	9,274 009 68(20) yJ/T	$2,2 \cdot 10^{-8}$
Klasičan poluprečnik elektrona	$r_e = e^2/4\pi\epsilon_0 c^2 m_e$	2,817 940 3267(27) fm	$9,7 \cdot 10^{-10}$
Komptonova talasna dužina	$\lambda_C = h/m_e c$	2,426 310 2389(16) pm	$6,5 \cdot 10^{-10}$
... elektrona	$\tilde{\lambda}_c = \hbar/m_e c = r_e/\alpha$	0,386 159 268 00(25) pm	$6,5 \cdot 10^{-10}$
Borov poluprečnik ^a	$a_\infty = r_e/\alpha$	52,917 721 092(17) pm	$3,2 \cdot 10^{-10}$
Kvant cirkulacije	$h/2m_e$	3,636 947 5520(24) $\cdot 10^{-4}$ m ² /s	$6,5 \cdot 10^{-10}$
Specifično naelektrisanje pozitrona	e/m_e	1,758 820 088(39) $\cdot 10^{11}$ C/kg	$2,2 \cdot 10^{-8}$
Učestanost elektrona u ciklotronu	$f_c/B = e/2\pi m_e$	27,992 491 10(62) GHz/T	$2,2 \cdot 10^{-8}$
	μ_e	-9,284 754 30(21) $\cdot 10^{-24}$ J/T	$2,2 \cdot 10^{-8}$
Magnetni moment elektrona	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) $\cdot 10^3$	$4,1 \cdot 10^{-10}$
G-faktor elektrona	g_e	-2,002 319 304 361 53(53)	$2,6 \cdot 10^{-13}$
Odnos masa mion-elektron	m_μ/m_e	206,768 2843(52)	$2,5 \cdot 10^{-8}$
Magnetni moment miona	μ_μ	-4,490 448 07(15) $\cdot 10^{-26}$ J/T	$3,4 \cdot 10^{-8}$
G-faktor miona	g_μ	-2,002 331 8418(13)	$6,3 \cdot 10^{-10}$
Odnos masa proton-elektron	m_p/m_e	1863,152 672 45(75)	$4,1 \cdot 10^{-10}$
Specifično naelektrisanje protona	e/m_p	9,578 833 58(21) $\cdot 10^7$ C/kg	$2,2 \cdot 10^{-8}$
Komptonova talasna dužina protona	$\lambda_{C,p} = h/m_p c$	1,321 409 856 23(94) fm	$7,1 \cdot 10^{-10}$
Magneton jezgra	$\mu_N = e\hbar/2m_p$	5,050 783 53(11) $\cdot 10^{-27}$ J/T	$2,2 \cdot 10^{-8}$

Magnetni moment protona	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	$2,792\ 847\ 356(23)$	$8,2 \cdot 10^{-9}$
Žiromagnetni odnos protona	$\gamma_p = 2\mu_p/\hbar$	$2,675\ 222\ 005(63) \cdot 10^8$ Hz/T	$2,4 \cdot 10^{-8}$
G-faktor protona	g_p	$5,587\ 694\ 713(46)$	$8,2 \cdot 10^{-9}$
Odnos masa neutron-elektron	m_m/m_e	$1838,683\ 6605(11)$	$5,8 \cdot 10^{-10}$
Odnos masa neutron-proton	m_n/m_p	$1,001\ 738\ 419\ 17(45)$	$4,5 \cdot 10^{-10}$
Komptonova talasna dužina neutrona	$\lambda_{C,n} = h/m_n c$	$1,319\ 590\ 9068(11)$ fm	$8,2 \cdot 10^{-10}$
	μ_n	$-0,966\ 236\ 47(23) \cdot 10^{-26}$ J/T	$2,4 \cdot 10^{-7}$
Magnetni moment neutrona	μ_n/μ_B	$-1,041\ 875\ 63(25) \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-7}$
	μ_n/μ_N	$-1,913\ 042\ 72(45)$	$2,4 \cdot 10^{-7}$
Štefan-Bolcmanova konstanta	$\sigma = \pi^2 k^4 / 60 \hbar^3 c^2$	$56,703\ 73(21)$ nW/m ² K ⁴	$3,6 \cdot 10^{-6}$
Vinova konstanta	$b = \lambda_{max} T$	$2,897\ 7721(26)$ mmK	$9,1 \cdot 10^{-7}$
		$58,789\ 254(53)$ GHz/K	$9,1 \cdot 10^{-7}$
Elektron volt	eV	$1,602\ 176\ 565(35) \cdot 10^{-19}$ J	$2,2 \cdot 10^{-8}$
Konstanta pretvaranja bitova u entropiju	$k \ln 2$	10^{23} bita = $0,956\ 994\ 5(9)$ J/K	$9,1 \cdot 10^{-7}$
Sadržaj energije TNT		3,7 do 4,0 MJ/kg	$4 \cdot 10^{-2}$

a. Za beskonačnu masu atomskog jezgra

U narednoj tablici su date neka korisna svojstva iz lokalnog okruženja.

TABELA 29 Astronomske konstante

Veličina	Simbol	Vrednost
Tropska 1900. godina ^a	a	$31\ 556\ 925,974\ 7$ s
Tropska 1994. godina	a	$31\ 556\ 925,2$ s
Srednji sideralni (zvezdani) dan	d	$23\ h\ 56\ min\ 4,090\ 53$ sec
Srednja udaljenost Zemlja – Sunce ^b		$149\ 597\ 870,691(30)$ km
Astronomska jedinica ^b	AU	$149\ 597\ 870\ 691$ m
Svetlosna godina, bazirana na Julijanskoj godini ^b	al	$9,460\ 730\ 472\ 5808$ Pm
Parsek	pc	$30,856\ 775\ 806$ Pm = $3,261\ 634$ al
Masa Zemlje	M_\oplus	$5,973(1) \cdot 10^{24}$ kg
Geocentrična gravitacijska konstanta	GM	$3,986\ 004\ 418(8) \cdot 10^{14}$ m ³ /s ²
Gravitacijska dužina Zemlje	$l_\oplus = 2GM/c^2$	$8,870\ 056\ 078(16)$ mm
Poluprečnik Zemlje na ekvatoru ^c	$R_{\oplus eq}$	$6378,1366(1)$ km
Poluprečnik Zemlje na polovima ^c	$R_{\oplus p}$	$6356,752(1)$ km
Rastojanje ekvator – pol (prosečno) ^c		$10\ 001,966$ km
Sploštenje zemlje ^c	e_\oplus	$1/298,25642(1)$
Prosečna gustina Zemlje	ρ_\oplus	$5,5$ Mg/m ³
Starost Zemlje	T_\oplus	$4,50(4)$ Ga = $142(2)$ Ps
Normalna gravitacija Zemlje	g	$9,806\ 65$ m/s ²
Standardni atmosferski pritisk na Zemlji	p_0	$101\ 325$ Pa
Poluprečnik Meseca iz pravca Zemlje	$R_{\mathbb{C} v}$	1738 km
Poluprečnik Meseca iz druga dva pravca	$R_{\mathbb{C} b}$	$1737,4$ km
Masa Meseca	$M_{\mathbb{C}}$	$7,35 \cdot 10^{22}$ kg
Srednja udaljenost Meseca ^d	$d_{\mathbb{C}}$	$348\ 401$ km
Udaljenost Meseca u perigeju		363 Mm (tipično)
		$359\ 861$ km (istorijski minimum)
Udaljenost Meseca i apogeju		404 Mm (tipično)
		$406\ 720$ km (istorijski maksimum)
Ugaona veličina Meseca ^e		$0,5181^\circ = 31,08'$
		$0,49^\circ$ (minimum)
		$0,55^\circ$ (maksimum)
Prosečna gustina Meseca	$\rho_{\mathbb{C}}$	$3,3$ Mg/m ³

Gravitacija na površini Meseca	g_{M}	1,62 m/s ²
Atmosferski pritisak na Mesecu	p_{M}	od 10^{-10} Pa (noću) do 10^7 Pa (danju)
Masa Jupitera	M_{J}	$1,90 \cdot 10^{27}$ kg
Poluprečnik Jupitera na ekvatoru	R_{J}	71,398 Mm
Poluprečnik Jupitera na polovima	R_{J}	67,1(1) Mm
Prosečna udaljenost Jupitera od Sunca	D_{J}	778 412 020 km
Gravitacija na površini Jupitera	g_{J}	24,9 m/s ²
Atmosferski pritisak na Jupiteru	p_{J}	od 20 kPa do 200 kPa
Masa Sunca	M_{\odot}	$1,988\ 43(3) \cdot 10^{30}$ kg
Gravitacijska dužina Sunca	$2GM_{\odot}/c^2$	2,953 250 08(5) km
Heliocentrična gravitacijska konstanta	GM_{\odot}	$132,712\ 440\ 018(8) \cdot 10^{18}$ m ³ /s ²
Sjaj Sunca	L_{\odot}	384,6 384,6 W
Poluprečnik Sunca na ekvatoru	R_{\odot}	695,98(7) Mm
Ugaona veličina Sunca		0,53° prosečno, minimum 4.07.1888. (afel) maksimum 4.01.1952. (perihel)
Prosečna gustina Sunca	ρ_{\odot}	1,4 Mg/m ³
Prosečna ugaljenost Sunca	AU	149 597 870,691(30) km
Starost Sunca	T_{\odot}	4,6 Ga
Solarna brzina oko centra galaksije	$v_{\odot g}$	220(20) km/s
Solarna brzina prema pozadini svemira	$v_{\odot b}$	370,6(5) km/s
Gravitacija na površini Sunca	$g_{\odot b}$	274 m/s ²
Najmanji fotosferični pritisak Sunca	$p_{\odot b}$	15 kPa
Udaljenost od centra Mlečnog puta		8,0(5) kpc = 26,1(1,6) kal
Starost Mlečnog puta		13,6 Ga
Veličina Mlečnog puta		oko 10^{21} m ili 100 kal
Masa Mlečnog puta		10^{12} solarne mase, oko $2 \cdot 10^{42}$ kg
Najdalje poznato jato galaksije	SXDF-XCLJ 0218-0510	$9,6 \cdot 10^9$ al

- a. Određuje konstanru od proletnje ravnodnevice do proletnje ravnovnevice; koristila se za određivanje sekunde. (Upamtite: π sekundi je oko nanostoleća.) Vrednost za 1990. godinu manja je za oko 0,7 s što odgovara usporenuju od otprilike 0,2 ms/godišnje. (Pazite: zašto?) (**Izazov 335s**). Postoji empirijski obrazac za promenu dužine godine tokom vremena. (**Ref. 303**).
- b. Zaista iznenadujuća preciznost za srednje rastojanje Zemlja-Sunce, od samo 30 m, posledica je prosečnog vremena signala kojeg šalje Viking u orbiti i spušten na Mars a koji su primani u periodu većem od 20 godina. Zapazite da *International Astronomical Union* razlikuje srednje rastojanje Zemlja-Sunce od same **astronomске jedinice**; koja je kasnije određena i tačne dužine. Isto tako svetlosnu godinu je odredio IAU kao tačan broj. Za više detalja, pogledati: www.iau.org/public/measuring.
- c. Oblik Zemlje je preciznije opisan sa World Geodetic System. Poslednje izdanje datira iz 1984. godine. Za opširnije predstavljanje njene pozadine i detalja, pogledajte veb stranu www.wgs84.com. Godine 2000. International Geodesic Union precistila je podatke. Poluprečnici i spljoštenost dati ovde su oni uzeti iz “mean tide system”. Oni se razlikuju od onih u “zero tide system” i u ostalim sistemima za 0,7 m. Detalji su dovoljni za posebnu nauku.
- d. Mereno od centra do centra. Da se nađe precizam položaj Meseca na nebu na određen datum, pogledajte veb stranu www.fourmilab.ch/earthview/moon_ap_per.html. Za položaje planeta pogledajte veb stranu www.fourmilab.ch/solar/solar.html i ostale strane na istom mestu
- e. Uglovi su određeni na sledeći način: $1^\circ = \pi/180$ rad, $1' = 1^\circ/60$, $1'' = 1'/60$. Stare mere “third minute” i “fourth minute”, svaki za 1/60 puta manji od predhodnog, nisu više u upotrebi. (“Minut” u originalu znači “vrlo malo”, kao što je zadržano u savremenom engleskom jeziku.)

Izvesne osobine prirode u celini nabrojane su u narednoj tabeli. (Ako želite izazov, možete li da odredite da li je navedena bilo koja osobina samog svemira?) (**Izazov 336s**).

TABELA 30 Kosmološke konstante

Veličina	Simbol	Vrednost
Kosmološka konstanta	Λ	oko $1 \cdot 10^{-52} \text{ m}^{-2}$
Starost svemira ^a	t_0	$4,333(53) \cdot 10^{17} \text{ s} = 13,8(0,1) \cdot 10^9 \text{ a}$
(određena iz prostor-vreme, preko proširenja opšte teorije relativnosti)		
Starost svemira ^a	t_0	preko $3,5(4) \cdot 10^{17} \text{ s} = 11,5(1,5) \cdot 10^9 \text{ a}$
(određena iz materije, preko galaksija i zvezda, korišćenjem kvantne teorije)		
Hablov parametar ^a	H_0	$2,3(2) \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1} = 0,73(4) \cdot 10^{-10} \text{ a}^{-1}$
		$= h_0 \cdot 100 \text{ km/sMpc} = h_0 \cdot 1,0227 \cdot 10^{-10} \text{ a}^{-1}$
Redukovan Hablov parametar ^a	h_0	0,71(4)
Parametar usporavanja ^a	$q_0 = -(\ddot{a}/a)_0/H_0^2$	-0,66(10)
Udaljenost horizonta svemira ^a	$d_0 = 3ct_0$	$40,0(6) \cdot 10^{26} \text{ m} = 13,0(2) \text{ Gpc}$
Topologija svemira ^a		obično do 10^{26} m
Broj dimenzija svemira		3 (do udaljenosti do 10^{26} m)
Kritična gustina	$\rho_c = 3H_0^2/8\pi G$	$h02 \cdot 1,878 82(24) \cdot 10^{-26} \text{ kg/m}^3$
... svemira		$= 0,95(12) \cdot 10^{-26} \text{ kg/m}^3$
Parametar (totalne) gustine ^a	$\Omega_0 = \rho_0/\rho_c$	1,02(2)
Parametar gustine bariona ^a	$\Omega_{B0} = \rho_{B0}/\rho_c$	0,044(4)
Parametar gustine hladne tamne materije ^a	$\Omega_{CDM0} = \rho_{CDM0}/\rho_c$	0,23(4)
Parametar gustine neutrina ^a	$\Omega_{v0} = \rho_{v0}/\rho_c$	0,001 do 0,05
Parametar gustine tamne energije	$\Omega_{X0} = \rho_{X0}/\rho_c$	0,73(4)
Parametar stanja tamne energije	$w = p_X/\rho_X$	-1,0(2)
Masa bariona	m_b	$1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Gustina broja bariona		$0,25(1) / \text{m}^3$
Gustina svetleće materije		$3,8(2) \cdot 10^{-28} \text{ kg/m}^3$
Broj zvezda u svemiru	n_s	$10^{22 \pm 1}$
Broj bariona u svemiru	n_b	$10^{81 \pm 1}$
Mikrotalasna temperatura pozadine ^b	T_0	2,725(1) K
Broj fotona u svemiru	n_γ	10^{89}
Gustina energije fotona	$\rho_\gamma = \pi^2 k^4/15T_0^4$	$4,6 \cdot 10^{-31} \text{ kg/m}^3$
Gustina broja fotona		$410,89/\text{cm}^3$ ili $400/\text{cm}^3$ ($T_0/2,7 \text{ K}^3$)
Gustina amplitude perturbacija	\sqrt{S}	$5,6(1,5) \cdot 10^{-6}$
Amplituda gravitacijskih talasa	\sqrt{T}	$< 0,71 \sqrt{S}$
Fluktuacija mase u 8Mpc	σ_8	0,84(4)
Skalarni indeks	n	0,93(3)
Tekući skalarni indeks	$dn/d \ln k$	-0,03(2)
Plankova dužina	$l_{pl} = \sqrt{\hbar G/c^3}$	$1,62 \cdot 10^{-35} \text{ m}$
Plankovo vreme	$t_{pl} = \sqrt{\hbar G/c^5}$	$5,39 \cdot 10^{-44} \text{ s}$
Plankova masa	$m_{pl} = \sqrt{\hbar c/G}$	$21,8 \mu\text{g}$
Trenutaka u istoriji ^a	t_0/t_{pl}	$8,7(2,8) \cdot 10^{60}$
Tačke prostor-vreme	$N_0 = (R_0/l_{pl})^3$	$10^{244 \pm 1}$
unutar horizonta	(t_0/t_{pl})	
Masa unutar horizonta	M	$10^{54 \pm 1} \text{ kg}$

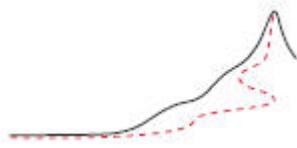
a. Indeks 0 odnosi se na vrednost na današnji dan.

b. Zračenje potiče kada je svemir bio star 380 000 godina i imao temperaturu od oko 3000 K; kolebanje ΔT_0 koja je dovelo do formiranja galaksija danas iznosi oko $16 \pm 4 \mu\text{K} = 6(2) \cdot 10^{-6} T_0$. (**Vol. II, strana 180**).

KORISNI BROJEVI (Ref. 304)

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)





IZAZOVI, SAVETI I REŠENJA

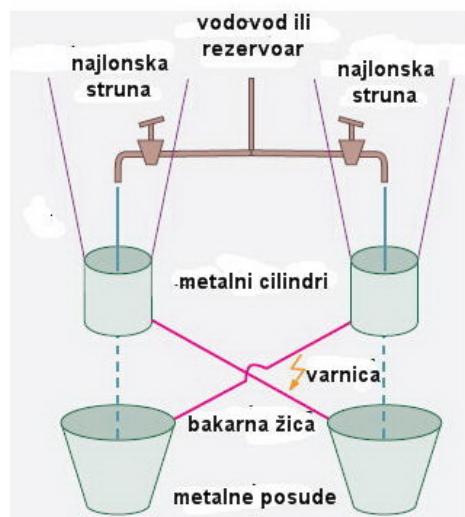
Izazov 1x, strana 10 Nemojte se ustručavati da budete zahtevni i strogi. Sledeće izdanje će imati od toga korist

Izazov 3s, strana 18: Električno polje ometa plamen ka češljju i od njega. Fotografija ovog efekta prikazana je na [slici 176](#). Video snimak sličnog efekta u jačem polju može se naći na veb strani www.youtube.com/watch?v=a7_8Gc_Llr8.



Slika 176 Način na koji plamen reaguje na protrljan češljaj (© Shubham Das and Rakesh Kumar).

Izazov 4s, strana 20: Kapi vode moraju se odvojiti od protoka **unutar** metalnih kontra-elektroda. Posoji uvek malo nanelektrisanje negde na metalnim delovima (usled kosmičkog zračenja, trenja, predhodnog nanelektrisanja). Na [slici 177](#) ovo početno nanelektrisanje je pozitivno, nacrtano na donjem levom i gornjem desnom metalnom delu. Kada se oblikuju vodene kapi, one dobijaju naboj suprotan onom u metalu u oblasti gde se oblikuju. Negativne kapi padaju u drugi metalni deo. Zbog negativnog naboja koji se ovde nagomilava, povećava se pozitivno nanelektrisanje u prvom delu. Kada se naboj na metalnom delu poveća, razdvajanje naboja u kapljicama je još efikasnije. Drugim rečima, formacija vodenih kapi unutar metalnog dela pojačava svako početno nanelektrisanje. Posle nekog vremena, vrednost naboja i pridruženi napon toliko su veliki da dovedu do glasnog praska (ako je sve suvo, uključujući i vazduh). Potom proces počinje opet. Zapravo, pomalo sličan mehanizam odvajanja naboja dovodi do punjenja oblaka i munje. Ako poželite da izgradite Kelvinov generator kod kuće, potražite na internetu ovu temu ili pogledajte veb stranu de.wikipedia.org/wiki/Kelvin-Generator.



slika 177 Ključni proces kod Kelvinovog generatora: razdvajanje naboja tokom oblikovanja kapi

Da bi izbegao varnicu u rezervoaru goriva na svojim automobilima, Opel je jednostavno uzemljio metalnu cev na ulivanju u rezervoar; zaboravili su da osiguraju električni spoj između ove cevi i ostatka automobila.

Do eksplozije goriva može takođe da dođe ako nalivate gorivo u vaš automobil iz metalne posude. Više puta kradljivci goriva bili su “kažnjeni” izazivanjem eksplozije statičnim elektricitetom kada su pokušavali da uliju ukradeno gorivo u sopstven automobil. Na svakom aerodromu možete videti kako se izbegava ovaj problem: pre no što se crevo sa gorivom priključi na avion, radnici priključuju provodni kabel da bi spojili kamion-cisternu (ili rezervoar) i avion.

Izazov 5s, strana 22: Gledamo dve varnice kroz ogledalo koje se brzo obrće. Na taj način mala vremenska razlika dovodi do razlike položaja dve varnice. U 19. veku, na takav način merena vrednost brzine menjala se između 6000 m/s i preko 100 000 km/s, zato što brzina zavisi od efektivne vrednosti kapaciteta i induktivnosti provodnika i naprave. Jedino kada bi se mogli odbaciti ovi uticaji, izmerena brzina bi bila ista kao brzina svetlosti u vakuumu, naime oko 300 000 km/s. U savremenim provodnicima brzina je obično oko jedne trećine ove vrednosti. (*Strana 30*)

Izazov 6s, strana 22 Pojavilo se puno buke dok je metalno klatno udaralo u dva fiksna zvona.

Izazov 8s, strana 26 Ne.

Izazov 9s, strana 25 Polje elektrona na rastojanju od 1 m iznosi 1,4 nV/m

Izazov 10s, strana 26 Zakon obrnute srazmere kvadrata rastojanja je jednostavni geometrijski efekt: bilo šta što teče homogeno iz lopte smanjuje se sa kvadratom rastojanja.

Izazov 11s, strana 27 Dobija se $F = \alpha \hbar c N_A^2 / 4R^2 = 3 \cdot 10^{12} \text{ N}$, enormna sila koja odgovara težini od 300 miliona tona. Pokazuje ogromne sile koje drže materiju. Očigledno, ne postoji zamisliv način da se drži zajedno 1 g pozitivnog nanelektrisanja u kutiji, pošto bi sile odbijanja između naboja bile čak i veće.

Izazov 13s, strana 28 Da se pokaže potpuna ekvivalentnost Kulonovog i Gausovog “zakona”, prvo treba da se dokaže za oni važe za jedno tačkasto nanelektrisanje. Potom da se rezultat proširi za više od jednog tačkastog nanelektrisanja. To daje Gausov “zakon” u intefralnom obliku, kao što je iznet pre ovog izazova.

Da se izvede integralni oblik Gausovog “zakona” za jedan tačkasti naboј, treba da se integrira po zatvorenoj površini. Suštinska tačka je da se zapazi da integriranje može da se izvede samo za zavisnost od kvadrata. Ova zavisnost omogućava transformaciju skalarnog proizvoda između lokalnog polja i elementa površine u normalan proizvod između naboja i prostornog ugla Ω .

$$E dA = \frac{q dA \cos \theta}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{q d\Omega}{4\pi\epsilon_0} \quad (109)$$

U slučaju da je površina zatvorena integracija je tada jednostavna.

Da se izvede diferencijalni oblik (statički) Gausovog “zakona”, naime

$$\nabla E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (110)$$

koristi se definicija gusine naboja ρ i čisto matematički obrazac

$$\oint_{\text{cl.surf}} E dA = \int_{\text{enc.vol}} \nabla E dV \quad (111)$$

Ovaj matematički odnos, koji važi za bilo koje vektorsko polje E , naziva se **Gausova teorema**. Ona jednostavno izražava da je upliv zapreminske integral divergencije.

Da se izvede potpun oblik Gausovog zakona, uključujući i izvod po vremenu magnetnog polja, mora da se uzme u obzir uticaj relativnosti usled promenljive tačke posmatranja posmatrača koji se kreće.

Izazov 15s, strana 28 Nenanelektrisana tela mogu da se privlače međusobno ako su načinjena od nanelektrisanih sastavnih delova koji se međusobno neutrališu i ako su naboji ograničeni u njihovojoj pokretljivosti. Kolebanje nanelektrisanja tada dovodi do privlačenja. Većina molekula među-

sobno deluje na takav način; takve sile su takođe osnova za površinski napon u tečnostima i oblikovanje kapi.

Izazov 16s, strana 28 Ne, baterije samo razdvajaju nanelektrisanja i pumpaju ih u kolo.

Izazov 18s, strana 30 Odnos q/m elektrona i onaj kod slobodnih nanelektrisanja u metalima nije u potpunosti isti.

Izazov 20r, strana 32 Pronađite način da se ovo pitanje proveri, izvedite eksperiment i objavite ga!

Izazov 21r, strana 36 Ako možete, objavite rezultat. Istraživači su pokušavali da uvedu ljude u okean tokom oblačnih dana, pokušavali su eksperimente u mračnim prostorijama, ali ništa do sada nije otkriveno. Isto tako iskustva osoba u uređaju za magnetnu rezonansu za sada nisu dovoljna.

Izazov 23s, strana 40 Ne.

Izazov 25s, strana 40 Tačan oblik Amperovog "zakona" je

$$\nabla \times \mathbf{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \mu_0 \mathbf{j} \quad (112)$$

pri čemu u tekstu koji se pominje nedostaje član $\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$.

Za drugaćiji način da se izrazi razlika između tačne i pogrešne verzije Amperovog "zakona", pogledajte Richard P. Feynman, Robert B. Leighton & Matthew Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, volume II, AddisonWesley, p. 21-1, 1977. To se može besplatno naći na web strani www.feynmanlectures.info

Izazov 26s, strana 42 Samo *podrška (boost)* uz relativističku brzinu meša električno i magnetno polje u značajnom iznosu.

Izazov 28s, strana 42 Binarno polje $*F$ određeno je na **strani 62**.

Izazov 29s, strana 43 Skalarni proizvod 4-vektora je uvek, prema konstrukciji, lorencova invarijantna veličina

Izazov 30d, strana 43 Proizvodnja X-zraka zahteva veliku koncentraciju energije; takav nivo nije moguć u biološkim sistemima.

Izazov 31s, strana 43 Električni talasi niske učestanosti proizvode se u nervnim sistemima, a posebno u mozgu. Kao što je predhodno pomenuto, razne ribe komuniciraju putem električnog dipolnog polja (**Ref. 16**). Međutim, nikada nije nađena ni jedna komunikacija putem *radio* talasa. Zapravo, mala je nada da takvi sistemi postoje. Zašto? (Savet: razmislite o pripadajućim učestanostima, njihovoj proizvodnji i fizičkim osobinama vode i vazduha.)

Izazov 34d, strana 46 Skoro sve neutralne čestice sastavljene su od nanelektrisanih. Tako granica brzine važi i kod njih. Postoji jedan izuzetak: neutrini. Za njih ovaj argument ne važi. Međutim, čak i neutrini imaju oko sebe nanelektrisane virtualne čestice, tako da se najveća brzina primenjuje i na njih.

Izazov 35d, strana 46 Kao što je ranije objašnjeno (**strana 45**), za posmatrača koji leti duž provodnika, događaj na počeku i na kraju za naboje na oba kraja ne dešavaju se više istovremeno, za posmatrača koji se kreće provodnik je nanelektrisan. Stoga postoji magnetno polje oko provodnika za *svakog* posmatršča koji se kreće.

Izazov 36d, strana 47 Osvetljavanje od Sunca menja jonizaciju u gornjoj atmosferi i izaziva provođenje u jonusferu. Plima pomera jone u okeanu i u atmosferi. (**Strana 52**). Ovo strujanje dovodi do magnetnog polja koje može da se oseti magnetnom iglom osetljivog kompasa.

Izazov 37d, strana 47 Ako nadete takav efekt i budete sposobni da ga prikažete, objavite to u obrazovnom časopisu.

Izazov 38s, strana 47 Obično su provodnici vodova visokog napona isuviše vrući da bi bili udobni.

Izazov 39s, strana 47 Pomerite ih u T oblik.

Izazov 40s, strana 47 Savet: sijalica koja svetli je vruća.

Izazov 41s, strana 48 Za tri i više prekidača koriste se inverteri; inverter je prekidač sa dva ulaza i dva izlaza, koji u jednom položaju spaja prvi i drugi ulaz sa prvim i drugim izlazom, respektivno, a u drugom položaju spaja prvi ulaz sa drugim izlazom i obrnuto. (Premda postoje i druge mogućnosti; provodnici mogu da se uštene primenom elektromagnetskih releja.)

Izazov 43d, strana 49 Plavokosa deca obično imaju tanju kosu, što daje izraženiji učinak. Potrebno je suvo vreme da bi se izbeglo da vlaga u vazduhu razelektriše glavu i da spreči da se kosa uopšte digne.

Izazov 44s, strana 49 Bežični prenos električne energije je moguće; međutim, sistemi su još uvek obično veliki, skupi i opasni po zdravlje ljudi. Ideja da se prihupi sunčeva snaga u dubokom svemiru, a potom zračenjem prenese na Zemlju kao mikrotalasi, često je pominjana. Finansijska sredstva i opasnosti za sada su je zaustavili.

Izazov 46s, strana 50 Zalepite dva ogledala pod pravim uglom. Ili gledajte sebe na TV prijemniku koristeći video kameru.

Izazov 47s, strana 50 To je ponovo primer kombinovane triboluminiscencije i triboelektriciteta. Pogledajte scienceworld.wolfram.com/physics/Triboluminescence.html ili www.geocities.com/RainForest/9911/tribo.htm. veb strane.

Izazov 50s, strana 51 Biber je lakši od soli, pa zato deluje na kašiku pre no što to učini so.

Izazov 51s, strana 52 Za talasnu dužinu od 546,1 nm (standardna zelena) to je nešta malo iznad 18 talasnih dužina.

Izazov 52s, strana 53 Ugaona veličina Sunca je prevelika, tako da rasipanje tu ne igra nikakvu ulogu.

Izazov 53s, strana 53 Uporebite samo kameru velike brzine.

Izazov 54s, strana 53 Struja teče upravno na magnetno polje i zato se odbija. To povlači ceo magnet sa njom.

Izazov 55s, strana 54 Najsličniji ekvivalent navoju je obrtna masa koju je u obrtanje pokrenula tekuća voda. Transformator bi mogao da se načini od dve takve mase spojene preko njigovih osa.

Izazov 56s, strana 54 U jednoj sekundi svetlost sedam puta obide Zemlju.

Izazov 60s, strana 56 Ne postoji u prirodi stalni magneti koji se uklapaju u pod, a koji su dovoljno jaki da bi se postigla visina lebdenja od 50 do 80 cm. (Zapazite da je na jednoj slici visina lebdenja toliko velika da ženine noge ne dodiruju pod.) I niko ko je to pokušao sa elektromagnetom zna da bi takav uređaj bio veći od cele sobe. Pažljivim posmatranjem slika, možete takođe zapaziti da one nisu fotografije: postoje greške sa senkom i sa slikom odraza žene. A pre svega, niko nebi mogao na jednoj od slike da odseće polovicu kreveta sa ženom na krevetu. Najzad, niko nikada nije video lebdeći krevet prikazan na slici.

Izazov 62d, strana 57 Matematika potrebna za pronalaženje rešenja je začuđujuća. Objasnite je!

Izazov 63s, strana 57 Naelektrisan sloj ima učinak da skoro samo joni sa jednim nabojem prolaze kanale. Kao rezultat, naelektrisanja su razdvojena na obe strane tečnosti, a proizvedena je električna struja.

Izazov 64s, strana 57 Privlačenje na malim rastojanjima je usled "slike sile", privlačenja naboja na svaku naelektrisanu površinu. Merenjem rastojanja d od centra lopte, odbijanje tačkastog naelektrisanja počinje za vrednosti $d > 1,618 R$.

Izazov 65s, strana 57 Struja curenja menja slui, Dugoročni odnos napona dat je odnosom otpornosti curenja $V_1/V_2 = R_1/R_2$, što se lako može potvrditi eksperimentom.

Izazov 66s, strana 57 Prvodnik paralelan sa vodom visokog napona obrazuje kondenzator. Naponska razlika koja se pojavljuje dovoljna je da upali neonsku svetiljku.

Izazov 67s, strana 58 Voda ometa male iskre pražnjenja, nazvane *perjanica*. kada se pojavi nova, ona stvara mali šum. Potom, dolaskom nove vode, one se ponovo ometaju, pa se proces ponavlja. Perjanica je oblik pražnjenja koronom; to takođe dovodi do gubitaka snage i radio interferencije.

Izazov 68s, strana 58 Videti predhodni tekst u odeljku o invarijantama.

Izazov 71s, strana 59 Model ne radi u tri dimenzije. Pokušaj da se to ispravi je F. De Flaviis, M. Noro & N. G. Alexopoulos, *Diaz-Fitzgerald time domain (D-FTD) method applied to dielectric and lossy materials*, čiji je preprint dostupan online na internetu.

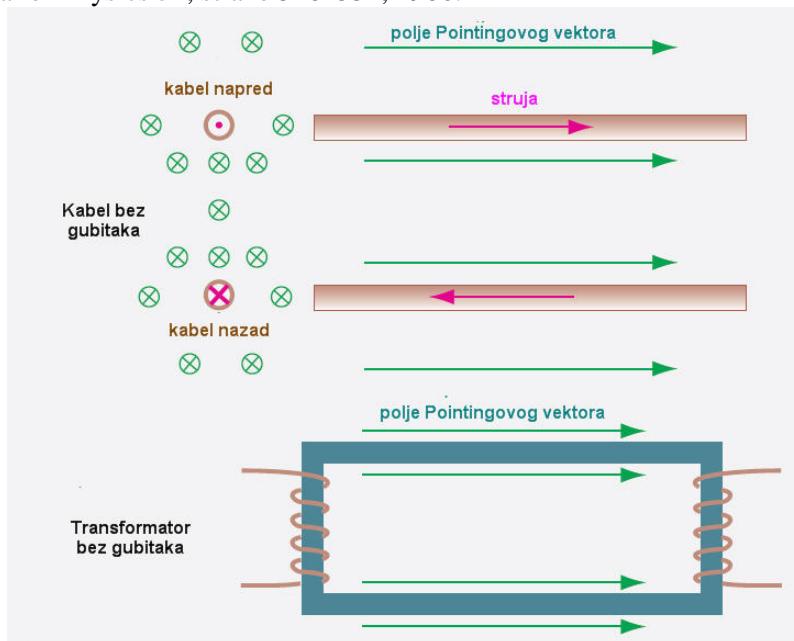
Izazov 72s, strana 60 Potražite na internetu, na primer na veb stranama blog.biodiversitylibrary.org/2012/06/narwhal-oceans-one-toothed-wonder.html ili narwhalslefttooth.blogspot.de/2011/05/narwhal-tusk-debate.html

Izazov 77s, strana 64 Neke količine kretanja, obično male delove, odnosi elektromagnetno polje. S obzirom na to da je elektromagnetna količina kretanja data vektorskim potencijalom, da li možete da proverite da li sve prolazi ispravno?

Izazov 78s, strana 65 Linije polja i ekvipotencijalne površine uvek su upravne međusobno. Prema tome, linije polja ne mogu dva puta da presecaju površinu.

Izazov 89s, strana 69 Dokaz je isti kao za povećavanje entropije; obrnuti proces je moguć, ali verovatnoća je toliko mala da se ne pojavljuje u praksi. Izuzetno mala verovatnoća je usled uticaja koje izaziva okolina.

Izazov 90s, strana 70 Videti *sliku 178*. Ako je kabel bez gubitaka, većina energije teče neposredno izvan dva provodnika i paralelna je sa njima. Ako u kablu postoji otpornost, Pointingovi vektori su usmereni malo prema provodnicima. U slučaju transformatora, koji može da se izvede iz slučaja kabla, preko analogije prikazane na slici, pogledajte lep dokument od F. Herrmann & G. B. Schmid, *The Poynting vector field and the energy flow within a transformer*, American Journal of Physics **54**, strane 528–531, 1986.



Slika 178 Polje Pointingovog vektora za kabel bez električne otpornosti i situacija dugačkog transformatora bez gubitaka

Izazov 92s, strana 70 Nacrtajte samo struju kroz navoj sa njegovim magnetnim poljem, a zatim nacrtajte sliku struje u ogledalu i ponovo nacrtajte magnetno polje.

Izazov 93s, strana 71 Druge nesimetričnosti u prirodi uključuju helikoidu molekula DNK kod živih bića, koji sačinjavaju hromozomi i mnogi drugi molekuli, sklonost korišćenja desne ruke kod većine ljudi, nesimetričnost ribljih vrsta koje obično ostaju ravne na dnu mora.

Izazov 94s, strana 71 Objašnjenje razlike levo i desno nije uopšte moguće korišćenjem gravitacijskih ili elektromagnetskih sistema ili učinka. Jedini način je da se koristi slabo nuklearno međusobno delovanje, kako je prikazano u **Vol. V, strana 179** u odeljku o jezgrima.

Izazov 95s, strana 71 Lagranžian se ne menja ako se jedna od tri koordinate zameni njenom negativnom vrednosti.

Izazov 96s, strana 71 Slika se obrne: obrt od 90 stepeni obrne sliku za 180 stepeni.

Izazov 97s, strana 72 Zamislite E i B kao jedinične vektore u dve ose u složenom sistemu. Tada svako obrtanje ovih osa je takođe uopštena dvojna simetrija.

Izazov 99s, strana 74 Moment količine kretanja unesen je u sistem kada se on oblikovao. Ako dovedemo tačkasto nanelektrisanje iz beskonačnosti po pravoj liniji do njegovog krajnjeg položaja u blizini magnetnog dipola, magnetne sile koje deluju na naboј nisu usmerene duž linije kretanja. One stoga stvaraju neiscrpan obrtni moment oko početka. Videti rad J.M. Aguirregabiria &A. Hernandez, *The Feynman paradox revisited*, European Journal of Physics 2, strane. 168–170, 1981.

Izazov 100s, strana 74 Pokažite da iako radijalno magnetno polje loptastog talasa nestaje po definiciji, Maksvelove jednakosti bi zahtevale da bude različito od nule. Pošto su elektromagnetni talasi transverzalni to je takođe dovoljno da se dokaže da je nemoguće očešljati dlakavu loptu bez (dvostrukog) vrtloga ili dva prosta vrtloga. Uprkos ovom iskazu, kvantna teorija menja unekoliko ovu sliku: verovatnoća emitivanja fotona iz pobuđenog atoma u degenerisanom stanju ima tačnu loptastu simetriju.

Izazov 101s, strana 74 Ako se u obzir uzme očuvanje linearne količine kretanja i momenta količine kretanja, ne postoji dvoznačnost Pointingovog vektora. Videti, na primer W. H. Furry, *Examples of momentum distributions in the electromagnetic field and in matter*, American Journal of Physics 37, strane. 621–636, 1969.

Izazov 102s, strana 75 Emitovano zračenje je snažno potisnuto, pošto je veličina dipola (utikač) mnogo manja od talasne dužine polja.

Izazov 104s, strana 75 Ne. Ni motor, ni navoj nisu nađeni ni u jednom živom biću. Mišići, najjači pokretač u biologiji, uglavnom su izgrađeni od velikog broja elektrostatičkih motora. Osnovna razlog za ovu razliku je mala efikasnost mikroskopskih **elektromagnetičnih** motora, nasuprot velikoj efikasnosti mikroskopskih **elektrostatičkih** motora. U makroskopskim veličinama prednost efikasnosti se menja.

Izazov 106s, strana 81: U svakom slučaju interferencije, energija je preraspodeljena u različitim pravcima. To je opšte pravilo; ponekad je prilično zapetljano otkriti ovaj drugi pravac.

Izazov 107s, strana 81: Autor redovno vidi oko 7 linija; pod pretpostavkom da je rastojanje oko 20 μm, što čini oko 3 μm po liniji. Talasna dužina mora biti manja od ove vrednosti i učestanosti te tako veća od 100 THz. Stvarne vrednosti za različite boje date su u tabeli elektromagnetnog spektra

Izazov 109s, strana 82: Rastojanje l linija u uzorku interferencije dato je sa $l = \lambda d/s$, pri čemu je d rastojanje do ekrana, a s razdvojenost izvora.

Da se nauči više o interferenciji i uslovima za njen pojavljivanje, treba proučiti pojам Frenelovog broja. Na primer, Frenelov broj omogućava da se razlukuje “daleko polje” od “bliskog polja”, dve situacije koje se pojavljuju u više pojava sa talasima.

Izazov 110s, strana 82: On je zapazio da kada se duga napravi pomoću prizme, termometar postavljen iza crvene boje pokazuje porast temperature.

Izazov 113d, strana 87: Dvolomnost se pojavljuje kada prelamanje svetlosti zavisi od polarizacije. Pošto postoje samo dve nezavisne linearne polarizacije, prema tome u prirodi ne postoji trolovnost. To važi isto tako i za kristale koji imaju tri različita indeksa prelamanja iz tri pravca.

Izazov 114s, strana 88: Svetlost koja se odbija od površine vode delimično je polarizovana. Fatamorgane nisu.

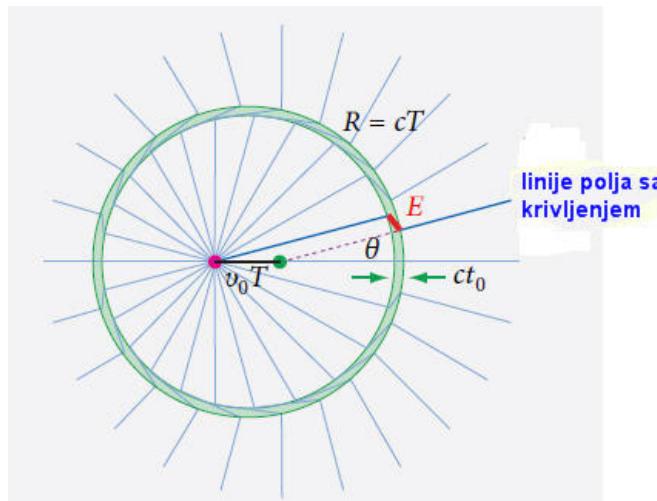
Izazov 115d, strana 90: Na **slici 179** prikazane su linije električnog polja. Predpostavimo da se nanelektrisanje kreće početnom brzinom v_0 koja je mala u odnosu na c i da se usporava do brzine jednake nuli. Kada prođe vreme T , impulsi zračenja su prešli put $R = cT$, pri čemu je $T \gg t_0$. Na slici se vidi da je u datom krivljenju, prikazanom crveno, odnos transverzalnog polja E_t i radijalnog polja E_r daje strminu krivljenja. (Zašto?) Geometrija potom dovodi do

$$\frac{E_t}{E_r} = \frac{v_0 T \sin \theta}{c t_0} = \frac{a R \sin \theta}{c^2} \quad (113)$$

Stavljanjem Kulonovog izraza za radijalno polje, dobija se

$$E_t = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0 c^2} \frac{a \sin \theta}{R} \quad (114)$$

Veličina transverzalnog polja prema tome se povećava sa $1/R$. Osim toga, polje zavisi i od ugla θ ; to se jasno vidi i na *slici 179* i na *slici 67* na *strani 90*. Drugim rečima, antene predajnika imaju predodređen pravac emisije snage, naime upravan na smer ubrzanja.



Slika 179 Izračunavanje transverzalnog polja E kratko ubrzanog električnog naboja

Izazov 116s, strana 93: Takav posmatrač bi doživeo talasno, ali statičko polje, koje ne može da postoji, kao što pokazuju jednakosti za elektromagnetsko polje.

Izazov 117s, strana 93: Vi ne biste nikada umrli. Da li biste mogli da dospete do kraja svemira?

Izazov 120s, strana 93: Površina od 1 m^2 upravna na svetlost prima oko 1 kW zračenja. To proizvodi isti pritisak kao težina od oko $0,3 \text{ mg}$ materije. To proizvodi pritisak od $3 \mu\text{P}$ na crnim površinama, a dvostruko veći na ogledalima.

Izazov 122s, strana 94: Sjajna strana dobija dvostruki prenos količine kretanja u odnosu na crnu stranu, pa se zato potiskuje unazad.

Izazov 125s, strana 95: Obrtanje svetlosti može da se razume na dva načina: obrtanje jačine uzorka oko pravca prostiranja, ili obrtanje polarizovanog uzorka oko prostiranja. Oba su moguća: Dove-ova prizma obrće jačinu (i polarizaciju) a ploča polutalasa samo obrće polarizaciju, za stalnu talasnu dužinu. Oba slučaja mogu takođe da se obrče pomoću razmeštaja ogledala koje je objašnjeno u predhodnom tekstu. (*Strana 106*).

Izazov 128s, strana 96: Uzorak interferencije se menja kada se promene boje. Duga se isto tako pojavljuje zbog toga što su različite boje usled različitih učestanosti.

Izazov 131s, strana 97: Duge trećeg i četvrtog reda oblikuju luk oko Sunca. Da bi se one videle, Sunce mora obično da bude iza neke zgrade ili drveća koje zaklanja direktni pogled u Suncu. Godine 2011. u svetu je bilo samo šačica fotografija duge trećeg reda i samo jedna fotografija duge četvrtog reda.

Izazov 132s, strana 97: Puna duga je okrugla kao kružnica. Možete da napravite dugu pomoću creva za baštu, ako crevo držite u ruci dok stojite na stolici, ledima okrenuti prema popodnevnom suncu. (Dobro, nedostaje još jedna sitnica; možete li da zamislite koji deo?) Kružnica nastaje zbog loptastog oblika kapi. Ako bi kapi bile drugačijeg oblika i ako bi se one sve poredale, duga bi imala drugačiji oblik od jednostavne kružnice.

Izazov 135s, strana 102: Snimite film udaljene eksplozije supernove, ili još bolje, optičku ili gama-zraci eksploziju, pa proverite da li se to događa istovremeno za svaku boju odvojeno. To je rađeno vrlo često i nikakve razlike nisu primećene unutar grešaka eksperimenta.

Izazov 137s, strana 104: Prvi deo predhodnika je osobina sa najkraćom mogućom efektivnom talasnom dužinom; tako da se to uzima za granicu beskonačne učestanosti.

Izazov 138s, strana 104: Svetlost pulsira; stoga je to i brzina energije

Izazov 139s, strana 104: Unutar materije energija se prenosi na atome, a potom ponovo u svetlost, zatim ponovo na sledeće atome itd. Za to je potrebno vreme i to usporava prostiranje.

Izazov 141d, strana 105: Za usamljene fotone propusnost, dielektričnost i talasna impedancija nisu tačno definisane. Konformalna invarijantnost, dimenzionalnost i topologija ne važe u malim Plankovim razmerama. U blizini crnih rupa, ako se u obzir uzmu kvantni efekti, postoji trenje objekata koji se kreću. Kvantna teorija polja pokazuje da vakuum sadrži i sastoji se od parova materija-antimaterija. Kosmologija pokazuje da vakuum ima energetski sadržaj različit od nule, a isto to predpostavlja i kvantna teorija polja. Opšta teorija relativnosti pokazuje da zakrivljen vakum može da se kreće, a to je isti slučaj i sa kvantnom gravitacijom. Ukratko, može da se kaže kako vakuum ima sve one osobine koje su nekad pripisivane eteru, ali na način koji se temeljno razlikuje od onog koji su raspravljali njegovi zagovornici.

Izazov 142s, strana 105: Skoro da ne prolazi nikakva svetlost; jačina malo svetlosti koja se prenosi, zavisi eksponencijalno od odnosa između talasne dužine i prečnika rupe. Može se reći da iza rupe postoji nepostojan talas.

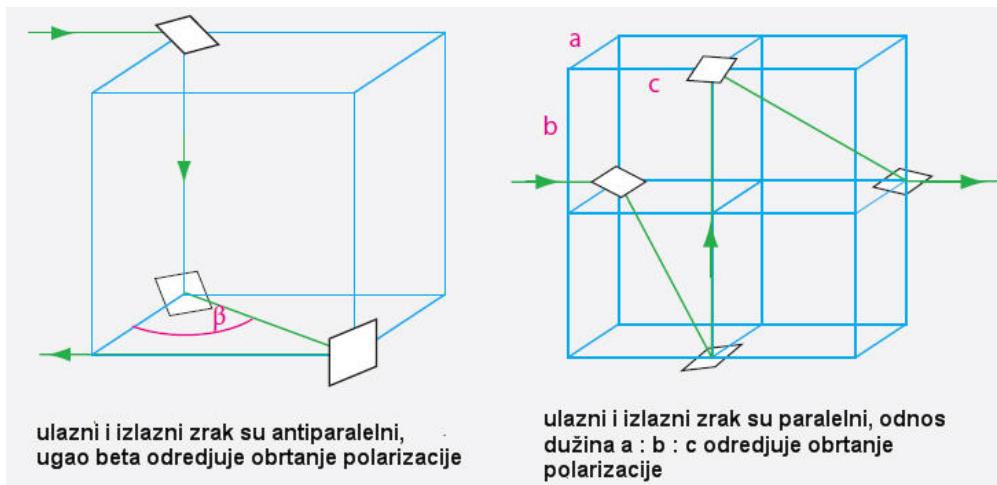
Izazov 143s, strana 106: Gustina energije je $1 \text{ kW/m}^2/c = 3,3 \mu\text{J/m}^3$. Predpostavljajući sinusoidalne talase, (srednja kvadratna vrednost) električnog polja je $\sqrt{3,3 \mu\text{J/m}^3/\epsilon_0} = 610 \text{ V/m}$ – što je zaista velika vrednost. (Srednja kvadratna vrednost) magnetnog polja je $610 \text{ V/m}/c = 2,1 \mu\text{T}$ – što je prilično mala vrednost.

Izazov 144s, strana 106: Svaki primer svetlosti ima samo jednu boju.

Izazov 146s, strana 106: Opisati svetlost kao supstancu pomaže da se razumeju zraci svetlosti. S jedne strane, svetlost je sasvim posebna supstanca: ona nema svakodnevnu trajnost – može da bude apsorbovana – i nema masu.

Izazov 147s, strana 106: Prevelika količina svetlosti se gubi, vetrobrani su preskupi, i nema razloga da se nešta čini što ne radi niko drugi.

Izazov 149s, strana 108: Najmanje tri ogledala. Dva takva rasporeda ogledala prikazani su na *slici 180*. Postoji takođe raspored od tri ogledala sa paralelnim ulazom i izlazom zraka; možete li da nađete? Ideje u vezi ovih rasporeda dobro su objašnjene u dokumentu Enrika Galveza (Enrique Galvez) i njegovih saradnika. (*Ref. 98*).



Slika 180 Dva rasporeda ogledala koji obrću polarizaciju za predhodno određen ugao

Izazov 150s, strana 109: U levom interferometru svetlost izlazi u smeru B, a u desnom u smeru A. Problem može takođe da se uopšti za proizvoljne oblike interferometra. Način da se to postigne je korišćenje Berijeve (Berry) faze. Ako ste zainteresovani, istražite ovaj interesantan pojam uz pomoć vaše omiljene biblioteke.

Izazov 151d, strana 113: Srednja temperatura na Zemlji je zato 287 K. Energija sa Sunca je srazmerna sa četvrtim stepenom temperature. Energija se rasipa (grubo) na polovinu površine Zemlje. Ista energija, na površini Sunca, dolazi sa mnogo manje površine, određene istim uglom kao da

je Zemlja tamo naspramna. Prema tome imamo $E \sim 2\pi R_{\text{Zemlja}}^2 T_{\text{Zemlja}}^4 = T_{\text{Sunce}}^4 R_{\text{Zemlja}}^2 \alpha^2$ gde je α polovina ugla naspramna Suncu. Kao rezultat toga, temperatura na Suncu je procenjena na $T_{\text{Sunce}} = (T_{\text{Zemlja}}^4 / \alpha^2)^{0,25} = 4 \text{ kK}$

Izazov 155s, strana 114: Pošto maksimalni spektar u talasnim dužinama i učestanostima nije isti, zato ne može i ne sledi $c = f\lambda$

Izazov 158s, strana 114: Na visokoj temperaturi sva tela se približavaju crnim telima. Boja je važnija od ostalih efekata u boji. Peć i stvari imaju istu temperaturu. Prema tome, ne mogu da se razlikuju međusobno.. Da bi se to ipak učinilo, osvetlite scenu jakom svetlošću, pa snimite fotografiju uz malu osetljivost. Prema tome, uvek je potrebno jako osvetljenje za snimanje onoga što se događa unutar vatre.

Izazov 159s, strana 115: Postizanjem visoke temperature omogućilo bi da se prekrši drugo načelo termo-dinamike. Da bi se dalje istražilo ovo pitanje, pričitajte u nekom udžbeniku tekst o takozvanim **Kirhovovim zakonima**.

Izazov 160s, strana 116: Efektivna temperatura svetlosti lasera može takođe da se opiše kao **veća od beskonačne**; to omogućava da se pogledaju ciljevi sa izuzetno visokim temperaturama.

Izazov 163s, strana 119: Za mala ogledala i sočiva, kao što su ona koja se koriste u mikroskopima, lakša je masovna proizvodnja sočiva. Nasuprot tome, velika ogledala su mnogo jednostavnija i jeftinija za izradu od velikih sočiva, pošto ogledala zahtevaju manje stakla, lakša su i omogućavaju da im se oblik menja pomoću pokretača.

Izazov 164s, strana 120: Sirup pokazuje još lepši učinak u sledećoj okolnosti. Uzmite dugačku providnu cev zatvorenu na jednom kraјunu napunite je sirupom. Osvetlite joj dno crvenim helijum-neon laserom. Potom unesite u zrak linearни polarizator: svetlost u cevi će oblikovati spiralu. Obrtanjem polarizatora možete učiniti da se spirala kreće napred ili nazad. Ovaj učinak, nazvan **optičkom aktivnošću** šećera, zahvaljujući sposobnosti šećera da obrće polarizaciju svetlosti i posebnu osobinu biljaka: one prave samo jedan od dva oblika ogledala šećera.

Izazov 166s, strana 121: Jednakost, takozvan "zakon" prelamanja svetlosti je

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} \quad (115)$$

Poseban odnos brzina one u vakkumu (ili vazduhu, koja je skoro ista) i one u materijalu, daje **indeks prelamanja** n za taj materijal

$$n = \frac{c_1}{c_0} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_0} \quad (116)$$

Mnogi nepravilno nazivaju "zakon" prelamanja "Snelovim zakonom" ili "Dekarteovim zakonom", iako su mnogi drugi to našli pre njih (iako je prezime "Snel" - brz).

Izazov 167s, strana 123: Jednakost za tanko sočivo je

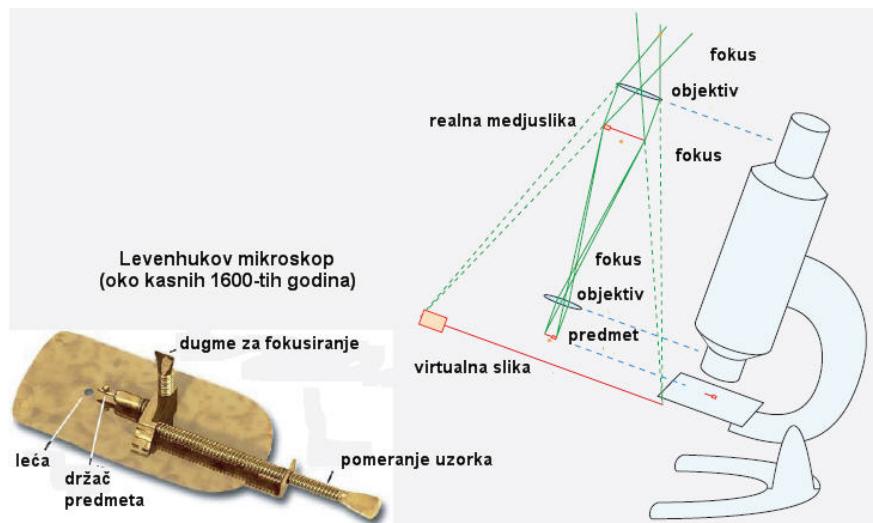
$$\frac{1}{d_0} + \frac{1}{d_1} = \frac{1}{f} \quad (117)$$

On važi za rasipna i za sabirna sočiva, sve dok je njihova debljina zanemarljiva. Jačina sočiva može prema tome da se meri veličinom $1/f$. Jedinica 1 m^{-1} nazvana **dioptrija**, koristi se posebno ta naziv za čitanje. Sabirna sočiva imaju pozitivnu, a rasipna sočiva negativnu vrednost.

Međutim, jednakost za tanko sočivo je samo približnost i ne koristi se za izradu sočiva. To je relikt iz starih udžbenika. Savremeni proizvođači pri proračunu uvek koriste Gausovu optiku. Videti, na primer, kod Francis A. Jenkins & Harvey E. White, *Fundamentals of Optics*, McGraw-Hill, 1957

Izazov 169s, strana 123: Optički mikroskopi su u osnovi načinjeni od dva sabirna sočiva. Jedno sočivo – ili sistem sočiva – stvara povećanu realnu sliku, a drugo sočivo stvara povećanu virtualnu sliku prve, realne slike. **Slika 181** takođe pokazuje da mikroskopi uvek okrenu sliku naopako. Zbog talasne dužine svetlosti, optički mikroskopi imaju najveću rezoluciju od oko $1 \mu\text{m}$. Treba primetiti da je **povećanje** mikroskopa neograničeno, ono što je ograničeno je

njegova **rezolucija**. To je u potpunosti ista osobina koju pokazuju digitalne slike. **Rezolucija** je jednostavno veličina najmanje moguće slikovne tačke (piksela) koja ima smisla.



Slika 181 Jedno sočivo čini prvi komercijalni mikroskop iz 1680. godine (dužine oko 8 cm, da bi se držalo uz oko), ali dva sabirna sočiva čine savremeni mikroskop (foto Wiki Commons)

Izgleda da je mikroskop pronašao Đirolamo Frakastro (Girolamo Fracastro) 1538. godine. Prvi funkcionalni mikroskopi izrađeni su u Holandiji oko 1590. godine. Napredak mikroskopa bio je veoma spor, zbog izuzetno teške izrade stakla i sočiva u ona vremena, posebno malih sočiva. Zbog toga je David Brewster 1819. godine predložio da se izradi mikroskop koristeći sočivo iz ribljeg oka; kada je ova ideja realizovana sa okom jegulje, rezultat je bio mikroskop sa začuđujućim osobinama. Da biste naučili više o mikroskopima, pročitajte lep tekst od Elizabeth M. Slater & Henry S. Slater *Light and Electron Microscopy*, Cambridge University Press, 1993., ili istražite namenske veb strane, kao što su www.mikroskopie-muenchen.de/ ili micro.magnet.fsu.edu/primer/techniques.

Izazov 171s, strana 125: Rasipanje sočiva dovodi do različitog položaja prividne slike, kao što je prikazano na *slici 182*. Za više detalja o rasipanju u ljudskom oku i načinima kako se to koristi za stvaranje trodimenzionalnih efekata, pogledajte članak od C. Ucke & R. Wolf, *Durch Farbe in die dritte Dimension*, Physik in unserer Zeit **30**, strane. 50–53, 1999.

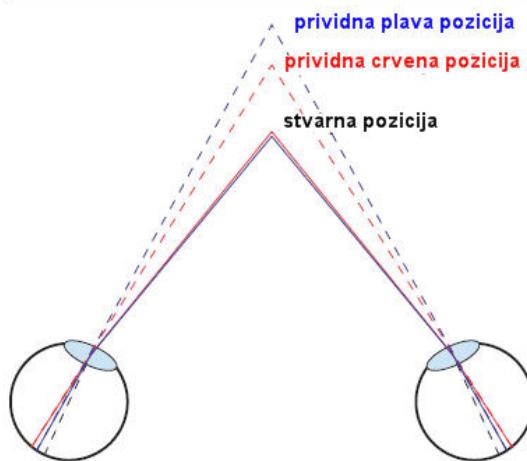
Izazov 172s, strana 127: Zrak od 1 mm vratio bi se 1000 puta širi kao zrak od 1 m. Savršen zrak zelene svetlosti, širine 1 m, bio bi širok 209 m na Mesecu; možete li da zakjučite ovaj rezultat iz (važne) jednakosti koja uzima u obzir daljinu, talasnu dužinu, početni prečnik i krajnji prečnik? Najpre pokušajte da pogodite ovu jednakost, a potom da je izvedete. U stvarnosti su vrednosti nekoliko puta veće od tako izračunatog teoretskog minimuma. Pogledajte veb strane www.csr.utexas.edu/mlrs/ i ilrs.gsfc.nasa.gov

Izazov 173s, strana 128: Često se kaže da je evolucija podesila broj čepića u oku na najveću rezoluciju uz otvorenu zenicu; stručnjaci iz ove oblasti međutim smatraju da je broj čepića nešto veći.

Izazov 174s, strana 128 Odgovor bi trebalo da bude između desetak i dvadesetak kilometara, pod predpostavkom idealnih atmosferskih okolnosti.

Izazov 177s, strana 134: Ustvari, ne postoji način da hologram osobe može da se šeta unaokolo i da plaši stvarne ljude. Hologram je uvek providan; kroz hologram se može videti pozadina. Hologram uvek daje utisak sličan onom kako obično na filmu prikazuju duhove, Ako je pozadina crna, osvetlite ga bakljom da biste ga videli.

Izazov 178s, strana 134: Mala talasna dužina svetlosti verovatno onemogućava ostvarenje ovog sna. Za stvaran hologramski prikaz, potrebno je da svetlosne tačke budu manje od talasne dužine svetlosti i moraju da budu sposobne da prikažu informacije o fazi. Zato je sledeće pitanje: koliko ovog sna može da se ostvari? Ukoliko nađete rešenje, postaćete bogati i poznati.



Slika 182 Odnosi između učinka dubine boje i rasipanja sočiva u ljudskom oku

Izazov 180s, strana 139: Postoji u oku *slepa mrlja*; to jest oblast na kojoj se ne opaža slika. Mozak tada predpostavlja da je slika na tom mestu ista kao na njenim ivicama. Ako tačka padne tačno unutar slepe mrlje, tačka nestaje.

Izazov 181s, strana 139: Mehanizam koji u centralnoj jami nadoknađuje nedostatak receptora za plavo ne radi tako brzo: videćete tačku zbog centralne jame.

Izazov 183s, strana 139: Oko i mozak sigurno ne menjaju pravac gore i dole u određenom dobu. Pored toga, odakle je došla ideja da bebe vide sve naopačke?

Izazov 184s, strana 147: Oči i sistem vida uklanjuju obrasce koji su stalni u vremenu.

Izazov 185s, strana 148: Ne, zaista; "mačje oči" koriste odbijanje sa stranica kocke. Oči žive mačke imaju veliki broj odbijanja. Premda je krajnji efekat isti: svetlost se vraća u pravcu iz kojeg je došla.

Izazov 187s, strana 150: Koristite rasipanje, posmatrajte uzorak na zidu nekoloko metara iza kose.

Izazov 189s, strana 152: Na 10 pars = 32.6 svetlosnih godina, Sunce ima prividnu veličinu 4,7. Na 20 pars = 65,2 svetlosne godine ono bi se pojавilo 4 puta slabije, stoga oko 1,5 magnitudo više, prema tome sa prividnom vizuelnom magnitudom od oko 6,2. To je u blizini granične veličine oka. Stvarna ograničavajuća veličina oka niti je stalna, niti univerzalna, tako da granica od 50 svetlosnih godina nije granica oštine vida. Ograničavajuća magnituda – kao noćni vid ili *skotopička osjetljivost* – zavisi od parcijalnog pritiska kiseonika u atmosferi u kojoj posmatrač diše, od prozračnosti vazduha, od rastojanja zenica, a pre svega, od stepena privikavanja na mrak. Oko izloženo punom osvetljaju nočnog neba na veoma mračnoj lokaciji, daleko od svetlosnog zagadenja, još uvek nije u potpunosti priviknuto na mrak. Možete lako da vidite zvezde magnitude 7 ako zaklonite veći deo neba i samo gledate jedan njegov deo. Neko posmatrači, pod idealnim uslovima, pouzdano su prijavili a su videli zvezde magnitude 8.

Izazov 190s, strana 152: Zelena površina posmatrana pod malim oštrim uglom je veća nego li kada se posmatra vertikalno, kada se vidi i zemlja; zemlja je pokrivena zelenom travom kada se posmatra pod malim uglom.

Izazov 191s, strana 152: To je zaista tačno. Savremeni teleskopi imaju velike površine koje prikupljaju svetlost (do 50 m^2) i izuzetno osjetljive detektore. Broj fotona koje emituje upaljena šibica na Mesecu u smeru velikog teleskopa (koliko njih) dovoljan je da aktivira detektor.

Izazov 192s, strana 153: Naravno ne, jer brzina grupe nije ograničena posebnom teorijom relativnosti. Ograničena je brzina energije, ali se u ovom eksperimentu ne menja.

Izazov 193s, strana 153: On je kupio za svoju majku i za sebe odeću čije su boje bile neprikladne

Izazov 195s, strana 154: Pruski istraživač Aleksandar fon Humboldt opširno je u devetnaestom veku istraživao taj mit. On je posetio mnoge rudarske jame i pitao bezbroj rudara u Meksiku, Peruu i Sibiru o njihovom iskustvima. Ispitao je i brojne dimničare. Nilo od njih i bilo ko drugi nikada nije video zvezde tokom dana.

Izazov 196s, strana 154: Gledajte u Sunce zatvorenih očiju i zapamtite crvenu senku koju vidite, Idite u zatvorenu prostoriju, upalite sijalicu i posmatrajte je zatvorenih očiju. Odaberite rastojanje od sijalice pri kojem je dobijena ista crvena senka. Tada zaključite snagu Sunca preko snage sijalice prema zavisnosti od obrnute srazmere kvadrata.

Izazov 197d, strana 154: Ako odmotavate kotur lepljive trake, osim svetlosti biće emitovani i X-zraci. To je primer triboluminiscencije. Pogledajte eksperiment uživo na filmu koji se nalazi na veb strani www.youtube.com/watch?v=J3i8oRi0WNc.

Izazov 205s, strana 160: Ljudsko telo je male provodnosti i menja oblik polja, pa ga time efektivno kratko spaja. Obično polje ne može da se koristi za proizvodnju energije, pošto su pripadajuće struje isuviše male. (Naravno, munje su drugačija priča. One zato – vrlo indirektno – potiču od polja Zemlje, ali su isuviše nepravilne da bi se dosledno koristile. Frenklinov gromobran je takav primer.) Polje pri lepom vremenu ne može da se koristi kao izvor snage, pošto je njegova inutrašnja otpornost $3 \text{ G}\Omega/\text{m}$.

Izazov 206s, strana 161: Polje na površini lopte sa poluprečnikom r dato je sa $E = Q/4\pi\epsilon_0 r^2$. Ako stavimo da je $E = 200 \text{ V/m}$, dobijamo $Q = 0,9 \text{ MC}$

Izazov 207d, strana 163: Ako nadete postupak koji se razlikuje od poznate pretpostavke, objavite ga.

Izazov 213s, strana 167: Sve iluzije čina letenja izgledaju kao da je madžioničar obešen nitima, što su mnogi primetili, uključujući i mene. (Zabranjeno je fotografisanje blicevima, postavljena je sveta pozadina da učini niti nevidljivim, nikakav prsten nije nikada provučen iznad madžioničara, akvarijum u kojem on pluta ostaje otvoren da bi se omogućilo da ribarske strune prođu skroz, uvek je isti saradnik "nasumice" izabran iz publike itd.) Informacije od očevidaca koji su zaprevo videli ribarske strune koje koristi Dejvid Koperfeld, objašnjavaju razloge za ovakve postavke. Grupa novinara useneta alt.magic.secrets, posebno Tilman Hausher, bila je centralna u razjašnjavanju ovog pitanja u svim detaljima, uključujući i naziv firme koja proizvodi mehanizme za vešanje.

Izazov 215r, strana 167: Svaka novost vredna je objavljanja.

Izazov 216s, strana 171: Zvučna energija takođe je moguća kao mehanički rad.

Izazov 217s, strana 172: Deformacija prostor-vremena nije povezana sa elektricitetom, barem svakodnevne energije. U blizini Plankovih energija, ovo bi moglo da bude drugačije, ali još ništa nije predvidivo.

Izazov 219s, strana 173: Idealna apsorpcija je crnina (mada može biti i crvenilo ili belina na višim temperaturama).

Izazov 220s, strana 173: Zaista, Sunce emituje oko $4 \cdot 10^{26} \text{ W}$ iz svoje mase od $2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$, oko $0,2 \text{ mW/kg}$. Ljudsko telo (u mirovanju) emituje oko 100 W (to možete da proverite u krevetu, tokom noći), prema tome oko $1,2 \text{ W/kg}$. To je oko 6000 puta više nego li Sunce. Razlog je što samo centar Sunca stvarno emituje energiju. Kada se ta količina energije raspodeli na celu masu, uključujući svu masu koja uopšte ne emituje energiju, dobija se mala prosečna vrednost. Uzgred, svaka sveća ili, još bolje, svaki laserski pokazivač emituju više svetlosti po masi, iz sličnih razloga.

Izazov 221s, strana 173: Naelektrisanja u metalnoj kutiji preuređuju se tako da nestaje polje koje ostaje unutar kuutije. To čini da su automobili i avioni sigurni u pogledu munja. Naravno, ako se spoljno polje menja toliko brzo da ga preuređenja ne mogu da prate, polje **može** da prodre u Faradejev kavez. (Uzgred, isto tako polja velike talasne dužine prodiru u metal; posebno daljinsko upravljanje za otvaranje sigurnosnih vrata radi na učestanosti od 25 Hz da bi se to

postiglo.) Međutim, treba sačekati malo pre no što se izade iz automobila posle udara groma, pošto automobil ima točkove sa gumama koje su loš provodnik; čekanjem se daje vreme naelektrisanju da protekne u zemlju.

Za gravitaciju i čvrste kaveze preuređenje mase nije moguće, tako da ne postoji gravitacijski štit.

Izazov 222s, strana 174: Mi-metal je legura nikl-gvožđe, a često sadrži i tragove drugih metala, i ima veliku relativnu magnetnu provodnost μ_r u opsegu od 50 000 do 140 000; to je začuđujući raspon. Velika vrednost provodnosti efikasno koncentriše magnetna poja unutar legure i to dovodi do primene magnetnih poja kroz mi-metal i oko zatvorene zapremine koja je kao rezultat toga zaštićena.

Izazov 225s, strana 174: To je osetljiva tema. Nije jasno da li su za ljude opasna polja učestanosti 50 Hz. Velika je verovatnoća da nisu; ali pitanje još uvek nije rešeno.

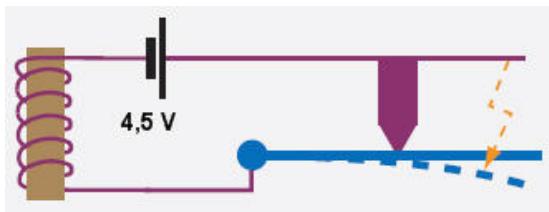
Izazov 226s, strana 175: Broj fotona puta kvant rada \hbar

Izazov 227s, strana 175: Prvo, Faradej je mogao da otkrije površnu vezu koristeći pomenuti eksperiment sa cevi. ([Strana 29](#)). Ali on je tražio moguću dublju povezanost. Međutim, gravitacija i elektricitet uopšte nisu povezani, pošto je prvo usled mase, a drugo usled nanelektrisanja. Mnogo posle Faradeja ljudi su otkrili da gravitacija uključuje i gravitomagnetizam, to jest, merljiv učinak usled masa koje se kreću – ali još uvek nema povezanosti sa elektromagnetizmom. ([Vol II, strana 134](#)). Daleka veza između gravitacije i elektriciteta pojaviće se samo u poslednjem delu.

Izazov 228s, strana 175: Nanelektrisanje prestaje, pošto negativno nanelektrisani satelit odbija elektrone i time je zaustavljen svaki mehanizam sakupljanja elektrona. Elektroni se hvataju češće nego joni zato što su lakši od jona koji imaju neelastičan sudar sa satelitom usled veće brzine na datojoj temperaturi.

Izazov 229s, strana 175: Svaki mehanizam gubitaka objasniće gubitak energije, kao što su električni otpor ili elektromagnetsko zračenje. Posle dela sekunde energija će biti izgubljena. Ovaj mali problem često je razmatran na internetu.

Izazov 230s, strana 175: Koristite ožičenje kako je prikazano na [slici 183](#). Ako su oscilacije podešene pravilno, i ako se kontakt pravilno razdvoji na vrhu, i ako dodirnete jakim stiskom dva kontakta, dobijete jači strujni udar no što možete da izdržite.



Slika 183 Kako da se dobije električni udar iz džepne baterije od 4,5 V

Izazov 232r, strana 176: To bi trebalo da bude moguće u bliskoj budućnosti; međutim, i eksperiment koji će verovatno da izmeri detalje magnetnog polja mozga i precizna provera ozbiljnosti merenja neće biti jednostavni.

Izazov 233s, strana 176: Ne, sistem nije siguran. U svakom sistemu sigurnost je poznata kao naslabija tačka. A u svakom sistemu sa lozinkom, najslabija tačka je prenos sirovih podataka – u ovom slučaju signala od električne kape do računara – i sistem provere lozinke. Oba su ranjiva kao i svaki sistem sa lozinkom. (Ako želite da naučite nešto o sigurnosti, pročitajte ono što je napisao Brus Šnajder, dosta toga je dostupno na internetu.)

Izazov 234x, strana 178: Najveće vrednosti električnog i magnetnog polja su one koje ispoljavaju najveću moguću silu $c^4/4G$ na elementarno nanelektrisanje e . ([Vol. II, strana 87](#)).

Izazov 236s, strana 179: Videti [Izazov 29](#).

Izazov 238s, strana 180: Može da se izmeri više tona nanelektrisanja i pokazati da je to uvek umnožak iste jedinice. Ovu metodu je koristio Milikan u svom poznatom eksperimentu. Može se

takođe izmeriti kolebanje struje i pokazati da ona nastaje od šuma, to jest od toka pojedinačnih naelektrisanja iste vrednosti.

Izazov 240s, strana 180: Tačkasta naelektrisanja podrazumevaju beskonačnu gustinu energije. To je nemoguće. Da li je ovaj dokaz primenjiv samo u klasičnoj elektrodinamici ili u prirodi, vruća je rasprava. Većina mišljenja je da kvantna teorija dozvoljava tačkasta naelektrisanja, pošto kvantne čestice nisu nikada u stanju mirovanja, tako da je beskonačna gustina energije efektno izbegnuta.

Izazov 242s, strana 180: Potencijal Zemlje bi bio $U = -q/(4\pi\epsilon_0 R) = 60 \text{ MV}$, pri čemu mora da se uzme u obzir i broj elektrona u vodi.

Izazov 243d, strana 181: Postoji uvek greška u merenju kada se mere vrednosti polja, čak i kada se mere “iščezavajuća” elektromagnetna polja. Osim toga, kvantna teorija vodi ka proizvoljno malim vrednostima gustine naelektrisanja preko gustine verovatnoće zbog talasnih funkcija.

Izazov 247s, strana 185: Pitanje je da li je “svemir” pojam? U poslednjem delu ove avanture pokazaćemo da nije. (**Vol. VI, strana 90**).

Izazov 249s, strana 190: Kada razmišljano, fizička energija, količina kretanja i moment količine kretanja su očuvani, a termodinamička entropija nije uništena. Svaki eksperiment koji pokaže bilo šta različito ukazivao bi na nepoznate procese. Međutim, ne postoji dokaz za takve procese.

Izazov 250s, strana 191: Najbolji postupak nebi bio mnogo kraći od onoga potrebnog da se opiše 1 u 6000 miliona, ili 33 bita. Holandski i britanski sistemi poštanskih kodova (uključujući i pisma u Holandiji ili Velikoj Britaniji) nisu mnogo daleko od ove vrednosti i zato može da se tvrdi da su veoma efikasni.

Izazov 251s, strana 191: Za složene sisteme, gde postoje brojne nepoznate, uspešnost se jednostavno postiže povećavanjem odgovora. Za svemir kao celinu, broj otvorenih pitanja je dosta mali, kao što će se kasnije pokazati (**Vol. V, strana 238**); u ovoj temi nije u prošlim godinama bilo velikog napretka. Međutim, napredak je jasno merljiv i u ovom slučaju.

Izazov 252s, strana 192: Da li je moguće koristiti temin “potpun” kada se opisuje priroda? Da, moguće je. Ustvari, čovečanstvo nije daleko od potpunog opisa kretanja. Za jasan pregled, pogledajte poslednji deo naše avanture. (**Vol. VI, strana 21**)

Izazov 254s, strana 193: Postoji više kupatila u seriji: toplo kupatilo u svakoj ćeliji oka osetljivoj na svetlost, toplo kupatilo unutar nerva prema mozgu i toplo kupatilo u ćelijama mozga.

Izazov 256s, strana 194: Da

Izazov 258s, strana 198: Čipovi na bazi “tritova” morali bi da budu preoblikovani od nule. To bi bilo rasipanje resursa i prethodnog rada.

Izazov 260d, strana 203: Fizičari tvrde da osobine predmeta, prostor-vremena i interakcija daju najmanji moguć popis. Međutim, ovaj popis je duži od onog kojeg su našli lingvisti! Razlog je to su fizičari pronašli primitive koji se ne pojavljuju u svakodnevnom životu. U određenom smislu, cilj fizičara ograničen je popisom neobjašnjenih pitanja prirode, koji će bit dat kasnije. (**Vol. V, strana 238**).

Izazov 261s, strana 206: Nema ni određen sadržaj, ni jasno navedene granice ni područje primene..

Izazov 262s, strana 206: Nemoguće! To nebi bio pojam, pošto nema sadržaj. Rešenje pitanja mora da bude i biće drugačije. (**Vol. VI, strana 117**)

Izazov 263s, strana 207: Niti jedno. Ovaj paradox pokazuje da "skup svih skupova" ne postoji.

Izazov 264s, strana 207: Najpoznatije je klasa svih skupova koji ne sadrže sebe. To nije skup, već klasa.

Izazov 265d, strana 207: Deljenje kolača je teško. Najprostiji postupak koji su rešili mnogi – ali ne i svi – problemi između N osoba P1...PN je sledeći:

- P1 iseče kolač na N delova,
- P2 do PN odaberu po komad
- P1 zadrži poslednji komad
- P2 ... PN sastave od svojih delova nov kolač.

- Zatim P2...PN ponove algoritam za jednu osobu manje.

Problem je mnogo složeniji ako ponovno sastavljanje nije dopušteno. **Jednostavan** postupak (u konačnom broju koraka) za 3 osobe, korišćenjem devet koraka, objavio je 1944. godine Steinhaus, a **potpun zadovoljavajući** postupak 1960-tih Džon Konvej. Potun zadovoljavajući postupak za 4 osobe nađen je tek 1995. godine; on ima 20 koraka.

Izazov 266s, strana 208: $(x, y) := \{x, \{x, y\}\}$.

Izazov 267s, strana 209: Savet: pokazati da u svakom prebrojivom popisu realnih brojeva nedostaje najmanje jedan broj. To je prvi dokazao Kantor. Njegov način je bio da se napiše popis u decimalnoj ekspanziji, a zatim da se nađe broj koji sigurno nije u popisu. Drugi savet: njegov trik poznat u svetu zove se **dijagonalni argument**.

Izazov 268s, strana 209: Savet: svi realni brojevi ograničeni su nizovima racionalnih brojeva.

Izazov 270s, strana 210: Da, ali samo predviđeno deljenje sa nulom nije dozvoljeno, a brojevi su ograničeni na racionalne i realne.

Izazov 271s, strana 210: Postoji beskrajno veliki broj takozvanih parazitskih brojeva. Najmanji od njih je već veliki: 1016949152542372881355932203389830508474576271186440677966. Ako se u zagonetki zameni broj 6, nalazi se da su najmanja rešenja:

- za 1 je 1,
- za 4 je 102564,
- za 5 je 142857,
- za 8 je 1012658227848
- za 2 je 105263157894736842
- za 7 je 1014492753623188405797
- za 3 je 1034482758620689655172413793 i
- za 9 je 10112359550561797752808988764044943820224719

Najmanje rešenje za broj 6 je daleko od najvećeg u tom popisu.

Izazov 272s, strana 211: Jedan način je dat u predhodnom tekstu: $0 := \emptyset$, $1 := \{\emptyset\}$, $2 := \{\{\emptyset\}\}$ etc.

Izazov 273s, strana 213: Oduzimanje je jednostavno. Sabiranje nije komutativno samo za slučaje kada su umešani beskonačni brojevi: $\omega + 2 \neq 2 + \omega$.

Izazov 274s, strana 213: Primeri su $1 - \varepsilon$ ili $1 - 4\varepsilon^2 - 3\varepsilon^3$.

Izazov 275s, strana 214: Odgovor je 57; navedena literatura daje detalje.

Izazov 276s, strana 215: $2^{2^{22}}$ i $4^{4^{4^4}}$

Izazov 279s, strana 215: Dete je staro minus 0,75 godina, ili minus 9 meseci; prema tome, otac je veoma blizu majke.

Izazov 280s, strana 215: Ovo nije lako pitanje. Prvi netrivijalni brojevi su 7, 23, 47, 59, 167 i 178. Videti kod Robert Matthews, *Maximally periodic reciprocals*, Bulletin of the Institute of Mathematics and its Applications **28**, strane. 147–148, 1992. R. Metjuz je pokazao da broj n za koji $1/n$ daje najviše $n - 1$ decimala u decimalnoj ekspanziji je posebna vrsta prostog broja koji se može izvesti iz takozvanih **Sofi Žermen** prostih brojeva S ; mora biti $n = 2S + 1$, pri čemu i S i $2S + 1$ moraju biti prosti brojevi i gde S mod 20 mora biti 3, 9 ili 11.

Prema tome, prvi brojevi n su 7, 23, 47, 59, 167 i 179 odgovaraju vrednosti za S od 3, 11, 23, 29, 83, i 89. Godine 1992., najveći poznat broj S koji zadovoljava uslove bio je:

$$S = (39051 \cdot 2^{6002}) - 1 \quad (118)$$

Sofi Žermen prost broj od 1812 cifara to jest $3 \bmod 20$. Njega je pronašao Vilfred Keler (Wilfred Keller). Ovaj Sofi Žermen prost broj dovodi do prostog broja n sa decimalnom ekspanzijom koja ima 101812 cifara pre no što počnu da se ponavljaju. Pročitajte vašu omiljenu knjigu iz teorije brojeva da biste saznali više. Interesantno, ali rešenje ovog izazova povezano je takođe sa onim iz **Izazova 271**. Možete li da nađete više?

Izazov 281s, strana 215: Klajn nije pripadao nijednoj grupi. Kao rezultat toga, nekoliko njegovih zlovoljnih studenata zaključilo je da on nije uopšte bio matematičar.

Izazov 282s, strana 215: Berberin ne može da pripadne nijednoj grupi; definicija berberina je prema tome protivrečna i mora da se odbaci.

Izazov 283s, strana 215: Pogledajte veb stranu members.shaw.ca/hdhcubes/cube_basics.htm za više informacija o magičnoj kocki.

Izazov 284d, strana 216: Pokušajte da nadete još jedan, a potom dokažite jedinstvenost na onom poznatom.

Izazov 285x, strana 216: Takav izraz je izведен iz međurezultata $(1 - 2^2)^{-1}$. Rad sa divergentim redovima izgleda apsurdno, ali matematičari znaju kako da izrazu daju određen sadržaj. (Videti Godfrey H. Hardy, *Divergent Series*, Oxford University Press, 1949.) Fizičari često koriste slične izraze u kvantnoj teoriji polja, a da o njima ne razmišljaju.

Izazov 286s, strana 216: Rezultat je povezan sa Rimanovom zeta funkcijom. Za uvod pogledajte veb stranu en.wikipedia.org/wiki/Prime_number.

Izazov 288s, strana 224: "Svi Krićani lažu" je *neistina*, pošto je suprotnost, naime "neki Krićani govore istinu" istina u datom slučaju. Klopka je da je suprotnost izvorne rečenice obično, ali *lažno*, predpostavlja da "svi Krićani govore istinu".

Izazov 289s, strana 225: Iskaz ne može biti neistina zbog prve polovine i konstrukcije sa "ili". Pošto je istina, druga polovina mora biti istina i vi ste andeo.

Izazov 290s, strana 225: Termine "kružno" i "samoreferentno" opisuju dva različita pojma.

Izazov 292s, strana 225: Vanzemaljci ne mogu biti uzrok krugovima u žitu, pošto ne postoje na Zemlji, slično Božić Bati ili duhovima.

Izazov 294s, strana 226: O tome može da se raspravlja; u svakom slučaju definitivno se zna da su oba izraza laži, kao što će se kasnije pokazati. (**Vol. V, strana 74**).

Izazov 295s, strana 226: Ako bi ovaj lažni iskaz bio istina, plivači i ronioci bi takođe umrli, pošto ni njihova koža ne može da diše.

Izazov 296s, strana 226: Podjednako je tačno i da se tvrdi da je Zemlja stvorena pre sto godina, a da su naša okolina i naše sećanje stvoreni u našem mozgu kako bi nas uverili da je Zemlja starija. Teško je opovrgnuti takve besmislice, ali je to moguće. Pogledajte i sledeći izazov.

Izazov 297s, strana 226: Iznenadujuće je teško odbaciti takve besmislice, ako se dobro promisli. Razlog za određeni datum (ili bilo koji drugi datum) nije očigledan. Niti je jasno šta se podrazumeva pod pojmom "stvaranje".

Izazov 299s, strana 226: Ne. Kao što je pokazano u više eksperimenata homeopatija je skup brojnih laži. Na primer, na internetu se prikazuje film o ljudima koji su progutali – bez ikakve štete – stotinak homeopatskih tableta u vreme kada su označene kao "izuzetno opasne kada se uzme prevelika doza". Uzgred, većinu homeopatskih laži stvorila je jedna osoba. Kao i uvek, najuspešnije laži su one koje omogućavaju grupi ljudi da zaradi mnogo para.

Izazov 301s, strana 226: Priča o sijalici izgleda da je tačna. sijalica je veoma slaba, tako da žica neće da ispari.

Izazov 302s, strana 226: Poreklo bi moglo da bude broj osoba prisutnih na tajnoj večeri u Novom Zavetu; ili zaboravljen 13. znak u zodijaku. Ne postoji istina u tom sujeverju. Ustvari, svako sujeverje je laž. Međutim, čuvajte se ljudi koji su ljubomorni na one koji ne mare o predrasudama, i čija reakcija postaje nasilna.

Izazov 303s, strana 227: Bez izuzetaka do sada, svi koji se pretvaraju da su bili stigmatizovani, imali su rane na svojim *dlanovima*. Međutim, na raspeću ekseri su stavljeni kroz zglob, pošto dlan ne može da nosi težinu ljudskog tela: šake bi se pocepale.

Izazov 304s, strana 227: Termin "višestruki svemir" je kako praznoverje tako i laž. Pre svega, to je besmislica. (**Vol. II, strana 200**). Slično je pokušaju da se izvede množina za reč "sve".

Izazov 306s, strana 227: U kojem referentnom sistemu? Kako? Čuvajte se svakog koji izgovara taj izraz: on je varalica.

Izazov 311s, strana 232: Samo nam indukcija omogućava da koristimo sličnosti i da stoga defunišemo pojmove.

Izazov 312s, strana 233: To zavisi od definicije (pojma) božanstva koji se koristi. Na primer, panteizam nema problema.

Izazov 313s, strana 233: Da, kao što ćemo kasnije da otkrijemo. (**Vol. VI, strana 86**).

Izazov 314s, strana 234: Da, pošto posmatranje podrazumeva interakciju.

Izazov 315s, strana 234: Nedostatak unutrašnjih protivrečnosti znači da je pojam valjan kao alat za razmišljanje; pošto naše misli koristimo da opišemo prirodu, matematičko postojanje je specijalizovana verzija fizičkog postojanja, jer je razmišljanje samo po sebi prirođan proces. Zapravo, matematički pojmovi su takođe korisni za opis rada računara i slično. Drugi način je da se naglasi da su svi matematički koncepti izgrađeni od skupova i odnosa ili nekih odgovarajućih njihovih uopštavanja. Ovi osnovni blokovi građenja uzeti su iz fizičkog okruženja. Ponekad je ideja da se izrazi drugačije; mnogi matematičari priznaju da su izvesni matematički pojmovi uzeti direktno iz iskustva, kao što su prirodni brojevi.

Izazov 316s, strana 234: Primeri su Ahil, Odisej, Miki Maus, bogovi u mnogobosatu i duše.

Izazov 318s, strana 236: Toričeli je napravio vakuum u staklenoj cevi oblika U koristeći živu, isti tečni metal koji se koristi u termometrima. Možete li da zamislite kako? I još teže pitanje: odakle je on dobio živu?

Izazov 319s, strana 237: Navođenje da je nešto beskonačno nije uverenje ako je izjava krivotvorena. Primer je iskaz "Postoji beskrajno mnogo komaraca." Ovakva izjava je pogrešna. Druge rečenice nisu krivotvorene, kao što je "Svemir se nastavlja bez granica iza horizonta." Takva izjava je verovanje. Oba slučaja izjava o beskrajnom nisu činjenice.

Izazov 320s, strana 238: Oni nisu ni skupovi ni zbirka tačaka.

Izazov 321s, strana 238: Još uvek ne postoji mogućnost za interakciju svih materija i energije, pošto to uključuje i sebe.

Izazov 322s, strana 242: Postoji samo uopštavanje koje obuhvata ova dva.

Izazov 323s, strana 243: Objasnjenje svemira nije moguće, pošto pojam objasnjenje zahteva mogućnost da se govori o sistemima izvan onih koji se razmatraju. Svemir nije deo većeg skupa.

Izazov 324s, strana 243; Oba mogu zapravo da se posmatraju kao dve strane istog dokaza: Ne postoji drugi izbor, postoji samo jedna mogućnost. Ekvivalentno tome, ostatak prirode pokazuje da posmatranja moraju da budu onakva kakva jesu, pošto sve zavisi od svega.

Izazov 326s, strana 256: Masa je merilo količine energije. "Masa na kvadrat" nema nikakvog smisla.

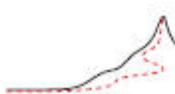
Izazov 329s, strana 258: Obrazac sa $n - 1$ bolje odgovara, Zašto?

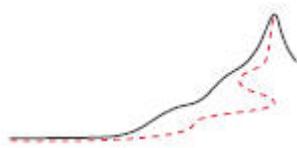
Izazov 332s, strana 258: Ne. Previše su precizna da bi imalo smisla. Postoje samo data kao ilustracija za ponašanje Gausove raspodele. Stvarna izmerena raspodela nije Gausova prema preciznosti koja se podrezumeva u ovim brojevima.

Izazov 333s, strana 259: Oko 0,3 m/s. To nije 0,33m/s, niti 0,333 m/s, a nije ni bilo koji duži niz trojki!

Izazov 335s, strana 263: Usporavanje ide sa **kvadratom** vremena, pošto se svako novo usporavanje dodaje predhodnom.

Izazov 336s, strana 263: Ne, navedene su osobine samo delova svemira. Svemir sam po sebi nema osobina, kao što će se pokazati u zadnjem delu. (**Vol. VI, strana 90**).





BIBLIOGRAFIJA

[...] moi, qui trouve toujours tous les livres trop longs, et surtout les miens [...]

Volter (Voltaire), *Lettre à M. Cideville*.¹

1. Julian Schwinger, L. L. De Raad, K. A. Milton & W. Y. Tsai, *Classical Electrodynamics*, Perseus, 1998. Izvanredan tekst na ovu temu jednog od većih majstora. Videti takođe lepu knjigu sa problemima od Andre Butoli & Jean-Marc Levy-Leblond, *La physique en questions – électricité et magnétisme*, Vuibert, 1999. Citirano na **stranama 17 i 65**.
2. Dobra knjiga o istoriji magnetizma i uzbudjenja koja izaziva je od James D. Livingston, *Driving Force – the Natural Magic of Magnets*, Harvard University Press, 1996. Citirano na **strani 19**.
3. R. Edwards, *Filling station fires spark cars' recall*, New Scientist, strane: 4–5, 4 March 1995. Citirano na **strani 20**.
4. S. Desmet, F. Orban & F. Grandjean, *On the Kelvin electrostatic generator*, European Journal of Physics **10**, strane: 118–122, 1989. Planove za izradu možete takođe da nađete na raznim veb stranicama interneta. Citirano na **strani 20**.
5. F. Steinle, *Exploratives Experimentieren – Georges Dufay und die Entdeckung der zwei Elektrizitäten*, Physik Journal **3**, strane: 47–52, 2004. Citirano na **strani 21**.
6. Za jetkanje Frenklinovog orginalnog gromobrana sa zvonom, videti E. P. Krider, *Benjamin Franklin and lightning rods*, Physics Today **59**, strane: 42–48, 2006. Citirano na **strani 22**.
7. W. Rueckner, *An improved demonstration of charge conservation*, American Journal of Physics **75**, strane: 861–863, 2007. Citirano na **strani 23**.
8. Za više detalja o raznim elektromagnetskim jedinicama, videti standardni tekst od J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, 3rd edition, Wiley, 1998. Citirano na **stranama 26 i 288**.
9. Videti stari ali lep dokument od Richard C. Tolman & T. Dale Stewart, *The electromotive force produced by the acceleration of metals*, Physical Review **8**, strane: 97–116, 1916, Richard C. Tolman & T. Dale Stewart, *The mass of the electric carrier in copper, silver and aluminium*, Physical Review **9**, strane: 164–167, 1917, i noviji ali mnogo precizniji eksperiment od C. F. Kettering & G. G. Scott, *Inertia of the carrier of electricity in copper and aluminum*, Physical Review **66**, strane: 257–267, 1944. (Očigledno američki engleski ispušta “i” iz aluminijuma tokom tog perioda.) Prvi od ovih dokumenata je takođe prikaz predhodnih pokušaja i objašnjava eksperiment detaljno. Drugi dokument pokazuje šta sve treba uzeti u obzir da bi se postigla dovoljna preciznost. Citirano na **strani 30**.
10. Ovaj efekt je prvi izmerio 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. Citirano na **strani 30**.
11. Videti, na primer, C. Schiller, A. A. Koomans ,T. L. van Rooy, C. Schonenberger & H. B. Elswijk, *Decapitation of tungsten field emitter tips during sputter sharpening*, Surface Science Letters **339**, strane: L925–L930, 1996. Citirano na **strani 30**.
12. L. I. Schiff & M. V. Barnhill, *Gravitational-induced electric field near a metal*, Physical Review **151**, strane: 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**, strane: 1049–1052, 1967. Citirano na **strani 31**.
13. J. Lepak & M. Crescimanno, *Speed of light measurement using ping*, elektronski preprint dostupan na veb strani arxiv.org/abs/physics/0201053. Citirano na **strani 30**.

¹ [...]ja, koji uvek nalazim da su sve knjige preduge, pre svega moje [...]

14. Ova priča je objavljena na prednjoj strani *Wall Street Journal* dana 15 decembra 2006 pod naslovom *Firms seek edge through speed as computer trading expands*. Citirano na [strani 30](#).
 15. J. D. Pettigrew, *Electroreception in monotremes*, Journal of Experimental Biology **202**, strane: 1447–1454, 1999. Citirano na [strani 31](#).
 16. Za izvanredan pregled članaka o začuđujućem svetu električnih riba, vidite kod C. D. Hopkins, *Electrical Perception and Communication*, Encyclopedia of Neuroscience **3**, strane: 813–831, 2009. Hopkinsova istraživačka laboratorija može da se nađe na veb strani nbb.cornell.edu. Citirano na [stranama 31 i 269](#).
 17. O potrazi za magnetnim jednopolima vidite veb stranu Particle Data Group, svetsku referencu na pdg.web.cern.ch. Videti takođe H. Jeon & M. Longo, *Search for magnetic monopoles trapped in matter*, Physical Review Letters **75**, strane: 1443–1447, 1995. Videti takođe S. Goldhaber & W. P. Trower, *Resource letter MM-1: magnetic monopoles*, American Journal of Physics **58**, strane: 429–439, 1990. Citirano na [strani 33](#).
 18. Pierre de Maricourt, *Tractatus de magnete*, 1269. Citirano na [strani 32](#).
 19. R. Wiltschko & W. Wiltschko, *Magnetic Orientation in Animals*, Springer, 1995. Citirano na [strani 35](#).
 20. M. Lauwers & al., *An iron-rich organelle in the cuticular plate of avian hair cells*, Current biology **23**, strane: 924–929, 2013. Ovaj dokument predstavlja najnovijeg kandidata za lokaciju osnovnog magnetnog čula kod ptica. Citirano na [strani 35](#).
 21. I. A. Solov'yov, K. Schulten & W. Greiner, *Nur dem Schnabel nach?*, Physik Journal **9**, strane: 23–28, 2010. Citirano na [strani 35](#).
 22. Odnos momenta količine kretanja L prema magnetnom momentu M je:
- $$\frac{L}{M} = \frac{2m}{e} \cdot \frac{1}{g} \quad (119)$$
- gde je e naielektisanje elektrona i m njegova masa. Obe veličine L i M mogu da se izmere. Prva merenja objavljena su sa vrednošću 1 za g , jer su verovatno autori očekivali rezultat. U kasnijim eksperimentima de Haas je našao drugačije rezultate. Merenja drugih istraživača dala su vrednosti bliže 2 nego li 1, posmatranje koje se može razumeti samo uz otkriće spina. Izvorna izdanja su A. Einstein & W. J. de Haas, *Proefondervinderlijk bewijs voor het bestaan der moleculaire stroomen van Ampère*, Koninklijke Akademie der Wetenschappen te Amsterdam, Verslagen **23**, p. 1449, 1915, i Einstein & W. J. de Haas, *Experimental proof of the existence of Ampere's molecular currents*, Koninklijke Akademie der Wetenschappen te Amsterdam, Proceedings **18**, strana 696, 1916. Citirano na [strani 38](#).
23. S. J. Barnett, *Magnetization by rotation*, Physical Review **6**, strane: 171–172, 1915, i S. J. Barnett, *Magnetization by rotation*, Physical Review **6**, strane: 239–270, 1915. Citirano na [strani 39](#).
 24. Vidite kod J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, 3rd edition, Wiley, 1998, ili takođe kod R. F. Harrington, *Time Harmonic Electromagnetic Fields*, McGraw-Hill, 1961. Citirano na [stranama 42 i 65](#).
 25. Najbolja dostupna knjiga o mozgu je ona od Eric R. Kandel, James H. Schwartz & Thomas M. Jessell, *Principles of Neural Science*, fifth edition, McGraw-Hill, 2000. Veb strana koja pruža uvod u fiziologiju mozga je suhep.phy.syr.edu/courses/modules/MM/brain/brain.html. Citirano na [strani 42](#).
 26. N. Salingaros, *Invariants of the electromagnetic field and electromagnetic waves*, American Journal of Physics **53**, strane: 361–363, 1985. Citirano na [strani 43](#).
 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**, strane: 500–544, 1952. Ovaj poznati dokument iz teorijske biologije doneo je autoru Nobelovu nagradu za medicinu 1963. Citirano na [strani 44](#).
 28. Vidite izvanredan pregled članka od T. Heimburg, *Die Physik von Nerven*, Physik Journal **8**, strane: 33–39, 2009. Videti takođe S. S. L. Andersen, A. D. Jackson & T. Heimburg, *Towards a thermodynamic theory of nerve pulse propagation*, Progress in Neurobiology **88**, strane: 104–113,

2009, veb stranu membranes.nbi.dk, i tekst Thomas Heimburg, *Thermal Biophysics of Membranes*, Wiley-VCH, 2007. Citirano na **strani 44**.

29. A.C. de la Torre, *v → c in 1820?*, European Journal of Physics **20**, strane: L23–L24, March 1999. Citirano na **strani 45**.
30. Vidite U. Fantz & A. Lotter, *Blitze zum Anfassen*, Physik in unserer Zeit **33**, strane: 16–19, 2002. Više informacija je dostupno na veb strani www.physik.uni-augsburg.de/epp/. Citirano na **strani 51**.
31. R. H. Tyler, S. Maus & H. Luhr, *Magnetic signal due to ocean tidal flow identified in satellite observations*, Science **299**, strane: 239–241, 2003. Film snimljen prema podacima može da se vidi na veb strani www.tu-braunschweig.de/. Citirano na **strani 51**.
32. H. Montgomery, *Unipolar induction: a neglected topic in the teaching of electromagnetism*, European Journal of Physics **20**, strane: 271–280, 1999. Citirano na **strani 53**.
33. O stanju geodinama, vidite članak od P. H. Roberts & G. A. Glatzmaier, *Geodynamo theory and simulations*, Reviews of Modern Physics **72**, strane: 1081–1123, 2000. Stariji članak je od R. Jeanloz & B. Romanowicz, *Geophysical dynamics at the center of the Earth*, Physics Today strane: 22–27, avgust 1997. Citirano na **stranama 53 i 163**.
34. A. Yazdani, D. M. Eigler & N.D. Lang, *Off-resonance conduction through atomic wires*, Science **272**, strane: 1921–1924, 28 juni 1996. Za aluminijum, zlato, oovo, niobium, kao i za uticaje na hemijske osobine, vidite Elke Scheer, *The signature of chemical valence in the electric conduction through a single-atom contact*, Nature **394**, strane: 154–157, 9. juli 1998. Citirano na **strani 56**.
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**, strane: 963–970, 2003. Citirano na **strani 57**.
36. Videti kod L. Kowalsk i, *A myth about capacitors in series*, The Physics Teacher **26**, strane: 286–287, 1988, i kod A. P. French, *Are the textbook writers wrong about capacitors?*, The Physics Teacher **31**, strane: 156–159, 1993. Citirano na **strani 57**.
37. Razmatranje o različitim električnim odnosima neodređenosti između struje i nakelektrisanja, može se naći kod Y-Q. Li & B. Chen, *Quantum theory for mesoscopic electronic circuits and its applications*, preprint dostupan na veb strani arxiv.org/abs/cond-mat/9907171. Citirano na **strani 58**.
38. Trezvena, ali optimistička ocena, bez jeftinog optimizma tabloidnog novinarstva, je kod R. W. Keyes, *Miniaturization of electronics and its limits*, IBM Jounal of Research and Development **32**, strane: 84–88, 1988. U njegovoj poslednjoj slici predviđa se da će donja granica kT za energiju rasutu logičkim operacijama biti dostignuta oko 2015. godine. Citirano na **strani 59**.
39. J. A. Heras, *Can Maxwell's equations be obtained from the continuity equation?*, American Journal of Physics **75**, strane: 652–657, 2007. Citirano na **stranama 60, 63, 72 i 177**.
40. Sličan zaključak je osnova za Friedrich W. Hehl & Yuri N. Obukov, *Foundations of Classical Electrodynamics – Charge, Flux and Metric*, Birkhauser 2003. Citirano na **strani 60**.
41. Za nepostojanje zatvorenih linija magnetnog polja u opštem slučaju, vidite kod J. Slepian, *Lines of force in electric and magnetic fields*, American Journal of Physics **19**, strane: 87–90, 1951, M. Lieberherr, *The magnetic field lines of a helical coil are not simple loops*, American Journal of Physics **78**, strane: 1117–1119, 2010, F. Herrmann & R. von Baltz, *Altlasten der Physik (128): Geschlossene magnetische Feldlinien*, Praxis der Naturwissenschaften: Physik in der Schule **60**, strane: 48–49, 2011. Citirano na **strani 62**.
42. Oleg D. Jefimenko, *A relativistic paradox seemingly violating conservation of momentum law in electromagnetic systems*, European Journal of Physics **20**, strane: 39–44, 1999. Citirano na **strani 64**.
43. H. Van Dam & E. P. Wigner, *Classical relativistic mechanics of interacting point particles*, Physical Review **136B**, strane: 1576–1582, 1965. Citirano na **strani 64**.
44. Mark D. Semon & John R. Taylor, *Thoughts on the magnetic vector potential*, American Journal of Physics **64**, strane: 1361–1369, 1996. Citirano na **stranama 65 i 66**.

45. Jean Sivardiere, *Simple derivation of magnetic vector potentials*, European Journal of Physics **14**, strane: 251–254, 1993. Citirano na [strani 66](#).
46. T. T. Wu & C. N. Yang, 1975, *Concept of nonintegrable phase factors and global formulation of gauge fields*, Physical Review D**12**, strane: 3845–3857, Citirano na [strani 68](#).
47. Videti [Ref. 8](#) ili A. M. Stewart, *Angular momentum of the electromagnetic field: the plane wave paradox explained*, European Journal of Physics **26**, strane: 635–641, 2005. Citirano na [strani 70](#).
48. Elektrodinamički tekst u potpunosti napisan pomoću (matematičkih) oblika je od Kurt Meetz & Walter L. Engl, *Elektromagnetische Felder – mathematische und physikalische Grundlagen*, Springer, 1980. Citirano na [strani 68](#).
49. Videti na primer razmatranje M. C. Corballis & I. L. Beale, *On telling left from right*, Scientific American **224**, strane: 96–104, mart 1971. Citirano na [strani 71](#).
50. Godine 1977., Claus Montonen i David Olive pokazali su da kvantna teorija dopušta dvojnu transformaciju čak i sa prisustvom materije, ako postoje posebni tipovi magnetnih jednopola, takozvanih *diona*. Osnovni dokument je D. Olive & C. Montonen, *Magnetic monopoles as gauge particles*, Physics Letters **72B**, strane: 117–120, 1977. Mnogi drugi dokumenti napravljeni su prema njemu; međutim, nikada se nije pojavila nikakva eksperimentalna podrška. Citirano na [strani 72](#).
51. Wolfgang Rindler, *Essential Relativity – Special, General, and Cosmological*, revised 2nd edition, Springer Verlag, 1977, page 247. Postoji isto tako lep dokument od M. Le Bellac & J. -M. Levy-Leblond, *Galilean electrodynamics*, Nuovo Cimento B **14**, p. 217, 1973, u kojem se objašnjavaju mogućnosti ali takođe i problemi koji se pojavljuju kada se pokušava da se teorija odredi nerelativistički. Citirano na [strani 72](#).
52. L. -C. Tu, J. Luo & G. T. Gilles, *The mass of the photon*, Reports on Progress of Physics **68**, strane: 77–130, 2005. Citirano na [strani 73](#).
53. Sistem za pisanje samo pomoću misli opisan je u mnogim dokumentima, kao kod B. Blankertz, F. Losch, M. Krauledat, G. Dornhege, G. Curio & K. - R. Muller, *The Berlin Brain-Computer Interface: accurate performance from first session in BCI-naive subjects*, IEEE Transactions on biomedical engineering **55**, strane: 2452–2462, 2008. Za više informacija vidite veb stranu www.bbci.de/. Citirano na [strani 74](#).
54. Vidite, na primer, dokument od I. Martinović, D. Davies, M. Frank, D. Perito, T. Ros & D. Song, *On the feasibility of side-channel attacks with brain-computer interfaces*, predstavljen na USENIX Security, 2012, nalazi se na veb strani www.usenix.org/conference/usenixsecurity12. Citirano na [strani 74](#).
55. D. Singleton, *Electromagnetic angular momentum and quantum mechanics*, American Journal of Physics **66**, strane: 697–701, 1998, Citirano na [strani 74](#).
56. Jačina magnetnog pola razmatrana se u udžbeniku J. C. Maxwell, A. Sommerfeld, J. D. Jackson i drugi. Citirano na [strani 75](#).
57. C. Hoyos, N. Sircar & J. Sonnenschein, *New knotted solutions of Maxwell's equations*, J. Phys. A: Math. Theor. **48**, strana. 255204, 2015, preprint je na veb strani arxiv.org/abs/1502.01382. Dokument takođe pruža kratak pregled novijih istraživanja. Citirano na [strani 75](#).
58. Za zadržljujući opis istorije ideja o svetlosti, vidite David Park, *The Fire Within the Eye: a Historical Essay on the Nature and Meaning of Light*, Princeton University Press, 1997. Za primer kompleksne istorije optike, vidite poznati tekst od Alhazena ili Ibn al-Haytham, *Book of Optics* 1021. Međutim, nijedna veb strana na arapskom jeziku ne omogućava čitanje teksta, a članci u arapskoj Wikipediji o ovoj temi mnogo su kraći od francuskih ili engleskih. Zaista, kao i mnogi drevni mislioci Srednjeg istoka, Alhazen (oko 965. Basra – 1039. Cairo) poznatiji je u Evropi nego u domaćem okruženju. Prevod *Book of Optics* na latinski može da se pročita na veb strani Univerzitza u Strasburu imgbase-scd-ulb.u-strasbg.fr/displayimage.php?album=44&pos=0. Oko 1000-te godine Alhazen je izveo više eksperimanata sa prelamanjem svetlosti, kao što je to učinio Ptolomej skoro sto godina pre njega. Rezultati merenja Ptolomeja još uvek su poznati. Međutim, ni jedan istraživač nije pronašao Snell-Descartes obrazac za prelamanje. Alhazen je čak poznavao i sinusnu funkciju; uprkos tom znanju, on

nije pronašao obrazac. Za više detalja vidite kod E. Kirchner, *Wie ontdekte de wet van Snellius?*, Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde **81**, strane: 198–201, 2015. Citirano na **strani 77**.

59. Vidite tekst od Raymond L. Lee & Alistair B. Fraser, *The Rainbow Bridge: Rainbows in Art, Myth, and Science*, Pennsylvania State University Press, 2000. Poglavlje se može naći na veb strani www.usna.edu/Users/oceano/raylee/RainbowBridge/Chapter_8.html. Citirano na **strani 81**.
60. Za detaljna objašnjenja o višestrukim dugama, vidite veb stranu www.atoptics.co.uk/fz696.htm. Za lepu zbirku slika vidite na www.flickr.com/groups/supernumeraryrainbows/. Izvanredan članak i dugama i uticaju oblika kapljica na njih, sa lepim fotografijama, graficima i crtežima, napisali su 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**, strane: 1–6, 2011. Oni su između ostalog, pokazali da pljosnate kišne kapi izazivaju pljosnate lukove. Citirano na **stranama 81 i 101**.
61. Lep eksperiment sa prorezom objavili su 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**, strane: 594–595, 18 april 1991, i u dužoj verziji 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**, strane: 149–152, 1991. Rezultati su takođe objavljeni u brojnim naučnim časopisima. Citirano na **strani 81**.
62. Skorašnja merenja učestanosti svetlosti predstavljaju Th. Udem, A. Huber, B. Gross, J. Reichert, M. Prevedelli, M. Weitz & T.W. Hausch, *Phasecoherent measurement of the hydrogen 1S–2S transition frequency with an optical frequency interval divider chain*, Physical Review Letters **79**, strane: 2646–2649, 1997. Drugi dokument je od 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**, strane: 4960–4963, 21. juni 1999. Citirano na **strani 83**.
63. Za otkriće takve metode, češlja učestanosti, Theodor Hansch i John Hall dobili su zajedno sa Roy Glauber, Nobelovu nagradu za fiziku 2005. godine. Videti kod John L. Hall & Theodor W. Hansch, *History of optical comb development*, u ediciji Jun Ye & Steven T. Cundiff, *Femtosecond Optical Frequency Comb: Principle, Operation, and Applications*, Springer, 2004. Citirano na **strani 83**.
64. M. Burresi, D. van Osten, T. Kampfrath, H. Schoenmaker, R. Heideman, Leinse & L. Kuipers, *Probing the magnetic field of light at optical frequencies*, Science Express October 2009. Citirano na **strani 83**.
65. K. L. Kelly, *Color designations for colored lights*, Journal of the Optical Society of America **33**, strane: 627–632, 1943. Citirano na **strani 86**.
66. O uzorcima polarizacije i kako ih koriste insekti, videti kod K. Pfeiffer & U. Homberg, *Coding of azimuthal directions via time-compensated combination of celestial compass cues*, Current Biology **17**, strane: 960–965, 2007. Citirano na **stranama 88 i 311**.
67. Najbolji uvod u iluzije su veb strane Andrew Young mintaka.sdsu.edu/GF/mintaka/mirintro.html. (Videti takođe veb strane mintaka.sdsu.edu/GF/bibliog/alphindex.html i mintaka.sdsu.edu/GF/bibliog/toc.html.) On objašnjava više tipova koji postoje: inferiorne iluzije, superiorne iluzije, lažne iluzije, iluzije Wegener-ovog tipa itd, a isto daje više referenci koje jasno pokazuju za koje su data tačna objašnjenja, a za koja netačna. Još uvek ne postoji savremeni članak o ovoj temi. Videti isto tako A. T. Young, G.W. Kattawar & P. Parviainen, *Sunset science I – the mock mirage*, Applied Optics **36**, strane: 2689–2700, 1997. Za radoznali pristup videti G. Horvath, J. Gal & R. Wehner, *Why are water-seeking insects not attracted by mirages? The polarization pattern of mirages*, Naturwissenschaften **83**, strane: 300–303, 1997. Citirano na **strani 88**.
68. W. K. Haidinger, *Über das direkte Erkennen des polarisierten Lichts*, Poggendorf's Annalen **63**, strane: 29–39, 1844, W. K. Haidinger, *Beobachtung des Lichtpolarisationsbüschels in geradlinig polarisiertem Lichte*, Poggendorf's Annalen **68**, strane: 73–87, 1846, W. K. Haidinger, *Dauer des Eindrucks der Polarisationsbüschel auf der Netzhaut*, Poggendorf's Annalen **93**, strane: 318–320, 1854. Citirano na **strani 88**.
69. Vidite poglavje o polarizaciji koje je dotakao Marcel G. J. Minnaert, *Light and Colour in the Outdoors*, Springer, 1993, ili orginalnu seriju knjiga od Marcel G. J. Minnaert, *De natuurkunde van 't*

vrije veld, Thieme & Cie, 1937. Za više detalja, vidite G. P. Mission, *Form and behaviour of Haidinger's brushes*, Ophthalmology and Physiological Optics **137**, strane: 392–396, 1993, ili kod J. Grebe-Ellis, *Zum Haidinger-Büschel*, 2002, na poučnoj veb strani didaktik.physik.hu-berlin.de/forschung/optik/download/veroeffentlichungen/haidinger.pdf. O dvolomnosti u oku, videti L. Bour, *Een eigenaardige spelling der natuur*, Nederlands tijdschrift voor natuurkunde **67**, strane: 362–364, decembar 2001. Posebno, fotografija oka korišćenjem linearne polarizovanog osvetljenja i snimljena kroz analizator prikazuje crni krst u zenici. Citirano na **strani 88**.

70. T. W. Cronin & J. Marshall, *Patterns and properties of polarized light in air and water*, Philosophical Transactions of the Royal Society B **366**, strane: 619–626, 2011, besplatno je dostupno na veb strani rstb.royalsocietypublishing.org. Citirano na **strani 89**.
71. Edward M. Purcell, *Electricity and Magnetism – Berkeley Physics Course Volume 2*, McGraw–Hill, 1984. Citirano na **strani 90**.
72. To je bila serija knjiga od dvadeset delova od Aaron Bernstein, *Naturwissenschaftliche Volksbücher*, Duncker, 1873–1874. Mladi Ajnštajn čitao je ove knjige između 1892. i 1894. godine “ne dišući”, kao što je kasnije pisao. Još uvek može da se pročita u mnogim bibliotekama. Citirano na **strani 93**.
73. O načinu levitacije i manipulacije malim staklenim perlama pomoću lasera, vidite članak od D. McGloin, *Optical tweezers: 20 years on*, Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences **364**, strane: 3521–3537, 2006. Fotografije prikazane na **strani 92** su od T. Li, S. Kheifets, D. Medellin & M. G. Raizen, *Measurement of the instantaneous velocity of a Brownian particle*, Science **328**, strane: 1673–1675, 2010, and T. Li, S. Kheifets & M. G. Raizen, *Millikelvin cooling of an optically trapped microsphere in vacuum*, Nature Physics **7**, strane: 527–530, 2011. Citirano na **strani 93**.
74. Prvo ispravno objašnjenje svetlosne vetrenjače dao je Osborne Reynolds, *On certain dimensional properties of matter in the gaseous state*, Royal Society Philosophical Transactions Part 2, 1879. Najbolje razmatranje dato je na veb strani Phil Gibbs, u često postavljanim pitanjima usenet news grupe sci.physics/, dostupnih na www.desy.de/user/projects/Physics/General/LightMill/lightmill.html. Film o obrtnom radiometru nalazi se na commons.wikimedia.org/. Citirano na **strani 94**.
75. P. Lebedew, *Untersuchungen über die Druckkräfte des Lichtes*, Annalen der Physik **6**, strane: 307–458, 1901. Lebedev je potvrdio Keplerove zaključke da je pritisak svetlosti osnova za promenu smera repa komete kada kruži oko Sunca. Citirano na **page 94**.
76. P. Galajda & P. Ormos, Applied Physics Letters **78**, strana. 249, 2001. Citirano na **strani 94**.
77. Kratak pregled je dat kod Miles Padgett & Les Allen, *Optical tweezers and spanners*, PhysicsWorld estrane: 35–38, September 1997. Orginalan dokumenti Ashkinove grupe su 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, i A. Ask in, J. M. Dziedzic & T. Yamane, *Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams*, Nature **330**, p. 769, 1987. Pedagoško objašnjenje o optičkim ključevima za matice, zajedno sa načinom kako da se naprave, može da se nađe kod 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**, strane: 271–276, 2001, i kod 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**, strane: 26–35, 1999. Citirano na **stranama 94 i 95**.
78. R. A. Beth, *Mechanical detection and measurement of the angular momentum of light*, Physical Review **50**, strana. 115, 1936. Za savremena merenja, vidite 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**, strane: 52–54, 1997, i M. E. J. Friese, T. A. Nieminen, N. R. Heckenberg & H. Rubinsztein-Dunlop, *Optical torque controlled by elliptical polarization*, Optics Letters **23**, strane: 1–3, 1998. Videti takođe 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*, Zbornik radova Royal Society London A **82**, strane: 560–567, 1908. Citirano na **strani 95**.
79. Fotografije su od 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**, strane: 3077–3084, 2009. Citirano na **stranama 95 i 311**

80. A. Valenzuela, G. Haerendel, H. Foppl, F. Melzner, H. Neus s, E. Rieger, J. Stocker, O. Bauer, H. Hofner & J. Loidl, *The AMPTE artificial comet experiments*, Nature **320**, strane: 700–703, 1986. Citirano na **strani 95**.
81. Videti tekst na latinskom od Dietrich von Freiberg, *De iride et radialibus impressionibus*, c. 1315. Citirano na **strani 96**.
82. J. Walker, *Multiple rainbows from single drops of water and other liquids*, American Journal of Physics **44**, strane: 421–433, 1976, kai i njegovo *Howto create and observe a dozen rainbows in a single drop of water*, Scientific American **237**, strane: 138–144, 1977. Videti takođe K. Sassen, *Angular scattering and rainbow formation in pendant drops*, Journal of the Optical Society of America **69**, strane: 1083–1089, 1979. Lep dokument sa obrascima za uglove svih duga je knjiga od E. Willerding, *ZurTheorie von Regenbögen, Glorien und Halos*, 2003, preprint na internetu. Ona takođe daje izvorni program za simulaciju duga na računaru. Citirano na **strani 97**.
83. Postoje i drugi načini da se zeleni zrak posmatra duže vreme, naime kada se iluzija pojavi pri zalasku sunca. Objasnjenje sa fotografijom u boji sadržano je kod M. Vollmer, *Gespiegelt in besonderen Düften ... – Oasen, Seeungeheuer und weitere Spielereien der Fata Morgana*, Physikalische Blatter **54**, strane: 903–909, 1998. Citirano na **strani 98**.
84. Nastala boja Sunčevog ruba je jasno prikazana na veb strani Andrew Young-a aty.sdsu.edu/explain/simulations/std/rims.html. Njegova veb strana mintaka.sdsu.edu/GF nudi najbolje objašnjenje zelenog bleska, uključujući razne vrste koje postoje (objašnjeno na veb strani aty.sdsu.edu/papers/Zenit/glance.html), kako da ih posmatrate i uključuje brojne prateće fizičke efekte. Dostupni su detaljna simulacija i opširan materijal. Videti takođe i dokument od A. T. Young, *Sunset science – III. Visual adaptation and green flashes*, Journal of the Optical Society of America A **17**, strane: 2129–2139, 2000. Citirano na **strani 98**.
85. Vidite divnu veb stranu od Cowley o atmosferskoj optici, www.atoptics.co.uk. Ili knjigu od David K. Lynch & William Livingston, *Color and Light in Nature*, second edition, Cambridge University Press, 2001. Oni su osavremenili zaprepašćujuće boje u prirodi – kao što su, na primer, oreol oko Meseca ili Sunca, ili boje senki – što je započeto lepom i klasičnom knjigom koji smo pomenuli ranije (**Vol. I, strana 81**), od Marcel G. J. Minnaert, *Light and Colour in the Outdoors*, Springer, 1993, što je osavremenjena verzija na temeljima divne izvorne serije knjiga od Marcel G. J. Minnaert, *De natuurkunde van 't vrije veld*, Thieme & Cie, 1937. Citirano na **strani 98**.
86. O boji ozonaskog sloja viđenog u zoru i o boji neba uopšte, vidite G. Hoeppe, *Die blaue Stunde des Ozons*, Sterne und Weltraum strane: 632–639, avgust 2001, a takođe i njegovu obimniju knjigu Gotz Hoeppe, *Blau: Die Farbe des Himmels*, Spektrum Akademischer Verlag, 1999, koja je dostupna i na engleskom jeziku kao proširena revizija Gotz Hoeppe, *Why the Sky is Blue: Discovering the Color of Life*, Princeton University Press, 2007. Ovaj lep dokument kazuje takođe zbog čega su bakterije bile suština za stvaranje boje neba. Citirano na **strani 98**.
87. Divan *RGB Color Atlas* iz 2011. godine od Tauba Auerbach predstavljen je na njegovoj zadivljujućoj veb strani taubaauberbach.com/view.php?id=286&alt=698. Knjiga je izdata zajedno sa Daniel E. Kelm. Ustvari, oni su napravili tri takve knjige, sa spinovima u različitim smerovima, kako je prikazano na veb strani. Citirano na **strani 98**.
88. Ovo poznato otkriće je od Brent Berlin & Paul Kay, *Basic Color Terms: Their Universality and Evolution*, University of California Press, 1969. Ukratko je prikazano stanje njihovog višedecenijskog **istraživanja boja sveta** na veb strani www1.icsi.berkeley.edu/wcs. Naravno postoje i studije koje su u toku kako bi se našla moguća odstupanja; ali osnovna struktura je čvrsta kao što je pokazano u konferencijskom zapisniku C. L. Hardin & Luisa Maffi, *Colour Categories in Thought and Language*, Cambridge University Press, 1997. Citirano na **strani 99**.
89. Za detaljnu diskusiju o različitim brzinama vezanim za nizove talasa, vidite klasičan tekst od Louis Brillouin, *Wave Propagation and Group Velocity*, Academic Press, New York, 1960. On detaljno proširuje temu koju je raspravljao Arnold Sommerfeld, *Über die Fortpflanzung des Lichtes in dispergierenden Medien*, Annalen der Physik, 4th series, **44**, strane: 177–202, 1914. Vidite takođe Arnold Sommerfeld, *Optik*, Dietrichssche Verlagsbuchhandlung, Wiesbaden 1950, section 22. Dostupan je takođe prevod na engleski je Arnold Sommerfeld, *Lectures on Theoretical Physics: Optics*, 1954. Citirano na **stranama 102, 103 i 104**.

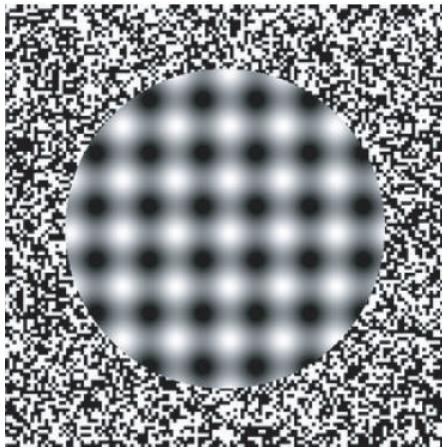
90. Promjena brzine grupe u vlaknima sada je čak moguća i na zahtev, kako je pokazao M. Gonzalez-Herraez, K. -Y. Song & L. Thevenaz, *Optically controlled slow and fast light in optical fibers using stimulated Brillouin scattering*, Applied Physics Letters **87**, strana. 081113, 2005. Oni su prikazali brzinu grupe od $0.24c$ do plus beskonačno i unazad, do negativnih vrednosti. Drugi eksperiment su izveli S. Chu & S. Wong, *Linear pulse propagation in an absorbing medium*, Physical Review Letters **48**, strane: 738–741, 1982. Vidite takođe S. Chu & D. Styer, *Answer to question #52. Group velocity and energy propagation*, American Journal of Physics **66**, strane: 659–661, 1998. Drugi primer je opisala 1993. godine grupa Raymond Chiao za slučaj nekih nelinearnih materijala u R. Chiao, P. G. Kwait & A. M. Steinberg, *Faster than light?*, Scientific American **269**, strana. 52, avgust 1993., i R. Y. Chiao, A. E. Kozhekin & G. Kurizki, *Tachyonlike excitations in inverted two-level media*, Physical Review Letters **77**, strane: 1254–1257, 1996. Za još sličnih naprava za eksperimente nepravilnog rasipanja u gasovitom cezijumu, vidite L. J. Wang, Kuzmich & A. Dogarin, *Gain-assisted superluminal light propagation*, Nature **406**, strane: 277–279, 20. juli 2000.. Citirano na **strani 102**.
91. G. Nimtz, A. Enders & H. Spieker, Journal de Physique I (Paris) **4**, strana. 565, 1994. Na nesreću, izgleda da je Nimtz lično verovao da je on preneo energiju ili signale brže od svetlosti; njemu su pomogle često loše pripremljene kritike njegovog dobro osmišljenog eksperimenta. Vidite A. Enders & G. Nimtz, Physikalische Blatter **49**, p. 1119, decembar 1993., i slab odgovor u Physikalische Blatter **50**, strana 313, april 1994.. Vidite takođe M. Steinberg, Journal de Physique I (Paris) **4**, strane 1813, 1994., A.M. Steinberg, P. G. Kwiat & R. Y. Chiao, Physical Review Letters **71**, strane: 708–711, 1993, i Ranfagni, P. Fabeni, G. P. Pazzi & D. Mugnai, Physical Review E **48**, strana 1453, 1993. Citirano na **strani 104**.
92. Terletskii, *Paradoxes in the Theory of Relativity*, Plenum Press, 1968. Citirano na **strani 104**.
93. Vidite lepo objašnjenje u Kirk T. McDonald, *Negative group velocity*, American Journal of Physics **69**, strane: 607–614, 2001. Citirano na **strani 104**.
94. Kratak pregled svih dokaza kretanja etera date je u 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**, strane: 167–178, 1955. Stariji tekst je H. Witte, Annalen der Physik **26**, strana 235, 1908. Citirano na **strani 105**.
95. Ustорија pojma vakuuma može da se nađe u knjizi E. Grant, *Much Ado About Nothing*, Cambridge University Press, 1981, i u opširnom referentnom tekstu od 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. Razni modeli etera – točkovi, cevi, vrtlozi – predlagani u devetnaestom veku, odbačeni su iz različitih razloga. Pošto je većina modela objašnjavala električna i magnetna polja kao kretanje nekih subjekata, bilo je zaključeno da brzina svetlosti zavisi od električnih i magnetnih polja. Jedna vrsta polja obično je objašnjavana kao linearno kretanje subjekata, druga vrsta kao obrtno i oscilatorno kretanje; obe podele su moguće. Kao posledica toga, eter bi morao da bude neki čudan fluid koji savršeno teče, ali koji se opire obrtanju zapreminskih elemenata, kao što je 1839. godine zaključio McCulloch. Međutim, eksperimenti su pokazali da brzina svetlosti u vakuumu ne zavisi od jačine elektromagnetskog polja. Vrtlozi su odbačeni pošto je nađeno da su u stvarnom svetu vrtlozi nestabilni. Svi modeli su pretpeli zadnji udarac kada nisu uspeli da zadovolje zahteve specijalne teorije relativnosti. Citirano na **strani 105**.
96. M. von Laue, *Zur Thermodynamik der Interferenzerscheinungen*, Annalen der Physik **20**, strane: 365–378, 1906. Citirano na **strani 106**.
97. Vidite na primer, pregled od L. C. Tu, J. Luo & G. T. Gillies, *The mass of the photon*, Reports on Progress in Physics **68**, strane: 77–130, 2005. Citirano na **strani 106**.
98. Da biste naučili o geometrijskoj fazi u optici, vidite 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**, strane: 3410–3414, 1999, E. J. Galvez & C. D. Holmes, *Geometric phuse of optical rotators*, Journal of the Optical Society of America **16**, strane: 1981–1985, 1999, kao i razna dokumenta od Enrique Galvez. Vidite takođe dokument R. Bhandari, *Geometric phase in interference experiments*, Current Science **67**, strane: 224–230, 1994. Citirano na **stranama 107 i 274**.
99. Korisna zbirka istorijskih dokumenata je od Frank Wilczek & Alfred Shapere, eds., *Geometric Phases in Physics*, World Scientific, 1989. Vidite takođe živopisni dokument od M. Berry, *Pancharatnam*,

virtuoso of the Poincaré sphere: an appreciation, Current Science **67**, strane: 220–223, 1994. Citirano na **strani 108**.

100. Stephen G. Lipson, David S. Tannhauser & Henry S. Lipson, *Optical Physics*, Cambridge University Press, 1995. Citirano na **strani 108**.
101. Orginalan dokument je od J. F. Nye & M. V. Berry, *Dislocations in wave trains*, Zbornik radova Royal Society A **336**, strane: 165–190, 1974. Novi kratki pregled je M. V. Berry, *Exploring the colours of dark light*, New Journal of Physics **4**, strane: 74.1–74.14, 2002, koji je besplatan na veb strani www.njp.org. Citirano na **strani 109**.
102. M. Arrayas & J. L. Trueba, *Electromagnetic torus knots*, preprint na arxiv.org/abs/1106.1122. Citirano na **strani 109**.
103. Postoji mnogo dobrih uvoda u optiku u svakoj biblioteci. Dobar uvod koji objašnjava osnovne pojmove korak po korak je odgovarajuće poglavlje u knjizi fizike od Eric Mazur, dostupno na internetu; jednog dana će ga objaviti Prentice Hall. Citirano na **strani 111**.
104. Dat je dobar pregled pronalaska i života Fritsa Zernika kod Menno van Dijk, *Ken uw klassieken: hoe Frits Zernike fasecontrast ontdekte*, Nederlands tijdschrift voor natuurkunde **71**, strane: 194–196, June 2005. Citirano na **strani 111**.
105. Vidite njegovu veb stranu www.cie.co.at/cie. Citirano na **strani 113**.
106. 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**, strane: 173–199, maj 1999. Citirano na **strani 113**.
107. On se seća ove epizode iz 1933. godine u dokumentu M. Planck, *Mein Besuch bei Adolf Hitler*, Physikalische Blatter p. 143, 1947. Citirano na **strani 113**.
108. Slike predmeta i crveno usijanoj peći i na sobnoj temperaturi prikazane su takođe kod C. H. Bennett, *Demons, engines and the second law*, Scientific American **255**, strane: 108–117, novembar 1987. Citirano na **strani 114**.
109. Ukoliko želite da pročitate više o ovoj temi, vidite klasičan tekst od Warren J. Smith, *Modern Optical Engineering: the Design of Optical Systems*, 3rd edition, McGraw-Hill, 2000. Glavna istorijska referenca je od R. Clausius, *Über die Concentration von Wärme und Lichtstrahlen und die Gränzen ihrer Wirkung*, Poggendorff's Annalen der Physik **121**, strane: 1–4, 1864. Citirano na **stranama 115 i 156**.
110. Izmerene vrednosti i opsezi fizičkih veličina piikupljeni su kod Horst Volz & Peter Ackermann, *Die Welt in Zahlen*, Spektrum Akademischer Verlag, 1996. Citirano na **strani 117**.
111. Vidite, na primer, K. Codling & L. J. Frasinski, *Coulomb explosion of simple molecules in intense laser fields*, Contemporary Physics **35**, strane: 243–255, 1994. Citirano na **strani 117**.
112. Standardna referenca za prostiranje svetlosti je od Max Born & Emil Wolf, *Principles of Optics – Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*, Pergamon Press, 6th edition, 1998. Citirano na **strani 120**.
113. E.D. Palik, *Handbook of optical constants of solids*, Academic Publishing, 1998. Citirano na **strani 122**.
114. Više fotografija iluzija, čak i filmova o iluzijama, možete naći veb stranama www.polarimage.fi/mirages/mirages.htm kao i finland.fi/netcomm/news/showarticle.asp?intNWSAID=25722. Citirano na **strani 122**.
115. E. J. J. Kirchner, *De uitvinding van het telescoop in 1608: gewoon twee lenzen*, Nederlands tijdschrift voor natuurkunde **74**, strane: 356–361, 2008. Citirano na **strani 123**.
116. Začuđujući pregled o tome šta su ljudi do sada postigli u ovoj oblasti dat je u klasičnom referentnom tekstu od Rolf Riehker, *Fernrohre und ihre Meister*, VEB Verlag Technik, second edition, 1990. Videti takođe kod Peter Manly, *Unusual Telescopes*, Cambridge University Press, 1991, i Henry C. King, *The History of the Telescope*, Dover, 2003. Citirano na **strani 123**.

117. Uvod u temu oreola od 22° , oreola od 46° , sporednog Sunca i mnogih drugih lukova koji se mogu videti oko Sunca, vidite lepo ilustrovan dokument od R. Greenler, *Lichterscheinungen, Eiskristalle und Himmelsarchäologie*, Physikalische Blatter **54**, strane: 133–139, 1998, ili knjigu od Robert Greenler, *Rainbows, Halos, and Glories*, Cambridge University Press, 1980. Citirano na [strani 124](#).
118. J. Aizenberg, V. C. Sundar, A.D. Yablon, J. C. Weaver & G. Chen, *Biological glass fibers: Correlation between optical and structural properties*, Zbornik radova National Academy of Sciences **101**, strane: 3358–3363, 2004, besplatno dostupno takođe na veb strani www.pnas.org/. Citirano na [strani 125](#).
119. K. Franz & al., *Müller cells are living optical fibers in the vertebrate retina*, Zbornik radova National Academy of Sciences **104**, strane: 8287–8292, 2007. Citirano na [strani 125](#).
120. Potpun pregled podataka i dokaza koji pokazuju da dlake polarnog medveda nemaju ulogu optičkih vlakana, možete naći na veb stranama it.stlawu.edu/~koon/mar-ref.html i it.stlawu.edu/~koon/polar.html. Citirano na [strani 126](#).
121. Predviđanje negativnog prelamanja je kod V. G. Veselago, *The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ* , Soviet Physics Uspekhi **10**, strana 509, 1968. (Izvorni dokument na ruskom je iz 1967.) Objašnjenje sa različitim pravcima prelamanja objavili su P. M. Valanju, R. M. Walser & A. P. Valanju, *Wave refraction in negative-index media: always positive and very inhomogeneous*, Physical Review Letters **88**, strana 187401, 8. maj 2002. Isto tako je ispravljen princip Ferma, kako je objavio V. G. Veselago, *About the wording of Fermat's principle for light propagation in media with negative refraction index*, dostupno na veb strani arxiv.org/abs/cond-mat/0203451. Citirano na [strani 126](#).
122. Prvi primer materijalnog sistema sa negativnim prelamanjem predstavio je David Smith i njegov tim R. A. Schelby, D. R. Smith & S. Schultz, *Experimental verification of a negative index of refraction*, Science **292**, p. 77–79, 2001. Još skoriji rezultati su od 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**, strana 137401, 2003, C. G. Parazzoli, R. B. Greegor, K. Li, B. E. C. Koltenbah & M. Tanielian, *Experimental verification and simulation of negative index of refraction using Snell's law*, Physical Review Letters **90**, strana 107401, 2003. S. Foteinopoulou, E.N. Economou & C.M. Soukoulis, *Refraction in media with a negative refractive index*, Physical Review Letters **90**, strana 107402, 2003. Citirano na [strani 126](#).
123. S. A. Ramakrishna, *Physics of negative refractive index materials*, Reports on Progress of Physics **68**, strane: 449–521, 2005. Citirano na [strani 126](#).
124. J. Pendry, *Negative refraction makes a perfect lens*, Physical Review Letters **85**, strana 3966, 2000. Vidite takođe J. B. Pendry, D. Schurig & D. R. Smith, *Controlling electromagnetic fields*, Science **312**, strane: 1780–1782, 2006, i 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**, strane: 977–980, 2006. Citirano na [strani 126](#).
125. O metamaterijalima vidite kod A. Lai, C. Caloz & T. Itoh, *Composite rightleft-handed transmission metamaterials*, IEEE Microwave Magazine **5**, strane: 34–50, septembar 2004. Citirano na [strani 126](#).
126. M. Zedler & P. Russer, *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 strane: 1477–1479, 2006. M. Zedler, C. Caloz & P. Russer, *A 3D Isotropic left-handed metamaterial based on the rotated transmission line matrix (TLM) scheme*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques **55**, strane: 2930–2941, 2007. Citirano na [strani 126](#).
127. Pročitajte na internetu tekst od Grimaldija fermi.imss.fi.it/rd/bdv?/bdviewer/bid=000000300682. Citirano na [strani 127](#).
128. James E. Faller & E. Joseph Wampler, *The lunar laser reflector*, Scientific American strane: 38–49, mart 1970. Citirano na [strani 127](#).

129. Neil Armstrong iz Apollo 11, Jim Lovell iz Apollo 8 i Apollo 13, i Jim Irwin iz Apollo 15 opširno su tražili a potom dali negativan odgovor, kao što je rečeno u Science News strana 423, 24 & 31 decembar 1994. Međutim, iz spejs šatla, koji je kružio oko Zemlje samo nekoliko stotina kilometara, zid se može videti kada je Sunce dovoljno nisko tako što je zid prividno širi usled svoje senke, kao što je objašnjeno u Science News **149**, strana 301, 1996. Citirano na **strani 128**.
130. S.W. Hell, *Strategy for far-field optical imaging and writing without diffraction limit*, Physics Letters A **326**, strane: 140–145, 2004, vidite takođe V. Westphal & S.W. Hell, *Nanoscale resolution in the focal plane of an optical microscope*, Physical Review Letters **94**, strana 143903, 2005, i V. Westphal, J. Seeger, T. Salditt & S.W. Hell, *Stimulated emission depletion microscopy on lithographic microstructures*, Journal of Physics B **38**, strane: S695–S705, 2005. Citirano na **strani 130**.
131. M. Shih, M. Segev & G. Salamo, *Three-dimensional spiraling of interacting spatial solitons*, Physical Review Letters **78**, strane: 2551–2554, 1997. Vidite takođe i čitljiviji dokument od M. Segev & G. Stegeman, *Self-trapping of optical beams: spatial solitons*, Physics Today **51**, strane: 42–48, avgust 1998. Citirano na **strani 130**.
132. Za snimanje Talbot-Lau pomoću X-zraka, vidite na primer dokument A. Momose & al., *X-ray phase imaging: from synchrotron to hospital*, Philosophical Transactions of the Royal Society A **372**, strana 20130023, 2014, slobodno za čitanje na veb strani rsta.royalsocietypublishing.org. Citirano na **strani 131**.
133. Vidite divan kratak pregled od Frank Schaeffel, *Processing of information in the human visual system*, strane: 1–33, u Alexander Hornberg, editor, *Handbook of Machine Vision*, Wiley-VCH, 2006. Citirano na **strani 139**.
134. W. H. Ehrenstein & B. Lingelbach, *Das Hermann–Gitter*, Physik in unserer Zeit **6**, strane: 263–268, 2002. Časopis takođe prikazuje varijacije boja ovih rešetki. Citirano na **strani 139**.
135. Da uživate u mnogim drugim cvetovima pod ultraljubičastim svetлом, pogledajte veliku zbirku na veb strani www.ultravioletphotography.com/content/. Citirano na **strani 140**.
136. Za primer takvog istraživanja, vidite S. A. Baccus, B. P. Olveczky, M. Manu & M. Meister, *A retinal circuit that computes object motion*, Journal of Neuroscience **28**, strane: 6807–6817, 2008. Za stariji prikaz, vidite M. Meister & M. J. Berry, *The neural code of the retina*, Neuron **22**, strane: 435–450, 1999. Citirano na **strani 143**.
137. Viditena primer kratak prikaz od D. M. Berson, *Strange vision: ganglion cells as circadian photoreceptors*, Trends in Neurosciences **26**, strane: 314–320, 2003. Citirano na **strani 143**.
138. Ova neverovatna priča je iz divnog bloga watchingtheworldwakeups.blogspot.de/2008/11/mountain-biking-moonlight-color-vision.html – blog koji pokazuje kolika je strast prema prirodi. Citirano na **strani 144**.
139. Mit o osjetljivosti oka detaljno je otkriven kod B. H. Soffer & D. K. Lynch, *Some paradoxes, errors, and resolutions concerning the spectral optimization of human vision*, American Journal of Physics **67**, strane: 946–953, 1999. Citirano na **strani 144**.
140. A. Bruckner, J. Duparre, F. Wippermann, R. Leitel, P. Dannberg & Brauer, *Ultra-compact close-up microoptical imaging system*, Zbornik radova SPIE, 7786, strana 77860A, 2010. Citirano na **strani 145**.
141. David R. Williams, *Supernormal Vision*, Science News **152**, strane: 312–313, 15 November 1997. Vidite takođe veb stranu aria.cvs.rochester.edu/team/williams_d/ a takođe i fotografije na veb strani roorda.vision.berkeley.edu/ o unutrašnjosti živog ljudskog oka. Njihovo poslednje objavljanje je Roorda, A.Metha, P. Lennie & D.R.Williams, *Packing arrangement of the three cone classes in the primate retina*, Vision Research **41**, strane: 1291–1306, 2001. Citirano na **strani 147**.
142. Vidite, na primer, lepu knjigu od Simon Ings, *Das Auge -Meisterstück der Evolution*, Hoffmann & Campe, 2008. O ograničenjima oka, vidite Thomas Ditzinger, *Illusionen des Sehens: Eine Reise in die Welt der visuellen Wahrnehmung*, Sudwest, 1998, koja prikazuje zaprepašćujuću Ouchi illusion prikazanu na **slici 184**. Citirano na **strani 147**.



Slika 184 Ouchi iluzija kretanja

143. To se dogodilo Đovani Beliniju (Giovanni Bellini, oko 1430. Venice, - 1516. Venice) Velikom slikaru Renesanse, koji je i ovo iskustvo zapisao, stvorivši jedan od najvećih "gafova" ikad. Ako snimite fotografiju efekta pomoću daljinskog upravljanja kamerom, možete dokazati da je i vaš fotoaparat svetac. Citirano na [strani 147](#).
144. S. R. Wilk, *How retroreflectors really work*, Optics & Photonics News, strane: 6–7, decembar 1993. Citirano na [strani 148](#).
145. G. G. P. van Gorkum, *Introduction to Zeus displays*, Philips Journal of Research **50**, strane: 269–280, 1996. Vidite takođe 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**, strane: 295–305, 1996. Citirano na [strani 148](#).
146. Između mnogo dokumenata o jamskim pitonima, vidite divan kratak pregled od B. Schwarzschild, *Neural-network model may explain the surprisingly good infrared vision of snakes*, Physics Today strane: 18–20, septembar 2006.; on je zasnovan na očaravajućim podacima od 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**, strana 068105, 2006. Citirano na [strani 149](#).
147. J. Cybulski, J. Clements & M. Prakash, *Foldscope: Origami-based paper microscope*, preprint na arxiv.org/abs/1403.1211. Citirano na [strani 150](#).
148. Za objašnjenje, vidite S. Y. van der Werf, G. P. Konnen & W.H. Lehn, *Novaya Zemlya effect and sunsets*, Applied Optics **42**, strane: 367–378, 2003. Citirano na [strani 150](#).
149. E.W. Streed, A. Jechow, B. G. Norton & D. Kielpinski, *Absorption imaging of a single atom*, Nature Communications, **3**, strana 933, 2012, preprint na arxiv.org/abs/1201.5280. Citirano na [strani 150](#).
150. Ovaj problem je predložio Vladimir Surdin. Citirano na [strani 152](#).
151. Za odstupanje od geometrijskog “zakona” odbijanja, vidite 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**, strane: 337 – 340, 2009. Vidite takođe M. Merano, 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**, strane: 15928–15934, 2007. Ovo lepo istraživačko polje je potrebno za dobar pregled članka. Za merenje vremena kašnjenja u totalnom odbijanju, od oko 28 fs, vidite D. Chauvat & al., *Timing the total reflection of light*, Physics Letters A **336**, strane: 271–273, 2005. Citirano na [strani 152](#).
152. Ovakvu tvrdnju je implicitno doneo D. Mugnai, A. Ranfagni & R. Ruggieri, *Observation of superluminal behaviors in wave propagation*, Physical Review Letters **84**, strana 4830, 2000. Odlično objašnjenje i pobijanje su dali W. A. Rodrigues, D. S. Thober & A. L. Xavier, *Causal explanation for observed superluminal behavior of microwave propagation in free space*, preprint na arxiv.org/abs/physics/0012032. Citirano na [strani 153](#).

153. Ako želite da vidite više o tome kako svet izgleda u različitim vrstama slepih boja, pogledajte veb strane webexhibits.org/causesofcolor/2.html ili www.vischeck.com/examples. Citirano na **strani 153**.
154. H. Kobayashi & S. Kohshima, *Unique morphology of the human eye*, Nature **387**, strane: 767–768, 1997. Oni su istražili 88 vrsta primata. Citirano na **strani 154**.
155. 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**, strane: 1053–1062, 2012. Citirano na **strani 158**.
156. Većina svetskih stručnjaka za munje su Rusi. Dve dobre knjige su od Vladimir Rakov & Martin A. Uman, *Lightning: Physics and Effects*, Cambridge University Press, 2003, i od Eduard M. Bazelyan & Yuri P. Raizer, *Lightning Physics and Lightning Protection*, Institute of Physics Publishing, 2000. Za jednostavan uvod vidite takođe deo o munjama na veb strani www.nrcan.gc.ca/. Citirano na **strani 159**.
157. O strasti koja je pokretala celog života Luke Howard-a, vidite knjigu od Richard Hamblin, *The Invention of Clouds*, Macmillan 2001. Citirano na **strani 159**.
158. Vidite kod See J. Latham, *The electrification of thunderstorms*, Quartely Journal of the Royal Meteorological Society **107**, strane: 277–289, 1981. Za noviji i širi pregled, vidite Earle R. Williams, *The tripole structure of thunderstorms*, Journal of Geophysical Research **94**, strane: 13151–13167, 1989. Vidite takođe knjigu od National Research Council Staff, *The Earth's Electrical Environment*, Studies in Geophysics, National Academy Press, 1986. Citirano na **strani 159**.
159. Objasnjenje kako se čestice razdvajaju u oblacima, predstavlja posebno polje istraživanja. Vidite, na primer, pregled i spisak literature na veb strani enviromom.us/lightning/lightningformation.html. Precizan mehanizam o odnosu atoma nije još potpuno objašnjen. Postoje dva glavna razloga: eksperimenti su teški i elektricitet nije u potpunosti razumljiv u većini poznatih materijalnih sistema, uključujući i dobropoznati proces trljanja staklene šipke krvnom. Citirano na **strani 159**.
160. A. V. Gurevich & K. P. Zybin, *Runaway breakdown and the mysteries of lightning*, Physics Today **58**, strane: 37–43, maj 2005. Citirano na **strani 160**.
161. Da biste saznali više o atmosferskim strujama, možda ćete želeti da pogledate popularizirajuću reviziju US work od E. A. Bering, A. A. Few & J. R. Benbrook, *The global electric circuit*, Physics Today **51**, strane: 24–30, oktobar 1998, ili više tehnički usmeren pregled od E. Bering, Reviews of Geophysics (supplement) **33**, strana 845, 1995. Citirano na **strani 161**.
162. Korišćenje rezonanse Šumana (Schumann) u kondenzatoru Zemlja-jonosfera za ovo polje istraživanja objašnjeno je u K. Schlegel & M. Fullerkrug, *Weltweite Ortung von Blitzen*, Physik in unserer Zeit **33**, strane: 257–261, 2002. Citirano na **strani 162**.
163. 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**, strane: 694–697, 2003. Citirano na **strani 160**.
164. J. R. Dwyer, *A fundamental limit on electric fields in air*, Geophysical Research Letters **30**, strana 2055, 2003. Citirano na **strani 160**.
165. B. M. Smirnov, *Physics of ball lightning*, Physics Reports **224**, strane: 151–236, 1993. Vidite takođe D. Finkelstein & J. Rubinstein, *Ball lightning*, Physical Review **135**, strane: 390–396, 1964. Za više folklora na ovu temu, samo potražite veb strane. Citirano na **strani 162**.
166. G. D. Shabanov, *The optical properties of long-lived luminous formations*, Technical Physics Letters **28**, strane: 164–166, 2002, A. I. Egorov & S. I. Stepanov, *Long-lived plasmoids produced in humid air as analogues of ball lightning*, Technical Physics **47**, strane: 1584–1586, 2002, A. E. Egorov, S. I. Stepanov & G. D. Shabanov, Physics Uspekhi *Laboratory demonstration of ball lightning*, **47**, strane: 99–101, 2004 i G. D. Shabanov & B. Yu. Sokolovskii, *Macroscopic separation of charges in a pulsed electric discharge*, Plasma Physics Reports **31**, strane: 512–518, 2005. (Svi ovi raniji ruski dokumenti prevedeni su na engleski.) Pogledajte veb strane biot.pnpi.spb.ru/pages_ru/Stepanov/index.htmlstealthtank.narod.ru, balllightning.narod.ru/hvewd.html i www.ipp.mpg.de/ippcms/eng/presse/pi/05_06_pi.html, za više detalja i više spektakularnih filmova. Citirano na **strani 162**.

167. G. Silva Paiva, A. C. Pavao, E. Alpesde Vasconcelos, O. Mendes & E. F. da Silva, *Production of ball-lightning-like luminous balls by electrical discharges in silicon*, Physics Review Letters **98**, strana 048501, 2007. Citirano na [strani 163](#).
168. Za noviji pregled, pogledajte S. Parrott, arxiv.org/abs/gr-qc/9711027. Vidite takođe T. A. Abbott & D. J. Griffiths, *Acceleration without radiation*, American Journal of Physics **53**, strane: 1203–1211, 1985. Vidite takođe A. Kovetz & G. E. Tauber, *Radiation from an accelerated charge and the principle of equivalence*, American Journal of Physics **37**, strane: 382–385, 1969. Citirano na [strani 167](#).
169. C. de Almeida & A. Saa, *The radiation of a uniformly accelerated charge is beyond the horizon: a simple derivation*, American Journal of Physics **74**, strane: 154–158, 2006. Citirano na [strani 167](#).
170. 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**, strane: 1357–1360, 2005. Citirano na [strani 164](#).
171. Izvanredan pregled je od E. H. Brandt, *Levitation in Physics*, Science **243**, strane: 349–355, 1989. Citirano na [stranama 164 i 166](#).
172. Vidite članak od R. Tuckermann, S. Bauerecker & B. Neidhart, *Levitation in Ultraschallfeldern – Schwebende Tröpfchen*, Physik in unserer Zeit **32**, strane: 69–75, februar 2001. Kapi tečnosti težine do 1 g na ovaj način su levitirale. Citirano na [strani 164](#).
173. F. C. Moon & P. Z. Chang, *Superconducting Levitation – Applications to Bearings and Magnetic Transportation*, Wiley & Sons, 1994. Citirano na [stranama 164 i 166](#).
174. W. T. Scott, *Who was Earnshaw?*, American Journal of Physics **27**, strane: 418–419, 1959. Citirano na [strani 164](#).
175. Trik je da se pokaže da je $\operatorname{div} \mathbf{E} = 0$, $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$, prema tome je $E \nabla^2 E = 0$ a odatle $\nabla^2 E^2 \geq 0$; stoga nema lokalnih maksimuma električnog polja u odsustvu slobodnih naelektrisanja. Isti dokaz važi i za magnetno polje. Međutim, tela sa dielektričnim konstantama manjim od okruženja mogu da levitiraju u statičkim električnim poljima. Primer su mehurići gasa u tečnostima, kao što pokazuje T. B. Jones & G. W. Bliss, *Bubble dielectrophoresis*, Journal of Applied Physics **48**, strane: 1412–1417, 1977. Citirano na [strani 165](#).
176. B. Scharlau, V. Nordmeier & H. J. Schlichting, *Magnetische Levitation*, in Deutsche Physikalische Gesellschaft, (editor) *Didaktik der Physik*, Lehmanns, 2003. Citirano na [stranama 165 i 218](#).
177. Vidite kod A. K. Geim, M. D. Simon, M. I. Boamfa & L.O. Heflinger, *Magnet levitation at your fingertips*, Nature **400**, strane: 323–324, 1999. Citirano na [strani 165](#).
178. Prve fotografije pojedinačnog **jona** bile su kod W. Neuhauser, M. Hohenstatt, P. E. Toschek & H. Dehmelt, *Localized visible Ba⁺ mono-ion oscillator*, Physical Review A **22**, strane: 1137–1140, 1980. Vidite takođe D. J. Wineland & W. M. Itano, Physics Letters A **82**, strane 75, 1981, a takođe i F. Dietrich & H. Walter, Physical Review Letters **58**, strana 203, 1987. Za pojedinačni atom vidite fotografije u Z. Hu & H. J. Kimble, Optics Letters **1**, strana 1888, 1994, F. Ruschewitz, D. Bettermann, J. L. Peng & W. Ertmer, Europhysics Letters **34**, strana 651, 1996, D. Haubrich, H. Schadwinkel, F. Strauch, B. Ueberholz, R. Wynands & D. Meschede, Europhysics Letters **34**, strana 663, 1996. Citirano na [strani 166](#).
179. Vidite na primer Mark Buchanan, *And God said...let there be levitating strawberries, flying frogs and humans that hover over Seattle*, New Scientist strane: 42–43, 26 July 1997, ili C. Wu, *Floating frogs*, Science News **152**, strane: 632–363, 6 decembar 1997. i C. Wu, *Molecular magnetism takes off*, Physics World, april 1997, strana 28. Eksperimente Andre Geim, Jan Kees Maan, Humberto Carmona and Peter Main, objavio je P. Rodgers, Physics World **10**, strana 28, 1997. Neki od ovih rezultata mogu se naći kod M. V. Berry & A. K. Geim, *Of flying frogs and levitrons*, European Journal of Physics **18**, strane: 307–313, 1997. Vidite takođe njihovu veb stranu na internetu www.ru.nl/hfml/research/levitation/. Citirano na [strani 166](#).
180. Dobro poznata igračka koja omogućava levitaciju bez upotrebe bilo kakvog izvora energije naziva se "Levitron". Nju nije izmislio Bil Hones iz Fascination Toys & Gifts u Sietlu, kao što je objašnjeno na veb strani levitationarts.com/. O igrački je raspravlja Ron Edge, *Levitation using only permanent*

magnets, Physics Teacher **33**, strana. 252, april 1995. Isto tako je razmatrao i M. V. Berry, *The Levitron TM: an adiabatic trap for spins*, Zbornik radova Royal Society A **452**, strane: 1207–1220, 1996, (Berijeva faza slave) a takođe i M. D. Simon, L. O. Heflinger & S. L. Ridgeway, *Spin stabilized magnetic levitation*, American Journal of Physics **65**, strane: 286–92, 1997, i T. B. Jones, M. Washizu & R. Gans, *Simple theory for the Levitron*, Journal of Applied Physics **82**, strane: 883–889, 1997. Citirano na **strani 166**.

181. Trikovi vežbanja i izgradnja Levitrona opisani su u liepom predavanju Josef Zweck, *Physik im Alltag*, Skript zur Vorlesung im WS 1999/2000 der Universität Regensburg. Citirano na **strani 166**.
182. Predviđanje kvantifikovane levitacije je kod Stephen B. Haley, *Length quantization in levitation of magnetic microparticles by a mesoscopic superconducting ring*, Physical Review Letters **74**, strane: 3261–3264, 1995. Tema je razmatrana detaljnije u Stephen B. Haley, *Magnetic levitation, suspension, and superconductivity: macroscopic and mesoscopic*, Physical Review B **53**, strana 3506, 1996, obrnuto od Stephen B. Haley, *Quantized levitation of superconducting multiple-ring systems*, Physical Review B **53**, strana. 3497, 1996, kao i u Stephen B. Haley, *Quantized levitation by multiply-connected superconductors*, LT-21 Proceedings, in Czechoslovak Journal of Physics **46**, strana. 2331, 1996. Godine 1998. još uvek nije postojalo eksperimentalni dokaz. (Stephen Haley, privatna komunikacija). Citirano na **strani 167**.
183. Detaljni opisi većine takvih efekata mogu se naći u izvanrednom pregledu kojeg su uredili Manfred von Ardenne, Gerhard Musiol & Siegfried Reball, *Effekte der Physik und ihre Anwendungen*, Harri Deutsch, 2004. Citirano na **strani 167**.
184. 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**, strane: 266–268, 15 januar 1998. Vidite takođe Science News **153**, strana 53, 24 januar 1998. Citirano na **strani 168**.
185. Henk Swagten & Reinder Coehoorn, *Magnetische tunneljuncties*, Nederlands tijdschrift voor natuurkunde **64**, strane: 279–283, November 1998. Citirano na **strani 168**.
186. H. Ohno, D. Chiba, F. Matsukura, T. Omiya, E. Abe, T. Dietl, Y. Ohno & K. Ohtani, *Electric-field control of ferromagnetism*, Nature **408**, strane: 944–946, 21-28 decembar 2000. Citirano na **strani 169**.
187. Ovaj efekt su otkrili G. Rikken, B. van Tiggelen & A. Sparenberg, *Lichtverstrooiing in een magneetveld*, Nederlands tijdschrift voor natuurkunde **63**, strane: 67–70, mart 1998. Citirano na **strani 170**.
188. Vitalij Pecharsky & Karl A. Gschneidner, *Giant magnetocaloric effect in Gd₅(Si₂Ge₂)*, Physical Review Letters **78**, strane: 4494–4497, 1995, i od istih autora *Tunable magnetic regenerator alloys with a giant magnetocaloric effect for magnetic refrigeration from ~20 to ~2990K*, Applied Physics Letters **70**, strana 3299, 1997. Citirano na **strani 170**.
189. J. Weissmuller, R.N. Viswanath, D. Kramer, P. Zimmer, R. Wurschum & H. Gleiter, *Charge-induced reversible strain in a metal*, Science **300**, strane: 312–315, 11 april 2003. Citirano na **strani 170**.
190. A. Ajdari, *Electro-osmosis on inhomogeneously charged surfaces*, Physical Review Letters **75**, strane: 755–758, 1995. Citirano na **strani 170**.
191. Ovaj efekt su otkrili 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**, strane: 231–234, 1996. Dobar uvod je kod R. Griessen, *Schaltbare Spiegel aus Metallhydriden*, Physikalische Blatter **53**, strane: 1207–1209, 1997. Citirano na **strani 171**.
192. M. J. Aitken, *Thermoluminescence Dating*, Academic Press, 1985. Medjutim, preciznost metode je daleko gora no kod određivanja starosti sa C14, kako je pokazao H. Huppertz, *Thermolumineszenzdatierung: eine methodologische Analyse aufgrund gesicherter Befunde*, Peter Lang Verlag, 2000. Citirano na **strani 172**.
193. Vidite bilo koju knjigu iz termostatike, kao što je od Linda Reichl, *A Modern Course in Statistical Physics*, Wiley, 2nd edition, 1998. Citirano na **strani 173**.

194. Sunce emituje oko $4 \cdot 10^{26}$ W iz svoje mase od $2 \cdot 10^{30}$ kg, ili 0,2 mW/kg; osoba sa prosečnom masom od 75 kg emituje oko 100 W (to možete da proverite u krevetu tokom noći), to jest oko 500 puta više. Citirano na [strani 173](#).
195. Vidite na primer, J. M. Aguirregabiria, A. Hernandez & M. Rivas, *Velocity fields inside a conducting sphere near a slowly moving charge*, American Journal of Physics **62**, strane: 462–466, 1994. Citirano na [strani 173](#).
196. Philip Cohen, *Openwide, this won't hurt a bit*, New Scientist strana 5, 3 februar 1996. Citirano na [strani 174](#).
197. Za referentnu listu o piezoelektricitetu kostiju pogledajte veb stranu silver.neep.wisc.edu/~lakes/BoneElectr.html. Citirano na [strani 174](#).
198. J. E. Avron, E. Berg, D. Goldsmith & A. Gordon, *Is the number of photons a classical invariant?*, European Journal of Physics **20**, strane: 153–159, 1999. Citirano na [strani 175](#).
199. Ovo je zaključeno iz *g-2* merenja, kao što je objasnio u svog govoru prilikom prijema Nobelove nagrade Hans Dehmelt, *Experiments with an isolated subatomic particle at rest*, Reviews of Modern Physics **62**, strane: 525–530, 1990, kao i u Hans Dehmelt, *Is the electron a composite particle?*, Hyperfine Interactions **81**, strane: 1–3, 1993. Citirano na [strani 175](#).
200. Dobar i kratak uvod je dokument od F. Rohrlich, *The self-force and radiation reaction*, American Journal of Physics **68**, strane: 1109–1112, 2000. Citirano na [strani 175](#).
201. Razlike između mišljenja “da” i “ne” moguće je već kod običnog elektroencefalograma. Za video prikaz razlikovanja pojmove korišćenjem tehnika snimanja mozga, pogledajte na intertnetu veb stranu www.youtube.com/watch?v=JVLu5_hvr8s. Citirano na [strani 176](#).
202. C. G. Tsagas, *Magnetic tension and the geometry of the universe*, Physical Review Letters **86**, strane: 5421–5424, 2001. Pregled ove teme je kod C. G. Tsagas, *Geometrical aspects of cosmic magnetic fields*, arxiv.org/abs/gr-qc/0112077. Citirano na [strani 178](#).
203. A. D. Erlykin & A.W. Wolfendale, *The origin of cosmic rays*, European Journal of Physics **20**, strane: 409–418, 1999, Citirano na [strani 180](#).
204. Vidite na primer, lep udžbenik od Stephen C. Stearns & Rolf F. Hoekstra, *Evolution: An Introduction*, Oxford University Press, 2000. Za zadivljujuću priču o razvoju za nestručnjake, videti kod Richard Fortey, *Life – An Unauthorized Biography*, Harper Collins, 1997, ili takođe kod Menno Schilthuizen, *Frogs, Flies & Dandelions – the Making of Species*, Oxford University Press, 2001. Vidite takođe Stephen J. Gould, *The Panda's thumb*, W. W. Norton & Co., 1980, jedna od nekoliko zanimljivih i informativnih knjiga o biologiji razvoja od strane najboljeg pisca u ovoj oblasti. Informativni pregled rezultata razvoja sa razgranatim porodičnim stablom koji je proizведен, dat je na veb strani phylogeny.arizona.edu/tree. O rezultatima razvija ljudskog bića, vidite informativni tekst od K. Kusch & S. Kusch, *Der Mensch in Zahlen*, Spektrum Akademischer Verlag, 2nd edn., 2000. Epohalno delo Charles Darwin, *On the Origin of Species*, može se naći na veb strani darwin-online.org.uk. Citirano na [strani 184](#).
205. Jednostavan opis je od Malcolm Ross Macdonald, *The Origin of Johnny*, Jonathan Cape, 1976. Vidite takođe Bas Haring, *Kaas en de evolutietheorie*, Houtekiet, 2001. Citirano na [strani 184](#).
206. Richard Bandler, *Using Your Brain for a Change*, Real People Press, strana 18, 1985. Citirano na [strani 184](#).
207. Postoji neslaganje među stručnjacima u vezi preciznog vremena ovog doživljaja. Neki kažu da je taj trenutak samo rođenje. Međutim, postoji nekoliko standardnih načina da se prizovu sećanja iz ranog života, čak i iz vremena pre rođenja. Jedan je od Norbert J. Mayer, *Der Kainkomplex – neue Wege der systemischen Familientherapie*, Integral Verlag, 1998. Citirano na [strani 184](#).
208. Sanjida O'Connell, *Mindreading – How We Learn to Love and Lie*, Arrow, 1998. Ova interesantna knjiga opisuje važnost laganja u razvoju ljudskog bića i opisuje teškoće onih ljudi, kao što su autistične osobe, koji ne mogu da čitaju tude misli, pa zato ne mogu ni da lažu. Citirano na [stranama 185 i 221](#).

209. Pristup opisivanja posmatranja kao povezanih delova naziva se **strukturalizam**; početna tačka za ovaj pokret bio je de Saussure's *Cours de linguistique générale* (videti fusnotu na **strani 195**). Brojni mislioci su pokušavali da iskoriste isti pristup i u filozofiji, mitologiji i teoriji književnosti, mada sa malim uspehom. Pregled (osrednjih) uspeha strukturalizma u lingvistici i propasti na drugim poljima dao je L. Jackson, *The Poverty of Structuralism: Literature and Structuralist Theory*, Longman, 1991. Autor tvrdi da kada se smanjuje sistem za interakcije, zanemaruje se specifičan sadržaj i svojstva elemenata sistema, pa ovaj pristup sprečava puno razumevanje sistema koji se razmatra. Citirano na **strani 185**.
210. U pogledu mentalnih sposobnosti različitih od Pijaže (Piaget – opisan na strani na **strani 179**), ttnrenutno mnogo razmatran autor je sovjetski eksperimentalni psiholog Lev Vigotsky, čije su ideje koje oduzimaju dah i komplikovan život opisani, na primer, u Lev Vigotsky, *Mind in Society*, Harvard University Press, 1978, ili kod Rene van der Veer & Jaan Valsiner, *Understanding Vigotsky: a Quest for Synthesis*, Blackwell Publishers, 1994. Prošireniji materijal može da se nađe u opširnom radu Rene van der Veer & Jaan Valsinger, *The Vigotsky Reader*, Blackwell, 1994. Citirano na **strani 186**.
211. Ponešto neobičan izvor za više detalja je lep tekst od Bruno Bettelheim, *The Uses of Enchantment: the Meaning and Importance of Fairy Tales*, Knopf, 1976. Citirano na **strani 186**.
212. Jednostavan uvod daje Manfred Spitzer, *Lernen – Gehirnforschung und Schule des Lebens*, Elsevier, 2007. Citirano na **strani 187**.
213. Vidite lep udžbenik od Martin Trepel, *Neuroanatomie: Struktur und Funktion*, Urban & Fischer, 5th edition, 2012. U njemu su prikazani takođe delovi mozga namenjeni za planiranje kretanja i upravljanje. Citirano na **strani 187**.
214. Navedeno kod V. Harlen, R. Rappmann & P. Schata, *Soziale Plastik – Materialien zu Joseph Beuys*, Achberger Verlag, 1984, strana 61. Citirano na **strani 187**.
215. Problemi koji se javljaju kada neko izgubi sposobnost razvrstavanja ili memorisanja opisani su u lepoj knjizi neurologa Oliver Sacks, *The Man Who Mistook His Wife for a Hat*, Picador, 1985, koji je prikupio mnoge studije slučaja sa kojima se sretao u svom radu. Iznenadujući sakupljeni slučajevi su u njegovom podjednako impresivnom tekstu *An Anthropologist on Mars*, Picador, 1995.
- Vidite takođe lep tekst od Donald D. Hoffman, *Visual Intelligence – How We Create What We See*, W. W. Norton & Co., 1998, i na veb strani www.cogsci.uci.edu/~ddhoff/ koja je pridružena. Citirano na **stranama 187 i 192**.
216. Za strastveni uvod u veze između jezika i mozga iz perspektive Čomskog, vidi bestseler knjigu od Steven Pinker, *The Language Instinct How the Mind Creates Language*, Harper Perennial, 1994. Sveža ideja rečenica raspravlja se u poglavljju knjige. Citirano na **stranama 187, 224 i 238**.
217. Uvod u neurologiju je od Joseph Ledoux, *Synaptic Self: How Our Brains Become Who We Are*, Viking Press, 2002. Citirano na **strani 187**.
218. Sledeći dobar uvod u proučavanje razvrstavanja je od James A. Anderson, *An Introduction to Neural Networks*, MIT Press, 1995. Uvod u nauku o računarima dat je kod J. Glenn Brookshear, *Computer Science, An Overview*, 6th edition, Addison Wesley, 2000, ili kod Rick Decker & Stuart Hirshfield, *The Analytical Engine: An Introduction to Computer Science Using the Internet*, Brooks/Cole Publishers, 1998. Citirano na **strani 188**.
219. Pregled stanja istraživanja o poreklu hoda na dve noge dat kod B. Wood, *Four legs good, two legs better*, Nature **363**, strane: 587–588, 17 juni 1983. Citirano na **strani 188**.
220. Dobar uvod u neuronske mreže je od J. Hertz, A. Krogh & R. Palmer, *Introduction to the Theory of Neural Computation*, AddisonWesley, 1991. Citirano na **strani 188**.
221. Navodi su od H. Eves, *Mathematical Circles Squared*, Prindle, Weber and Schmidt, 1972. Citirano na **strani 191**.
222. K. Baumgartel, 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**, strane: 572–578, 2008. Citirano na **strani 192**.

223. Više o povezanosti entropije i računara može se naći u klasičnom radu R. Landauer, *Irreversibility and heat generation in the computing process*, IBM Journal of Research and Development **5**, strane: 183–191, 1961, i kod C. H. Bennett & R. Landauer, *The fundamental physical limits of computation*, Scientific American **253**, strane: 48–56, 1985. Citirano na **strani 194**.
224. H. Zurek, *Thermodynamic cost of computation, algorithmic complexity and the information metric*, Nature **341**, strane: 119–124, 14 avgust 1989. Citirano na **strani 194**.
225. L. Szilard, *Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen*, Zeitschriftfur Physik **53**, strana 840, 1929. Ovaj klasičan dokument može da se nađe preveden na engleski u zborniku radova Leo Szilard. Citirano na **strani 194**.
226. J. J. Hopfield, Nature **376**, strane: 33–36, 1995. Ovaj članak jednog od tvoraca na ovom polju predstavlja jednu mogućnost kojom bi vremenski raspored nervnih signala, umesto obično prepostavljene učestanosti paljenja, mogao nositi i informacije. Citirano na **strani 194**.
227. Detalji o svojstvima uzoraka paljenja neurona lepo su opisani u članku od M. Mahowald & R. Douglas, *A silicon neuron*, Nature **354**, strane: 515–518, 19/26 decembar 1991., u kojem pokazuje kako da se simulira neuronsko električno ponašanje pomoću silicijumskog kola. Citirano na **strani 194**.
228. A. Mechelli, J. T. Crinion, U. Noppeney, J. O'Doberty, J. Ashburner, R. S. Frackowiak & C. J. Price, *Neurolinguistics: structural plasticity in the bilingual brain*, Nature **431**, strana 757, 2004. Citirano na **strani 195**.
229. Rasprava o tome je li mozak bolji ili nije bolji od računara lepo je sažeto G. Vollmer, *Algorithmen, Gehirne, Computer – Was sie können und was sie nicht können, Teil I und Teil II*, Naturwissenschaften **78**, strana. 481, 1991, i **78**, strane: 533–542, 1991. Citirano na **strani 195**.
230. T. Seidel, *The role of student characteristics in studying micro teaching-learning environments*, Learning Environments Research **9**, strane: 253–257, 2006. Citirano na **strani 196**.
231. Radi uvoda, pogledajte K. Amunts & al., *BigBrain: an ultrahigh-resolution 3d human brain model*, Science **340**, strane: 1472–1475, 2013. Citirano na **strani 196**.
232. Rezultati sa decom su kod Niels Birbaumer, oni za scenske izvođače kod Boris Kleber, obojica u Universitat Tubingen. Više informacija možete naći na veb stranama www.dgbfb.de/index.php/en/ i applied-neuroscienc.org. Citirano na **strani 196**.
233. J. T. Choi & A. J. Bastian, *Adaptation reveals independent control networks for human walking*, Nature Neuroscience **10**, strane: 1055–1062, 2007. Citirano na **strani 197**.
234. Zabavni uvod u važnost creva i enteričnog nervnog sistema je kod Giulia Enders, *Darm mit Charme*, Ullstein, 2014. Dobar je, vredan čitanja i sadrži mnogo zanimljivih referenci. Citirano na **strani 197**.
235. O ovom vidu istraživanja spavanja, vidite J. Mayer, H. G. Schuster, J. Ch. Claussen & M. Molle, *Corticothalamic projections control synchronization in locally coupled bistable thalamic oscillators*, Physical Review Letters **99**, strane 068102, 2007. Citirano na **strani 198**.
236. 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**, strane: 337–341, 2015. Citirano na **strani 199**.
237. E. Kropff, J.E. Carmichael, M. -B. Moser & E. I. Moser, *Speed cells in the medial entorhinal cortex*, Nature **523**, strane: 419–424, 2015. Citirano na **strani 199**.
238. 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**, strana 66032, 2013, besplatno dostupno na veb strani journals.plos.org/plosone/. Citirano na **strani 199**.
239. Za blago različite odrednice i bogatstvo drugih zanimljivih informacija o jeziku, pogledajte lepu knjigu od David Crysta 1, *The Cambridge Encyclopedia of Language*, Cambridge University Press, 1987. Citirano na **strani 201**.

240. Međutim, jezik sa najvećim dostupnim rečnikom je holandski, sa 40 tomova *Wordenboek der Nederlandsche Taal*, koji se pojavio između 1864. and 1998. godine. On sadrži skoro 400 000 pojnova. Citirano na [strani 202](#).
241. Popis i primedbe o otkrivanju pojnova dolazi iz lične komunikacije Ane Veržbicke (Anna Wierzbicka). Dugačak popis je objavljen u njenoj knjizi *Semantics, Primes and Universals*, Oxford University Press, 1996. Citirano na [stranama 203 i 218](#).
242. W. S. Hatcher, *Foundations of Mathematics*, W.B. Saunders Co., Philadelphia, 1968. Postoji takođe i članak od P. J. Cohen & R. Hersch, *Non-Cantorian set theory*, *Scientific American* **217**, strane: 104–116, 1967. Cohen je bio matematičar koji je 1963. godine dokazao da se negacija hipoteze kontinuma može dodati aksiomima teorije skupova i još uvijek činiti dosljednu teoriju on je takav skup nazvao *ne-Kantorijanski*. Citirano na [strani 207](#).
243. Vidite lep članak od I. Stewart, *Fair shares for all*, *New Scientist*, strane: 42–46, 17 juni 1995. Citirano na [strani 207](#).
244. Dokaz nezavisnosti hipoteza neprekidnosti dolazi u dva dela. Prvi deo, Kurt Gödel je dokazao 1940. godine da se aksiom može dosledno dodati u teoriju skupova ZFC tako da je hipoteza kontinuma tačna. Zatim je 1963. godine Pol Cohen (Paul Cohen) dokazao da se aksiom može dosledno dodati u teoriju setova ZFC tako da je hipoteza kontinuma lažna. Citirano na [strani 209](#).
245. Rudy Rucker, *Infinity and the Mind – the Science and Philosophy of the Infinite*, Bantam, Toronto, 1983. Citirano na [strani 209](#).
246. Čudan svet teorije kategorija, ponekad nazvan apstrakcijom svih apstrakcija, predstavljen je kod F. William Lawvere & Stephen H. Schanuel, *Conceptual Mathematics: a First Introduction to Categories*, Cambridge University Press, 1997. Citirano na [strani 210](#).
247. Ova opšta podela matematike je lepo objašnjena u tekstu od Pierre Basieux, *Die Architektur der Mathematik – Denken in Strukturen*, Rororo, 2000. Citirano na [strani 210](#).
248. Umberto Eco, *L'Homme et la mer*, Flammarion, 1994. Nema citata.
249. Pitanje je obrađeno kod Thomas Aquinas, *Summa Theologica*, u pitanju 52 prvog dela. Kompletan tekst, od nekoliko hiljada strana, može da se nađe na veb strani www.newadvent.org. Mi ćemo se vratiti na to u delu o kvantnoj teoriji, u odeljku o Paulijevom načelu isključenja. ([Vol. IV, strana 106](#)) Izgleda kao da se celo pitanje vraća nazad do Peter (the) Lombard, *Liber Sententiarum c. 1150*. Citirano na [strani 211](#).
250. B. C. Gallivan, *How to fold paper in half twelve times: an “impossible challenge” solved and explained*, Historical Society of Pomona Valley, 2002, može se takođe naći na veb strani pomonahistorical.org/12times.htm. Vidite takođe veb stranu www.sciencenews.org/search?st=mathtrek. Citirano na [strani 211](#).
251. I. Stewart, *Daisy, daisy, give me your answer, do*, *Scientific American*, strane: 76–79, januar 1995. Ovaj pedagoški članak objašnjava kako rast biljaka dovodi do cvetova čiji je broj latica iz Fibonačijevog reda 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, etc. Isto tako su objašnjena i odstupanja od ovog idealnog slučaja. Izvorni rad su dva članka od S. Douady & Y. Couder, *La physique des spirales végétales*, *La Recherche* **24**, strane: 26–36, 1993, i *Phyllotaxis as a selforganized growth process*, u *Growth Patterns in Physical Sciences and Biology*, editovanog od J. M. Garcia-Ruiz & al., Plenum Press, 1993. Uprkos ovim i drugim objavljenim radovima o Fibonačijevom redu, dokaz na strani 285 pokazuje da je većina ovih dokumenata utemeljena na pesku. Citirano na [stranama 211 i 216](#).
252. H. Davson, *The Eye*, Academic Press, 1962. Citirano na [stranama 191 i 212](#).
253. Vidite veb stranu akbar.marlboro.edu/~mahoney/cube/NxN.txt. Citirano na [strani 212](#).
254. Uvod u surrealne brojeve dat je u članku Polly Shulman, *Infinity plus one, and other surreal numbers*, *Discover*, strane: 99–105, decembar 1995. Postoji takođe i tekst od D. Knuth, *Surreal Numbers: How two ex-Students Turned on to Pure Mathematics and Found Total Happiness*, Addison Wesley, 1974, ili na veb strani www-cs-faculty.stanford.edu/~knuth/sn.html. Uobičajeno navedene reference na ovu temu obuhvataju i John H. Conway, *On Numbers and Games*, Academic

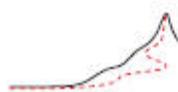
Press, 1976, E. R. Berlekamp, J. H. Conway & R. K. Guy, *Winning Ways for Your Mathematical Plays, Volume I: Games in General*, Academic Press, 1982, i H. Gonshor, *An Introduction to Surreal Numbers*, Cambridge University Press, 1986. Citirano na stranama 212 i 213

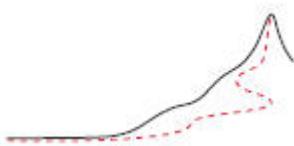
255. O ovom lepom problemu raspravljao je Ian Stewart, *A bundling fool beats the wrap*, Scientific American, strane: 109–111, juni 1993. U četiri dimenzije poznato je da odgovor leži negde između 50 000 i 100 000, pri čemu se za odgovor za pet dimenzija predpostavlja da je “nikad”. Citirano na strani 214.
256. Alfred Tarski, *Introduction to Modern Logic*, Dover, 1946. Vidite takođe poznatu knjigu za decu od matematičarke i fotografa Lewis Carroll, *Alice in Wonderland*. Citirano na strani 205.
257. A. Pais, *Niels Bohr's Times: in Physics, Philosophy, and Polity*, Oxford University Press, 1991, strana 176. Citirano na strani 214.
258. Eugene Wigner, *Symmetries and Reflections*, Indiana University Press, 1962. Citirano na strani 214.
259. Goran Wikell, *The layout of digits on pushbutton telephones – a review of the literature*, Tele 34, strane: 34–42, 1982. Citirano na strani 216.
260. Jasan pregled filozofije o nauci, često nazivane *epistemologija*, bez nepotrebnih detalja, dao je Robert Blanche, *L'Epistémologie*, Presses Universitaires de France, 1972. Citirano na strani 217.
261. O različitim vidovima falsifikovanja opštih iskaza, uobičajeno je navesti delo epitemologa Karl Popper (1902 Vienna, - 1994. London), posebno njegovu dugu i dosadnu knjigu *Logik der Forschung*, prvi put oblavljenu 1934. godine. Razlog ovog dosađivanja je taj što je Popova knjiga jednostavno zagrejala ideje Pierre Duhem-a. Citirano na strani 221.
262. Za dobar način stvaranja krvi koja teče, vidite L. Garlaschelli, F. Ramaccini & S. Della Scala, *Working bloody miracles*, Nature 353, p. 507, 1991. The *Grand dictionnaire universel du XIX e siecle*, by Pierre Larousse, koja takođe sadrži recepte; nju je ponovo prikazao publici 1980-ih godina Henri Broch. Lep i klasičan tekst je od Harry Houdini, *Miracle Mongers and their Methods*, Prometheus Books, Buffalo, 1981. Orginal je napisao 1920. godine, svetski poznat mađioničar pod imenom “The Great Houdini”, a dostupan je na veb strani etext.lib.virginia.edu/toc/modeng/public/HouMirM.html. Statua indijanca koja piće mleko bila je poznata širom sveta u 1994. i 1995. godini, O isceliteljima vidite James Randi, *Flim-flam!*, Prometheus Books, Buffalo, New York, 1987, i izuzetnu knjigu od Hans Conrad Zander, *Warum ich Jesus nicht leiden kann*, Rowohlt, 1994. Citirano na strani 222.
263. John Horgan, *The End of Science – Facing the Limits of Knowledge in the Twilight of the Scientific Age*, Broadway Books, 1997, strane: 31–32, i poglavlje 2, beleška 2. Citirano na stranama 224 i 237.
264. Za mišljenje koje je potpuno u suprotnosti ovom koji je ovde opisano, vidite knjigu od Gregory J. Chaitin, *The Limits of Mathematics*, Springer Verlag, 1997, koja takođe može da se nađe na veb strani autora www.cs.auckland.ac.nz/CDMTCS/chaitin/lm.html, i između njegovih ostalih radova, Chaitin je većinu svog života posvetio pitanju razmatranom u odeljku, posebno kopatibilnosti. Citirano na strani 224.
265. Vidite njigu od J. Barwise & J. Etchemendy, *The Liar*, Oxford University Press, New York, 1987. Citirano na strani 224.
266. Demosthenes, *Third Olynthiac*, section 19. Citirano na strani 225.
267. Ova definicija (iskaz 4.11) i mnogi drugi iskazi o nauci nalaze se u lepom i dobro poznatom tekstu od Ludwig Wittgenstein, *Tractatus logico-philosophicus*, Edition Suhrkamp, 1963. On pruža skraćeni zaključak o osnovama nauke, misli i jezika u zbirci visoko strukturiranih i numeriranih rečenica. Citirano na stranama 228 i 232.
268. Vidite M. Dresden, *The Klopsteg memorial lecture*, American Journal of Physics 66, strane: 468–482, 1998. Citirano na strani 228.
269. Dobro poznate knjige su, na primer, Friedrich Kohlrausch, *Praktische Physik*, Teubner, 24. Auflage, 1996. Citirano na strani 229.

270. Rezultati su opisani na primer kod L. Bergmann & C. Schafer, *Lehrbuch der Experimentalphysik*, Band I, II, III und IV, W. de Gruyter. Citirano na strani 229.
271. Landolt-Bornstein, uredili K. -H. Hellwege & O. Madelung, *Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik*, Neue Serie, Springer Verlag, Berlin, 1984. Ova serija sa više od hiljadu delova sadrži značajna zapažanja u oblasti fizike. Citirano na strani 229.
272. Polazište ovih netačnih pridruživanja je knjiga od Gerhard Szczesny, *Brecht, Leben des Galilei – Dichtung und Wirklichkeit*, Ullstein, Berlin 1966, strana 6. Iskaze nikada nije napravio Galilej; ovo pitanje je detaljno diskutovano u posebnim krugovima, na primer F. Kleinert, "Messen was meßbar ist" - *Über ein angebliches Galilei-Zitat*, Berichte zur Wissenschaftsgeschichte 11, strana 221, 1988, ili na internetu kod Peter Jaencke. Citirano na strani 229.
273. Čudne i ponekad opasne posledice ubedjenja mogu se naći na primer kod Martin Gardner, *Fads and Fallacies*, Dover, 1957, i kod James Randi, *Faith Healers*, Prometheus Books, 1989. Nagrada od milion dolara za pokazivanje bilo kakvog paranormalnog ili supernormalnog efekta dostupna je na njegovoj veb strani web.randi.org/. Citirano na strani 232.
274. Pogledajte lepu kolekciju o polugama na veb strani www.crank.net/. Citirano na strani 232.
275. Zanimljivo je zapaziti da najsavremeniji teolozi, u doba interneta, izbegavaju da ponavljaju ova stara i netačna uverenja i da ih stave na internet. Citirano na strani 233.
276. Suprotan pogled na pojavu osobina čvrsto se brani u knjizi od Robert Laughlin, *A Different Universe: Reinventing Physics from the Bottom Down* Basic Books, 2005, ili od P. Jense n, *Particle physics and our everyday world*, Physics Today strane: 58–59, juli 1998. Citirano na strani 233.
277. Videti stranu 133 literatura od John Bowlby, *Charles Darwin*, Pimlico, 1991. Citirano na strani 233.
278. Roger Penrose, *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*, Jonathan Cape, 2004, strana 378. Citirano na strani 236.
279. Lep uvod u grčku filozofiju je od Eduard Zeller, *Outlines of the History of Greek Philosophy*, Dover, 1980, ponovno štampanje knjige objavljene 1928. godine. Između ostalog, ona daje jasno izlaganje filozofije Demokrita i ostalih predhodnika Sokrata. Citirano na strani 237.
280. Poznati citat se nalazi u početku poglavlja XI, "The Physical Universe", kod Arthur Eddington, *The Philosophy of Physical Science*, Cambridge, 1939. Citirano na strani 237.
281. Giuseppe Fumagalli, *Chi l'ha detto?*, Hoepli, Milano, 1983. Citirano na strani 238.
282. See Jean-Paul Dumont, *Les écoles présocratiques*, Folio Essais, Gallimard, strana 653, 1991. Citirano na strani 238.
283. Za lep tekst o fraktalima, videti kod Heinz-Otto Peitgen, Hartmut Jurgens & Dietmar Saupe, *Fractals for the Classroom*, Springer Verlag, 1992, strane: 232–245. Dostupna je takođe i na više drugih jezika. Citirano na strani 240.
284. Kao što je naglasio René Descartes. Citirano na strani 242.
285. Poznata rezonansa ^{12}C koju je otkrio Willy Fowler, opisana je kod E. Margaret Burbidge, G. R. Burbidge, W. A. Fowler & F. Hoyle, *Synthesis of the elements in stars*, Reviews of Modern Physics 29, strane: 547–560, 1957. Citirano na strani 244.
286. Opširan pregled tema dat je u debeloj knjizi od John D. Barrow & Frank J. Tipler, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press, 1986. Sam pojam je potekao od Brandon Carter, koji ga je iskovao 1973. godine i predstavio na skupu posvećenom 500 godišnjici Nikole Kopernika. Za još literature, videti Yuri I. Balashov, *Resource Letter AP-1: the anthropic principle*, American Journal of Physics 59, strane: 1069–1076, 1991. Citirano na strani 244.
287. Voltaire, *Candide ou l'optimisme*, 1759. Vidite takođe fusnotu na strani 240 u Vol. I. Knjiga je toliko dobra da ju je američka carina zaplenila 1930. godine, a pošta u SAD odbila da je dostavlja do 1944. godine. Za više detalja, potražite na "banned books online" na veb stranama. Citirano na strani 244.

288. Broj knjiga o svesti je veliki i sadržaj nije uvek zanimljiv i često se ne zasniva na činjenicama, kao što je pokazano kod Karl R. Popper & John Eccles, *The Self and its Brain – an Argument for Interactionism*, Rutledge, 1993. Citirano na **strani 245**.
289. Videti na primer *Encyclopedia Britannica*, Macropaedia, u uvodu o ponašanju životinja. Citirano na **strani 246**.
290. Pravi i informativni uvod u rad i ideje Joseph Beuys (na nemčkom) je od Renate Georgi, *Joseph Beuys*, RAAbits Kunst, Raabe Fachverlag, septembar 1996. Citirano na **strani 246**.
291. Dve studije, jedna od R. P. Ebstein & al., *Dopamine D4 receptor (D4DR) exon III polymorphism associated with human personality trait of novelty seeking*, Nature Genetics **12**, strane: 78–80, januar 1996, i druga studija od J. Benjamin & al., *Population and familial association between the D4 dopamine receptor gene and measures of novelty seeking*, Nature Genetics **12**, strane: 81–84, januar 1996, otkrile su da ljudi sa posebnim oblikom D4 gena prijema dopamina, ili D4DR, više skloni traženju novosti od ljudi sa uobičajenim oblikom. Gen D4DR reguliše oblikovanje prijemnika dopamina, hemijskog glasnika u mozgu koji je već neko vreme bio kandidat za supstancu odgovornu za sklonost ka traženju novih stvari. Citirano na **strani 246**.
292. Vidite Jacques Hadamard, *The Mathematician's Mind – The Psychology of Invention in the Mathematical Field*, Princeton Science Library, 1996. Za savremenu perspektivu, vidite Pierre de Gennes, *Fragile Objects: Soft Matter, Hard Science, and the Thrill of Discovery*, Springer, 1996. u kojoj de Gennes kritikuje određene obrazovne sisteme koji previše naglašavaju matematiku, čime uništavaju kreativnost. Citirano na **strani 246**.
293. Volter je ovo napisao u svojoj knjizi *Catalogue pour la plupart des écrivains français qui ont paru dans Le Siecle de Louis XIV, pour servir à l'histoire littéraire de ce temps* (1752). Citirano na **strani 247**.
294. Ovo je iz lepe knjižice od Bert Hellinger, *Verdichtetes*, Carl-Auer Systeme Verlag, 1996. Citirano na **strani 247**.
295. Na primer, potrebna je hrabrost da se suoči sa zavišću. AO ovoj temi videti klasičan tekst od Helmut Schoeck, *Der Neid*, 1966, objavljene na engleskom kao *Envy: A Theory of Social Behavior*, 1969. Ovo je standardni rad na ovom polju. Citirano na **strani 247**.
296. Bill McGuire, *A Guide to the End of the World: Everything You Never Wanted to Know*, Oxford University Press, 2002. O prošlim katastrofama pogledajte uvod od Tony Hallam, *Catastrophes and Lesser Calamities – the Causes of Mass Extinctions*, Oxford University Press, 2004. Citirano na **strani 251**.
297. *Le Systeme International d'Unités*, Bureau International des Poids et Mesures, Pavillon de Breteuil, Parc de Saint Cloud, 92310 Sevres, France. Svi noviji razvoji u vezi SI jedinica objavljeni su u časopisu *Metrologia*, kojeg uređuje isto telo. Prikazujući spor tempo jedne stare ustanove, BIPM je pokrenuo veb stranu tek 1998. godine; ona je sada doступna na www.bipm.fr/. Vidite takođe veb stranu www.utc.fr/~tthomass/Themes/Unites/index.html; ona sadrži biografije ljudi koji su svoja imena dali raznim jedinicama. Mnogo je bolja veb strana koja je ekvivalentna britanskoj www.npl.co.uk/category/2095; ova veb strana daje više detalja, a takođe definiciju jedinica u verziji engleskog jezika. Citirano na **strani 255**.
298. Svetlo pismo u oblasti merenja vremena je delo u dva toma od J. Vanier & C. Audoin, *The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards*, Adam Hilge, 1989. Popularan izveštaj je od Tony Jones, *Splitting the Second*, Institute of Physics Publishing, 2000. Na veb strani opdaf1.obspm.fr/www/lexique.html dat je rečnik pojmove koji su korišćeni u ovoj oblasti. Za precizna mereja **dužine** izbor alata su specijalni laseri, kao što laseri sa sinhronizacionim modom i češalj učestanosti. Postoji obimna literatura na ovu temu. Isto tako je obimna literatura za precizna merenja **električne struje**; radi se o tri za najbolji način da se to učini: prebrojavanjem nakelektrisanja ili merenjem magnetnih sila. Problem je još uvek ovoren. Za merenje **mase** i **atomske mase**, vidite **Vol. II, strana 59**. Za vrlo precizna merenja **temperature**, vidite **Vol. I, strana 407**. Citirano na **strani 255**.
299. Nezvanični SI prefikse je prvi put predložio devedesetih godina Jeff K. Aronson sa University of Oxford, i oni mogu da budu opšte primenjeni u budućnosti. Vidite New Scientist **144**, strana 81, 3 decembar 1994. Postoje i drugi, manje ozbiljni predlozi. Citirano na **strani 257**.

300. Razni koncepti čak su i tema posebnog međunarodnog standarda, ISO 5725, pod naslovom *Accuracy and precision of measurement methods and results*. Dobar uvod je od John R. Taylor, *An Introduction to Error Analysis: the Study of Uncertainties in Physical Measurements*, 2nd edition, University Science Books, Sausalito, 1997. Citirano na [strani 258](#).
301. P. J. Mohr & B. N. Taylor, *CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 1998*, *Reviews of Modern Physics* **59**, strana 351, 2000. To je skup konstanti koje su rezultat međunarodnih dogovora i koje je za međunarodnu upotrebu preporučio Committee on Data for Science and Technology (CODATA), stručno telo u International Council of Scientific Unions, koje je ujedinilo International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP), International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) i druge organizacije. Organizacija IUPAC ima svoju veb stranu iupac.org/. Citirano na [strani 259](#).
302. Neke priče se mogu naći u tekstu od N. W. Wise, *The Values of Precision*, Princeton University Press, 1994. Oblast merenja visoke preciznosti, iz kojih potiču rezultati na ovim stranama, svet je sam za sebe. Lep uvod u njega kod J. D. Fairbanks, B. S. Deaver, C.W. Everitt & P. F. Michelson, eds., *Near Zero: Frontiers of Physics*, Freeman, 1988. Citirano na [strani 259](#).
303. Za detalje vidite dobro poznatu referencu iz astronomije od P. Kenneth Seidelmann, *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*, 1992. Citirano na [strani 263](#).
304. Videti odgovarajuće reference u **Vol. I**. Citirano na [strani 265](#).





ZASLUGE

PRIZNANJA

Mnogi ljudi koji su sačuvali svoj dar radoznalosti, pomogli su da se ovaj projekat ostvari. Pre svega, Saverio Pascazio bio je – prisutan ili ne – stalna referenca za ovaj projekat. Fernand Mayne, Anna Koolen, Ata Masafumi, Roberto Crespi, Serge Pahaut, Luca Bombelli, Herman Elswijk, Marcel Krijn, Marc de Jong, Martin van derMark, Kim Jalink, moji roditelji Peter i Isabella Schiller, Mike vanWijk, Renate Georgi, Paul Tegelaar, Barbara i Edgar Augel, M. Jamil, Ron Murdock, Carol Pritchard, Richard Hoffman, Stephan Schiller, Franz Aichinger i, pre svih, moja supruga Britta pružili su mi vredne savete i ohrabrenja.

Mnogi ljudi su pomogli u projektu i prikupljanju materijala. Najkorisnija je bila pomoć od Mikael Johansson, Bruno Barberi Gnecco, Lothar Beyer, brojna poboljšanja od Berta Sierre, detaljne predloge Claudia Farinatija, mnoga poboljšanja od Erica Sheldona, detaljne predloge Andrew Young-a, stalna pomoć i saveti Jonatana Kelu, ispravke Elmara Bartela, a posebno obimnu, strastvenu i savesnu pomoć Adrian Kubale.

Važan materijal su pružili 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, Wimde 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 Čorović, Paul Vannoni, John Haber, Saverio Pascazio, Klaus Finkenzeller, Leo Volin, Jeff Aronson Boone, Lawrence Tuppen, Quentin David Jones, Arnaldo Uguzzoni, Frans van Nieuwpoort, Alan Mahoney, Britta Schiller, Petr Daneček, Ingo Thies, Vitaliy Solomatin, Carl Offner, Nuno Proenca, Elena Colazingari, Paula Henderson, Daniel Darre, Wolfgang ang Rankl, John Heumann, Joseph Kiss, Martha Weiss, Antonio Gonzalez, Antonio Martos, Andre Slabber, Ferdinand Bautista, Zoltan Gacs, Pat Furrie, Michael Reppisch, Enrico Pasi, Thomas Koppe, Martin Rivas, Herman Beeksma, Tom Helmond, John Brandes, Vlad Tarko, Nadia Murillo, Ciprian Dobra, Romano Perini, Harald van Lintel, Andrea Conti, Francois Belfort, Dirk Van de Moortel, Heinrich Neumaier, Jarosław Krolkowski, John Dahlman, Fathi Namouni, Paul Townsend, Sergei Emelin, Freeman Dyson, SR Madhu Rao, David Parks, Jurgen Janek, Daniel Huber, Alfons Buchmann, William Purves, Pietro Redondi, Damoon Saghian, Frank Sweetser, Markus Zeherle, Zach Joseph Espiritu, Marian Denes, Miles Mutka, kao i velik broj ljudi koji su žeeli da ostanu nepomenuti.

Softverski alati su usavršavani uz obimnu pomoć za fontove i slaganje od strane Michaela Zedlera i Achima Blumensatha i uz ponavljanu i vrednu podršku Donalda Arseneaua; pomoć je došla i od Ulrike Fischer, Piet van Oostrum, Gerben Wierda, Klaus Bohncke, Craig Upright, Herbert Voss, Andrew Trevorrow, Danie Els, Heiko Oberdiek, Sebastian Rahtz, Don Story, Vincent Darley, Johan Linde, Joseph Hertzlinger, Rick Zaccone, John Warkentin, Ulrich Diez, Uwe Siart, Will Robertson, Joseph Wright, Enrico Gregorio, Rolf Niepraschk, Alexander Grahn, Werner Fabian i Karl Koller.

Slog i dizajniranje knjiga rezultat je profesionalnih saveta Ulricha Dirra. Slog je znatno poboljšan uz pomoć Johannesa Kustera i njegovog fonta Minion Math. Dizajn knjige i njena veb strana duguju mnogo sugestijama i podršci moje supruge Britte.

Takođe se zahvaljujem zakonodavcima i poreskim obveznicima u Nemačkoj, gde je, nasuprot drugim zemljama, dopušteno stanovnicima da koriste lokalne univerzitetske biblioteke. Od 2007. do 2011. godine elektronsko izdanje i distribuciju teksta Planina Kretanja velikodušno je podržavala Fondacija Klaus Čira (Klaus Tschira Foundation)

PRIZNANJA ZA FILM

Animacije elektromagnetnog talasa u ravnim *slici 51* su autorsko pravo i ljubaznost Thomas Weiland i uzete su sa njegove veb strane www.temf.de na Technische Universitat Darmstadt. Animacije polarizovanog talasa *slici 66* su autorsko pravo i ljubaznost Jose Antonio Diaz Navas. Animacija elektromagnetnog polja kojeg emitiše naboј koji osciluje, na *slici 68* je autorsko pravo i ljubaznost Daniel Schroeder. On će jednog dana postaviti ovu animaciju na njegovu veb stranu physics.weber.edu/schroeder/mrr/MRRtalk.html. Animacija elektromagnetnog polja kojeg emitiše dipol pri oscilaciji na *slici 69* je autorsko pravo i ljubaznost Daniel Weiskopf i može da se nađe na njegovoj veb strani www.vis.uni-stuttgart.de/~weiskopf. Animacija brzine grupe na *slici 84* i prelamanja na *slici 102* su autorsko pravo ISVR, University of Southampton, i ljubaznost Steve Elliot. One mogu da se nađu na veb strani www.southampton.ac.uk/engineering/research/centres/isvr.page. Zadivljujući film o svetlosnom impulsu koji skakuće na ogledalu na *slici 90* – koji se takođe nalazi i u **Volume II** – je autorsko pravo i ljubaznost Wang Lihong i Washington University u St. Louis. Očaravajući film kucanja srca zmetka miša na *slici 129* je autorsko pravo i ljubaznost Kyrill Larin i nalazi se na njegovoj veb strani bol.egr.uh.edu/.

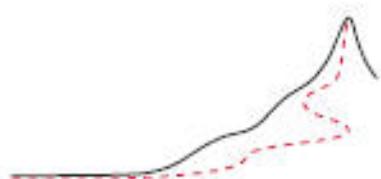
PRIZNANJA ZA SLIKE

Fotografija istočne padine vrha Langtang Lirung u Nepalskim Himalajima, prikazana na prednjoj korici knjige, je ljubaznost i autorsko pravo Kevin Hite i nalazi se na njegovom blogu thegettingthere.com. Retka fotografija kružne duge na *strani 9* je autorsko pravo i ljubaznost Oat Vaiyaboon, a uzeta je iz njegove zbirke; njegova veb strana je hangingpixels.com. Fotografije objekata na *slici 2* su ljubaznost Wikimedia i Royal Philips Electronics. Fotografija uticaja nanelektrisanog češlja na vodu na *slici 3* je autorsko pravo i ljubaznost Robert Fritzius i nalazi se na njegovoj veb strani www.datasync.com/~rsf1/fun/bend-w.htm. Fotografije linija električnog polja na *slici 4* su autorsko pravo i ljubaznost Eli Sidman, iz Technical Service Group, Massachusetts Institute of Technology, a nalazi se na grupnoj veb strani tsgphysics.mit.edu/front/. Grafike električnog polja sa revolucionarnog računara na *slici 4* su autorsko pravo i ljubaznost TEAL group na MIT, a nalaze se na njihovoj veb strani web.mit.edu/8.02t/www/802TEAL3D/visualizations/guidedtour/Tour.htm. Fptografija udara groma na *slici 5* je autorsko pravo Steven Horsburgh (videti www.horsburgh.com) i koristi se uz njegovu dozvolu. Fotografija Kelvinovog generatora na *slici 6* je ljubaznost i autorsko pravo Harald Chmela i uzeta je sa njegove veb strane www.hcrs.at. Prikaz eksperimenta očuvanosti električnog naboja na *slici 8* je autorsko pravo i ljubaznost Wolfgang Rueckner. Na *slici 9*, fitografija elektrometra u tegli od marmelade je ljubaznost i autorsko pravo Harald Chmela i uzeta je sa njegove veb strane www.hcrs.at; fotografija bele ajkule je autorsko pravo i ljubaznost Klaus Jost i nalazi se na njegovoj lepoj veb strani www.jostimages.com; fotografija digitalnog elektrometra je ljubaznost i autorsko pravo Advantest. Na *slici 11*, sve fotografije, osim jedne, su ljubaznost Wikimedia; fotografija solarne čelije je autorsko pravo i ljubaznost Q-Cells. Na *slici 13*, većina fotografija su ljubaznost Wikimedia; fotografija galaksija je ljubaznost i autorsko pravo Anthony Ayiomamitis, fotografija Sunca je ljubaznost NASA. Fotografije magnetnih linija na *slici 14* su ljubaznost Wikimedia; računarske grafike su ljubaznost i autorsko pravo MIT. Na *slici 16* fotografija čelije goluba je ljubaznost i autorsko pravo Institute of Molecular Pathology u Beču. Fotografija *Magneto-bacterium bavaricum* na *slici 17* je autorsko pravo Marianne Hanzlik i ljubaznost Nicolai Petersen. Na *slici 18*, fotografije električnih motora i galvanometra su ljubaznost Wikimedia; fotografija savremenog elektromotora je ljubaznost i autorsko pravo Honda. Prikazi Teslinog transformatora na *slici 23* su ljubaznost i autorsko pravo Robert Billon, a nalaze se na njegovoj veb strani qsl.net/f3wm/. Fotografija nanelektrisane kose na dečjem igralištu *slici 24*, je ljubaznost i autorsko pravo Evan Keller i nalazi se na njegovoj veb strani www.flickr.com/photos/evankeller. Prikaz magnetne memorije na *slici 25* su autorsko pravo i ljubaznost Hendryk Richert i nalaze se na veb strani njegove kompanije www.matesy.de. Gausova puška na *slici 26* je ljubaznost i autorsko pravo Simon Quellen Field i nalazi se na njegovoj veb strani www.sci-toys.com. Na *slici 27*, fotografija Roberta Krampfa je ljubaznost Wikimedia. Na *slici 28*, fotografija kugle sa plazmom je ljubaznost i autorsko pravo Philip Evans. Fotografija podizanja na *slici 29* je ljubaznost i autorsko pravo Jean-Louis Naudin; više informacija može da se nađe na njegovoj veb strani www.jlnlabs.org. Slika okana na *slici 30* je ljubaznost Stefan Maus, a uzera je sa njegove veb strane www.gfz-potsdam.de/pb2/pb23/SatMag/ocean_tides.html. Na *slici 31*, prikazi magnetnog okruženja Zemlje su ljubaznost NASA. Fotografija jednostavnog motora na *slici 33* je ljubaznost i autorsko pravo Stefan Kluge. Fotografija modela lebdećeg kreveta na *slici 35* i računarska grafika zamišljene pune veličine lebdećeg kreveta su ljubaznost i autorsko pravo Janjaap Ruissenars uzeto sa veb strane www.UniverseArchitecture.com. Humoristički strip na *slici 39* je autorsko pravo i ljubaznost Randall

Munroe, i nalazi se na njegovoj veb strani xkcd.com/. Na **slici 40**, grafici relativne provodnosti su autorsko pravo Kenneth Mauritz i ljubaznost Wikimedia. Na **slici 21**, grafici nerva su autorsko pravo i ljubaznost Thomas Heimburg i Wiley-VCH. Slika duge na **slici 47** je sa veb strane NOAA. Na **slici 48**, fotografije upravljanja mislina su autorsko pravo i ljubaznost Fraunhofer FIRST. Fotografija prizme na **slici 49** i na **slici 75** je od Susan Schwartzenberg, a ljubaznost i autorsko pravo Exploratorium, nalaze se na veb strani www.exploratorium.edu. Na **slici 52**, fotografija Hajnriha Herca je ljubaznost Wikimedia. Na **slici 53**, fotografija rekonstruisanog predajnika i prijemnika su autorsko pravo i ljubaznost of the Fondazione Guglielmo Marconi. Fotografije lepih jednostavnih daljinskih upravljača na **slici 54** su autorsko pravo i ljubaznost of Guido Pegna, a nalaze se na njegovoj veb strani www.pegna.com. Prikaz rasipanja između prstiju na **slici 55** je autorsko pravo i ljubaznost Chuck Bueter i nalazi se na njegovoj instruktivnoj veb strani za astronomiju old.transitofvenus.org. Druga fotografija duge **slici 56** je ljubaznost i autorsko pravo Antonio Martos. Fotografija prekobrojne duge na **slici 56** je ljubaznost i autorsko pravo Wolfgang Hinz i uzeta je sa njegove veb strane www.meteoros.de. Na **slici 57**, grafik merenja je ljubaznost i autorsko pravo Nature Publishing Group. Prikaz interferencije na gitari na **slici 58** je autorsko pravo i ljubaznost Bernard Richardson sa Cardiff University. Interferencija na ogledalu teleskopa je autorsko pravo i ljubaznost Mel Bartels i alazi se na njegovoj veb strani www.bbastrodesigns.com. Pegasti uzorak lasera je autorsko pravo i ljubaznost Epzaw i nalazi se na Wikimedia Commons. Prikazi uzorka koje stvara dvostruki prorez su autorsko pravo i ljubaznost Dietrich Zawischa i nalaze se na njegovoj veb strani www.itp.uni-hannover.de/~zawischa. Kombinovana slika duge u vidljivoj i infracrvenoj svetlosti na **slici 59** je ljubaznost i autorsko pravo Stefan Zeiger iz kolekcije na veb strani www.photo.net/photodb/member-photos?include=all&user_id=439012. Na **slici 61**, fotografije antene su kopije od Martin Abegglen i K. Krallis i ljubaznost Wikimedia. Fotografije dvolomnosti na **slici 62** su autorsko pravo i ljubaznost Roger Weller, sa njegove veb strane skywalker.cochise.edu/wellerr/mineral/calcite/calcite1.htm, Brad Amos, sa njegove vwb strane homepage.ntlworld.com/w.amos2/BradAmos'sWebsite i Martin Pietralla iz njegovih materijala sa predavanja. Polarizacija svetlosti na **slici 63** je od Keram Pfeiffer i ljubaznost Elsevier; može da se nadje u **Ref. 66**. Prikaz merenja polja svetlosti na **slici 60** je ljubaznost i autorsko pravo L. (Kobus) Kuipers. Fotografije levitacije zrnaca stakla prikazana na **slici 70** su ljubaznost i autorsko pravo Mark Raizen i Tongcang Li. Fotografija McNaught komete na **slici 71** je ljubaznost i autorsko pravo Flagstaffotos. Fotografija obrtnih The photograph of rotating carbon nanotubes na **slici 73** is ljubaznost of A.C. Ferrari and taken from the paper **Ref. 79**. Na **slici 74**, fotografija prikaza kako kišobran razlaže belu svetlost je ljubaznost Wikimedia. Fotografija solarnog zelenog bleska na **slici 76** je autorsko pravo i ljubaznost Andrew Young i deo njegove opširne i očaravajuće veb strane mintaka.sdsu.edu/GF; fotografija lunarnog zelenog bleska je autorsko pravo i ljubaznost Laurent Laveder i uzeta sa njegove lepe veb strane www.PixHeaven.net. Slika sa mlekom u vodi na **slici 77** napravljena je za ovaj tekst i autorsko pravo je Antonio Martos. Na **slici 78**, grafike prostora boja su autorsko pravo i ljubaznost of SharkD. Knjiga boja na **slici 79** je autorsko pravo i ljubaznost Tauba Auerbach; može da se nađe na njenoj lepoj veb strani taubaauerbach.com. Duga na **slici 80** je autorsko pravo i ljubaznost Denis Betsch i može se naći na www.atoptics.co.uk/fz696.htm. Fotografija maglene duge na **slici 81** je ljubaznost i autorsko pravo Michel Tournay, a može se naći na njegovoj veb strani www.spacew.com/gallery/Michelturnay. Fotografija rascepljene duge na **slici 81** je ljubaznost i autorsko pravo Eva Seidenfaden, a može da se nađe na njenoj veb strani www.paraselene.de. Fotografija šestostuke duge na **slici 81** je ljubaznost i autorsko pravo Terje Nordvik, a može da se nađe na apod.nasa.gov/apod/ap070912.html. Fotografija crvene duge na **slici 81** je ljubaznost i autorsko pravo of Zhu XiaoJin, a može da se nađe u njegovoj zbirci na www.cs.cmu.edu/~zhuxj/astro/. Fotografija mesečeve duge na **slici 81** je ljubaznost i autorsko pravo Laurent Laveder, a može da se nađe u njegovoj zbirci na www.pixheaven.net. Fotografija parhelije na **slici 82** je ljubaznost i autorsko pravo Phil Appleton i nalazi se na njegovoj veb strani www.astronet.ru/db/xware/msg/1174325/solsticehalo_appleton.jpg.html. Fotografija cirkumzenitnog luka na **slici 83** je ljubaznost i autorsko pravo Paul Gitto. Fotografija Mach-Zehnder interferometra na **slici 86** je autorsko pravo i ljubaznost Felix Dieu i Gael Osowiecki i nalazi se na njihovoj veb strani www.flickr.com/photos/felixdieu/sets/72157622768433934/ i www.flickr.com/photos/gaeloso/sets/72157623165826538/. Snimak šake rentgenovim zracima na **slici 89** je autorsko pravo Drgnu23 i ljubaznost Wikimedia. Na **slici 91**, spektar crnog tela je ljubaznost i autorsko pravo Chris Gueymard, svetskog liera u oblasti sunčevog spektra. Snimak užarene crvene peći na **slici 92** is autorsko pravo and ljubaznost Wolfgang Rueckner. Fotografija sunčane peći na **slici 93** je ljubaznost i autorsko pravo Gerhard Weinrebe. Na **slici 94**, fotografija solarne elektrane je ljubaznost Wikimedia. Na **slici 95**, fotografije lasera i izvora X-zraćenja su ljubaznost i autorsko pravo Time-Bandwidth i SPECS. Fotografija ribe-aveti **slici 96** je ljubaznost i autorsko pravo Tamara Frank, a nalazi se na njenoj veb strani www.flickr.com/photos/gioischia/. Na **slici 97**, fotografija koncentričnih ogledala je ljubaznost i autorsko pravo Media Lario Technologies.

Fotografija savijenog zraka svetlosti na *slici 99* je ljubaznost i autorsko pravo 2003 Jennifer Nierer. Prikazi čaša sa vodom na *slici 100* su ljubaznost i autorsko pravo 2003 Robin Wood, a nalaze se na njegovoj veb strani www.robinwood.com. Prikazi iluzije sa strelicama na *slici 101* su ljubaznost i autorsko pravo by Marić Vladimira; one su uzete iz kratkog filma sa njegovog youtube kanala na www.youtube.com/user/maricv84/videos. Fotografija visinske iluzije na *slici 104* je ljubaznost i autorsko pravo Thomas Hogan i nalazi se na njegovoj veb strani home.centurytel.net/Arkcite/looming.htm. Fotografija nizinske iluzije na *slici 104* je ljubaznost i autorsko pravo Andy Barson i nalazi se na njegovoj veb strani www.andybarson.co.uk. Slike napravljene kroz leće na *slici 106* su autorsko pravo i ljubaznost Eric Kirchner a nalaze se u njegovom dokumentu citiranom u tekstu. Nebeski sjaj na *slici 107* je autorsko pravo Brocken Inaglory i ljubaznost Wikimedia Commons. Fotografije optičkih vlakana na *slici 109* su autorsko pravo i ljubaznost NOAA, Hochschule Mittweida i Schott. Crtež metamaterijala na *slici 111* je autorsko pravo i ljubaznost IEEE i Michael Zedler. Fotografija Puasonove tačke na *slici 112* je ljubaznost i autorsko pravo Christopher Jones, i uzeta sa njegove veb strane www.union.edu/PUBLIC/PHYDEPT/jonesc/scientific_photos.htm. Na *slici 113*, prikazi su ljubaznost i autorsko pravo Jenoptik, Wikimedia i Jeff Sherman. Snimci mikroskopom na *slici 114* su autorsko pravo i ljubaznost Stefan Hell. Slika palca rendgenovim zracima na *slici 117* su ljubaznost i autorsko pravo Momose Atsushi. Fotografija holograma na *slici 118* je autorsko pravo i ljubaznost Yves Gentet i može da se nadje na njegovoj veb strani www.ultimate-holography.com. Na *slici 120*, hologram na novčanici euro je ljubaznost i autorsko pravo Hans-Ulrich Potsch i nalazi se na njegovoj veb strani www.hupoetsch.de/Makro.htm. Crtež na *slici 121* je iz Deutsche Gesellschaft fur Holographie, ljubaznost Niklas Moller i može da se nadje na njihovoj informativnoj veb strani www.dgholo.de. Na *slici 122*, interferogram gitare je ljubaznost Wikimedia. Na *slici 123*, fotografija sistema za trodimenzionalno snimanje je ljubaznost i autorsko pravo USC Stevens Institute za inovacije. Na *slici 124*, prikazi su ljubaznost i autorsko pravo Nikon i Carl Zeiss. Na *slici 125*, fotografija elektronskog mikroskopa je ljubaznost i autorsko pravo Carl Zeiss; sama slika je ljubaznost Wikimedia. Slike optičkog mikroskopa sa skeniranjem u bliskom polju na *slici 126* su autorsko pravo i ljubaznost WITec GmbH i nalaze se na njihovoj veb strani www.witec.de/. Tomografi pomoću X-zraka na *slici 127* su autorsko pravo i ljubaznost Manuel Dierick i njegove istraživačke grupe na University of Ghent i nalaze se na njegovoj veb strani www.ugct.ugent.be. Na *slici 129*, snimak pomoću X-zraka je autorsko pravo i ljubaznost Fraunhofer IIS. Infracrvena fotografija *slici 133* je autorsko pravo i ljubaznost Serge Augustin. Fotografija suncokreta na *slici 134* je autorsko pravo i ljubaznost Andrew Davidhazy i nalazi se na njegovoj veb strani www.rit.edu/~andpph. Slike oka na *slici 135* su ljubaznost i autorsko pravo National Eye Institute pri National Institute of Health u USA. Fotografije mrežnjače na *slici 140* su ljubaznost i autorsko pravo Austin Roorda. Slika oreola na *slici 141* je autorsko pravo i ljubaznost Bernt Rostad i nalazi se na njegovoj veb strani www.flickr.com/photos/brostad/257104770/sizes/l/. Na *slici 144*, fotografije senzora za snimanje su ljubaznost i autorsko pravo Wikimedia, Austin Roorda, Hamamatsu Photonics i Guido Westhoff/Leo van Hemmen. Na *slici 136*, ilustracije su ljubaznost i autorsko pravo Watcher; one su uzete sa njegovog lepog bloga na watchingtheworldwakeup.blogspot.com, punog strasti za prirodu oko nas. Fotografije ravnog mikroskopa koji se zasniva na oblasti mikroleća prikazane na *slici 137* su ljubaznost i autorsko pravo Frank Wippermann. Fotografije o mikroskopu napravljenog od lista papira na *slici 145* su ljubaznost i autorsko pravo tima Foldscope na www.foldscope.com. Slika usamljenog jona na *slici 146* je ljubaznost i autorsko pravo Dave Kielinski; verovatno takođe MacMillan Publishing ima neka autorska prava; oni su dzvolili korišćenje. Na *slici 147*, prikazi endoskopa su autorsko pravo i ljubaznost Karl Storz. Slike koje prikazuju slepilo za boje na *slici 149* su ljubaznost i autorsko pravo Michael Douma, sa njegove očaravajuće veb strane www.webexhibits.org/causesofcolor/2.html. Fotografije Ejmijeve sobe na *slici 150* su ljubaznost i autorsko pravo Sergio Davini, uzeto sa njegove veb strane www.flickr.com/photos/mosso, a ljubaznost i autorsko pravo David Darling, uzeto sa njegove enciklopedijske veb strane www.daviddarling.info. Na *slici 151*, iluzija boja je ljubaznost i autorsko pravo Kitaoka Akiyoshi, a uzeta je iz njegove divne vebstrane www.ritsumei.ac.jp/~akitaoka. Pseudoskopski snimak na *slici 152* je autorsko pravo i ljubaznost Joshua Foer. The photograph na *slici 153* is ljubaznost and autorsko pravo Nick Veasey; njegova divna zbirka snimaka rendgenovim zracima može da se nađe na veb strani www.untilled.co.uk. Na *slici 154*, snimak vrsta diskova su ljubaznost Wikimedia. Spectakularne fotografije udara groma na *slici 158* je autorsko pravo i ljubaznost Niklas Montonen. Fotografije oblaka na *slici 157* su ljubaznost NASA. Na *slici 158*, prikazi su ljubaznost i autorsko pravo nordique, NASA i NOAA. Fotografije oblaka plazme u laboratoriji koji oslobođaju loptaste munje na *slici 159* su ljubaznost i autorsko pravo Sergei Emelin i Alexei Pirozerski i uzete su sa njihove veb strane balllightning.narod.ru/. Crteži unutrašnjosti Zemlje na *slici 160* su autorsko pravo i ljubaznost MPI-Chemie, Mainz/GEO i mogu da se nađu u brošuri na veb strani www.mpch-mainz.mpg.de/mpg/deutsch/Panels_B.pdf. Njih je ljubazno obezbedila Mirjana Kotowski. Fotografije dijamagnete levitacije na *slici 161* su autorsko pravo i

Ljubaznost Joachim Schlichting i mogu da se nađu na na njegovoj veb strani www.uni-muenster.de/Physik/DP. Fotografije levitacije lopte koja se obrće na **slici 163** su autorsko pravo i ljubaznost Kay Kublenz i mogu da se nađu na njegovoj veb strani www.schwebemagnet.de. Elektroencefalogram na **slici 167** je ljubaznost Wikimedia. Fotografija neurona na **slici 169** je autorsko pravo Medlat i ljubaznost Wikimedia. Fotografija Fibonačijevih podloški na **slici 174** je autorsko pravo i ljubaznost Donald Simanek i može da se nađe na njegovoj veb strani www.lhup.edu/~dsimanek. Fotografija češlja i plamena na **slici 176** je ljubaznost i autorsko pravo Shubham Das, a za ovu knjigu je napravio on i Rakesh Kumar. Fotografija na zadnjim koricama knjige, guštera basilisk koji trči po vodi, je ljubaznost i autorsko pravo belgijske grupe TERRA vzw i nalazi se na njihovoj veb strani www.terravzw.org. Svi crteži su autorsko pravo Christoph Schiller. Ukoliko posumnjate da vaše autorsko pravo nije ispravno navedeno ili dobijeno, to nije učunjeno sa namerom; molim vas da me u tom slučaju obavestite.



PLANINA KRETANJA

Pustolovina fizike – Vol. III

Svetlost, naboji i mozak

Šta su ekektricitet i magnetizam?

Kako je oblikovana duga?

Koje je najzačuđujuće putovanje moguće?

Šta je svetlost?

Šta mogu da urade laseri?

Kakva je razlika između mozga i računara?

Koje se najveće katastrofe očekuju u budućnosti?

Koji problemi u fizici nisu rešeni?



Odgovarajući na ova i ostala pitanja o kretanju,
ova serija knjiga daje zanimljiv i mozgoloman
uvod u savremenu fiziku – koji je
iznenađujuć i izazovan na svakoj stranici.

Polazeći od svakodnevnog života, pustolovina daje
pregled savremenih rezultata u mehanici,
toploti, elektromagnetizmu, relativnosti,
kvantnoj fizici i objedinjavanju

Christoph Schiller, PhD Université Libre de Bruxelles,
fizičar je i popularizator fizike. Napisao je ovu
knjigu za svoju decu i za sve studente, predavače i
čitaoce koji se interesuju za fiziku, nauku o kretanju.

Pdf datateka je dostupna besplatno na

www.motionmountain.net

