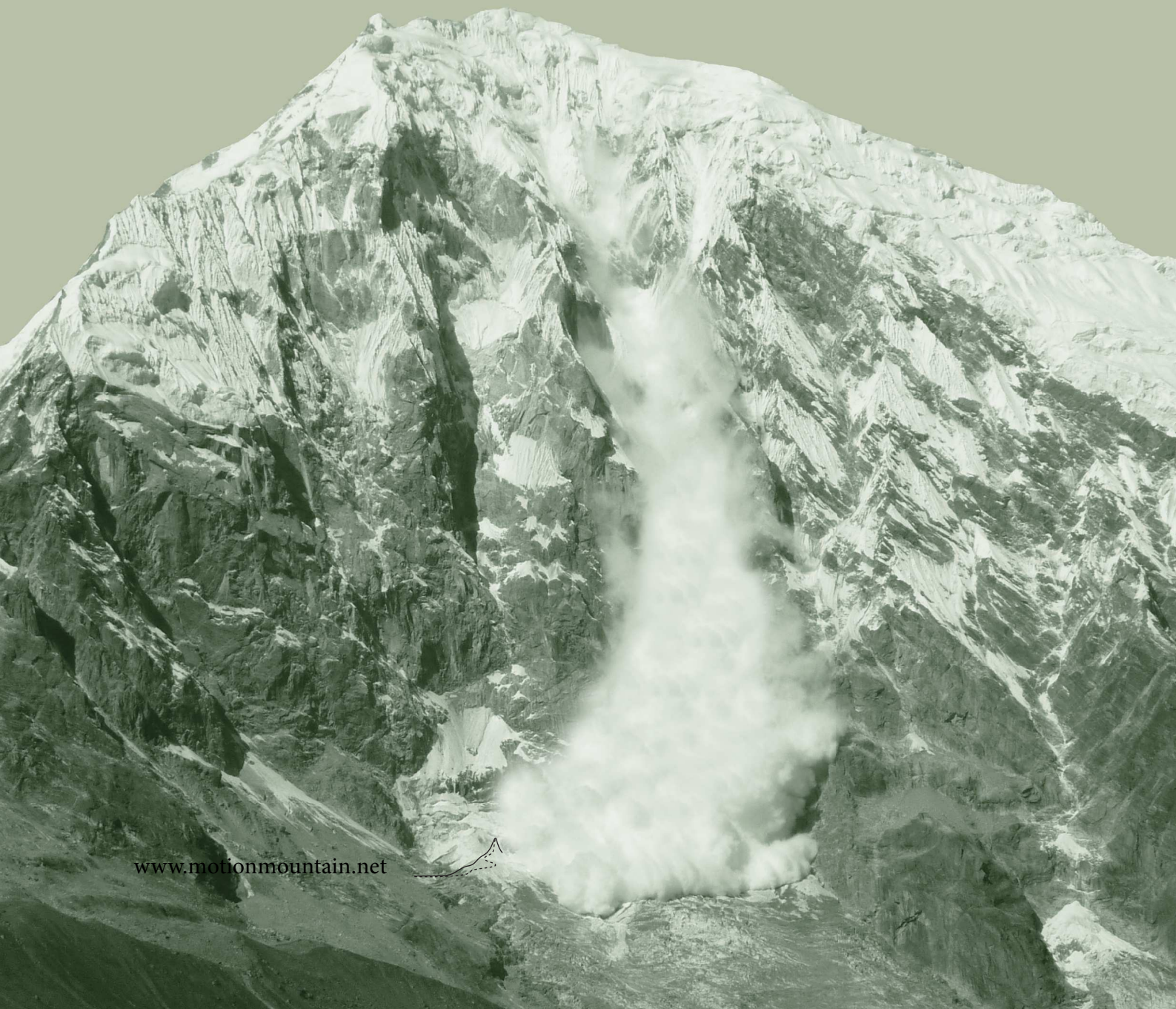
Christoph Schiller Traduit par Didier Rajon

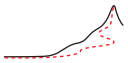
LA MONTAGNE MOUVEMENT

L'AVENTURE DE LA PHYSIQUE – VOL.IV

LE QUANTUM DE CHANGEMENT

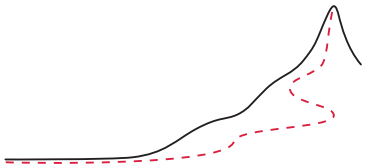


www.motionmountain.net



Christoph Schiller

MONTAGNE MOUVEMENT



L'aventure de la physique
Volume IV

Le quantum de changement

Traduit de l'anglais par Didier Rajon

31ème édition, disponible gratuitement sous forme pdf
avec les films sur www.motionmountain.net

Editio trigesima prima.

Proprietas scriptoris © Chrestophori Schiller
tertio anno Olympiadis trigesimae secundae.

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

Trente-et-unième édition.

Copyright © 1990–2022 par Christoph Schiller,
de la troisième année de la 24ème olympiade
à la troisième année de la 32ème olympiade.



Ce fichier pdf est distribué sous licence Creative Commons Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 3.0 Allemagne, dont le texte peut être consulté en intégralité sur la page internet creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de, avec la restriction supplémentaire que toute reproduction, distribution et utilisation, partielle ou totale, dans *n'importe quel* produit ou service, qu'il soit commercial ou non, n'est pas autorisée sans le consentement écrit du détenteur du droit d'auteur. Toute personne est libre de consulter, enregistrer et imprimer ce fichier pdf pour son usage personnel, et de le diffuser par des moyens électroniques, mais uniquement sous sa forme originale et de manière entièrement gratuite.

To Britta, Esther and Justus Aaron

τῷ ἐμοὶ δαίμονι

Die Menschen stärken, die Sachen klären.

Préface

> Primum movere, deinde docere. *
>
> Antiquité

Cette série de livres s'adresse à toute personne curieuse en ce qui concerne le mouvement dans la nature. Comment les choses, les gens, les animaux, les images et l'espace vide se déplacent-ils? La réponse nous entraine dans de nombreuses aventures, et ce volume présente celles qui sont les conséquences de la découverte qu'il existe une valeur minimale pour les changements dans la nature. Cette valeur de changement minimal, le quantum d'action, conduit à ce que l'on appelle la *physique quantique*. Dans la structure de la physique moderne, que montre la Figure 1, la physique quantique traite quatre des huit sommets. Le présent volume introduit les fondements de la théorie quantique, déduit la structure des atomes, et explique l'introduction des probabilités, des fonctions d'onde et des couleurs.

Cette introduction à la physique quantique est le résultat d'une triple aspiration que j'ai poursuivie depuis 1990: présenter les fondements du mouvement quantique d'une façon simple, à jour et captivante.

Afin d'être *simple*, le texte se concentre sur les concepts, tout en maintenant les mathématiques à leur minimum nécessaire. La priorité est donnée à la compréhension des concepts de la physique plutôt qu'à l'utilisation des formules de calculs. L'intégralité du texte est à la portée d'un étudiant de premier cycle universitaire.

Afin d'être *à jour*, ce texte est enrichi par de nombreux joyaux, aussi bien théoriques qu'empiriques, qui parsèment la littérature scientifique.

Afin d'être *captivant*, le texte tente de surprendre le lecteur autant que possible. Lire un livre de physique générale se doit d'être comme d'assister à un spectacle de magie. On le regarde, on s'en étonne, on n'en croit pas ses yeux, on y réfléchit, et finalement on comprend le truc. Lorsque l'on regarde la nature, on fait souvent la même expérience. C'est pourquoi chaque page propose au moins une surprise ou une provocation qui incitera le lecteur à réfléchir. Un grand nombre de défis intéressants sont proposés.

La devise du texte, *die Menschen stärken, die Sachen klären*, une phrase célèbre en pédagogie, se traduit ainsi: «fortifier les gens, clarifier les choses». Clarifier les choses (et n'adhérer qu'à la vérité) demande du courage, car changer les habitudes de pensée provoque la peur, souvent masquée derrière la colère. Mais en surmontant nos peurs, nous gagnons en force. Et nous éprouvons des émotions intenses et belles. Toutes les

* «D'abord émouvoir, ensuite enseigner.» Dans les langues modernes, le type de *mouvement* mentionné ici (celui du cœur) est appelé *motivation*. Les deux termes sont issus de la même racine latine.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

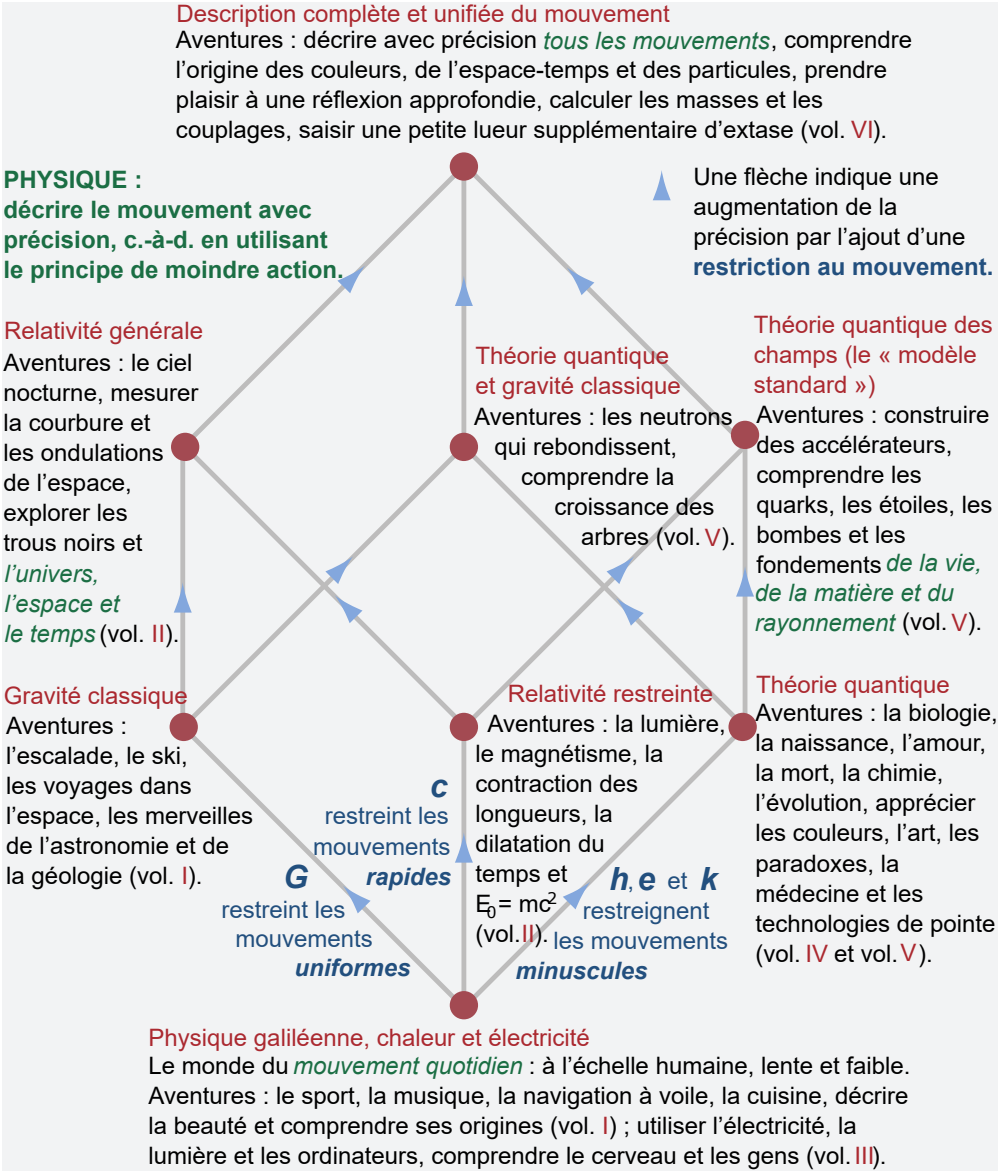


FIGURE 1 Une carte complète de la physique, la science du mouvement, telle qu'elle fut proposée pour la première fois par Matvei Bronshtein (Vinnytsia, 1907 – Leningrad, 1938). Le cube de Bronshtein commence par le bas avec les mouvements de la vie quotidienne et indique les liens vers les domaines de la physique moderne. Chaque lien augmente la précision de la description et est due à la prise en compte d'une restriction du mouvement. Les restrictions sont données par la constante de gravitation G pour les mouvements uniformes, par la vitesse de la lumière c pour les mouvements rapides, et par la constante de Planck h, la charge élémentaire e et la constante de Boltzmann k pour les mouvements minuscules.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

grandes aventures de la vie le permettent, et explorer le mouvement en est une. Bonne lecture!

Christoph Schiller

Comment utiliser ce livre

Les notes en marge renvoient à la bibliographie, à d'autres pages, ou aux solutions des défis. Dans l'édition en couleur, les notes en marge, les liens vers les notes de bas de page et vers des sites internet apparaissent en vert. Avec le temps, les liens vers les sites internet ont tendance à disparaître. La plupart des liens peuvent être recouvrés par l'intermédiaire du site www.archive.org qui garde une copie des anciennes pages internet. Dans l'édition pdf gratuite de ce livre, disponible sur www.motionmountain.net, tous les liens et pointeurs verts sont accessibles en cliquant dessus. L'édition pdf contient également tous les films; ils sont visualisables directement par Adobe Reader.

Des solutions et des suggestions pour les *défis* se trouvent en annexe. Les défis sont classés en facile (f), niveau étudiant (e), difficile (d) et niveau recherche (r). Les défis pour lesquels les solutions n'ont pas encore été introduite dans le livre sont marqués (pe).

Conseils pour l'étudiant

Étudier permet de découvrir quel genre de personne nous pouvons être. L'instruction élargit les connaissances, améliore l'intelligence et apporte un sentiment d'accomplissement. Par conséquent, apprendre à partir d'un livre, en particulier s'il traite de la nature, se doit d'être efficace et d'apporter du plaisir. Méfiez-vous des mauvaises méthodes d'enseignement comme de la peste! N'utilisez pas un marqueur, un stylo ou un crayon pour mettre en évidence ou souligner un texte sur papier. C'est une perte de temps, cela fournit une fausse sensation de confort et rend le texte illisible. Et n'essayez pas d'étudier à partir d'un écran. En particulier, n'essayez jamais, au grand jamais, d'apprendre sur internet, à partir de vidéos, de jeux ou d'un téléphone portable. La plupart des sites internet, presque toutes les vidéos et tous les jeux sont des poisons et des drogues pour le cerveau. Les téléphones portables sont des distributeurs de drogues qui rendent les gens dépendants et les empêchent d'apprendre. Personne n'apprend efficacement ni ne prend du plaisir à le faire en faisant des marques sur du papier ou en regardant un écran.

De ma propre expérience d'élève et d'enseignant, une méthode d'apprentissage n'a jamais manqué de transformer des élèves ayant des difficultés en des élèves couronnés de succès: lorsque vous lisez un texte pour l'étudier, faites un résumé de chacune des sections que vous lisez, *en vos propres termes et images, à voix haute*. Si vous n'y arrivez pas, relisez à nouveau la section. Recommencez jusqu'à ce que vous soyez capable de résumer clairement ce que vous avez lu, en vos propres termes et images, à voix haute. Et *prenez du plaisir* à cette narration à voix haute! Vous pouvez le faire tout seul ou avec des amis, dans une pièce ou tout en marchant. Si vous suivez cette méthode pour tout ce que vous lisez, vous réduirez votre temps d'étude et de lecture de façon significative; vous prendrez beaucoup plus de plaisir à étudier à partir de bons textes et vous détesterez beaucoup moins les mauvais textes. Les personnes qui maitrisent cette méthode peuvent

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

même l'utiliser tout en suivant un cours, à voix basse, évitant ainsi d'avoir à prendre des notes.

Conseils pour l'enseignant

Un enseignant aime les élèves et aime à les guider dans l'exploration du domaine qu'il s'est choisi. Son enthousiasme est la clef pour éprouver de la satisfaction dans son travail. En tant qu'enseignant, avant de débuter un cours, représentez-vous, ressentez et dites-vous à vous-même combien vous appréciez le sujet de la leçon. Ensuite, représentez-vous, ressentez et dites-vous à vous-même comment vous aller conduire chacun de vos élèves à apprécier ce sujet autant que vous-même. Faites cet exercice sciemment, chaque jour. Vous minimiserez les difficultés dans votre classe et maximiserez votre réussite professionnelle.

Ce livre n'a pas été écrit avec les examens à l'esprit; il a été écrit pour que les enseignants et les étudiants *comprennent* et *prennent du plaisir* à la physique, la science du mouvement.

Vos commentaires

La dernière édition pdf de ce texte est, et restera, téléchargeable gratuitement depuis internet. Je serais ravi de recevoir un courriel de votre part à fb@motionmountain.net, tout particulièrement concernant les points suivants:

Défi 1 e
— Qu'est-ce qui n'était pas clair et qui devrait être amélioré?
— Quelle histoire, sujet, énigme, image ou film n'avez-vous pas compris?

De même, toute aide concernant les points spécifiques qui sont énumérés sur la page internet www.motionmountain.net/help.html sera la bienvenue. Tout commentaire sera utilisé pour améliorer la prochaine édition. Je vous invite à envoyer vos commentaires par courrier ou en envoyant un pdf avec vos annotations ajoutées en jaune, à me fournir des illustrations ou des photos, ou bien en contribuant à errata wiki depuis le site internet. Si vous voulez traduire un chapitre du livre dans votre propre langue, merci de me le faire savoir.

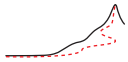
Au nom de tous les lecteurs, merci d'avance pour votre apport. Si votre contribution est particulièrement utile, votre nom sera mentionné (si vous le désirez) dans les remerciements ou vous recevrez une récompense, ou encore les deux.

Votre soutien

Vos dons à l'organisation caritative, à but non lucratif et exonérée d'impôt, qui produit, traduit et publie cette série de livres, sont les bienvenus. Pour plus de détails, visitez la page internet www.motionmountain.net/donation.html. L'autorité fiscale allemande vérifie l'utilisation appropriée de vos dons. Si vous le désirez, votre nom sera ajouté à la liste des sponsors. Merci d'avance pour votre aide au nom de tous nos lecteurs des quatre coins du monde.

La version papier de ce livre est disponible, en couleur ou en noir et blanc, sur www.amazon.com, en anglais et dans quelques autres langues. Mais tout d'abord, bonne lecture!

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Table des matières

7 Préface

Comment utiliser ce livre 9 • Conseils pour l'étudiant 9 • Conseils pour l'enseignant 10 • Vos commentaires 10 • Votre soutien 10

12 Table des matières

16 1 L'action minimale – la théorie quantique pour les poètes

Les effets du quantum d'action sur le repos 21 • Les conséquences du quantum d'action pour les objets 21 • Pourquoi «quantique»? 24 • L'effet du quantum d'action sur le mouvement 27 • Les surprises du quantum d'action 28 • La transformation, la vie et Démocrite 31 • Le hasard – une conséquence du quantum d'action 35 • Les ondes – une conséquence du quantum d'action 37 • Les particules – une conséquence du quantum d'action 38 • L'informatique quantique 39 • Curiosités et défis amusants concernant le quantum d'action 40 • Les dangers de l'achat d'une boite de haricots 41 • Un résumé: la physique quantique, la loi et l'endoctrinement 43

44 2 La lumière – les conséquences étranges du quantum d'action

Comment se comportent les lampes de faible luminosité? 44 • Les Photons 49 • Qu'est-ce que la lumière? 51 • La taille des photons 52 • Peut-on compter les photons? – La lumière compressée 52 • La position des photons 56 • Les photons sont-ils nécessaires? 60 • Les interférences: comment une onde peut-elle être constituée de particules? 63 • L'interférence d'un seul photon 66 • La réflexion et la diffraction déduites des photons à flèches 67 • La réfraction et la réflexion partielle déduites des photons à flèches 69 • Des photons aux ondes 70 • La lumière peut-elle se déplacer plus vite que la lumière? – Les photons réels et les photons virtuels 71 • L'indétermination des champs électriques 73 • Comment l'échange de photons virtuels peut-il conduire à une attraction? 73 • Deux photons peuvent-ils interférer? 74 • Curiosités et défis amusants concernant les photons 75 • Un résumé sur la lumière: particule et onde 79

81 3 Le mouvement de la matière – au-delà de la physique classique

Les verres de vin, les crayons et les atomes – pas de repos 81 • Pas de précision infinie pour les mesures 82 • Les gaz froids 83 • Les écoulements et la quantification de la matière 83 • Les écoulements de fluides et les quantons 84 • Frapper sur les tables et la quantification de la conductivité 84 • Les quantons de matière et leur mouvement – les ondes de matière 85 • La masse et l'accélération des quantons 89 • Pourquoi les atomes ne sont-ils pas plats? Pourquoi les formes existent-elles? 89 • La rotation, la quantification du moment cinétique et la pénurie de pôles Nord 91 • La rotation

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

des quantons 93 • L'argent, Stern et Gerlach – la polarisation des quantons 94 • Curiosités et défis amusants concernant la matière quantique 95 • Premier résumé sur le mouvement des particules quantiques 97

98 4 La description quantique de la matière et de son mouvement
Les états et les mesures – la fonction d'onde 98 • Visualiser la fonction d'onde: les flèches tournantes et les nuages de probabilité 100 • L'évolution de l'état – l'équation de Schrödinger 103 • L'auto-interférence des quantons 105 • La vitesse des quantons 105 • L'étalement des quantons 106 • L'effet tunnel et les limites de la mémoire – l'amortissement des quantons 107 • La phase quantique 109 • Deux faisceaux d'électrons peuvent-ils interférer? Y a-t-il des faisceaux d'électrons cohérents? 113 • Le principe de moindre action en physique quantique 114 • Le mouvement des quantons avec spin 116 • Les équations d'onde relativistes 118 • Les mouvements liés, ou les quantons composites contre les quantons élémentaires 120 • Curiosités et défis amusants concernant le mouvement quantique de la matière 122 • Un résumé sur le mouvement des quantons de matière 124

126 5 La permutation des particules – les particules sont-elles comme les gants?
Différencier les objets macroscopiques 126 • Distinguer les atomes 128 • Pourquoi l'indistinguabilité apparaît-elle dans la nature? 129 • Est-il possible de compter les particules quantiques? 130 • Qu'est-ce que la symétrie de permutation? 131 • L'indistinguabilité et la symétrie de la fonction d'onde 132 • Le comportement des photons 133 • Le regroupement et l'anti-regroupement 134 • La symétrie de permutation dépend de l'énergie 135 • L'indistinguabilité en théorie quantique des champs 136 • Avec quelle précision la symétrie de permutation est-elle vérifiée? 137 • Les copies, les clones et les gants 138 • Résumé 139

141 6 Les rotations et les statistiques – visualiser le spin
Les particules quantiques et la symétrie 141 • Les types de particules quantiques 143 • Le spin 1/2 et les objets attachés 147 • L'extension du tour de la ceinture 150 • Les anges, le principe d'exclusion de Pauli et la dureté de la matière 153 • Le spin est-il une rotation autour d'un axe? 155 • La rotation a besoin des antiparticules 156 • Pourquoi est-il impossible de faire de l'escrime avec des faisceaux laser? 158 • Le spin, les statistiques et les objets composites 158 • La taille et la densité de la matière 159 • Un résumé sur le spin et l'indistinguabilité 160 • Les limites de la statistique quantique et quelques questions qui font toujours débat 160

162 7 Les superpositions et les probabilités – la théorie quantique sans idéologie
Pourquoi les gens sont-ils soit morts soit vivants? 163 • Les superpositions macroscopiques, la cohérence et l'incohérence 163 • La décohérence est due aux thermostats 165 • Comment les thermostats conduisent à la décohérence – la diffusion 166 • Comment les thermostats conduisent à la décohérence – la relaxation 168 • Un résumé sur la décohérence, la vie et la mort 170 • Qu'est-ce qu'un système? Qu'est-ce qu'un objet? 171 • L'intrication 172 • La théorie quantique est-elle non locale? Un aperçu sur le paradoxe Einstein-Podolsky-Rosen 173 • Curiosités et défis amusants concernant les superpositions 176 • Pourquoi est-ce que les probabilités et l'effondrement des fonctions d'onde apparaissent lors des mesures? 178 • Pourquoi $\hbar$ est-il nécessaire aux probabilités? 184 • Les va-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

riables cachées 184 • Résumé sur les probabilités et le déterminisme 186 • Quel est la différence entre l'espace et le temps? 189 • Sommes-nous de bons observateurs? 190 • Quel est le lien entre la théorie de l'information, la cryptologie et la théorie quantique? 190 • L'Univers est-il un ordinateur? 191 • Est-ce que l'Univers a une fonction d'onde? Est-ce qu'il a des conditions initiales? 192

194 8 Les couleurs et autres interactions entre la lumière et la matière

Les origines de la couleur 194 • Déterminer la composition des étoiles en utilisant l'arc-en-ciel 205 • Qu'est-ce qui détermine les couleurs des atomes? 206 • La forme des atomes 210 • La taille des atomes 211 • L'hydrogène relativiste 213 • Les équations d'onde relativistes – à nouveau 214 • Une première familiarisation avec l'équation de Dirac 217 • L'antimatière 217 • Les particules virtuelles 219 • Curiosités et défis amusants concernant la couleur et les atomes 220 • Les propriétés des matériaux 222 • Un défi de taille: la force de l'électromagnétisme 222 • Un résumé sur les couleurs et les matériaux 224

225 9 Pour résumer la physique quantique

Les résultats physiques de la théorie quantique 225 • Résultats concernant le mouvement des particules quantiques 226 • Réalisations en termes d'exactitude et de précision 229 • La théorie quantique est-elle magique? 231 • La théorie quantique est exacte, mais elle peut faire mieux 231

233 A Les unités, les mesures et les constantes

Les unités du SI 233 • La signification de la mesure 236 • Les unités naturelles de Planck 237 • Les autres systèmes d'unités 238 • Curiosités et défis amusants concernant les unités 240 • La précision et l'exactitude des mesures 241 • Les limites de la précision 243 • Les constantes physiques 243 • Nombres utiles 251

252 B Les nombres et les espaces vectoriels

Les nombres en tant que structures mathématiques 253 • Les nombres complexes 254 • Les quaternions 257 • Les octonions 263 • D'autres types de nombres 265 • Des espaces vectoriels aux espaces de Hilbert 265 • Curiosités mathématiques et défis amusants 268

270 Indices et solutions des défis

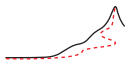
278 Bibliographie

295 Crédits

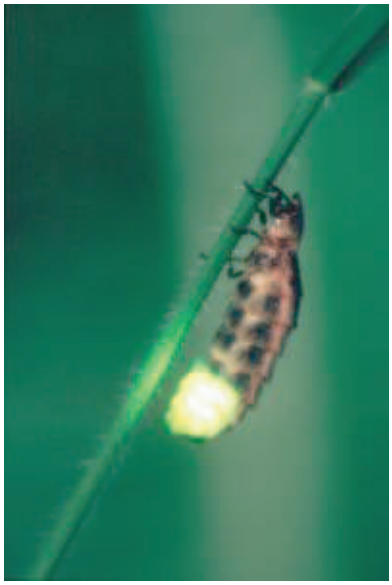
Remerciements 295 • Crédits filmographiques 296 • Crédits photographiques 296

300 Index des noms

307 Index des sujets

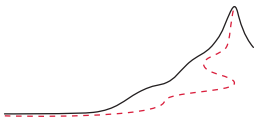


Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net



Le Quantum de Changement

En poursuivant notre recherche pour comprendre comment les choses se déplacent,
nous découvrons qu'il existe une valeur minimale pour le changement dans la nature,
laissant entendre que le mouvement est flou,
que les boites ne sont jamais hermétiques,
que la matière est composée d'unités élémentaires,
et que la lumière et les interactions sont des courants de particules.
La valeur minimale pour le changement explique pourquoi l'antimatière existe,
pourquoi les particules ne sont pas comme les gants,
pourquoi les duplicateurs n'existent pas,
pourquoi les probabilités sont raisonnables,
et comment se forment toutes les couleurs de la nature.



Chapitre 1

L'action minimale – la théorie quantique pour les poètes

> Natura [in operationibus suis] non facit saltus.**
>
> XVe siècle

À ce stade de notre ascension de la montagne mouvement nous avons déjà franchi trois étapes. Nous avons traversé la mécanique de Galilée (la description du mouvement pour les enfants), ensuite nous avons poursuivi avec la relativité d'Einstein (la description du mouvement pour les amateurs de science-fiction), et nous avons finalement exploré l'électrodynamique de Maxwell (la description du mouvement pour les entrepreneurs). Ces trois descriptions classiques du mouvement sont impressionnantes, belles et utiles. Pourtant, elles ont un petit défaut: elles sont fausses. La raison en est simple: aucunes d'entre elles ne décrit *la vie*. Chaque fois que l'on observe une fleur ou un papillon, tels que ceux de la Figure 2, on prend plaisir aux couleurs éclatantes, au mouvement, à la senteur sauvage, à la forme douce et délicate ou aux détails magnifiques de leurs symétries. Pourtant, nous savons que

▷ La physique classique ne peut expliquer aucune longueur caractéristique, ni aucune échelle de temps que l'on observe dans la nature.

Or, les fleurs et les animaux – mais également de nombreux systèmes inanimés – ont des tailles caractéristiques, des échelles de grandeurs et des proportions; ils ont aussi des rythmes caractéristiques. Mais il se trouve que la physique classique ne peut pas expliquer leur origine, parce que

▷ Les constantes classiques de la nature (la constante de gravitation G, la constante des gaz parfaits R, la vitesse de la lumière c, la permittivité diélectrique du vide ε_0 et la perméabilité magnétique du vide μ_0) ne permettent pas de définir des échelles de longueur ou de temps. Et elles ne peuvent pas être utilisées pour fabriquer un mètre étalon.

En fait, les constantes classiques ne nous permettent même pas de mesurer les valeurs des vitesses ou des forces, bien que les résultats de ces mesures soient des fractions de c et de c^4/G, car pour pouvoir mesurer des fractions, nous avons d'abord besoin de les

Ref. 1 ** «La nature [dans ses rouages] ne fait pas de sauts.»

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net



FIGURE 2 Exemples de machines quantiques. (© Linda de Volder)

définir. Cependant, définir des fractions nécessite aussi des échelles de longueur ou de temps et des unités, que la physique classique ne permet pas.

Sans mesure, il n'y a pas non plus d'émotions! En effet, nos émotions sont déclenchées par nos sens. Et toutes les impressions, de même que toutes les informations que nos sens nous fournissent, sont – entre autres choses – des mesures. Puisque la physique classique ne fournit pas d'échelles de mesure, nous savons que

▷ La physique classique ne permet pas de comprendre les sens ni les émotions.

La raison pour toutes ces limitations est la suivante:

▷ La physique classique, à elle seule, ne peut pas servir à fabriquer des instruments de mesure.

Chacun de nos sens contient des instruments de mesure. Et tout instrument de mesure, de même que tout motif ou tout rythme, a besoin d'une échelle interne ou, plus généralement, d'une unité de mesure interne. Parce que la physique classique ne fournit pas d'échelle de grandeur, elle n'explique pas comment les instruments de mesure fonctionnent, ni comment les sens fonctionnent, ni comment les émotions apparaissent.

Pour comprendre les émotions et la vie, il nous faut aller *au-delà* de la physique clas-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

sique. Prenez n'importe quel exemple d'une situation agréable,* tel qu'un beau ciel du soir, une chute d'eau, un enfant heureux ou une caresse. La physique classique n'est capable d'expliquer aucun des aspects de la situation. Premièrement, les couleurs et leur origine demeurent mystérieuses. Deuxièmement, toutes les formes, les tailles et les proportions demeurent mystérieuses. Troisièmement, on ne peut pas comprendre le chronométrage et la durée des processus impliqués. Quatrièmement, toutes les sensations et les émotions produites par la situation demeurent mystérieuses. Pour comprendre et expliquer ces aspects, nous avons besoin de la *théorie quantique*. En fait, nous découvrirons que *la vie* et que *toutes les formes de plaisir* sont des exemples de mouvements quantiques. Les émotions sont des processus quantiques.

Défi 2 e

Aux premiers jours de la physique, l'impossibilité de décrire la vie et le plaisir n'était pas vue comme une lacune, parce que ni les sens, ni les propriétés des matériaux, ni les échelles de grandeur n'étaient perçus comme ayant un rapport avec le mouvement. Et de toute façon, le plaisir n'était pas considéré comme un sujet d'investigation sérieux pour le chercheur respectable. Aujourd'hui, la situation est différente. Au cours de notre aventure, nous avons appris que nos sens du temps, de l'ouïe, du toucher, de l'odorat et de la vue étaient principalement des *détecteurs de mouvement*. Sans mouvement, les sens n'existeraient pas. De plus, tous les détecteurs sont faits de matière. Lors de notre exploration de l'électromagnétisme, nous avons commencé à comprendre que toutes les propriétés de la matière étaient dues aux mouvements de constituants électriquement chargés. La densité, la rigidité, les couleurs et toutes les autres propriétés des matériaux découlent du comportement électromagnétique des pièces de lego qui composent la matière: les molécules, les atomes et les électrons. Donc, les propriétés de la matière sont également des conséquences du mouvement. De plus, nous avons vu que ces constituants minuscules n'étaient *pas* décrits correctement par l'électrodynamique classique. Nous avons découvert que même la lumière ne se comportait pas de façon classique. Par conséquent, l'incapacité de la physique classique à décrire la matière, la lumière et les sens est bel et bien due à ses limitations intrinsèques.

Vol. I, page 411

Vol. III, page 231

Vol. III, page 247

Vol. III, page 149

En fait, il est possible de faire remonter l'origine de tous les échecs de la physique classique à une seule découverte fondamentale faite en 1899 par Max Planck:**

Ref. 2

▷ Dans la nature, on n'observe pas de valeur d'action plus petite que $\hbar = 1,06 \cdot 10^{-34}$ Js.

Toutes les tentatives pour observer des valeurs d'action physique plus petite que celle-ci,

* La photographie de la page 15 montre une femelle de ver luisant, *Lampyris noctiluca*, comme on en trouve couramment au Royaume Unis (© John Tyler, www.johntyler.co.uk/gwfacts.htm).

** Max Planck (1858 – 1947), professeur de physique à Berlin, était une figure centrale en thermodynamique et en physique moderne. Il découvrit et nomma la *constante de Boltzmann k* et le *quantum d'action h*, souvent appelée la *constante de Planck*. Son introduction de l'hypothèse quantique a donné naissance à la théorie quantique. Il fit également connaître les travaux d'Einstein auprès de la communauté scientifique, et il arrangea ensuite un poste pour lui à Berlin. Il reçut le prix Nobel de physique en 1918. Il était une figure importante au sein des institutions scientifiques allemandes. Il était également l'une des rares personnes à avoir le courage de dire *face-à-face* à Adolf Hitler que l'idée de renvoyer les professeurs juifs était mauvaise. (Il reçut un déchaînement de colère en réponse.) Connu pour être modeste, avec de nombreuses tragédies dans sa vie personnelle, il était estimé par tous ceux qui le connaissaient.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

échouent.* Autrement dit, dans la nature, comme dans un bon film, il y a toujours de l'action. L'existence d'une valeur minimale pour l'action (ce que l'on appelle le *principe quantique*) contraste franchement avec la physique classique. (Pourquoi?) Malgré tout, le principe quantique a passé avec succès d'innombrables tests expérimentaux, dont nous rencontrerons un grand nombre lors de cette étape de notre ascension de la montagne. Par-dessus tout, le principe quantique n'a jamais échoué à un seul test. La constante fondamentale $\hbar$, que l'on prononce «hache-barre», s'appelle le *quantum d'action*, ou alternativement la *constante de Planck*. Planck découvrit le principe quantique alors qu'il étudiait les propriétés de la lumière incandescente, c.-à-d. de la lumière émanant des objets chauds. Mais le principe quantique s'applique également au mouvement de la matière, et même, comme on le verra plus tard, au mouvement de l'espace vide, tel que les ondes gravitationnelles.

Défi 3 e

Vol. III, page 149

Le principe quantique établit qu'aucune expérience ne peut mesurer une action plus petite que $\hbar$. Pendant longtemps, Einstein essaya de concevoir des expériences pour surmonter cette restriction. Mais toutes ses tentatives se soldèrent par des échecs: la nature ne le permet pas, comme Bohr le démontra maintes et maintes fois. De nombreux autres chercheurs firent le même constat.

Rappelons-nous qu'en physique, comme au cinéma, l'action est une mesure du *changement* qui se produit dans un système. Le principe quantique peut donc se reformuler en:

Vol. I, page 248

▷ Dans la nature, il n'est pas possible d'observer un changement plus petit que $\hbar = 1,06 \cdot 10^{-34}$ Js.

Par conséquent, une action minimale implique qu'*il existe une valeur minimale pour le changement dans la nature*. Lorsque l'on compare deux observations, il y aura toujours quelque chose de changé entre les deux. Pour cette raison, le quantum d'action serait peut-être mieux nommé le *quantum de changement*.

Est-il possible qu'un changement minimal puisse réellement exister dans la nature? Pour accepter l'idée, il nous faut explorer trois points, détaillés dans le Tableau 1. Il nous faut montrer qu'un changement plus petit n'est *jamais observé* dans la nature; il nous faut montrer que des valeurs de changement plus petites ne *peuvent jamais* être observées; et finalement, il nous faut montrer que *toutes les conséquences* de ce changement minimal, aussi bizarres qu'elles puissent paraître, s'appliquent à la nature. En fait, cette exploration constitue l'ensemble de la physique quantique. Par conséquent, tout ce que nous faisons

* En fait, cette histoire est une légère simplification: la constante introduite initialement par Planck était la constante (non réduite) $h = 2\pi\hbar$. Le facteur 2π qui conduisit au principe quantique final, fut ajoutée quelques temps plus tard, par d'autres chercheurs.

Cette approche de la théorie quantique, quelque peu non conventionnelle, mais utile sur le plan didactique, est due à Niels Bohr. De nos jours, elle est rarement rencontrée dans la littérature, malgré sa simplicité.

Ref. 3, Ref. 4

Niels Bohr (Copenhague, 1885 – Copenhague, 1962) fut l'une des grandes figures de la physique moderne. Un penseur audacieux et un homme poli, il fit de l'Université de Copenhague le nouveau centre de développement de la théorie quantique, surpassant Göttingen. Il développa la description de l'atome en termes de théorie quantiques, ce qui lui valut le prix Nobel de physique en 1922. Il dut fuir le Danemark en 1943 après l'invasion allemande, à cause de son origine juive, mais il y retourna après la guerre, continuant d'y attirer les meilleurs physiciens du monde.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

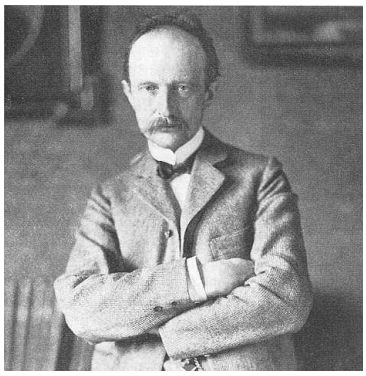


FIGURE 3 Max Planck (1858 – 1947)



FIGURE 4 Niels Bohr (1885 – 1962)

TABLEAU 1 Comment se convaincre soi-même, ainsi que les autres, qu'il y a une action minimale (un changement minimal) $\hbar$ dans la nature. Comparez ce tableau avec les deux tableaux du volume II, celui concernant la vitesse maximale à la page 26, et celui concernant la force maximale à la page 109.

AFFIRMATION	VÉRIFICATION
La valeur minimale $\hbar$ de l'action est la même pour tous les observateurs.	Vérifier toutes les observations.
Aucune valeur locale de changement (d'action) $< \hbar$ n'est observée.	Vérifier toutes les observations.
Aucune valeur locale de changement (d'action) $< \hbar$ ne peut être produite.	Vérifier toutes les tentatives.
Aucune valeur locale de changement (d'action) $< \hbar$ ne peut pas même être imaginée.	Résoudre tous les paradoxes.
La valeur minimale $\hbar$ de changement local (d'action locale) est un principe de la nature.	En déduire la théorie quantique.
	Montrer que toutes les conséquences, aussi bizarres soient-elles, sont confirmées par l'observation.

dans le reste de cette étape de notre aventure, est de procéder à ces vérifications. Mais avant d'explorer certaines expériences qui confirment l'existence d'un changement minimal, nous allons commencer par présenter quelques-unes de ses conséquences les plus surprenantes.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Les effets du quantum d'action sur le repos

Puisque l'action est une mesure du changement, une action observable minimale signifie que deux observations successives d'un même système diffèreront toujours d'au moins $\hbar$. Dans tout système, il se passe toujours *quelque chose*. Par conséquent, nous trouvons que

▷ Dans la nature, *il n'y a pas de repos*.

Page 16 Tout bouge, tout le temps, au moins un petit peu. *Natura facit saltus.** Il est vrai que ces sauts sont minuscules, puisque $\hbar$ est trop petit pour être observable par l'un quelconque de nos sens. Néanmoins, le repos n'est observable que sur le plan macroscopique, et seulement en tant que moyenne, sur un temps long ou sur un grand nombre de particules. Par exemple, le quantum d'action implique que dans une montagne (l'archétype d'un système au repos) tous les atomes et les électrons s'activent en permanence. En bref,

▷ Il y a du mouvement *à l'intérieur de la matière*.

Puisqu'il a une action minimale pour tous les observateurs, et puisqu'il n'y a pas de repos, on en déduit que

▷ Dans la nature *il n'y a pas de mouvement parfaitement rectiligne ou parfaitement uniforme*.

Oubliez tout ce que vous avez appris jusqu'à maintenant: le mouvement inertiel est une approximation! Un objet ne peut se déplacer en suivant une trajectoire en ligne droite et uniforme que de façon approximative, et seulement s'il est observé sur de longues distances ou sur une longue période de temps. Nous verrons plus tard que plus l'objet est Défi 4 e massique, plus l'approximation est bonne. (Pouvez-vous le confirmer?) Donc, les observateurs *macroscopiques* peuvent continuer à parler de symétries de l'espace-temps, et la relativité *restreinte* peut se réconcilier avec la théorie quantique.

De même, la *chute libre* (le mouvement le long d'une géodésique) n'existe qu'en tant que moyenne sur une longue période. Donc, la relativité *générale*, qui est basée sur l'existence d'observateurs en chute libre, ne peut pas être correcte quand elle concerne des actions de l'ordre de $\hbar$. En effet, la réconciliation du principe quantique avec la relativité générale, et donc avec l'espace courbe, est un grand défi. (La solution est simple uniquement dans le cas des champs faibles de la vie quotidienne.) Les questions que cela soulève sont tellement déconcertantes qu'elles constituent une étape indépendante à la fin de notre aventure. Nous allons donc d'abord explorer les situations qui ne font pas intervenir la gravité.

Les conséquences du quantum d'action pour les objets

Ne vous êtes-vous jamais demandé pourquoi les feuilles sont vertes? Vous savez sans doute qu'elles sont vertes parce qu'elles absorbent la lumière bleu (les petites longueurs

* «La nature fait des sauts.»

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

d'ondes) et la lumière rouge (les grandes longueurs d'ondes), tout en permettant à la lumière verte (les longueurs d'ondes intermédiaires) de se réfléchir. Comment se peut-il qu'un système puisse éliminer le petit et le grand, tout en laissant passer ce qu'il y a entre les deux? Pour ce faire, les feuilles doivent, d'une façon ou d'une autre, *mesurer* la fréquence. Mais nous avons vu que la physique classique ne permettait pas de mesurer les intervalles de temps ou de longueur, car toute mesure nécessite une unité de mesure, et
Vol. I, page 439 la physique classique ne permet pas de définir de telles unités. D'autre part, il ne faut que quelques lignes pour confirmer qu'avec l'aide du quantum d'action $\hbar$ (et de la constante de Boltzmann k, toutes les deux découvertes par Planck), il est possible de définir les unités fondamentales pour *toutes* les grandeurs mesurables, y compris pour le temps et donc pour les fréquences. (Pouvez-vous trouver une combinaison de la vitesse de la lumière c,
Défi 5 e de la constante de gravitation G et du quantum d'action $\hbar$ qui produise une durée? Cela ne prendra que quelques minutes.)

En bref, les mesures sont possibles uniquement parce que le quantum d'action existe:

▷ Toutes les mesures *sont des effets quantiques*.

Lorsque Planck se rendit compte que le quantum d'action permettait de définir toutes les unités de la nature, il devint heureux comme un gamin. Il reconnut sur le champ qu'il venait de faire une découverte fondamentale, même si, en 1899, la théorie quantique n'existait pas encore. Il en parla même à Erwin, son fils de sept ans, alors qu'il marchait
Ref. 5 avec lui dans les bois autour de Berlin. Planck expliqua à son fils qu'il venait de faire une découverte aussi importante que celle de la gravitation universelle. En effet, Planck savait qu'il venait de trouver la clef qui permettrait de comprendre un grand nombre des effets restant encore inexpliqués à l'époque.

▷ Dans la nature, *toutes les durées et toutes les fréquences sont dues au quantum d'action*.

Tous les processus qui prennent du temps sont des processus quantiques. Si vous préférez, *attendre* est un effet quantique! En particulier, sans le quantum d'action, les oscillations et les ondes ne pourraient pas exister:

▷ Toute couleur est un effet quantique.

Mais ce n'est pas tout. Planck réalisa également que le quantum d'action nous permettait de comprendre la *taille* de toutes choses:

▷ Toute taille est un effet quantique.

Défi 6 f Pouvez-vous trouver la combinaison de c, G et $\hbar$ qui conduit à une longueur? Avec le quantum d'action, il devint finalement possible de déterminer la taille maximale des
Vol. I, page 338 montagnes, des arbres et des êtres humains. Planck savait que le quantum d'action confirmait ce que Galilée avait déduit bien longtemps avant lui: que les tailles étaient dues à des échelles fondamentales, minimales de la nature.

Max Planck comprit également que le quantum d'action $\hbar$ était la *dernière constante*

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

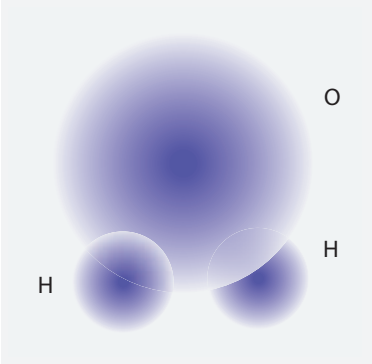


FIGURE 5 Représentation par un artiste d'une molécule d'eau composée de deux atomes d'hydrogène (H) et d'un atome d'oxygène (O).

manquante de la nature. Avec $\hbar$, il devient possible de définir une unité *naturelle* pour *toutes* les propriétés observables de la nature. Ensemble, c, G et $\hbar$ permettent de définir des unités qui sont indépendantes d'une culture ou d'une civilisation (même des extraterrestres pourraient les comprendre).* En bref, $\hbar$ permet de comprendre *toutes* les observables. C'est pourquoi, avec $\hbar$ il est possible de dessiner le diagramme de la Figure 1 qui englobe *tous* les mouvements de la nature, et donc *toute* la physique. Dans notre environnement, la taille de tous les objets dépend de (et est due à) la taille des atomes. Mais il se trouve que la taille des atomes est une conséquence directe du quantum d'action. Pouvez-vous dériver une approximation de la taille des atomes, sachant qu'elle est donnée par le mouvement des électrons, de masse m_e et de charge e, contraints par le quantum d'action? Cette formule simple a été découverte en 1910 par Arthur Erich Haas, 15 ans avant que la théorie quantique ne soit formulée.

Défi 8 e

▷ Les tailles des atomes sont des effets quantiques.

À l'époque, Haas fut largement ridiculisé.** De nos jours, sa formule sur la taille des atomes se trouve dans tous les manuels, y compris celui-ci. Parce qu'il détermine la taille des atomes, le quantum d'action a une autre conséquence importante:

Page 211

▷ Les *voyages de Gulliver* sont impossibles.

Il n'existe pas de personnes minuscules, ni de géants. Classiquement, rien ne s'oppose à l'idée, mais le quantum d'action l'en empêche. Pouvez-vous fournir un argument détaillé?

Défi 9 e

Mais si le repos n'existe pas, comment les *formes* peuvent-elles exister? N'importe quelle forme de la vie quotidienne, y compris celle d'une fleur, est le résultat de consti-

* En fait, il est également possible de définir toutes les unités de mesure en termes de la vitesse de la lumière c, de la constante de gravitation G et de la charge de l'électron e. Pourquoi ceci n'est-il pas entièrement satisfaisant?

Défi 7 e

** Avant la découverte de $\hbar$, la seule échelle de longueur simple pour l'électron était la combinaison $e^2/(4\pi\varepsilon_0 m_e c^2) \approx 3\,\mathrm{fm}$, ce qui est dix mille fois plus petit qu'un atome. Soulignons que toute échelle de longueur contenant e est un effet quantique, et non pas une échelle de longueur classique, parce que e est le quantum de charge électrique.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net



FIGURE 6 Max Born (1882 – 1970)

tuants qui restent *au repos* les uns par rapport aux autres. Or, toutes les formes résultent d'interactions entre les constituants de la matière, comme le montrent très clairement les formes des molécules. Mais comment se fait-il qu'une molécule, telle que la molécule d'eau H_2O, illustrée sur la Figure 5, puisse avoir une forme? En réalité, une molécule n'a pas une forme *figée*, mais sa forme fluctue, comme on pourrait s'y attendre d'après le quantum d'action. Malgré les fluctuations, toutes les molécules ont bien une forme *moyenne*, parce que des angles et des distances différentes correspondent à des énergies différentes. Une fois de plus, ces valeurs moyennes pour les longueurs et les angles existent uniquement parce que le quantum d'action conduit à des échelles fondamentales de longueur dans la nature. Sans le quantum d'action, il n'y aurait *pas* de formes dans la nature:

▷ Toutes les formes sont des effets quantiques.

Toute les formes de la vie quotidienne sont dues aux formes des molécules, ou à leurs généralisations.

La *masse* d'un objet est également une conséquence du quantum d'action, comme nous le verrons plus loin. Puisque toutes les propriétés des matériaux (telles que la densité, la couleur, la rigidité ou la polarisabilité) se définissent par des combinaisons d'unités de longueur, de temps et de masse, nous en déduisons que

▷ Toutes les propriétés des matériaux découlent du quantum d'action.

En bref, le quantum d'action détermine la taille, la forme, la couleur, la masse et toutes les autres propriétés des objets, depuis les pierres jusqu'à la crème fouettée.

Pourquoi «quantique»?

Nous sommes entourés d'effets quantiques de toutes parts. Cependant, le quantum d'action est si petit que ses effets sur le *mouvement* apparaissent principalement (mais pas exclusivement) pour les systèmes *microscopiques*. L'étude de tels systèmes était dénommée *mécanique quantique* par Max Born, l'un des principaux contributeurs dans le

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 2 Quelques petit systèmes en mouvement et les valeurs de l'action que l'on observe pour leurs changements.

Système et changement	Action	Mouvement
La lumière		
La plus petite quantité de lumière absorbée par une surface colorée	$1\,\hbar$	quantique
Le plus petit impact lorsque la lumière se réfléchie sur un miroir	$2\,\hbar$	quantique
La plus petite quantité de lumière visible consciemment	$\approx 5\,\hbar$	quantique
La plus petite quantité de lumière absorbée par un pétale de fleur	$1\,\hbar$	quantique
Le noircissement d'un film photographique	$\approx 3\,\hbar$	quantique
Un flash photographique	$\approx 10^{17}\,\hbar$	classique
L'électricité		
Un électron éjecté d'un atome ou d'une molécule	$\approx 1-2\,\hbar$	quantique
Un électron arraché d'un métal	$\approx 1-2\,\hbar$	quantique
Le mouvement d'un électron à l'intérieur d'un microprocesseur	$\approx 2-6\,\hbar$	quantique
Le transport d'un signal par les nerfs, d'une molécule à la suivante	$\approx 5\,\hbar$	quantique
L'écoulement du courant électrique dans un éclair	$\approx 10^{38}\,\hbar$	classique
Les matériaux		
Séparer deux atomes voisins dans le fer	$\approx 1-2\,\hbar$	quantique
Casser une barre d'acier	$\approx 10^{35}\,\hbar$	classique
Le processus élémentaire de supraconductivité	$1\,\hbar$	quantique
Le processus élémentaire dans les transistors	$1\,\hbar$	quantique
Le processus élémentaire de magnétisation	$1\,\hbar$	quantique
La chimie		
Une collision entre atomes dans un liquide à température ambiante	$1\,\hbar$	quantique
Une oscillation de la forme d'une molécule d'eau	$\approx 1-5\,\hbar$	quantique
Le changement de forme d'une molécule, ex. lors d'une réaction chimique	$\approx 1-5\,\hbar$	quantique
Une seule réaction chimique frisant un cheveu	$\approx 2-6\,\hbar$	quantique
Séparer deux molécules de mozzarella	$\approx 300\,\hbar$	quantique
Sentir une seule molécule odorante	$\approx 10\,\hbar$	quantique
Brûler le carburant dans un cylindre lors de l'explosion d'un moteur de voiture	$\approx 10^{37}\,\hbar$	classique
La vie		
Une molécule d'air frappant le tympan de l'oreille	$\approx 2\,\hbar$	quantique
Le plus petit signal sonore détectable par l'oreille	Défi 10 pe	
Une seule étape de la duplication de l'ADN lors d'une division cellulaire	$\approx 100\,\hbar$	quantique
La fertilisation d'un ovule	$\approx 10^{14}\,\hbar$	classique
La plus petite étape dans un moteur moléculaire	$\approx 5\,\hbar$	quantique
Le déplacement d'un spermatozoïde le long d'une cellule	$\approx 10^{15}\,\hbar$	classique
Une division cellulaire	$\approx 10^{19}\,\hbar$	classique
Le battement d'aile d'une mouche des fruits	$\approx 10^{24}\,\hbar$	classique
Une personne marchant sur une longueur équivalente au corps humain	$\approx 2 \cdot 10^{36}\,\hbar$	classique
Les noyaux et les étoiles		
Une réaction de fusion nucléaire dans une étoile	$\approx 1-5\,\hbar$	quantique
L'explosion produisant un sursaut de rayons gamma	$\approx 10^{80}\,\hbar$	classique

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

domaine.* Plus tard, le terme *théorie quantique* est devenu plus populaire.

La théorie quantique découle de l'existence de valeurs mesurables *minimales* dans la nature, généralisant l'idée que Galilée avait eu au XVIIe siècle. Comme nous l'avons vu
Vol. I, page 335
en détails un peu plus tôt, c'était l'insistance de Galilée pour les «piccolissimi quanti» (quanta minimaux) de la matière qui lui valurent tous ses ennuis. Nous allons bientôt découvrir que l'idée d'un changement minimal est nécessaire à une description précise et exacte de la matière et de la nature dans son ensemble. C'est pour cela que Born adopta le terme de Galilée pour cette nouvelle branche de la physique et l'appela «Quantentheorie» (théorie des quanta). L'anglais a adopté le mot latin singulier «quantum» au lieu du pluriel «quanta» utilisé par la plupart des autres langues.**

Notez que le terme «quantique» ne sous-entend *pas* que toutes les valeurs issues de mesures sont des *multiples* d'une valeur minimale: ceci est vrai seulement dans quelques cas.

La théorie quantique est la description des mouvements microscopiques. La théorie quantique est *nécessaire* chaque fois qu'un processus produit une action dont la valeur est du même ordre de grandeur que le quantum d'action. Le Tableau 2 montre que tous les processus à l'échelle d'un atome ou d'une molécule, y compris les processus biologiques et chimiques, sont des processus quantiques, comme c'est le cas également pour les processus d'émission et d'absorption de la lumière. Ces phénomènes ne peuvent être expliqués *que* par la théorie quantique.

Le Tableau 2 montre également que le terme «microscopique» a un sens différent lorsqu'il est utilisé par un physicien ou par un biologiste. Pour le biologiste, un système est «microscopique» s'il nécessite un microscope pour son observation. Pour le physicien, un système est *microscopique* si son action caractéristique est du même ordre de grandeur que le quantum d'action. Autrement dit, pour le physicien, si un système est microscopique, il n'est en général *même pas* visible à l'aide d'un microscope (optique). Pour rajouter à la confusion, de nos jours, certains physiciens spécialistes de la quantique utilisent le terme «mésoscopique» pour désigner leur propre classe de systèmes microscopiques, alors que d'autres utilisent «nanoscopique». Les deux termes ont été introduits seulement pour attirer l'attention et les financements: ils sont conceptuellement inutiles.

* Max Born (Breslau, 1882 – Göttingen, 1970) commença par étudier les mathématiques, puis se tourna vers la physique. Professeur à l'université de Göttingen, il fit de la ville l'un des centres mondiaux de la physique. Il développa la mécanique quantique avec ses assistants Werner Heisenberg et Pascual Jordan, pour ensuite l'appliquer à la diffusion, à la physique de l'état solide, à l'optique et aux liquides. Il fut le
Ref. 6
premier à comprendre que la fonction d'onde (la fonction d'état) décrivait une amplitude de probabilité. Plus tard, Born et Emil Wolf écrivirent ce qui est encore aujourd'hui le principal manuel d'optique. Un grand nombre de livres écrits par Born étaient des classiques et se lisaient dans le monde entier.

Born attira à Göttingen les talents les plus brillants de l'époque, recevant en tant que visiteur Hund, Pauli, Nordheim, Oppenheimer, Goeppert-Mayer, Condon, Pauling, Fock, Frenkel, Tamm, Dirac, Mott, Klein, Heitler, London, von Neumann, Teller, Wigner et des douzaines d'autres. Étant juif, Born perdit son travail en 1933 quand des criminels prirent le pouvoir du gouvernement allemand. Il émigra et devint professeur à Édinbourg, où il resta 20 ans. La physique à Göttingen ne se remit jamais de cette perte. Pour avoir élucidé la signification de la fonction d'onde, il reçut le prix Nobel de physique en 1954.

** La langue française parle plus communément de la «théorie quantique» ou de la «mécanique quantique», ou parfois encore tout simplement de la «quantique» [N.d.T.].

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net



FIGURE 7 Werner Heisenberg (1901 – 1976)

L'effet du quantum d'action sur le mouvement

Il existe un autre moyen pour caractériser la différence entre un système microscopique (quantique) et un système macroscopique (classique). Une action minimale implique que la différence entre les valeurs S de l'action d'un même système lors de deux observations successives, séparées par un intervalle de temps Δt, ne peut pas s'annuler. Nous avons

$$|S(t + \Delta t) - S(t)| = |(E \pm \Delta E)(t + \Delta t) - Et| = |E\Delta t \pm t\Delta E \pm \Delta E\Delta t| \geqslant \frac{\hbar}{2} \,. \qquad (1)$$

Le facteur 1/2 apparaît parce qu'une action minimale $\hbar$ implique automatiquement une indétermination de l'action de la moitié de sa valeur. Or, les valeurs de l'énergie E et du temps t, mais pas celles (positives) de ΔE ou de Δt, peuvent être ramenées à zéro si on choisit un observateur convenable. Donc, l'existence d'un quantum d'action implique que, dans tout système, l'évolution est contrainte par

$$\Delta E\Delta t \geqslant \frac{\hbar}{2} \,, \qquad (2)$$

où E est l'énergie du système et t est son âge, de sorte que ΔE est le changement d'énergie et Δt l'intervalle de temps entre les deux observations successives.

Défi 11 f En faisant un raisonnement similaire, on trouve que pour tout système physique, la position et la quantité de mouvement sont contraints par

$$\Delta x\Delta p \geqslant \frac{\hbar}{2} \,, \qquad (3)$$

où Δx est l'indétermination sur la position et Δp est l'indétermination sur la quantité de mouvement. Ces deux relations célèbres ont été nommées *relations d'indétermination* par leur découvreur, Werner Heisenberg.* On les appelle souvent les «relations

* On entend souvent dire que la relation d'indétermination sur l'énergie et le temps a une importance différente de celle sur la position et la quantité de mouvement. C'est une idée fausse, propagée par les anciennes générations de physiciens, qui a survécu au travers de nombreux manuels pendant plus de 70 ans.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

d'incertitude», mais ce terme est incorrect. Les quantités ne sont pas incertaines, mais *indéterminées*. À cause du quantum d'action, les observables d'un système n'ont *pas* de valeurs définies. Il n'y a pas moyen d'assigner une valeur précise à la quantité de mouvement, à la position, ou à toute autre observable d'un système quantique. Nous utiliserons le terme «relations d'indétermination» dans toute la suite de ce texte. L'habitude d'appeler la relation un «principe» est encore plus erronée.

Tout système dont l'indétermination est du même ordre de grandeur que $\hbar$ est un système quantique. Si le produit d'indétermination est beaucoup plus grand, le système est classique, et dans ce cas la physique classique est suffisante pour sa description. Donc, bien que la physique classique suppose qu'il n'y ait *pas* d'indéterminations de mesures dans la nature, un système est *classique* seulement si ses indéterminations sont *grandes* par rapport aux valeurs minimales possibles!

Autrement dit, la théorie quantique est nécessaire chaque fois que l'on essaye de mesurer une quantité avec la plus grande précision possible. En fait, chaque mesure est, en elle-même, un processus quantique. Et la relation d'indétermination implique que la précision des mesures est limitée. Le quantum d'action montre que

▷ *Il n'est pas possible d'observer le mouvement avec une précision infinie.*

Autrement dit, le monde microscopique est *flou*. Ce fait a de nombreuses conséquences importantes et de nombreuses qui sont étranges. Par exemple, si le mouvement ne peut être observé avec une précision infinie, le concept même de mouvement doit être manipulé avec beaucoup de précaution, car il existe certaines situations pour lesquelles il ne peut pas s'appliquer. Dans un sens, le reste de notre quête n'est qu'une exploration des implications de ce résultat.

En fait, tant que l'espace-temps est *plat*, il se trouve que l'on *peut* conserver le concept de mouvement pour décrire les observations, tout en restant conscient des limitations qu'implique le principe quantique.

Les surprises du quantum d'action

Le quantum d'action $\hbar$ implique que tous les mouvements sont flous. Ce manque de netteté implique à son tour l'existence de déviations de courtes durées par rapport aux

Oubliez-la tout simplement. Il est essentiel de se rappeler que les quatre grandeurs qui apparaissent dans les inégalités décrivent les propriétés *internes* du système. En particulier, t est une variable de temps déduite des changements que l'on observe à *l'intérieur* du système, et non pas la coordonnée de temps mesurée par une horloge externe. De même, la position x n'est pas la coordonnée externe d'espace, mais la position qui caractérise le système.

Ref. 7

Werner Heisenberg (1901 – 1976) était un physicien théoricien important, ainsi qu'un excellent joueur de ping-pong et de tennis. En 1925, alors qu'il n'était encore qu'un jeune homme, il développa, avec l'aide de Max Born et de Pascual Jordan, la première version de la théorie quantique, à partir de laquelle il déduisit les relations d'indétermination. Pour ces accomplissements, il reçut le prix Nobel de physique en 1932. Il travailla également dans le domaine de la physique nucléaire et celui des turbulences. Pendant la Seconde Guerre mondiale, il travailla sur le programme de fission nucléaire. Après la guerre, il publia plusieurs livres à succès sur des questions de philosophie en physique. Il se transforma lentement en un excentrique et tenta sans succès (avec l'aide, sans grande conviction, de Wolfgang Pauli) de trouver une description unifiée de la nature basée sur la théorie quantique, la «formule universelle».

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

conservations de l'énergie, de la quantité de mouvement et du moment cinétique, dans le cas des systèmes microscopiques. Afin de rassurer tout le monde, il nous faut signaler qu'en ce qui concerne les observations de longues durée (du moins pour toutes les durées supérieures à la microseconde) la conservation reste valide. Mais dans la première partie de notre aventure, nous avons constaté que tout type de non-conservation impliquait l'existence de *surprises* dans la nature. Eh bien en voici quelques-unes.

Vol. I, page 238

Puisque le mouvement parfaitement uniforme n'existe pas, un système qui se déplacerait suivant une seule dimension (tel qu'une aiguille d'horloge) a toujours la possibilité de se déplacer un petit peu dans la direction opposée, ce qui conduit à une lecture incorrecte de la valeur. En effet, la théorie quantique prédit que les horloges ont des limitations fondamentales:

▷ Les horloges parfaites n'existent pas.

Les implications profondes de cette affirmation deviendront évidentes petit à petit.

Il est également impossible d'éviter qu'un objet fasse des petits déplacements latéraux. En fait, la théorie quantique implique que, pour être rigoureux,

▷ Ni le mouvement uniforme ni le mouvement unidimensionnel n'existent.

Cette affirmation renferme également de nombreuses surprises supplémentaires.

Les limitations quantiques s'appliquent aussi aux règles graduées servant à mesurer les longueurs. Il est impossible de garantir que la règle soit parfaitement au repos par rapport à l'objet que l'on est en train de mesurer. Donc, le quantum d'action implique une nouvelle fois, d'une part, que les mesures sont possibles, et de l'autre, que

▷ La précision des mesures est limitée.

Une autre conséquence du quantum d'action est que tout observateur inertiel ou en chute libre doit être suffisamment *volumineux*, car seuls les gros systèmes permettent de se rapprocher du mouvement inertiel. Donc,

▷ Un observateur ne peut pas être microscopique.

Si les humains n'étaient pas macroscopiques, ils ne pourraient ni observer ni étudier le mouvement.

À cause de la précision finie avec laquelle les mouvements microscopiques peuvent être observés, nous découvrons que

▷ *Le mouvement plus rapide que la lumière* est possible dans le domaine microscopique.

La théorie quantique prédit donc les *tachyons*, du moins sur des intervalles de temps courts. Pour la même raison,

▷ Le *mouvement en remontant le temps* est possible sur des temps et des dis-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

tances microscopiques.

En bref, un quantum d'action implique l'existence de voyages dans le temps microscopiques. Cependant, ceci reste impossible dans le domaine macroscopique, tel que celui de la vie quotidienne.

Mais il y a plus. Imaginez une voiture en mouvement qui disparaîtrait soudainement, pour de bon. Dans une telle situation, ni la quantité de mouvement, ni l'énergie ne se conserveraient. La variation de l'action lors d'une telle disparition est plus grande que $\hbar$, de sorte que son observation contredirait même la physique classique (ce que vous pourDéfi 12 e riez sans doute vouloir vérifier). Cependant, le quantum d'action permet à une particule *microscopique*, telle qu'un électron, de disparaître pour un *court* instant, pourvu qu'elle réapparaisse par la suite:

▷ Le quantum d'action implique que rien n'est permanent dans la nature.

Le quantum d'action implique également que

▷ L'espace vide n'est pas vide.

Lorsque l'on regarde l'espace vide deux fois de suite, les deux observations étant séparées par un intervalle de temps minuscule, de l'énergie sera observée la seconde fois. Si l'intervalle de temps est suffisamment petit, le quantum d'action conduira à l'observation de rayonnement ou de particules de matière. En effet, des particules peuvent apparaître n'importe où, venant de nulle part, et disparaître juste après: la limite minimale de l'action l'impose. Pour résumer, la nature exhibe des apparitions et des disparitions de matière ou de rayonnement pour des courtes durée. Autrement dit, l'idée classique d'un vide *absolu* n'est correcte que lorsque le vide est observé sur une *longue* durée.

Le quantum d'action implique que les aiguilles d'une boussole ne peuvent pas marcher. Lorsque l'on regarde l'aiguille d'une boussole, ou même une maison, deux fois de suite, on observe généralement qu'elle reste orientée dans la même direction. Mais Défi 13 f comme l'action physique a les mêmes dimensions que le moment cinétique, une valeur minimale de l'action implique une valeur minimale pour le moment cinétique. Même un objet macroscopique a une valeur minimale pour sa rotation. Autrement dit, la théorie quantique prédit que:

▷ Tout tourne.

C'est seulement de façon approximative qu'un objet peut ne pas tourner sur lui-même, lorsque les observations sont séparées par de long intervalles de temps.

Pour les systèmes microscopiques, les limites quantiques sur la rotation ont des effets particuliers. S'il est possible d'observer l'angle de rotation (comme dans le cas des molécules) le système se comporte comme un objet macroscopique: sa position et son orientation sont floues. Mais pour un système dont l'angle de rotation ne peut pas être observé, le quantum d'action limite le moment cinétique à des multiples de $\hbar/2$. En particulier, tous les systèmes microscopiques liés (tels que les molécules, les atomes ou les

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

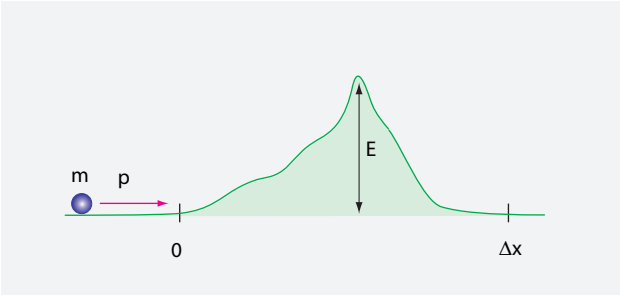


FIGURE 8 Les collines ne sont jamais assez hautes.

noyaux) possèdent des mouvements de rotation et des constituants qui tournent sur eux-mêmes.

La transformation, la vie et Démocrite

Vol. I, page 20

Au début de notre aventure, nous avons mentionné que les Grecs distinguaient trois types de changements: le transport, la croissance et la transformation. Nous avons également mentionné que Démocrite avait déduit que tous ces types de changements (dont font partie la vie et la mort) étaient en fait la même chose et qu'ils étaient dus à des mouvements d'atomes. Le quantum d'action établit exactement cette conclusion.

Premièrement, une action minimale implique que les cages des zoos sont dangereuses et que les banques ne sont pas sûres. Il faut beaucoup d'énergie pour vaincre les barreaux d'une cage. Du point de vue de la physique, les barreaux de la cage sont comme une colline d'énergie, qui ressemble à la vraie colline de la Figure 8. Imaginez qu'une particule ayant la quantité de mouvement p s'approche d'un côté de la colline, dont on supposera qu'elle a une largeur Δx.

Dans la vie quotidienne (et donc en physique classique) la particule ne sera jamais observée de l'autre côté de la colline si son énergie cinétique $p^2/2m$ est *inférieure* à la hauteur E de la colline. Mais imaginez que la quantité de mouvement manquante pour pouvoir passer par-dessus la colline, $\Delta p = \sqrt{2mE} - p$, satisfasse $\Delta x \Delta p \leqslant \hbar/2$. La particule aura alors la possibilité de vaincre la colline, malgré son énergie insuffisante. Le quantum d'action implique donc qu'une colline de largeur

$$\Delta x \leqslant \frac{\hbar/2}{\sqrt{2mE} - p} \tag{4}$$

n'est *pas* un obstacle pour une particule de masse m. Mais ce n'est pas tout. Puisque la valeur de la quantité de mouvement p de la particule est elle-même indéterminée, une particule peut vaincre la colline même si la largeur de cette dernière est *plus grande* que la valeur donnée par (4) (quoique plus la colline est large, plus la probabilité est faible). Donc, n'importe quelle particule peut vaincre *n'importe quel* obstacle. C'est ce que l'on appelle l'*effet tunnel*, pour des raisons évidentes. En physique classique, le passage par effet tunnel est impossible. Avec la théorie quantique, ce tour de force est possible, parce que la fonction d'onde ne s'annule pas à l'emplacement où se trouve la colline. Plus simplement, la fonction d'onde n'est pas nulle à l'intérieur de la colline. Elle sera donc

Page 100

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

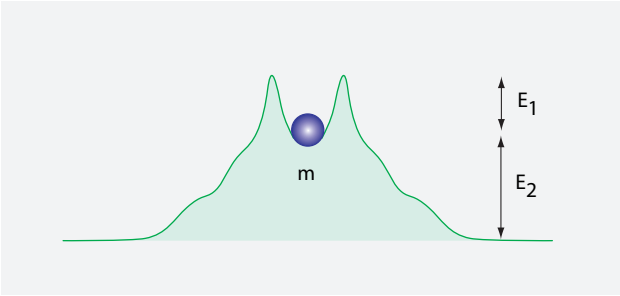


FIGURE 9 Sortir des enclos.

également non nulle derrière la colline. Par conséquent, les systèmes quantiques peuvent pénétrer ou «percer un tunnel» à travers les collines.

En bref, le principe d'action minimale implique qu'il n'y a pas de boites hermétiques dans la nature. Grâce à l'effet tunnel,

▷ La matière n'est pas impénétrable.

La pénétrabilité de toute matière contraste avec l'observation classique quotidienne. Pouvez-vous expliquer pourquoi les cages à lions fonctionnent *en dépit* du quantum d'action? Défi 14 e

D'ailleurs, le quantum d'action implique également qu'une particule, dont l'énergie cinétique serait supérieure à l'énergie correspondant à la hauteur de la colline, peut se *réfléchir* contre la colline. Cet effet est également impossible en physique classique.

Le principe d'action minimale implique aussi que les rayonnages d'une bibliothèque sont dangereux. Pourquoi? Les étagères sont des obstacles au mouvement. Un livre sur une étagère est dans la même situation que la masse de la Figure 9: la masse est encerclée par l'énergie de la colline qui l'empêche de s'échapper vers le monde extérieur, où l'énergie est moindre. Mais grâce à l'effet tunnel, il est toujours possible de s'échapper. La même situation s'applique à la branche d'un arbre, à une pointe enfoncée dans un mur ou à n'importe quoi qui serait attaché à n'importe quoi d'autre. Les choses ne peuvent jamais être assemblées de façon permanente. En particulier, nous découvrirons que tous les exemples d'émission de lumière (même la radioactivité) résultent de cet effet.

Pour résumer, le quantum d'action implique donc que

▷ La désintégration fait partie de la nature.

Notez que le phénomène de désintégration se produit souvent dans la vie quotidienne, sous un nom différent: la *décomposition*. En fait, toutes les décompositions ont besoin du quantum d'action pour leur description. De toute évidence, la cause de la décomposition est souvent classique, mais le *mécanisme* de décomposition est toujours quantique. Seuls les objets qui obéissent à la théorie quantique peuvent se décomposer. En somme, il n'y a pas de systèmes excités qui soient stable dans la nature. C'est d'ailleurs pour la même raison qu'aucune mémoire ne peut être parfaite. (Pouvez-vous le confirmer?) Ref. 8 Défi 15 e

D'un point de vue plus général, le *vieillissement* et la *mort* résultent également du quantum d'action. La mort, comme le vieillissement, est un ensemble de processus de

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

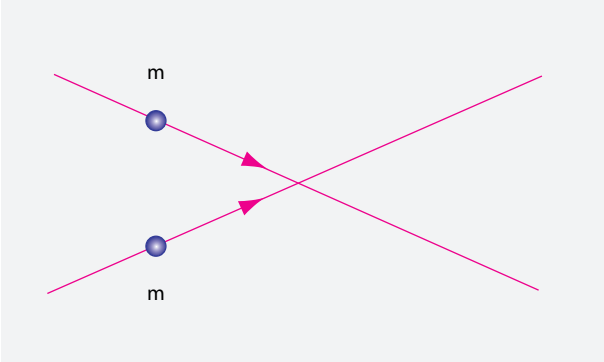


FIGURE 10 Des objets identiques dont les chemins se croisent.

décomposition. Lors de la mort, les mécanismes à l'intérieur d'un être vivant se décomposent. La décomposition est une forme de désintégration, et elle est due à l'effet tunnel. La mort est donc un processus quantique. Classiquement, la mort n'existe pas. Ce pourrait-il que ce soit la raison pour laquelle tant de gens croient en l'immortalité ou en une jeunesse éternelle?

Défi 16 e

Nous découvrirons également que le quantum d'action est la raison de l'importance donnée à l'action observable en physique classique. En fait, l'existence d'une action *minimale* est la raison du principe de *moindre* action de la physique classique.

Une action minimale implique également que la matière ne peut pas être continue, mais qu'elle doit être composée d'entités minimales. En effet, tout écoulement d'un matériau vraiment continu contredirait le principe quantique. Pouvez-vous en donner l'argument précis? Bien sûr, à ce stade de notre aventure, la non-continuité de la matière n'est plus une surprise. Mais le quantum d'action implique que même le *rayonnement* ne peut pas être continu. Comme Albert Einstein fut le premier à l'affirmer clairement: la lumière est constituée de particules quantiques.

Défi 17 e

D'une façon encore plus générale, le quantum d'action implique que, dans la nature,

▷ Tous les écoulements et toutes les ondes sont constitués de particules microscopiques.

Le terme «microscopique» (ou «quantique») est indispensable, car de telles particules ne se comportent *pas* comme des petites pierres. Nous avons déjà entrevu plusieurs différences, et nous en rencontrerons d'autres très prochainement. Pour ces raisons, il devrait y avoir un nom spécial pour les particules microscopiques. Mais pour l'instant, toutes les propositions, parmi lesquelles *quanton* est la plus populaire, n'ont pas réussi à s'imposer.

Le quantum d'action a plusieurs conséquences étranges pour les particules microscopiques. Prenez deux de ces particules ayant la même masse et la même composition. Imaginez que leurs trajectoires se croisent, et qu'à leur intersection elles s'approchent l'une de l'autre de très près, tel que le montre la Figure 10. Une action minimale implique que dans une telle situation, si la distance devient suffisamment petite, les deux particules peuvent permuter leurs rôles, sans que personne ne soit capable de les en empêcher, ni même de s'en apercevoir. Dans un volume de gaz, il est donc *impossible* (grâce au quantum d'action) de suivre les particules dans leurs déplacements, ni de distinguer

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

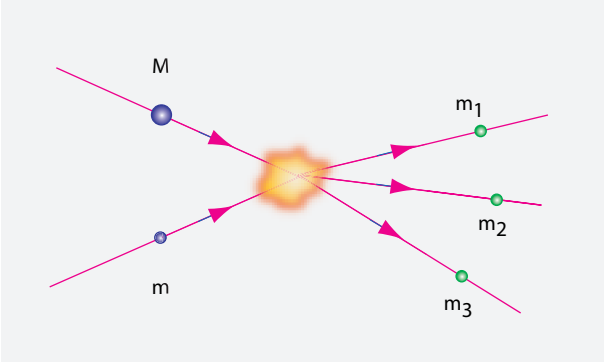


FIGURE 11 Une transformation produite par une réaction.

une particule parmi les autres. Pouvez-vous confirmer cette déduction, et en spécifier les
Défi 18 e conditions, en utilisant les relations d'indétermination? Pour résumer,

▷ Dans la nature, il est impossible de faire la distinction entre des particules identiques.

Défi 19 e Pouvez-vous deviner ce qui se passe dans le cas de la lumière?

Mais la matière mérite encore plus d'attention. Imaginez une nouvelle fois deux particules, pas nécessairement identiques, s'approchant l'une de l'autre de très près, tel que le montre la Figure 11. Nous savons que si la distance d'approche devient petite, les choses deviennent floues. Or, le principe d'action minimale fait que quelque chose peut se produire dans ce petit domaine, dans la mesure où les produits qui en ressortent ont les mêmes valeurs totales de quantité de mouvement, de moment cinétique et d'énergie que ceux qui y sont entrés. En effet, rendre impossibles de tels processus impliquerait que des actions arbitrairement petites puissent être observées, éliminant du même coup le flou
Défi 20 f de la nature, comme vous pourriez vouloir le vérifier par vous-même. En bref,

▷ Le quantum d'action permet la transformation de la matière.

On dit également que le quantum d'action permet les *réactions* entre particules. En fait, nous découvrirons que *toutes* les catégories de réactions dans la nature, y compris la respiration, la digestion et toute autres réactions chimiques ou nucléaires, sont dues uniquement à l'existence du quantum d'action.

Une catégorie de processus qui nous est tout particulièrement chère est la *croissance*. Le quantum d'action implique que toute croissance se produit par petites étapes. En effet,

▷ Tous les processus de croissance dans la nature sont des processus quantiques.

Par-dessus tout, comme nous l'avons déjà mentionné, le quantum d'action explique la vie. Seul le quantum d'action rend possible la reproduction et l'hérédité. La naissance, la sexualité et la mort sont des conséquences du quantum d'action.

Donc, Démocrite avait raison, mais en même temps, il avait tort. Il avait raison

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

lorsqu'il déduisait les constituants fondamentaux de la matière et du rayonnement. Il avait raison lorsqu'il unifiait tous les changements de la nature (depuis le transport jusqu'à la transformation et la croissance) comme étant des mouvements de particules. Mais il avait tort lorsqu'il supposait que les petites particules se comportaient comme des pierres. Comme nous le montrerons par la suite, les particules les plus petites se comportent comme des *quantons*: elles se comportent au hasard, et elles se comportent partiellement comme des ondes et partiellement comme des particules.

Le hasard – une conséquence du quantum d'action

Que se passe-t-il lorsque l'on essaye de mesurer un changement plus petit que le quantum d'action? La nature a une réponse simple: on obtient des *résultats aléatoires*. Si on conçoit une expérience qui tente de produire un changement (une action) dont la valeur serait le quart du quantum d'action, l'expérience produira, par exemple, un changement équivalent à *un* quantum d'action dans un quart des cas, et *aucun* changement dans les trois quarts des autres cas,* donnant ainsi une *moyenne* d'un quart de $\hbar$ par cas.

▷ Les tentatives pour mesurer des actions plus petites que $\hbar$ produisent des résultats aléatoires.

Si vous voulez condenser la physique quantique en une seule affirmation clef, la voici.

Le quantum d'action introduit du hasard au niveau microscopique, ce qui peut également être vu de la façon suivante. À cause des relations d'indétermination, il n'est pas possible d'obtenir une valeur précise à la fois pour la quantité de mouvement et pour la position d'une particule. De toute évidence, des valeurs précises sont également impossibles pour les constituants individuels d'un appareil expérimental ou d'un observateur. Par conséquent, les conditions initiales, à la fois pour le système et pour l'appareil expérimental, ne peuvent pas être dupliquées exactement. Le quantum d'action implique donc que chaque fois qu'une expérience est réalisée deux fois sur un système microscopique, les deux résultats seront (en général) différents. Les résultats ne pourraient être les mêmes que si le système et l'observateur étaient tous les deux exactement dans les mêmes configurations à chaque fois. Toutefois, à cause du second principe de thermodynamique, et à cause du quantum d'action, reproduire une configuration est impossible. Donc,

▷ Les systèmes microscopiques se comportent de façon aléatoire.

Bien évidemment, il y aura un résultat *moyen*, mais dans tous les cas, les observations microscopiques sont *probabilistes*. Nombreux sont ceux qui trouvent cette conclusion de la théorie quantique difficile à avaler. Mais les faits montrent que le quantum d'action implique que le comportement des systèmes quantiques est profondément différent de celui des systèmes classiques. La conclusion est inévitable:

▷ La nature se comporte de façon aléatoire.

* Dans ce contexte, «aucun changement» signifie aucun changement sur la variable physique que l'on est en train de mesurer. Plus généralement, il y a toujours du changement, mais pas nécessairement concernant la variable mesurée.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net



FIGURE 12 Un effet quantique bien connu: comment les fenêtre des trains font-elles pour montrer deux images superposées? (Photo © Greta Mansour)

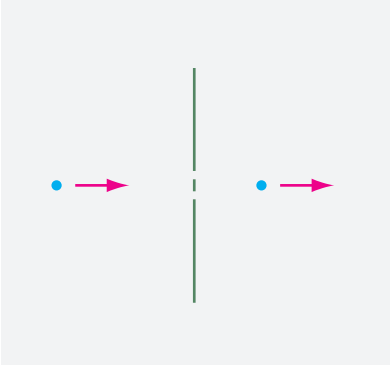


FIGURE 13 Une particule et un écran comportant deux fentes proches.

Est-il possible d'observer le caractère aléatoire dans la vie quotidienne? Oui. Toutes les *fenêtres* démontrent que la nature se comporte de façon aléatoire à l'échelle microscopique. Tout le monde sait qu'il est possible d'utiliser la fenêtre d'un train soit pour regarder le paysage *au dehors* soit, en se concentrant sur l'image réfléchie, pour observer certaines personnes intéressantes *à l'intérieur* du wagon. Autrement dit, les observations telles que celle de la Figure 12 montrent que le verre réfléchit un certain nombre de particules de lumière et en laisse passer d'autres à travers. Plus précisément, le verre réfléchit une sélection aléatoire de particules de lumière, bien que la proportion moyenne soit constante. S'agissant de ses propriétés, la réflexion partielle est similaire à l'effet tunnel. En effet, la réflexion partielle des photons sur le verre est une conséquence du quantum d'action. Rappelons une fois de plus que la situation peut *se décrire* avec la physique classique, mais que la quantité précise de réflexion ne peut pas *s'expliquer* sans la théorie quantique. Nous retiendrons que:

▷ Les quantons se déplacent de façon aléatoire.

Sans le quantum d'action, les voyages en train seraient beaucoup plus ennuyeux.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Les ondes – une conséquence du quantum d'action

Le quantum d'action implique un résultat important en ce qui concerne les *trajectoires* des particules. Lorsqu'une particule voyage d'un point à un autre, il n'y a aucun moyen de déterminer par quel chemin elle est passée entre les deux points. En effet, pour pouvoir distinguer entre deux chemins possibles, mais légèrement différents, des actions plus petites que $\hbar$ devraient pouvoir être mesurées de façon fiable. En particulier, si une particule est envoyée à travers un écran ayant deux fentes suffisamment proches l'une de l'autre, comme l'illustre la Figure 13, il est impossible de dire par laquelle des deux fentes la particule est passée. Cette impossibilité est fondamentale.

Nous connaissons déjà des phénomènes de mouvement au cours desquels il n'est pas possible de dire avec précision comment quelque chose se déplace ou bien quel chemin a été suivi après les deux fentes: les *ondes* se comportent de cette façon. Toutes les ondes
Vol. I, page 314
sont soumises aux relations d'indétermination:

$$\Delta\omega\Delta t \geqslant \frac{1}{2} \quad \text{et} \quad \Delta k\Delta x \geqslant \frac{1}{2}\,. \tag{5}$$

Une onde est un type de mouvement décrit par une *phase* qui change au cours de l'espace et du temps. Il se trouve que ceci reste valide pour tous les mouvements, et en particulier pour la matière.

Nous avons vu plus haut que les systèmes quantiques étaient soumis à

$$\Delta E\Delta t \geqslant \frac{\hbar}{2} \quad \text{et} \quad \Delta p\Delta x \geqslant \frac{\hbar}{2}\,. \tag{6}$$

Nous sommes donc amenés à attribuer une fréquence et une longueur d'onde à un système quantique:

$$E = \hbar\omega \quad \text{et} \quad p = \hbar k = \hbar\frac{2\pi}{\lambda}\,. \tag{7}$$

En ce qui concerne la *lumière*, la relation entre l'énergie et la fréquence, de même que celle, équivalente, entre la quantité de mouvement et la longueur d'onde, ont été déduites par Max Planck en 1899. Durant les années qui suivirent 1905, Albert Einstein confirma que les relations étaient valides pour tous les exemples d'émission et d'absorption de lumière. En 1923 et 1924, Louis de Broglie* prédit que les relations devaient également être valables pour toutes les particules de *matière* quantiques. La confirmation expérimen-
Page 84
tale arriva quelques années plus tard. (C'est donc un autre exemple de découverte qui fut faite environ 20 ans trop tard.) En bref, le quantum d'action implique que:

* Louis de Broglie (Dieppe, 1892 – Paris, 1987), physicien et professeur à la Sorbonne. La relation entre l'énergie et la fréquence pour la lumière a valu le prix Nobel de physique à Max Planck en 1918 et à Albert Einstein en 1921. De Broglie a élargi le domaine d'application de la relation pour prédire la nature ondulatoire de l'électron (et de toutes les autres particules de matière quantiques). Ceci était le point essentiel de sa thèse doctorale. La prédiction fut confirmée expérimentalement pour la première fois quelques années plus tard, en 1927. Pour sa prédiction de la nature ondulatoire de la matière, de Broglie reçut le prix Nobel de physique en 1929. Parce qu'il était aristocrate, il ne fit plus de recherche après cela. Par exemple, ce fut Schrödinger qui mit par écrit l'équation d'onde, même si de Broglie aurait tout aussi bien pu le faire lui-même.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

▷ Les particules de matière se comportent comme des ondes.

En particulier, le quantum d'action implique l'existence d'*interférences* pour les courants de matière.

Les particules – une conséquence du quantum d'action

Le quantum d'action (le changement minimal) implique que les écoulements ne peuvent pas être arbitrairement faibles. Ceci s'applique à *tous* les écoulements. En particulier, ceci s'applique aux rivières, aux écoulements de matière solide, aux écoulements de gaz, aux faisceaux lumineux, aux écoulements d'énergie, aux écoulements d'entropie, aux écoulements de quantité de mouvement, aux écoulements de moment cinétique, aux écoulements de probabilité, aux signaux de toutes sortes, aux écoulements de charges électriques, aux écoulements de charges de couleur et aux écoulements de charges faibles.

Vol. I, page 354

L'écoulement de l'eau dans les rivières, comme tout autre écoulement de matière, ne peut pas être arbitrairement petit: le quantum d'action implique qu'il existe un écoulement de matière minimal dans la nature. Suivant la situation, l'écoulement de matière minimal peut être une molécule, un atome ou une particule plus petite. En effet, le quantum d'action est également à l'origine de l'observation d'une charge minimale dans les courants électriques. Puisque toute matière peut s'écouler, le quantum d'action implique que:

▷ Toute matière a des aspects particulaires.

De la même façon, le quantum d'action (le changement minimal) implique que la lumière ne peut pas être arbitrairement faible. Il y a un éclairage minimal dans la nature, que l'on appelle le *photon*, ou encore le *quantum de lumière*. Or, la lumière est une onde, et le même argument s'applique également à n'importe quelle autre onde. En bref, le quantum d'action implique que:

▷ Toutes les ondes ont des aspects particulaires.

Ceci a été démontré pour les ondes lumineuses, les vagues à la surface de l'eau, les rayons X, les ondes sonores, les ondes de plasma, le tourbillonnement d'un fluide, ainsi que tous les autres types d'onde qui on été observés. Il existe une exception: les ondes gravitationnelles ont finalement été observées en 2016, de nombreuses décennies après leur prédiction. On s'attend à ce que leurs aspects particulaires, les *gravitons*, existent également, bien que cela puisse prendre beaucoup de temps à démontrer à l'aide d'expériences.

En résumé, le quantum d'action affirme que:

▷ Si quelque chose bouge, c'est que cette chose est constituée de particules quantiques (de quantons).

Par la suite, nous explorerons et spécifierons la différence exacte entre une particule quantique et une petite *pierre* ou un grain de sable. Nous découvrirons que les quantons de matière se déplacent différemment, se comportent différemment lors d'une rotation

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

et se comportent différemment lors d'un échange.

L'INFORMATIQUE QUANTIQUE

En informatique (la science de l'information), l'unité de changement minimale s'appelle un «changement d'un bit». L'existence d'un changement minimal dans la nature implique que l'informatique peut être utilisée pour décrire la nature, et en particulier la théorie quantique. Cette analogie a fait l'objet de nombreuses recherches durant les dernières décennies et a permis d'explorer de nombreuses questions intéressantes: Le stockage illimité d'information est-il possible? L'information peut-elle être lue et copiée complètement? Est-il possible de transmettre de l'information tout en la gardant secrète? Est-il possible de transférer et de mémoriser de l'information indépendamment du bruit de fond parasite? Peut-on utiliser la physique quantique pour fabriquer un nouveau type d'ordinateurs? Pour l'instant, la réponse à toutes ces questions est négative, mais l'espoir de voir la situation changer n'a pas encore été enterré.

L'analogie entre la théorie quantique et l'informatique est limitée: l'informatique ne peut décrire que le côté «logiciel» des appareils. Pour un physicien, le côté «matériel» de la nature est central. L'aspect matériel de la nature s'invite dans la description chaque fois que la valeur même du quantum d'action $\hbar$ doit être introduite.

Lorsque nous explorerons les similarités et les différences entre la nature et l'informatique, nous découvrirons que le quantum d'action implique que les systèmes physiques macroscopiques ne peuvent pas être copiés (ou «clonés» comme disent les théoriciens de la quantique). La nature ne permet pas les copies d'objets macroscopiques. Autrement dit,

▷ Les duplicateurs parfaits n'existent pas.

Le quantum d'action interdit de rassembler et d'utiliser toutes les informations d'une manière qui permettrait de produire une copie parfaite.

L'exploration des duplicateurs nous rappellera une fois de plus que l'ordre précis dans lequel les mesures sont prises, lors d'une expérience, est important. Lorsque l'ordre des mesures peut être inversé sans affecter le résultat final, les physiciens parlent de «commutation». Le quantum d'action implique que

▷ Les observables physiques ne commutent pas.

Nous trouverons également que le quantum d'action implique que les systèmes ne
Page 172 sont pas toujours indépendants, mais qu'ils peuvent être *intriqués*. Ce terme, introduit par Erwin Schrödinger, décrit l'une des conséquences les plus absurdes de la théorie quantique. L'intrication quantique (que l'on appelle également «enchevêtrement quantique» [N.d.T.]) fait que tout dans la nature est connecté avec tout le reste. L'intrication produit des effets qui *semblent* (mais ne sont pas) plus rapides que la lumière:

▷ L'intrication produit une (fausse) forme de non-localité.

Ref. 9 L'intrication implique que la communication en toute confiance ne peut pas exister.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Nous découvrirons aussi que la *décohérence* est un processus omniprésent dans la nature, et qu'elle influence tous les systèmes quantiques. Par exemple, d'une part elle permet de faire des mesures, mais de l'autre elle rend les ordinateurs quantiques impossibles.

Page 178

Curiosités et défis amusants concernant le quantum d'action

Même si on admet qu'aucune expérience faite jusqu'à ce jour ne contredit l'action minimale, il nous reste tout de même à vérifier que l'action minimale ne contredit pas la raison. En particulier, l'action minimale doit aussi être consistante avec toutes les expériences qu'il soit possible d'*imaginer*. Ceci n'est pas évident en soi-même.

* *

Défi 21 e Où se trouve l'échelle quantique dans une horloge à pendule?

* *

Lorsque des champs électromagnétiques entrent en jeu, la valeur de l'action dépend (en général) du choix du potentiel vecteur, et donc du choix de la jauge. Nous avons vu dans la partie concernant l'électrodynamique qu'un choix de jauge convenable pouvait modifier la valeur de l'action en ajoutant ou soustrayant n'importe quelle quantité désirée. Néanmoins, il y a une action minimale dans la nature. Ceci est possible parce que, en théorie quantique, les changements de jauge physique ne peuvent pas ajouter ou soustraire n'importe quelle quantité, mais seulement des multiples de *deux fois* la valeur minimale. Par conséquent, ils ne nous permettent pas de descendre en dessous de l'action minimale.

Vol. III, page 85

* *

À l'âge adulte, les plantes arrêtent leur développement dans le noir. Sans lumière, les réactions nécessaires à la croissance cessent. Pouvez-vous montrer qu'il s'agit d'un effet quantique, inexplicable si on utilise la physique classique?

Défi 22 e

* *

La plupart des processus quantiques de la vie quotidienne sont de nature électromagnétique. Pouvez-vous montrer que le quantum d'action doit aussi être valide pour les processus nucléaires, c.-à-d. pour des processus qui ne sont pas de nature électromagnétique?

Défi 23 e

* *

Est-ce que le quantum d'action est indépendant de l'observateur, même lorsque l'on s'approche de la vitesse de la lumière? Cette question est la raison pour laquelle Planck contacta le jeune Einstein, l'invitant à Berlin, et l'introduisant de ce fait à la communauté scientifique internationale.

Défi 24 e

* *

Le quantum d'action implique que les gens minuscules, tels que *Tom Pouce*, ne peuvent pas exister. Le quantum d'action implique que les fractales ne peuvent pas exister dans la

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

nature. Le quantum d'action implique que la «*loi de Moore*» de l'électronique des semi-conducteurs, qui affirme que le nombre de transistors dans une puce électronique double tous les deux ans, ne peut pas être éternellement valide. Pourquoi? Défi 25 e

* *

Prenez un fer à cheval. La distance entre les deux extrémités n'est pas fixe, puisque si elles l'étaient, leur position et leur vitesse seraient connues en même temps, contredisant la relation d'indétermination. Bien sûr, ce raisonnement est également valable pour tout autre objet solide. En bref, la mécanique quantique et la relativité restreinte montrent toutes les deux que les corps rigides n'existent pas, bien que ce soit pour des raisons différentes.

* *

Le moment cinétique a les mêmes dimensions que l'action. Une action minimale implique qu'il y a un moment cinétique minimal dans la nature. Comment cela est-il possible, sachant que certaines particules sont de spin zéro, c.-à-d. qu'elles n'ont pas de moment cinétique? Défi 26 e

* *

Aurions-nous pu commencer toute la discussion sur la théorie quantique en affirmant qu'il existe un moment cinétique minimal au lieu d'une action minimale? Défi 27 e

* *

Niels Bohr, en plus de propager l'idée d'une action minimale, était également un adepte de ce que l'on appelle le *principe de complémentarité*. L'idée est que certaines paires d'observables d'un système (tel que la position et la quantité de mouvement) ont des *précisions* qui sont liées: si l'une des observables de la paire est connue avec une grande précision, l'autre observable est nécessairement connue avec une petite précision. Pouvez-vous déduire ce principe à partir de l'action minimale? Défi 28 e

Les dangers de l'achat d'une boite de haricots

Une autre façon de montrer les conséquences absurdes de la théorie quantique nous est fournie par l'avertissement ultime des produits de consommation, qui, selon certains avocats bien informés, devrait être inscrit sur toutes les boites de haricots et sur tous les emballages de produits. Il nous montre en détail comment notre condition humaine nous trompe profondément. Ref. 10

Avertissement: **regardez** ce produit avec précaution:

- Il rayonne de la chaleur.
- La lumière vive a pour effet de compresser ce produit.

Avertissement: **touchez** ce produit avec précaution:

- Une partie peut s'échauffer alors qu'une autre peut se refroidir, pouvant causer de graves brûlures.

Avertissement: **manipulez** ce produit avec précaution:

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

- Ce produit est constitué d'au moins 99,999 999 999 999 % d'espace vide.
- Ce produit contient des particules se déplaçant à des vitesses supérieures à un million de kilomètres par heure.
- Chaque kilogramme de ce produit contient autant d'énergie que l'explosion d'environ cent bombes nucléaires.*
- Si ce produit est mis en contact avec de l'antimatière, une explosion catastrophique se produira.
- Si on tourne ce produit sur lui-même, il émettra du rayonnement gravitationnel.

Avertissement: **transportez** ce produit avec précaution:

- La force nécessaire dépend de sa vitesse, de même que son poids.
- Ce produit émettra un rayonnement supplémentaire s'il est accéléré.
- Ce produit attire, avec une force qui augmente lorsque la distance diminue, tout autre objet qui se trouve dans son voisinage, y compris les enfants de son acheteur.

Avertissement: **entreposez** ce produit avec précaution:

- Il est impossible de garder ce produit dans un endroit spécifique tout en le maintenant immobile.
- Sauf s'il est entreposé sous terre à une profondeur de plusieurs kilomètres, avec le temps, le rayonnement cosmique rendra ce produit radioactif.
- Ce produit pourrait se désintégrer dans les 10^{35} prochaines années.
- Il pourrait se refroidir et s'élever dans les airs.
- Ce produit déforme le temps et l'espace dans son voisinage, y compris le récipient dans lequel il est entreposé.
- Même si on l'entrepose dans un récipient fermé, ce produit est influencé par, et influence, tous les autres objets de l'univers, y compris vos beaux-parents.
- Ce produit peut disparaître de son emplacement actuel et réapparaître aléatoirement à n'importe quel autre endroit de l'univers, y compris dans le garage de votre voisin.

Avertissement: **éloignez-vous** de ce produit avec précaution:

- Il atteindra sa date de péremption avant que son acheteur n'y parvienne.

Avertissement: **utilisez** ce produit avec précaution:

- Quel qu'en soit son utilisation, cela augmentera l'entropie de l'univers.
- Les constituants de ce produit sont exactement les mêmes que ceux de n'importe quel autre objet de l'univers, y compris ceux d'un poisson pourri.

Toutes ces affirmations sont correctes. L'impression d'un certain côté paranoïaque de la physique quantique est pure coïncidence.

* Une tête nucléaire standard possède un rendement explosif d'environ 0,2 mégatonne (on sous-entend ici l'explosif standard trinitrotoluène ou T.N.T.), environ treize fois le rendement de la bombe d'Hiroshima, qui était de 15 kilotonne. Une mégatonne se définie comme étant égal à 1 Pcal = 4, 2 PJ, bien que le T.N.T. délivre environ 5 % moins d'énergie que cette valeur. Une mégatonne est aussi l'énergie contenue dans environ 47 g de matière. C'est moins qu'une poignée pour la plupart des solides ou des liquides. Ref. 11

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Un résumé: la physique quantique, la loi et l'endoctrinement

La simple existence d'un quantum d'action (quantum de changement) a de nombreuses conséquences profondes: le hasard, la dualité onde-particule, la transformation de la matière, la mort et, par-dessus tout, de nouvelles habitudes de pensée.

N'est-il pas vrai que toutes les déductions que nous avons faites jusque-là, à partir du quantum d'action, semblent incorrectes, ou du moins insensées? En fait, si vous ou votre avocat énonciez certaines de ces affirmations concernant la physique quantique devant un tribunal, peut-être même sous serment, vous pourriez bien finir en prison! Pourtant, toutes les affirmations énoncées ci-dessus sont correctes: elles sont toutes confirmées par l'expérience. Et il y a encore beaucoup de surprises à venir. Vous avez peut-être remarqué que, lors des exemples précédents, nous n'avons fait aucune référence explicite à l'électricité, aux interactions nucléaires ou à la gravité. Dans ces domaines, les surprises sont encore plus étonnantes. L'observation de l'antimatière, de courants électriques sans résistance, du mouvement à l'intérieur des muscles, de l'énergie du vide, des réactions nucléaires dans les étoiles et, un jour peut-être, de l'ébullition de l'espace vide vous fascineront autant qu'elles ont fasciné, et fascinent encore, des milliers de chercheurs.

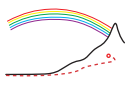
En particulier, les conséquences du quantum d'action pour l'univers primitif sont époustouflantes. Essayez simplement d'explorer pour vous-même ses conséquences dans le cas du big-bang. Ensemble, tous ces sujets vont nous guider pendant un long moment vers le but de notre aventure. Les conséquences du quantum d'action sont si étranges, si incroyables et si nombreuses, que la physique quantique pourrait être appelée, à juste titre, la description du mouvement pour le professeur *Foldingue*. Dans un sens, ceci généralise notre précédente définition de la physique quantique comme étant la description du mouvement ayant rapport au plaisir.

Défi 29 d

Malheureusement, il est parfois affirmé que «personne ne comprend la théorie quantique». Ceci est faux. En fait, c'est même pire que faux: c'est de l'endoctrinement et de la désinformation. L'endoctrinement et la désinformation sont des techniques qui empêchent les gens de prendre leurs propres décisions et de prendre plaisir à la vie. En réalité, les conséquences du quantum d'action peuvent être comprises et appréciées par tout le monde. Et pour ce faire, notre première tâche lors de notre cheminement vers le terminus de notre aventure sera d'utiliser le quantum d'action pour étudier notre standard classique du mouvement: le mouvement de la lumière.

Page 189

> Nie und nirgends hat es Materie ohne
> Bewegung gegeben, oder kann es sie geben.
> Friedrich Engels, *Anti-Dühring*.*



Ref. 12

* «Jamais et nulle part la matière n'a existé, ni ne peut exister, sans le mouvement.» Friedrich Engels (1820 – 1895) fut un des théoriciens du marxisme.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Chapitre 2

La lumière – les conséquences étranges du quantum d'action

> Alle Wesen leben vom Lichte,
> jedes glückliche Geschöpfe.
> Friedrich Schiller, *Guillaume Tell*.**

Puisque toutes les couleurs des matériaux sont des effets quantiques, il devient obligatoire d'étudier les propriétés de la lumière elle-même. Si un changement minimal existe réellement, alors il doit également y avoir un éclairage minimal dans la nature. Cette conclusion avait déjà été déduite dans la Grèce antique, par exemple par Épicure (341 – 271 av. J.-C.), qui énonça que la lumière était un courant de petites particules. Le plus petit éclairage possible serait alors celui produit par une seule particule de lumière. Aujourd'hui, on appelle ces particules des *quanta de lumière* ou des *photons*. Ceci peut paraître incroyable mais Épicure lui-même aurait pu vérifier sa prédiction à l'aide d'une expérience.

Ref. 13

Comment se comportent les lampes de faible luminosité?

Ref. 14

Vers 1930, Brumberg et Vavilov ont trouvé un moyen élégant pour vérifier l'existence des photons à l'œil nu, en s'aidant seulement d'une lampe. Nos yeux ne nous permettent pas de détecter *consciemment* des photons individuels, mais Brumberg et Vavilov ont trouvé le moyen de contourner cette limitation. En fait, l'expérience est si simple qu'elle aurait pu être réalisée bien des siècles auparavant, mais personne n'avait encore eu une imagination suffisamment audacieuse pour la tenter.

Brumberg et Vavilov avaient construit un volet mécanique qui pouvait être ouvert pendant des intervalles de temps de 0, 1 s. De l'autre côté, dans une chambre complètement noire, ils ont éclairé l'ouverture avec une lumière verte extrêmement faible, environ 200 aW à 505 nm, tel que le montre la Figure 14. À cette intensité, chaque fois que le volet s'ouvre, une moyenne d'environ 50 photons peuvent passer. Ceci correspond précisément au seuil de sensibilité de l'œil. Pour réaliser leur expérience, ils ont regardé le volet ouvert de nombreuses fois. Le résultat était simple mais surprenant. Tantôt ils observaient de la lumière et tantôt ils n'en observaient pas. Qu'ils observent de la lumière ou non était complètement aléatoire. Brumberg et Vavilov en ont déduit l'explication simple suivante: aux faibles puissances de la lampe, à cause des fluctuations, le nombre de photons est supérieur au seuil de l'œil dans la moitié des cas et inférieur dans l'autre moitié. Les fluctuations se font au hasard, d'où le caractère aléatoire de la détection consciente de la

** «Tous les êtres vivent de la lumière, chaque créature bienheureuse.» Friedrich Schiller (Marbach, 1759 – Weimar, 1805), poète, auteur dramatique et historien.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

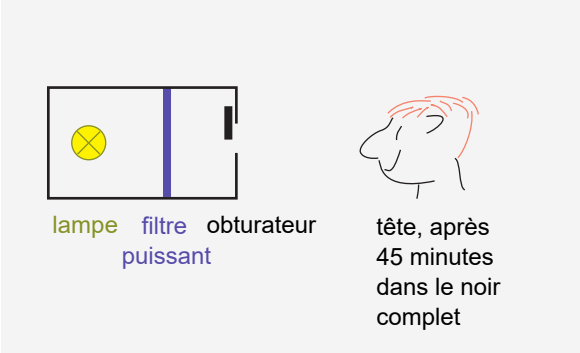


FIGURE 14 Comment ressentir les effets d'un seul photon (voir le texte).

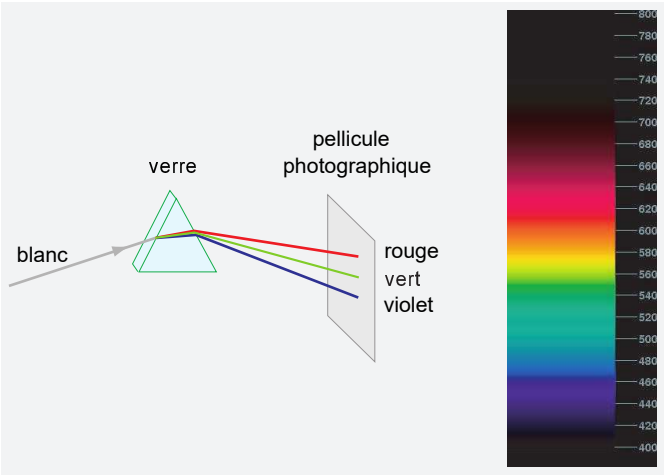


FIGURE 15 Comment un spectre de lumière blanche apparaît-il pour des distances d'écran extrêmement grandes? (Le spectre montré ici, © Andrew Young, pour une distance d'écran courte, est optimisé pour l'afficheur d'un tube à rayons cathodiques et non pour une impression couleur, tel qu'expliqué sur le site mintaka.sdsu.edu/GF/explain/optics/rendering.html.)

lumière. Ceci ne pourrait *pas* se produire si la lumière était un courant *continu*, car dans ce cas l'œil détecterait de la lumière lors de chacune des ouvertures du volet. (Pour des intensités lumineuses plus élevées, le pourcentage de cas de non-observation diminue rapidement, en accord avec l'explication fournie.)

En bref, une expérience simple démontre que:

▷ La lumière est constituée de photons.

Personne ne sait comment la théorie de la lumière aurait pu se développer si cette simple expérience avait été réalisée 100 ans, voire même 2500 ans plus tôt.

La réalité des photons devient plus convaincante lorsque l'on utilise des instruments pour nous aider. Un moyen simple est de commencer par un écran placé derrière un prisme éclairé par de la lumière blanche, comme le montre la Figure 15. La lumière se décompose en couleurs. Lorsque l'écran est placé de plus en plus loin, l'intensité de l'éclairage ne peut pas devenir arbitrairement petite, car cela irait à l'encontre du quantum d'action. Pour vérifier cette prédiction, nous avons seulement besoin d'une pellicule photographique noir et blanc. La pellicule se noirci à la lumière du jour de n'importe

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

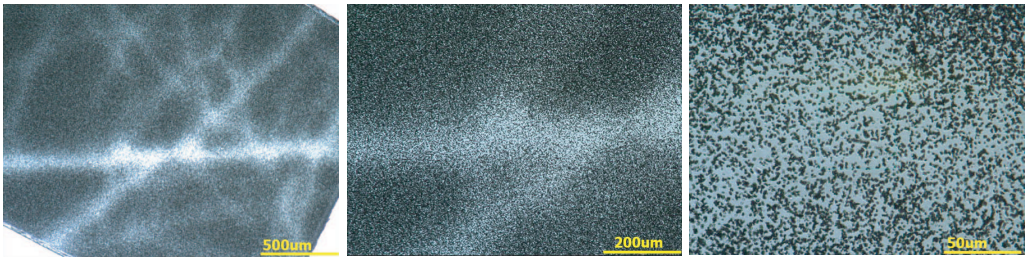


FIGURE 16 Pellicule photographique ayant été exposée, sous des grossissements de plus en plus forts. (© Rich Evans)

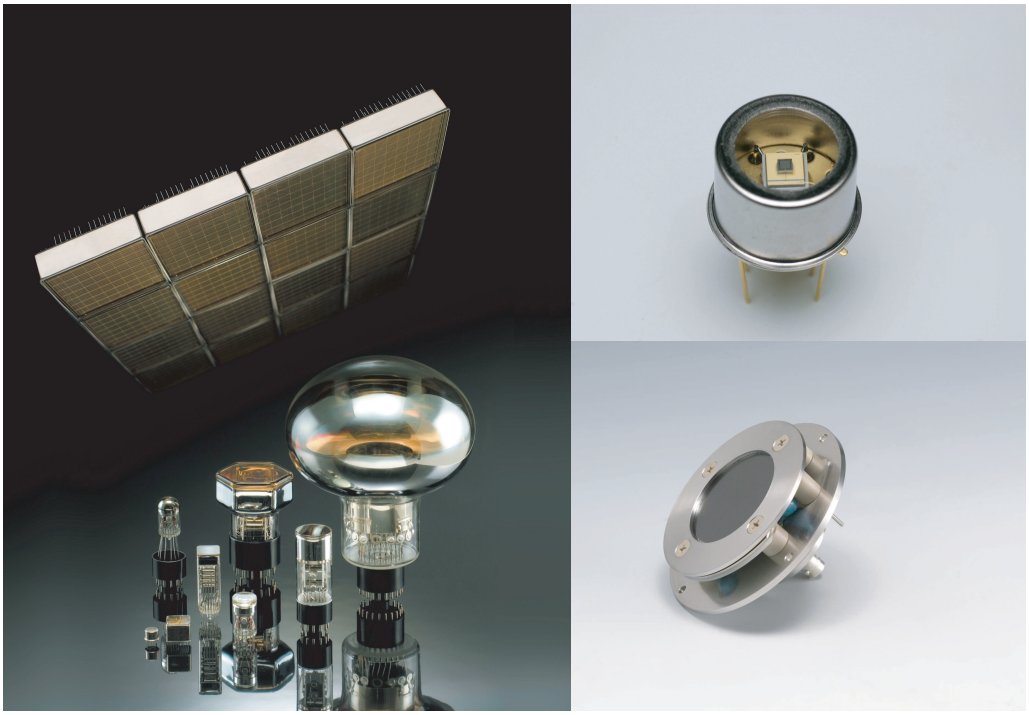


FIGURE 17 Détecteurs permettant le comptage des photons: des tubes photomultiplicateur (à gauche), une photodiode à avalanche (en haut à droite, ≈ 1 cm) et une galette de microcanaux (en bas à droite, ≈ 10 cm). (© Hamamatsu Photonics)

quelle couleur: elle devient gris foncé aux intensités moyennes et gris clair aux intensités plus faibles. Si on regarde une pellicule photographique d'un gris extrêmement clair à l'aide d'un microscope, on découvre que même sous un éclairage uniforme, le nuance de gris est en réalité composée de points noirs disposés de façon plus ou moins dense. Tous ces points ont la même taille, comme le montre la Figure 16. Ces tailles régulières suggèrent que la pellicule photographique réagit à des photons individuels. Des recherches détaillées confirment cette conjecture. Durant le XXe siècle, les fabricants de pellicules photographiques ont élucidé le mécanisme atomique sous-jacent, jusqu'au moindre de ses détails.

Les photons individuels peuvent être détectés de la façon la plus élégante en s'aidant

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

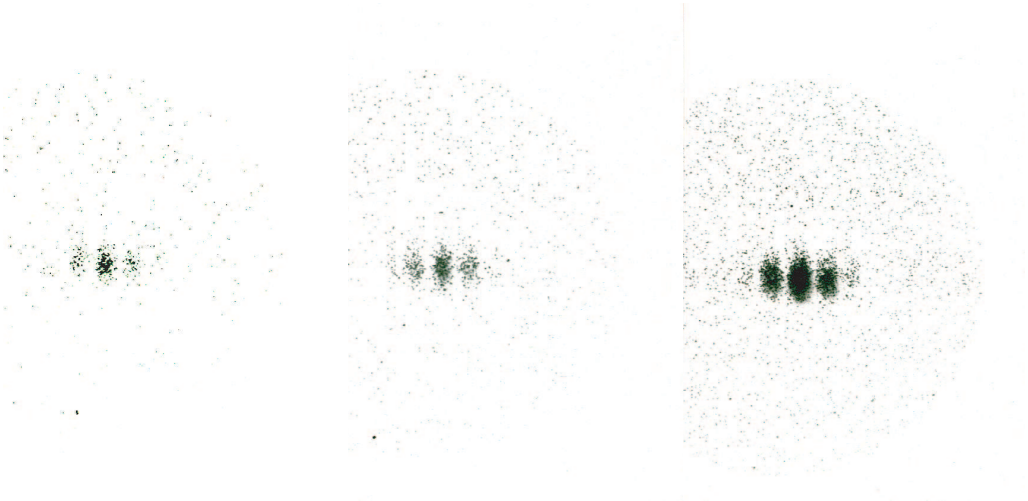


FIGURE 18 Les ondes lumineuses sont constituées de particules: observation de photons (les points noirs sur ces négatifs) lors d'une expérience des deux fentes d'Young en faible intensité, avec un temps d'exposition de 1 s, de 2 s et de 5 s, et en utilisant un amplificateur d'image. (© Delft University of Technology)

d'appareils électroniques. De tels appareils peuvent être des photomultiplicateurs, des
Ref. 15 photodiodes, des galettes de microcanaux ou les bâtonnets de la rétine de l'œil. Une sélection est présentée sur la Figure 17. Ces détecteurs montrent également que la lumière de faible intensité ne produit *pas* une couleur homogène. Au contraire, une intensité faible produit un motif aléatoire de points identiques, même lorsque l'on observe des phénomènes propres aux ondes, telles que des figures d'interférence, comme le montre la Figure 18. De nos jours, détecter et compter des photons individuels est une procédure expérimentale courante. Les compteurs de photons font partie de nombreuses installations de spectroscopie, telles que celles utilisées pour mesurer des concentrations minuscules de matériaux. Par exemple, on peut les utiliser pour détecter de la drogue dans un cheveu humain.

Toutes les expériences montrent donc le même résultat: chaque fois que des détecteurs de lumière de haute sensibilité sont construits dans le but de «voir» de façon aussi précise que possible (et donc dans des environnements aussi sombres que possible), on trouve que la lumière se manifeste par un courant de *quanta de lumière*. De nos jours, on les appelle habituellement des *photons*, un terme qui est apparu en 1926. De la lumière d'intensité faible ou élevée correspond à un courant comprenant un petit ou un grand nombre de photons.

Un exemple particulièrement intéressant de source de lumière de faible intensité est celui d'un atome individuel. Les atomes sont des sphères minuscules. Lorsque les atomes émettent de la lumière ou des rayons X, le rayonnement devrait être émis comme une onde sphérique. Mais dans toutes les expériences (voir la Figure 19 pour une installation typique), il n'a *jamais* été trouvé que la lumière émise par un atome formait une onde sphérique, contrairement à ce que l'on pourrait s'attendre de la physique quotidienne. Chaque fois qu'un atome rayonnant est entouré par de nombreux détecteurs, un *seul* détecteur est déclenché. Seule la moyenne sur un grand nombre d'émissions et de dé-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

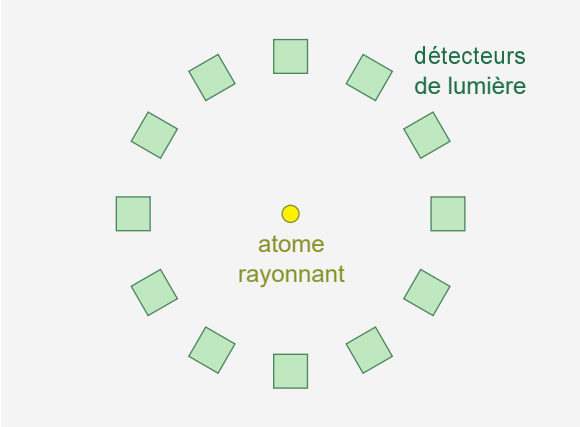


FIGURE 19 Un atome ne rayonnant qu'*un* seul photon ne déclenche qu'*un* seul détecteur et ne recule que dans *une* seule direction.

tections conduit à une forme sphérique. Les expériences montrent clairement qu'il n'est pas possible de détecter des photons partiels.

Toutes les expériences avec de la lumière de faible intensité montrent donc que la description continue de la lumière est incorrecte. Toutes ces expériences prouvent ainsi clairement que la lumière est un courant de particules, comme l'avait proposé Épicure dans la Grèce antique. Des mesures plus précises confirment le rôle du quantum d'action: chaque photon conduit à la *même* quantité de changement. Tous les photons ayant la même fréquence noircissent une pellicule ou déclenchent un écran à scintillation de la même façon. En bref, la quantité de changement induite par un seul photon est bien la quantité de changement *minimale* que la lumière puisse produire.

S'il n'y avait pas de valeur minimale pour l'action, la lumière pourrait être conditionnée en quantités arbitrairement petites. Mais la nature est différente. Plus simplement: la description classique de la lumière par un champ de potentiel vecteur $A(t, x)$ *continu* Vol. III, page 86 (ou par un champ électromagnétique $F(t, x)$ continu) dont l'évolution est décrite par un principe de moindre action, est *fausse*. Les fonctions continues ne décrivent pas les effets des particules tels qu'on les observe. Il est nécessaire de modifier la description. La modification ne doit être significative qu'aux intensités faibles, puisqu'aux intensités élevées, celles de la vie quotidienne, le Lagrangien classique décrit toutes les observations expérimentales avec une précision suffisante.*

À partir de quelles intensités la lumière cesse-t-elle de se comporter comme une onde continue? La vision humaine ne nous permet pas de distinguer consciemment des photons individuels, bien que des expériences montrent que les composants de l'œil sont Ref. 16 en principe capables de le faire. Les étoiles les plus faibles que l'on peut voir de nuit produisent une intensité lumineuse d'environ $0,6\,\mathrm{nW/m^2}$. Puisque la pupille de l'œil est petite, et comme nous ne sommes pas capables de voir des photons individuels, les photons doivent avoir des énergies plus petites que 100 aJ. L'expérience de Brumberg et Vavilov donnent une limite supérieure d'environ 20 aJ.

Une valeur exacte pour le quantum d'action de la lumière doit être déduite à l'aide

* On avait l'habitude de nommer «*quantification*» la transition entre le cas classique et le cas quantique. Ce concept, ainsi que l'idée qui se cache derrière, n'a plus qu'un intérêt historique aujourd'hui.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

d'une expérience en laboratoire. Quelques exemples sont donnés dans ce qui suit.

Les Photons

En général, toutes les expériences montrent qu'un faisceau de lumière de fréquence f, ou de pulsation ω, qui détermine sa couleur, est décrite avec précision par un courant de photons, chacun d'eux ayant la même énergie E donnée par

$$E = \hbar 2\pi f = \hbar\omega \,. \tag{8}$$

Cette relation a été déduite pour la première fois par Max Planck en 1899. Il trouva que dans le cas de la lumière, la plus petite action mesurable était donnée par le quantum d'action $\hbar$. En bref, la *couleur* est une propriété des photons. Un faisceau de lumière coloré est une averse de photons à la fréquence correspondante.

Vol. III, page 149

La valeur de la *constante de Planck* peut se déterminer à partir de mesures sur les corps noirs ou d'autres sources de lumière. Tous les résultats de ces mesures coïncident

Page 243

et donnent

$$\hbar = 1,054\,571\,726(47) \cdot 10^{-34}\,\mathrm{Js} \,. \tag{9}$$

Cette valeur est tellement petite qu'il est facile de comprendre pourquoi les photons ne se font pas remarquer par les humains. Par exemple, un photon vert avec une longueur

Défi 30 f

d'onde de 555 nm a une énergie de 0, 37 aJ. Il est vrai que dans des conditions normales d'éclairage, les photons sont tellement nombreux que l'approximation continue d'un champ électromagnétique est très précise. Dans le noir, le manque de sensibilité du processus de traitement du signal de l'œil humain (tout particulièrement la lenteur des ré-

Ref. 16

cepteurs lumineux) rend impossible tout comptage des photons. Pourtant, l'œil n'est pas si loin que cela de la sensibilité maximale possible. À partir des chiffres donnés ci-dessus concernant les étoiles de faible intensité, il est possible d'estimer que les humains sont capables de voir consciemment, dans des conditions idéales, des flashes d'environ une

Défi 31 pe

demi-douzaine de photons. Dans des conditions normales, ce nombre est environ dix fois plus élevé.

Explorons les autres propriétés des photons. Avant tout, les photons n'ont pas de masse (au repos) mesurable, ni de charge électrique mesurable. Pouvez-vous le confir-

Défi 32 e

mer? En fait, les expériences ne peuvent fournir qu'une limite supérieure pour les deux

Ref. 17

grandeurs. La limite expérimentale supérieure pour la masse (au repos) d'un photon est actuellement de 10^{-52} kg, et pour la charge électrique elle est de $5 \cdot 10^{-30}$ fois la charge de l'électron. Ces limites sont si petites que l'on peut considérer avec certitude que la masse et la charge du photon sont toutes les deux nulles.

Nous savons qu'une lumière intense peut *pousser* les objets. Puisque l'on connaît l'énergie, l'absence de masse et la vitesse des photons, on en déduit que la quantité de

Défi 33 f

mouvement du photon est donnée par

$$p = \frac{E}{c} = \hbar\frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{ou} \quad \boldsymbol{p} = \hbar\boldsymbol{k} \,. \tag{10}$$

Autrement dit, si la lumière est composée de particules, on doit pouvoir jouer au billard

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

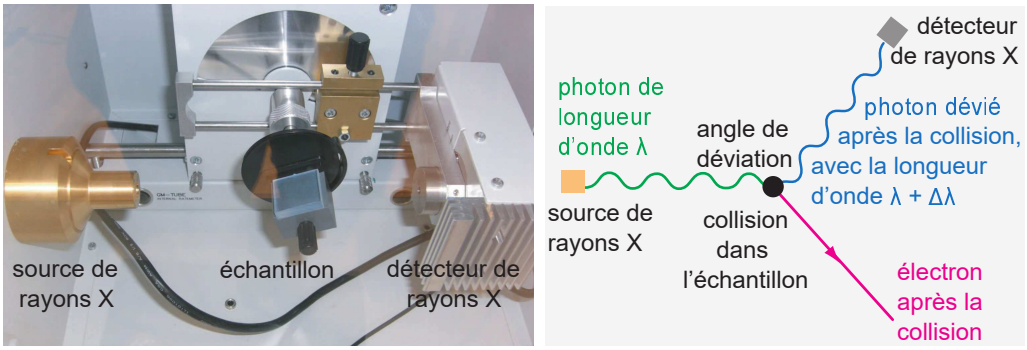


FIGURE 20 Une version moderne de l'expérience de Compton tient sur une table. L'expérience montre que les photons ont une quantité de mouvement: les rayons X (et donc les photons qui les constituent) changent de fréquence lorsqu'ils percutent les électrons de la matière, exactement de la même façon que prédit lorsque l'on considère des collisions entre particules. (© Helene Hoffmann)

avec elles. C'est en effet possible, comme l'a démontré Arthur Compton dans une expé-
Ref. 18 rience célèbre en 1923. Il dirigea des rayons X, qui sont des photons de haute énergie, sur du graphite, un matériau au sein duquel les électrons se déplacent presque librement. Il trouva que chaque fois que les électrons dans le matériau étaient percutés par les photons du faisceau de rayons X, les rayons X déviés changeaient de couleur. Son expérience est représentée sur la Figure 20. Comme on peut s'y attendre, la force de la collision dépend de l'angle de déflexion du photon. À partir du changement de couleur et de l'angle de déflexion, Compton confirma que la quantité de mouvement du photon vérifiait bien l'expression $\boldsymbol{p} = \hbar \boldsymbol{k}$.

Toutes les autres expériences sont en accord avec le fait que les photons ont une quantité de mouvement. Par exemple, lorsqu'un atome *émet* de la lumière, l'atome subit du *recul*. La quantité de mouvement se trouve être encore une fois donnée par l'expression $\boldsymbol{p} = \hbar \boldsymbol{k}$. En bref, le quantum d'action détermine la quantité de mouvement du photon.

La valeur de la quantité de mouvement d'un photon respecte la relation d'indétermination. De même qu'il n'est pas possible de mesurer exactement à la fois la longueur d'onde et la position de la crête d'une onde, il est impossible de mesurer à la fois la quantité de mouvement et la position d'un photon. Pouvez-vous le confirmer?
Défi 34 e Autrement dit, la valeur de la quantité de mouvement du photon est une conséquence directe du quantum d'action.

Depuis notre étude de la physique classique, nous savons que la lumière a une autre propriété en plus de sa couleur: la lumière peut être *polarisée*. Ceci n'est qu'un moyen compliqué pour dire que la lumière peut faire *tourner* les objets qu'elle illumine.
Vol. III, page 123 Autrement dit, la lumière a un moment cinétique orienté (principalement) le long de son axe de propagation. Qu'en est-il des photons? Les résultats des mesures montrent de façon consistante que chaque quantum de lumière transporte un *moment cinétique* donné par $L = \hbar$, que l'on appelle l'*hélicité* du photon. La grandeur physique est similaire à une autre que l'on trouve dans le cas des particules massiques: on parle donc également du *spin* d'un photon. En bref, les photons, d'une certaine manière, «tournent» sur eux-mêmes dans une direction qui est soit parallèle, soit antiparallèle à la direction de leur mouvement. Une fois de plus, l'intensité de l'hélicité du photon, son spin, n'est pas une

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

surprise: elle confirme la relation classique $L = E/\omega$ entre l'énergie et le moment cinétique, tel que nous l'avons trouvé dans la section sur l'électrodynamique classique. Notez que, contrairement à l'intuition, le moment cinétique d'un photon individuel est fixe et est donc indépendant de son énergie. Même les photons les plus énergétiques ont $L = \hbar$. Bien sûr, la valeur de l'hélicité respecte aussi la limite donnée par le quantum d'action. Les nombreuses conséquences de la valeur $\hbar$ pour l'hélicité (le spin) des photons deviendront claire dans ce qui suit.

Vol. III, page 123

Qu'est-ce que la lumière?

> La *lumière* est un mouvement luminaire de corps lumineux.
>
> Blaise Pascal*

Au XVIIe siècle, Blaise Pascal utilisait l'affirmation ci-dessus à propos de la lumière pour se moquer de certains physiciens, ridiculisant l'utilisation flagrante d'une définition circulaire. Bien sûr, il avait raison: à son époque, la définition était en effet circulaire, car aucun sens ne pouvait être donné à chacun des termes. Mais chaque fois que les physiciens étudient soigneusement une observation, les philosophes sont les perdants. Tous ces termes, à l'origine indéfinis, ont maintenant un sens bien précis et la définition circulaire est résolue. La lumière est en effet un type de mouvement. Ce mouvement peut fort justement être qualifié de «luminaire» parce que, contrairement au mouvement des objets matériels, il a la propriété unique $v = c$. Les corps lumineux, appelé *quanta de lumière* ou *photons*, sont caractérisés (et différenciés de toutes les autres particules) par leur relation de dispersion $E = cp$, par leur énergie $E = \hbar\omega$, par leur spin $L = \hbar$, par l'annulation de tous les autres nombres quantiques, et par la propriété d'être les quanta du champ électromagnétique.

En bref, *la lumière est un courant de photons*. C'est donc bien un «mouvement luminaire de corps lumineux». Les photons nous fournissent notre premier exemple d'une propriété générale du monde à petite échelle: *toutes les ondes et tous les écoulements dans la nature sont constitués de particules quantiques*. Lorsqu'elles sont en grands nombres, les particules quantiques cohérentes (les *quantons* cohérents) se comportent comme des ondes et forment des ondes. Nous verrons bientôt que ceci est le cas même pour la matière. Les quantons sont les constituants fondamentaux de *toutes* les ondes et de *tous* les écoulements, sans exception. Par conséquent, la description continue de la lumière que l'on fait dans la vie quotidienne est similaire, à bien des égards, à celle que l'on fait lorsque l'on décrit l'eau comme un fluide continu: les photons sont les atomes de la lumière, et la continuité est une approximation valide pour des grands nombres de particules. Les quantons individuels se comportent bien souvent comme des particules classiques.

Les livres de physique avaient l'habitude de discuter en détail ce que l'on appelle la *dualité onde-particule*. Soyons clair dès le départ: les quantons (les particules quantiques) ne sont *ni* des ondes classiques *ni* des particules classiques. Dans le monde microscopique, les quantons sont les objets fondamentaux.

Cependant, il reste encore beaucoup de choses qui ne sont pas claires. D'où proviennent, au sein de la matière, ces photons monochromatiques? Encore plus intéres-

* Blaise Pascal (Clermont, 1623 – Paris, 1662), était un mathématicien et physicien important jusqu'à l'âge de 26 ans, après quoi il devint théologien et philosophe.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

sant: si la lumière est constituée de quantons, tous les champs électromagnétiques, même ceux qui sont statiques, doivent également être constitués de photons. Pourtant, dans un champ statique, rien ne s'écoule. Comment cette contradiction apparente est-elle résolue? Et quelles implications l'aspect particulaire a-t-il pour ces champs statiques? Quelle est la différence entre les quantons et les particules classiques? Les propriétés des photons nécessitent une étude plus approfondie.

La taille des photons

Tout d'abord, on pourrait se demander: de quoi ces photons sont-ils constitués? Toutes les expériences réalisées jusqu'à présent, poussées jusqu'à la limite actuelle d'environ 10^{-20} m, apportent la même réponse: «il est impossible de trouver quoi que ce soit». Ceci est consistant avec à la fois une masse nulle et une taille nulle des photons. En effet, on peut s'attendre intuitivement qu'un corps qui aurait une taille non nulle ait aussi une masse non nulle. Donc, bien que les expériences ne puissent donner qu'une limite supérieure, il est raisonnable d'affirmer qu'un photon a une *taille nulle*.

Une particule ayant une taille nulle ne peut pas avoir de constituants. Donc, un photon ne peut pas être subdivisé en des entités plus petites: les photons ne sont pas composites. Pour cette raison on les appelle des particules *élémentaires*. Nous donnerons bientôt d'autres arguments solides confirmant ce résultat. (Pouvez-vous en trouver un?) Néanmoins, la conclusion est étrange. Comment un photon peut-il avoir une taille nulle, ne pas avoir de constituants et, malgré tout, être *quelque chose*? C'est une question difficile et la réponse n'apparaîtra que dans le dernier volume de notre aventure. Pour l'instant, il nous faut simplement accepter la situation telle qu'elle est. Nous nous tournons donc vers une question plus facile.

Défi 35 e

Peut-on compter les photons? – La lumière compressée

> “Also gibt es sie doch.”
>
> Max Planck*

Nous avons vu plus haut que le moyen le plus simple pour compter des photons était de les distribuer sur un grand écran pour ensuite les absorber. Mais cette méthode n'est pas entièrement satisfaisante, car elle détruit les photons. Comment peut-on compter des photons sans les détruire?

Une solution est de faire se réfléchir les photons sur un miroir et de mesurer le recul du miroir. Cela peut sembler presque incroyable, mais de nos jours cet effet devient mesurable même pour des petits nombres de photons. Par exemple, l'effet doit être pris en compte dans le cas des miroirs laser utilisés dans les détecteurs d'ondes gravitationnelles, dont la position doit être mesurée avec une grande précision.

Vol. II, page 181

Une autre façon de compter les photons sans les détruire est d'utiliser des cavités laser spéciales de haute qualité. Il est possible de compter les photons en mesurant l'effet qu'ils

* «Donc, finalement, ils existent.» Max Planck, durant ses dernières années, fit cette remarque après être resté debout, silencieux, pendant un long moment devant un instrument qui comptait des photons individuels en produisant un clic chaque fois qu'il en détectait un. Durant une grande partie de sa vie, Planck était resté sceptique envers le concept du photon, bien que ses propres expériences et conclusions aient été le point de départ de son introduction.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

ont sur des atomes placés astucieusement à l'intérieur d'une telle cavité.

Autrement dit, il est donc possible de mesurer l'intensité lumineuse sans l'absorber. Ces expériences font apparaître un problème important: même les meilleurs faisceaux lumineux, provenant des lasers les plus sophistiqués, ont des intensités qui *fluctuent*. Il n'y a *pas* de faisceaux stationnaires. Ceci n'est pas une surprise: si un faisceau lumineux ne fluctuait *pas*, deux observations successives conduiraient à une valeur nulle de l'action. Cependant, il y a une action minimale dans la nature, à savoir $\hbar$. Donc, dans la nature, tout faisceau, ainsi que tout écoulement, *doit* fluctuer. Mais il y a plus.

Un faisceau lumineux est décrit, dans sa coupe transversale, par son intensité et sa phase. Le changement (l'action) qui se produit alors qu'un faisceau se propage, est donnée par le produit entre l'intensité et la phase. Les expériences confirment la déduction évidente suivante: l'intensité et la phase d'un faisceau se comportent comme la quantité de mouvement et la position d'une particule, en ce sens qu'elles obéissent à une relation d'indétermination. Vous pouvez la déduire vous-même, de la même façon que nous avons déduit les relations d'Heisenberg. En utilisant comme intensité caractéristique $I = E/\omega$ (l'énergie du faisceau divisée par sa pulsation) et en nommant la phase φ, on obtient*

$$\Delta I \, \Delta\varphi \geqslant \frac{\hbar}{2} \,. \tag{12}$$

D'une façon équivalente, le produit d'indétermination pour le nombre moyen de photons $n = I/\hbar = E/\hbar\omega$ et pour la phase φ obéit à

$$\Delta n \, \Delta\varphi \geqslant \frac{1}{2} \,. \tag{13}$$

Pour de la lumière émise par une lampe ordinaire, que l'on appelle de la *lumière thermique*, le produit d'indétermination à gauche de l'inégalité ci-dessus est un grand nombre. De la même manière, le produit d'indétermination de l'action (12) est un grand multiple du quantum d'action.

Pour les faisceaux laser, c.-à-d. les faisceaux de *lumière cohérente*,** le produit d'indétermination est proche de 1/2. Une illustration de lumière cohérente est donnée sur la Figure 22.

Il est aujourd'hui possible de produire de la lumière pour laquelle le produit des deux indéterminations de l'équation (13) est proche de 1/2, mais dont les deux valeurs *dif-*

* On suppose un grand nombre de photons dans cette expression. Ceci est évident car $\Delta\varphi$ ne peut pas croître au-delà de toutes les limites. Plus précisément, il ne peut pas croître au-delà de 2π. Les relations exactes sont

$$\Delta I \, \Delta \cos\varphi \geqslant \frac{\hbar}{2} |\langle \sin\varphi \rangle|$$
$$\Delta I \, \Delta \sin\varphi \geqslant \frac{\hbar}{2} |\langle \cos\varphi \rangle| \tag{11}$$

où $\langle x \rangle$ représente l'espérance mathématique de l'observable x.

** De la lumière cohérente est de la lumière pour laquelle la distribution de probabilité du nombre de photons suit une loi de Poisson. En particulier, la variance est égale au nombre moyen de photons. La meilleure façon de décrire la lumière cohérente est de la considérer comme étant composée de photons se trouvant dans des états quantiques cohérents. Un tel *état cohérent* (canonique), ou encore *état de Glauber*, est officiellement un état pour lequel $\Delta\varphi \to 1/n$ et $\Delta n \to n$.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

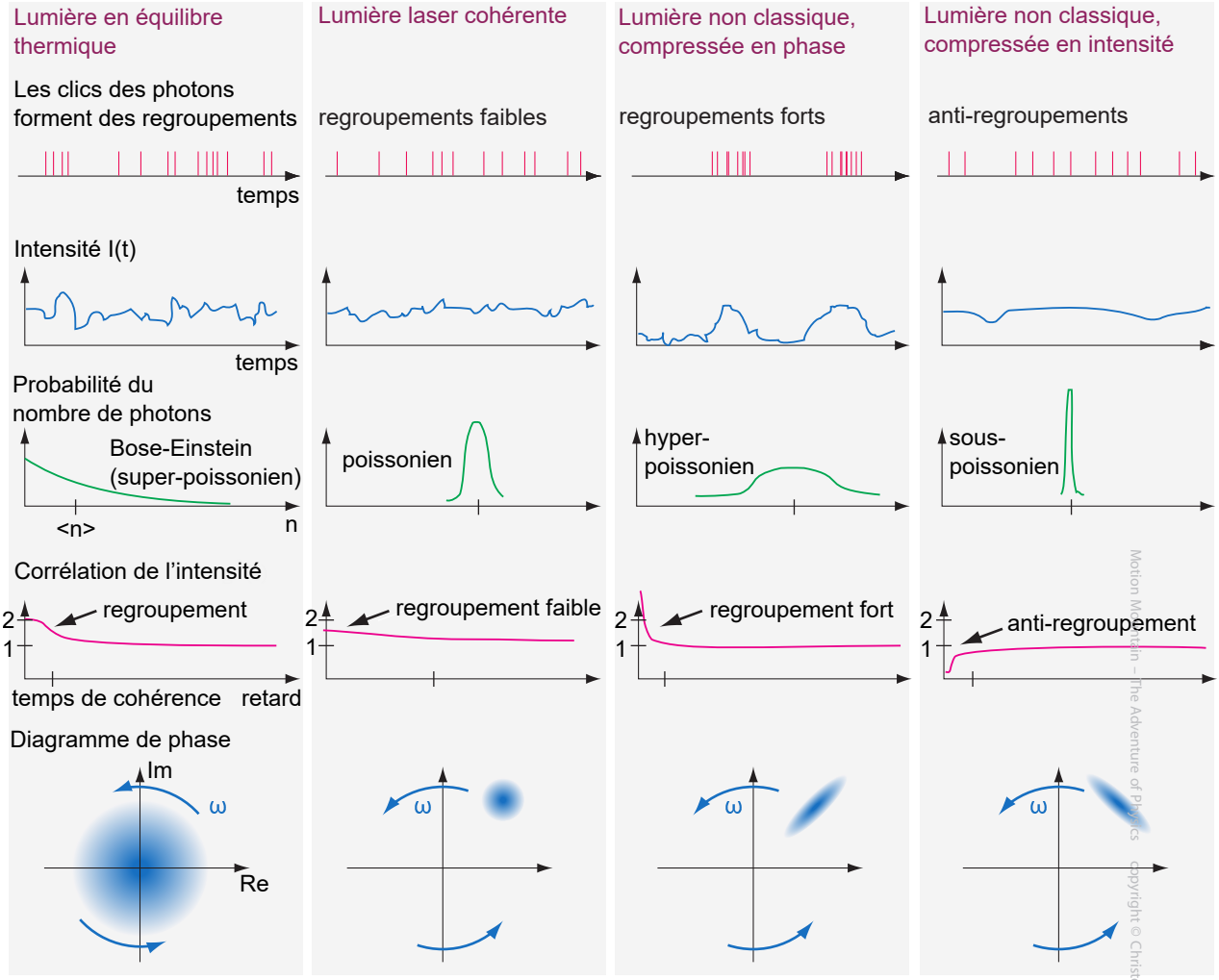


FIGURE 21 Quatre types de lumière et les propriétés de leurs photons: de la lumière thermique, de la lumière laser et deux types extrêmes de lumière non-classique, compressée.

fèrent (dans les unités de ce que l'on appelle l'*espace!de phases*, qui est illustré sur la Ref. 19 Figure 21). Une telle lumière est qualifiée de *non-classique* ou *compressée*. La distribution statistique des photons est soit hyper-poissonienne, soit sous-poissonienne. De tels faisceaux lumineux nécessitent des installations de laboratoire compliquées pour leur production, et ils sont utilisés dans de nombreuse applications de recherche modernes. La lumière non-classique doit être manipulée avec beaucoup de soin, car la moindre perturbation va la faire se retransformer en lumière cohérente ordinaire (voire même en lumière thermique), pour laquelle les statistiques de Poisson (ou même de Bose-Einstein) redeviennent valides. Une vue d'ensemble des principaux types de faisceaux lumineux est donnée par la Figure 21, avec les comportements de leur intensité et de leur phase. (Plusieurs des propriétés présentées sur la figure sont définies seulement pour une seule cellule de l'espace des phases.)

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

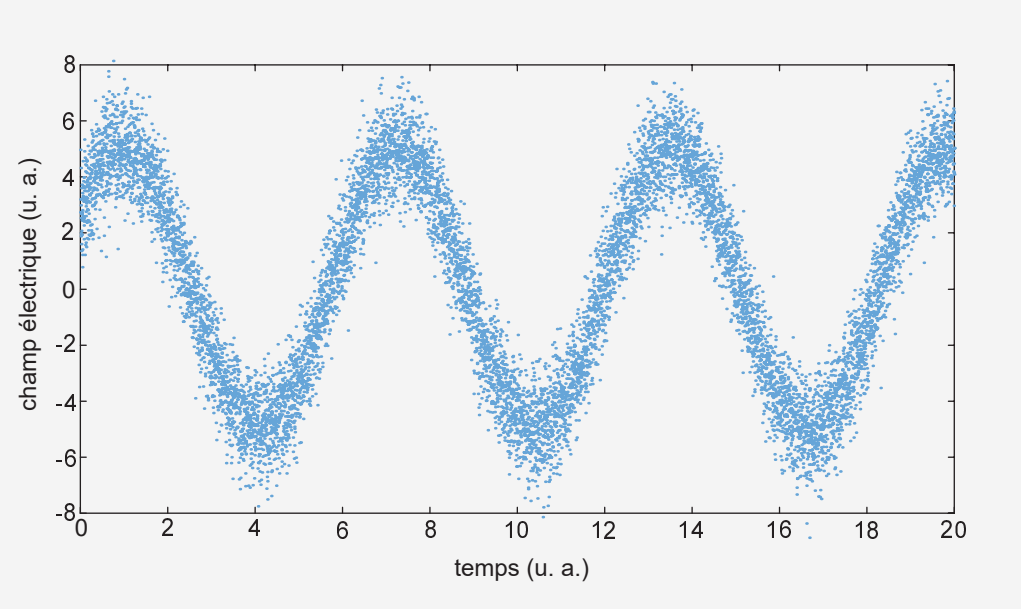


FIGURE 22 Un moyen simple pour illustrer l'indétermination de l'intensité et de la phase d'un faisceau de lumière: le champ électrique que l'on mesure pour une onde électromagnétique cohérente et de faible intensité (consistant environ d'une douzaine de photons). L'onde sinusoïdale floue correspond au diagramme de phase du bas de la seconde colonne de la vue d'ensemble précédente. Pour un grand nombre de photons, l'amplitude relative du bruit de fond est négligeable. (© Rüdiger Paschotta)

Une situation extrême de lumière non-classique est la *lumière compressée en phase*. Puisqu'un faisceau de lumière compressée en phase a une phase (presque) déterminée, le nombre de photons d'un tel faisceau fluctue entre zéro et (presque) l'infinie. Autrement dit, pour pouvoir produire une lumière laser cohérente qui soit aussi proche que possible d'une onde sinusoïdale pure, il nous faut accepter que le nombre de photons soit aussi indéterminé que possible. Un tel faisceau a une fluctuation de phase extrêmement réduite, ce qui permet une grande précision en interférométrie. Le bruit de fond parasite de la phase est aussi faible que possible.

L'autre situation extrême de lumière non-classique est un faisceau comportant un nombre donné, fixe, de photons, et donc ayant une indétermination de phase extrêmement élevée. Pour un tel faisceau de *lumière compressée en amplitude*, la phase fluctue de façon erratique.* Ce type de lumière compressée, non-classique, est idéale pour des mesures d'intensité précises car il fournit le plus petit bruit de fond disponible pour mesurer l'intensité. Ce genre de lumière met en évidence des *anti-regroupements* de photons. Pour vous donner un meilleur aperçu, esquissez le graphe correspondant à la Figure 22 pour de la lumière compressée en phase et pour de la lumière compressée en amplitude).

Défi 36 e

En revanche, la *lumière cohérente* qui est émise par les pointeurs laser, ainsi que tout autre laser, se situent entre les deux types extrêmes de lumière compressée: les indéterminations sur la phase et sur le nombre de photons sont du même ordre de grandeur.

* Les états quantiques les plus appropriés pour décrire une telle lumière s'appellent les *états de nombres*, ou encore *états de Fock*. Ces états sont stationnaires, et donc états propres de l'Hamiltonien, et ils contiennent un nombre fixe de photons.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Les observations concernant la lumière thermique, la lumière laser cohérente et la lumière non-classique mettent en avant une propriété importante de la nature: le nombre de photons dans un faisceau lumineux n'est pas une quantité bien définie. En général, il est indéterminé, et il *fluctue*. Contrairement aux pierres, il n'est pas possible de compter les photons avec précision (tant qu'ils se propagent et ne sont pas absorbés). Lorsqu'ils sont en vol, il n'est possible de déterminer qu'un nombre approximatif, moyen, de photons, dans les limites définies par l'indétermination. Est-il correct d'affirmer que le nombre de photons au départ du faisceau n'est pas nécessairement le même qu'à la fin du faisceau? Défi 37 pe

Les fluctuations sur le nombre de photons sont de la plus grande importance pour les fréquences optiques. Pour les fréquences radio, les fluctuations du nombre de photons sont généralement négligeables du fait de la faible énergie des photons ainsi que des nombres généralement élevés de photons impliqués. Inversement, aux énergies des rayons gamma, les effets ondulatoires ne jouent qu'un petit rôle. Par exemple, nous avons vu que dans l'espace intergalactique, distant et sombre, loin de toute étoile, il y avait environ 400 photons par centimètre cube, et qu'ils formaient le rayonnement de fond diffus cosmologique. Cette densité du nombre de photons, tout comme le nombre de photons dans un faisceau lumineux, a aussi une indétermination lors des mesures. Pouvez-vous l'estimer? Défi 38 e

En bref, contrairement aux cailloux, *bien que les photons puissent être comptés, leur nombre n'est pas fixe*. Et ceci n'est pas la seule différence entre les photons et les cailloux.

La position des photons

Où se trouve un photon lorsqu'il se déplace au sein d'un faisceau lumineux? La théorie quantique nous donne une réponse simple: à aucun endroit particulier. Ceci est démontré d'une façon des plus spectaculaire à l'aide d'expériences utilisant des interféromètres, tel que l'interféromètre élémentaire présenté sur la Figure 23. Les interféromètres montrent que même un faisceau composé d'un *seul* photon peut être divisé, forcé à suivre deux chemins différents, pour ensuite être recombiné. L'interférence qui en résulte montre qu'il n'est pas possible de dire si le photon individuel a pris l'un ou l'autre des deux chemins. Si un des deux chemins est obstrué, le motif sur l'écran change. Autrement dit, d'une façon ou d'une autre, le photon a dû passer par les deux chemins en même temps. Les photons ne peuvent pas être localisés, ils n'ont pas de position.*

Nous en arrivons à la concluons que les impulsions de lumière macroscopiques ont des chemins, mais que les photons individuels qui les composent n'en ont pas. Les photons n'ont ni chemin, ni position. Seuls les grands nombres de photons peuvent avoir des chemins et des positions, et encore, seulement de façon approximative.

L'impossibilité de localiser les photons peut être quantifiée. Les interférences montrent qu'il est impossible de localiser les photons dans la direction *transversale* par rapport au déplacement. Il semblerait qu'il puisse être moins difficile de les localiser *le long de* la direction de déplacement, lorsqu'ils font partie d'une impulsion lumineuse, mais ceci est une erreur. Le quantum d'action implique que l'indétermination

* Il n'est pas possible de contourner cette conclusion en disant que le photon est *divisé* par le séparateur de faisceau: si on place un détecteur sur chacun des deux chemins, on trouve qu'ils ne détectent jamais de photon en même temps. Les photons ne peuvent pas être divisés.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

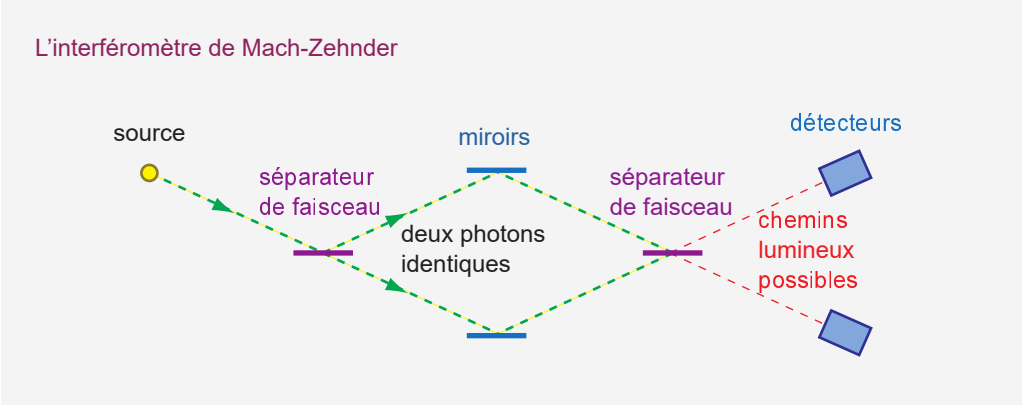


FIGURE 23 L'interféromètre de Mach-Zehnder ainsi qu'une réalisation pratique, d'une taille d'environ 0,5 m. (© Félix Dieu et Gaël Osowiecki)

sur la position longitudinale est donnée au moins par la longueur d'onde de la lumière. Pouvez-vous le confirmer? Il se trouve que les photons ne peuvent être localisés que dans la limite d'une *longueur de cohérence*. En fait, dans le cas général, la longueur de cohérence transversale diffère de la longueur de cohérence longitudinale. La longueur de cohérence longitudinale (divisée par c) est également appelée la cohérence temporelle, ou plus simplement le *temps de cohérence*, qui est également indiqué sur la Figure 21. L'impossibilité de localiser les photons est une conséquence du quantum d'action. Par exemple, la longueur de cohérence transversale est due à l'indétermination de la quantité de mouvement transversale. Les valeurs de l'action, pour des chemins passant par des points séparés par une distance plus petite qu'une longueur de cohérence, diffèrent de

Défi 39 f
Page 54

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

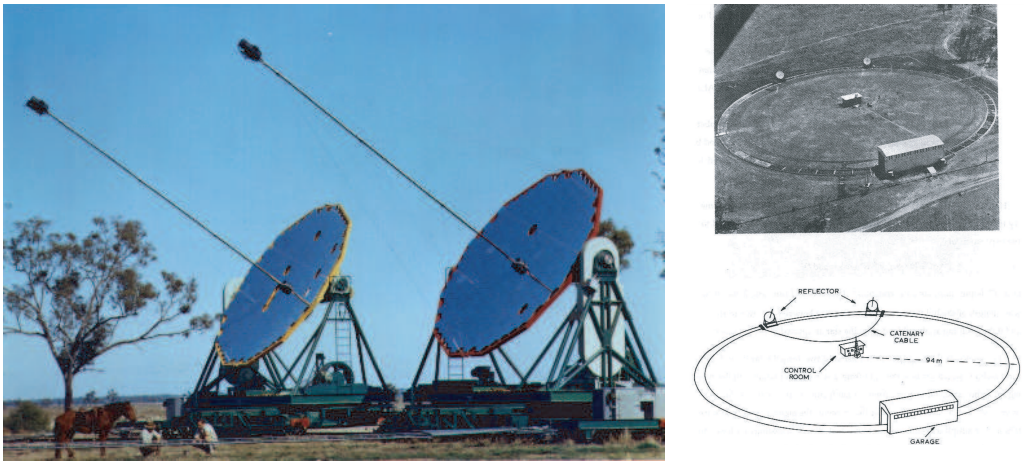


FIGURE 24 La configuration expérimentale originale avec laquelle Hanbury Brown et Twiss ont mesuré les diamètres des étoiles à Narrabri en Australie. La distance entre les deux collecteurs de lumière pouvait être modifiée en les déplaçant le long de rails. Les détecteurs de lumière se trouvent au bout des perches. Chacun d'eux, comme ils l'ont écrit eux-mêmes, «recueillait de la lumière comme de l'eau dans un saut.» (© John Davis)

moins d'un quantum d'action $\hbar$. Chaque fois que l'on détecte un photon quelque part, par exemple lors d'une absorption, il n'est *pas possible* de fournir une détermination *précise* de sa direction ou de son origine. Cependant, dans des cas spéciaux, il peut se trouver qu'il y ait une forte probabilité pour une direction particulière ou pour une source particulière.

L'absence de localisation signifie que les photons ne *peuvent pas* être simplement visualisés comme des trains de petites ondes. Par exemple, il est possible d'augmenter la longueur de cohérence en faisant passer de la lumière par un filtre étroit. Les photons sont réellement des entités qu'il n'est *pas possible de localiser*, spécifiques au monde quantique. Les photons ne sont ni des petites pierres, ni des petits paquets d'onde. En revanche, le «chemin lumineux», la «position d'une impulsion lumineuse» et la «cohérence» sont des propriétés d'un ensemble de photons, mais ne s'appliquent *pas* à un photon individuel.

Chaque fois que des photons peuvent être *presque* localisés le long de leur direction de propagation, comme c'est le cas pour la lumière cohérente, on peut se demander comment les photons s'alignent, les uns à la suite des autres, dans un faisceau lumineux. Il est vrai que l'on vient de voir que cela n'avait aucun sens de parler de leur position *précise*. Mais est-ce que les photons, dans un faisceau parfait, arrivent à des intervalles presque réguliers?

Ref. 20 À la grande honte des physiciens, l'étude de la corrélation des photons a été initiée par deux astronomes, Robert Hanbury Brown et Richard Twiss, en 1956, et a rencontré plusieurs années d'incrédulité. Ils ont fait varier la distance transversale entre les deux détecteurs que l'on peut voir sur la Figure 24 (de quelques mètres à 188 mètres) et ils ont mesuré les corrélations en intensité entre les deux. Hanbury Brown et Twiss ont alors trouvé que les fluctuations en intensité à l'intérieur du volume de cohérence étaient corrélées. Donc, les photons eux-mêmes sont corrélés. Avec cette expérience, ils ont pu me-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

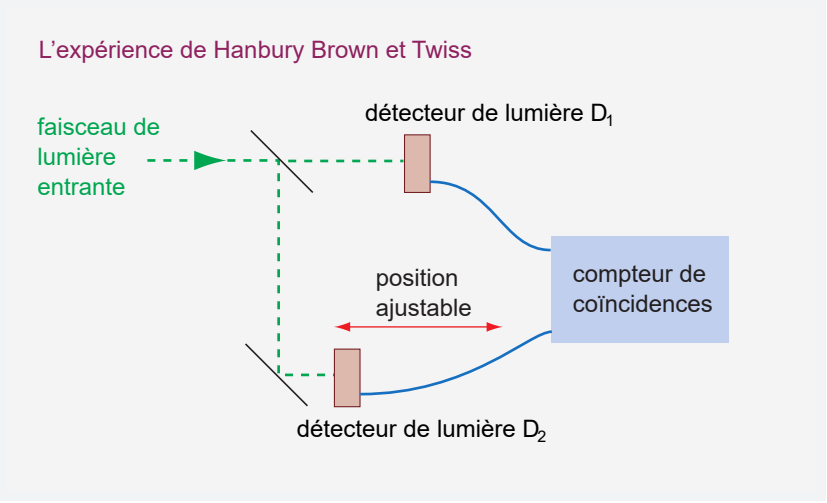


FIGURE 25 Comment mesurer les statistiques des photons avec un corrélateur d'intensité électronique (compteur de coïncidence). La variation est mesurée en faisant varier la position d'un détecteur.

surer le diamètre de nombreuses étoiles lointaines.

Inspirés par le succès de Hanbury Brown et Twiss, des chercheurs ont développé une méthode simple pour mesurer la probabilité pour qu'un second photon dans un faisceau lumineux arrive à un certain temps donné après le premier. Ils ont simplement divisé le faisceau, mis un détecteur sur la première des deux branches et ont fait varier la position du second détecteur sur l'autre branche. L'installation est représentée sur la Figure 25. Cette expérience est appelée aujourd'hui *l'expérience de Hanbury Brown et Twiss*. On trouve que, pour de la lumière cohérente et dans les limites du volume de cohérence, les clics des deux compteurs (et donc les photons eux-mêmes) sont *corrélés*. Pour être plus précis, de telles expériences montrent que chaque fois que le premier photon est reçu, le second photon a plus de chance d'être reçu juste après. Donc, les photons des faisceaux lumineux sont *regroupés*. Le regroupement est l'un des nombreux résultats qui montrent que les photons sont des quantons, qu'ils sont en effet nécessaires pour décrire la lumière, et que ce sont des entités qu'il n'est pas possible de localiser. Comme nous allons le voir ci-dessous, les résultats montent également que les photons sont des bosons.

Page 70

Chaque faisceau lumineux a une limite de temps maximale pour le regroupement: le *temps de cohérence*. Pour des durées plus longues que le temps de cohérence, la probabilité de regroupement est faible et indépendante de l'intervalle de temps, comme le montre la Figure 25. Le temps de cohérence caractérise chaque faisceau lumineux. En fait, il est souvent plus facile de penser en termes de *longueur de cohérence* d'un faisceau lumineux. Pour de la lumière thermique, la longueur de cohérence est seulement de quelques micromètres (un petit multiple de la longueur d'onde). Les longueurs de cohérence les plus grandes, de plus de 300 000 km, sont obtenues avec des lasers de recherche qui ont une bande passante laser extrêmement étroite de seulement 1 Hz. Il est intéressant de remarquer que de la lumière cohérente peut même être trouvée dans la nature: plusieurs étoiles spéciales qui en émettent ont été découvertes.

Ref. 21

Bien que l'intensité d'un bon faisceau laser soit presque constante, les photons n'arrivent pas à intervalles réguliers. Même la meilleure lumière laser produit des regroupements, mais avec une statistique différente et à un moindre degré que dans le cas de la

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

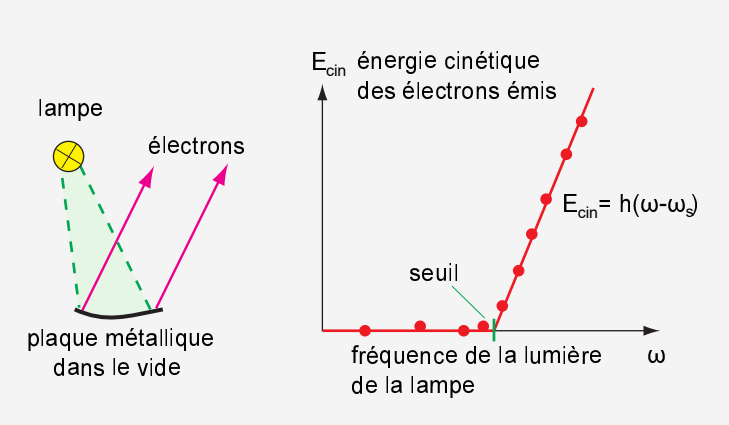


FIGURE 26 L'énergie cinétique des électrons émis par effet photoélectrique.

Page 54 lumière d'une lampe, comme l'illustre la Figure 21. La lumière dont les photons arrivent à intervalles réguliers, et donc produisant ce que l'on nomme des *anti-regroupements (de photons)*, est, de toute évidence, non-classique dans le sens défini ci-dessus. Une telle lumière ne peut être produite que par des montages expérimentaux spéciaux. Des exemples extrêmes de ce phénomène sont actuellement en cours d'investigation par plusieurs groupes de recherche, dont le but est de fabriquer des sources de lumière qui n'émettraient qu'un seul photon à la fois, à des intervalles de temps réguliers, et de façon la plus fiable possible. En bref, on peut affirmer que la statistique précise des photons dans un faisceau lumineux dépend du mécanisme de la source de lumière.

Pour résumer, les expériences nous obligent à conclure que la lumière est constituée de photons, mais aussi que les photons ne peuvent pas être localisés au sein des faisceaux lumineux. En général, parler de la position d'un photon n'a pas de sens. L'idée n'a de sens que dans certaines situations spéciales, et alors seulement de façon approximative et sous la forme d'une moyenne statistique.

Les photons sont-ils nécessaires?

À la lumière des résultats découverts jusqu'à présent, la réponse à la question ci-dessus est évidente. Mais le problème est délicat. Dans les manuels, l'*effet photoélectrique* est souvent cité comme étant la première et la plus évidente preuve expérimentale de l'existence des photons. En 1887, Heinrich Hertz avait observé que pour certains métaux, comme le lithium ou le césium, de la lumière ultraviolette incidente conduisait à charger électriquement le métal. Plus tard, d'autres études du même effet ont montré que la lumière produisait l'émission d'électrons, et que l'énergie des électrons éjectés ne dépendait pas de l'intensité de la lumière, mais seulement de la différence entre sa pulsation multipliée par $\hbar$ et un seuil d'énergie dépendant du matériau. La Figure 26 résume l'expérience et les résultats de mesures.

En physique classique, l'effet photoélectrique est difficile à expliquer. Mais en 1905, Ref. 22 Albert Einstein expliqua les résultats des mesures à partir de l'hypothèse que la lumière était constituée de photons d'énergie $E = \hbar\omega$. Il imagina que cette énergie était utilisée en partie pour amener l'électron au-dessus de l'énergie de seuil et en partie pour lui fournir

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

de l'énergie cinétique. Un plus grand nombre de photons conduit seulement à un plus grand nombre d'électrons, mais pas à des électrons plus rapides. En 1921, Einstein reçu le prix Nobel pour l'explication de l'effet photoélectrique. Mais Einstein était un *génie*: il avait déduit un résultat correct en utilisant un raisonnement quelque peu incorrect. La (petite) erreur était d'avoir supposé qu'un faisceau de lumière classique et continu aurait produit un effet différent. En fait, il est facile de voir qu'un champ électromagnétique classique et continu, qui interagit avec de la matière discrète, faite d'atomes discrets, eux-mêmes composés d'électrons discrets, conduirait exactement au même résultat, pour autant que l'on décrive le mouvement des électrons avec la théorie quantique. Plusieurs
Ref. 23 chercheurs l'ont confirmé au début du XXe siècle. L'effet photoélectrique en lui-même n'implique donc *pas* l'existence des photons.

Il est vrai que de nombreux chercheurs par le passé n'étaient pas convaincus que l'effet photoélectrique démontrait l'existence des photons. Historiquement, l'argument le plus important pour la *nécessité* des quanta de lumière a été donnée par Henri Poincaré. En 1911 et 1912, âgé de 57 ans, et seulement quelques mois avant sa mort, il publia deux articles influents prouvant que la loi du rayonnement du corps noir (pour laquelle Max
Ref. 24 Planck avait découvert le quantum d'action) *requérait* l'existence des photons. Il démontra également que la quantité de rayonnement émise par un corps chaud n'était *finie* qu'à cause de la nature *quantique* des processus qui conduisaient à l'émission de la lumière. Une description de ces processus en termes d'électrodynamique classique conduirait à des quantités (presque) *infinies* d'énergie rayonnée. Les deux articles influents de Poincaré avaient convaincu la plupart des physiciens qu'il était devenu nécessaire d'étudier les phénomènes quantiques avec plus de détails. Poincaré ne connaissait pas l'action limite $S \geqslant \hbar$. Pourtant, son argument était basé sur l'observation qu'une lumière de fréquence donnée avait une intensité minimale, à savoir, le photon individuel. Un tel faisceau ne comportant qu'un seul photon peut être divisé en deux faisceaux, par exemple en utilisant un miroir semi-réfléchissant. Pourtant, pris dans leur ensemble, ces deux faisceaux ne contiennent jamais plus d'un seul photon.

Une autre expérience intéressante montrant la nécessité des photons est l'observation
Ref. 25 de «molécules de photons». En 1995, Jacobson et al. ont prédit qu'il devait être possible d'observer la longueur d'onde de de Broglie d'un *paquet* de photons. Selon la théorie quantique, la longueur d'onde du paquet est donnée par la longueur d'onde d'un photon unique divisée par le nombre de photons dans le paquet. L'équipe de recherche soutenait que la longueur d'onde du paquet pourrait être observée si un tel paquet pouvait être divisé, puis recombiné sans détruire sa cohésion interne. En 1999, cet effet fut enfin observé par de Pádua et son équipe de recherche au Brésil. Ils ont utilisé un dispositif minutieux, composé d'un cristal non-linéaire pour créer ce qu'ils appelaient un *biphoton*, et ils ont observé ses propriétés d'interférences, trouvant une réduction de la longueur d'onde effective par un facteur 2, tel que prédit. Depuis, des paquets de trois, voire quatre
Ref. 26 photons intriqués ont été créés et observés.

Un autre argument en faveur de la nécessité des photons est, comme nous l'avons
Page 48 mentionné plus haut, le recul des atomes lorsqu'ils émettent de la lumière. La meilleure façon d'expliquer le recul mesuré dans ces cas est en considérant l'émission d'un photon dans une direction particulière, ce qui n'est pas le cas de l'électrodynamique classique qui prédit l'émission d'une onde sphérique, sans préférence de direction.

De toute évidence, l'observation de la *lumière non-classique*, que l'on appelle aussi de

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

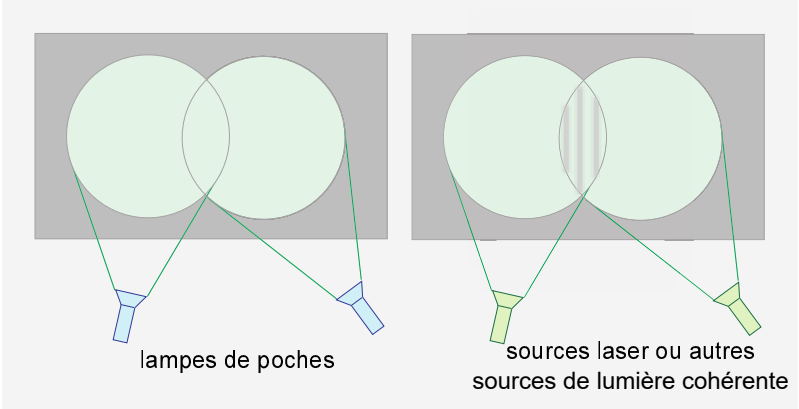


FIGURE 27 Deux situations pour lesquelles de la lumière croise de la lumière: des sources de lumière différentes produisent des résultats différents.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Page 54 la *lumière compressée*, conforte également l'existence des photons, car la lumière compressée prouve que les photons sont bien un aspect *intrinsèque* de la lumière, nécessaires même lorsque les interactions avec la matière ne jouent aucun rôle. Ceci est également vrai pour l'effet Hanbury Brown et Twiss.

Ref. 27

Finalement, la désintégration spontanée des états excités d'un atome nécessite aussi l'existence des photons. Ceci ne peut être expliqué par une description continue de la lumière.

En résumé, le concept du photon est donc bien nécessaire pour une description précise de la lumière. Mais les détails sont souvent subtils, car les propriétés des photons sont inhabituelles et demandent un changement de nos habitudes de pensée. Pour éviter ces problèmes, la plupart des manuels arrêtent de parler des photons après avoir décrit l'effet photoélectrique. C'est dommage, car ce n'est qu'à partir de là que les choses commencent à être intéressantes. Méditez sur ce qui suit. De toute évidence, tous les champs électromagnétiques sont constitués de photons. Aujourd'hui, les photons peuvent être comptés lorsqu'il s'agit de rayons gamma, de rayons X, de lumière ultraviolette, de lumière visible et de lumière infrarouge. Cependant, pour des fréquences plus faibles, telles que les ondes radio, les photons n'ont toujours pas été détectés. Pouvez-vous imaginer ce qui serait nécessaire pour permettre de compter les photons émis depuis une station radio? Ce problème nous conduit directement à la question la plus importante de toutes:

Défi 40 e

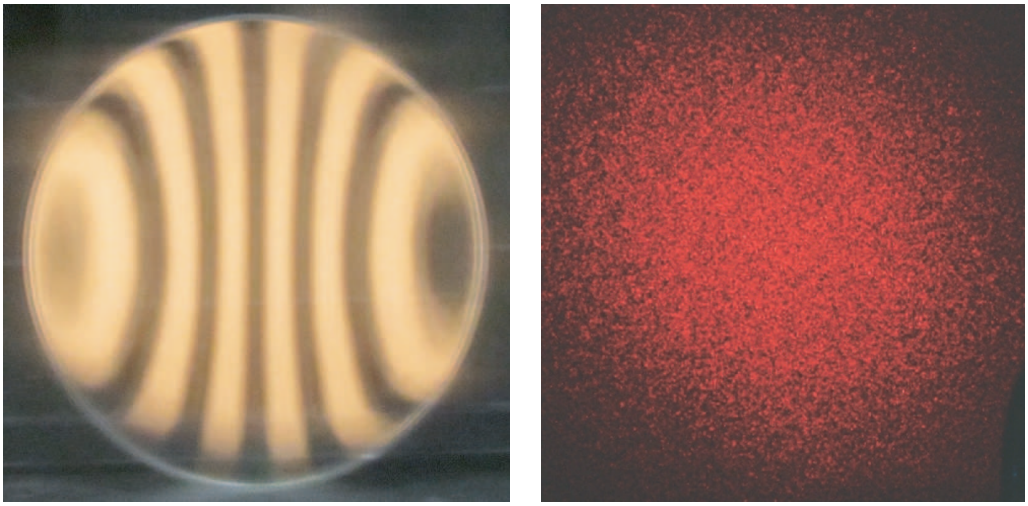


FIGURE 28 Exemples de figures d'interférence qui apparaissent lorsque des faisceaux de lumière cohérente se croisent: l'interférence produite par un miroir de télescope parabolique artisanal de 27 cm de diamètre et une figure de granularité laser sur une surface rugueuse. (© Mel Bartels, Epzcaw)

Les interférences: comment une onde peut-elle être constituée de particules?

> Die ganzen fünfzig Jahre bewusster Grübelei haben mich der Antwort auf die Frage 'Was sind Lichtquanten?' nicht näher gebracht. Heute glaubt zwar jeder Lump er wisse es, aber er täuscht sich.
>
> Albert Einstein, 1951 *

Si une onde lumineuse est constituée de particule, il doit être possible d'expliquer chacune des propriétés des ondes en termes de photons. Les expériences mentionnées ci-dessus nous laisse déjà entendre que ceci n'est possible que parce que les photons sont des particules *quantiques*. Essayons d'explorer plus en détails cette question.

La lumière peut *croiser* un autre faisceau lumineux sans être perturbée, par exemple lorsque les faisceaux lumineux de deux lampes de poche continuent à éclairer derrière l'endroit où ils se croisent. Cette observation n'est pas difficile à expliquer à l'aide des photons: puisque les photons n'interagissent pas entre eux et qu'ils sont comme des points sans dimension, ils ne se percutent «jamais». En réalité, il *y a* une probabilité extrêmement faible pour qu'ils interagissent, comme nous le découvrirons plus tard, mais cet effet n'est pas observable dans la vie quotidienne.

Vol. V, page 130

Mais si deux faisceaux de lumière *cohérente* (c.-à-d. deux faisceaux lumineux de fréquence identique et en relation de phase constante) se croisent, on observe alternativement des régions brillantes et des régions sombres, que l'on appelle des *franges d'interférence*. L'expérience est schématisée sur la Figure 27. Des exemples de produc-

* «Cinquante années à me ruminer la conscience ne m'ont pas rapproché de la réponse à la question «Que sont les quanta de lumière?» De nos jours, tout goujat pense qu'il le sait, mais il a tort.» Einstein écrivit ceci quelques années avant sa mort dans une lettre à Michele Besso.

Ref. 28

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net



FIGURE 29 En haut: figures d'interférence calculées (et indistinguables de celles que l'on observe dans des conditions idéales que l'on trouve dans les manuels scolaires), produites par deux fentes étroites et parallèles éclairées par de la lumière verte et par de la lumière blanche. En bas: deux faisceaux gaussiens interférant sous un certain angle. (© Dietrich Zawischa, Rüdiger Paschotta)

tions d'interférences réelles sont présentés sur la Figure 28 et la Figure 29. Comment ces franges d'interférence apparaissent-elles?* Comment se peut-il qu'aucun photon ne soit détecté dans les zones d'ombre? Nous connaissons déjà la seule réponse possible: la luminosité en un point donné correspond à la *probabilité* pour qu'un photon puisse y arriver. Les franges impliquent que

▷ Les photons se comportent comme des petites *flèches* qui se déplacent.

Une réflexion plus poussée conduit à la description suivante:

— La flèche est toujours perpendiculaire à la direction du déplacement.
— La direction de la flèche reste fixe dans l'espace lorsque les photons se déplacent.

* Si des lasers sont utilisés, les franges ne peuvent être observées que si les deux faisceaux sont issus d'un faisceau unique après qu'il ait été divisé, ou si on utilise deux lasers de haute précision, et chères. (Pourquoi?)

Défi 41 e

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

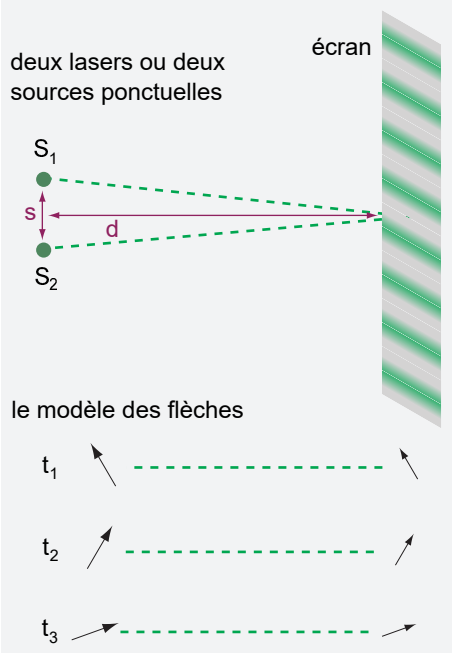


FIGURE 30 Les interférences et la description de la lumière à l'aide de flèches (à trois instants dans le temps).

— La longueur d'une flèche diminue comme le carré de la distance parcourue.
— *La probabilité pour qu'un photon arrive quelque part est donnée par le carré d'une flèche.*
— *La flèche finale est la somme de toutes les flèches qui arrivent en un point par tous les chemins possibles.*
— Les photons émis par des source monochromatiques sont émis avec des flèches de longueur constante et pointant dans la direction ωt. Autrement dit, de telles sources crachent des photons par une bouche *tournant sur elle-même*.
— Les photons émis par des sources incohérentes (par exemple des sources thermiques, telles que des lampes de poche) sont émis avec des flèches de longueur constante et pointant dans des directions *aléatoires*.

À l'aide de ce modèle simple,* nous pouvons expliquer le comportement ondulatoire de la lumière. En particulier, nous pouvons expliquer les franges d'interférence que l'on voit lors des expériences avec des lasers, comme le montre schématiquement la Figure 30. Vous pouvez vérifier que dans certaines régions, les deux flèches voyageant par chacune des deux fentes s'annulent *tout le temps*. Aucun photon n'est détecté dans ces régions: elles sont noires. Dans d'autre régions, les flèches s'additionnent toujours pour donner la valeur maximale. Ces régions sont toujours brillantes. Les régions entre les deux ont des niveaux intermédiaires de brillance. De toute évidence, dans le cas des lampes de poche courantes, que montre la partie gauche de la Figure 27, la luminosité dans la région

* Le modèle fournit une description correcte de la lumière, excepté qu'il néglige la polarisation. Pour ajouter la polarisation, il est nécessaire de combiner des flèches qui tournent dans les deux sens autour de la direction de déplacement.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

commune se comporte également comme on s'y attend: les moyennes s'additionnent simplement.

Bien évidemment, le modèle du photon implique qu'une figure d'interférence se construit lorsqu'un grand nombre d'impacts de photons individuels s'accumulent. En utilisant des faisceaux de faible intensité, il doit donc être possible de voir comment ces petites tâches s'amoncellent doucement pour former une figure d'interférence, en arrivant en plus grand nombre sur les régions brillantes et en évitant les régions sombres. Page 47 C'est en effet le cas, comme nous l'avons vu plus tôt. Toutes les expériences confirment cette description.

Autrement dit, une interférence est la superposition de champs de lumière cohérente ou, plus généralement, de champs électromagnétiques cohérents. Le comportement des photons des champs de lumière cohérente est spécifique et plus régulier que celui des champs de lumière incohérente. Nous explorerons les détails de la statistique des photons très bientôt.

En résumé, les photons sont des particules quantiques. Les particules quantiques peuvent produire des figures d'interférence (de même que tous les autres effets propres aux ondes) quand elles apparaissent en grands nombres, parce qu'elles sont décrites par une flèche dont le carré de la longueur fournit la probabilité de leur détection.

L'interférence d'un seul photon

Il est important de faire remarquer que l'interférence entre deux faisceaux lumineux n'est *pas* le résultat de deux photons distincts qui s'annuleraient ou bien qui s'ajouteraient. Une telle annulation contredirait la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement. L'interférence est un effet qui s'applique à chaque photon séparément (tel qu'on l'a montré dans la section précédente) parce que chaque photon est dispersé sur l'ensemble du dispositif: chaque photon passe par tous les chemins possibles. Ref. 29 Comme Paul Dirac le soulignait:

▷ Chaque photon n'interfère qu'avec lui-même.

L'interférence d'un photon avec lui-même ne se produit que parce que les photons sont des quantons, et non pas des particules classiques.

L'affirmation de Dirac, bien souvent citée, conduit à un paradoxe célèbre: si un photon ne peut interférer qu'avec lui-même, comment deux faisceaux provenant de deux lasers différents peuvent-ils interférer entre eux? La réponse que fournit la physique quantique est simple, mais étrange: dans la région où les faisceaux interfèrent (comme mentionné Page 56 plus haut) il est impossible de savoir de quelle source un photon provient. Il n'est *pas possible* de dire de quelle source spécifique proviennent les photons qui se trouvent dans la région où les faisceaux se croisent. Les photons dans la région commune sont aussi des quantons, et ils n'interfèrent donc qu'avec eux-mêmes.

Une autre description de la situation est la suivante:

▷ Un photon n'interfère que dans son volume de cohérence. Et dans ce volume, il est impossible de distinguer les photons.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

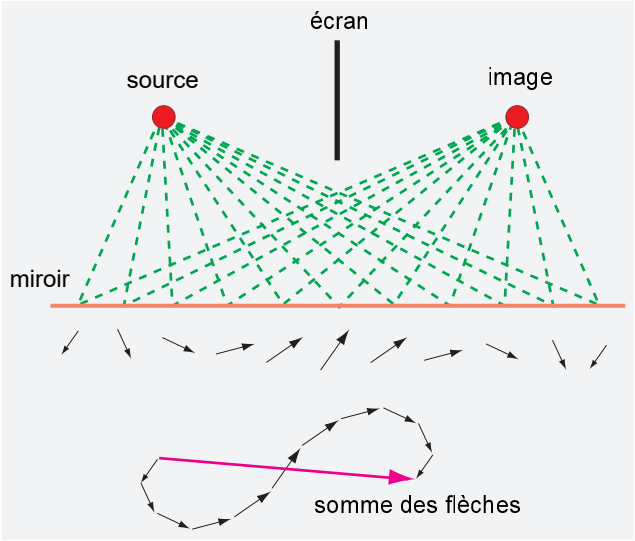


FIGURE 31 De la lumière réfléchie par un miroir, et les flèches correspondantes (à un instant donné).

Dans le volume de cohérence formé par les longueurs de cohérence longitudinale et transversale (ce que l'on appelle parfois une *cellule de l'espace des phases*) on ne peut pas vraiment dire que la lumière soit un écoulement de photons, parce qu'un écoulement ne peut pas y être défini. Malgré des affirmations régulières du contraire, l'énoncé
Page 74
de Dirac est correct, comme on le verra par la suite. C'est une conséquence étrange du quantum d'action.

La réflexion et la diffraction déduites des photons à flèches

Les ondes manifestent également de la *diffraction*. La diffraction est le changement de direction de propagation de la lumière, ou de n'importe quelle autre onde, proche des arêtes d'un obstacle. Pour comprendre ce phénomène dans le cas des photons, commençons par un simple miroir, et étudions d'abord la *réflexion*. Les photons (comme toutes les particules quantiques) se déplacent depuis une source vers un détecteur par *tous* les chemins possibles. Comme Richard Feynman,* qui découvrit cette explication, aimait à

* Richard («Dick») Phillips Feynman (New York City, 1918 – Los Angeles, 1988), physicien, fut l'un des fondateurs de l'électrodynamique quantique. Il découvrit aussi la reformulation de la théorie quantique dite de «l'intégrale de chemin», il apporta des contributions importantes à la théorie de l'interaction faible et à la gravité quantique, et il coécrivit un manuel célèbre *Le cours de physique de Feynman*, aujourd'hui disponible sur internet à www.feynmanlectures.info. Il était l'un de ces physiciens théoriciens qui fit carrière principalement en faisant des calculs avec les nombres complexes. Mais il fit marche arrière avec l'âge, et fut tout particulièrement couronné de succès avec son enseignement et ses livres de physique, qui valent tous la peine d'être lus. Il s'est consacré avec dévotion à la physique et au développement des connaissances, et il était collectionneur d'explications physiques surprenantes. Il aida à la construction de la bombe nucléaire, il écrivait des articles dans les bars pour gentlemen, il évitait de prendre des responsabilités professionnelles, et il était d'une arrogance célèbre ainsi qu'irrespectueux de l'autorité. Il a écrit plusieurs livres populaires sur les évènements de sa vie. Bien qu'il ait tenté toute sa vie de surpasser le génie de Wolfgang Pauli, il échoua dans cette aventure. Il partagea le prix Nobel de physique pour ses travaux sur l'électrodynamique quantique en 1965.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

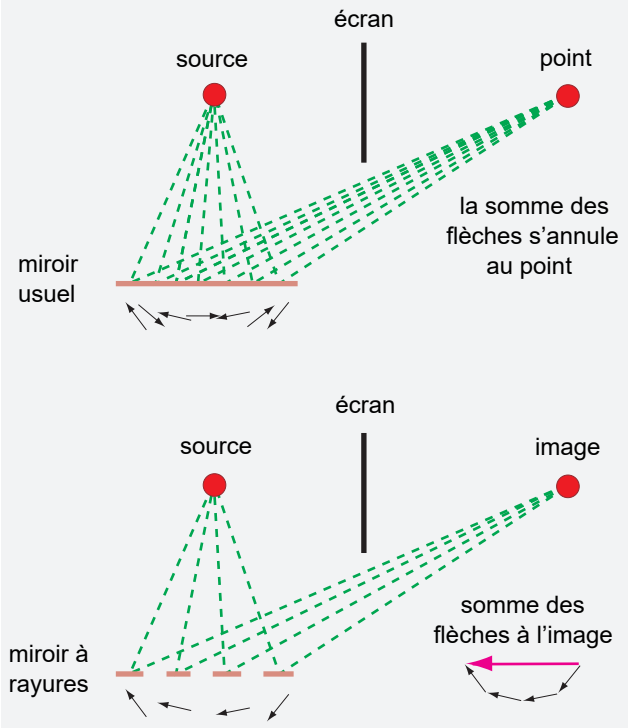


FIGURE 32 De la lumière réfléchie par un miroir mal positionné et par un réseau.

insister: le terme «tous» doit être pris au pied de la lettre. Ceci n'est pas vraiment important en ce qui concerne l'explication des interférences. Mais pour pouvoir comprendre un miroir, il faut inclure toutes les possibilités, aussi insensées qu'elles puissent paraître, comme le montre la Figure 31.

Comme nous l'avons mentionné ci-dessus, une source lumineuse émet des flèches tournantes. Pour déterminer la probabilité pour que la lumière arrive à un certain point de l'image, il faut additionner toutes les flèches qui arrivent au même instant à cet emplacement. Pour chaque chemin, l'orientation de la flèche qui arrive à l'image est indiquée (uniquement pour faciliter la compréhension) en dessous du segment de miroir correspondant. L'angle et la longueur de la flèche qui arrive dépendent du chemin. Notez que la somme de toutes les flèches ne s'annule pas: de la lumière arrive en effet sur l'image. De plus, la contribution la plus importante provient des chemins les plus proches du milieu. Si on devait faire le même calcul pour un autre point de l'image, (presque) aucune lumière n'y parviendrait.

En bref, la règle qui dit que la réflexion se produit pour un angle réfléchit égal à l'angle initial est une approximation, qui découle du modèle des flèches de la lumière. En fait, un calcul détaillé, avec plus de flèches, montre que l'approximation est assez précise: les erreurs sont bien plus petites que la longueur d'onde de la lumière.

La preuve que la lumière prend bien tous ces chemins étranges est apportée par un miroir plus spécialisé. Comme le montre la Figure 32, on peut répéter l'expérience avec un miroir qui réfléchit seulement le long de certaines bandes. Dans ce cas, les bandes ont été soigneusement choisies pour que les longueurs correspondantes des chemins conduisent

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

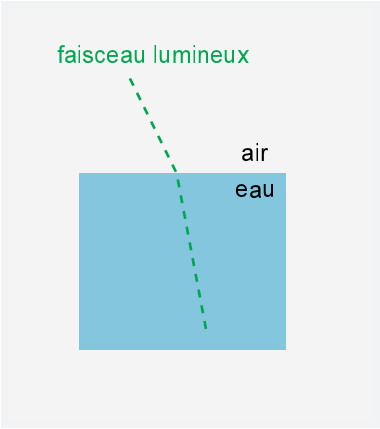


FIGURE 33 Si la lumière était faite de petites pierres, elles se déplaceraient plus vite dans l'eau.

à des flèches ayant un biais dans une direction, vers la gauche dans notre cas. La somme des flèches montre maintenant qu'un tel miroir spécialisé (appelé couramment un *réseau*) permet à la lumière de se réfléchir dans des directions inhabituelles. Il se trouve que ce comportement est standard pour les ondes: il s'appelle la *diffraction*. En bref, le modèle des flèches pour les photons nous permet de décrire cette propriété ondulatoire de la lumière, pour autant que les photons suivent ce schéma de probabilité un peu «farfelu». Mais que cela ne vous fâche pas! Comme nous l'avons dit plus haut, la théorie quantique est la théorie pour les dingues.

Vous voudriez peut-être vérifier que le modèle des flèches, avec les approximations qu'il produit en sommant sur tous les chemins possibles, garantit automatiquement que
Défi 42 e le quantum d'action est bien la plus petite action que l'on puisse observer.

La réfraction et la réflexion partielle déduites des photons à flèches

Toutes les ondes ont une *vitesse de propagation*. La vitesse de propagation dépend également du milieu dans lequel l'onde se propage. En conséquence, les ondes manifestent de la *réfraction* lorsqu'elles passent d'un milieu vers un autre, si ce dernier a une vitesse de propagation différente. Il est intéressant de noter que la vision particulaire naïve consistant à assimiler les photons à des petites pierres impliquerait que la lumière soit plus rapide dans des matériaux ayant un indice de réfraction élevé, que l'on qualifie de
Défi 43 f matériaux *denses* (voir Figure 33). Pouvez-vous le confirmer? Cependant, les expériences montrent que la lumière se déplace *lentement* dans les matériaux denses. La visualisation ondulatoire n'a aucune difficulté à expliquer cette observation. (Pouvez-vous le confir-
Défi 44 f mer?) Sur le plan historique, ceci a été l'un des arguments *contre* la théorie particulaire de la lumière. En revanche, le modèle des flèches pour la lumière, que l'on a présenté ci-dessus, est capable d'expliquer la réfraction correctement. Ce n'est pas difficile, essayez.
Défi 45 f

De même, les ondes se *réfléchissent partiellement* sur des matériaux tels que le verre. Ceci est l'une des propriétés des onde les plus difficile à expliquer à l'aide des photons. Mais c'est l'un des rares effets qui ne soit *pas* expliqué par une théorie ondulatoire clas-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

sique de la lumière. En revanche, il *est* expliqué par le modèle des flèches, comme nous allons le découvrir. La réflexion partielle confirme les deux premières règles du modèle
Page 65 des flèches, et elle montre que les photons se comportent bien de façon *aléatoire*: certains sont réfléchis et d'autre ne le sont pas, sans aucun critère de sélection. La distinction est purement statistique. Nous reviendrons sur ce problème bientôt.

Des photons aux ondes

Dans les ondes, les champs *oscillent dans le temps et dans l'espace*. Un moyen pour montrer comment il est possible que les ondes puissent être constituées de particules, est de démontrer comment construire une onde sinusoïdale en utilisant un grand nombre de photons. Une onde sinusoïdale est un état cohérent de la lumière. La façon de les
Ref. 30 construire a été expliquée en détail par Roy Glauber. En fait, pour construire une onde sinusoïdale pure, nous avons besoin de la superposition d'un faisceau comportant un photon, d'un faisceau comportant deux photons, d'un faisceau comportant trois photons, etc. Ensemble, ils donnent une onde sinusoïdale parfaite. Comme on peut s'y attendre, son nombre de photons fluctue au plus haut degré possible.

En répétant le calcul pour des faisceaux non idéaux, nous trouvons que la relation d'indétermination pour l'énergie et le temps est respectée: tout faisceau émis possédera une certaine largeur spectrale. La lumière purement monochromatique n'existe pas. De façon similaire, aucun système qui émet une onde *au hasard* ne peut produire une onde monochromatique. Toutes les expériences confirment ce résultat.

De plus, les ondes peuvent être *polarisées*. Jusqu'à maintenant, nous avons ignoré cette propriété. Dans la représentation de la lumière par des photons, la polarisation est le résultat de la superposition rigoureuse de faisceaux de photons en rotation dans le sens des aiguilles d'une montre et dans le sens contraire. En effet, nous savons que la polarisation linéaire peut être vue comme étant le résultat de la superposition de lumières polarisées circulairement des deux signes, en utilisant la phase adéquate. Ce qui semblait être une curiosité en optique classique, apparaît comme une justification fondamentale pour la théorie quantique.

Finalement, les photons sont *indistinguables*. Lorsque deux photons de même couleur se croisent, il n'y a aucun moyen, après la rencontre, de les distinguer l'un de l'autre. Le quantum d'action rend cette distinction impossible. L'indistinguabilité des photons a une conséquence intéressante. Il est impossible de dire, parmi les photons qui sont émis, lequel correspond à un photon qui vient d'arriver. Autrement dit, il n'y a pas moyen de suivre le chemin d'un photon, comme on a l'habitude de le faire en suivant la trajectoire
Page 58 d'une boule de billard. Les photons sont en effet indistinguables. De plus, l'expérience de
Ref. 31 Hanbury Brown et Twiss implique que les photons sont des bosons. Nous découvrirons
Page 126 d'autres détails concernant l'indistinguabilité spécifique des bosons un peu plus loin.

Pour résumer, nous découvrons que les ondes lumineuses *peuvent* en effet être décrites comme étant constituées de particules. Cependant, ceci n'est correct qu'à la condition que les *photons*:

— ne soient pas dénombrables avec précision (jamais avec une précision meilleure que $\sqrt{N}$),
— ne soient pas localisables (jamais avec une précision meilleure que la longueur de cohérence),

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

— n'aient pas de taille, pas de charge et pas de masse (au repos),
— aient une phase qui augmente avec ωt, c.-à-d. avec le produit de la pulsation et du temps,
— transportent un spin de valeur 1,
— soient des bosons indistinguables (à l'intérieur d'un volume de cohérence) lorsqu'ils ont la même fréquence,
— puissent prendre n'importe quel chemin sans restriction (tant que les conditions aux limites le permettent),
— n'aient pas d'origine discernable, et
— aient une probabilité de détection donnée par le carré de la somme des amplitudes* de tous les chemins autorisés menant au point de détection.

Autrement dit, il est possible de décrire la lumière comme étant constituée de particules *seulement* si ces particules ont des propriétés spéciales, *quantiques*. Ces propriétés quantiques diffèrent de celles des particules de la vie quotidienne et permettent aux photons de se comporter comme des ondes chaque fois qu'ils sont présents en grands nombres.

La lumière peut-elle se déplacer plus vite que la lumière? – Les photons réels et les photons virtuels

Dans le vide, la lumière peut se déplacer plus vide que c, et également plus lentement que c. Le principe quantique nous fournit les détails. Tant que ce principe est respecté, la vitesse d'un petit flash de lumière peut être différente (bien que ce soit seulement d'une quantité minuscule) de la valeur «officielle». Pouvez-vous estimer la différence permise pour l'heure d'arrivée d'un flash lumineux venant de la nuit des temps?

Défi 46 pe

La description des photons à l'aide des flèches produit le même résultat. Si on prend en compte la possibilité folle que les photons puissent se déplacer avec n'importe quelle vitesse, on trouvera que toutes les vitesses très différentes de c s'annulent. La seule variation qui reste, traduite en termes de distance, est l'indétermination d'environ une longueur d'onde dans la direction longitudinale, que nous avons mentionnée plus haut.

Défi 47 pe

En bref, la lumière (les photons réels) peut en effet se déplacer plus vite que la lumière, mais seulement d'une quantité autorisée par le quantum d'action. Pour les situations de la vie quotidienne, c.-à-d. pour des grandes valeurs de l'action, tous les effets quantiques sont moyennés, y compris des vitesses de lumière et de photons différentes de c.

Il n'y a pas que la position d'un photon individuel qui puisse être indéfinie, il y a aussi son énergie. Par exemple, certains matériaux divisent les photons d'énergie $\hbar\omega$ en deux photons dont les deux énergies s'ajoutent pour donner l'énergie initiale. La mécanique quantique implique que le partitionnement de l'énergie n'est connu que lorsque l'énergie d'un des deux photons est mesurée. Ce n'est qu'à cet instant-là que l'énergie du second photon est connue. Avant la mesure, les deux photons ont des énergies indéfinies. Le processus d'établissement de l'énergie se produit *instantanément*, même si le second photon se trouve à une grande distance. Nous expliquerons plus loin les origines de cet effet ainsi que celles d'autres effets étranges similaires, *semblant* être plus rapides que la lumière. En fait, en dépit des apparences, ces observations ne font *pas* intervenir des transmissions d'énergie ou d'information plus rapides que la lumière.

Ref. 32

Page 173

Défi 48 e

* Cependant, l'amplitude d'un champ de photons ne peut et ne doit pas être identifiée à la fonction d'onde de n'importe quelle particule massique de spin 1.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Des conséquences encore plus bizarres du quantum d'action apparaissent lorsque l'on étudie les champs électriques *statiques*, tels que le champ qui entoure une sphère métallique chargée. De toute évidence, un tel champ doit aussi être composé de photons. Comment se déplacent-ils? Il se trouve que les champs électriques statiques sont composés de photons *virtuels*. Les photons virtuels sont des photons qui n'apparaissent pas comme des particules libres: ils n'apparaissent que pour un instant extrêmement court avant de disparaître à nouveau. Dans le cas d'un champ électrique statique, ils sont polarisés *longitudinalement*, et n'emportent pas d'énergie avec eux. Les photons virtuels, comme les autres particules virtuelles, sont des «ombres» de particules qui obéissent à

$$\Delta x \Delta p \leqslant \hbar/2 \,. \tag{14}$$

Plutôt que de satisfaire la relation d'indétermination habituelle, ils obéissent à la relation contraire, qui exprime leur très brève apparition. Malgré leur durée de vie intrinsèque très courte, et malgré l'impossibilité de les détecter directement, les particules virtuelles ont des effets importants. Nous les explorerons en détails très bientôt.

Page 219

En fait, le potentiel vecteur A autorise *quatre* polarisations, correspondant aux quatre coordonnées (t, x, y, z). Il se trouve que dans le cas des photons dont tout le monde parle couramment (les photons libres ou *réels*) les polarisations le long des directions t et z s'annulent, de sorte que l'on observe uniquement les polarisations le long de x et de y lors des expériences réelles.

Pour les photons liés (ou *virtuels*), la situation est différente. Les quatre polarisations sont possibles. En effet, les polarisations des photons virtuels le long de z et de t (qui n'apparaissent pas dans le cas des photons réels, c.-à-d. les photons libres) sont celles dont on peut dire qu'elles sont les briques permettant de construire les champs électriques et magnétiques *statiques*.

Autrement dit, les champs électriques et magnétiques statiques sont des écoulements continus de photons virtuels. Au contraire des photons réels, les photons virtuels peuvent avoir une masse, peuvent avoir des directions de spin qui ne pointe pas dans la direction de leur déplacement, et peuvent avoir des quantités de mouvement opposées à leur direction de déplacement. L'échange de photons virtuels conduit à l'*attraction* des corps ayant une charge électrique différente. En fait, les photons virtuels apparaissent *nécessairement* dans toute description des interactions électromagnétiques. Plus loin, nous discuterons de leurs effets plus en détails, y compris la fameuse attraction des corps neutres.

Vol. V, page 122

Nous avons déjà vu précédemment que les photons virtuels, par exemples ceux dont on a besoin pour décrire les collisions de charges, doivent être capable de se déplacer avec des vitesses supérieures à celle de la lumière. Cette description est nécessaire pour pouvoir garantir que la vitesse de la lumière reste une limite dans toutes les expériences.

Vol. II, page 72

Pour résumer, il peut être intéressant de noter que les photons virtuels, contrairement aux photons réels, ne sont pas limités par la vitesse de la lumière. Mais il est également équitable de dire que les photons virtuels se déplacent plus vite que la lumière uniquement dans un sens *formel*.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

L'INDÉTERMINATION DES CHAMPS ÉLECTRIQUES

Nous avons vu que le quantum d'action impliquait une indétermination pour l'intensité lumineuse. Puisque la lumière est une onde électromagnétique, cette indétermination implique des limites similaires et distinctes pour les champs électriques et magnétiques en un point donné de l'espace. Cette conclusion fut établie pour la première fois en 1933 par Bohr et Rosenfeld. Ils commencèrent par les effets des champs sur une particule test de masse m et de charge q. Ces effets sont décrits par

Ref. 33

$$m\boldsymbol{a} = q\,(\boldsymbol{E} + \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{b})\ . \tag{15}$$

Puisqu'il est impossible de mesurer à la fois la quantité de mouvement et la position d'une particule, ils en ont déduit une indétermination pour le champ électrique donnée par

Défi 49 pe

$$\Delta E = \frac{\hbar}{q\,\Delta x\,t}\ , \tag{16}$$

où t est l'instant de la mesure et Δx est l'indétermination sur la position. Donc, chaque valeur d'un champ électrique, et de façon similaire d'un champ magnétique, possède une indétermination. À cet égard, l'état du champ électromagnétique se comporte comme l'état de la matière: tous les deux suivent une relation d'indétermination.

COMMENT L'ÉCHANGE DE PHOTONS VIRTUELS PEUT-IL CONDUIRE À UNE ATTRACTION?

Un échange de photons réels conduit toujours à du recul. Mais l'échange de photons *virtuels* peut conduire soit à une attraction, soit à une répulsion, selon les signes des deux charges considérées. Ceci vaut la peine d'y jeter un coup d'œil.

Nous commençons avec deux charges localisées et de même signe, se trouvant toutes les deux sur l'axe des x, et nous voulons déterminer la quantité de mouvement transférée depuis la charge se trouvant à droite vers la charge se trouvant à gauche, au moyen d'un photon virtuel.

En ce qui concerne le photon virtuel, la partie importante de son état *dans l'espace des quantités de mouvement* est sa partie imaginaire, qui, *si le photon virtuel est émis par une charge négative*, a un pic positif (en forme de fonction delta – encore appelée «distribution de Dirac» [N.d.T.]) pour la valeur négative de sa quantité de mouvement et un pic négatif pour la valeur positive de sa quantité de mouvement.

Lorsque le photon virtuel percute l'autre particule chargée, celle de gauche, il peut la pousser soit vers la gauche, soit vers la droite. L'amplitude de probabilité pour chaque processus est donnée par la charge de la particule, multipliée par la valeur de la quantité de mouvement du photon, multipliée par i, multipliée par le temps. Les deux amplitudes doivent être ajoutées.

Dans le cas où la seconde particule a la même charge que la première, l'effet de l'absorption du photon virtuel dans l'espace des quantités de mouvement est d'ajouter une fonction d'onde, qui était initialement antisymétrique et à valeurs positives sur l'axe positif, et qui est alors décalée vers la gauche, à une seconde fonction d'onde, qui était initialement l'opposée de la première, mais qui est alors décalée vers la droite. Le résultat

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

de ce processus d'absorption d'un photon est une fonction dans l'espace des quantités de mouvement à valeurs réelles et antisymétrique, avec des valeurs positives pour les quantités de mouvement négatives et des valeurs négatives pour les quantités de mouvement positives.

Pour comprendre la répulsion, nous devons ajouter la fonction d'onde de ce processus (correspondant à un photon) à la fonction de la seconde particule (correspondant à zéro photon et donc inchangée), et ensuite élever la somme au carré. Cette fonction inchangée était positive dans le cas de charges identiques. Le processus d'élévation au carré de la somme conduit à une distribution de probabilité dans l'espace des quantités de mouvement dont le maximum se trouve à une valeur négative de la quantité de mouvement. Donc, la seconde particule a été *repoussée* de la première.

Si les charges avaient été de signes différents, le maximum de la somme se serait trouvé à une valeur positive de la quantité de mouvement, et la seconde particule aurait été *attirée* vers la première. En bref, le choix entre l'attraction et la répulsion est déterminé par l'interférence entre la fonction d'onde de l'absorption à un photon (plus précisément, de l'absorption à nombre impair de photons) et la fonction d'onde de l'absorption à zéro photon (plus précisément, de l'absorption à nombre pair de photons).

Deux photons peuvent-ils interférer?

Page 66 En 1930, Paul Dirac prononça l'affirmation célèbre déjà mentionnée plus tôt:

> ▷ Chaque photon n'interfère qu'avec lui-même. Des interférences ne se produisent jamais entre deux photons différents

Ref. 29

Cette affirmation est souvent mal interprétée en laissant entendre que la lumière provenant de deux *sources* de photons séparées ne peut pas interférer. Malheureusement, Ref. 34 cette fausse interprétation s'est répandue sur une partie de la littérature. N'importe qui peut vérifier que cette affirmation est incorrecte à l'aide d'un poste radio: des signaux en provenance de deux stations radio distantes et émettant à la même fréquence produisent des variations périodiques d'amplitude, c.-à-d. des *interférences d'ondes*. (Ceci ne doit pas être confondu avec le phénomène plus commun d'*interférences radio*, qui, en général, sont simplement des superpositions d'intensités.) Les émetteurs radio sont des sources cohérentes de photons, et n'importe quel récepteur radio démontre que les signaux de deux sources différentes peuvent très bien interférer.

En 1949, l'interférence entre des champs émis par deux sources de photons différentes a été également démontrée avec des faisceaux de *micro-ondes*. Depuis les années 1950, de nombreuses expériences utilisant deux lasers, et même deux sources de lumière ther- Ref. 35 mique, ont produit des interférences lumineuses. Par exemple, en 1963, Magyar et Mandel ont utilisé deux lasers à rubis émettant des impulsions lumineuses et un appareil photo à obturateur rapide pour produire des franges d'interférence spatiales.

Cependant, tous ces résultats expérimentaux, faisant interférer deux sources, ne contredisent pas l'affirmation de Dirac. En effet, deux photons ne peuvent pas interférer pour plusieurs raisons.

— Les interférences résultent de la propagation d'ondes dans l'espace-temps. Les pho-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

tons n'apparaissent que si la représentation en impulsion-énergie est utilisée, ce qui est principalement le cas lorsqu'il se produit des interactions avec la matière. La description de la propagation dans l'espace-temps et la représentation particulaire sont mutuellement exclusives (ce qui est un des aspects du principe de complémentarité). Pourquoi Dirac semble-t-il mélanger les deux dans son affirmation? Dirac emploie le terme «photon» dans un sens très général, comme étant un état quantifié du champ électromagnétique. Lorsque deux faisceaux cohérents se superposent, les entités quantifiées (les photons) ne peuvent pas être attribués à l'une ou l'autre des sources. Les interférences résultent de la superposition de deux états cohérents, et non pas de deux particules.

— Une interférence n'est possible que lorsque l'on *ne peut pas savoir* d'où provient le photon détecté. Dans une situation produisant des interférences, la description du champ par la mécanique quantique ne permet jamais d'attribuer les photons du champ superposé à l'une ou l'autre des sources. Autrement dit, s'il est possible de dire de quelle source provient un photon détecté, on *ne peut pas* observer d'interférence.

— Une interférence entre deux faisceaux cohérents nécessite une phase corrélée (fixe) entre les deux, c.-à-d. un nombre de particules indéterminé. Autrement dit, une interférence est possible si, et seulement si, le nombre de photons pour chacun des deux faisceaux est inconnu. Et le nombre de photons d'un faisceau est inconnu lorsque l'indétermination sur le nombre est du même ordre de grandeur que le nombre moyen.

L'affirmation de Dirac dépend donc de la définition du terme «photon». Une meilleure façon de l'exprimer serait de dire qu'une interférence se produit toujours entre deux histoires (indistingables) de l'état, mais jamais entre deux particules quantiques. Où encore, comme exprimé ci-dessus:

▷ Un photon n'interfère qu'à l'intérieur de son volume de cohérence, c.-à-d. au sein de sa propre cellule de l'espace des phases. En dehors, il n'y a pas d'interférence. Et à l'intérieur de ce volume (cette cellule) il est impossible de distinguer les photons, les états ou les histoires des états.

Le concept de «photon» reste profond, même aujourd'hui. La modélisation de la cohérence et de la lumière par des particules quantiques est restée fascinante jusqu'à ce jour. Pour résumer, on peut dire que *deux faisceaux électromagnétiques différents peuvent interférer, alors que deux photons différents ne le peuvent pas.*

Curiosités et défis amusants concernant les photons

Est-il possible d'expliquer la réfraction à l'aide des photons? Newton n'avait pas été capable de le faire, mais aujourd'hui, on le peut. Lors d'une réfraction par une surface horizontale, tel que le montre la Figure 34, la situation est invariante par translation le long de la direction horizontale. Donc, la composante de la quantité de mouvement le long de cette direction se conserve: $p_1 \sin\alpha_1 = p_2 \sin\alpha_2$. L'énergie du photon $E = E_1 = E_2$ est bien évidemment conservée. L'indice de réfraction n est défini en termes de quantité

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

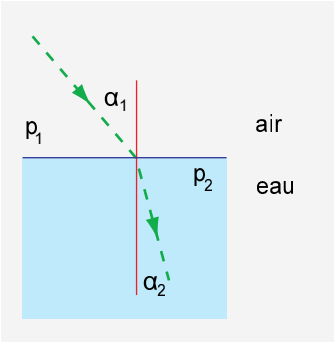


FIGURE 34 La réfraction et les photons.

de mouvement et d'énergie comme étant

$$n = \frac{cp}{E} \,. \tag{17}$$

Défi 50 f La «loi» de la réfraction s'en suit:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = n \,. \tag{18}$$

Cette relation est connue depuis le Moyen Âge.

Il y a un problème important dans ce que l'on vient de dire. Dans un matériau, la vitesse d'un photon $v = \delta E/\delta p$ au sein d'un rayon lumineux *diffère* de la vitesse de phase $u = E/p$ qui intervient dans le calcul. Pour résumer, à l'intérieur de la matière, le concept de photon doit être utilisé avec beaucoup de précaution.

* *

Si une onde électromagnétique possède une amplitude A, la densité de photons d est

$$d = \frac{A^2}{\hbar\omega} \,. \tag{19}$$

Défi 51 pe Pouvez-vous le démontrer?

* *

Montrez que pour une impulsion laser dans le vide, le volume de cohérence augmente au cours de la propagation, alors que le volume occupé dans l'espace des phases reste
Défi 52 f constant. Son entropie est constante, puisque son chemin est réversible.

* *

Un effet typique des «lois» quantiques est la couleur jaune des lampes utilisées dans la plupart des villes pour éclairer les rues. Elles émettent de la lumière jaune pure ayant une fréquence (presque) unique. C'est pour cela qu'aucune autre couleur ne peut être

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net



FIGURE 35 Les nuances de bleu dans le ciel et les couleurs des nuages sont dues à différents degrés de diffusion de Rayleigh, de diffusion de Mie et de diffusion Tyndall. (© Giorgio di Iorio)

distinguée sous leur éclairage. D'après l'électrodynamique classique, des harmoniques de cette fréquence lumineuse devraient également être émises. Pourtant, les expériences montrent qu'il n'en est rien et que l'électrodynamique classique est fausse. Cet argument est-il correct? Défi 53 e

* *

Comment pourriez-vous vérifier si une bombe, que l'on pourrait amorcer avec un seul photon, est fonctionnelle sans la faire exploser? Ce casse-tête célèbre, posé par Avshalom Elitzur et Lev Vaidman, nécessite des interférences pour sa résolution. Pouvez-vous trouver un moyen? Défi 54 pe

* *

Qu'arrive-t-il aux photons qui percutent un objet mais qui ne sont ni absorbés ni transmis? D'une façon générale, ils sont diffusés. La *diffusion* est le nom de n'importe quel processus qui change le mouvement de la lumière (ou celui de n'importe quelle autre onde). Les détails du processus de diffusion dépendent de l'objet. Certains processus de diffusion changent seulement la direction du mouvement; d'autres changent aussi la fréquence. Le Tableau 3 donne une vue d'ensemble des processus qui diffusent la lumière. Toutes les propriétés de la diffusion dépendent du matériau qui produit la déflexion de la lumière. L'étude des processus de diffusion explique, entre autres choses, de nombreuses couleurs des matériaux transparents, comme nous le verrons ci-dessous. Page 194

Nous noterons que la courbure de la lumière du fait de la gravité n'est pas appelée diffusion. Pourquoi pas? Défi 55 f

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 3 Différents types de diffusion de la lumière.

Type de diffusion	Diffuseur	Détails	Exemples
Diffusion de Rayleigh	atomes, molécules	élastique, l'intensité change en $1/\lambda^4$, les diffuseurs sont plus petits que $\lambda/10$	ciel bleu, ciel rouge du soir, fumée de cigarette bleue
Diffusion de Mie	objets transparents, gouttelettes	élastique, l'intensité change en $1/\lambda^{0,5}$ à $1/\lambda^2$, les diffuseurs sont de taille comparable à λ	ciel bleu, soirées rougeoyantes, montagnes lointaines bleus
Diffusion géométrique	arêtes des objets	élastique, les diffuseurs sont plus grands que λ	encore appelée *diffraction*, utilisée lors d'interférences
Diffusion Tyndall	objets non transparents	élastique, l'angle dépend faiblement ou pas du tout de la longueur d'onde	fumée, nuages blancs, brouillard, fumée de cigarette blanche
Diffusion Smekal-Raman	atomes excités, molécules	inélastique, la lumière gagne de l'énergie	utilisée lors d'investigations de l'atmosphère à l'aide de lidars
Diffusion Raman inverse	atomes, molécules	inélastique, la lumière perd de l'énergie	utilisée en recherche des matériaux
Diffusion Thomson	électrons	élastique	utilisée pour déterminer les densités électroniques
Diffusion Compton	électrons	inélastique, les rayons X perdent de l'énergie	démontre la nature particulaire de la lumière (voir page 50)
Diffusion Brillouin	phonons acoustiques, variations de densité dans les solides/fluides	inélastique, décalage de fréquence de quelques GHz	utilisée pour étudier les phonons et pour diagnostiquer les fibres optiques
Diffusion des rayons X de Von Laue	solides cristallins	élastique, due aux interférences sur les plans cristallins	utilisée pour déterminer les structures cristallines; appelée aussi *diffraction!de Bragg*

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Un résumé sur la lumière: particule et onde

Pour résumer, la lumière est un faisceau de quanta de lumière, ou photons. Un seul photon correspond à la plus petite intensité lumineuse possible pour une couleur donnée. Les photons, comme tous les quantons, sont bien différents des particules de la vie quotidienne. En fait, il est possible de soutenir que les seuls aspects particulaires (classiques) des photons sont les quantifications de leur énergie, de leur quantité de mouvement et de leur spin. À tous les autres égards, les photons ne sont *pas* comme des petites pierres. Les photons se déplacent à la vitesse de la lumière. Les photons ne peuvent pas être localisés au sein des faisceaux lumineux. Les photons sont indistinguables. Les photons sont des bosons. Les photons n'ont pas de masse, pas de charge électrique et pas de taille. Il est plus exact de dire que *les photons sont des instruments de calcul pour décrire avec précision les observations que l'on fait sur la lumière*.

Ref. 36

Les propriétés étranges des photons sont la raison pour laquelle les premières tentatives de description de la lumière comme étant un faisceau de particules (classiques), tel que celle faite par Newton, ont échoué misérablement, et ont été ridiculisées, à juste titre, par d'autres scientifiques. En effet, Newton soutenait sa théorie contre toutes les évidences expérimentales (tout particulièrement en ce qui concernait les propriétés ondulatoires de la lumière) ce qui est quelque chose qu'un physicien ne devrait jamais faire. C'est seulement après que les gens ont accepté que la lumière puisse être une onde, et donc qu'ils ont découvert et compris que les particules quantiques étaient fondamentalement différentes des particules classiques, que la description du quanton est devenu un succès.

Le quantum d'action implique que *toutes les ondes sont des écoulements de quantons*. En fait, toutes les ondes sont des écoulements *corrélés* de quantons. Ceci est vrai pour la lumière, pour n'importe quelle autre forme de rayonnement, et pour toutes les formes d'onde de matière.

Les relations d'indétermination montrent que même un seul quanton peut être considéré comme une onde. Cependant, chaque fois qu'il interagit avec le reste du monde, il se comporte comme une particule. En fait, il est *essentiel* que toute onde soit constituée de quantons: si ce n'était pas le cas, les interactions ne seraient pas locales et les objets ne pourraient pas du tout être localisés, contrairement à l'expérience.

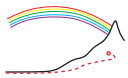
Pour décider si la description ondulatoire ou la description particulaire est la plus appropriée, on peut utiliser le critère suivant. Chaque fois que la matière et la lumière interagissent, il est plus approprié de décrire le rayonnement électromagnétique comme une onde si la longueur d'onde λ satisfait

$$\lambda \gg \frac{\hbar c}{kT} \,, \tag{20}$$

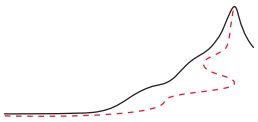
où $k = 1,4 \cdot 10^{-23}$ J/K est la constante de Boltzmann et T est la température de la particule. Si la longueur d'onde est beaucoup *plus petite* que la quantité de droite, la description particulaire est plus appropriée. Si les deux côtés sont du même ordre de grandeur, les deux descriptions jouent un rôle. Pouvez-vous expliquer le critère?

Défi 56 f

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net



Chapitre 3

Le mouvement de la matière – au-delà de la physique classique

> All great things begin as blasphemies.**
> George Bernard Shaw

L'existence d'une action minimale a de nombreuses conséquences importantes pour le mouvement de la matière. Nous commençons par quelques résultats expérimentaux qui montrent que le quantum d'action, également dans le cas de la matière, est en effet la plus petite valeur d'action qui soit mesurable. Ensuite, nous montrons que le quantum d'action implique l'existence d'une phase, et donc de propriétés ondulatoires pour la matière. Finalement, à partir du quantum d'action, nous déduisons la même description pour la matière que celles que nous avons déjà trouvée pour la lumière: les particules de matière se comportent comme des flèches tournantes.

Les verres de vin, les crayons et les atomes – pas de repos

> Otium cum dignitate.***
> Cicéron, *De oratore*.

Si le quantum d'action est le plus petit changement observable dans un système physique, alors deux observations d'un même système doivent toujours être différentes. Il ne peut donc pas y avoir de repos parfait dans la nature. Est-ce vrai? Les expériences montrent que c'est en effet le cas.

Une conséquence simple du manque de repos parfait est l'impossibilité de remplir entièrement un verre de vin. Si on dit qu'un verre est «plein» lorsqu'il est à sa capacité maximale (en tenant compte des effets de tension surfacique pour rendre le raisonnement précis), on voit immédiatement que la situation nécessite que la surface du liquide soit complètement au repos. Ceci ne s'observe jamais. En effet, une surface complètement calme permettrait à deux observations successives d'avoir une différence de moins de $\hbar$. On pourrait essayer de réduire tous les mouvements en diminuant la température du système. Pour obtenir le repos absolu, il faudrait atteindre la température du zéro absolu. Les expériences montrent que ceci est impossible. (En effet, cette impossibilité, qui n'est autre que la *troisième loi de la thermodynamique*, est équivalente à l'existence d'une action minimale.) Toutes les expériences le confirment: *il n'y a pas de repos dans la nature*. Autrement dit, le quantum d'action démontre la vieille vérité qu'un verre de

** «Toutes les grandes choses commencent comme des blasphèmes.»
*** «Reposez-vous avec dignité.»

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

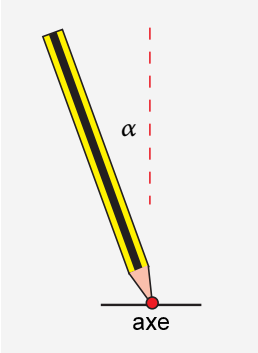


FIGURE 36 Un crayon en train de tomber.

vin est toujours partiellement vide *et* partiellement plein.

L'absence de repos microscopique, prédite par le quantum d'action, est confirmée par de nombreuses expériences. Par exemple, un crayon reposant sur sa pointe *ne peut pas* rester vertical, comme le montre la Figure 36, même si on l'isole de toutes perturbations, telles que les vibrations, les molécules d'air et l'agitation thermique. Cette conclusion (très académique on en conviendra) découle de la relation d'indétermination. En fait, il est même possible de calculer la période de temps au-delà de laquelle le crayon *doit* être tombé. Mais en pratique, les crayons tombent bien plus tôt, parce que dans les conditions habituelles, les perturbations extérieures sont beaucoup plus importantes que les effets du quantum d'action.

Défi 57 d

Mais la conséquence la plus importante de l'absence de repos est toute autre. L'absence de repos pour les électrons au sein des atomes les empêche de tomber sur les noyaux, malgré leur attraction mutuelle. Autrement dit, l'existence et la taille des atomes, et donc de toute matière, est une conséquence directe de l'absence de repos microscopique! Nous explorerons cette conséquence plus en détail ci-dessous. Puisque nous somme constitués d'atomes, nous pouvons dire que nous existons et nous vivons uniquement à cause du quantum d'action.

Page 89

Pas de précision infinie pour les mesures

Non seulement le quantum d'action empêche l'existence du repos, mais le quantum d'action empêche également d'observer ou de mesurer le repos. Pour pouvoir vérifier si un objet est au repos, nous devons observer sa position avec une grande précision. À cause des propriétés ondulatoires de la lumière, il nous faut un photon de haute énergie: seul un photon d'énergie élevée a une longueur d'onde courte et permet donc une mesure précise de la position. Cependant, en raison de cette énergie élevée, l'objet est perturbé. Pire, la perturbation elle-même n'est pas mesurable avec précision. Il n'est donc pas possible de déterminer la position initiale, même en prenant en compte la perturbation. En bref, il n'est pas possible d'observer de repos parfait (même s'il existait).

En effet, toutes les expériences au cours desquelles des systèmes ont été observés avec la plus grande précision confirment que le repos parfait n'existe pas. L'absence de repos a été confirmée pour les électrons, les neutrons, les protons, les ions, les atomes, les molécules, les condensats atomiques et les cristaux. L'absence de repos a même été confirmée

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

pour des objets ayant une masse d'environ une tonne, tels que ceux que l'on utilise dans certains détecteurs d'ondes gravitationnelles. Aucun objet n'est jamais au repos.

Le même argument concernant les limitations sur les mesures montre également qu'aucune mesure, de n'importe quelle observable, ne pourra jamais être réalisée avec une précision infinie. Ceci est une autre des conséquences de grande portée du quantum d'action.

Les gaz froids

Le quantum d'action implique que le repos est impossible dans la nature. En fait, même aux températures extrêmement basses, toutes les particules dans la matière sont en mouvement. On dit que ce manque de repos fondamental est dû à ce que l'on appelle les *fluctuations du point zéro*. Un bon exemple est fourni par les mesures récentes des condensats de Bose-Einstein. Ce sont des gaz piégés, avec un petit nombre d'atomes (entre dix et quelques millions), refroidis à des températures extrêmement basses (environ 1 nK). Les pièges permettent de maintenir les atomes suspendus au milieu du vide. Ces gaz froids et piégés peuvent être observés avec beaucoup de précision. En utilisant des techniques expérimentales élaborées, des condensats de Bose-Einstein peuvent être placés dans des états pour lesquels $\Delta p \Delta x$ est presque exactement égal à $\hbar/2$ (bien que jamais en dessous de cette valeur). Ces expériences confirment directement qu'il n'y a pas de repos observable, mais un *flou* fondamental dans la nature. Et le flou est décrit par le quantum d'action.

Ceci nous conduit à un casse-tête intéressant. Dans un objet normal, la distance entre les atomes est beaucoup plus grande que leur longueur d'onde de de Broglie. (Pouvez-
Défi 58 e vous le confirmer?) Mais aujourd'hui, il est possible de refroidir des objets à des tem-
Ref. 37 pératures extrêmement basses. Aux températures suffisamment bases (moins de 1 nK) la longueur d'onde des atomes peut être plus grande que leur séparation. Pouvez-vous
Défi 59 e imaginer ce qui se passe dans de telles situations?

Les écoulements et la quantification de la matière

> « Die Bewegung ist die Daseinsform der Materie. »
> Friedrich Engels, *Anti-Dühring*.*

Non seulement le quantum d'action rend le repos impossible, mais il rend également impossible toute situation qui ne change pas au cours du temps. L'exemple le plus important de situations (apparemment) stationnaires est celui des *écoulements*. Le quantum d'action implique qu'*aucun* écoulement ne peut être stationnaire. Plus précisément, une action minimale implique qu'aucun écoulement ne peut être continu. *Tous les écoulements fluctuent*. Dans la nature, tous les écoulements sont constitués d'entités minimales; tous les écoulements sont constitués de particules quantiques. Nous avons vu ci-dessus que ceci était valable pour la lumière, mais cela s'applique également aux écoulements de matière. Deux types d'écoulements simples de notre expérience quotidienne confirment directement cette conséquence du quantum d'action: les écoulements de fluides et les écoulements d'électricité.

Ref. 12 * «Le mouvement est la façon d'être de la matière.»

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Les écoulements de fluides et les quantons

L'écoulement de la matière exhibe également des unités minimales. Nous avons mentionné plus tôt dans notre aventure qu'une des conséquences de la structure particulaire des liquides était que l'huile, ou tout autre liquide continu, produisait du *bruit* même lorsqu'elle s'écoulait dans les tuyaux les plus lisses. Nous avons mentionné que le bruit que nous entendons dans nos oreilles dans des situations de silence absolu (par exemple, dans un paysage de montagne enneigé et sans vent ou dans une chambre anéchoïque) était en partie dû à la granularité de l'écoulement du sang dans nos veines. Toutes les expériences confirment que tous les écoulements de matière produisent des vibrations. C'est une conséquence du quantum d'action, et de la granularité de la matière qui en résulte. En fait, il est possible de déterminer le quantum d'action à partir de mesures de bruit dans les fluides.

Vol. I, page 391

Frapper sur les tables et la quantification de la conductivité

Si le courant électrique était un écoulement continu, il serait possible d'observer des valeurs d'actions aussi petites que désirées. Le contre-exemple le plus simple a été découvert en 1996, par José Costa-Krämer et ses collègues. Ils ont mis deux fils métalliques l'un sur l'autre sur une table de cuisine et y ont attaché une pile électrique, un convertisseur de courant en tension (ou plus simplement une résistance) et un oscilloscope à mémoire. Ensuite, ils ont mesuré le courant électrique alors qu'ils *frappaient* sur la table. C'est tout.

Ref. 38, Ref. 39

Un coup frappé sur la table rompt le contact entre les deux fils. Durant la dernière milliseconde avant que les fils ne se séparent, la conductivité (et donc le courant électrique) diminue par échelons réguliers d'environ 7 µA, comme on peut le voir facilement sur l'oscilloscope. La Figure 37 montre un tel résultat de mesure. Cette expérience simple aurait pu détrôner, si elle avait été réalisée quelques années plus tôt, un certain nombre d'autres expériences énormément onéreuses. Ces dernières ont découvert la même quantification au prix de plusieurs millions d'euros chacune, en utilisant des montages expérimentaux complexes à des températures extrêmement basses.

En fait, la quantification de la conductivité apparaît dans n'importe quel contact électrique ayant une petite section transversale. Dans de telles situations, le quantum d'action implique que la conductivité ne peut être qu'un multiple de $2e^2/\hbar \approx (12\,906\,\Omega)^{-1}$. Pouvez-vous confirmer ce résultat? Notez que la conductivité électrique peut être aussi petite que nécessaire; seule la conductivité électrique quantifiée a une valeur minimale de $2e^2/\hbar$.

Défi 60 f

De nombreuses autres expériences élaborées confirment l'observation d'échelons de conductance. Elles nous obligent à conclure qu'il y a une *charge électrique minimale* dans la nature. Cette charge minimale a la même valeur que la charge d'un électron. En effet, il se trouve que les électrons sont des constituants de tous les atomes, au sein d'une construction que nous allons expliquer bientôt. Dans les métaux, un grand nombre d'électrons peuvent se déplacer librement, ce qui explique pourquoi les métaux conduisent si bien l'électricité et qu'ils se comporte comme des miroirs.

En bref, la matière et l'électricité s'écoulent en unités minimales. Suivant le matériau qui s'écoule, les unités d'écoulement minimales peuvent être des «molécules», des «atomes», des «ions» ou des «électrons». Toutes sont des particules *quantiques* (des *quan-*

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

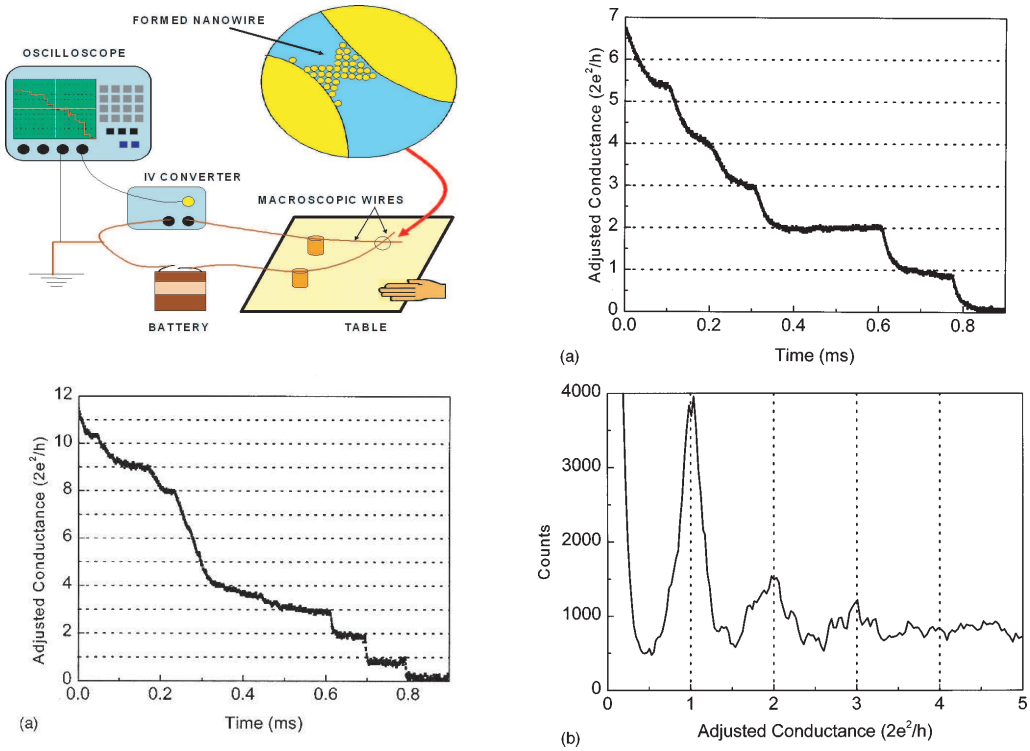


FIGURE 37 Échelons lors de l'écoulement de l'électricité dans des fils métalliques qui se croisent: le montage expérimental, les nanofils à la base de l'effet, et trois résultats de mesures. (© José Costa-Krämer, AAPT de Ref. 39)

tons). En bref, le quantum d'action implique que la matière est constituée de quantons. Les quantons de matière partagent certaines propriétés avec les pierres ordinaires, mais ils en diffèrent également de nombreuses façons. Une pierre a une position et une quantité de mouvement, une masse et une accélération, une taille, une forme, une structure, une orientation et un moment cinétique, ainsi qu'une couleur. Nous allons maintenant explorer chacune de ces propriétés dans le cas des quantons, et voir comment elles sont liées au quantum d'action.

Les quantons de matière et leur mouvement – les ondes de matière

Ref. 40 En 1923 et 1924, le physicien influent Louis de Broglie réfléchissait aux conséquences du quantum d'action pour les particules de matière. Il savait que dans le cas de la lumière, le quantum d'action faisait le lien entre le comportement ondulatoire et le comportement particulaire. Son raisonnement était que la même chose devait s'appliquer à la matière. Il comprit que les courants de particules matérielles ayant toutes la même quantité de mouvement, devaient se comporter comme des ondes, tout comme le faisaient les courants de quanta de lumière. Il prédit donc que, comme pour la lumière, les écoulements de matière cohérente devaient avoir une longueur d'onde λ et une pulsation ω données

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

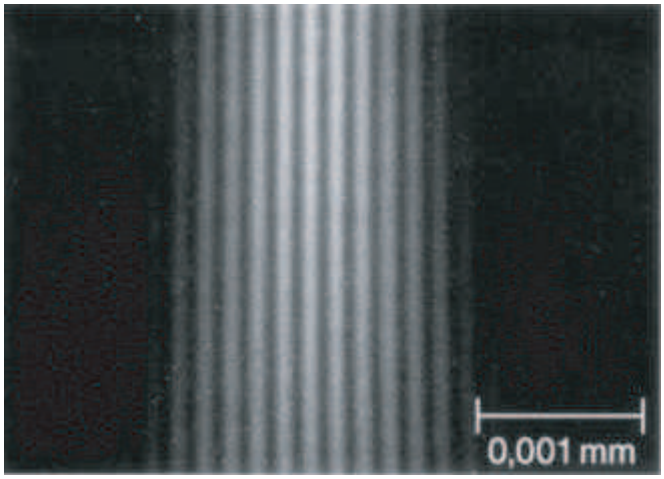


FIGURE 38 Des faisceaux d'électrons diffractent et interfèrent sur plusieurs fentes. (© Claus Jönsson)

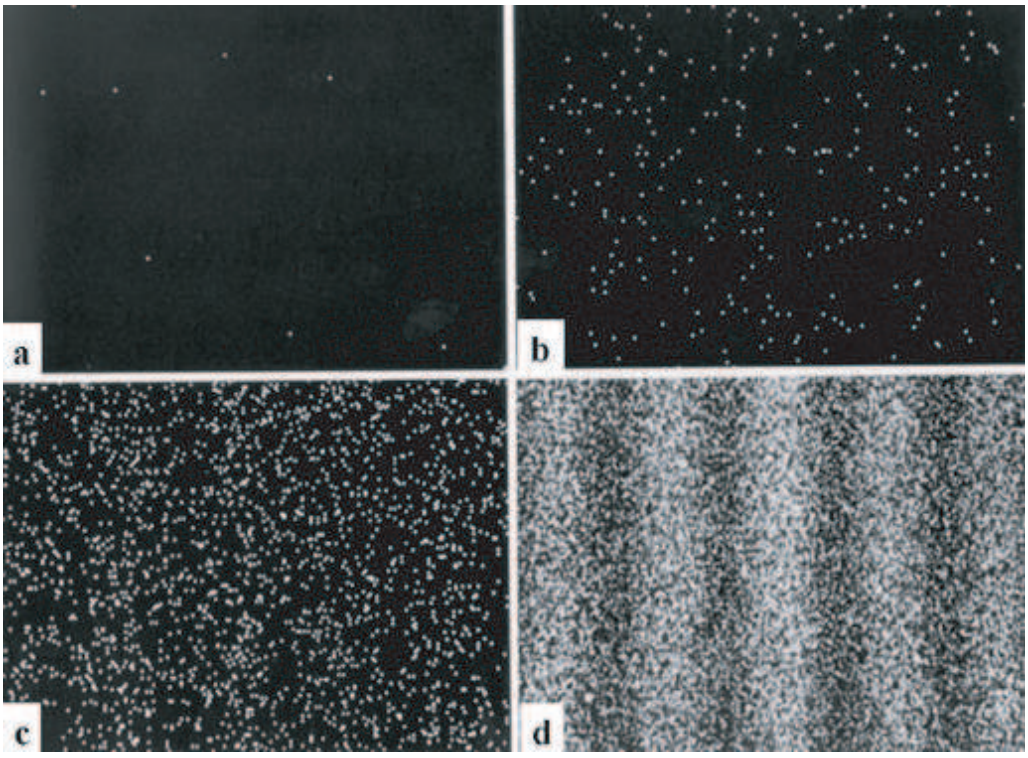


FIGURE 39 Formation au cours du temps d'une figure d'interférence par des électrons, dans le cas d'une expérience des deux fentes à basse intensité: (a) 8 électrons, (b) 270 électrons, (c) 2000 électrons, (d) 6000 électrons, après une exposition de 20 minutes. La dernière image correspond à la situation de la figure précédente. (© Tonomura Akira/Hitachi)

par

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{p} \quad \text{et} \quad \omega = \frac{E}{\hbar}\,, \tag{21}$$

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

où p et E sont respectivement la quantité de mouvement et l'énergie des particules individuelles. De façon équivalente, on peut écrire les relations sous la forme

$$\boldsymbol{p} = \hbar \boldsymbol{k} \quad \text{et} \quad E = \hbar\omega \,. \tag{22}$$

Toutes ces relations établissent que les quantons de matière se comportent, eux aussi, comme des ondes. En ce qui concerne les objets de la vie quotidienne, la longueur d'onde prédite est bien trop petite pour être mesurable (bien que ce ne soit pas le cas pour les particules microscopiques).

Peu de temps après la prédiction de de Broglie, des expériences commencèrent à la confirmer. On observait des courants de matière qui diffractaient, qui se réfractaient et qui produisaient des interférences, et toutes les observations correspondaient aux valeurs prédites par de Broglie. À cause des petites longueurs d'onde des quantons, des expériences minutieuses sont nécessaires pour détecter ces effets. Mais l'une après l'autre, toutes les confirmations expérimentales des propriétés ondulatoires de la lumière ont été reproduites pour des faisceaux de matière. Par exemple, tout comme la lumière est diffractée lorsqu'elle passe près de l'arête d'un objet ou à travers une fente, la matière est également diffractée dans ces situations. Ceci est vrai même pour les électrons, les plus simples des particules de matière de la vie quotidienne, comme le montre la Figure 38. En fait, l'expérience avec les électrons est assez difficile. Elle fut réalisée pour la première fois par Claus Jönsson à Tübingen en 1961. En 2002 elle a été désignée comme étant la plus belle expérience de toute la physique. De nombreuses années après Jönsson, l'expérience a été reproduite avec un microscope électronique modifié, comme le montre la Figure 39.

Ref. 41

Inspirés par les interféromètres pour la lumière, des chercheurs commencèrent à construire des interféromètres *à onde de matière*. Ces derniers ont été utilisés dans de nombreuses expériences de toute beauté, comme on va le découvrir. Aujourd'hui, les interféromètres à onde de matière fonctionnent avec des faisceaux d'électrons, de nucléons, de noyaux, d'atomes et même de grosses molécules. De la même façon que les observations d'interférences lumineuses démontrent le caractère ondulatoire de la lumière, les figures d'interférence que l'on observe avec des faisceaux de matière démontrent le caractère ondulatoire de la matière. Elles confirment également la valeur de $\hbar$.

Vol. V, page 142

Ref. 42

Vol. III, page 101

Comme la lumière, la matière est constituée de particules. Comme la lumière, la matière se comporte comme une onde lorsqu'elle concerne un grand nombre de particules ayant toutes la même quantité de mouvement. Mais bien que les faisceaux de grosses molécules se comportent comme des ondes, ce n'est pas le cas pour les objets de la vie quotidienne, tels que des voitures sur l'autoroute. Il y a plusieurs raisons à cela. Premièrement, pour les voitures sur l'autoroutes la longueur d'onde pertinente est extrêmement petite. Deuxièmement, la vitesse des voitures varie trop. Troisièmement, il est possible de compter les voitures. En résumé, il n'est pas possible de produire des faisceaux cohérent avec des voitures ayant toutes la même vitesse.

Si la matière se comporte comme une onde, nous pouvons en tirer une conclusion étrange. Pour n'importe quelle onde, la position et la longueur d'onde ne peuvent pas être toutes les deux définies avec précision en même temps: les indéterminations du

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

nombre d'onde $k = 2\pi/\lambda$ et de la position X obéissent à la relation

$$\Delta k \Delta X \geq \frac{1}{2} \,. \tag{23}$$

De façon similaire, pour toute onde, la pulsation $\omega = 2\pi f$ et l'instant T de son pic d'amplitude ne peuvent pas être tous les deux définis avec précision. Leurs indéterminations sont liées par

$$\Delta\omega \Delta T \geq \frac{1}{2} \,. \tag{24}$$

En utilisant les propriétés des ondes de de Broglie de la matière (22), nous obtenons

$$\Delta p \Delta X \geqslant \frac{\hbar}{2} \qquad \text{et} \qquad \Delta E \Delta T \geqslant \frac{\hbar}{2} \,. \tag{25}$$

Ces relations célèbres s'appellent les *relations d'indétermination d'Heisenberg*. Elles ont été découvertes par Werner Heisenberg en 1925. Elles sont valides pour toutes les particules quantiques, qu'elles soient matérielles ou de rayonnement. Les relations d'indétermination établissent qu'il n'y a aucun moyen d'attribuer simultanément à un système quantique une quantité de mouvement précise et une position précise, ni de lui attribuer simultanément une énergie précise et un âge précis. Plus une des grandeurs est connue avec précision, moins l'autre l'est.* Par conséquent, les quantons de matière (un peu comme les pierres) peuvent *toujours* être localisés, mais uniquement de manière approximative. D'autre part, nous avons vu que bien souvent, les photons ne pouvaient pas être localisés.

Les deux relations d'indétermination ont été vérifiées expérimentalement dans leurs moindres détails. Toutes les expériences les confirment. En fait, toute expérience qui démontre que la matière se comporte comme une onde est une confirmation de la relation d'indétermination, et vice versa.

Lorsque deux variables sont liées par des relations d'indétermination, on dit qu'elles sont *complémentaires* l'une de l'autre. Niels Bohr explora systématiquement toutes les
Défi 61 e paires possibles. Vous pouvez également le faire vous-même. Bohr était profondément fasciné par l'existence d'un principe de complémentarité, et il l'étendit plus tard à des aspects plus philosophiques. Lors d'une scène bien connue, quelqu'un lui demanda quelle était la grandeur complémentaire de la précision. Il répondit: «la clarté».

Nous remarquons que les quantons de matière habituels (*réels*) se déplacent toujours plus lentement que la lumière. Du fait du flou inhérent au mouvement quantique, il ne doit pas être surprenant d'apprendre qu'il existe des exceptions. En effet, dans certains cas extrêmement spéciaux, le quantum d'action autorise l'existence de particules qui se déplacent plus vide que la lumière (que l'on appelle des particules *virtuelles*) et que nous
Page 219 rencontrerons plus loin.

En résumé, le quantum d'action signifie que les quantons de matière ne se comportent pas comme des pierres ponctuelles, mais comme des ondes. En particulier, comme pour

* Un agent de police arrêta la voiture que conduisait Werner Heisenberg. «Savez-vous à quelle vitesse vous rouliez?» «Non, mais je sais exactement où j'étais.»

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

les ondes, les valeurs de la position et de la quantité de mouvement des quantons ne peuvent pas être toutes deux définies exactement. Les valeurs sont floues; la position et la quantité de mouvement sont indéterminées. Plus l'une des deux est connue avec précision, moins l'autre est connue avec précision.

La masse et l'accélération des quantons

Les quantons de matière, tout comme les pierres, ont une masse. En effet, il est possible de détecter les impacts de particules individuelles (électrons, atomes ou molécules) lorsque des appareils de mesure sensibles sont utilisés. Il est également possible de ralentir ou d'accélérer les quantons. Nous avons déjà exploré certaines de ces expériences dans la section sur l'électrodynamique. Cependant, les quantons sont différents des cailloux. En utilisant la relation d'indétermination entre le temps et l'énergie, vous pouvez déduire que:

Vol. III, page 30

Défi 62 e

$$a \leqslant \frac{2mc^3}{\hbar} \,. \tag{26}$$

Il y a donc une *accélération maximale* pour les quantons.* Il se trouve en effet qu'aucune particule n'a jamais été observée avec une accélération plus grande que cette valeur. En fait, aucune particule n'a jamais été observée avec une accélération même *proche* de cette valeur. Le quantum d'action empêche donc le repos, mais il limite également l'accélération.

Ref. 43

Pourquoi les atomes ne sont-ils pas plats? Pourquoi les formes existent-elles?

Le quantum d'action détermine toutes les tailles dans la nature. En particulier, il détermine toutes les *formes*. Commençons par explorer ce sujet.

Des expériences montrent que tous les quantons *composés*, tels que les atomes ou les molécules, ont des structures de taille non nulle et souvent de forme complexe. La taille et la forme de tout quanton composé sont dues au mouvement de leurs constituants. Le mouvement des constituants est dû au quantum d'action, mais comment se déplacent-ils?

En 1901, Jean Perrin (de même que Nagaoka Hantaro, indépendamment en 1904) proposa que les atomes soient de petits «systèmes solaires». En 1913, Niels Bohr repris cette idée en la combinant avec le quantum d'action. Il trouva qu'il pouvait prédire la taille et la couleur des atomes d'hydrogène, deux propriétés qui n'avaient pas encore été comprises jusque-là. Nous ferons le calcul plus loin. Même Bohr savait que personne ne saisissait complètement le sens des calculs, car ils semblaient supposer que les atomes d'hydrogène étaient plats, comme le système solaire. Mais, tout d'abord, les

Ref. 44

Ref. 45

Page 206

* On notera que cette limite de l'accélération est différente de la limite de l'accélération due à la relativité générale:

$$a \leqslant \frac{c^4}{4Gm} \,. \tag{27}$$

En particulier, la limite quantique (26) s'applique aux particules microscopiques, alors que la limite relativiste s'applique aux systèmes macroscopiques. Pouvez-vous confirmer que, dans chaque domaine, la limite pertinente est la plus petite des deux?

Défi 63 f

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

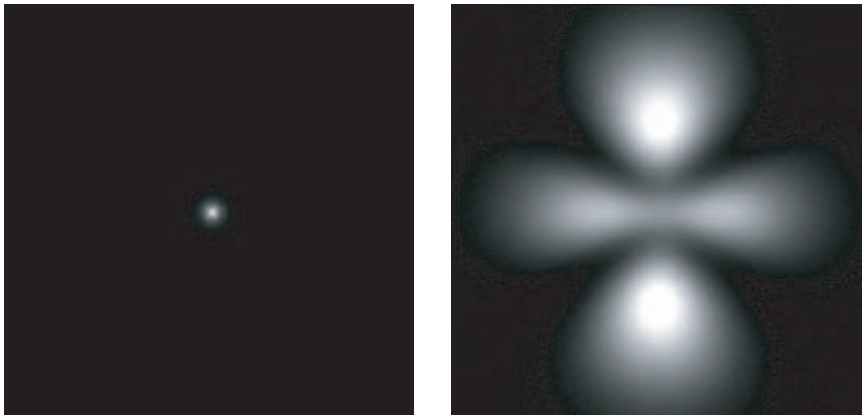


FIGURE 40 Nuages de probabilité: un atome d'hydrogène dans son état fondamental sphérique (à gauche) et dans un état excité non sphérique (à droite) tels que les verrait un observateur qui voyagerait autour. (Film QuickTime produit par le progiciel de Dean Dauger «Atom in a Box» disponible sur daugerresearch.com)

atomes que l'on observe sont sphériques. Ensuite, une forme aplatie contredirait le quantum d'action. En effet, le quantum d'action implique que le mouvement des constituants quantiques est flou. Par conséquent, tous les quantons composés, tels que les atomes ou les molécules, doivent être constitués de *nuages* de constituants.

Défi 64 f

En bref, le quantum d'action prédit que

▷ Les atomes sont des nuages sphériques.

Les expériences et la théorie confirment que la taille de n'importe quel atome est due au nuage (à la distribution de probabilité) de ses constituants les plus légers: les électrons. Le quantum d'action établit donc que les atomes ou les molécules ne sont pas des balles dures, comme Démocrite ou Dalton le croyait, mais qu'ils sont des nuages. *La matière est faite de nuages*.

Les nuages électroniques des atomes ne sont pas infiniment durs, mais peuvent, dans une certaine limite, s'interpénétrer et être déformés. La région dans laquelle cette déformation se produit s'appelle une *liaison* chimique, et les liaisons conduisent aux molécules. Les molécules, parce qu'elles sont constituées d'atomes, sont composées de nuages sphériques (déformés). Les liaisons conduisent également aux liquides, aux solides, aux fleurs et aux gens. Une exploration détaillée confirme que toutes les formes, depuis celles des molécules les plus simples jusqu'à la forme des gens, sont dues aux interactions entre les électrons et le noyau des atomes constituants. De nos jours, il est possible de calculer la forme des molécules avec une grande précision. Les petites molécules, comme celle de l'eau, ont des formes qui sont assez rigides, bien que dotés d'un certain degré d'élasticité. Les grosses molécules, telles que les polymères ou les peptides, ont des formes flexibles. Ces changements de forme sont essentiels pour les effets qu'ils ont au sein de la cellule, et donc pour notre survie. De nombreuses recherches en biophysique et en biochimie explorent les conséquences des formes des molécules.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

En résumé, le quantum d'action implique l'existence des formes, de même que leurs fluctuations. Par exemple, si une longue molécule est maintenue fixe par ses deux extrémités, elle ne peut pas rester au repos entre les deux. Il est aujourd'hui facile de réaliser de telles expériences, par exemple avec l'ADN. En fait, toutes les expériences confirment que le quantum d'action empêche le repos, produit les tailles et les formes, et permet la chimie et la vie.

Dans la nature, toutes les tailles et toutes les formes sont dues au quantum d'action. Or, tout objet macroscopique et tout objet quantique n'ayant pas une forme sphérique, est capable de tourner sur lui-même. Nous allons donc explorer ce que le quantum d'action a à dire en ce qui concerne la rotation.

La rotation, la quantification du moment cinétique et la pénurie de pôles Nord

> « Tristo è quel discepolo che non avanza il suo maestro. »
>
> Leonardo da Vinci*

Dans la vie quotidienne, la rotation est un type de mouvement fréquent. Les roues sont partout autour de nous. Il se trouve que le quantum d'action a des conséquences importantes pour le mouvement de rotation. Tout d'abord, nous notons que l'action et le moment cinétique ont la même dimension physique: tous les deux se mesurent en Js ou en Nms. Il suffit juste d'une analyse toute simple pour montrer que si la matière et le rayonnement ont une quantité de mouvement et une longueur d'onde qui sont liés par le quantum d'action, alors le moment cinétique ne prend que des valeurs multiples du quantum d'action. Ce beau raisonnement est dû à Dicke et Wittke.

Ref. 46

Imaginez une clôture circulaire, composée de N palis d'acier verticaux séparés par une distance $a = 2\pi R/N$, comme le montre la Figure 41. Au centre de la clôture, imaginez une source de matière ou de rayonnement qui puisse émettre des particules vers la clôture dans une direction quelconque que l'on peut choisir. La quantité de mouvement d'une telle particule est $p = \hbar k = 2\pi\hbar/\lambda$. Aux intervalles entre les palis de la clôture l'onde va interférer. En dehors de la clôture, la direction du mouvement de la particule est déterminée par la condition d'interférence constructives. Autrement dit, l'angle θ, décrivant la direction du déplacement en dehors de la clôture, est donné par $a \sin\theta = M\lambda$, où M est un entier. Lors du changement de direction dû au processus d'interférence, la clôture reçoit une quantité de mouvement $p \sin\theta$, ou un moment cinétique $L = pR \sin\theta$. En combinant toutes ces expressions, nous trouvons que le moment cinétique transféré à la clôture est

Défi 65 f

$$L = NM\hbar \,. \tag{28}$$

Autrement dit, le moment cinétique de la clôture est un multiple entier de $\hbar$. Les clôtures ne peuvent avoir que des moments cinétiques intrinsèques entiers (en unités de $\hbar$). La généralisation de ce raisonnement à tous les corps est également correcte. (Bien sûr, cette dernière affirmation n'est qu'une suggestion, pas une démonstration.)

* «Triste est le disciple qui ne surpasse pas son maître.» Cette assertion, tirée de l'un de ses carnets, le Codex Forster III, est sculptée en gros caractères dans la salle de cours de chimie de l'Université de Rome *La Sapienza*.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

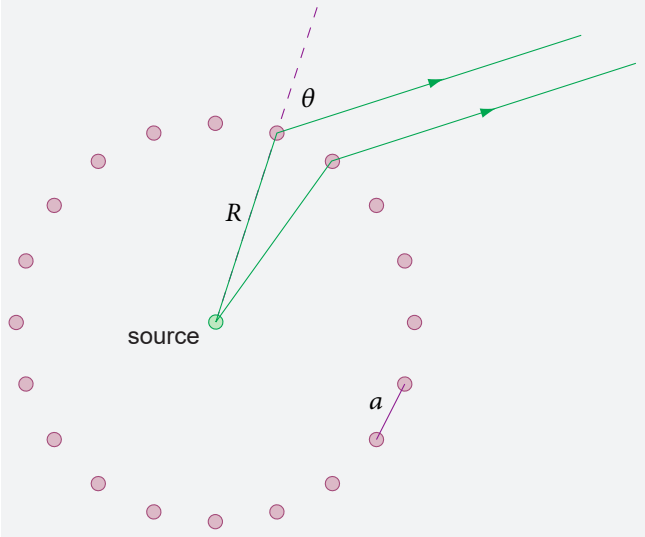


FIGURE 41 La quantification du moment cinétique.

▷ La valeur mesurée du moment cinétique intrinsèque des objets est toujours un multiple de $\hbar$.

La théorie quantique établit donc que le moment cinétique de tout objet augmente par échelons. Le moment cinétique est quantifié. Ce résultat est confirmé par toutes les expériences.

Mais la rotation a des aspects encore plus intéressants. Grâce au quantum d'action, tout comme la quantité de mouvement est en général floue, il en est de même pour le moment cinétique. Il y a une relation d'indétermination pour le moment cinétique L. La variable complémentaire est l'angle de phase φ de la rotation. La relation d'indétermination peut s'exprimer de plusieurs façons. L'approximation la plus simple, et qui n'est donc *pas* l'expression exacte, est

Ref. 47 Ref. 48 Page 53

$$\Delta L \, \Delta\varphi \geqslant \frac{\hbar}{2} \,. \tag{29}$$

Ceci est bien évidemment une approximation: la relation est seulement valable pour les gros moments cinétiques. Malgré tout, l'expression nous renseigne qu'une rotation se comporte de façon similaire à une translation. L'expression ne peut pas être valable pour les petites valeurs de moments cinétiques, car $\Delta\varphi$ ne peut pas, par définition, augmenter au-delà de 2π. En particulier, les états propres du moment cinétique ont $\Delta L = 0$.*

* Une formulation exacte de la relation d'indétermination pour le moment cinétique est

$$\Delta L \, \Delta\varphi \geqslant \frac{\hbar}{2} |1 - 2\pi P(\pi)| \,, \tag{30}$$

où $P(\pi)$ est la probabilité normalisée pour que la position angulaire ait la valeur π. Pour un état propre du moment cinétique, on a $\Delta\varphi = \pi/\sqrt{3}$ et $P(\pi) = 1/2\pi$. Cette expression exacte a été testée et confirmée par les expériences. Ref. 49

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

L'indétermination du moment cinétique apparaît pour tous les objets macroscopiques. On peut dire que l'indétermination apparaît dans tous les cas pour lesquels la phase angulaire du système peut être mesurée.

La quantification et l'indétermination du moment cinétique ont des conséquences importantes. En suivant un raisonnement classique, les pôles de la Terre sont les lieux qui ne bougent pas lorsqu'ils sont observés par un observateur non tournant. Par conséquent, en ces lieux la matière aurait une position définie et une quantité de mouvement définie. Cependant, le quantum d'action l'interdit. Il ne peut y avoir de pôle Nord sur Terre. Plus précisément, l'idée d'un axe de rotation *fixe* est une approximation, qui n'est en général pas valide. Ceci s'applique en particulier aux particules quantiques qui tournent sur elles-mêmes.

La rotation des quantons

Les conséquences du quantum d'action sur la rotation des particules microscopiques, telles que les atomes, les molécules ou les noyaux, sont particulièrement intéressantes. Nous notons à nouveau que l'action et le moment cinétique ont les mêmes unités. La précision avec laquelle le moment cinétique peut être mesuré dépend de la précision de l'angle de rotation. Mais si une particule *microscopique* tourne sur elle-même, il se peut que cette rotation ne soit pas observable: une situation qui contraste fondamentalement avec le cas des objets *macroscopiques*. Les expériences confirment en effet que de nombreuses particules microscopiques ont des angles de rotation qui ne sont pas observables. Par exemple, dans beaucoup de cas (bien que pas tous), un noyau atomique qui aurait tourné sur lui-même d'un demi-tour ne peut pas être distingué d'un noyau qui n'aurait pas tourné.

Si une particule microscopique a un angle de rotation inobservable *minimal*, le quantum d'action implique que le moment cinétique de cette particule *ne peut pas* être nul. Elle doit toujours tourner sur elle-même. Donc, il nous faut vérifier, pour chaque particule, quel est son plus petit angle de rotation inobservable. Les physiciens ont développé des expériences pour vérifier toutes les particules de la nature. Ils ont trouvé des angles inobservables minimales (selon le type de particule) de 0, 4π, 2π, $4\pi/3$, π, $4\pi/5$, $2\pi/3$, etc.

Prenons un exemple. Certains noyaux ont un angle de rotation inobservable minimale d'*un demi-tour*. C'est le cas pour un noyau prolate (un qui ressemble à un ballon de rugby) tournant autour de son petit axe, comme par exemple pour un noyau de ^{23}Na. Dans ce cas, le plus grand angle de rotation observable ainsi que l'indétermination sont donc tous les deux d'*un quart de tour*. Puisque le changement (l'action) produit par une rotation est le nombre de tours multiplié par le moment cinétique, nous trouvons que le moment cinétique de ce noyau est $2 \cdot \hbar$.

D'une façon générale, nous déduisons à partir des valeurs d'angle minimales que le moment cinétique d'une particule microscopique peut être 0, $\hbar/2$, $\hbar$, $3\hbar/2$, $2\hbar$, $5\hbar/2$, $3\hbar$, etc. Autrement dit, le moment cinétique intrinsèque d'une particule, que l'on appelle usuellement son *spin*, est un multiple entier de $\hbar/2$. Le spin décrit comment une particule se comporte lorsqu'elle tourne sur elle-même.

Comment une particule peut-elle tourner sur elle-même? À ce stade, nous ne savons pas encore comment nous *représenter* la rotation. Mais nous pouvons l'*entrevoir*. Tout

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

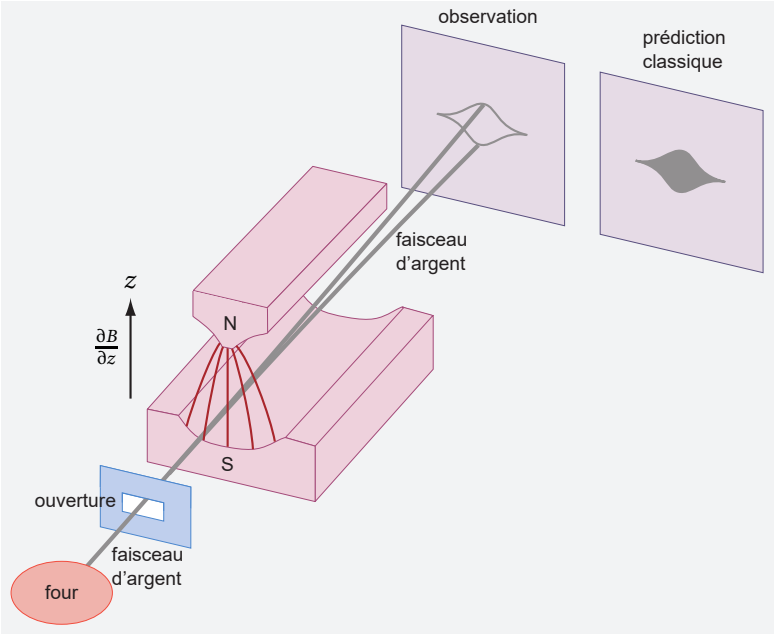


FIGURE 42
L'expérience de Stern et Gerlach.

comme nous avons montré que la lumière était faite d'entités qui tournaient sur elles-mêmes, toute matière, y compris les électrons, peut être *polarisée*. Ceci est démontré clairement par la célèbre expérience de Stern et Gerlach.

L'argent, Stern et Gerlach – la polarisation des quantons

Après une année de travail acharné, en 1922, Otto Stern et Walther Gerlach* menèrent à bien une belle expérience qui étudiait la polarisation des quantons de matière. Ils savaient que les champs magnétiques inhomogènes agissaient comme des polariseurs pour les charges tournantes. Des charges tournantes sont présentes dans tous les atomes. Ils firent donc passer un faisceau d'atomes d'argent, extraits d'un four par évaporation, dans un champ magnétique inhomogène. Ils ont alors trouvé que le faisceau se divisait en *deux faisceaux séparés*, comme le montre la Figure 42. Aucun atome ne quittait la région soumise au champ magnétique dans des directions intermédiaires. Ceci est en contradiction totale avec ce à quoi on s'attendrait en physique classique.

Ref. 50

La séparation en *deux* faisceaux est une propriété intrinsèque des atomes d'argent. Aujourd'hui on sait que cela est dû à leur spin. Les atomes d'argent ont un spin $\hbar/2$ et, selon leur orientation dans l'espace, ils sont déviés soit dans la direction de l'inhomogénéité du champ, soit dans la direction opposée. La séparation du faisceau est un effet purement quantique: il n'y a pas d'option intermédiaire. Ainsi, l'expérience de Stern et Gerlach fournit une des démonstrations les plus claires que la physique classique comporte des lacunes dans le domaine microscopique. En 1922, le résultat semblait

* Otto Stern (1888 – 1969) et Walther Gerlach (1889 – 1979) ont travaillé ensemble à l'Université de Francfort. Par la suite, pour avoir mesuré le moment magnétique anormal du proton, Stern reçu le prix Nobel de Physique en 1943, après qu'il a dû fuir le national-socialisme.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

si étrange qu'il fut étudié dans tous ses détails partout dans le monde.

Lorsqu'un des deux faisceaux, disons le faisceau «up»*, est envoyé à travers un deuxième appareil, tous les atomes en ressortent dans le faisceau «up». L'autre sortie possible, le faisceau «down», n'est pas utilisée dans ce cas. Autrement dit, les faisceaux «up» et «down», contrairement au faisceau initial, ne peuvent pas être séparés une nouvelle fois. Ceci n'est pas une surprise.

Mais si le deuxième appareil est tourné de $\pi/2$ par rapport au premier, il se forme à nouveau deux faisceaux (que l'on peut noter ici «droit» et «gauche»). Et ceci est indépendant du fait que le faisceau entrant provienne directement du four ou de la partie «up» du faisceau initial. Un appareil partiellement tourné produit une séparation partielle, inégale. Les proportions des deux faisceaux finaux dépendent de l'angle de rotation du deuxième appareil.

Nous notons directement que si on sépare le faisceau sortant du four d'abord verticalement puis ensuite horizontalement, nous obtenons un résultat différent de celui obtenu pour des séparations du faisceau dans l'ordre inverse. (Vous pouvez vérifier cela par vous-même.) Les processus de séparation ne commutent pas. Lorsque le résultat final dépend de l'ordre de deux opérations, les physiciens disent que les deux opérations sont *non commutatives*. Puisque toutes les mesures sont également des processus physiques, on en déduit que les mesures et les processus des systèmes quantiques sont, en général, non commutatifs.

Défi 66 f

La séparation des faisceaux dépend de la direction. Les faisceaux de matière se comportent presque de la même façon que les faisceaux de lumière polarisée. En effet, le champ magnétique inhomogène agit sur la matière un peu comme un polariseur agit sur la lumière. Les faisceaux «up» et «down», pris dans leur ensemble, définissent une direction de polarisation. En effet, il est possible de faire tourner la direction de polarisation à l'aide d'un champ magnétique *homogène*. Et un faisceau que l'on a fait tourner, placé dans un aimant que l'on n'a pas tourné, se comporte comme un faisceau que l'on n'a pas fait tourner, placé dans un aimant que l'on a tourné.

En résumé, les quantons de matière peuvent être polarisés. On peut se représenter la polarisation comme étant l'orientation d'un axe de rotation interne du quanton massique. Pour être consistent, il faut s'imaginer l'axe de rotation comme faisant un mouvement de précession autour de la direction de polarisation. Donc, les particules quantiques massiques ressemblent aux photons également en ce qui concerne leur polarisabilité.

Curiosités et défis amusants concernant la matière quantique

> It is possible to walk while reading, but not to read while walking.**
>
> Serge Pahaut

Le quantum d'action implique qu'il n'y a *pas de fractales* dans la nature. Tout est constitué de particules. Et les particules sont des nuages. La théorie quantique requière que toutes les formes de la nature soient des *nuages* «flous».

* Nous utilisons dans ce texte les expressions anglaise «up» et «down» («haut» et «bas») car ce sont les plus couramment utilisées dans les manuels de physique quantique. Nous les retrouverons plus loin lorsque nous parlerons du spin et des propriétés des particules élémentaires [N.d.T.].

** «Il est possible de marcher en lisant, mais pas de lire en marchant.»

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

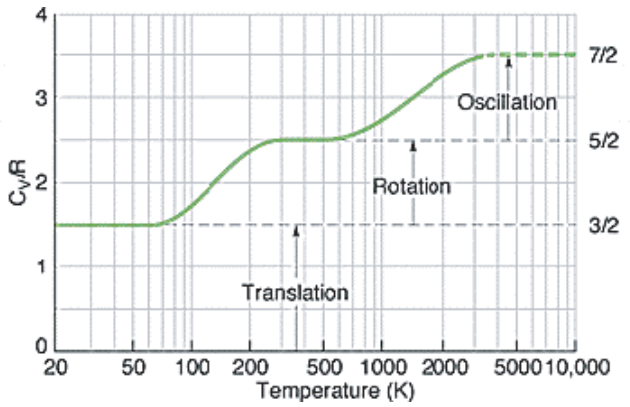


FIGURE 43 Un graphique idéalisé de la capacité thermique de l'hydrogène en fonction de la température. (© Peter Eyland)

* *

Est-ce que les atomes peuvent tourner sur eux-mêmes? Est-ce qu'un atome qui tombe sur le sol peut rouler sous la table? Est-ce qu'il est possible de mettre des atomes en rotation rapide? La réponse à toutes ces questions est «non», parce que le moment cinétique est quantifié. De plus, les atomes ne sont pas des objets solides, mais des nuages. Le cas macroscopique d'un objet tournant sur lui-même de plus en plus lentement jusqu'à ce qu'il s'arrête, n'existe pas dans le monde microscopique. Le quantum d'action ne le permet pas.

Ref. 51

* *

La lumière se réfracte lorsqu'elle entre dans un matériau dense. Est-ce que les ondes de matière se comportent de la même façon? Oui, elles le font. En 1995, David Pritchard le montra pour des ondes de sodium entrant dans un gaz d'hélium et de xénon.

Ref. 52

* *

De nombreux effets quantiques conduisent à des courbes qui présentent des échelons. Un exemple important est la capacité thermique molaire du gaz H_2, que montre la Figure 43. En augmentant la température de 20 à 8 000 K, la capacité thermique molaire subit deux échelons, un premier de $3R/2$ à $5R/2$, et ensuite à $7R/2$. Pouvez-vous en expliquer la raison?

* *

La plupart des exemples de mouvement quantique que nous avons donnés jusque-là sont dus à des effets électromagnétiques. Pouvez-vous argumenter que le quantum d'action doit également s'appliquer aux mouvements nucléaires, et en particulier aux interactions nucléaires?

Défi 67 e

* *

Il existe de nombreuses autres formulations du principe d'indétermination. Une qui est intéressante est celle que l'on doit à de Sabbata et Sivaram, qui ont expliqué en 1992 que

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

la relation mystérieuse suivante entre la température et le temps était également valide:

$$\Delta T \Delta t \geqslant \hbar/k. \tag{31}$$

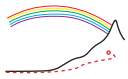
Ref. 53 Ici, k est la constante de Boltzmann. Tous les tests expérimentaux jusqu'à aujourd'hui ont confirmé le résultat.

* *

Voici une question un peu délicate: quel est le moment d'inertie d'un électron?
Défi 68 f Pourquoi?

Premier résumé sur le mouvement des particules quantiques

Pour résumer, la séparation «digitale» du faisceau que l'on voit dans l'expérience de Stern et Gerlach et les propriétés ondulatoires de la matière nous obligent à repenser notre description du mouvement. Elles montrent que le mouvement de la matière microscopique découle du quantum d'action, la valeur observable minimale pour l'action. En relativité restreinte, l'existence d'une vitesse maximale nous avait obligé à introduire le concept d'espace-temps, et ensuite à affiner notre description du mouvement. En relativité générale, la force maximale nous avait obligé à introduire les concepts d'horizon et de courbure, et ensuite, à affiner une nouvelle fois notre description du mouvement. Au stade actuel, l'existence du quantum d'action et le comportement ondulatoire de la matière nous obligent à prendre deux mesures similaires: nous introduisons tout d'abord le concept de fonction d'onde, et ensuite, nous affinons notre description du mouvement de la matière.



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Chapitre 4

La description quantique de la matière et de son mouvement

> Die Quanten sind doch eine hoffnungslose Schweinerei!**
>
> Max Born

Ref. 54

Dans la vie quotidienne comme en physique classique, nous disons qu'un système *a* une position, qu'il *est* orienté dans une certaine direction, qu'il *a* un axe de rotation, et qu'il *est* dans un état avec une quantité de mouvement spécifique. En physique classique, nous pouvons parler de la sorte parce que l'*état* (la situation dans laquelle un système «est» ainsi que les propriétés qu'un système «a») coïncide avec les *résultats des mesures*. Il coïncide parce qu'il est toujours possible d'imaginer que les mesures ont un effet négligeable sur le système.

Cependant, à cause de l'existence d'une action minimale, l'interaction nécessaire à la réalisation d'une mesure sur un système *ne peut pas* être réduite à une valeur arbitrairement petite. Donc, le quantum d'action *ne nous permet plus* de continuer à dire qu'un système *a* une quantité de mouvement, qu'il *a* une position ou qu'il *a* un axe de rotation. Le quantum d'action nous oblige à utiliser l'idée de la flèche tournante et à introduire le concept de *fonction d'onde*, ou de *fonction d'état*. Voyons pourquoi et comment.

Les états et les mesures – la fonction d'onde

Page 94

L'expérience de Stern et Gerlach nous montre que les valeurs de l'*orientation* du spin que l'on mesure ne sont *pas* intrinsèques, mais qu'elles résultent du processus de mesure (dans ce cas, il s'agit de l'interaction avec le champ inhomogène qui est appliqué). Ceci contraste avec l'*amplitude* du spin, qui est intrinsèque et indépendante de l'état et de la mesure. En bref, le quantum d'action nous oblige à distinguer soigneusement trois concepts:

— l'état du système;
— l'opération de mesure;
— le résultat de la mesure.

Contrairement au cas classique de la vie quotidienne, l'*état* d'un système quantique (les propriétés qu'un système «a») n'est *pas* décrit par les résultats des mesures. L'illustration la plus simple de cette différence est le système constitué d'une seule particule dans l'expérience de Stern et Gerlach. L'expérience montre que la mesure du spin sur une

** «Ces quanta sont une sale pagaille sans espoir!»

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

particule dans un état générale (lorsqu'elle sort du four) produit parfois «up» (disons +1), et produit parfois «down» (disons −1). Donc, un atome le plus général (à la sortie du four) n'a pas d'orientation intrinsèque. Ce n'est qu'*après* la mesure que l'atome se trouve soit dans l'état «up», soit dans l'état «down».

On trouve également qu'alimenter un second appareil de mesure avec des états «up» ne produit que des états «up»: il se trouve donc que certains états spéciaux, appelés les *états propres*, ne sont pas affectés par une mesure.

Finalement, l'expérience de Stern et Gerlach et ses variantes montrent que les états peuvent tourner lorsqu'on leur applique des champs: les états des atomes ont une direction (une orientation) dans l'espace. Les expériences montrent également que les états tournent au cours du déplacement des atomes dans l'espace.

Les observations expérimentales peuvent être décrites de façon assez simple. Puisque les mesures sont des opérations qui prennent un état en entrée et produisent un état de sortie et un résultat de mesure, on peut dire que:

- Les *états* sont décrits par des flèches tournantes (des vecteurs tournants).
- Les *mesures* des observables sont des opérations sur les vecteurs d'états.
- Les *résultats des mesures* sont des *nombres réels*. Tout comme en physique classique, ils dépendent généralement de l'observateur.

En particulier, nous avons distingué deux concepts qui ne sont pas distinguées en physique classique: les états et les résultats des mesures. Étant donnée cette distinction, la théorie quantique découle assez simplement, comme nous allons le voir.

Puisque le quantum d'action n'est pas infiniment petit, toute mesure d'une grandeur observable est une interaction avec un système et est donc une transformation de son état. Par conséquent, la physique quantique décrit les observables physiques comme des *opérateurs* ou, de façon équivalente, comme des transformations. L'expérience de Stern et Gerlach montre clairement que l'interaction avec le champ influence les atomes: certains dans un sens, et d'autres dans un autre sens. En fait, toutes les expériences montrent que:

- Sur le plan mathématique, les états sont des *vecteurs complexes* (des flèches tournantes) dans un espace abstrait. Cet espace de tous les états possibles (toutes les flèches possibles) est un *espace!de Hilbert*.
- Sur le plan mathématique, les mesures sont des transformations linéaires. Plus précisément, elles sont décrites par des *opérateurs* (des matrices) auto-adjoints (*hermitiens*).
- Sur le plan mathématique, les *changements de point de vue* sont décrits par des *opérateurs* (des matrices) *unitaires* qui agissent sur les états (sur les flèches) et sur les opérateurs de mesure.

Page 267

Les expériences de la mécanique quantique montrent également que la mesure d'une observable ne peut donner qu'un résultat qui est une *valeur propre* de la transformation correspondante. Les états qui résultent de la mesure, ces états exceptionnels qui ne sont *pas* influencés lorsque la variable correspondante est mesurée, sont les *vecteurs propres*. En bref, tout expert sur le mouvement doit savoir ce qu'est une valeur propre et ce qu'est

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

un vecteur propre.

Pour toute transformation linéaire T, les vecteurs spéciaux ψ qui se transforment en des multiples d'eux-mêmes,

$$T\psi = \lambda\psi \tag{32}$$

s'appellent des *vecteurs propres* (ou encore des *états propres*), et le facteur de multiplication λ s'appelle la *valeur propre* associée. Les expériences montrent que

▷ L'état du système *après* une mesure est donné par le vecteur propre correspondant à la valeur propre mesurée.

En ce qui concerne l'expérience de Stern et Gerlach, les états propres sont les états «up» et «down». En général, les états propres sont les états qui ne changent pas lorsque l'on mesure la variable correspondante. Les valeurs propres des opérateurs hermitiens sont toujours réelles, de sorte que la cohérence est assurée: tous les résultats de mesures sont des nombres réels.

En résumé, le quantum d'action nous oblige à faire la distinction entre trois concepts qui sont confondus en physique classique: l'*état* d'un système, une *mesure* sur le système et le *résultat de la mesure*. Le quantum d'action nous oblige à modifier le vocabulaire avec lequel nous décrivons la nature, et nous oblige à utiliser des concepts plus différenciés. Maintenant, nous arrivons à l'étape principale: la description du *mouvement* à l'aide de ces concepts. C'est ce que l'on appelle habituellement la «théorie quantique».

Visualiser la fonction d'onde: les flèches tournantes et les nuages de probabilité

Nous venons juste de décrire l'état d'un quanton par une flèche. En fait, ceci est une approximation dans le cas des quantons localisés. Plus précisément:

▷ L'état d'une particule quantique est décrit par une distribution spatiale de flèches, que l'on appelle la *fonction d'onde*.

Pour développer une image visuelle de la fonction d'onde, nous commençons par nous imaginer une particule quantique qui est localisée, autant que possible. Dans ce cas, la fonction d'onde d'un quanton libre peut être décrite simplement par une seule *flèche tournante*.

Les expériences montrent que lorsqu'un quanton *localisé* voyage dans l'espace, la flèche qui lui est attachée tourne. Si la particule n'est pas relativiste et si on peut négliger son spin, la rotation se produit dans un plan perpendiculaire à la direction du mouvement. Le bout de la flèche décrit donc une *hélice* autour de la direction du mouvement. Dans ce cas, l'état à un instant donné est décrit par l'angle de la flèche. Cet angle est la *phase quantique*. La phase quantique est responsable des propriétés ondulatoires de la matière, comme nous allons le voir. La longueur d'onde et la fréquence de l'hélice sont déterminées par la quantité de mouvement et l'énergie cinétique de la particule.

Si la particule n'est *pas localisée* (mais toujours non relativiste et toujours avec des effets de spin négligeables) l'état (la fonction d'onde) définit une flèche tournante *en*

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

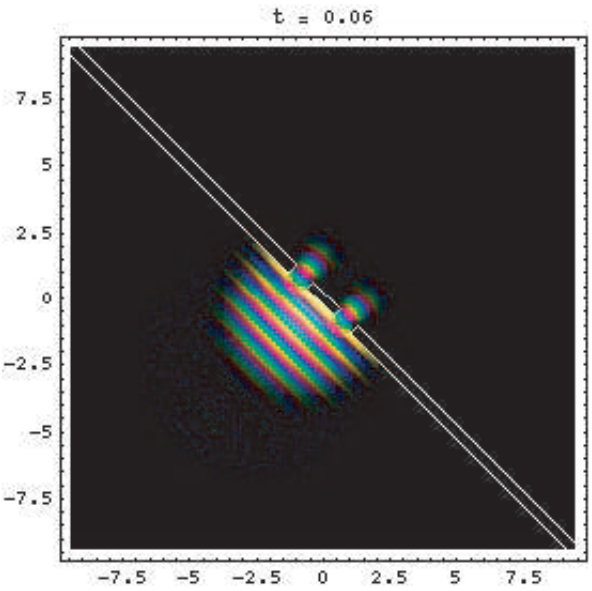


FIGURE 44 Le mouvement d'une fonction d'onde (ou état quantique) passant à travers deux fentes, montrant en même temps les propriétés particulaires et ondulatoires de la matière. La densité de l'état, lié à la longueur de la flèche, est représentée par la luminosité, et la phase locale est codée par la couleur. (Film QuickTime © Bernd Thaller)

chaque point de l'espace. La rotation se produit encore dans un plan perpendiculaire à la direction du mouvement, mais dans ce cas, nous avons une distribution de flèches qui tracent toutes des hélices parallèles à la direction du mouvement. En tout point de l'espace et du temps, l'état a une phase quantique et une longueur de flèche. Les longueurs des flèches diminuent lorsque l'on s'éloigne à l'infini dans l'espace.

La Figure 44 montre un exemple de l'évolution d'une fonction d'onde pour des particules non relativistes avec des effets de spin négligeables. La direction de la flèche en chaque point est indiquée par la couleur en ce point. La longueur de la flèche est indiquée par la luminosité de la couleur. Pour des particules non relativistes ayant des effets de spin négligeables, la fonction d'onde $\psi(t, x)$ est donc décrite par une longueur et une phase: c'est un nombre *complexe* en chaque point de l'espace. La phase est essentielle pour les interférences et pour de nombreux autres effets ondulatoires. Quelle propriété mesurable est décrite par l'amplitude (ou longueur) de la flèche locale? La réponse a été donnée par le célèbre physicien Max Born:

Page 254

▷ L'amplitude de la fonction d'onde est une *amplitude de probabilité*. Le carré de l'amplitude, c.-à-d. la grandeur $|\psi(t, x)|^2$, donne la probabilité de trouver la particule à la position x et à l'instant t.

Autrement dit, une fonction d'onde est la combinaison de deux idées: d'une part, une fonction d'onde est un *nuage*, et de l'autre, en chaque point du nuage il faut s'imaginer une flèche. Avec le temps, les flèches tournent et le nuage change de forme.

▷ Une fonction d'onde est un nuage de flèches tournantes.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Décrire l'état d'une particule matérielle à l'aide d'un nuage de flèches tournantes est l'étape essentielle pour se représenter les propriétés ondulatoires de la matière.

Nous pouvons clarifier la situation davantage:

▷ Dans tous les processus pour lesquels la phase de la fonction d'onde n'est pas importante, la représentation de la fonction d'onde par un nuage est suffisante et correcte.

Par exemple, le mouvement des atomes ou des molécules dans les gaz ou les liquides peut être visualisé par le mouvement d'objets nuageux. Il faut souligner que les nuages en question sont assez durs: il faut beaucoup d'énergie pour déformer les nuages atomiques. La dureté d'un cristal typique résulte directement de la dureté des nuages atomiques que l'on trouve à l'intérieur. Les atomes sont des nuages extrêmement rigides et durs.

D'autre part,

▷ Dans tous les processus pour lesquels la phase de la fonction d'onde joue un rôle, la représentation de la fonction d'onde par un nuage doit être étendue en ajoutant des flèches tournantes en chacun des points.

C'est le cas pour les processus d'interférences de quantons, mais également pour la description précise des liaisons chimiques.

Les enseignants discutent souvent du meilleur moyen pour expliquer les fonctions d'ondes. Certains préfèrent utiliser uniquement le modèle du nuage, d'autres préfèrent ne pas utiliser de visualisation du tout. Les deux approches sont possibles, mais le moyen le plus utile et le plus pratique est d'imaginer l'état (la fonction d'onde) d'une particule quantique *non relativiste* comme une flèche en tout point de l'espace. La fréquence de rotation de l'ensemble des flèches est l'*énergie cinétique* de la particule. La longueur d'onde du mouvement des flèches (la période de la courbe hélicoïdale que la pointe des flèches, ou celle de la flèche moyenne, trace au cours du mouvement) est la *quantité de mouvement* de la particule quantique.

Une flèche en chaque point de l'espace est un *champ* (mathématique). Le champ est concentré dans la région où se situe la particule, et l'amplitude du champ est liée à la probabilité de trouver la particule. Donc, le champ de l'état (la fonction d'onde ou la fonction d'état) est un *nuage de flèches*, que l'on désigne habituellement en utilisant la lettre grecque ψ.

Notez que, bien que la fonction d'onde puisse être vue comme définissant une flèche en chaque point de l'espace, elle peut également être décrite, dans son ensemble, comme un vecteur unique, cette fois-ci dans un espace!de Hilbert. Pour des particules libres, c.-à-d. des particules qui ne sont pas soumises à des forces externes, l'espace de Hilbert est de dimension infinie! Néanmoins, il n'est pas difficile de faire des calculs dans de tels espaces. Le produit scalaire de deux fonctions d'onde est l'intégrale spatiale du produit du complexe conjugué de la première fonction et du complexe (non conjugué) de la deuxième fonction. Avec cette définition, tous les concepts sur les vecteurs (vecteurs unitaires, vecteurs nuls, vecteurs de base, etc.) peuvent être appliqués de manière significative aux fonctions d'ondes.

Page 267

Défi 69 f

En résumé, pour des particules non relativistes et sans effets de spin, *l'état (la fonc-*

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

tion d'onde) d'une particule quantique est un nuage (une onde distribuée) de flèches tournantes. Cet aspect d'un nuage quantique est inhabituel. Puisqu'un nuage quantique est constitué de petites flèches, chaque point du nuage est décrit par une densité locale et une orientation locale. Cette dernière propriété n'apparaît dans aucun des nuages de la vie quotidienne.

Pendant de nombreuses décennies, il a été tacitement supposé qu'une fonction d'onde ne pouvait pas être visualisée plus simplement que par un nuage de flèches tournantes. Ce n'est seulement que depuis ces dernières années que l'on a montré qu'il existait d'autres visualisations possibles pour de tels nuages quantiques. Une visualisation possible sera présentée dans le dernier volume de cette série.

Vol. VI, page 174

L'évolution de l'état – l'équation de Schrödinger

La description de l'état d'un quanton non relativiste et dont les effets de spin sont négligeables à l'aide d'un nuage tournant sur lui-même, détermine *complètement* comment la fonction d'onde évolue dans le temps. En effet, pour de telles particules quantiques, l'évolution découle de l'énergie totale (la somme des énergies cinétique et potentielles $T + V$) et des propriétés des ondes de matière:

▷ Le taux de changement local de la flèche (ou des flèches) de l'état $\psi(x)$ (ou tout simplement ψ) est généré par l'énergie totale locale (l'hamiltonien) $H = T + V$:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t}\psi = H\psi \,. \tag{33}$$

Cette équation célèbre est l'*équation du mouvement de Schrödinger*.* Cette *équation d'évolution* s'applique à tous les systèmes quantiques et elle est l'un des points culminants de la physique moderne.

Ref. 55
Ref. 56
En fait, Erwin Schrödinger avait trouvé son équation de deux manières différentes. Dans son premier article il la déduisait à partir du principe variationnel. Dans son deuxième article, il déduisait l'équation d'évolution directement, en se posant une question simple: comment l'état évolue-t-il? Il savait que l'état d'un quanton se comportait à la fois comme une onde et comme une particule. Une onde est décrite par un champ, qu'il désigna $\psi(t, x)$. Si l'état ψ se comporte comme une onde, alors la fonction d'onde correspondante doit être une amplitude W multipliée par un facteur de phase $e^{i\boldsymbol{kx}-\omega t}$. L'état peut alors s'écrire

$$\psi(t, x) = W(t, x)\, e^{i\boldsymbol{kx}-\omega t} \,. \tag{34}$$

L'amplitude W est la *longueur* de la flèche locale, et la phase est son *orientation*. De ma-

* Erwin Schrödinger (Vienne, 1887 – Vienne, 1961) était célèbre pour être un *physicien bohémien*, vivant toujours en ménage avec deux femmes. En 1925, il découvrit l'équation qui lui apporta une renommée internationale et le prix Nobel de physique en 1933. Il fut également le premier à montrer que le rayonnement découvert par Victor Hess à Vienne provenait en effet du cosmos. Il quitta l'Allemagne, puis à nouveau l'Autriche, par aversion pour le national-socialisme, et il est resté professeur à Dublin durant de nombreuses années. C'est là qu'il publia sont livre célèbre et influent *Qu'est-ce que la vie?*. Dans ce livre, il était tout proche de prédire l'acide nucléique ADN (inconnu à l'époque) uniquement par une approche théorique.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net



FIGURE 45 Erwin Schrödinger (1887 – 1961).

nière équivalente, l'amplitude est la densité locale du nuage, et la phase est l'orientation locale du nuage.

Nous savons que l'onde quantique doit aussi se comporter comme une particule de masse m. En particulier, la relation non relativiste entre l'énergie et la quantité de mouvement $E = \boldsymbol{p}^2/2m + V(\boldsymbol{x})$ (où $V(\boldsymbol{x})$ est le potentiel au point $\boldsymbol{x}$) doit être satisfaite pour ces ondes. Les deux relations de de Broglie (22) pour la longueur d'onde de la matière et
Page 84
pour sa fréquence impliquent alors

$$i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t} = H\psi = \frac{-\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi + V(\boldsymbol{x})\psi \,. \tag{35}$$

Ceci est la forme complète de l'équation d'onde de Schrödinger. L'opérateur ∇^2 est le laplacien, essentiellement la dérivée seconde sur l'espace. L'équation établit comment l'onde de flèches (la fonction d'onde ψ associée à une particule) évolue au cours du temps. En 1926, cette *équation d'onde* pour le champ complexe ψ est devenue célèbre instantanément lorsque Schrödinger l'utilisa, en y introduisant le potentiel ressenti par un électron proche d'un proton, pour calculer les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène. Dans un atome d'hydrogène, la lumière est émise par l'unique électron à l'intérieur de l'atome. Ainsi, une description précise du mouvement de l'électron au sein de l'atome d'hydrogène nous permet de décrire les fréquences lumineuses que l'atome peut émettre. (Nous ferons les calculs et la comparaison avec l'expérience plus loin.)
Page 206
Tout d'abord, l'équation de Schrödinger expliquait que seul des couleurs *discrètes* étaient émises par l'hydrogène. De plus, les fréquences de la lumière émise se trouvaient être en accord avec les prédictions de l'équation avec cinq chiffres significatifs. Finalement, la taille des atomes était prédite correctement. Ces résultats étaient très importants, tout particulièrement si on garde à l'esprit que la physique classique ne peut même pas expliquer l'existence des atomes, sans même parler de la lumière qu'ils émettent! En revanche, la physique quantique explique toutes les propriétés des atomes ainsi que leurs couleurs avec une très bonne précision. Autrement dit, la découverte du quantum d'action a conduit la description du mouvement de la matière vers un nouveau sommet.

En fait, on ne peut arriver à une description exacte des quantons de matière que lorsque les *effets de spin* et la relation d'énergie-impulsion *relativiste* sont tous deux pris
Page 213
en compte, ce que nous ferons plus loin. Aucun écart entre les calculs relativistes com-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

plets et les expériences n'a jamais été trouvé. Et même aujourd'hui, les prédictions et les mesures des spectres atomiques restent les plus précises et les plus exactes de tous les domaines de l'étude de la nature: dans les cas pour lesquels la précision expérimentale le permet, les valeurs calculées sont en accord avec les expériences jusqu'à 13 chiffres significatifs.

L'AUTO-INTERFÉRENCE DES QUANTONS

Page 86 Les ondes interfèrent. Toutes les expériences, y compris les exemples de la Figure 38 et de la Figure 39, confirment que toutes les particules quantiques, et en particulier tous les quantons de matière, produisent des interférences. Les interférences sont une conséquence directe de l'équation de Schrödinger, comme le montre le film de la Figure 44. Le film illustre la solution de l'équation de Schrödinger pour une particule quantique passant à travers deux fentes. Le film visualise comment deux fentes induisent de la diffraction et des interférences pour une particule de matière.

Page 101

Il se trouve que l'équation de Schrödinger reproduit et explique complètement les observations d'interférences de la matière: les interférences de quantons de matière sont également dues à l'évolution de nuages de flèches tournantes. Et comme dans tous les phénomènes d'interférences, l'intensité locale de la figure d'interférence se trouve être proportionnelle au carré $|W|^2$ de l'amplitude locale de l'onde. Et l'amplitude locale de l'onde résulte de la phase des trains d'ondes qui interfèrent. L'analogie avec les interférences lumineuses est totale, même les formules sont identiques.

On notera que bien que la fonction d'onde soit répartie sur l'ensemble de l'écran de détection juste avant qu'elle ne le frappe, elle ne produit pour autant qu'une tache localisée sur l'écran. Cet effet, que l'on appelle l'*effondrement de la fonction d'onde*, est exploré en détails dans ce qui suit.

Page 173

LA VITESSE DES QUANTONS

Approfondissons un peu les détails de la description que donne l'équation de Schrödinger (35). L'équation exprime une relation simple: la vitesse classique d'une particule matérielle est la *vitesse de groupe* de la fonction d'onde ψ. Vue depuis une grande distance, la fonction d'onde se déplace donc comme le ferait une particule *classique*.

Mais la physique classique nous a appris que la vitesse de groupe n'était pas toujours bien définie: dans les cas pour lesquels le groupe se dissout en plusieurs pics, le concept de vitesse de groupe n'est pas d'une grande utilité. Ces cas sont également ceux pour lesquels le mouvement quantique est très différent du mouvement classique, comme nous allons le découvrir bientôt. Mais pour les cas bien élevés, telles que les particules libres ou presque libres, il apparaît que la fonction d'onde se déplace de la même façon que le ferait une particule classique.

Page 173

L'équation de Schrödinger nous renseigne sur un autre point: la vitesse et la position de la matière ne sont pas des variables indépendantes et ne peuvent pas être choisies librement. La condition initiale d'un système est donnée uniquement par la valeur initiale de la fonction d'onde. Aucune dérivée ne doit (ou ne peut) être spécifiée. En effet, les expériences confirment que les systèmes quantiques sont décrits par une équation d'évolution du *premier ordre*, un contraste frappant avec les systèmes classiques. La raison de ce contraste est le quantum d'action, et la limite qu'il impose sur les variables

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

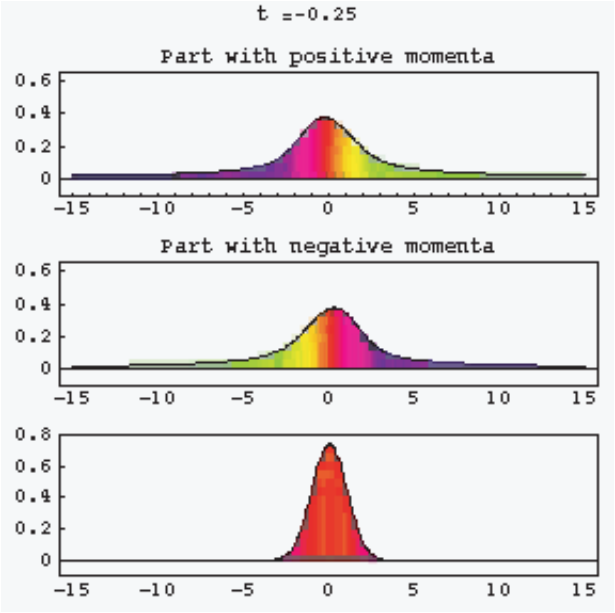


FIGURE 46 L'évolution d'une fonction d'onde (courbe du bas) avec une quantité de mouvement nulle, et le mouvement de ses parties avec des quantités de mouvement positive et négative. La phase locale est codée à l'aide de la couleur. (Film QuickTime © Bernd Thaller)

d'état possibles d'une particule.

L'ÉTALEMENT DES QUANTONS

Pour des particules quantiques libres, l'équation d'évolution de Schrödinger implique de la *dispersion*, comme l'illustre la Figure 46. Imaginez une fonction d'onde qui se trouve localisée autour d'une position de départ donnée. Une telle fonction d'onde décrit un système quantique au repos. Avec le temps, cette fonction d'onde va *s'étaler* dans l'espace. En effet, l'équation d'évolution de Schrödinger est similaire, sur le plan mathématique, à une équation de diffusion. De la même façon qu'une goutte d'encre dans l'eau va se répandre, l'état d'une particule quantique localisée va également s'étaler dans l'espace. Il est vrai que la position la plus probable reste inchangée, mais la probabilité de trouver la particule à une grande distance de la position de départ augmente avec le temps. En ce qui concerne les particules quantiques, l'effet d'étalement est effectivement observé lors de toutes les expériences. L'étalement est une conséquence de l'aspect ondulatoire de la matière, et donc du quantum d'action $\hbar$. Il se produit pour les quantons au repos, et donc également pour les quantons en mouvement. Cependant, dans le cas des objets macroscopiques, l'effet d'étalement n'est pas observé: les voitures s'éloignent rarement de leur place de parking. En effet, la théorie quantique prédit que pour les objets macroscopiques, l'effet d'étalement est très petit, au point d'être négligeable. Pouvez-vous montrer pourquoi?

Défi 70 f

Défi 71 pe

Pour résumer, l'aspect ondulatoire de la matière conduit à l'étalement des fonctions d'ondes. Les fonctions d'ondes manifestent de la dispersion.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

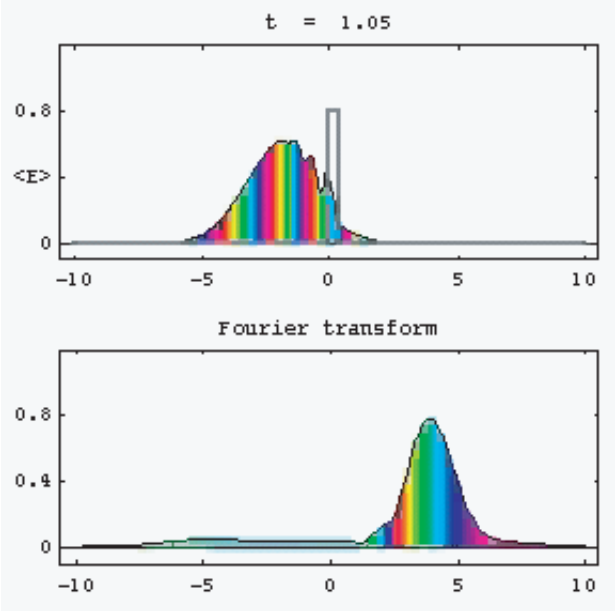


FIGURE 47 Le passage d'une fonction d'onde à travers une barrière de potentiel (la colonne rectangulaire) par effet tunnel: la plus grande partie de la fonction d'onde est réfléchie, alors qu'une partie passe de l'autre côté. La phase locale est codée à l'aide de la couleur. (Film QuickTime © Bernd Thaller

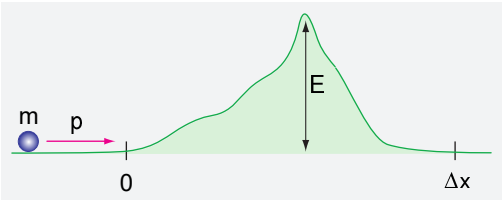


FIGURE 48 Gravir une colline.

L'EFFET TUNNEL ET LES LIMITES DE LA MÉMOIRE – L'AMORTISSEMENT DES QUANTONS

Notre «bon sens» nous dit qu'une balle trop lente ne peut pas passer par-dessus une colline trop haute. Plus précisément, la physique classique nous dit que si l'énergie cinétique T est plus petite que l'énergie potentielle V que la balle aurait au sommet de la colline, alors la balle ne peut pas atteindre le sommet de la colline. En revanche, d'après la théorie quantique, il y a une probabilité non nulle de passer par-dessus la colline, et cela *quel que soit* l'énergie de la balle.

En théorie quantique, les collines et les obstacles sont décrits par des barrières de potentiel, et les objets par des fonctions d'onde. N'importe quelle fonction d'onde initiale s'étalera *au-delà* de n'importe quelle barrière de potentiel de hauteur et de largeur finies. De même, la fonction d'onde ne s'annulera pas *à* l'endroit où se trouve la barrière. En bref, n'importe quel objet peut surmonter n'importe quelle colline ou barrière, comme le montre la Figure 48. Cet effet s'appelle l'*effet tunnel*. Il contraste franchement avec l'expérience quotidienne (et avec la mécanique classique).

L'effet tunnel résulte d'un nouvel aspect faisant partie de la description quantique des collines: dans la nature, tout obstacle peut se surmonter avec un effort *fini*. Aucun

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

obstacle n'est infiniment difficile à franchir. En effet, ce n'est qu'en cas de potentiel de hauteur infinie que la fonction d'onde s'annulerait et qu'elle ne pourrait pas s'étaler de l'autre côté. Mais de tels potentiels n'existent qu'en tant qu'approximations: dans la nature, les potentiels ont toujours une valeur finie.

Défi 72 pe Quelle est l'ampleur de l'effet tunnel? Le calcul montre que la probabilité de transmission P est donnée approximativement par

$$P \approx \frac{16T(V-T)}{V^2} \; \mathrm{e}^{-\frac{2w}{\hbar}\sqrt{2m(V-T)}} \tag{36}$$

où w est la largeur de la colline, V sa hauteur, et m et T la masse et l'énergie cinétique de la particule. Pour un système comportant un grand nombre de particules, la probabilité est (au plus) le produit des probabilités des différentes particules.

Prenons le cas d'une voiture dans un garage, et supposons que la voiture soit composée de 10^{28} atomes à température ambiante. L'épaisseur typique d'un mur de garage est de 0, 1 m et sa hauteur de potentiel typique est $V = 1\,\mathrm{keV} = 160\,\mathrm{aJ}$ pour qu'un atome puisse passer à travers. Nous obtenons que la probabilité de trouver la voiture à l'extérieur du garage est

$$P \approx \left(10^{-(10^{12})}\right)^{(10^{28})} \approx 10^{-(10^{40})} \,. \tag{37}$$

Cette valeur est tellement petite (essayez simplement de l'écrire pour vous en Défi 73 f convaincre), qu'elle n'est jamais prise en compte par la police lorsqu'une voiture est rapportée disparue. (En fait, la probabilité est même considérablement plus petite. Défi 74 e Pouvez-vous citer au moins un effet qui a été oublié dans ce calcul simple?)

De toute évidence, l'effet tunnel ne peut être important que pour des petits systèmes, constitués de quelques particules, et pour des barrières minces, d'une épaisseur de l'ordre de $\hbar/\sqrt{2m(V-T)}$. Par exemple, on observe l'effet tunnel pour des atomes individuels dans les solides à haute température, mais il n'est pas important dans la vie quotidienne. Pour les électrons, l'effet est plus prononcé: la largeur de la barrière w pour que l'effet tunnel soit appréciable est

$$w \approx \frac{0,5\,\mathrm{nm}\,\sqrt{\mathrm{aJ}}}{\sqrt{V-T}} \,. \tag{38}$$

À température ambiante, l'énergie cinétique T est de l'ordre de 6 zJ. Une augmentation de la température augmente bien évidement l'effet tunnel. Par conséquent, les électrons traversent assez facilement par effet tunnel des barrières qui sont larges de quelques atomes. En effet, tous les tubes de télévision utilisent l'effet tunnel à haute température pour générer le faisceau d'électrons qui produit l'image. La nécessité du chauffage est la raison pour laquelle, par le passé, les tubes de télévision prenaient un certain temps pour se mettre en route.

L'effet tunnel des électrons limite également la taille physique de la mémoire des ordinateurs. Les puces de mémoire ne peuvent pas être arbitrairement petites. Des circuits intégrés en silicone d'un téraoctet de mémoire vive (ou RAM pour «random access me-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

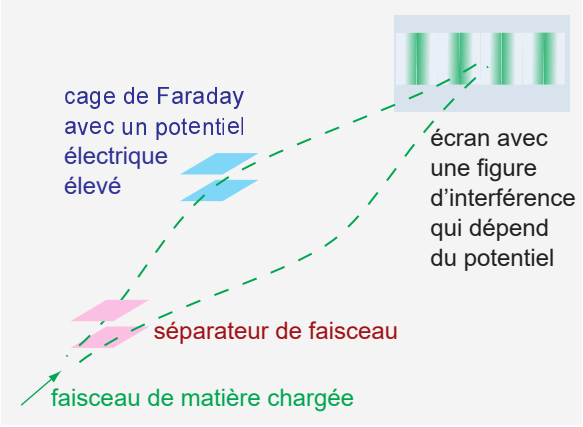


FIGURE 49 Un potentiel électrique localisé, placé dans un interféromètre, conduit à un décalage de la figure d'interférence.

Défi 75 e

mory» [N.d.T.]) n'existeront sans doute jamais. Pouvez-vous imaginer pourquoi? En fait, l'effet tunnel limite le fonctionnement de n'importe quelle mémoire, y compris celle de notre cerveau. En particulier, si nous avions une température bien plus élevée que 37 °C, nous ne nous souviendrions de rien!

Puisque la lumière est constituée de particule, elle peut également passer à travers les barrières de potentiel par effet tunnel. Les meilleurs (les plus hautes) barrières de potentiel pour la lumière sont les miroirs, qui ont des hauteurs de barrières de l'ordre d'un attojoule. L'effet tunnel implique que la lumière *peut* être détectée derrière n'importe quel miroir. On a en effet détecté ce que l'on appelle des ondes évanescentes, qui sont utilisées dans diverses appareils et expériences de haute précision.

La phase quantique

Nous avons vu que l'*amplitude* de la fonction d'onde (l'amplitude de probabilité) montre les mêmes effets que n'importe quelle onde: étalement et amortissement. Nous retournons maintenant vers la *phase* de la fonction d'onde et l'explorons plus en détails.

Alors que l'amplitude d'une fonction d'onde est facile à se représenter (pensez simplement à la densité d'un nuage réel, ou plus exactement à sa racine carrée) sa phase nécessite un peu plus d'efforts. Comme nous l'avons mentionné, les états (les fonctions d'onde) sont des *nuages ayant une phase locale*: ce sont des nuages de flèches tournantes, c.-à-d. des nuages d'objets qui tournent et peuvent être tournés. Dans le cas du nuage atmosphériques quotidien, une rotation locale des gouttelettes sur elles-mêmes n'a aucun effet sur le nuage. En revanche, en théorie quantique, la rotation locale du nuage, et donc le changement local de sa phase, a bien un effet mesurable. Explorons ce point.

Page 63

La phase des ondes de matière libre se comporte comme la phase des photons: elle évolue avec le temps, et donc, elle augmente le long du parcours d'une particule en mouvement. On peut se représenter la phase par une petite flèche tournante. La vitesse angulaire (que l'on appelle la pulsation [N.d.T.]) avec laquelle la phase tourne est donnée par la relation célèbre $\omega = E/\hbar$. En bref,

▷ On peut se représenter la fonction d'onde d'une particule quantique libre

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

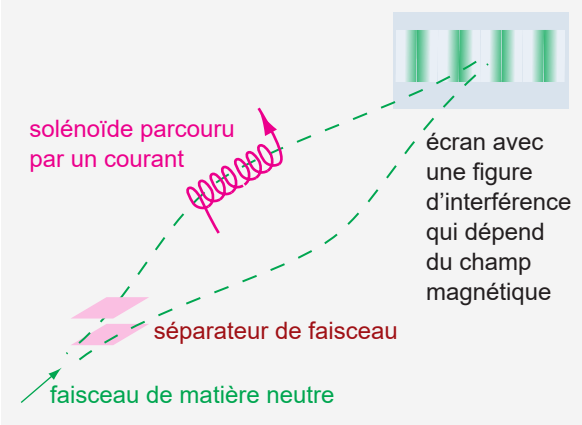


FIGURE 50 Les champs magnétiques modifient la phase d'une particule tournant sur elle-même.

par un nuage de flèches qui se déplace. Les flèches tournent à une fréquence constante alors que pendant ce temps, le nuage s'étale.

Par-dessus tout, la phase est l'aspect de la fonction d'onde qui conduit aux effets d'interférences. Lorsque deux fonctions d'ondes partielles sont séparées puis recombinées après un changement de phase relative, c'est le changement de phase qui déterminera la figure d'interférence. Ceci est à l'origine des observations d'interférences des faisceaux d'électrons que l'on voit sur la Figure 38. Sans la phase quantique, il n'y aurait pas d'atténuation et pas d'interférence.

La phase d'une fonction d'onde peut être influencée de nombreuses façons. Le moyen le plus simple est d'utiliser des champs électriques. Si la fonction d'onde d'une particule *chargée* est divisée en deux, et qu'une des parties est dirigée à travers une région où règne un champ électrique, un changement de phase va se produire. Le montage est présenté sur la Figure 49. Un changement périodique du potentiel électrique devrait conduire à un décalage périodique de la figure d'interférence. C'est en effet ce que l'on observe.

Un autre cas simple de manipulation de phase est présenté sur la Figure 50: un champ magnétique modifie également la phase d'une particule neutre tournant sur elle-même et contenant une distribution de charges. Il influence donc le comportement des interférences.

Ref. 57 Une expérience célèbre montre l'importance de la phase d'une façon encore plus surprenante: l'*effet Aharonov-Bohm*. L'effet est célèbre pour deux raisons: il est contre-intuitif et il a été prédit avant d'être observé. Regardez l'appareillage présenté sur la Figure 51. Une onde de matière de particules chargées est divisée en deux par un cylindre (positionné à angle droit par rapport à la trajectoire de la matière) et l'onde de matière se recombine derrière lui. À l'intérieur du cylindre se trouve un champ magnétique, alors qu'il n'y en a pas à l'extérieur. (Un moyen simple pour produire un tel cylindre est d'utiliser un solénoïde long.) La physique quantique prédit que l'on observera une figure d'interférence, et que la position des franges dépendra de la valeur du champ magnétique. Ceci se produit malgré le fait que l'onde n'entre jamais dans la région où se trouve le champ! Cet effet surprenant a été observé lors d'innombrables expériences.

L'explication de l'effet Aharonov-Bohm est simple: pour une particule chargée, la

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

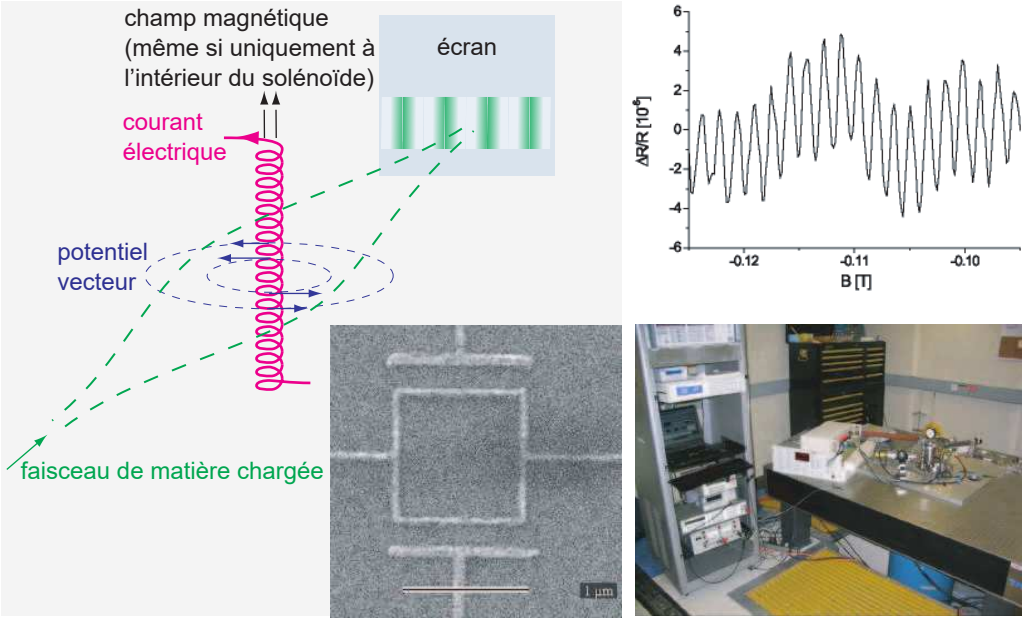


FIGURE 51 L'effet Aharonov-Bohm: l'influence du potentiel vecteur magnétique sur les interférences (à gauche) et une confirmation par la mesure (à droite), en utilisant un échantillon microscopique transportant des électrons dans des fils métalliques fins. (© Doru Cuturela)

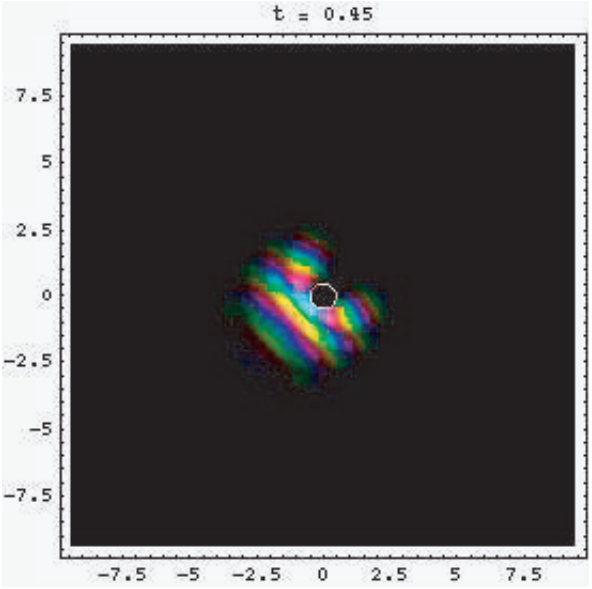


FIGURE 52 Le mouvement d'une fonction d'onde autour d'un solénoïde, montrant l'effet Aharonov-Bohm. La densité de l'état est représentée par la luminosité, et la phase locale est codée par la couleur. (Film QuickTime © Bernd Thaller)

phase d'une fonction d'onde est déterminée par le potentiel vecteur $\boldsymbol{A}$, et non pas par le champ magnétique $\boldsymbol{B}$. Le potentiel vecteur ne s'annule pas autour d'un solénoïde (comme on l'a vu dans la section sur l'électrodynamiques) mais circule autour. Cette

Vol. III, page 83

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

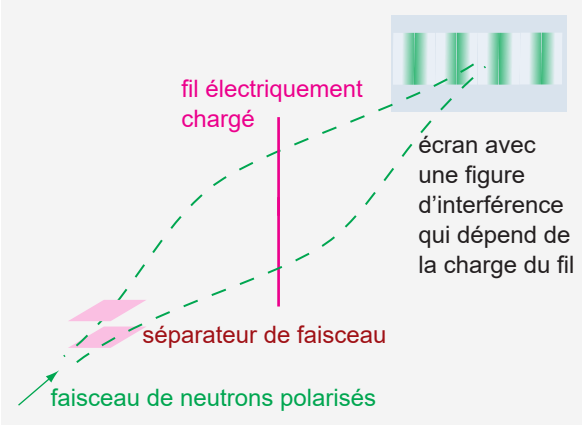


FIGURE 53 L'effet Aharonov-Casher: l'influence d'une charge sur la phase conduit à des interférences même lorsque ce sont des neutrons qui interfèrent.

circulation différencie les deux côtés du solénoïde et conduit à un décalage de phase (qui dépend en effet de la valeur du champ magnétique) pour produire ensuite des interférences, et ceci bien que la particule n'interagisse jamais avec le champ magnétique lui-même.

Un autre exemple de manipulation de phase est l'*effet Aharonov-Casher*, qui se produit même pour des particules neutres, pour autant qu'elles aient un moment magnétique, comme c'est le cas des neutrons. La phase d'un neutron *polarisé* va être influencée par un champ électrique, de sorte que le montage de la Figure 53 produira une figure d'interférences qui dépend du potentiel électrique que l'on applique.

Un autre cas de manipulation de phase sera présenté plus loin: les champs de gravitation peuvent également être utilisés pour faire tourner les fonctions d'ondes. Même l'accélération due à un mouvement de rotation est capable de le faire. En fait, il a été possible de mesurer la rotation de la Terre en observant le changement de la figure
Ref. 58 d'interférence d'un faisceau de neutrons.

Une autre catégorie d'expériences importantes qui manipulent la phase des fonctions d'ondes est possible en utilisant des phénomènes quantiques macroscopiques. En supraconductivité et en superfluidité, la phase de la fonction d'onde est régulièrement manipulée à l'aide de champs magnétiques et de champs électriques. Cette possibilité a de nombreuses applications techniques importantes. Par exemple, ce que l'on appelle l'*effet Josephson* est utilisé pour mesurer des différences de potentiels électriques en mesurant la fréquence des ondes radio émises. De même, ce que l'on appelle les *dispositifs supraconducteurs à interférence quantique* (ou DSIQ) sont utilisés pour mesurer des champs magnétiques minuscules.

Nous noterons que toutes ces expériences confirment qu'il n'est *pas possible* de mesurer la phase *absolue* d'une fonction d'onde. Cependant, il *est possible* de mesurer les *phases relatives* (les différences de phases ou les changements de phases). Pouvez-vous le
Défi 76 f confirmer?

Tous les effets de décalage de phase que nous venons de présenter ont été observés au cours de nombreuses expériences. La phase est un aspect essentiel de la fonction d'onde: c'est sa phase qui conduit aux interférences, et en tout premier lieu, elle est la raison principale pour lui avoir donner son nom de fonction d'*onde*. Comme pour n'importe quelle

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

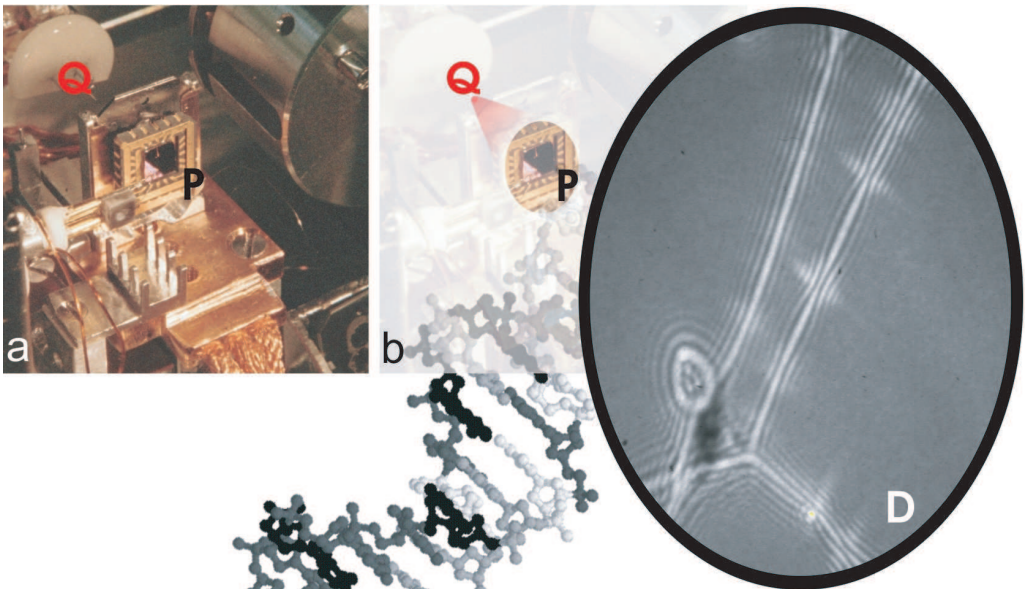


FIGURE 54 Un hologramme électronique de molécules d'ADN. (© Hans-Werner Fink/Wiley VCH)

onde, la phase évolue au cours du temps et elle peut être affectée par différentes influences extérieures. Par-dessus tout, les expériences montrent que l'on se fait une meilleure idée d'une particule quantique localisée (une pour laquelle l'étalement de la fonction d'onde peut être négligée) en se l'imaginant comme une flèche tournante. En revanche, chaque fois que l'étalement ne peut pas être négligée, on se fait une meilleure idée de la fonction d'onde en se l'imaginant comme une onde de flèches tournantes placées en chaque point de l'espace.

Deux faisceaux d'électrons peuvent-ils interférer? Y a-t-il des faisceaux d'électrons cohérents?

Existe-t-il des sources d'électrons cohérentes? La question est délicate. Certains résultats dans la littérature, tels que celui qu'illustre la Figure 54, établissent qu'il est possible de faire des hologrammes avec des faisceaux d'électrons.* Cependant, lorsque l'on demande à leurs auteurs ce qu'ils entendent par cohérence, ils répondent que la cohérence des électrons n'est que transversale, mais pas longitudinale. La cohérence transversale est déterminée par la taille possible des fronts d'onde ayant une phase donnée. La limite supérieure de cette taille est donnée par les interactions d'un tel état avec son environnement. Ce comportement est tel que l'on peut s'y attendre pour le cas d'une cohérence réelle.

Ref. 59

Cependant, le concept de «cohérence transversale» est inapproprié. La capacité à interférer avec soi-même, telle qu'on le sous-entend par le terme «cohérence transversale», n'est pas la définition correcte de la cohérence. La cohérence transversale, qu'elle soit pour des photons ou pour des particules de matière, exprime seulement la petitesse de la source de particules. Les petites lampes et les lasers permettent de produire des inter-

Ref. 60

* Les premiers hologrammes utilisant des faisceaux de neutrons ont été produits en 2002.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

férences lorsque le faisceau est divisé puis recombiné avec une longueur de trajectoire identique, et ceci n'est pas une preuve de la cohérence du champ lumineux. Un raisonnement similaire montre que la monochromaticité n'est pas non plus une preuve de cohérence.

Un état est dit *cohérent* s'il possède une phase bien définie en tous points d'un domaine donné d'espace ou de temps. La taille de la région spatiale ou de l'intervalle de temps défini le degré de cohérence. Cette définition conduit à des longueurs de cohérence de l'ordre de la taille de la source pour des petites sources «incohérentes». Même pour une petite longueur de cohérence, la taille d'une figure d'interférence (la distance d entre ses maximums) peut être bien plus grande que la longueur de cohérence l ou que la taille de la source s. En bref, la grande taille (ou la durée persistante dans le temps) d'une figure d'interférence n'est *pas* une preuve de cohérence en elle-même.

Rappelons la situation dans le cas de la lumière. Une source de lumière est cohérente si elle produit une onde sinusoïdale approximative sur une certaine distance ou au cours d'une certaine durée. À cause de la relation d'indétermination, dans n'importe quel faisceau de lumière cohérente, le nombre de photons est indéterminé. La même exigence s'applique aux faisceaux d'électrons cohérents: la cohérence nécessite que le nombre d'électrons soit indéterminé. Ceci n'est pas possible parce que les électrons transportent une charge qui se conserve. Les faisceaux d'électrons cohérents n'existent pas.

Page 52

En résumé, bien qu'un électron soit capable d'interférer avec lui-même, et bien qu'il soit possible de produire des interférences entre deux sources lumineuses, les interférences entre deux sources d'électrons sont impossibles. Et effectivement, personne n'a jamais réussi à produire des interférences entre deux sources d'électrons. Il n'y a pas de concept de cohérence, au sens conventionnel, pour les faisceaux d'électrons.

Le principe de moindre action en physique quantique

Dans la nature, le mouvement se produit d'un façon qui minimise le changement. En effet, en physique classique, le principe de moindre action (le principe de la paresse cosmique) établit que: dans la nature, le mouvement d'une particule se produit le long du chemin particulier (parmi tous les chemins possibles ayant les mêmes extrémités) pour lequel l'action est minimale. Ce principe de la paresse cosmique (ou de l'efficacité cosmique) a été établi mathématiquement en disant que dans la nature, la *variation* δS de l'action était nulle. La minimisation de l'action (du changement) explique toutes les équations d'évolution classiques. Nous transposons maintenant cette idée au domaine quantique.

Vol. I, page 253

Pour les systèmes quantiques, nous avons besoin de redéfinir à la fois le concept d'action et le concept de variation. Premièrement, il nous faut trouver une description de l'action qui soit basée sur des opérateurs. Deuxièmement, il nous faut définir la variation de l'action sans utiliser les chemins, parce que le concept de «chemin» n'existe pas pour les systèmes quantiques. Troisièmement, puisqu'il y a une action minimale dans la nature, la minimisation d'une variation n'est pas un concept clairement défini, et nous devons surmonter cet obstacle. Il existe deux façons principales pour atteindre cet objectif: on peut décrire le mouvement d'un système quantique comme une superposition de tous les chemins possibles, ou encore, on peut décrire l'action avec l'aide de fonctions d'ondes. Les deux approches sont équivalentes.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Avec la première approche, la *formulation de l'intégrale de chemin*, le mouvement d'une particule quantique est décrit comme une superposition démocratique des mouvements le long de tous les chemins possibles. (Plus haut, nous avons appelé cette approche le «modèle des flèches».) Le long de chaque chemin, l'évolution de la flèche est déterminée, puis, au point d'arrivée, les flèches de tous les chemins sont additionnées. Pour chaque chemin, l'action est le nombre de tours que la flèche effectue le long du chemin. Le résultat de cette approche est que le chemin le long duquel la flèche a fait le plus petit nombre de tours est en général (mais pas toujours!) le chemin le plus probable. Une étude plus précise montre que les systèmes macroscopiques classiques suivent, dans tous les cas, uniquement le chemin produisant l'action la plus petite, alors que les systèmes quantiques suivent tous les chemins.

Page 63

Dans la seconde approche de la physique quantique, l'action est définie à l'aide de fonctions d'ondes. En physique classique, nous avons défini l'action (le changement) comme étant l'intégrale temporelle du lagrangien entre le point initial et le point final. Le lagrangien lui-même est défini comme étant la différence entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle. En physique quantique, la définition la plus simple est celle de l'*action quantique* que l'on doit à Julian Schwinger. Appelons l'état initial et l'état final du système ψ_i et ψ_f. L'action S entre ces deux états est définie par

Vol. I, page 248

$$S = \langle \psi_i \,|\, \int L \,\mathrm{d}t \,|\, \psi_f \rangle \;, \tag{39}$$

où L est le lagrangien (l'opérateur lagrangien pour être rigoureux). Les parenthèses en forme d'équerres représentent la «multiplication» des états et des opérateurs telle qu'elle est définie en théorie quantique.* Pour simplifier, en théorie quantique, l'action (c.-à-d. le changement qui se produit dans un système) est également l'intégrale du lagrangien. L'opérateur lagrangien L est défini de la même façon qu'en physique classique: le lagrangien $L = T - V$ est la différence entre l'opérateur énergie cinétique T et l'opérateur énergie potentielle V. La seule nouveauté est qu'en physique quantique, les *variables* quantité de mouvement et position de la physique classique sont remplacées par les *opérateurs* correspondants de la physique quantique.**

Pour transposer le concept de variation de l'action δS au domaine quantique, Julian Schwinger a introduit l'expression simple

$$\delta S = \langle \psi_i \,|\, \delta \int L \,\mathrm{d}t \,|\, \psi_f \rangle \;. \tag{40}$$

Nous n'avons pas besoin du concept de chemin dans cette expression, puisque la variation de l'action est obtenue en faisant varier des fonctions d'onde au lieu de faire varier des chemins.

* Nous ne donnerons pas les détails de la notation et des mathématiques ici. Dans leur description la plus simple, les états sont des fonctions d'ondes, les opérateurs agissent sur ces fonctions, et le produit de deux parenthèses différentes est l'intégrale du produit des fonctions sur l'espace.

** Plus précisément, il existe également une condition qui gouverne l'ordre des opérateurs dans un produit mixte, de façon à prendre en compte la non-commutativité des opérateurs. Nous n'explorerons pas cette question ici.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

La dernière exigence classique que nous devons transposer au domaine quantique est que, parce que la nature est paresseuse, la variation de l'action doit s'annuler. Cependant, dans le domaine quantique, la variation de l'action ne peut pas être nulle, puisque l'action observable minimale est le quantum d'action. Comme Julian Schwinger le découvrit, il n'y a qu'un seul moyen possible pour exprimer cette exigence de minimalité de l'action:

$$\delta S = \langle \psi_i \,|\, \delta \int L \,\mathrm{d}t \,|\, \psi_f \rangle = -i\hbar\, \delta \langle \psi_i | \psi_f \rangle \ . \tag{41}$$

Ceci est ce que l'on appelle le *principe de l'action quantique* et il décrit tous les mouvements du domaine quantique. En physique classique, le membre de droite est nul (puisque $\hbar$ est pris égale à zéro) et on retrouve alors le principe classique d'action minimale $\delta S = 0$. Mais en théorie quantiques, chaque fois que l'on tente d'obtenir des petites variations, on est confronté au quantum d'action et aux changements de phase (relative). Ceci s'exprime par le membre de droite de l'expression. Ce membre de droite est la raison pour laquelle les équations d'évolution de la fonction d'onde (l'équation de Schrödinger pour les cas non relativistes sans spin, ou l'équation de Dirac pour les cas relativiste de spin 1/2) sont valables dans la nature.

Autrement dit, tout mouvement quantique (c.-à-d. l'évolution quantique d'un état ψ ou $|\psi\rangle$), se produit de telle façon que la variation de l'action soit égale à $-i$ multiplié par le quantum d'action $\hbar$, multiplié par la variation du produit scalaire entre l'état initial et l'état final. En termes simples, dans le mouvement réel, les états intermédiaires sont fixés par l'exigence qu'ils doivent conduire de l'état initial à l'état final avec le plus petit nombre de tours effectifs de la phase d'état. Le facteur $-i$ exprime que l'action dépend de la rotation de la fonction d'onde.

En résumé, le principe de moindre action est également valable en physique quantique, à condition de prendre en compte qu'il n'est pas possible de trouver des valeurs d'action plus petites que $\hbar$ lors des expériences. Le principe de moindre action gouverne l'évolution de la fonction d'onde. Le principe de moindre action explique donc la couleur de toutes les choses, toutes les autres sciences des matériaux, toute la chimie et toute la biologie, comme nous allons le voir dans ce qui suit.

Le mouvement des quantons avec spin

> “Everything turns.*”
>
> Anonyme

Quelle est l'origine de la phase quantique? La physique classique nous aide à répondre à la question. Tout comme les objets de la vie quotidienne, les quantons peuvent également tourner sur eux-mêmes autour d'un axe: on parle du *spin* de la particule. Mais si les particules quantiques peuvent tourner sur elles-mêmes, elles doivent posséder un moment cinétique. Et en effet, les expériences confirment cette déduction.

Page 93

En particulier, les électrons ont un spin. Tous les détails du spin de l'électron ont été déduits à partir des expériences de deux étudiants hollandais, George Uhlenbeck et Samuel Goudsmit, en 1925. Ils ont eu l'audace de publier ce que Ralph Kronig avait éga-

Ref. 61

* «Tout tourne.»

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

lement suspecté: que les électrons tournaient sur eux-mêmes autour d'un axe et que la projection du moment cinétique sur l'axe était donnée par $\hbar/2$. En fait, cette valeur, que l'on abrège souvent en «spin 1/2», est valide pour *toutes* les particules de *matière* élémentaires. (En revanche, toutes les particules élémentaires de *rayonnement* ont des valeurs de spin égales à $\hbar$, que l'on abrège en «spin 1».)

Si une particule qui tourne sur elle-même a un moment cinétique, il doit être possible d'en réarranger l'axe en lui appliquant un couple de forces, d'y observer une précession, de transférer le spin au cours de collisions, etc. Tous ces effets sont effectivement observés. Par exemple, l'expérience de Stern et Gerlach permet déjà toutes ces observations.
Page 94 La seule différence entre le spin d'une particule et le moment cinétique classique est que
Page 93 le spin d'une particule est quantifié, comme nous l'avons déduit plus haut.

Autrement dit, le *spin* L d'une particule quantique a toutes les propriétés d'une rotation autour d'un axe. Par conséquent, les particules quantiques *chargées*, tournant sur elles-mêmes, agissent comme des petits dipôles magnétiques (des aimants) orientés le long de l'axe de rotation. La force de l'aimant que l'on observe (le *moment magnétique*) est proportionnel au spin et au facteur de conversion $-e/2m_e$, comme on s'y attend en physique classique. Par conséquent, l'unité naturelle du moment magnétique de l'électron est la quantité $\mu_B = e\hbar/2m_e$, que l'on appelle le *magnéton de Bohr*. Il se trouve que le moment magnétique $\boldsymbol{\mu}$ des quantons se comporte différemment de celui des particules classiques. Les effets quantiques du spin sont décrits par ce que l'on nomme le *facteur de Landé* et que l'on note g,* qui est un nombre pur:

$$\boldsymbol{\mu} = g\frac{-e}{2m_e}\boldsymbol{L} = -g\mu_B\frac{\boldsymbol{L}}{\hbar}\,, \quad \text{avec} \quad \mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}\,. \tag{42}$$

À partir du spectre optique qu'ils ont observé, Uhlenbeck et Goudsmit ont déduit un
Page 120 facteur de Landé $g = 2$ pour l'électron. En physique classique, on s'attendrait à une
Ref. 62 valeur $g = 1$. La valeur expérimentale $g = 2$ a été expliquée par Llewellyn Thomas comme étant un effet relativiste, quelques mois après sa découverte expérimentale.

En 2004, les techniques expérimentales étaient devenues si sensibles qu'il devint possible de détecter l'effet magnétique du spin d'un seul électron attaché à une impureté (au sein d'un matériau autrement non magnétique). Les chercheurs espèrent aujourd'hui améliorer les microscopes dit «à force de résonance magnétique» jusqu'à ce qu'ils atteignent la résolution atomique.

En 1927, Wolfgang Pauli** découvrit comment introduire le spin 1/2 dans une description de la mécanique quantique: au lieu d'une fonction d'état décrite par un nombre

* En anglais, le facteur de Landé s'appelle tout simplement le «g-factor» [N.d.T.].

** Wolfgang Ernst Pauli (Vienne, 1900 – Zurich, 1958) écrivit, à l'âge de 21 ans, l'un des meilleurs textes sur les relativités restreint et générales. Il fut le premier à calculer les niveaux d'énergie de l'hydrogène en utilisant la théorie quantique, il découvrit le principe d'exclusion, il incorpora le spin dans la théorie quantique, il élucida la relation entre le spin et les statistiques, il démontra le théorème CPT, et il prédit le neutrino. Il était admiré pour son intelligence, et redouté pour ses critiques acerbes, qui lui valurent le surnom de «conscience de la physique». Malgré ce trait, il aida de nombreuses personnes dans leur recherche,
Ref. 63 tel que Heisenberg avec la théorie quantique, sans jamais s'attribuer le moindre mérite. Il était considéré par beaucoup, parmi lesquels Einstein, comme étant l'esprit le plus grand et le plus vif de la physique du XXe siècle. Il était également célèbre pour «l'effet Pauli», c.-à-d. sa capacité à déclencher des catastrophes dans les laboratoires, dans les machines et dans son entourage, du simple fait de sa présence. Comme nous

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

complexe unique, on a besoin d'une fonction d'état ayant *deux* composantes complexes. La raison de cette expansion est simple. En générale, la petite flèche tournante qui décrit un état quantique ne tourne *pas* autour d'un axe *fixe*, comme le suppose l'équation de Schrödinger. L'*axe de rotation* doit également être spécifié en chaque point de l'espace. Ceci implique que deux paramètres supplémentaires sont nécessaires en chaque point de l'espace, portant le nombre total de paramètres à quatre nombres réels, ou, de façon équivalente, à deux nombres complexes. De nos jours, l'équation de Pauli pour la mécanique quantique avec spin est principalement d'un intérêt conceptuel, parce que, comme celle de Schrödinger, elle n'est pas conforme avec la relativité restreinte.

En résumé, la description non relativiste d'un quanton avec spin implique l'utilisation d'une fonction d'onde qui spécifie *deux* nombres complexes en chaque point de l'espace et du temps. Le nombre complexe supplémentaire décrit le plan de rotation local du spin. L'idée d'introduire le plan de rotation local avait également été utilisée par Dirac lorsqu'il avait introduit la description relativiste de l'électron, et l'idée est également utilisée dans toutes les autres équations d'ondes pour des particule avec spin.

Les équations d'onde relativistes

En 1899, Max Planck avait découvert le quantum d'action. En 1905, Albert Einstein publiait la théorie de la relativité restreinte, qui était basée sur l'idée que la vitesse de la lumière c était indépendante de la vitesse de l'observateur. La première question que Planck se posa était de savoir si la valeur du quantum d'action pouvait être indépendante de la vitesse de l'observateur. C'est l'intérêt qu'il avait pour cette question qui le conduisit à inviter Einstein à Berlin. Par cette invitation, il rendit le clerc du bureau des patentes célèbre dans tout le monde de la physique.

Les expériences montrent que le quantum d'action est en effet indépendant de la vitesse de l'observateur. Tous les observateurs trouvent la même valeur minimale. Pour inclure la relativité restreinte dans la théorie quantique, il nous faut donc d'abord trouver l'hamiltonien quantique H correct, c.-à-d. l'opérateur énergie correct.

Pour une particule relativiste libre, la fonction hamiltonienne classique, c.-à-d. l'énergie de la particule, est donnée par

$$H = \pm\sqrt{c^4m^2 + c^2\boldsymbol{p}^2} \quad \text{avec} \quad \boldsymbol{p} = \gamma m\boldsymbol{v} \,. \tag{43}$$

On peut donc se demander quel est l'opérateur hamiltonien correspondant dans le monde quantique. La réponse la plus simple a été donnée, en 1949 par T.D. Newton et
Ref. 64 E.P. Wigner, et en 1950 par L.L. Foldy et S.A. Wouthuysen. L'opérateur est pratiquement le même:

$$H = \beta\sqrt{c^4m^2 + c^2\boldsymbol{p}^2} \quad \text{avec} \quad \beta = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} . \tag{44}$$

le verrons bientôt, on peut prétendre que Pauli reçu le prix Nobel de physique en 1945 (officiellement «pour la découverte du principe d'exclusion») pour finalement régler la question du nombre d'anges que l'on peut faire danser sur la pointe d'une épingle.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Les signes qui apparaissent dans l'opérateur matriciel β font la distinction, comme nous allons le voir, entre les particules et les antiparticules. Les nombres +1 et −1 apparaissent deux fois, pour prendre en compte les deux directions de spin possibles dans chacun des cas.

Avec cet opérateur hamiltonien relativiste pour les particules de spin 1/2 (ainsi que pour toutes les autres) la fonction d'onde est décrite par *quatre* nombres complexes, *deux* pour les particules et *deux* pour les antiparticules. Pourquoi? Nous avons vu plus haut qu'une particule quantique avec spin nécessitait deux composantes complexes pour son état. Ceci faisait suite à l'exigence de devoir spécifier, en tout point de l'espace, la longueur de la flèche, sa phase et son plan de rotation. Un peu plus tôt, nous avons également trouvé que la relativité introduisait automatiquement l'antimatière. (Nous explorerons ce point plus en détails un peu plus loin.) La matière et l'antimatière font donc toutes deux partie de n'importe quelle description relativiste des effets quantiques. La fonction d'onde d'une particule a des composantes d'antiparticules qui s'annulent, et vice versa. Au total, la fonction d'onde pour les particules relativistes de spin 1/2 a donc *quatre* composantes complexes.

Page 117
Vol. II, page 72
Page 217

L'opérateur hamiltonien conduit à l'opérateur vitesse $\boldsymbol{v}$ à partir de la même relation qui est valable en physique classique:

$$\boldsymbol{v} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{x} = \beta \frac{\boldsymbol{p}}{\sqrt{c^4 m^2 + c^2 \boldsymbol{p}^2}} \,. \tag{45}$$

Cet opérateur vitesse possède un ensemble continu de valeurs propres, entre $+c$ et $-c$. La vitesse $\boldsymbol{v}$ est une constante du mouvement, tout comme le sont la quantité de mouvement $\boldsymbol{p}$ et l'énergie

$$E = \sqrt{c^4 m^2 + c^2 \boldsymbol{p}^2} \,. \tag{46}$$

De même, le moment cinétique orbital $\boldsymbol{L}$ est défini comme en physique classique par,

$$\boldsymbol{L} = \boldsymbol{x} \times \boldsymbol{p} \,. \tag{47}$$

Le moment cinétique orbital $\boldsymbol{L}$ et le spin $\boldsymbol{\sigma}$ sont des constantes du mouvement distinctes. Une particule (ou une antiparticule) avec une composante de moment cinétique positive (ou négative) a une fonction d'onde avec seulement une composante non nulle, alors que les trois autres composantes s'annulent.

Ref. 65

Mais hélas, la représentation du mouvement relativiste nommée en l'honneur de Foldy et Wouthuysen, n'est pas des plus simples lorsqu'il s'agit de prendre en compte les interactions électromagnétiques. L'identité simple entre la description classique et celle de la mécanique quantique disparait lorsque l'on introduit l'électromagnétisme. Nous résoudrons ce problème plus loin, lorsque nous explorerons l'équation d'évolution de Dirac pour les fonctions d'onde relativistes.

Page 214

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Les mouvements liés, ou les quantons composites contre les quantons élémentaires

Quand peut-on dire qu'un objet est composite, et qu'il n'est pas élémentaire? Chaque fois qu'il contient des mouvements internes, ou liés. Dans quels cas cela se vérifie-t-il? La théorie quantique donne plusieurs réponses pragmatiques.

Le premier critère pour déterminer si une particule est composite est quelque peu étrange: un objet est un *composite* lorsque son rapport gyromagnétique est différent de celui prédit par l'électrodynamique quantique. Le *rapport gyromagnétique* γ (à ne pas confondre avec le facteur de dilatation relativiste) est défini comme étant le rapport entre le moment magnétique $\boldsymbol{M}$ et le moment cinétique $\boldsymbol{L}$:

Ref. 66
Page 214

$$\boldsymbol{M} = \gamma \boldsymbol{L} \,. \tag{48}$$

Le rapport gyromagnétique γ se mesure dans les unités $s^{-1}T^{-1}$ (c.-à-d. C/kg) et il détermine les niveaux d'énergie des particules magnétiques tournant sur elles-mêmes dans les champs magnétiques. On le retrouvera plus tard dans le contexte de l'imagerie par résonnance magnétique. Tous les candidats au qualificatif de particule élémentaire ont un spin 1/2. Le rapport gyromagnétique pour les particules de spin 1/2, de moment magnétique M et de masse m, peut s'écrire

Défi 77 f
Vol. V, page 162

$$\gamma = \frac{M}{\hbar/2} = g\frac{e}{2m} \,. \tag{49}$$

Le critère pour pouvoir être qualifié d'élémentaire peut donc se réduire à une condition sur la valeur du nombre sans dimension g, appelé le *facteur de Landé*. (L'expression $e\hbar/2m$ est souvent appelé le *magnéton* de la particule.) Si le facteur de Landé *diffère* de la valeur prédite par l'électrodynamique quantique pour les particules ponctuelles, qui est environ égal à $2,0$, alors l'objet est *composite*. Par exemple, un ion d'hélium $^4He^+$ a un spin 1/2 et une valeur pour g de $14,7 \cdot 10^3$. Le rayon de l'ion hélium est en effet de $3 \cdot 10^{-11}$ m, une valeur qui n'est évidemment pas infiniment petite, et l'ion est une entité composite. Pour le proton, on mesure un facteur de Landé d'environ $5,6$. Les expériences fournissent en effet une valeur non nulle pour le rayon du proton d'environ $0,9$ fm, et montrent qu'il contient plusieurs constituants.

Page 214

Le neutron, qui possède un moment magnétique bien qu'il soit électriquement neutre, se doit donc d'être composite. En effet, son rayon est approximativement le même que celui du proton. De façon similaire, les molécules, les montagnes, les étoiles et les gens doivent être composites. D'après ce premier critère, les seules particules élémentaires sont les *leptons* (c.-à-d. les électrons, les muons, les taus et les neutrinos), les *quarks* et les *bosons intermédiaires* (c.-à-d. les photons, les bosons W, les bosons Z et les gluons). Plus de détails concernant ces particules seront révélés au chapitre sur le noyau.

Vol. V, page 162

Un autre critère simple pour déterminer si une particule est composite vient juste d'être mentionné: *tout objet ayant une taille mesurable est composite*. Ce critère conduit à la même liste de particules élémentaires que le premier. En effet, les deux critères sont liés. Le modèle le plus simple pour les structures composites prédit que le facteur de

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Ref. 67 Landé obéit à

$$g - 2 = \frac{R}{\lambda_C} , \tag{50}$$

où R est le rayon et $\lambda_C = h/mc$ est la longueur d'onde de Compton du système. Cette expression est d'une précision surprenante pour les ions d'hélium-4, l'hélium-3, les ions tritium et les protons, comme vous pourriez vouloir le vérifier. Les tableaux de l'annexe B du prochain volume établissent la même conclusion. En bref, le deuxième critère pour déterminer si une particule est composite est équivalent au premier.

Défi 78 f

Vol. V, page 342

Un troisième critère pour déterminer si une particule est composite est plus général: *tout objet plus grand que sa longueur de Compton est un composite*. L'argument est simple. Un objet est composite s'il est possible d'y détecter un mouvement *interne*, c.-à-d. le mouvement de constituants. Or, l'action de n'importe quelle partie ayant une masse m_{part} se déplaçant à l'intérieur d'un système composite de taille r obéit à

$$S_{\text{part}} < 2\pi r\, m_{\text{part}}\, c < \pi r\, m\, c \tag{51}$$

où m est la masse de l'objet *composite*. D'autre part, si on suit le principe de la théorie quantique, cette action, pour être observable, doit être plus grande que $\hbar/2$. Si on introduit cette condition, on trouve que pour n'importe quel objet composite*

$$r > \frac{\hbar}{2\pi m\, c} . \tag{52}$$

Le membre de droite diffère seulement d'un facteur $4\pi^2$ de la *longueur (d'onde) de Compton* de l'objet

$$\lambda = \frac{h}{m\, c} . \tag{53}$$

Donc, n'importe quel objet *plus gros* que sa propre longueur d'onde de Compton est un composite, et n'importe quel objet *plus petit* que le membre de droite de l'équation (52) est élémentaire. Une fois de plus, seuls les leptons, les quarks et les bosons intermédiaires réussissent le test. (Pour le *boson de Higgs* découvert en 2012, le test n'a pas encore été réalisé, mais on s'attend à ce qu'il se conforme également.) Tous les autres objets sont des composites. En bref, le troisième critère produit la même liste que les deux premiers. Pouvez-vous expliquer pourquoi?

Défi 80 f

Un quatrième critère pour déterminer si une particule est composite est régulièrement cité par Steven Weinberg: une particule est élémentaire si elle apparaît dans le lagrangien du modèle standard de la physique des particules, c.-à-d. dans la description des éléments constitutifs fondamentaux de la nature. Pouvez-vous montrer que ce critère se déduit des précédents?

Vol. V, page 261

Défi 81 e

Il est intéressant de noter que nous n'en avons pas encore terminé avec ce sujet. Des affirmations encore plus étranges concernant la distinction entre particules composites

Défi 79 pe

* Pouvez-vous trouver où est passé le facteur 2 manquant? Et est-ce que l'hypothèse qui prétend que les constituants doivent toujours être plus légers que le composite est valable?

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

et particules élémentaires apparaitrons lorsque nous prendrons en compte la gravité. Essayez de patienter, cela en vaut la peine.

Vol. VI, page 313

Curiosités et défis amusants concernant le mouvement quantique de la matière

> Die meisten Physiker sind sehr naiv, sie glauben immer noch an wirkliche Wellen oder Teilchen.*
>
> Anton Zeilinger

Prenez la lame d'un couteau la plus aiguisée ou la pointe d'une aiguille la plus fine que vous puissiez imaginer: le quantum d'action implique que leurs contours ne sont pas nets, mais qu'ils sont flous, comme les contours d'un nuage. Prenez l'objet le plus dur et le plus solide que vous puissiez imaginer, tel qu'un diamant ou un morceau de tungstène: le quantum d'action implique que sa surface est plus ou moins molle. Toutes les expériences confirment ces affirmations. *Rien dans la nature n'est vraiment net et tranchant ou vraiment solide*. La physique quantique n'est donc pas d'accord avec plusieurs des idées des atomistes de la Grèce antique.

* *

Est-ce que les atomes d'hydrogène existent? La plupart des types d'atomes ont été imagés à l'aide de microscopes, photographiés sous éclairage, lévités un par un, et même déplacés un par un avec des aiguilles, comme le montre l'image de la page 344 du volume I. Des chercheurs ont même fait se déplacer des atomes individuels en utilisant des faisceaux laser pour les pousser. Cependant, aucune de ces expériences n'a mesuré ou visualisé des atomes d'hydrogène. Est-ce une raison pour douter de l'existence des atomes d'hydrogène? Cette discussion ne semble pas très sérieuse, mais la prendre au sérieux peut s'avérer très amusant.

Ref. 68

Défi 82 e

* *

Est-ce que la fonction d'onde est «réelles»? Plus précisément, est-ce que la fonction d'onde est réellement un nuage? Quelques physiciens en doutent encore. Ce groupe de physiciens, de moins en moins nombreux et souvent nés vers le milieu du XXe siècle, ont entendu dire si souvent (incorrectement et généralement par des autorités douteuses) qu'une fonction d'onde n'avait pas de réalité, qu'ils ont tout simplement arrêté de se poser les questions les plus simples, et d'y répondre. Pour dissiper leurs doutes, demandez-leurs s'ils ont une taille non nulle ou s'ils pensent que les atomes sont ronds. S'ils sont d'accord, ils doivent admettre que les fonctions d'ondes ont une part de réalité. Tous les objets de la vie quotidienne sont constitués de particules élémentaires qui sont si petites que leur taille n'est même pas mesurable, de sorte que l'on peut les qualifier de particules ponctuelles. Donc, la taille, la surface et le volume de tous les objets de notre quotidien sont exclusivement dus aux fonctions d'ondes. Toutes les longueurs, toutes les surfaces et tous les volumes sont des preuves que les fonctions d'ondes ont une part de réalité.

Défi 83 f

* «La plupart des physiciens sont très naïfs, ils croient encore aux vraies ondes ou aux vraies particules.» Anton Zeilinger, physicien à l'Université de Vienne, est réputé pour ces expériences en mécanique quantiques.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

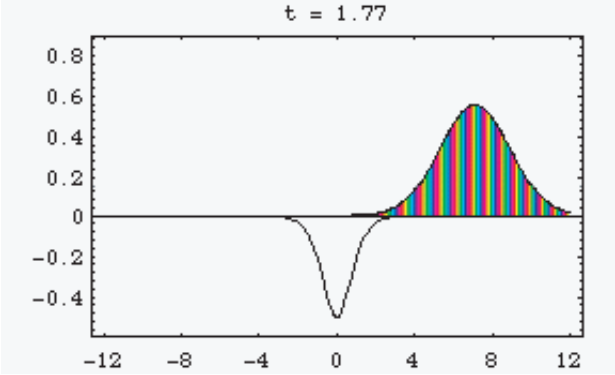


FIGURE 55 Un puits de potentiel spécial qui ne perturbe *pas* une fonction d'onde. La couleur indique la phase. (Film QuickTime © Bernd Thaller)

* *

Deux observables peuvent commuter pour deux raisons différentes: soit elles sont très *similaires* (telles que la coordonnée x et la grandeur x^2) soit elles sont très *différentes* (telles que la coordonnée x et la quantité de mouvement p_y). Pouvez-vous donner une explication à cela?

Défi 84 d

* *

Les translations d'espace et de temps commutent. Mais alors, pourquoi est-ce que l'opérateur quantité de mouvement et l'hamiltonien ne commutent-ils pas en générale?

Défi 85 pe

* *

Il existe des potentiels spéciaux qui n'ont *pas* d'influence sur une fonction d'onde. La Figure 55 en montre un exemple. Ce potentiel a un coefficient de réflexion nul à toutes les énergies; l'onde diffusée n'a pas de partie réfléchie. La raison mathématique est fascinante. Le puits de potentiel a la forme d'un soliton de l'équation de Korteweg-de Vries. Cette équation a un lien avec l'équation de Schrödinger.

* *

Tout système lié dans un état non relativiste et n'ayant pas de moment cinétique, obéit à la relation

Ref. 69

$$\langle r^2 \rangle \, \langle T \rangle \;\geqslant \frac{9\hbar^2}{8m} \,, \tag{54}$$

où m est la masse réduite, T est l'énergie cinétique des constituants et r est la taille du système. Pouvez-vous déduire ce résultat et le vérifier dans le cas de l'état fondamental de l'hydrogène?

Défi 86 e

* *

Au lycée, il est souvent logique de se représenter les fonctions d'onde des électrons comme un type particulier de matière fluide, que l'on appelle l'*électronium* et dont la densité de charge est négative. Dans cette représentation, un atome est un noyau posi-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

tif entouré par un nuage d'électronium. Déformer le nuage d'électronium autour d'un noyau nécessite de l'énergie. Cela se produit par exemple lorsqu'un photon ayant la bonne fréquence est absorbé. Lorsque des atomes de types compatibles s'approchent les uns des autres, les nuages d'électronium forment souvent des ponts stables (des liaisons chimiques).

* *

La théorie quantique autorise de nombreux états liés inhabituels. En général, lorsque l'on pense à des états liés on pense à des états de basses énergies. Mais il existe des situations pour lesquelles les états liés surviennent en raison de contraintes externes par des potentiels oscillants. Nous avons rencontré une telle situation en physique classique: le pendule renversé, entrainé verticalement et qui reste vertical bien qu'il soit dans une configuration instable. Des situations similaires se produisent également en physique quantique. Des exemples sont les pièges de Paul, l'atome d'hélium, les ions négatifs, les *électrons troyens* et les accélérateurs de particules.

Vol. I, page 319

Ref. 70

* *

On lit souvent que l'Univers aurait pu naître à partir d'une fluctuation quantique. Pouvez-vous expliquer pourquoi cette affirmation n'a aucun sens?

Défi 87 e

Un résumé sur le mouvement des quantons de matière

En résumé, le mouvement des quantons massiques, c.-à-d. des particules de matière quantiques, peut se décrire de deux façons:

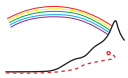
— Sous un fort grossissement, les particules de matière quantiques sont décrites par des fonctions d'onde qui se déplacent comme *des nuages de flèches, qui avancent, qui tournent sur elles-mêmes et qui subissent une précession*. L'orientation locale du nuage (la phase locale) suit un mouvement d'oscillation. Le carré de la fonction d'onde, c.-à-d. la densité du nuage, est la probabilité de trouver la particule en un lieu donné.
— Lorsqu'on la regarde de loin, avec un grossissement faible, une particule quantique massique qui se déplace se comporte comme *une flèche unique qui avance, qui tourne et qui subit une précession*. Les détails de la rotation et de la précession de la flèche dépendent de l'énergie et de la quantité de mouvement de la particule ainsi que du potentiel auquel elle est soumise. La flèche est une amplitude de probabilité: le carré de la longueur de la flèche est la probabilité d'observer la particule. Si une particule peut se rendre d'un point de départ à un point d'arrivé par plusieurs chemins, les amplitudes de probabilité de chaque chemin s'additionnent

La flèche tournante unique est le résultat d'une moyenne sur le nuage. La flèche unique combine les propriétés d'une particule et d'une onde. Une rotation complète de la flèche correspond au quantum d'action $\hbar$. Cette caractéristique centrale implique qu'une particule non relativiste dont le spin peut être négligé, suit l'équation de Schrödinger, et qu'un électron relativiste suit l'équation de Dirac. L'équation de Dirac est en accord avec toutes les expériences connues. En particulier, l'équation de Dirac décrit toute la

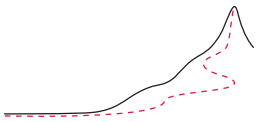
Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

science des matériaux, toute la chimie et toute la biologie, comme on va le découvrir.

Pour continuer le plus efficacement possible sur notre chemin à travers la physique quantique, nous explorons maintenant trois sujets importants: l'indistinguabilité des particules de même type, le spin des particules quantiques et la signification des probabilités.



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net



Chapitre 5

La permutation des particules – les particules sont-elles comme les gants?

Pourquoi sommes-nous capables de distinguer deux jumeaux l'un de l'autre? Pourquoi pouvons-nous distinguer ce qui se ressemble, telle qu'une copie de son original? La plupart d'entre nous sommes convaincus que chaque fois que l'on compare un original avec une copie, il est possible de trouver une différence. Cette conviction se trouve être également correcte dans le domaine quantique, mais la conclusion n'est pas aussi simple.

Pensez à n'importe quelle méthode qui vous permette de distinguer des objets: vous
Défi 88 e constaterez que cela pose des problèmes lorsqu'il s'agit de particules ponctuelles. Donc, dans le domaine quantique, quelque chose doit changer en ce qui concerne notre capacité à distinguer les particules et les objets.

Nous pourrions argumenter qu'il est toujours possible d'éliminer la différence entre un objet original et sa copie: il devrait être suffisant d'utiliser le même nombre et le même type d'atomes. En fait, le quantum d'action montre que cela n'est pas suffisant, bien que tous les atomes d'un même type soient en effet des copies indistinguables les unes des autres! Dans ce qui suit, nous explorons les conséquences les plus importantes de l'indistinguabilité des atomes et de la distinguabilité des objets macroscopiques sur le mouvement.

Différencier les objets macroscopiques

Quelques-unes des propriétés importantes des objets sont mises en évidence en étudiant un casse-tête combinatoire: le *problème du gant*. Il pose la question:

> Combien de gants chirurgicaux (de la main droite) sont nécessaires si m médecins doivent opérer w malades en respectant les règles d'hygiène, afin que personne n'entre en contact avec les fluides corporels de quelqu'un d'autre?

Le même problème apparaît également dans d'autres situations. Par exemple, il
Ref. 71 s'applique aux ordinateurs, avec les interfaces et les virus informatiques ou aux préservatifs, avec les hommes et les femmes (il est alors appelé le *problème du préservatif*). Pour être clair, le nombre optimal de gants n'est *pas* le produit mw. En fait, le problème se divise en trois cas.

— Le cas simple où $m = w = 2$ fournit déjà les idées les plus importantes dont on a
Défi 89 e besoin. Pouvez-vous trouver la solution optimale ainsi que la procédure?
Défi 90 f — Dans le cas où $w = 1$ et m est impaire, la solution est $(m + 1)/2$ gants. L'expression

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

similaire $(w+1)/2$ est valable pour le cas où $m = 1$ et w est impaire. C'est la solution optimale, comme vous pouvez facilement le vérifier vous-même.

— Une solution avec une procédure simple pour toutes les autres situations est donnée par $\lceil 2w/3 + m/2 \rceil$ gants, où $\lceil x \rceil$ signifie le plus petit entier supérieur ou égale à x. Par exemple, pour deux docteurs et trois malades, cela fait seulement trois gants. (Cependant, cette formule ne donne pas toujours la solution optimale, et des solutions meilleures existent dans certains cas.)

Ref. 72

Défi 91 f

Amusez-vous à résoudre ce casse-tête. Vous constaterez que trois propriétés fondamentales des gants déterminent la solution. Premièrement, les gants ont deux faces, une intérieure et une extérieure, qui peuvent être distinguées l'une de l'autre. Deuxièmement, les gants que l'on tourne à l'envers, inversent leur caractère droite/gauche et peuvent donc être distingués des gants qui n'ont pas été inversés. Troisièmement, les gants sont distinguables les uns des autres.

Maintenant, nous retournons à notre objectif initial: est-ce que les trois propriétés fondamentales des gants s'appliquent également aux particules quantiques? Nous explorerons la question de la double face des particules quantiques lors de la dernière partie de notre ascension de la montagne. La question de savoir si les particules peuvent être tournées à l'envers sera importante pour leur description et pour leur mouvement. Nous explorerons aussi la différence entre les particules à hélicité droites et les particules à hélicité gauches, mais seulement dans la prochaine partie de notre aventure. Dans ce chapitre nous nous concentrons sur le troisième problème, à savoir si les objets et les particules peuvent toujours être distinguées de leurs copies. Nous découvrirons que les particules *élémentaires* ne se comportent pas comme des gants, mais d'une manière beaucoup plus surprenante.

Vol. VI, page 114

Vol. V, page 245

Dans la vie quotidienne, la distinction des objets macroscopique peut se faire de deux façons. D'une part, nous sommes capables de distinguer les objets (ou les gens) les uns des autres parce qu'ils diffèrent par leurs *propriétés intrinsèques*, telles que leur masse, leur couleur, leur taille ou leur forme. D'autre part, nous sommes capables de distinguer les objets même s'ils ont les mêmes propriétés intrinsèques. N'importe quelle partie de billard nous renseigne qu'il est possible de distinguer une boule parmi les autres simplement en suivant sa trajectoire. En bref, nous pouvons distinguer des objets ayant des propriétés identiques en utilisant aussi leur *état*.

L'état d'une boule de billard est donné par sa position, sa quantité de mouvement et son moment cinétique. Nous pouvons distinguer deux boules de billard identiques parce que l'erreur sur la mesure de la position de chaque boule est bien plus petite que la taille de la boule elle-même. Le fait que deux boules de billard aient des états différents permet de suivre chaque boule. Cependant, dans le domaine microscopique, ceci n'est pas possible! Prenons deux atomes d'un même type. Ces deux atomes ont exactement les mêmes propriétés intrinsèques. Pour être capable de les distinguer lors des collisions, nous avons besoin de suivre leur mouvement. Mais à cause du quantum d'action et de la relation d'indétermination qui en découle, nous avons aucune chance de pouvoir le faire. En fait, une expérience simple, qui remonte au XIXe siècle, a montré que la nature elle-même n'était pas capable de le faire! Ce résultat fondamental a été découvert en étudiant des systèmes constitués de grands nombres d'atomes d'un même type et qui s'entrechoquent: les *gaz*.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Distinguer les atomes

Vol. I, page 402 Quelle est l'entropie d'un gaz? Le calcul de l'entropie S d'un *gaz simple*, constitué de N particules simples* de masse m et se déplaçant dans un volume V, donne

$$\frac{S}{kN} = \ln\left[\frac{V}{\Lambda^3}\right] + \frac{3}{2} + \frac{\ln\alpha}{N} \,. \tag{55}$$

Ici, k est la constante de Boltzmann, ln est le logarithme népérien et $\Lambda = \sqrt{2\pi\hbar^2/mkT}$ est la longueur d'onde thermique (approximativement la longueur d'onde de de Broglie des particules qui composent le gaz), où T est la température. Dans ce résultat, le nombre pur α est égale à 1 si les particules sont distinguables comme les boules de billard, et il est Défi 92 f égale à $1/N!$ si elles ne sont pas distinguables du tout. Mesurer l'entropie d'un gaz simple nous permet donc de déterminer α et donc de tester expérimentalement si les particules sont distinguables.

Il se trouve que seul le deuxième cas, $\alpha = 1/N!$, décrit la nature. Nous pouvons le vérifier Défi 93 f facilement sans même avoir besoin de faire la mesure: ce n'est que dans le deuxième cas que l'entropie des volumes de deux gaz identiques s'*additionne*.** Le résultat, souvent appelé le *paradoxe de Gibbs****, démontre donc que les composants microscopiques de Ref. 73 la matière sont *indistinguables*: dans un système de particules quantiques (qu'elles soient des électrons, des protons, des atomes ou des petites molécules) il n'y a pas moyen de distinguer une particule parmi les autres.

L'indistinguabilité des particules est donc une propriété expérimentale de la nature. Elle est valide sans exception. Par exemple, quand la radioactivité a été découverte, les gens pensaient qu'elle contredisait l'indistinguabilité des atomes, parce que la désintégration semblait cibler certains atomes par rapport à d'autres. Mais la théorie quantique montra alors que cela n'était pas le cas et que même les atomes et les molécules étaient indistinguables.

Puisque $\hbar$ apparaît dans l'expression de l'entropie, l'indistinguabilité est un effet quantique. En effet, l'indistinguabilité ne joue aucun rôle si les effets quantiques sont négligeables, tel que dans le cas des boules de billard. Néanmoins, l'indistinguabilité est importante dans la vie quotidienne. Nous découvrirons que les propriétés de la matière

* Des particules sont *simples* si elles sont entièrement décrites par leur quantité de mouvement et leur position. Les atomes sont des particules simples. Les molécules ne sont pas simples, car elles sont également décrites par leur orientation.

** En effet, les valeurs de l'entropie que l'on observe lors des expériences, pour un gaz monoatomique, sont Défi 94 d données par la formule dite de Sackur-Tetrode

$$\frac{S}{kN} = \ln\left[\frac{V}{N\Lambda^3}\right] + \frac{5}{2} \tag{56}$$

qui est obtenue en insérant $\alpha = 1/N!$ ci-dessus. Elle a été déduite indépendamment par le physicien allemand Otto Sackur (1880 – 1914) et par le physicien hollandais Hugo Tetrode (1895 – 1931). Notez que le paramètre essentiel est le rapport entre V/N, le volume classique par particule, et Λ^3, le volume de de Broglie d'une particule quantique.

*** Josiah Willard Gibbs (1839 – 1903), physicien des États-Unis qui a été, avec Maxwell et Planck, l'un des trois fondateurs de la mécanique statistique et de la thermodynamique. Il a introduit le concept d'*ensemble* et le terme de «*phase thermodynamique*».

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net



FIGURE 56 Willard Gibbs (1839 – 1903)

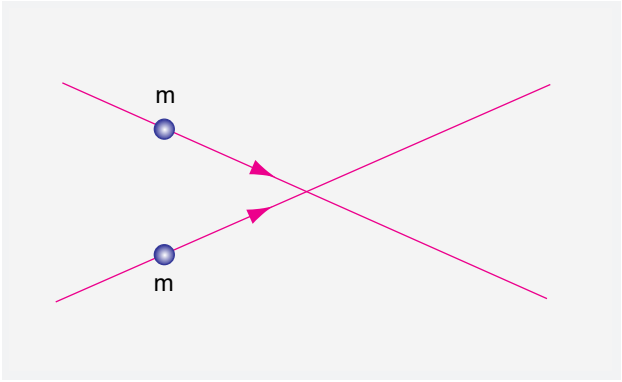


FIGURE 57 Des objets identiques dont les trajectoires se croisent.

du quotidien (les plasmas, les gaz, les liquides et les solides) seraient complètement différentes sans l'indistinguabilité. Par exemple, nous découvrirons que sans elle, les couteaux et les épées ne couperaient pas. De plus, le sol ne pourrait pas supporter notre poids, nous passerions directement à travers. Pour étayer plus en détails le problème, nous explorons la question suivante.

Pourquoi l'indistinguabilité apparaît-elle dans la nature?

Prenez deux particules quantiques ayant la même masse, la même composition et la même forme, tels que deux atomes du même type. Imaginez que leurs trajectoires se croisent et qu'en leur point de rencontre, elles s'approchent l'une de l'autre à une courte distance, comme le montre la Figure 57. Dans un gaz, cela peut être par exemple des collisions entre atomes ou bien lorsque deux atomes se manquent de justesse. Or, toutes les expériences jamais réalisées montrent qu'à de courtes distances, il est impossible de dire si les deux quantons ont interverti leur rôle ou non.

▷ Dans un gaz, il est *impossible* de suivre les particules quantiques en mouvement et de déterminer laquelle est l'une et laquelle est l'autre. Suivre des quantons qui entrent en collision est impossible.

L'impossibilité de distinguer des particules proches est une conséquence directe du

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

quantum d'action $\hbar$. Pour une trajectoire qui fait passer deux particules qui s'approchent très près l'une de l'autre, une inversion des rôles ne nécessiterait qu'une petite quantité de changement, c.-à-d. une petite action (physique). Mais nous savons qu'il y a une action observable minimale dans la nature. Pouvoir suivre la trace de chaque particule quantique à de petites distances nécessiterait une valeur d'action *plus petite* que le quantum d'action. L'existence du quantum d'action rend donc impossible le suivi des particules quantiques lorsqu'elles s'approchent trop près les unes des autres. Toute description de systèmes comportant plusieurs quantons doit donc prendre en compte le fait qu'après une rencontre rapprochée il est impossible de distinguer deux quantons l'un de l'autre.

Si on se souvient que la théorie quantique décrit les quantons comme étant des nuages, l'indistinguabilité apparaît encore plus naturelle. Chaque fois que deux nuages se rencontrent puis se séparent à nouveau, il est impossible de dire lequel est l'un et lequel est l'autre. D'un autre côté, si deux particules sont maintenues à une distance suffisante l'une de l'autre, la distinguabilité est bien réelle. L'indistinguabilité n'apparaît donc que lorsque les particules s'approchent de près.

En bref, l'indistinguabilité est une conséquence naturelle et inévitable de l'existence d'une valeur d'action minimale dans la nature. Ce résultat nous conduit directement vers la question suivante.

Est-il possible de compter les particules quantiques?

Dans la vie quotidienne, il est possible de compter les objets parce que nous pouvons les distinguer. Puisque les particules quantiques ne peuvent pas toujours être distinguées, il nous faut faire preuve de vigilance lorsque nous décidons de la façon de les compter. La première étape lorsque l'on veut compter des particules est de définir ce que l'on entend par une situation sans aucune particule du tout. Cela semble une chose facile à faire, mais nous rencontrerons plus loin des situations pour lesquelles cette étape fait déjà face à des difficultés. Mais dans tous les cas, la première étape pour pouvoir compter est donc de *spécifier ce qu'est le vide*. N'importe quelle méthode de comptage nécessite que la situation sans particule soit traitée séparément des situations avec particules.

La deuxième étape nécessaire au comptage est la spécification d'une observable utile à la détermination du nombre de particules quantiques. Le moyen le plus simple est de choisir un des nombres quantiques conservatifs qui s'additionnent lors des compositions, telle que la charge électrique. Le comptage en lui-même est alors réalisé en mesurant la charge totale et en divisant par l'unité de charge.

Dans la vie quotidienne, le poids (la masse) est couramment utilisé comme observable. Cependant, en général, on ne peut pas l'utiliser dans le domaine quantique, excepté pour des cas simples. Dans les cas comportant un grand nombre de particules, l'énergie d'interaction introduit des erreurs. Si le nombre de particules est encore plus grand, l'énergie de liaison gravitationnelle cause également des problèmes. Mais pardessus tout, pour les phénomènes transitoires (les particules instables ou les temps de mesure courts) les mesures de masses montrent leurs limites. En bref, même si compter des atomes stables en mesurant leur masse est possible dans la vie quotidienne, la méthode n'est pas applicable en général. En particulier, elle ne peut pas s'appliquer aux particules de hautes énergies.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Compter à l'aide de nombres quantiques conservatifs à plusieurs avantages. Premièrement, cela fonctionne aussi pour les phénomènes transitoires (les particules instables ou les temps de mesure courts). Deuxièmement, que les particules soient distinguables ou non n'a pas d'importance et le comptage marche toujours. Troisièmement, les particules virtuelles ne sont pas comptées. Ce fait est le bienvenu, comme nous le verrons, parce que dans le cas des particules virtuelles, c.-à-d. les particules pour lesquelles $E^2 \neq p^2c^2 + m^2c^4$, il n'y a, de toute façon, *aucun moyen* de définir un nombre de particules. L'utilisation d'une grandeur qui se conserve est donc en effet la meilleure méthode possible pour compter des particules.

Vol. II, page 72
Vol. V, page 127
Vol. II, page 72

L'effet indésirable lorsque l'on compte à l'aide de nombres quantiques est que les antiparticules sont comptées négativement! Cette conséquence est également due au quantum d'action. Nous avons vu plus haut que le quantum d'action impliquait que même dans le vide, des paires de particules-antiparticules étaient observées aux énergies suffisamment élevées. Par conséquent, une antiparticule doit être comptée comme moins une particule. Autrement dit, n'importe quel moyen utilisé pour compter les particules quantiques peut produire une erreur à cause de cet effet. Dans la vie quotidienne cette limitation ne joue aucun rôle, parce qu'il n'y a pas d'antimatière autour de nous. Cependant, elle joue bel et bien un rôle aux énergies plus élevées. Il se trouve qu'il n'existe pas de méthode générale pour compter séparément le nombre exact de particules et d'antiparticules; seule la somme peut être déterminée. En bref, la théorie quantique montre que le comptage des particules n'est jamais parfait.

En résumé, la nature nous fournit effectivement un moyen pour compter les particules quantiques même s'il n'est pas possible de les distinguer, mais seulement dans les conditions de la vie quotidienne, aux basses énergies. À cause du quantum d'action, les antiparticules sont comptées négativement. Les antiparticules représentent donc une limite au comptage des particules de hautes énergies, lorsque l'équivalence masse-énergie devient importante.

Qu'est-ce que la symétrie de permutation?

Puisque les particules quantiques sont dénombrables mais qu'elles sont indistinguable, il existe une symétrie de la nature pour les systèmes composés de plusieurs quantons identiques. La *symétrie de permutation*, également appelée *symétrie d'échange*, est la propriété de la nature qui fait que les observations sont inchangées après un échange de particules identiques. La symétrie de permutation constitue l'un des quatre piliers de la théorie quantique, avec la symétrie d'espace-temps, la symétrie de jauge et la symétrie de renormalisation que nous n'avons pas encore rencontrée. La symétrie de permutation est une propriété des systèmes *composites*, c.-à-d. des systèmes composés de nombreux sous-systèmes (identiques). Ce n'est que dans le cas de ces systèmes que l'indistinguabilité joue un rôle.

Autrement dit, «indistinguable» n'est pas la même chose que «identique». Deux particules quantiques d'un même type ne sont pas les *mêmes*, elles sont plutôt comme deux copies exactes l'une de l'autre. D'autre part, l'expérience de la vie quotidienne nous montre que deux copies peuvent toujours être différenciées par une inspection minutieuse, de sorte que le terme «copie» n'est pas totalement approprié non plus.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

▷ Les quantons (les particules quantiques) sont dénombrables et totalement indistinguables.* Les particules quantiques sont des *copies parfaites* les unes des autres.

Étant des copies parfaites, même la nature ne peut pas distinguer les particules. Par conséquent, la symétrie de permutation apparaît.

Dans le chapitre suivant, nous découvrirons qu'une permutation est une rotation partielle. La symétrie de permutation est donc une symétrie par rapport aux rotations partielles. Pouvez-vous trouver pourquoi?

Défi 95 f

L'indistinguabilité et la symétrie de la fonction d'onde

L'indistinguabilité des particules quantiques conduit à des conclusions importantes concernant la description de leur état de mouvement. La raison en est qu'il est impossible, dès le départ, de formuler une description du mouvement qui incorpore l'indistinguabilité. (Pouvez-vous confirmer cela?) Il nous faut décrire un état à n particules avec un état $\Psi_{1\dots i\dots j\dots n}$ qui suppose que la distinction soit possible, comme l'exprime l'ordre des indices dans la notation, et introduire ensuite l'indistinguabilité.

Défi 96 e

L'indistinguabilité (la symétrie de permutation) signifie que l'échange de deux particules quantiques quelconques produit les mêmes observations physiques.** Or, deux états quantiques ont les mêmes propriétés physiques s'ils diffèrent au mieux par un facteur de phase. L'indistinguabilité nécessite donc que

$$\Psi_{1\dots i\dots j\dots n} = \mathrm{e}^{i\alpha}\, \Psi_{1\dots j\dots i\dots n} \tag{57}$$

pour un angle α inconnu. Si on applique cette expression deux fois, en échangeant à nouveau le même couple d'indices, on en conclut que $\mathrm{e}^{2i\alpha} = 1$. Ceci implique que

$$\Psi_{1\dots i\dots j\dots n} = \pm\, \Psi_{1\dots j\dots i\dots n}\,. \tag{58}$$

Autrement dit, une fonction d'onde est soit *symétrique* soit *antisymétrique* par rapport à l'échange d'indices. (Nous pouvons dire également que la valeur propre de l'opérateur d'échange est soit +1 soit −1.)

▷ La théorie quantique prédit donc que les particules quantiques ont deux façons différentes d'être indistinguables.***

▷ Les particules qui correspondent à des fonctions d'ondes *symétriques* (celles qui se transforment par rapport à l'échange de particule avec un '+' dans

* Le mot «indistinguable» est un peu long, de sorte que de nombreux physiciens parlent néanmoins, et négligemment, de particules «identiques». Faites attention.

** Nous sommes donc dans la même situation que celle que nous avons déjà rencontrée plusieurs fois: *trop de spécification dans la description mathématique*, l'ordre explicite des indices dans ce cas, *implique une symétrie de cette description*, qui dans notre cas est une symétrie par rapport au changement d'indice, c.-à-d. par rapport à un échange de particules.

*** Cette conclusion s'applique à l'espace à trois dimensions. En deux dimensions, il existe plus de possibilités. Ces possibilités ont été, et sont encore partiellement, le sujet de recherches.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

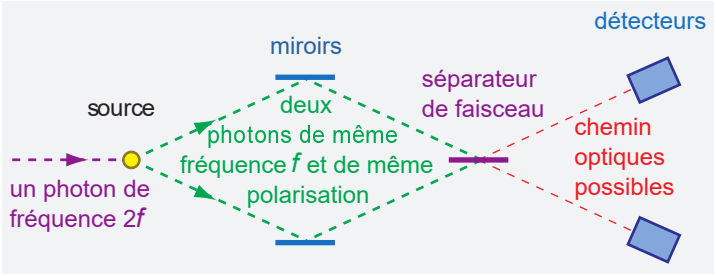


FIGURE 58 Émission et interférence de deux photons: deux photons indistinguables arrivent toujours ensemble, dans le même détecteur.

l'équation (58)) s'appellent* des *bosons*.

▷ Les particules qui correspondent à des fonctions d'ondes *antisymétriques* (celles qui se transforment par rapport à l'échange de particule avec un '–' dans l'équation (58)) s'appellent** des *fermions*.

Les expériences montrent que le comportement de l'échange dépend du *type* de particule. Il se trouve que les photons sont des bosons. Au contraire, les électrons, les protons et les neutrons sont des fermions. De plus, environ la moitié des atomes se comportent comme des bosons (aux énergies modérées), l'autre moitié étant des fermions. Pour déterminer le type d'un atome, il est nécessaire de prendre en compte le spin de l'électron et celui du noyau.

En fait, il se trouve qu'un composite ayant un nombre *pair* de fermions (aux énergies modérées), ou un nombre quelconque de bosons (à n'importe quelle énergie) est un boson. Un composite ayant un nombre *impair* de fermions est (toujours) un fermion. Par exemple ^{4}He est un boson, ^{3}He est un fermion. Les isotopes naturels ^{23}Na, ^{41}K, ^{85}Rb, ^{87}Rb et ^{133}Cs sont également des bosons, car ils ont des nombres impairs d'électrons et de nucléons. En revanche, ^{40}K et ^{134}Cs sont des fermions (et dans ce cas, également radioactifs).

Le comportement des photons

Une expérience simple, décrite sur la Figure 58, permet d'observer un aspect important du comportement des photons. Prenez une source qui émet simultanément deux pho-

* Les «bosons» ont été nommés en référence au physicien Satyenra Nath Bose (Calcutta, 1894 – Calcutta, 1974) qui fut le premier à décrire les propriétés statistiques des photons. Son travail fut repris plus tard par Albert Einstein, de sorte que l'on parle de la statistique de Bose-Einstein. Ref. 74

** Le terme «fermion» dérive du nom du physicien et lauréat de prix Nobel, Enrico Fermi (Rome, 1901 – Chicago, 1954), célèbre pour son génie universel en physique théorique et expérimentale. Il travailla principalement en physique des particules nucléaires et élémentaires, sur le spin et en statistique. On l'appelait «l'ingénieur quantique» pour ses travaux expérimentaux. Il est également célèbre pour ses cours qui sont toujours publiés dans leur version écrite de sa propre main, et pour son approche brillante des problèmes physiques. Néanmoins, son prix Nobel, hautement mérité, a été l'un des quelques cas pour lesquels le prix a été décerné pour une découverte qui s'est avérée incorrecte. Il quitta l'Italie à cause du mauvais traitement dont était victime sa femme juive et émigra aux USA. Fermi travailla sur le projet Manhattan qui construisit les premières bombes atomiques. Après la Seconde Guerre mondiale, il organisa l'un des meilleurs départements de physique du monde à l'Université de Chicago, où tous les gens qui travaillaient avec lui l'admiraient.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

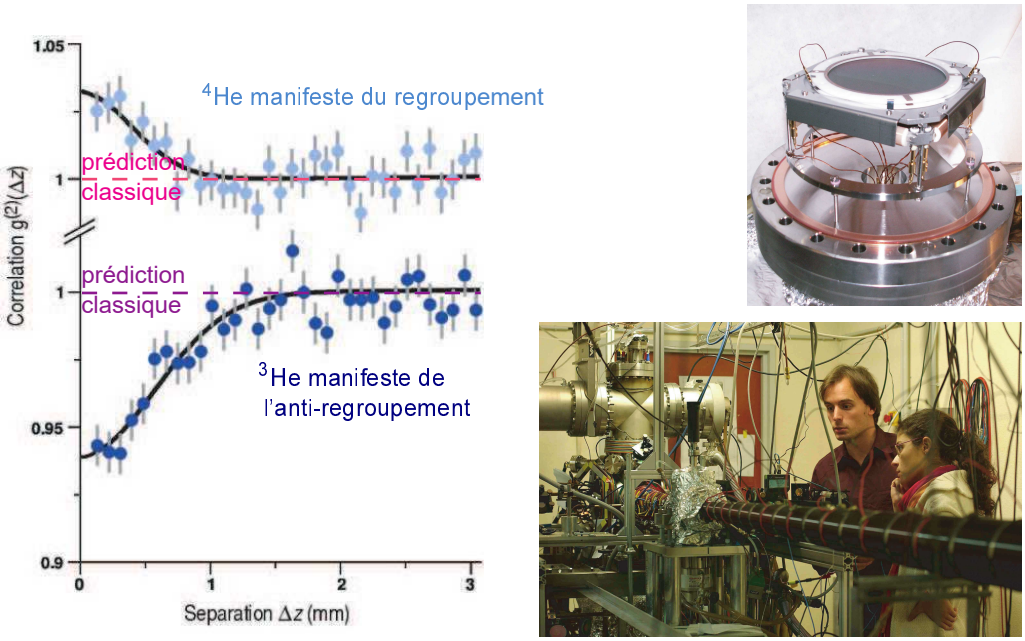


FIGURE 59 Regroupement et anti-regroupement des atomes d'hélium ^{3}He et ^{4}He: le résultat des mesures, le détecteur et l'expérience. (reproduit de atomoptic.iota.u-psud.fr/research/helium/helium.html, photo © Denis Boiron, Jerome Chatin)

tons indistinguables, c.-à-d. deux photons de fréquence et de polarisation identiques. La paire de photons se trouve donc dans un état intriqué. Au laboratoire, une telle source peut être produite à l'aide d'un convertisseur bas, un matériau qui converti un photon de fréquence $2f$ en deux photons de fréquence f. Les deux photons intriqués, après avoir parcouru exactement la même distance, sont amenés à entrer chacun par un des deux côtés d'un séparateur de faisceau idéal (par exemple un miroir semi-réfléchissant argenté). Deux détecteurs se trouvent aux deux sorties du séparateur de faisceau. Les expériences
Ref. 75 montrent que les deux photons sont toujours détectés ensemble, du *même* côté, et jamais séparément, un de chaque côté. La raison en est que les deux options pour lesquelles un des photons est transmis et l'autre réfléchi, interfèrent de manière destructive. (La dis-
Page 66 cussion que nous avons mentionnée plus haut s'applique également ici: bien que deux photons soient impliqués, lorsque l'on étudie les détails, on constate, dans ce cas aussi, qu'un seul photon interfère avec lui-même.)

L'expérience montre que les photons sont des *bosons*. En effet, dans la même expérience, les fermions se comportent exactement de façon inverse: deux fermions sont tou-
Ref. 76 jours détectés séparément, *un de chaque* côté, mais jamais ensemble, du même côté.

Le regroupement et l'anti-regroupement

Une autre façon de tester les propriétés d'échange d'une particule est l'expérience de
Page 59 Hanbury Brown et Twiss que nous avons décrite plus haut. Tout d'abord, cette belle expérience montre que les particules quantiques se comportent différemment des particules classiques. De plus, comparées aux particules classiques, les fermions manifestent

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

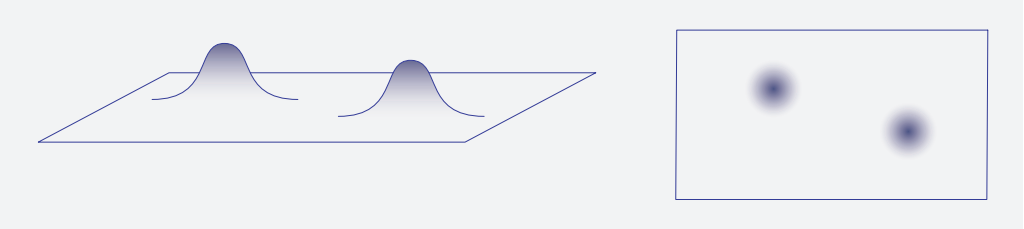


FIGURE 60 Se représenter des particules comme des excitations localisées (gauche) ou des nuages (droite).

de l'anti-regroupement (à cause du principe d'exclusion de Pauli) et les bosons manifestent du regroupement. Hanbury Brown et Twiss réalisèrent leur expérience avec des photons, qui sont des bosons.

Ref. 77 En 2005, une collaboration de recherche franco-hollandaise réalisa l'expérience avec des atomes. En utilisant un gaz d'hélium extrêmement froid à 500 nK et un principe de détection astucieux, ils réussirent à mesurer des courbes de corrélation typiques pour cet effet. Les résultats, que montre la Figure 59, confirment que ^{3}He est un fermion et que ^{4}He est un boson, tout comme le prédit la règle de composition des particules quantiques.

La symétrie de permutation dépend de l'énergie

Si les expériences nous obligent à conclure que personne, pas même la nature, ne peut faire la distinction entre deux particules d'un même type, on en déduit qu'elles ne forment pas deux entités séparées, mais une certaine forme d'unité. Notre perception classique et naïve d'une particule en tant qu'entité séparée du reste du monde est donc une description incorrecte du phénomène de «particule». En effet, dans le cas de particules ayant des propriétés intrinsèques identiques, aucune expérience ne peut suivre leur trajectoire d'une manière qui pourrait les distinguer avec certitude. Cette impossibilité a été vérifiée expérimentalement avec toutes les particules élémentaires, avec des noyaux, avec des atomes et avec de nombreuses molécules.

Comment cela s'intègre-t-il dans la vie quotidienne, c.-à-d. avec la physique classique? Les photons ne nous inquiètent pas beaucoup ici. Concentrons la discussion sur les particules de matière. Nous savons comment distinguer des électrons en désignant les différents fils électriques dans lesquels ils circulent. De même, nous sommes capables de distinguer notre propre réfrigérateur, avec ses électrons et ses atomes, de celui de notre voisin. Alors que le quantum d'action rend la distinction impossible, la vie quotidienne l'autorise.

L'explication la plus simple pour ces deux observations est d'imaginer une particule microscopique, plus particulièrement une qui soit élémentaire, comme un *renflement*, c.-à-d. une excitation localisée du vide, ou comme un nuage minuscule. La Figure 60 montre deux de ces renflements ainsi que deux nuages représentant des particules. Il est évident que lorsque deux particules sont trop proches l'une de l'autre, cela n'a aucun sens de les distinguer; on ne peut plus dire laquelle est l'une et laquelle est l'autre.

L'image du renflement montre que dans le cas d'une séparation soit par de grandes distances soit par des barrières de potentiel élevées, la distinction des particules identiques devient effectivement possible. Dans de telles situations, il est bel et bien possible

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

de faire des mesures qui permettent de suivre les particules indépendamment (comme nous le faisons au cours de notre expérience quotidienne). Autrement dit, nous pouvons spécifier une énergie limite à partir de laquelle la symétrie de permutation des objets ou des particules, séparées par une distance d, devient importante. Elle est donnée par

$$E = \frac{c\,\hbar}{d} \,. \tag{59}$$

Défi 97 f Êtes-vous capable de confirmer cette expression? Par exemple, aux températures ambiantes, nous *pouvons* distinguer des atomes les uns des autres à l'intérieur d'un solide, parce que l'énergie ainsi calculée est bien plus élevée que l'énergie thermique des atomes. Pour vous divertir, vous pouvez essayer de déterminer à partir de quelle énergie
Défi 98 f deux vrais jumeaux parfaitement identiques deviennent indistinguables. L'estimation de l'énergie à partir de laquelle le caractère statistique des arbres et des réfrigérateurs deviendrait apparent est alors assez simple.

Pour résumer, dans la vie quotidienne nous pouvons distinguer les objets, et donc les gens, pour deux raisons: parce qu'ils sont constitués de *nombreuses* parties, et parce que nous vivons dans un environnement de *faible énergie*. L'image du renflement pour les particules exprime l'idées que la distinguabilité existe pour les objets du quotidien, mais pas pour les particules du domaine microscopique.

La question de l'énergie apporte immédiatement un nouvel aspect à la discussion. Comment pouvons-nous décrire les fermions et les bosons en présence de particules virtuelles et d'antiparticules?

L'indistinguabilité en théorie quantique des champs

La théorie quantique des champs, comme nous le verrons dans le prochain volume, ne fait que mettre l'idée du renflement nuageux de la Figure 60 en langage mathématique. Une situation sans renflement s'appelle un *état de vide*. La théorie quantique des champs décrit toutes les particules d'un type donné comme des *excitations* d'un champ fondamental unique. Les particules sont indistinguables parce que chacune d'elle est une excitation d'un même substrat fondamental, et que chaque excitation a les mêmes propriétés. Une situation ne comportant qu'une seule particule est alors décrite par un état de vide sur lequel agit un *opérateur de création*. L'ajout d'une seconde particule est décrit en ajoutant un deuxième opérateur de création, et la soustraction d'une particule en ajoutant un *opérateur d'annihilation*, le second se trouvant être l'opérateur adjoint du premier.

La théorie quantique des champs étudie comment les opérateurs de création et d'annihilation doivent se comporter pour décrire ce que l'on observe.* Elle est arrivée aux conclusions suivantes:

* Chaque fois que la relation

$$[b, b^\dagger] = bb^\dagger - b^\dagger b = 1 \tag{60}$$

est valable entre l'opérateur de création $b^\dagger$ et l'opérateur d'annihilation b, les opérateurs décrivent un *boson*. La dague peut ainsi être vue comme décrivant l'opération consistant à transformer un opérateur en son adjoint. Une double dague est équivalente à aucune dague. Si les opérateurs de création et d'annihilation de particules anti-commutent

$$\{d, d^\dagger\} = dd^\dagger + d^\dagger d = 1 \tag{61}$$

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

— Les opérateurs de champs pour des particules de spin demi-entier sont des fermions et implique l'anti-commutation (locale).
— Les opérateurs de champs pour des particules de spin entier sont des bosons et implique la commutation (locale).
— Pour tous les opérateurs de champs, le commutateur (respectivement l'anti-commutateur) pris en deux points ayant des séparations de genre espace, s'annule.
— Les antiparticules de fermions sont des fermions, et les antiparticules de bosons sont des bosons.
— Les particules virtuelles se comportent comme leurs homologues réelles par rapport à l'échange.

Ces conclusions sont à la base de la théorie quantique des champs. Elles décrivent comment les quantons se comportent au cours d'une permutation.

Mais pourquoi les particules quantiques sont-elles identiques? Pourquoi tous les électrons sont-ils identiques? Guidé par les expériences, la théorie quantique des champs décrit les électrons comme des excitations identiques du vide, et donc comme étant identiques par construction. Bien sûr, cette réponse n'est pas vraiment satisfaisante. Nous n'en trouverons une meilleure que lors de la dernière partie de notre ascension de la montagne.

Avec quelle précision la symétrie de permutation est-elle vérifiée?

Les électrons sont-ils des fermions *parfaits*? En 1990, une expérience simple mais efficace
Ref. 78 a été réalisée par Ramberg et Snow pour tester leur comportement de fermions. Ils ont fait circuler un courant électrique de 30 A dans un fil de cuivre pendant un mois et ils ont cherché s'il en résultait des émissions de rayons X. Ils n'en ont trouvé aucune. Ils en conclurent que les électrons étaient toujours dans un état antisymétrique, avec une fraction de composante symétrique représentant moins de

$$2 \cdot 10^{-26} \tag{62}$$

de l'état total. En bref, les électrons sont toujours dans un état antisymétrique, ce sont des fermions.

Le raisonnement derrière cette expérience élégante est le suivant. Si les électrons n'étaient pas toujours des fermions, un électron pourrait tomber de temps en temps dans le niveau d'énergie le plus bas d'un atome de cuivre, conduisant à l'émission d'un rayon X. L'absence de tels rayons X implique que les électrons sont des fermions avec un très grand niveau de confiance. Des rayons X ne pourraient être émis que si les électrons étaient des bosons, au moins une partie du temps. En effet, deux électrons, étant des fermions, ne peuvent pas être dans le même état quantique: cette restriction s'appelle le *principe d'exclusion de Pauli*. Ce principe s'applique à tous les fermions et il fait l'objet du chapitre suivant.

ils décrivent un *fermion*. Le couple d'accolades ainsi défini s'appelle un *anti-commutateur*.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Les copies, les clones et les gants

Les systèmes classiques peuvent-ils être indistinguables? Ils le peuvent: les grosses molécules en sont des exemples, pourvu qu'elles soient constituées exactement des mêmes isotopes. Les *gros* systèmes classiques, composés d'une mole de particules ou plus, peuvent-ils être indistinguables? Cette question simple pose effectivement la question de savoir si une copie *parfaite* (un *clone* physique) d'un système physique est possible.

On pourrait argumenter que n'importe quelle usine de production de masse, telle qu'une usine de boutons de chemise ou encore de trombones, démontre que les copies sont possibles. Mais l'apparence est trompeuse. Lorsque l'on regarde à l'aide d'un microscope il y a en général des différences. Est-ce toujours le cas? En 1982, le physicien hollandais Dennis Dieks et, indépendamment, les physiciens des États-Unis Wootters et Zurek, ont publié des preuves simples que les systèmes quantiques ne pouvaient pas être copiés. C'est le célèbre *théorème de l'impossibilité du clonage quantique*.

Ref. 79

Un *duplicateur* est une machine qui prend un original, lit ses propriétés et produit une copie, laissant l'original inchangé. Cette définition semble simple. Cependant, nous savons que lorsque l'on extrait une information d'un original, nous devons interagir avec lui. Par conséquent, le système changera au moins d'un quantum d'action. Nous devons donc nous attendre à ce que les copies et les originaux ne puissent jamais être identiques, à cause de la théorie quantique.*

La théorie quantique montre en effet que les duplicateurs sont impossibles. Un duplicateur est décrit par un opérateur qui reproduit l'état d'un système original sur l'état de la copie. Autrement dit, un duplicateur est linéaire. Cette linéarité pose un problème. Simplement dit, si un duplicateur était capable de copier des originaux soit dans l'état $|A\rangle$ soit dans l'état $|B\rangle$, alors il ne pourrait pas fonctionner si l'état de l'original était une superposition $|A\rangle + |B\rangle$. Voyons pourquoi.

Un duplicateur est un dispositif décrit par un opérateur U qui change l'état de départ $|s\rangle_c$ de la copie, de la façon suivante:

— Si l'original se trouve dans l'état $|A\rangle$, le duplicateur agit sur la copie $|s\rangle_c$ suivant

$$U|A\rangle|s\rangle_c = |A\rangle|A\rangle_c \,. \tag{63}$$

— Si l'original se trouve dans l'état $|B\rangle$, le duplicateur agit sur la copie $|s\rangle_c$ suivant

$$U|B\rangle|s\rangle_c = |B\rangle|B\rangle_c \,. \tag{64}$$

En conséquence de ces deux exigences, un original dans l'état $|A + B\rangle$ serait traité par le duplicateur selon

$$U|A + B\rangle|s\rangle_c = |A\rangle|A\rangle_c + |B\rangle|B\rangle_c \,. \tag{65}$$

* Ceci semble fournir une solution pour éliminer la contrefaçon des billets de banque. En fait, Stephen Wiesner proposa d'utiliser la théorie quantique dès 1970. Il imagina d'utiliser la polarisation de photons individuels comme les bits des numéros de série. Pouvez-vous expliquer pourquoi cela ne peut pas marcher?

Ref. 80
Défi 99 e

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Ceci est en contradiction avec ce que nous voulons et qui devrait être

$$U_{\text{voulu}}|A + B\rangle|s\rangle_c = (|A\rangle + |B\rangle)(|A\rangle_c + |B\rangle_c) \,. \tag{66}$$

Autrement dit, un duplicateur ne peut pas complètement copier un état.* Ceci est ce que l'on appelle le *théorème de l'impossibilité du clonage quantique*.

L'impossibilité de faire des copies est implicite en théorie quantique. Si nous étions capables de cloner des systèmes, nous pourrions mesurer une variable d'un système et une seconde variable sur sa copie. Nous serions donc capables de surmonter la relation d'indétermination dans chacune des copies. Ceci est impossible. En bref, les copies sont toujours imparfaites.

L'absence de duplicateur en mécanique quantique est décevante. De telles machines de science-fiction pourraient être alimentées par deux entrées différentes, telles qu'un lion et une chèvre, et produire une superposition: une chimère. La théorie quantique montre que tous ces êtres ou ces situations imaginaires ne peuvent pas se matérialiser.

D'autres chercheurs ont alors exploré jusqu'à quel niveau de perfection il était pos-
Ref. 81 sible de faire des copies, particulièrement dans le cas de systèmes classiques. Pour faire court, ces investigations montrent que la duplication (le clonage) des systèmes macroscopiques est également impossible. Plus simplement, les *duplicateurs n'existent pas*. Les copies peuvent toujours être distinguées des originaux si les observations sont réalisées avec suffisamment de soin. En particulier, c'est le cas pour les clones biologiques. Les clones biologiques sont des vrais jumeaux qui seraient nés à la suite de deux grossesses séparées. Ils diffèrent par leurs empreintes digitales, par l'analyse de leurs iris, par leurs souvenirs physiques et émotionnels, par la structure de leur cerveau, et par de nom-
Défi 100 e breux autres aspects. (Pouvez-vous en spécifier quelques autres?) En bref, les clones biologiques, comme les vrais jumeaux, ne sont pas des copies les uns des autres.

En résumé, les objets de la vie quotidienne, tels que les photocopies, les boules de billard ou les jumeaux sont toujours distinguables. Il y a deux raisons à cela: premièrement, les effets quantiques ne jouent aucun rôle dans la vie quotidienne, de sorte qu'il n'y a pas de danger qu'un échange inobservable se produise; deuxièmement, les clones parfaits de systèmes classiques n'existent pas de toute façon, de sorte qu'il y a toujours des différences minuscules entre deux objets quelconques, même s'ils paraissent identiques à première vue. Les *gants* étant des objets classiques, peuvent donc toujours être distingués.

Résumé

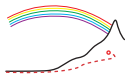
Une conséquence du quantum d'action $\hbar$ est que les particules quantiques sont *indistinguables*. Ceci se produit de l'une des deux façons suivantes: les particules sont soit des

* Le théorème de l'impossibilité du clonage quantique impose des limitations importantes sur les ordinateurs quantiques, car les calculs ont souvent besoin de copier des résultats intermédiaires. Le théorème montre également que la communication plus rapide que la lumière est impossible lors des expériences EPR. En revanche, la *cryptographie quantique* devient possible, tout du moins en laboratoire. En effet, le théorème de l'impossibilité du clonage quantique montre que personne ne peut copier un message quantique sans se faire remarquer. Les moyens spécifiques pour utiliser ce résultat en cryptographie sont le protocole Bennett-Brassard de 1984 et le protocole Ekert de 1991.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

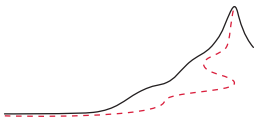
bosons soit des fermions. Même la nature n'est pas capable de faire la distinction entre des particules quantiques identiques.

Malgré l'indistinguabilité des quantons, l'état d'un système physique ne peut pas être copié en un second système qui contiendrait les mêmes particules. Par conséquent, les clones parfaits n'existent pas dans la nature.



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net





Chapitre 6

Les rotations et les statistiques – visualiser le spin

Le spin est l'observation que les faisceaux de matière peuvent être *polarisés*: il est possible de faire tourner sur eux-mêmes les rayons de particules. Le spin décrit donc comment les particules se comportent lorsqu'elles tournent sur elles-mêmes. Ainsi, les particules quantiques ne sont pas simplement comme des points, elles peuvent tourner autour d'un axe. Cette rotation propre s'appelle le *spin*. Et comme pour la rotation des objets macroscopiques, le spin se décrit à l'aide d'un moment cinétique.

Page 116

Dans ce qui suit, nous allons rappeler que le spin des quantons est quantifié en unités de $\hbar/2$. Ensuite nous montrerons un résultat fondamental: la valeur du spin détermine si une particule quantique, ainsi que tout système quantique en général, est un boson ou un fermion. Et nous montrerons que le spin correspond à la rotation des quantons.

Les particules quantiques et la symétrie

Ref. 82

Le contexte général qui a permis l'apparition du spin a été clarifié par Eugene Wigner en 1939.** Il commença par rappeler que toute particule quantique, pour être *élémentaire*, doit se comporter comme une *représentation irréductible* de l'ensemble de tous les changements de points de vue. Cet ensemble des changements de points de vue forme le groupe de symétrie de l'espace-temps plat, que l'on appelle le *groupe de Lorentz inhomogène* (parfois appelé groupe de Lorentz affine ou encore *groupe de Poincaré* [N.d.T.]). Pourquoi?

Vol. I, page 266

Nous avons vu au chapitre sur la symétrie, dans le premier volume de cette aventure, que la symétrie de n'importe quel système composite conduisait à certaines exigences sur les constituants du système. Si les constituants ne suivent pas ces exigences, ils ne peuvent pas former un composite symétrique.

Nous savons, d'après notre expérience quotidienne, confirmé par des expériences de précision, que tous les systèmes physiques sont symétriques par rapport à une translation dans le temps et dans l'espace, par rapport à une rotation dans l'espace, par rapport à une poussée de Lorentz et (dans beaucoup de cas) par rapport à une réflexion miroir, à un échange de matière/antimatière et à une inversion du mouvement. Nous connaissons ces symétries car nous les rencontrons dans notre vie quotidienne. Par exemple, l'utilité de ce que nous appelons une «expérience» dans la vie quotidienne est simplement une conséquence de la symétrie de translation dans le temps. L'ensemble de toutes ces symé-

** Eugene Wigner (Budapest, 1902 – Princeton, 1995), physicien théoricien. Il reçut le prix Nobel de physique en 1963. Il a écrit plus de 500 articles, dont un grand nombre sur les différents aspects de la symétrie de la nature. Il était également célèbre pour être le physicien le plus poli au monde.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

tries courantes (ou plus précisément, de toutes ces transformations de symétrie) s'appelle le *groupe de Lorentz inhomogène*.

Ces *symétries*, c.-à-d. ces changements de points de vue, conduisent à certaines exigences pour les constituants des systèmes physiques, c.-à-d. pour les particules quantiques élémentaires. En langage mathématique, ces exigences s'expriment en disant que les *particules élémentaires* doivent être des *représentations irréductibles* du groupe de symétrie.

Vol. I, page 266

Tous les manuels de théorie quantique détaillent systématiquement ce raisonnement. En partant du groupe de Lorentz, on obtient une liste de toutes les représentations irréductibles possibles. Autrement dit, on obtient une liste de tous les comportements possibles pour les particules élémentaires.* Lorsque l'on inventorie les possibilités, on trouve tout d'abord que toute particule élémentaire est décrite par un *quadrivecteur impulsion-énergie* (rien de nouveau jusqu'ici), par un moment cinétique interne (le *spin*) et par un ensemble de *parités*.

— Le quadrivecteur impulsion-énergie résulte de la symétrie de translation de la nature. La valeur du quadrivecteur impulsion-énergie décrit comment une particule se comporte lors d'une translation, c.-à-d. lors d'un décalage spatial ou temporel des points de vue. La norme du quadrivecteur impulsion-énergie est une propriété invariante, donnée par la masse, alors que son orientation dans l'espace-temps est libre.
— Le spin résulte de la symétrie de rotation de la nature. La valeur du spin décrit comment un objet se comporte au cours d'une rotation en trois dimensions, c.-à-d. lors d'un changement d'orientation des points de vue.** La grandeur du spin est une propriété invariante, et son orientation a plusieurs possibilités par rapport à la direction du mouvement. En particulier, le spin des particules quantiques massiques se comporte différemment de celui des particules quantiques sans masse.

  Pour les particules quantiques *massiques*, le groupe de Lorentz inhomogène implique que l'amplitude invariante du spin est $\sqrt{J(J+1)}\,\hbar$, souvent écrite J, par excès de simplification. Il est donc coutumier de dire et d'écrire «spin J», plutôt que de s'encombrer de «spin $\sqrt{J(J+1)}\,\hbar$». Puisque la valeur du nombre quantique J spécifie la grandeur du moment cinétique, elle donne la représentation d'un type de particule donné lors des rotations. Des explorations ont montré que le nombre quantique de spin J pouvait être n'importe quel multiple de 1/2, c.-à-d. qu'il pouvait prendre les valeurs 0, 1/2, 1, 3/2, 2, 5/2, etc. Comme il est résumé dans le Tableau 4, les expériences montrent que les électrons, les protons et les neutrons sont de spin 1/2, les particules W et Z sont de spin 1, et les atomes d'hélium sont de spin 0. De plus, la représentation du spin J est de dimension $2J + 1$, ce qui signifie que l'orientation spatiale du spin a $2J + 1$ valeurs possibles. Pour les électrons, puisque $J = 1/2$, il y a donc deux possibilités, que l'on appelle habituellement «up» et «down».*** Le spin

* Pour avoir une pertinence physique en théorie quantique, les représentations doivent être *unitaires*. La liste complète des représentations *irréductibles* et *unitaires* des changements de points de vue fournit donc l'éventail des possibilités pour toute particule qui se veut *élémentaire*.

** Le groupe des rotations physiques est également appelé SO(3), car sur le plan mathématique il est décrit par le groupe spécial orthogonal des matrices 3 par 3.

*** On conservera dans tout le texte les termes anglais «up» et «down» pour désigner les deux valeurs du spin de l'électron, car ils sont plus souvent utilisés que leurs traductions françaises «haut» et «bas» [N.d.T.].

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

ne prend donc que des valeurs *discrètes*. Ceci contraste avec la quantité de mouvement, pour laquelle les représentations sont de dimension infinie et dont les valeurs possibles forment un *continuum*.

Les particules quantiques *sans masse* sont, elles aussi, caractérisées par la valeur de leur spin, qui peut prendre les mêmes valeurs que dans le cas des particules massiques. Par exemple, les photons et les gluons sont de spin 1. En ce qui concerne les particules sans masse, contrairement aux particules massiques, leurs représentations sont toujours de dimension 1, de sorte qu'elles sont entièrement décrites par leur *hélicité*, définie comme la projection du spin sur la direction du mouvement. Les particules sans masse peuvent avoir une hélicité positive ou une hélicité négative, que l'on appelle parfois polarisation droite et polarisation gauche. Il n'y a pas d'autre liberté pour l'orientation du spin pour le cas des particules sans masse.

— Pour compléter la liste des propriétés des particules, il nous faut y inclure les autres symétries discrètes du groupe de Lorentz inhomogène. Puisque l'*inversion de mouvement*, la *parité spatiale* et l'*inversion de charge* sont des parités, chaque particule élémentaire doit être décrite à l'aide de trois nombres supplémentaires, que l'on appelle T, P et C, chacun d'entre eux ne pouvant prendre que les valeurs +1 ou −1. Étant des parités, ces nombres doivent être *multipliés* pour fournir les valeurs correspondantes dans un système composite.

En bref, les symétries de la nature conduisent à la classification de toutes les particules quantiques élémentaires par leur masse, par leur quantité de mouvement, par leur spin et par leurs parités P, C et T.

Les types de particules quantiques

Les valeurs de spin que l'on observe pour toutes les particules quantiques de la nature sont données dans le Tableau 4. Les parités, ainsi que toutes les autres propriétés connues des particules élémentaires sont données dans le Tableau 5. Le spin et les parités constituent ensemble ce que l'on appelle les *nombres quantiques*. Toutes les autres propriétés intrinsèques des quantons sont liées aux interactions. Ce sont par exemple la masse, la charge électrique ou l'isospin, et nous les explorerons dans le prochain volume.

Vol. V, page 162

TABLEAU 5 Les propriétés des particules élémentaires.

Particule	Masse m [a]	Durée de vie τ ou largeur de la bande d'énergie, [b] principaux modes de désintégration	Isospin I, spin J, [c] parité P, parité de charge C	Charge, isospin, étrangeté, charme, beauté, [d] vérité: $QISCBT$ [e]	Nombre leptonique & baryonique [f] $L\,B$
Rayonnement élémentaire (bosons)					
photon γ	0 ($<10^{-53}$ kg)	stable	$I(J^{PC}) = 0,1(1^{--})$	000000	0, 0

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 5 (Continuation) Les propriétés des particules élémentaires.

PARTICULE	MASSE m [a]	DURÉE DE VIE τ OU LARGEUR DE LA BANDE D'ÉNERGIE, [b] PRINCIPAUX MODES DE DÉSINTÉGRATION	ISOSPIN I, SPIN J, [c] PARITÉ P, PARITÉ DE CHARGE C	CHARGE, ISOSPIN, ÉTRANGETÉ, CHARME, BEAUTÉ, [d] VÉRITÉ: $QISCBT$ [e]	NOMBRE LEPTONIQUE & BARYONIQUE [f] LB
$W^{\pm}$	$80,398(25)\,\mathrm{GeV}/c^2$	$2,124(41)\,\mathrm{GeV}$ 67,60(27) % hadrons, 32,12(36) % $l^+\nu$	$J = 1$	±100000	0, 0
Z	$91,1876(21)\,\mathrm{GeV}/c^2$	$2,65(2)\cdot 10^{-25}$ s ou $2,4952(23)\,\mathrm{GeV}/c^2$ 69,91(6) % hadrons, 10,0974(69) % l^+l^-	$J = 1$	000000	0, 0
gluon	0	stable	$I(J^P) = 0(1^-)$	000000	0, 0
Matière élémentaire (fermions): leptons					
électron e	$9,109\,382\,15(45)\cdot 10^{-31}\,\mathrm{kg} = 81,871\,0438(41)\,\mathrm{pJ}/c^2$ $= 0,510\,998\,910(13)\,\mathrm{MeV}/c^2 = 0,000\,548\,579\,909\,43(23)\,\mathrm{u}$ rapport gyromagnétique $\mu_e/\mu_B = -1,001\,159\,652\,1811(7)$	$> 13\cdot 10^{30}$ s	$J = \frac{1}{2}$	−100 000	1, 0
muon μ	$0,188\,353\,130(11)\,\mathrm{yg}$ $= 105,658\,3668(38)\,\mathrm{MeV}/c^2$ rapport gyromagnétique $\mu_\mu/(e\hbar/2m_\mu) = -1,001\,165\,9208(6)$	$2,197\,03(4)\,\mu\mathrm{s}$ 99 % $e^-\bar{\nu}_e\nu_\mu$ $= 0,113\,428\,9256(29)\,\mathrm{u}$	$J = \frac{1}{2}$	−100000	1, 0
tau τ	$1,776\,84(17)\,\mathrm{GeV}/c^2$	$290,6(1,0)\,\mathrm{fs}$	$J = \frac{1}{2}$	−100000	1, 0
neutrino électronique ν_e	$< 2\,\mathrm{eV}/c^2$		$J = \frac{1}{2}$		1, 0
neutrino muonique ν_μ	$< 2\,\mathrm{eV}/c^2$		$J = \frac{1}{2}$		1, 0
neutrino tauique ν_τ	$< 2\,\mathrm{eV}/c^2$		$J = \frac{1}{2}$		1, 0
Matière élémentaire (fermions): quarks [g]					
haut (up) u [h]	de 1,5 à 3,3 MeV/c^2	voir proton	$I(J^P) = \frac{1}{2}(\frac{1}{2}^+)$	$+\frac{2}{3}+\frac{1}{2}0000$	$0, \frac{1}{3}$
bas (down) d [h]	de 3,5 à 6 MeV/c^2	voir proton	$I(J^P) = \frac{1}{2}(\frac{1}{2}^+)$	$-\frac{1}{3}-\frac{1}{2}0000$	$0, \frac{1}{3}$
étrange (strange) s [h]	de 70 à 130 MeV/c^2		$I(J^P) = 0(\frac{1}{2}^+)$	$-\frac{1}{3}0-1000$	$0, \frac{1}{3}$

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net



TABLEAU 5 (Continuation) Les propriétés des particules élémentaires.

PARTICULE	MASSE m [a]	DURÉE DE VIE τ OU LARGEUR DE LA BANDE D'ÉNERGIE, [b] PRINCIPAUX MODES DE DÉSINTÉGRATION	ISOSPIN I, SPIN J, [c] PARITÉ P, PARITÉ DE CHARGE C	CHARGE, ISOSPIN, ÉTRANGETÉ, CHARME, BEAUTÉ, [d] VÉRITÉ: $QISCBT$ [e]	NOMBRE LEPTONIQUE & BARYONIQUE [f] L B
charme (charm) c [h]	$1,27(11)\,\mathrm{GeV}/c^2$		$I(J^P) = 0(\frac{1}{2}^+)$	$+\frac{2}{3}00{+}100$	$0, \frac{1}{3}$
dessous (bottom) b [h]	$4,20(17)\,\mathrm{GeV}/c^2$	$\tau = 1,33(11)\,\mathrm{ps}$	$I(J^P) = 0(\frac{1}{2}^+)$	$-\frac{1}{3}000{-}10$	$0, \frac{1}{3}$
dessus (top) t [h]	$171,2(2,1)\,\mathrm{GeV}/c^2$		$I(J^P) = 0(\frac{1}{2}^+)$	$+\frac{2}{3}0000{+}1$	$0, \frac{1}{3}$
Boson élémentaire observé					
boson de Higgs	$126\,\mathrm{GeV}/c^2$		$J = 0$		

Notes:
a. Voir également le tableau des préfixes SI à la page 235. Pour ce qui est de l'unité de masse eV/c^2, voir page 239.
b. La largeur de la *bande d'énergie* Γ d'une particule est liée à sa durée de vie τ par la relation d'indétermination $\Gamma\tau = \hbar$. Il y a une différence entre la *demi-vie** $t_{1/2}$ et la *durée de vie* τ d'une particule: elles sont liées par la relation $t_{1/2} = \tau \ln 2$, avec $\ln 2 \approx 0,693\,147\,18$. La demi-vie est donc plus courte que la durée de vie. L'*unité de masse atomique* unifiée u est définie comme étant 1/12 de la masse d'un atome de carbone 12 au repos et dans son état fondamental. On a $1\,\mathrm{u} = \frac{1}{12}m(^{12}\mathrm{C}) = 1,660\,5402(10)\,\mathrm{yg}$.
c. Pour limiter la taille du tableau, son entête ne mentionne pas explicitement la *couleur*, que l'on nomme également (de façon confuse) la charge de l'interaction forte. Elle doit être ajoutée à la liste des propriétés fondamentales des objets. Les nombres quantiques contenant le mot «parité» sont multiplicatifs. Tous les autres sont additifs. La parité P et la parité de charge C s'écrivent à l'aide d'un signe + ou d'un signe −. La parité de temps T (à ne pas confondre avec la propriété de vérité T**), qui serait mieux nommée la parité d'inversion du mouvement, est égale à CP pour toutes les particules connues. L'isospin I (ou I_Z) apparaît deux fois dans le tableau. Il n'est défini que pour les quarks haut («up») et bas («down»), ainsi que pour leurs composés, tels que le proton et le neutron. Dans la littérature on trouve également des références à la parité G, définie par $G = (-1)^{IC}$.

L'entête du tableau ne mentionne pas non plus la *charge faible* des particules. La charge faible g (l'*isospin faible* pour être plus précis) est un nombre quantique associé à tous les fermions de polarisation gauche (et à tous les anti-fermions de polarisation droite), mais à aucun des fermions

* La demi-vie s'appelle parfois la période de désintégration, ou encore la période radioactive, dans le cas des particules qui se désintègrent en émettent de la radioactivité (c.-à-d. en émettent une autre particule que l'on qualifie communément d'alpha, de beta ou de gamma) [N.d.T.].
** La lettre T pour désigner la vérité vient de l'anglais «topness», ou encore «truth» [N.d.T.]

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 4 Le spin des particules en tant que représentation du groupe des rotations.

Spin [$\hbar$]	Système inchangé par une rotation de	Exemples massiques élémentaires	composites	Exemples sans masse élémentaires
0	n'importe quel angle	boson de Higgs	mésons, noyaux, atomes	aucun [a]
1/2	2 tours	e, μ, τ, q, ν_e, ν_μ, ν_τ	noyaux, atomes, molécules, radicaux	aucun, puisque même les neutrinos ont une masse mi
1	1 tour	W, Z	mésons, noyaux, atomes, molécules, grille-pains	photon γ, gluon g
3/2	2/3 de tour	aucun [a]	baryons, noyaux, atomes	aucun [a]
2	1/2 tour	aucun	noyaux	'graviton' [b]
5/2	2/5 de tour	aucun	noyaux	aucun
3	1/3 de tour	aucun	noyaux [c]	aucun
etc.[c]	etc.[c]	etc.[c]	etc.[c]	aucun n'est possible

a. La supersymétrie, une symétrie conjecturée durant le XXe siècle, prédit des particules élémentaires dans ces c tableau.
b. Le graviton n'a pas encore été observé.
c. Il existe des noyaux avec des valeurs de spin jusqu'à 101/2 et 51 (en unités de $\hbar$). Ref. 83

de polarisation droite (ni des anti-fermions de polarisation gauche). Les détails concernant la charge faible sont donnés dans la section traitant de l'interaction faible.
Vol. V, page 245
d. De nos jours, la «beauté» est plus communément appelée de son nom anglais «*bottomness*», de même que la «vérité» est appelé plus communément «*topness*». Les signes des nombres quantiques S, I, C, B et T peuvent se définir de différentes façons. Dans l'attribution standard que l'on montre ici, le signe de tous les nombres quantiques qui ne s'annulent pas est donné par le signe de la charge du quark correspondant.
e Bien que les noms des nombres quantiques soient parfois francisés (comme c'est le cas dans ce tableau), la lettre qui les désigne conserve l'initiale du nom anglais: S pour «stangeness» et T pour «topness» [N.d.T.].
f. Si la supersymétrie existait, la parité R devrait être ajouté dans cette colonne. La parité R est un nombre quantique multiplicatif lié au nombre leptonique L, au nombre baryonique B et au spin J par la définition $R = (-1)^{3B+L+2J}$. Toutes les particules du modèle standard sont paires vis-à-vis de la parité R alors que leurs partenaires supersymétriques conjecturés, seraient impaires. Cependant, il est maintenant reconnu que la supersymétrie est en contradiction avec les expériences.
g. Pour une définition et une explication précise de la masse des quarks, voir à la page 233 du volume V.



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

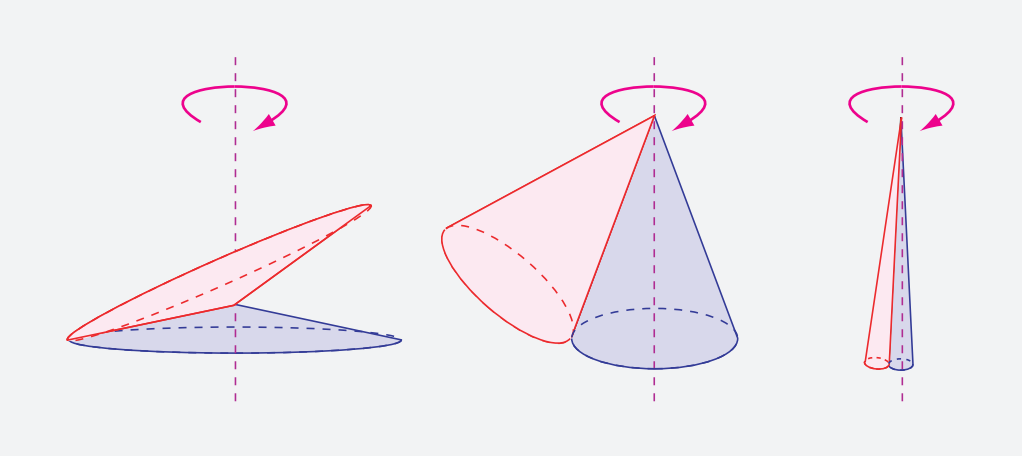


FIGURE 61 Illustration d'un argument montrant pourquoi les rotations de 4π sont équivalentes à aucune rotation (voir le texte).

h Les noms entre parenthèses sont les dénominations anglaises, que l'on rencontre souvent dans la littérature scientifique française [N.d.T.].

Le spin 1/2 et les objets attachés

Un résultat central de la théorie quantique est que le spin 1/2 soit possible dans la nature, bien que cette valeur n'apparaisse pas dans la vie quotidienne. Pour un système, avoir un spin 1/2 signifie que seule une rotation de *deux tours* est équivalente à *aucune rotation*, alors qu'une rotation d'*un seul tour* ne l'est pas. Aucun système *simple* ayant cette propriété n'existe dans la vie quotidienne, mais de tels systèmes existent dans le monde microscopique: les électrons, les neutrinos, les atomes d'argent et les radicaux moléculaires sont tous de spin 1/2. Le Tableau 4 fournit une liste plus complète.

Vol. I, page 49

Le mathématicien Hermann Weyl utilisait une image simple pour expliquer qu'une rotation de deux tours était équivalente à zéro tour alors qu'un seul tour produisait un effet différent. Prenez deux cônes se touchant par leur sommet ainsi que le long d'une ligne, comme le montre la Figure 61. Tenez un des cônes et faites rouler l'autre autour du premier. Lorsque le cône roulant, après avoir fait un tour complet autour de l'autre cône (c.-à-d. autour de l'axe vertical) est revenu à sa position initiale, il a tourné sur lui-même d'un certain angle. Si les cônes sont largement ouverts, comme ceux de gauche, l'angle de rotation final sera petit. À la limite, pour des cônes extrêmement ouverts, il n'y aura pas de rotation du tout. Si les cônes sont très fins, comme des aiguilles, le cône roulant aura tourné sur lui-même de (presque) 720 degrés. Cette situation est identique à celle d'une pièce de monnaie roulant autour d'une autre pièce ayant la même taille, toutes les deux étant posées sur une table. La pièce roulante tourne sur elle-même de deux tours, donc de 720 degrés. Dans ce cas, l'angle de rotation final est également petit. Le résultat pour 0 degré ou pour 720 degrés est donc le même. Si on s'imagine l'angle du cône variant de façon continue, on s'aperçoit qu'il est possible de passer de façon continue d'une rotation de 0 degré à une rotation de 720 degrés. Au contraire, une rotation de 360 degrés *ne peut pas* être «défaite» de cette façon.

Défi 101 f

Défi 102 f



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

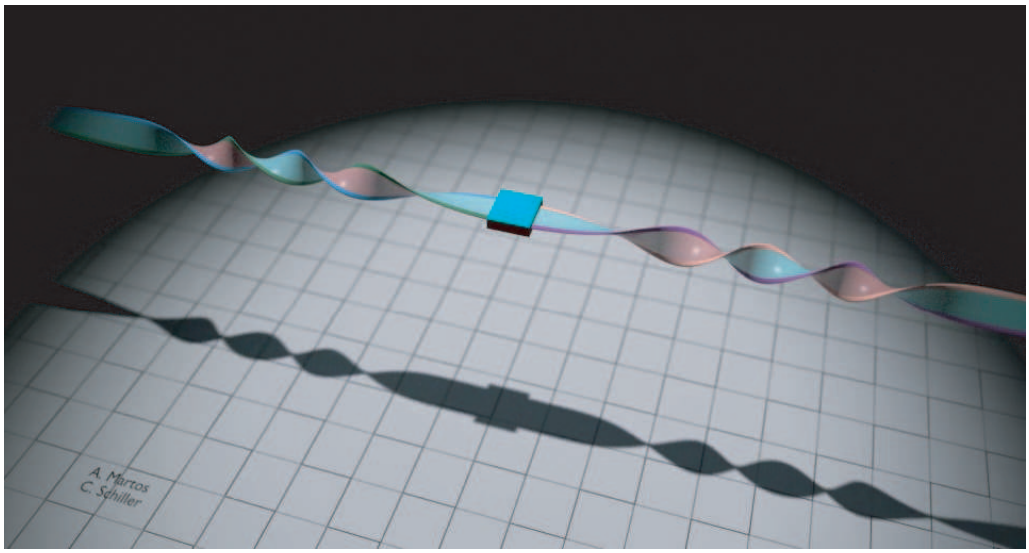


FIGURE 62 Supposez que la ceinture ne puisse pas être observée, mais que l'objet carré le puisse, et qu'il représente une particule. L'animation montre alors qu'une telle particule (l'objet carré) peut retourner à la position de départ après une rotation de 4π (mais pas après une rotation de 2π). Une telle particule «ceinturée» satisfait donc à la propriété définissant une *particule de spin* $1/2$: une rotation de 4π est équivalente à aucune rotation. La ceinture représente donc la fonction d'onde d'un spineur. Par exemple, une rotation de 2π entraine un mouvement de torsion, ce qui signifie un changement du signe de la fonction d'onde. Une rotation de 4π n'a pas d'influence sur la fonction d'onde. Vous pouvez répéter le tour chez vous avec une bande de papier. L'équivalence est montrée ici avec deux ceintures attachées, mais le tour marche avec un nombre quelconque de ceintures! (Film QuickTime © Antonio Martos)

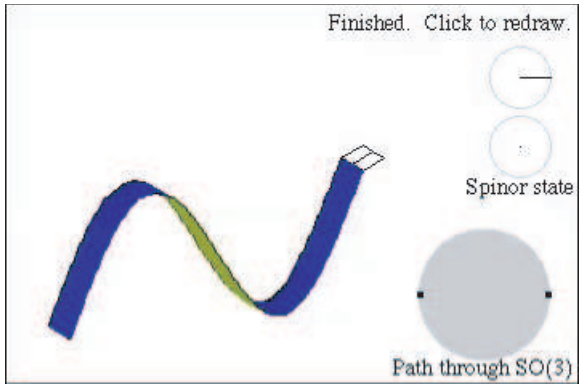


FIGURE 63 Le tour de la ceinture avec une ceinture simple: une rotation de deux tours de la boucle de la ceinture équivaut à aucune rotation. (Film QuickTime © Greg Egan)

Il existe des systèmes de la vie quotidienne qui se comportent comme le spin 1/2, mais ils ne sont pas simples: tous ces systèmes sont *attachés*. Le système le plus connu est la ceinture. La Figure 62 et la Figure 63 montrent qu'une rotation de 4π de la boucle d'une ceinture est équivalente à aucune rotation: on peut y arriver simplement en faisant

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

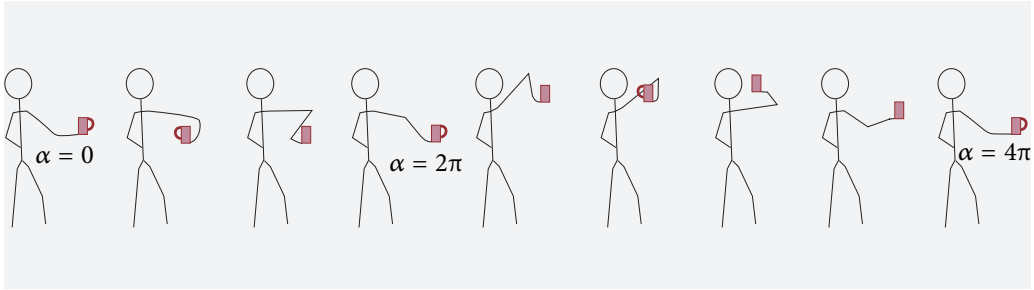


FIGURE 64 Le bras humains sert de modèle pour le spin 1/2.

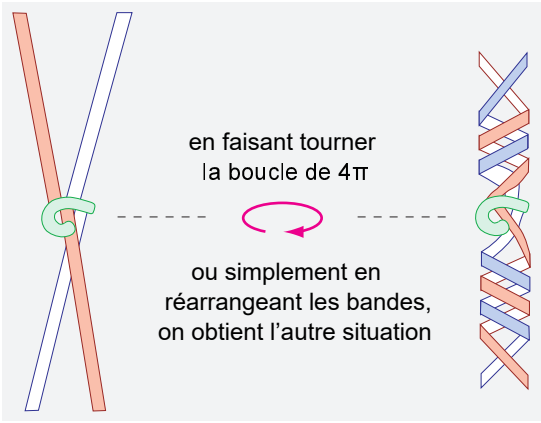


FIGURE 65 La généralisation du tour de la ceinture modélise le comportement de rotation d'une particule de spin 1/2: indépendamment du nombre de bandes, de tubes ou de ficelles attachés, les deux situations peuvent être transformées l'une en l'autre, soit en faisant tourner l'objet central de 4π, soit en gardant l'objet central fixe et en déplaçant les bandes autour de lui.

se déplacer la ceinture. Vous voudriez peut-être répéter le processus par vous-même, en
Défi 103 f utilisant une ceinture réelle, ou une bande de papier, afin de vous en faire une idée. Le processus de démêlage est souvent appelé le tour (l'astuce [N.d.T.]) de la ceinture, mais également le *tour des ciseaux*, le *tour de l'assiette*, le *tour des ficelles*, la *danse du vin des Philippines* ou la *danse des bougies balinaises*. Il est parfois attribué à tort à Dirac, parce qu'il l'utilisait souvent lors de ses cours.

Le corps humain possède en lui-même une telle ceinture: le *bras*. Prenez simplement votre main, placez un objet dessus pour plus de clarté (une tasse par exemple) et faite tourner votre main et l'objet de 2π en tordant votre bras. Après une deuxième rotation, le système sera de nouveau entièrement démêlé, comme le montre la Figure 64. Le tour est encore plus impressionnant lorsque l'on utilise *plusieurs* bras. Vous pouvez mettre
Défi 104 f vos deux mains (si vous choisissez la bonne position de départ) sous la tasse ou vous pouvez demander à un ou deux amis de garder chacun une main attachée à la tasse en même temps que vous. Le tour de la ceinture peut encore être réalisé dans ce cas et le
Défi 105 f système se démêle après deux tours complets.

Ceci nous conduit au moyen le plus général pour montrer le lien entre l'attachement et le spin 1/2. Collez simplement un nombre quelconque de fils, de ceintures ou de tubes, disons d'un demi-mètre de long, à un objet, comme le montre la Figure 65. (Avec un tel nombre de queues, il n'est plus approprié de l'appeler une boucle de ceinture.) Chaque bande est supposée s'étendre à l'infinie et d'y être attachée. Au lieu d'être attachées à

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

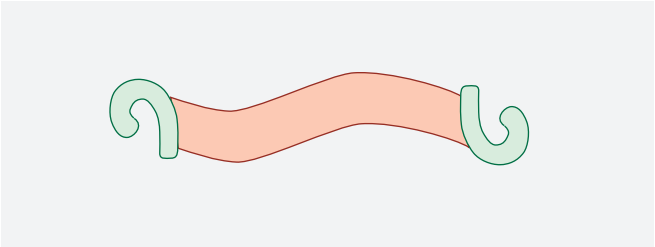


FIGURE 66 Deux boucles reliées à l'aide d'une ceinture, un moyen de visualiser deux particules de spin 1/2.

l'infini, on peut aussi imaginer que les ceintures soient attachées à un objet lointain et fixe, tout comme les bras sont attachés au corps humain. Si on fait tourner l'objet (qui représente la particule) de 2π, des torsions vont apparaître dans ses queues. Si on fait tourner l'objet d'un tour supplémentaire, pour un total de 4π, il est alors possible de faire disparaître toutes les torsions et tous les enchevêtrements, sans avoir à déplacer ou à faire tourner l'objet. Il vous faut vraiment faire l'expérience vous-même pour pouvoir le croire. Et le processus marche réellement pour un nombre *quelconque* de bandes collées à l'objet. Le site internet www.evl.uic.edu/hypercomplex/html/dirac.html fournit une animation montrant le processus avec quatre ceintures attachées.

En bref, toutes ces animations montrent que les boucles de ceintures, et en fait tous les systèmes (suffisamment) attachés, retournent dans leur état initial uniquement après des rotations de 4π, et *pas* après des rotations de seulement 2π. *Les objets attachés se comportent comme les particules de spin* 1/2. En fait, les objets attachés, telles que les boucles de ceinture, sont les *seuls* systèmes qui reproduisent les propriétés du spin 1/2. Lors de la dernière partie de notre aventure nous découvrirons les raisons sous-jacentes profondes de l'équivalence entre les particules de spin 1/2 et les systèmes attachés.

Défi 106 f

En explorant les symétries des fonctions d'onde, la théorie quantique montre que les rotations *nécessitent* l'existence d'un spin pour toutes les particules quantiques. Une investigation de la fonction d'onde montre que, lors des rotations, les fonctions d'onde des particules de matière élémentaires se comportent comme des objets attachés. Par exemple, une fonction d'onde dont l'équivalent attaché serait emmêlé acquière un signe négatif.

En résumé, la théorie quantique implique l'existence, quelque peu contre-intuitive, du spin de valeur 1/2. En particulier, il apparaît pour les particules de matière élémentaires.

L'extension du tour de la ceinture

Mais pourquoi les expériences montrent-elles que tous les fermions ont des spins demi-entiers et que tous les bosons ont des spins entiers? En particulier, pourquoi est-ce que les électrons obéissent au principe d'exclusion de Pauli? À première vue, le rapport entre la valeur du spin et les propriétés statistiques de la particule n'est pas clair. En fait, il y a plusieurs moyens de montrer que les rotations et les statistiques sont liées. La première démonstration, due à Wolfgang Pauli, utilisait les détails de la théorie quantique des champs et elle était si compliquée que ses ingrédients essentiels étaient cachés. Il fallut plusieurs décennies pour convaincre tout le monde qu'une observation plus approfondie concernant les ceintures était la partie centrale de la démonstration.

Page 153

Ref. 86

Ref. 87



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

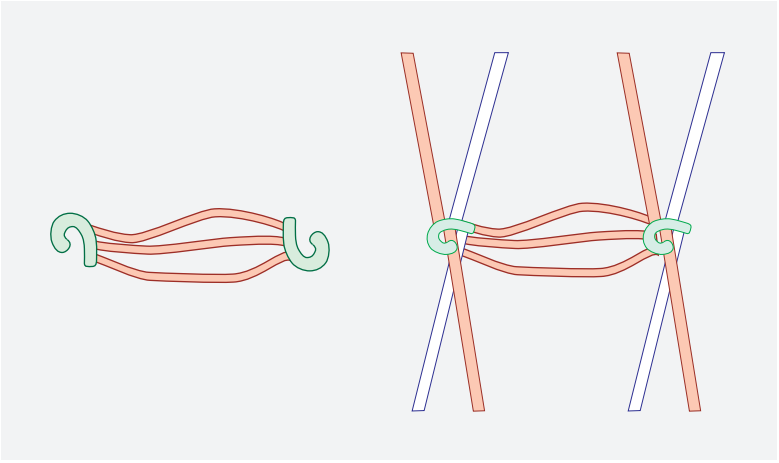


FIGURE 67 Des modèles de la ceinture étendus dans le cas de deux particules de spin 1/2.

En partant du modèle des renflements des particules quantiques, que montre la Figure 60, on peut s'imaginer un tube reliant deux particules, de la même façon qu'une ceinture relie deux boucles, tel que le montre la Figure 66. Les boucles représentent les particules. Le tube permet de suivre leur orientation relative. Si on fait tourner une particule (une boucle) de 2π autour d'un axe quelconque, une torsion est incorporée à la ceinture. Comme on vient de le montrer, si on fait tourner la même boucle de 2π supplémentaires, pour un total de 4π, la double torsion qui en résulte peut facilement être défaite sans avoir à déplacer ou à faire tourner les boucles.

Page 135

Maintenant, regardons à nouveau la Figure 66. Si on prend les deux boucles et que l'on *échange* simplement leur position, une torsion est incorporée à la ceinture. Si on les échange à nouveau, la torsion va disparaître. En bref, deux boucles de ceintures reliées retournent dans leur état initial uniquement après un double échange, et pas après un seul échange.

Autrement dit, si chaque boucle représente une particule et qu'une torsion signifie un facteur -1, la ceinture décrit exactement le comportement de la phase des fonctions d'onde de spin 1/2 lors d'une *rotation* ou lors d'un *échange*. En particulier, on voit que le comportement de la rotation et de l'échange sont liés.

D'une façon similaire, le tour de la ceinture lui-même peut être étendu à l'échange. Prenez deux boucles qui sont connectées avec de *nombreuses* bandes ou fils, comme sur la Figure 67 ou sur la Figure 68. La bande peut connecter les particules, ou se prolonger à l'infini, ou les deux. Un échange des deux boucles produit un enchevêtrement assez désordonné. Mais de façon presque incroyable, dans tous les cas, un deuxième échange ramène à la situation initiale, si les ceintures sont correctement réarrangées. Vous pourriez vouloir tester par vous-même que le comportement est également valable si des particules supplémentaires sont impliquées, tant que vous échangez la même paire de particules deux fois.

Défi 107 f

Nous en concluons que les objets attachés se comportent comme des fermions lors des échanges. Ensemble, ces observations forment le théorème spin-statistique pour les particules de spin 1/2: *le spin et le comportement lors des échanges sont liés*. En effet, ces arguments presque «expérimentaux» peuvent se formuler en langage mathématique exact

Ref. 88

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

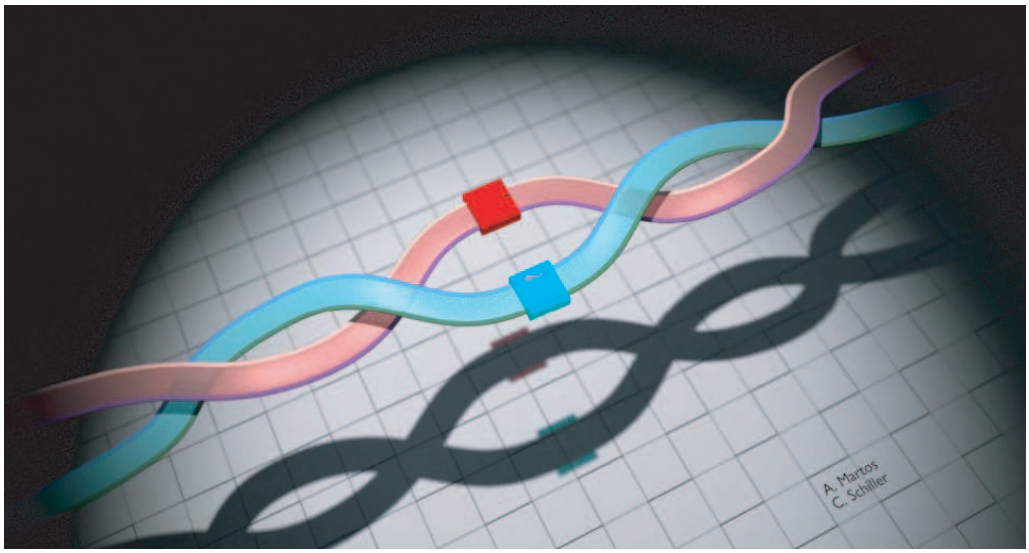


FIGURE 68 Supposez que les ceintures ne puissent pas être observées, mais que les objets carrés le puissent, et qu'ils représentent des particules. Nous avons vu plus haut que les boucles attachées à des ceintures se comportaient comme des particules de spin 1/2. L'animation montre que de telles particules retournent à leur position initiale si on permute leurs positions deux fois (mais pas près une seule permutation). De telles particules satisfont donc à la propriété définissant les *fermions*. (Dans le cas opposé, celui des bosons, un seul échange conduirait à la situation identique.) Vous pouvez reproduire le tour chez vous, en utilisant des bandes de papier. L'équivalence est démontrée ici avec deux ceintures par particule, mais le tour marche avec un nombre quelconque de ceintures attachées à chaque boucle. Cette animation est l'étape essentielle de la démonstration que les particules de spin 1/2 sont des fermions. Ceci s'appelle le *théorème spin-statistique*. (Film QuickTime © Antonio Martos)

en étudiant le comportement de l'espace!des configurations des particules. Ces investigations conduisent aux affirmations suivantes:

▷ Les objets de spin 1/2 sont des fermions.*

▷ L'échange et la rotation des particules de spin 1/2 sont deux processus similaires.

En bref, les objets qui se comportent comme des particules de spin 1/2 lors des rotations se comportent également comme des fermions lors des échanges, et vice versa. Le comportement d'échange des particules détermine leurs propriétés statistiques, alors que leur comportement de rotation détermine leur spin. En généralisant le tour de la ceinture à plusieurs boucles, chacune ayant plusieurs ceintures, nous avons donc visualisé le théorème spin-statistique pour les fermions.

Notez que tous ces arguments nécessitent trois dimensions d'espace, parce qu'il n'y

* Une observable mathématique qui se comporte comme une particule de spin 1/2 n'est ni un vecteur ni un tenseur, comme vous pourriez vouloir le vérifier. Un nouveau concept est nécessaire: une telle observable s'appelle un *spineur*. Nous l'introduirons en détail plus loin.

Défi 108 f
Page 214

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

a pas d'enchevêtrements (de nœuds) avec moins ou plus de dimensions.* Et le spin n'existe en effet que pour trois dimensions spatiales.

Le tour de la ceinture conduit à des casse-têtes intéressants. Nous avons vu qu'un objet de spin 1/2 pouvait être modélisé en imaginant qu'une ceinture que l'on étend jusqu'à l'infini y était attachée. Si nous voulons modéliser le comportement du spin avec des *ficelles* unidimensionnelles attachées au lieu de *bandes*, quel est le nombre minimum de ficelles dont on a besoin? Le casse-tête suivant est encore plus difficile: est-il possible de réaliser le tour de la ceinture si la boucle est collée à un matelas, le matelas agissant alors comme un nombre «infiniment grand» de ceintures?

Défi 109 e

Défi 110 d

Les anges, le principe d'exclusion de Pauli et la dureté de la matière

Pourquoi est-il possible de frapper à une porte? Pourquoi les pierres ne peuvent-elles pas passer à travers les troncs des arbres? Comment la montagne sur laquelle nous marchons peut-elle nous porter? Pourquoi ne pouvons-nous pas marcher à travers les murs? En physique classique, nous avons évité ce problème en considérant la solidité comme une propriété définissant la matière. Mais nous ne pouvons plus le faire: nous avons vu que la matière était constituée principalement de nuages électroniques de faible densité. Le quantum d'action nous oblige donc à *expliquer* le quantum de matière.

L'explication de l'impénétrabilité de la matière est si importante qu'elle a conduit à un prix Nobel de physique. L'interpénétration des corps est rendue impossible par le *principe d'exclusion de Pauli* qui s'applique aux électrons à l'intérieur de l'atome. Le principe d'exclusion de Pauli affirme que

▷ Deux fermions ne peuvent pas occuper le même état quantique.

Toutes les expériences connues corroborent cette affirmation.

Pourquoi les électrons et les autres fermions obéissent-ils au *principe d'exclusion* de Pauli? La réponse peut être apportée par un argument beau et simple. Nous savons qu'échanger deux fermions produit un signe moins dans la fonction d'onde totale. Imaginez que ces deux fermions soient, comme le dirait un physicien classique, localisés au même endroit, ou, comme dirait un physicien quantique, dans le même état. Si cela était possible, un échange ne changerait rien au système. Mais un échange de fermions doit produire un signe moins pour l'état total. Les deux possibilités (pas d'échange du tout ainsi qu'un signe moins) ne peuvent pas se réaliser en même temps. Il n'y a qu'une issue pour s'en sortir: deux fermions doivent absolument éviter de se trouver dans le même état. Ceci constitue le principe d'exclusion de Pauli.

Ref. 89

Le principe d'exclusion est la raison pour laquelle deux morceaux de matière de la vie quotidienne ne peuvent pas s'interpénétrer, mais doivent se *repousser*. Par exemple, prenez une cloche. Une cloche ne fonctionnerait pas si les pièces qui s'entrechoquent

* Bien sûr, les nœuds et les enchevêtrements existent en dimension supérieure. Au lieu de considérer des lignes unidimensionnelles nouées, on peut considérer des plans noués ou des hyperplans de dimension supérieure noués. Par exemple, les plans déformables peuvent être noués dans un espace de dimension 4, de même que les espaces de dimension 3 déformables dans un espace de dimension 5. Cependant, les dimensions effectives qui produisent le nœud sont toujours au nombre de trois.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

pour produire le son pouvaient s'interpénétrer. Mais dans n'importe quel exemple de deux objets qui s'interpénètrent, les électrons des différents atomes devraient se trouver au même endroit: ils devraient se trouver dans le même état. Ceci est impossible. Le principe d'exclusion de Pauli interdit l'interpénétration de la matière. Les cloches ne fonctionnent qu'à cause du principe d'exclusion.

Pourquoi est-ce que nous ne passons pas à travers le sol mais restons debout sur sa surface, alors même que la gravité nous tire vers le bas? De nouveau, la raison est le principe d'exclusion de Pauli. Pourquoi est-ce que le sol lui-même ne tombe pas? Il ne tombe pas parce que la matière de la Terre ne peut pas s'interpénétrer et parce qu'il n'est pas possible de rapprocher les atomes les uns des autres en dessous d'une certaine distance minimale. Autrement dit, le principe d'exclusion de Pauli implique que la matière atomique ne peut pas se compresser indéfiniment. À partir d'un certain niveau, une *pression effective de Pauli* apparaît, de sorte qu'il s'ensuit une limite à la compression. C'est pour cette raison, par exemple, que les planètes, constituées de matière atomique (ou encore les étoiles à neutrons, constituées de neutrons qui ont aussi un spin 1/2 et obéissent donc également au principe d'exclusion) ne s'effondrent pas sous l'effet de leur propre gravité.

Le principe d'exclusion est la raison pour laquelle les atomes sont des nuages électroniques *étendus* et que différents atomes ont différentes tailles. En fait, le principe d'exclusion oblige les électrons dans les atomes à former des *couches*. Lorsque les électrons sont ajoutés autour d'un noyau, et lorsqu'une couche est remplie, une nouvelle couche démarre. Ceci est à l'origine du tableau périodique des éléments.

La taille de n'importe quel atome est la taille de sa dernière couche. Sans le principe d'exclusion, les atomes seraient aussi petit qu'un atome d'hydrogène. En fait, la plupart des atomes sont considérablement plus gros. Le même argument s'applique aux noyaux: leur taille est donnée par la dernière couche de nucléons. Sans le principe d'exclusion, les noyaux seraient aussi petit qu'un seul proton. En fait, ils sont habituellement environ 100 000 fois plus gros.

Le principe d'exclusion règle également une ancienne question: combien d'*anges* peuvent danser sur la pointe d'une épingle? (Notez que les anges, le cas échéant, doivent être constitués de fermions, ce que vous pourriez vouloir déduire à partir des informations que l'on connait sur eux, et que la pointe d'une épingle est un point unique de l'espace.) La théorie et l'expérience confirment toutes les deux la réponse qu'avait déjà donnée Thomas d'Aquin au Moyen Âge: seulement *un* ange! Le principe d'exclusion des fermions pourrait donc tout aussi bien s'appeler le «principe d'exclusion des anges». Pour rester dans le même domaine, le principe montre également que les *fantômes* ne peuvent pas être des objets, car les fantômes sont supposés pouvoir passer à travers les murs.

Défi 111 e

Ref. 90

Résumons tout cela! En simplifiant quelque peu, le principe d'exclusion maintient la forme des choses qui nous entourent. Sans le principe d'exclusion, il n'y aurait pas d'objets de dimension 3. Seul le principe d'exclusion établit le diamètre des nuages atomiques, empêche ces nuages de fusionner, et les maintient à distance. Cette répulsion est à l'origine de la taille du savon, des planètes et des étoiles à neutrons. Les formes de tous les solides et de tous les liquides sont une conséquence directe du principe d'exclusion. Autrement dit, lorsque l'on frappe sur une table ou à une porte, on démontre expérimentalement que ces objets ainsi que nos mains sont constitués de fermions.

Jusqu'à présent, nous n'avons considéré que les fermions de spin 1/2. Nous ne par-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

lerons pas beaucoup des particules de spin impair de valeur supérieure, telle que 3/2 ou 5/2. Ces particules peuvent toutes être vues comme étant composées d'entités de spin 1/2. Pouvez-vous le confirmer? Défi 112 f

Nous n'avons pas non plus parlé de spins plus petits que 1/2. Un théorème célèbre établit qu'une valeur de spin comprise entre 0 et 1/2 est impossible en dimension 3. Les spins plus petits sont impossibles, car le plus grand angle de rotation qui puisse être distingué et mesuré en dimension 3 est 4π. Il n'y a aucun moyen de mesurer un angle plus grand, car le quantum d'action rend cela impossible. Par conséquent, il ne peut pas y avoir de spin compris entre 0 et 1/2 dans la nature. Ref. 82

Le spin est-il une rotation autour d'un axe?

Expérimentalement, le spin d'une particule se comporte comme un moment cinétique intrinsèque, il s'additionne comme un moment cinétique, il contribue à la conservation du moment cinétique, il est décrit comme un moment cinétique, et il a un nom synonyme de moment cinétique. En dépit de tout ceci, pendant de nombreuses décennies, un mythe étrange et erroné s'était répandu dans de nombreux cours et de nombreux manuels de physique un peu partout dans le monde: «le spin 1/2, malgré son nom, n'est *pas* une rotation autour d'un axe.» Il est temps d'en finir avec cet exemple de pensée incorrecte.

Les électrons ont bien un spin 1/2 et ils ont une charge électrique. Les électrons ainsi que toutes les autres particules chargées de spin 1/2 on bien un moment magnétique.* On s'attend à un moment magnétique pour n'importe quelle charge en rotation. Autrement dit, le spin 1/2 se comporte comme une rotation. Cependant, si on suppose qu'une particule est constituée d'une distribution de charge *continue* en mouvement de rotation, on trouve une valeur erronée pour le moment magnétique. Au début du XXe siècle, alors que les physiciens pensaient toujours en termes de physique classique, ils en conclurent que les particules chargées de spin 1/2 ne pouvaient donc pas tourner. Ce mythe a survécu à travers de nombreux manuels. Mais la déduction correcte est que l'hypothèse d'une distribution continue de charge électrique est fausse. En effet, la charge est quantifiée et personne ne s'attend à ce qu'une charge élémentaire soit distribuée de façon continue dans l'espace, car cela contredirait sa quantification.

Une autre raison en défaveur du mythe est la rotation elle-même. Le mythe est basé sur une réflexion classique et il affirme que tout objet en rotation doit avoir un spin *entier*. Puisque le spin demi-entier n'est pas possible en physique classique, il est prétendu qu'un tel spin n'est pas dû à un mouvement de rotation. Mais souvenons-nous de ce qu'est une rotation. Le tour de la ceinture pour le spin 1/2, tout comme le cas du spin entier, nous rappelle que la *rotation* d'un corps autour d'un autre est une fraction ou un multiple d'un échange. Ce que nous appelons un objet tournant dans la vie quotidienne est un objet qui échange de façon continue les positions de ses constituants, et vice versa.

▷ La rotation et l'échange sont le même processus.

Or, nous venons juste de trouver que le spin était un comportement d'échange. Puisque la rotation est un échange et que le spin est un échange, il s'en suit que

* Ce moment magnétique peut facilement se mesurer à l'aide d'une expérience, bien qu'elle ne soit pas du même type que celle de Stern et Gerlach. Pourquoi pas? Défi 113 pe

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

▷ Le spin *est* une rotation.

Puisque nous avons déduit le spin, comme le fit Wigner, à partir de l'invariance de la rotation, cette conclusion n'est pas une surprise. De même, le modèle de la ceinture d'une particule de spin 1/2 nous dit qu'une telle particule peut tourner de façon continue sans
Page 148 aucune entrave. De plus, le moment magnétique obtient alors sa valeur correcte. En bref, il nous est permis de soutenir que le spin est une rotation autour d'un axe, sans aucune contradiction avec les observations, même pour le spin 1/2.

En résumé, le modèle de la ceinture montre que le spin 1/2 est une sorte de rotation,
Ref. 91 tant que l'on suppose que seule la boucle peut être observée (mais pas les ceintures) et que la charge élémentaire n'est pas distribuée de façon continue dans l'espace.*

Puisque les propriétés de permutation et les propriétés de spin des fermions sont si bien décrites par le modèle de la ceinture, nous pourrions être tentés de conclure que ces propriétés sont réellement la conséquence de liens, du même type que ceux de la ceinture, entre les particules et le monde extérieur. Il se pourrait que, pour certaines raisons, nous n'observions que les boucles, mais pas les ceintures elles-mêmes. Dans la dernière partie de cette promenade, nous découvrirons si cette idée est correcte ou non.

La rotation a besoin des antiparticules

Le lien entre la rotation et les antiparticules est peut-être la conclusion la plus étonnante des expériences montrant l'existence du spin. Jusqu'à présent, nous avons vu que la rotation nécessitait l'existence du spin, que le spin apparaissait lorsque la relativité était
Vol. II, page 72 introduite dans la théorie quantique, et que la relativité avait besoin de l'antimatière. Si on considère ces trois affirmations dans leur ensemble, la conclusion du titre n'est plus une surprise: la rotation a besoin des antiparticules. Il est intéressant de noter qu'il existe un argument simple qui permette d'arriver à la même conclusion avec le modèle de la ceinture, si on le généralise de l'espace seul à l'*espace-temps* complet.

Pour apprendre comment penser en termes d'espace-temps, prenons une particule et limitons-la à deux petites queues, de sorte que la particule soit un petit segment de droite. Lorsqu'elle se déplace dans un espace-temps de dimension 2 + 1, la particule
Défi 114 pe est décrite par un ruban. Jouer avec des rubans dans l'espace-temps, au lieu de ceintures dans l'espace, fournit de nombreuses conclusions intéressantes. Par exemple, la Figure 69 montre qu'enrouler un ruban de caoutchouc autour des doigts permet de montrer, une nouvelle fois, qu'une rotation d'un corps de 2π, en présence d'un deuxième corps, est la même chose qu'échanger les positions des deux corps.** Les deux faces de la main transforment la même condition initiale, le long d'un des bords de la main, en la même condition finale, le long de l'autre bord. Nous avons donc étendu avec succès un résultat, déjà connu dans le cas de l'espace seul, à l'espace-temps: la rotation et l'échange sont équivalents.

* De toute évidence, la structure exacte de l'électron demeure *floue* à ce stade. En physique classique, tout moment cinétique S est donné par $S = \Theta\omega$. Pourtant, à ce stade, ni le moment d'inertie Θ, qui est lié au rayon de rotation et à la masse de l'électron, ni la vitesse angulaire ω ne sont connus. Nous allons devoir attendre un peu, jusqu'à la dernière partie de notre aventure, pour en découvrir plus.

** De toute évidence, le raisonnement complet nécessiterait de vérifier l'intégralité du modèle du spin 1/2 de
Défi 115 pe la Figure 65 avec les quatre dimensions de l'espace-temps. Mais ceci n'est pas une tâche facile et il n'existe

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

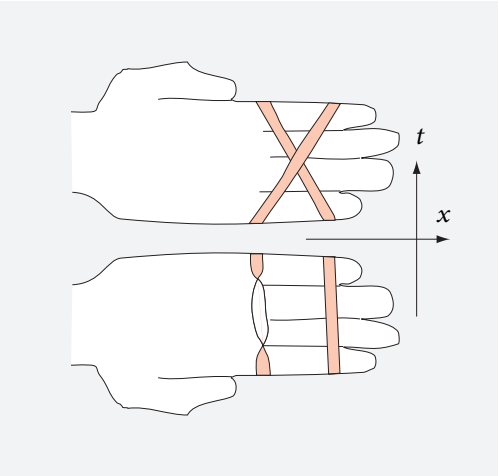


FIGURE 69 L'équivalence entre l'échange et la rotation dans l'espace-temps.

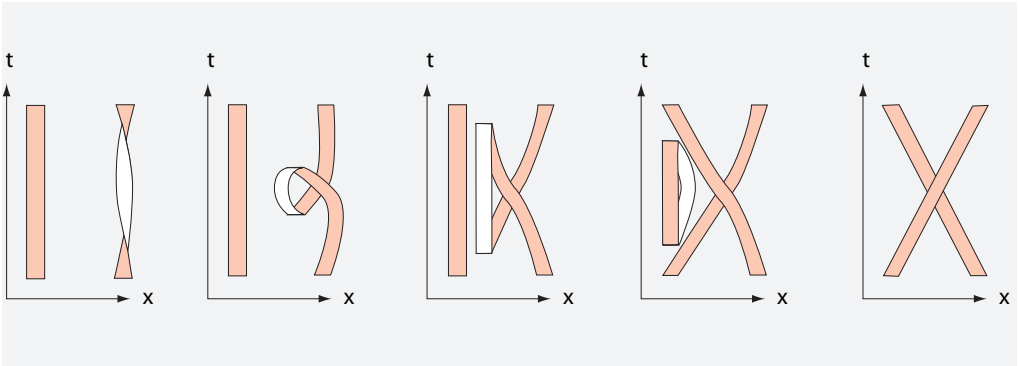


FIGURE 70 Les ceintures dans l'espace-temps: la rotation et les antiparticules.

Si vous pensez que la Figure 69 n'est pas une explication satisfaisante, vous avez raison. Une explication plus satisfaisante doit comporter une séquence continue d'étapes, réalisant l'équivalence entre la rotation et l'échange. C'est ce que montre la Figure 70. On suppose que chaque particule est décrite par un segment. Sur la figure, les deux segments sont placés horizontalement. Le diagramme le plus à gauche montre deux particules: une au repos et une qui tourne de 2π. La déformation du ruban montre que ce processus est équivalent à l'échange de position de deux particules, ce que montre le diagramme le plus à droite.

Mais le point essentiel est fourni par les diagrammes intermédiaires. Nous notons que la séquence montrant l'équivalence entre la rotation et l'échange nécessite l'utilisation d'une boucle. Mais une telle boucle dans l'espace-temps décrit l'apparition d'une paire particule-antiparticule! Autrement dit, sans les antiparticules, l'équivalence entre la rotation et l'échange ne tiendrait pas. En bref, la rotation dans l'espace-temps nécessite l'existence des antiparticules.

pas encore de bonne représentation pour le visualiser.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

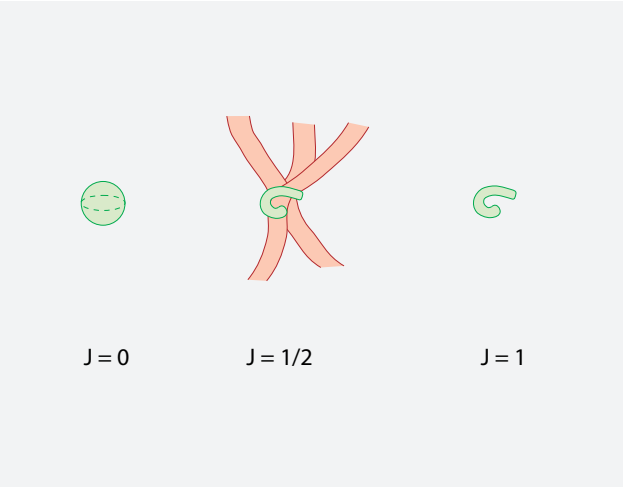


FIGURE 71 Quelques visualisations de représentations du spin.

POURQUOI EST-IL IMPOSSIBLE DE FAIRE DE L'ESCRIME AVEC DES FAISCEAUX LASER?

Lorsqu'une épée s'approche dangereusement, il est possible de l'arrêter avec une deuxième épée. De nombreux films anciens utilisent de telles scènes. Lorsqu'un faisceau laser s'approche, il est impossible de le repousser avec un deuxième faisceau, contrairement à tout ce que nous montrent les films de science-fiction. Frapper deux faisceaux laser l'un contre l'autre est impossible. L'explication du théorème spin-statistique que l'on a détaillée plus haut, nous montre pourquoi.

Les électrons de l'épée sont des fermions et ils obéissent au principe d'exclusion de Pauli. Les fermions rendent la matière impénétrable. En revanche, les photons d'un faisceau laser sont des bosons. Deux bosons *peuvent* se trouver dans le même état et permettent donc l'interpénétration. La matière est impénétrable parce qu'*elle est constituée de fermions* à son niveau fondamental. Le rayonnement est composé de bosons et les faisceaux lumineux peuvent donc se croiser les uns les autres. C'est donc la distinction entre les fermions et les bosons qui explique pourquoi il est possible de toucher les objets alors qu'il n'est pas possible de toucher les images. Au cours de la première étape de notre ascension de la montagne, nous avons commencé par noter cette différence. Nous connaissons maintenant son origine.

Vol. I, page 98

LE SPIN, LES STATISTIQUES ET LES OBJETS COMPOSITES

Lors des rotations, les particules de spin entier se comportent différemment des particules de spin demi-entier. Les particules de spin entier ne présentent pas de changements de signe étranges lors des rotations de 2π. Dans la visualisation à l'aide des ceintures, les particules de spin entier n'ont pas besoin d'être attachées par des ficelles. En particulier, une particule de spin 0 correspond de toute évidence à une sphère. Des modèles pour d'autres valeurs de spin importantes sont représentées sur la Figure 71. En explorant leurs propriétés de la même façon que nous l'avons fait ci-dessus, on aboutit au *théorème spin-statistique* complet:

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

▷ L'échange et la rotation des objets sont des processus similaires.

▷ Les objets de spin demi-entier sont des fermions. Ils obéissent au principe d'exclusion de Pauli.

▷ Les objets de spin entier sont des bosons.

Défi 116 f Vous pourriez démontrer par vous-même que ceci suffit à établir la règle suivante:

▷ Les composites de bosons, de même que les composites ayant un nombre pair de fermions (à faible énergie) sont des bosons. Les composites ayant un nombre impair de fermions sont des fermions*

Ces liens expriment les caractéristiques fondamentales du monde tridimensionnel dans lequel nous vivons. À quelle classe de particules est-ce que les balles de tennis, les gens, Défi 118 e les arbres, les montagnes et tous les autres objets macroscopiques appartiennent-ils?

La taille et la densité de la matière

Les trois dimensions d'espace ont de nombreuses conséquences pour les systèmes physiques. Nous savons que toute matière est constituée de fermions, tels que des électrons, des protons et des neutrons. Le principe d'exclusion a une conséquence intéressante en ce qui concerne les systèmes composés de N fermions *identiques*: de tels systèmes obéissent à l'expression suivante entre leur quantité de mouvement p et leur taille l:

$$\Delta p \, \Delta l \gtrsim N^{1/3} \hbar \,. \tag{67}$$

Défi 119 f Pouvez-vous dériver cette expression? Cette *relation d'indétermination étendue* four-
Ref. 92 nit un moyen simple pour estimer la taille des systèmes matériels. En particulier elle implique que l'énergie moyenne par quanton augmente avec la densité de quantons. Défi 120 f Pouvez-vous le montrer?

La relation d'indétermination étendue implique que les systèmes matériels dont la taille est due aux électrons (ce sont donc tous les systèmes de matière condensée) ont essentiellement des densités de matière et d'énergie similaires. La relation d'indétermination étendue implique également que les noyaux, qui sont composés de protons et de neutrons, ont tous essentiellement la même densité de matière.

En ce qui concerne les bosons (les constituants des rayonnements) il n'y a pas de relation d'indétermination étendue, car le nombre de constituants N dans un état quantique particulier n'a aucun effet et n'a aucune limite. La relation d'indétermination ne limite donc pas la densité de puissance de la lumière laser. En effet, la densité de puissance des faisceaux laser varie beaucoup plus que la densité de matière des solides.

La relation d'indétermination souligne une autre différence entre la matière et le Page 53 rayonnement. Comme nous l'avons vu ci-dessus, un système de N bosons identiques

* Cette règle implique que le spin 1 et les spins supérieurs peuvent également être obtenus *avec* des queues. Défi 117 e Pouvez-vous trouver une telle représentation?

Notez que les composites de fermions ne peuvent être des bosons que jusqu'à une certaine énergie, au-delà de laquelle la composition se rompt. Sinon, en assemblant des fermions en bosons, on pourrait avoir des fermions dans le même état.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

(tel qu'un faisceau laser) obéit à une indétermination entre son nombre de particules et sa phase. On peut facilement la dériver à partir de la relation d'indétermination entre l'énergie et le temps. La relation entre le nombre et la phase peut s'écrire approximativement

$$\Delta N \, \Delta\varphi \gtrsim 1 \, . \tag{68}$$

Cette relation est importante pour l'utilisation des lasers dans les expériences de précision. Elle limite à quel point un système peut être proche d'une onde sinusoïdale pure. En effet, pour une onde sinusoïdale pure le produit d'indétermination serait zéro.

Pour les fermions, pour lesquels le nombre maximum de particule dans le même état est égale à 1, la relation d'indétermination entre le nombre et la phase se réduit à une indétermination totale de la phase. Autrement dit, nous en concluons, une nouvelle fois, qu'il n'est pas possible d'avoir des faisceaux de fermions qui se comportent comme des ondes. Il n'y a pas d'ondes de fermions classiques dans la nature, pas de faisceaux de fermions cohérents.

Page 113

Un résumé sur le spin et l'indistinguabilité

Le quantum d'action $\hbar$ implique que les systèmes physiques sont constitués de deux types de particules quantiques indistinguables: les *bosons* et les *fermions*. Les deux comportements d'échange possibles sont liés à la valeur du spin de la particule, car l'échange est lié à la rotation. Le lien entre le spin et la rotation implique que les antiparticules existent. Il implique également que le spin est un phénomène intrinsèquement tridimensionnel.

Les expériences montrent que le rayonnement est constitué de particules élémentaires qui se comportent comme des bosons. Les bosons ont un spin entier. Plusieurs bosons (tels que deux photons) *peuvent partager* le même état. C'est ce partage qui rend possible la lumière laser.

Les expériences montrent que la matière est constituée de particules élémentaires qui se comportent comme des fermions. Les fermions ont un spin demi-entier. Ils obéissent au principe d'exclusion de Pauli: deux fermions *ne peuvent pas* se trouver dans le même état. Le principe d'exclusion entre les électrons explique la structure des atomes et (en partie) leur taille. De même, il explique leur comportement chimique, comme nous le découvrirons plus loin. Le principe d'exclusion, lorsqu'on lui adjoint la répulsion électrostatique des électrons, explique l'incompressibilité de la matière et son impénétrabilité.

Les fermions sont responsables de la «dureté» de la matière, alors que les bosons permettent aux faisceaux lumineux de se croiser.

Les limites de la statistique quantique et quelques questions qui font toujours débat

Le sujet de la statistique des particules quantiques reste un domaine de recherche en physique théorique et en physique expérimentale. En particulier, des physiciens ont cherché (et continue de le faire) à généraliser les comportements possibles lors des échanges de particules.

En deux dimensions d'espace, l'effet d'un échange de particules sur la fonction d'onde est une phase continue. Ceci contraste avec le cas à trois dimensions, pour le-

Page 155

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

quel le résultat est un changement de signe. Les objets quantiques de dimension 2 sont donc appelés des *anyons* parce qu'ils peuvent avoir «n'importe quel» («any» en anglais [N.d.T.]) spin. Les anyons apparaissent comme des quasiparticules dans diverses expériences de la physique de l'état solide, parce que leur configuration effective est souvent bidimensionnelle. L'*effet Hall quantique fractionnel* (peut-être la découverte la plus intéressante de la physique expérimentale moderne) a propulsé les anyons sur la scène de la recherche moderne.

Vol. V, page 107

D'autres théoriciens ont généralisé le concept de fermion d'une façon différente, en introduisant les parafermions, les parabosons, les plektons et d'autres concepts hypothétiques. Oscar Greenberg a passé une grande partie de sa vie professionnelle sur le sujet. Sa conclusion est que

Ref. 93

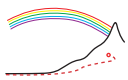
▷ Dans l'espace-temps de dimension 3 + 1, seuls les fermions et les bosons existent.

Pouvez-vous montrer que ce résultat implique que les fantômes qui apparaissent dans les contes écossais n'existent pas?

Défi 121 e

D'un autre point de vue, le modèle de la ceinture pour le spin 1/2 nous invite à étudier le comportement des tresses, des maillons ouverts et des nœuds. (En mathématiques, les tresses et les maillons ouverts sont faits de brins qui s'étendent à l'infini.) Cette partie fascinante de la physique mathématique est devenue importante parmi les théories unifiées modernes: elles établissent toutes que les particules (surtout aux énergies élevées) ne sont pas des entités ponctuelles, mais qu'elles sont étendues. La quête est de comprendre ce qu'il advient de la symétrie de permutation dans une théorie unifiée de la nature. Un aperçu des difficultés est déjà apparu plus haut: comment les Figures 60, 65 et 70 peuvent-elle être réconciliées et combinées? Nous réglerons ce problème dans la dernière partie de notre ascension de la montagne.

Vol. VI, page 174



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Chapitre 7

Les superpositions et les probabilités – la théorie quantique sans idéologie

Ref. 94

> The fact that an adequate philosophical presentation has been so long delayed is no doubt caused by the fact that Niels Bohr brainwashed a whole generation of theorists into thinking that the job was done fifty years ago.**
>
> Murray Gell-Mann

Pourquoi ce problème de physique célèbre suscite-t-il des émotions si fortes? Et en particulier, qui subit un lavage de cerveau? Est-ce Gell-Mann, qui a découvert les quarks, ou bien la plupart des physiciens du monde qui travaillent sur la théorie quantique en suivant le point de vue de Niels Bohr? Au cours du XXe siècle, la mécanique quantique a semé le désarroi chez beaucoup d'entre eux. Notre but est simple: nous voulons *comprendre* la théorie quantique. La mécanique quantique n'est pas coutumière pour deux raisons: elle permet des *superpositions* et elle conduit à des *probabilités*. Dans ce chapitre nous explorons et clarifions ces deux sujets, jusqu'à ce que nous comprenions la théorie quantique.

Les probabilités apparaissent chaque fois qu'un aspect d'un système microscopique est mesuré. Le quantum d'action, la plus petite quantité de changement que l'on trouve dans la nature, conduit à l'apparition de probabilités au cours des mesures.

Les superpositions apparaissent parce que le quantum d'action change radicalement les deux concepts fondamentaux de la physique classique: l'état et le système. L'*état* n'est plus décrit et défini par les valeurs spécifiques que prennent la position et la quantité de mouvement, mais par la fonction d'onde spécifique que «prennent» les opérateurs de position et de quantité de mouvement.*** De plus, en physique classique un *système* est décrit et défini comme un ensemble d'aspect permanents de la nature, et la permanence a été définie comme étant une interaction négligeable avec l'environnement. La mécanique quantique nous montre que ces définitions doivent être modifiées.

Clarifier l'origine des superpositions et des probabilités, de même que les concepts de système et d'état, nous aidera à ne pas nous perdre en chemin vers le sommet de la

** «Le fait qu'une présentation philosophique adéquate ait été retardée pendant si longtemps est sans aucun doute dû au fait que Niels Bohr a pratiqué un lavage de cerveau sur toute une génération de théoriciens en leur faisant croire que le travail avait été fait il y a cinquante ans.»

*** Il est équivalent, et souvent conceptuellement plus clair, de dire que l'état est décrit par un ensemble complet d'opérateurs qui commutent. En fait, la discussion concernant les états est quelque peu simplifiée si on utilise la *représentation d'Heisenberg*. Cependant, dans ce livre nous étudions le problème uniquement avec la *représentation de Schrödinger*, c.-à-d. en utilisant les fonctions d'ondes.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

montagne Mouvement. En effet, un nombre assez important de chercheurs se sont perdu depuis que la théorie quantique est apparue, y compris des physiciens importants tels que Murray Gell-Mann et Steven Weinberg.

Pourquoi les gens sont-ils soit morts soit vivants?

L'équation d'évolution de la mécanique quantique est *linéaire* par rapport à la fonction d'onde. Cette linéarité reflète l'existence de superpositions. Les superpositions impliquent qu'il est possible d'imaginer et d'essayer de construire des systèmes pour lesquels l'état ψ est une superposition de deux situations radicalement distinctes, telles que celles d'un chat mort et d'un chat vivant. Ce célèbre animale de fiction s'appelle le *chat de Schrödinger*, d'après l'auteur de l'exemple. Est-il possible de produire un chat dans un tel état? Et comment évoluerait-il dans le temps? On peut se poser ces deux mêmes questions dans d'autres situations. Par exemple, est-il possible de produire une superposition d'un état dans lequel une voiture serait à l'intérieur d'un garage fermé, avec un état dans lequel la voiture serait à l'extérieur? Que se passerait-il dans ce cas?

Les superpositions macroscopiques sont étranges. De telles situations ne s'observent pas dans la vie quotidienne, et même très rarement en laboratoire. La raison de cette rareté est un aspect important de ce que l'on appelle souvent «l'interprétation» de la mécanique quantique. En fait, de telles situations étranges *sont* possibles, et la superposition d'états macroscopiquement distincts a effectivement été observée dans quelques cas, bien que ce ne soit ni pour des chats, ni pour des personnes et ni pour des voitures. Pour nous faire une idée des contraintes, commençons par spécifier la situation plus en détails.*

Les superpositions macroscopiques, la cohérence et l'incohérence

La discussion porte sur les superpositions linéaires du type $\psi = a\psi_a + b\psi_b$, où ψ_a et ψ_b sont des états macroscopiquement distincts du système en cours de discussion, et où a et b sont des coefficients complexes. Des états sont dits *macroscopiquement distincts* lorsque chacun correspond à une situation macroscopique différente, c.-à-d. lorsqu'il est possible de distinguer les deux états en utilisant les concepts ou les méthodes de mesure de la physique classique. En particulier, cela signifie que l'action physique nécessaire pour passer d'un état à l'autre, doit être bien plus grande que $\hbar$. Par exemple, deux positions différentes d'un corps composé d'un grand nombre d'atomes sont macroscopiquement distinctes. L'état d'un chat vivant et celui du même chat lorsqu'il est mort diffèrent également par un grand nombre de quanta d'action.

Une situation «étrange» est donc la superposition d'états macroscopiquement distincts. Élaborons plus clairement l'essence de ces superpositions macroscopiques. Étant donnés deux états macroscopiquement distincts ψ_a et ψ_b, toute superposition du type $\psi = a\psi_a + b\psi_b$ est appelé un *état pur*. Puisque les états ψ_a et ψ_b peuvent interférer, on parle

* La plus grande partie de ce qui peut être dit sur ce sujet l'a été par trois chercheurs importants: Niels Bohr, un des pères de la physique quantique, John von Neumann qui, dans les années 1930, souligna la différence entre évolution et décohérence, et par Heinz-Dieter Zeh qui, dans les années 1970, souligna l'importance des thermostats et de l'environnement lors du processus de décohérence

Ref. 95
Ref. 96

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Toute « vue artistique » que l'on en fait est fausse.

(Pourquoi ?)

Défi 122 e

FIGURE 72 Une vue artistique d'une superposition macroscopique est impossible parce que l'on ne trouve pas de telles superpositions dans notre environnement.

encore de *superposition cohérente (en phase)*. Dans le cas d'une superposition d'états macroscopiquement distincts, il est évident que le produit scalaire $\psi_a^\dagger \psi_b$ s'annule. Dans le cas d'une superposition cohérente, le produit des coefficients $a^* b$ est différent de zéro. Ce fait peut également s'exprimer à l'aide de la *matrice densité* ρ du système, défini par $\rho = \psi \otimes \psi^\dagger$. Ici, $\otimes$ dénote le produit dyatique non commutatif (produit tensoriel) qui produit un tenseur (une matrice) à partir de deux vecteurs. Dans le cas présent, la matrice densité est donnée par:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{pur}} = \psi \otimes \psi^\dagger &= |a|^2 \psi_a \otimes \psi_a^\dagger + |b|^2 \psi_b \otimes \psi_b^\dagger + a\, b^* \psi_a \otimes \psi_b^\dagger + a^*\, b\, \psi_b \otimes \psi_a^\dagger \\ &= (\psi_a, \psi_b) \begin{pmatrix} |a|^2 & a\, b^* \\ a^*\, b & |b|^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_a^\dagger \\ \psi_b^\dagger \end{pmatrix} . \end{aligned} \tag{69}$$

On peut alors dire que chaque fois que le système est dans un état pur (cohérent) sa matrice densité (sa *fonctionnelle densité*) contient alors des termes en dehors de la diagonale du même ordre de grandeur que ceux de la diagonale.* Une telle matrice densité correspond à la situation étrange que nous avons mentionnée plus haut et que l'on n'observe jamais dans la vie quotidienne. Nous comprendrons bientôt pourquoi.

Voyons maintenant la situation inverse d'une matrice densité pour des états macroscopiques distincts ayant des termes non-diagonaux qui s'*annulent*. Pour deux états, l'exemple

$$\begin{aligned} \rho_{\text{mixte}} &= |a|^2 \psi_a \otimes \psi_a^\dagger + |b|^2 \psi_b \otimes \psi_b^\dagger \\ &= (\psi_a, \psi_b) \begin{pmatrix} |a|^2 & 0 \\ 0 & |b|^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_a^\dagger \\ \psi_b^\dagger \end{pmatrix} , \end{aligned} \tag{71}$$

décrit un système qui ne possède *pas* de cohérence de phase du tout. Une telle matrice densité diagonale ne peut pas être celle d'un état pur. Elle décrit un système qui a une probabilité $|a|^2$ de se trouver dans l'état ψ_a et une probabilité $|b|^2$ de se trouver dans l'état ψ_b. On dit qu'un tel système est dans un état mixte, parce que son état *n'est pas connu*,

* En utilisant la matrice densité, on peut réécrire l'équation d'évolution d'un système quantique:

$$\dot{\psi} = -iH\psi \quad \text{devient} \quad \frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}t} = -\frac{i}{\hbar}[H, \rho] . \tag{70}$$

Les deux sont complètement équivalentes. (La nouvelle expression est parfois également appelée l'*équation de von Neumann*.) Nous ne ferons aucun calcul ici. Les expressions sont fournies pour que vous puissiez les reconnaître si vous les rencontrez ailleurs.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

ou, de façon équivalente, qu'il est dans une *superposition incohérente (en phase)*: il n'est pas possible d'observer des interférences dans une telle situation. Un système décrit par un état mixte se trouve toujours *soit* dans l'état ψ_a, *soit* dans l'état ψ_b. Autrement dit, une matrice densité diagonale pour des états macroscopiquement distincts n'est pas en contradiction, mais en accord avec l'expérience quotidienne.

Dans la représentation utilisant les matrices densité, ce sont les éléments non diagonaux qui renferment la différence entre les superpositions normales, c.-à-d. incohérentes, et les superpositions inhabituelles ou étranges, c.-à-d. cohérentes.

La situation expérimentale est claire: pour des états macroscopiquement distincts, seules des matrices densité diagonales sont observées dans la vie quotidienne. Presque tous les systèmes en superposition macroscopique cohérente perdent d'une façon ou d'une autre leurs éléments de matrice non diagonaux. Comment ce processus de *décohérence* (que l'on appelle également *désintrication* dans certains contextes) se produit-il? C'est la matrice densité elle-même qui nous le montre.

La décohérence est due aux thermostats

En thermodynamique, la matrice densité ρ d'un gros système est utilisée pour la définition de son entropie S (ainsi que de toutes ses autres grandeurs thermodynamiques). Ces études montrent que

Ref. 97
Défi 123 pe

$$S = -k \operatorname{tr}(\rho \ln \rho) \,, \tag{72}$$

où tr dénote la *trace* d'une matrice, c.-à-d. la somme de tous les éléments de sa diagonale, et k est la constante de Boltzmann. Cette expression est donc la définition de l'entropie en mécanique quantique.

Mais rappelons-nous maintenant qu'un système physique ayant une grande entropie qui reste constante s'appelle un *thermostat*. En termes physiques simples, un thermostat et un système auquel il est possible d'attribuer une température. Plus précisément,

> Un *thermostat (physique)*, que l'on appelle aussi un *réservoir (thermodynamique)*, est n'importe quel gros système pour lequel il est possible d'appliquer le concept d'*équilibre*.

Les expériences montrent que dans la pratique, ceci est équivalent à la condition qu'un thermostat doit être constitué de nombreux sous-systèmes qui interagissent entre eux. Pour cette raison, toutes les grandeurs macroscopiques décrivant l'état d'un thermostat présentent des petites *fluctuations* irrégulières, une propriété qui sera d'une importance fondamentale sous peu.

Un bain de la vie quotidienne est aussi un thermostat physique: en effet, un thermostat thermodynamique est similaire à un bain d'eau tiède extrêmement grand, pour lequel la température ne change pas même si on y ajoute de l'eau froide ou de l'eau chaude. Le concept physique de thermostat (ou de réservoir) est donc une abstraction et une généralisation du concept de bain de la vie quotidienne.* Quelques autres exemples de

* Cette abstraction est tellement claire dans l'esprit des physiciens que la littérature anglaise utilise le mot «bath» (bain) pour désigner un thermostat physique [N.d.T.].

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

thermostats physiques sont: un champ magnétique intense, une grande quantité de gaz ou un solide volumineux. (Les sens des mots «intense», «grande» et «volumineux» dépendent bien évidement du système étudié.)

La définition (72) de l'entropie nous renseigne que la perte des éléments non diagonaux correspond à une augmentation de l'entropie. En outre, toute augmentation de l'entropie d'un système réversible, tel que le système mécanique quantique en question, est due à l'interaction avec un thermostat.

Défi 124 e

En bref, *la décohérence est due à l'interaction avec un thermostat*. De plus, la décohérence est un processus qui augmente l'entropie: la décohérence est irréversible. Nous allons maintenant montrer que l'on trouve des thermostats partout, qu'il en découle que la décohérence se produit partout et tout le temps, et que l'on n'observe donc (presque) jamais de superpositions macroscopiques.

Comment les thermostats conduisent à la décohérence – la diffusion

Où se trouve le thermostat interagissant avec un système typique? Le thermostat doit se trouver à l'extérieur du système dont on parle, c.-à-d. dans son *environnement*. En effet, nous savons par expérience qu'un environnement typique est grand et qu'il est caractérisé par une température. Quelques exemples sont énumérés dans le Tableau 6. En bref,

▷ N'importe quel environnement est un thermostat.

Nous pouvons aller encore plus loin: pour chaque situation expérimentale, il y a un thermostat qui *interagit* avec le système étudié. En effet, tout système que l'on peut observer n'est pas isolé, puisqu'il interagit évidemment au moins avec l'observateur, et que, par définition, tout observateur comporte un thermostat, comme nous le montrerons plus en détails bientôt. Cependant, les thermostats les plus importants que nous devons habituellement prendre en considération sont: l'atmosphère qui entoure le système; les rayonnements ou les champs électromagnétiques qui interagissent avec le système; ou, si le système lui-même est suffisamment grand pour avoir une température, les degrés de liberté du système qui ne sont pas impliqués dans la superposition qui fait l'objet de l'étude.

Puisque tout système physique est en contact avec un thermostat, toute matrice densité d'une superposition macroscopique finira éventuellement par perdre ses éléments non diagonaux. À première vue, ce raisonnement n'est pas convainquant. Les interactions d'un système avec son environnement peuvent être fortement réduites en utilisant des configurations expérimentales astucieuses, ce qui impliquerait qu'il soit possible de produire un temps de décohérence extrêmement long. Il nous faut donc vérifier combien de temps il faut à une superposition d'états pour perdre sa cohérence. Il se trouve qu'il existe deux méthodes standard pour estimer le *temps de décohérence*: soit en modélisant le thermostat par un grand nombre de particules en collisions, soit en le modélisant par un champ continu.

Si le thermostat est décrit comme un ensemble de particules percutant aléatoirement le système microscopique, la meilleure façon de caractériser le thermostat est en utilisant

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 6 Thermostats courants (et moins courants) avec leurs propriétés principales.

TYPE DE THERMOSTAT	TEMPÉRATURE	LONGUEUR D'ONDE	FLUX DE PARTICULES	SECTION EFFICACE (ATOME)	INTERVALLE ENTRE DEUX COLLISIONS $1/\sigma\varphi$ POUR ATOME[a]	BALLE[a]
	T	λ_{eff}	φ	σ		
thermostats de matière						
solide, liquide	300 K	10 pm	$10^{31}\,/\text{m}^2\text{s}$	$10^{-19}\,\text{m}^2$	10^{-12} s	10^{-25} s
air	300 K	10 pm	$10^{28}\,/\text{m}^2\text{s}$	$10^{-19}\,\text{m}^2$	10^{-9} s	10^{-22} s
vide de laboratoire	50 mK	10 µm	$10^{18}\,/\text{m}^2\text{s}$	$10^{-19}\,\text{m}^2$	10 s	10^{-12} s
thermostats de photons						
lumière du Soleil	5800 K	900 nm	$10^{23}\,/\text{m}^2\text{s}$		10^{-4} s	10^{-17} s
«ténèbres»	300 K	20 µm	$10^{21}\,/\text{m}^2\text{s}$		10^{-2} s	10^{-15} s
micro-ondes cosmiques	2, 7 K	2 mm	$10^{17}\,/\text{m}^2\text{s}$		10^{2} s	10^{-11} s
ondes radio terrestres						
effet Casimir					très grand	
effet Unruh de la Terre	40 zK				très grand	
thermostats de rayonnement nucléaire						
radioactivité		10 fm	$1\,/\text{m}^2\text{s}$	$10^{-25}\,\text{m}^2$	10^{25} s	10^{12} s
rayonnement cosmique	>1000 K	10 fm	$10^{-2}\,/\text{m}^2\text{s}$	$10^{-25}\,\text{m}^2$	10^{27} s	10^{14} s
neutrinos solaires	≈ 10 MK	10 fm	$10^{11}\,/\text{m}^2\text{s}$	$10^{-47}\,\text{m}^2$	10^{36} s	10^{15} s
neutrinos cosmiques	2, 0 K	3 mm	$10^{17}\,/\text{m}^2\text{s}$	$10^{-62}\,\text{m}^2$	10^{45} s	10^{24} s
thermostats gravitationnels						
rayonnement gravitationnel	$5 \cdot 10^{31}$ K	10^{-35} m			très grand	

a. Les valeurs sont des estimations grossières. On suppose que la balle macroscopique a une taille de 1 mm.

la longueur d'onde effective λ_{eff} des particules et l'intervalle de temps moyen t_{col} entre deux collisions. Un calcul simple montre que le temps de décohérence t_d est, dans tous les cas, plus petit que cet intervalle de temps, de sorte que

Défi 125 pe

$$t_d \leqslant t_{\text{col}} = \frac{1}{\varphi\sigma}\,, \tag{73}$$

où φ est le flux de particules et σ est la section efficace de collision.* Des valeurs typiques

* Le temps de décohérence est obtenu en étudiant l'évolution de la matrice densité $\rho(x, x')$ d'un objet localisé en deux points x et x'. On trouve que les éléments non diagonaux satisfont $\rho(x, x', t) = \rho(x, x', 0)\text{e}^{-\Lambda t(x-x')^2}$, où le taux de localisation Λ est donné par

$$\Lambda = k^2\varphi\sigma_{\text{eff}} \tag{74}$$

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

sont données dans le Tableau 6. On remarquera facilement que pour des objets macroscopiques, les temps de décohérence sont extrêmement courts. (On notera également que les effets nucléaire et gravitationnel conduisent à des temps de décohérence longs et qu'ils peuvent donc être négligés.) *La diffusion conduit à des décohérences rapides des systèmes macroscopiques*. Cependant, pour les atomes ou les petits systèmes, la situation est différente, comme on peut s'y attendre. *Les systèmes microscopiques peuvent exhiber des temps de décohérence longs*.

On remarquera que le quantum d'action $\hbar$ apparaît dans l'expression donnant le temps de décohérence, puisqu'il apparaît dans la surface σ. La décohérence est un processus quantique.

Comment les thermostats conduisent à la décohérence – la relaxation

Une deuxième méthode pour estimer le temps de décohérence est également couramment utilisée. Toute interaction d'un système avec un thermostat est décrite par un temps de relaxation t_r. Le terme «*relaxation*» désigne n'importe quel processus qui conduit à un retour à l'état d'équilibre. Les termes «*amortissement*» et «*frottement*» sont également utilisés. Dans le cas présent, le temps de relaxation décrit le retour à l'équilibre de la combinaison thermostat-système. La relaxation est un exemple d'évolution irréversible. Un processus est dit *irréversible* si le processus inverse, au cours duquel tous les composants se déplaceraient dans la direction opposée, a une probabilité très faible de se produire.* Par exemple, nous sommes habitués à ce qu'un verre de vin déversé dans un bol d'eau colore l'intégralité de l'eau. Il est très rarement observé que le vin et l'eau se séparent à nouveau, car la probabilité pour que toutes les molécules de vin et d'eau inversent leur direction en même temps est plutôt faible, un état de fait qui fait le bonheur des producteurs de vin et le désespoir des consommateurs.

Tentons maintenant de simplifier la description du thermostat. Nous l'approximons par un unique champ scalaire, non spécifié, qui interagit avec le système quantique. À cause de la continuité de l'espace, un tel champ a une infinité de degrés de liberté. On les utilise pour modéliser les nombreux degrés de liberté du thermostat. Le champ est supposé se trouver dans un état initial pour lequel ses degrés de liberté sont excités d'une manière décrite par une température T. L'interaction du système avec le thermostat, qui est à l'origine du processus de relaxation, peut être décrite par le transfert répété de petites quantités d'énergie E_{col} jusqu'à la fin du processus de relaxation.

Les objets qui nous intéressent dans cette discussion, tels que le chat, la personne ou la voiture que nous avons mentionnés plus haut, sont décrits par leur masse m. Leur caractéristique principale est l'énergie maximale E_r qui peut être transférée du

où k est le nombre d'onde, φ est le flux et σ_{eff} est la section efficace de collision, c.-à-d. habituellement la taille de l'objet macroscopique.

Ref. 98

On arrive également à un autre résultat surprenant: un système percuté par une particule d'énergie E_{col} voit la matrice densité s'*effondrer* approximativement jusqu'à la longueur d'onde (thermique) de de Broglie de la particule incidente. Ces deux résultats, ensembles, conduisent à la formule ci-dessus.

Ref. 99

* Méfiez-vous des autres définitions qui tentent de présenter le concept d'irréversibilité comme quelque chose de plus profond, telles que les affirmations que le terme «irréversible» signifie que le processus inverse n'est *pas possible du tout*. De nombreuses prétendues «contradictions» entre l'irréversibilité des processus et la réversibilité des équations d'évolution sont dues à cette interprétation erronée du terme «irréversible».

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

système vers l'environnement. Cette énergie décrit les interactions entre le système et l'environnement. Les superpositions d'états macroscopiques qui nous intéressent ici sont des solutions de l'évolution de l'hamiltonien de ces systèmes.

La cohérence initiale de la superposition, qui contraste de façon si troublante avec notre expérience quotidienne, disparaît exponentiellement avec un *temps de décohérence* Ref. 100 t_d donné par*

$$t_d = t_r \frac{E_{\text{col}}}{E_r} \frac{e^{E_{\text{col}}/kT} - 1}{e^{E_{\text{col}}/kT} + 1} \tag{77}$$

ou k est encore une fois la *constante de Boltzmann*, et comme ci-dessus, E_r est l'énergie maximale qui peut être transférée du système vers l'environnement. Notez que l'on a toujours $t_d \leqslant t_r$. Une fois que le temps de décohérence t_d s'est écoulé, le système a évolué de la superposition cohérente des états vers leur superposition incohérente. Autrement dit, la matrice densité a perdu ses termes non diagonaux. On dit également que la cohérence de phase de ce système a été détruite. Donc, après un temps t_d, on trouvera le système soit dans l'état ψ_a, soit dans l'état ψ_b avec les probabilités respectives $|a|^2$ et $|b|^2$, mais plus dans une superposition cohérente qui contredit tellement notre expérience quotidienne. Lequel des deux états finaux est sélectionné dépend de l'état précis du thermostat, dont les détails ont été éliminés du calcul en prenant une *moyenne* sur les états de tous ses constituants microscopiques.

Le résultat important est que pour tout objet *macroscopique*, le temps de décohérence t_d est extrêmement petit. Pour voir ceci plus clairement, nous pouvons étudier un cas spécial simple. Supposons qu'un objet macroscopique de masse m, tel que le chat ou la voiture mentionnés ci-dessus, se trouve au même instant en deux endroits différents séparés par une distance l, c.-à-d. dans une superposition des deux états correspondants. Nous supposerons également que la superposition est due au fait que l'objet se déplace suivant le mouvement d'un oscillateur mécanique quantique de pulsation ω entre les deux positions. Ceci est le système le plus simple permettant de montrer les superpositions d'un objet se trouvant en deux endroits différents. L'énergie de l'objet est alors donnée par $E_r = m\omega^2 l^2$, et la plus petite énergie de transfert $E_{\text{col}} = \hbar\omega$ est la différence entre les niveaux d'énergie de l'oscillateur. Pour une situation macroscopique, cette dernière énergie est beaucoup plus petite que kT, de sorte que l'expression précédente nous

* Ce résultat est dérivé comme dans le cas ci-dessus. Un système interagissant avec un thermostat a toujours Ref. 101 une évolution donnée par la forme générale

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{i}{\hbar}[H, \rho] - \frac{1}{2t_o}\sum_j [V_j\rho, V_j^\dagger] + [V_j, \rho V_j^\dagger] \,, \tag{75}$$

où ρ est la matrice densité, H est l'hamiltonien, V est le potentiel de l'interaction et t_o est le temps ca- Défi 126 pe ractéristique de l'interaction. Pouvez-vous voir pourquoi? Lorsque l'on résout cette équation, on trouve $\rho(t) = \rho_0 e^{-t/t_0}$ pour les éléments loin de la diagonale. Autrement dit, ils disparaissent avec un temps caractéristique t_o. Dans la plupart des situations, on a une relation de la forme

$$t_0 = t_r \frac{E_{\text{col}}}{E_r} = t_{\text{col}} \tag{76}$$

ou une variante de celle-ci, comme dans l'exemple ci-dessus.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Ref. 102 donne

$$t_d = t_r \frac{E_{\text{col}}^2}{2E_r\, kT} = t_r \frac{\hbar^2}{2mkTl^2} = t_r \frac{\lambda_T^2}{l^2} \tag{78}$$

dans laquelle la pulsation ω a disparue. La quantité $\lambda_T = \hbar/\sqrt{2mkT}$ s'appelle la *longueur d'onde thermique de de Broglie* d'une particule.

Nous noterons une fois de plus que le quantum d'action $\hbar$ apparaît dans l'expression du temps de décohérence. La décohérence est un processus quantique.

Il est assez simple de voir que pour pratiquement tous les objets macroscopiques, le temps de décohérence typique t_d est extrêmement court. Par exemple, en prenant $m = 1\,\text{g}$, $l = 1\,\text{mm}$ et $T = 300\,\text{K}$, on obtient $t_d/t_r = 1,3 \cdot 10^{-39}$. Même si l'interaction entre le système et l'environnement était tellement faible, au point que le temps de relaxation du système soit égal à l'âge de l'Univers, qui est d'environ $4 \cdot 10^{17}\,\text{s}$, le temps de décohérence t_d serait encore inférieur à $5 \cdot 10^{-22}\,\text{s}$, ce qui est plus d'un million de fois plus rapide que la période d'oscillation d'un faisceau lumineux (environ 2 fs pour de la lumière verte). Dans le cas du chat de Schrödinger, le temps de décohérence serait encore plus petit. Ces temps sont si courts qu'il n'est même pas possible d'espérer *préparer* la superposition cohérente initiale, et encore moins d'observer sa décroissance ou de mesurer sa durée de vie.

Cependant, dans le cas des systèmes microscopiques, la situation est différente. Par exemple, pour un électron dans un solide refroidit à la température de l'hélium liquide, nous avons $m = 9,1 \cdot 10^{-31}\,\text{kg}$, et typiquement $l = 1\,\text{nm}$ et $T = 4\,\text{K}$. On obtient alors $t_d \approx t_r$ et le système peut ainsi rester dans une superposition cohérente jusqu'à ce qu'il soit relaxé, ce qui confirme que dans ce cas, il est effectivement possible d'observer les effets de la cohérence si le système est maintenu isolé. Un exemple typique est le com-
Ref. 103 portement des électrons dans un matériau supraconducteur. Nous en mentionnerons quelques autres plus loin.

En 1996, la première mesure réelle de temps de décohérence a été publiée par l'équipe
Ref. 104 parisienne conduite par Serge Haroche. Elle confirmait la relation entre le temps de décohérence et le temps de relaxation, montrant ainsi que les deux processus devaient être distingués à l'échelle microscopique. Depuis, de nombreuses autres expériences ont
Ref. 105 confirmé le processus de décohérence et son équation d'évolution, aussi bien pour des petites valeurs que pour des grandes valeurs de t_d/t_r. Une expérience particulièrement
Ref. 106 élégante, a été réalisée en 2004. Au cours de cette dernière, il a été possible d'observer la disparition des interférences produites par le passage de molécules de fullerène C_{70} au travers de deux fentes, lorsqu'un thermostat interagissait avec elles.

Un résumé sur la décohérence, la vie et la mort

Notre exploration nous a montré que *la décohérence résultait du couplage avec un thermostat de l'environnement*. La décohérence est un effet statistique quantique, c.-à-d. un effet thermodynamique. La décohérence découle de la théorie quantique et c'est un processus irréversible qui se produit donc automatiquement. Par-dessus tout, la décohérence est un processus qui a été observé lors d'expériences.

Les estimations des temps de décohérence de la vie quotidienne nous renseignent que la préparation et le maintien d'une superposition d'états macroscopiquement différents

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

sont tous deux *impossibles*, à cause de l'interaction avec n'importe lequel des thermostats que l'on trouve dans l'environnement. Ceci est le cas, même si la mesure habituelle de cette interaction, produite par les frottements au cours du mouvement du système, est très petite. Même lorsqu'un système macroscopique est soumis à des frottements extrêmement faibles, conduisant à un temps de relaxation très long, son temps de décohérence est toujours extrêmement court. Seuls des systèmes microscopiques soigneusement conçus en utilisant des dispositifs de laboratoire couteux, peuvent atteindre des temps de décohérence substantiels.

Notre environnement quotidien est rempli de thermostats. Donc,

▷ Les superpositions cohérentes d'états macroscopiquement distincts n'apparaissent jamais dans la vie quotidienne, en raison des temps de décohérence très courts induits par les thermostats de l'environnement.

Les voitures ne peuvent pas être en même temps à l'intérieur et à l'extérieur d'un garage. Nous ne pouvons pas être à la fois mort et à la fois vivant. Une illustration d'une superposition macroscopique (voir la Figure 122) est impossible. En accord avec l'explication, des Page 176 superpositions cohérentes d'états macroscopiques apparaissent dans certaines situations spéciales en laboratoire.

Qu'est-ce qu'un système? Qu'est-ce qu'un objet?

En physique classique, un système est une partie de la nature qui peut être isolée de son environnement. Cependant, la mécanique quantique nous renseigne que les systèmes isolés n'existent pas, car il n'est pas possible de réduire les interactions au point qu'elles deviennent nulles. La contradiction peut se résoudre avec les résultats que l'on vient de voir ci-dessus: ils nous permettent de définir plus précisément le concept de système.

▷ Un *système* est n'importe quelle partie de la nature qui interagit de façon *incohérente* avec son environnement.

Ceci implique que

▷ Un *objet* est une partie de la nature qui interagit avec son environnement seulement par l'intermédiaire de thermostats.

En particulier, nous obtenons que

▷ Un système est dit *microscopique* (ou *quantique*), et il peut se décrire à l'aide d'une fonction d'onde ψ, chaque fois que:
  — il est presque isolé, avec $t_{\text{évol}} = \hbar/\Delta E < t_{\text{r}}$, et
Ref. 107 — il est en interaction *incohérente* avec son environnement.

En bref, un système microscopique (ou quantique) ne peut être décrit par une fonction d'onde que s'il interagit de façon incohérente et faiblement avec son environnement. (Pour un tel système, l'indétermination ΔE sur l'énergie est plus grande que l'énergie

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

de relaxation.) Au contraire, un thermostat n'est jamais isolé au sens que l'on vient de donner, parce que le temps d'évolution d'un thermostat (l'échelle de temps au cours de laquelle ses propriétés changent) est toujours beaucoup plus grand que son temps de relaxation. Puisque tous les corps macroscopiques sont en contact avec des thermostats (ou peuvent même en contenir un), ils ne peuvent pas être décrits par une fonction d'onde. En particulier, il est impossible de décrire un instrument de mesure quelconque à l'aide d'une fonction d'onde.

Nous concluons donc que

▷ Un *système macroscopique* est un système ayant un temps de décohérence beaucoup plus court que n'importe quel autre temps d'évolution de ses constituants.

De toute évidence, les systèmes macroscopiques interagissent également de façon incohérente avec leur environnement. Donc, les chats, les voitures et les présentateurs de journaux télévisés sont tous des systèmes macroscopiques.

L'intrication

Une possibilité est ignorée par les deux définitions d'un système: que se passe-t-il dans la situation pour laquelle les interactions avec l'environnement sont *cohérentes*? Nous rencontrerons quelques exemples bientôt. Si on s'en tient aux définitions, ces systèmes ne sont ni microscopiques, ni macroscopiques:

▷ Un «système» pour lequel l'interaction avec l'environnement est cohérente est dit *intriqué*.

De tels «systèmes» ne sont pas décrits par une fonction d'onde, et pour être strict, ce ne sont *pas* des systèmes. Dans ces situations, pour lesquelles l'interaction est cohérente, on parle d'*intrication* (ou d'*enchevêtrement* [N.d.T.]). Par exemple, on dit qu'une particule, ou qu'un ensemble de particules, est *intriquée* avec son environnement.

Des systèmes intriqués, c.-à-d. qui interagissent de façon cohérente, peuvent être séparés, mais il faut les désintriquer lorsqu'on le fait. L'acte de séparation conduit à des entités détachées, et des entités détachées interagissent de façon incohérente. La théorie quantique nous montre que la nature n'est pas faite d'entités détachées, mais qu'elle est faite d'entités *détachables*. En théorie quantique, le critère de détachement est l'incohérence de l'interaction. Les superpositions cohérentes impliquent une conséquence surprenante: il existe des systèmes qui, bien qu'ils aient l'air d'être constitués de parties détachées, ne le sont pas. L'intrication pose une limite au détachement. Toutes les propriétés surprenantes de la mécanique quantique, tel que celle du chat de Schrödinger, sont des conséquences du préjudice causé par la physique classique quand elle nous enseigne qu'un système composé de deux ou plusieurs parties peut, de toute évidence, être détaché en deux sous-systèmes sans causer de perturbation. Mais les superposition cohérentes (les systèmes intriqués), ne permettent pas les détachements sans perturbation. Chaque fois que l'on suppose être capable de détacher des systèmes intriqués, on obtient des conclusions étranges ou incorrectes, tel qu'une propagation en apparence plus ra-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

pide que la lumière, ou, comme on dit aujourd'hui, un comportement non local. Jetons un coup d'œil à quelques exemples typiques.

Des situations intriquées se rencontrent dans de nombreuses expériences. Par exemple, lorsqu'un électron et un positon s'annihilent pour produire deux photons, les polarisations de ces deux photons sont intriquées, comme on le mesurait déjà en 1949. De même, lorsqu'un atome excité se désintègre par étapes, en émettant deux photons, les polarisations des photons sont intriquées, comme il l'a été démontré pour la première fois en 1966 avec des atomes de calcium. D'une façon similaire, lorsqu'une molécule instable dans un état singulet, c.-à-d. dans un état de spin 0, se désintègre ou se divise en résidus, les spins des résidus sont intriqués, comme il a été observé dans les années 1970. De même, la conversion paramétrique descendante spontanée des photons produit une intrication. Dans un matériau optique non linéaire, un photon entrant est converti en deux photons sortants et dont la somme des énergies correspond à l'énergie du photon initial. Dans ce cas, les deux photons produits sont deux fois intriqués: pour leur polarisation et pour leur direction. En 2001, les spins de deux échantillons de gaz de césium extrêmement froids, chacun ayant des millions d'atomes et se trouvant séparés l'un de l'autre de quelques millimètres, ont été intriqués. De même, l'intrication concernant la position a été observée régulièrement, par exemple pour des ions rapprochés dans des pièges à ions.

La théorie quantique est-elle non locale? Un aperçu sur le paradoxe Einstein-Podolsky-Rosen

> [Mr. Duffy] lived a little distance away from his body ...
>
> James Joyce, *A Painful Case**

Il est souvent incorrectement suggéré que l'effondrement de la fonction d'onde, ou encore la théorie quantique, n'est pas local.** Cette question a besoin d'être clarifié.

Nous commençons par imaginer un électron qui percute un écran après être passé à travers une fente. En suivant la description que nous venons juste de déduire, le processus d'effondrement se déroule schématiquement comme décrit sur la Figure 73. Une animation comportant un autre exemple du processus d'effondrement (inspiré par l'expérience de pensée de Bohm) peut être visualisée sur le coin inférieur gauche de ces pages, en commençant à la page 129. Le processus d'effondrement a un côté surprenant: à cause de la brièveté du temps de décohérence, durant l'effondrement de cette fonction d'onde (ainsi que de n'importe quelle autre) le maximum de la fonction d'onde change généralement de position plus rapidement que la lumière. Ceci est-il raisonnable?

Page 175

Une situation est dite *acausale* ou *non locale* si l'énergie est transportée plus vite que la lumière. En utilisant la Figure 73, et en vous aidant de résultats de propagation du signal, vous pouvez déterminer la vitesse de l'énergie impliquée. La valeur trouvée est plus petite que *c*. Une fonction d'onde dont le maximum se déplace plus vite que la lumière n'implique *pas automatiquement* que l'énergie se déplace plus vite que la lumière.

Défi 127 e

Vol. III, page 133

* «[Monsieur Duffy] vivait à une petite distance de son corps ...» James Joyce, Un cas douloureux.

** Ceci est la continuation d'un sujet que nous connaissons déjà: nous avons exploré un peu plus tôt, en relativité générale, un autre type de non-localité.

Vol. II, page 284

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

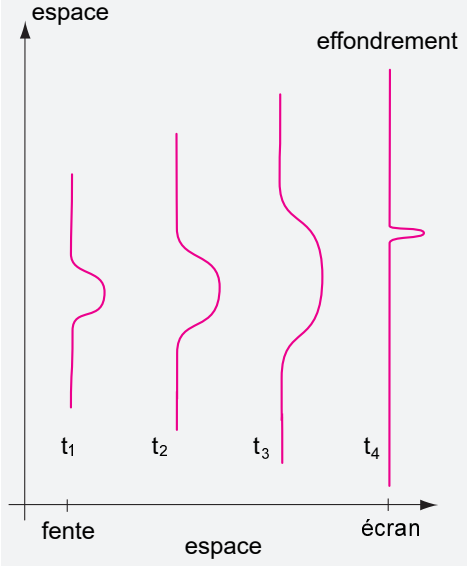


FIGURE 73 Le mouvement en mécanique quantique: la fonction d'onde d'un électron (ou plutôt le carré de son module) entre l'instant où il passe à travers une fente et celui où il percute l'écran.

Autrement dit, la théorie quantique contient des vitesses plus grandes que celles de la lumière, mais pas des vitesses d'*énergie* plus grandes que celles de la lumière. En électrodynamique classique, la même chose se produit avec les potentiels scalaires et les potentiels vecteurs si on utilise la jauge de Coulomb. Nous avons également rencontré des vitesses plus grandes que celles de la lumière dans le cas du déplacement des ombres et dans le cas des ciseaux, ainsi que lors de nombreuses autres observations. Tout physicien a donc maintenant deux options: il peut dire franchement qu'il n'y a pas de non-localité dans la nature, ou bien il peut être moins franc et prétendre que la non-localité existe. Dans le deuxième cas, il devrait également prétendre que même la physique classique est non locale. Cependant personne n'ose le faire. En fait, il y un danger à utiliser cette version plus dérangeante du terme «non local»: un faible pourcentage parmi ceux qui prétendent que le monde est non local finissent par croire, après un certain temps, qu'il existe vraiment un transport d'énergie plus rapide que la lumière dans la nature. Ces gens deviennent prisonniers de leur pensée confuse. D'un autre côté, le manque de rigueur aide à faire plus facilement la une des journaux. En bref, même si la définition de la non-localité n'est pas unanime, dans ce texte, nous nous en tenons à celle qui est la plus stricte et nous définissons la non-localité comme un transport d'*énergie* plus rapide que la lumière.

Ref. 108

Vol. II, page 58

Une expérience de pensée souvent citée pour montrer les pièges de la non-localité a été proposée par Bohm* lors de la discussion concernant le paradoxe dit de Einstein-Podolsky-Rosen. Dans leur article célèbre décrivant le paradoxe EPR, les trois auteurs essayaient de trouver une contradiction entre la mécanique quantique et le bon sens. Bhom a converti leur article, quelque peu confus, en une expérience de pensée claire que l'on montre de façon schématique sur la Figure 74. Lorsque deux particules dans un état

Ref. 109, Ref. 110

* David Joseph Bohm (1917 – 1992), était un physicien influent. Il codécouvrit l'effet Aharonov-Bohm et passa une grande partie du reste de sa vie à étudier les rapports entre la physique quantique et la philosophie.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

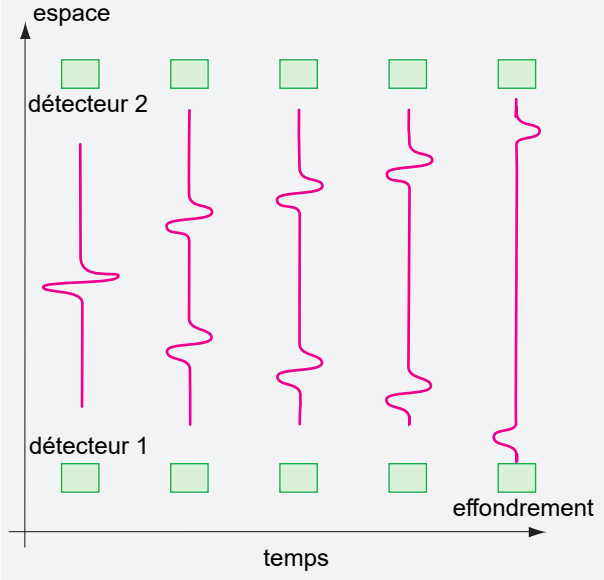


FIGURE 74 L'expérience de pensée de Bohm.

de spin 0 s'éloignent l'une de l'autre, la mesure de l'orientation du spin d'une des deux particules implique également un effondrement *immédiat* du spin de l'autre particule, à savoir, l'orientation de son spin est exactement dans la direction opposée. Ceci se produit instantanément, malgré la distance de séparation. Aucune limitation de vitesse n'est donc respectée. Autrement dit, l'intrication semble conduire à une communication plus rapide que la lumière.

Cependant, au cours de l'expérience de Bohm, aucune énergie n'est transportée plus rapidement que la lumière. Aucune non-localité n'est présente, malgré les nombreuses affirmations du contraire de la part de certains auteurs. Les deux électrons intriqués appartiennent à un même système, et supposer qu'ils sont séparés uniquement parce que la fonction d'onde a deux maximums distants est une erreur conceptuelle. En fait, aucun signal ne peut être transmis à l'aide de cette méthode. La décohérence est un cas de prédiction qui ressemble à un signal sans en être un. L'expérience de Bohm, comme toute autre expérience du type EPR, ne permet pas de communication plus rapide que la lumière. Nous avons déjà discuté de tels cas dans la section sur l'électrodynamique.

Vol. III, page 136

L'expérience de Bohm a finalement été réalisée. La première, et la plus célèbre, de ces réalisations a été due, en 1982, à Alain Aspect et elle utilisait des photons au lieu d'électrons. Comme tous les tests réalisés par la suite, elle a confirmé pleinement la mécanique quantique.

Ref. 111

En fait, les expériences telles que celle d'Alain Aspect confirment qu'il est impossible de traiter l'une ou l'autre des deux particules comme un système en soi. Il est impossible d'attribuer une quelconque propriété physique, telle qu'une orientation de spin, à l'une ou l'autre des deux particules. (La représentation d'Heisenberg exprimerait cette restriction encore plus clairement.) Seul l'ensemble formé par les deux électrons constitue un système physique, car seule la paire interagit de façon incohérente avec l'environnement.

Les deux exemples de non-localité apparente que nous venons de avons mention-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

nés peuvent être rejetés avec la remarque suivante: puisqu'il est évident qu'aucun flux d'énergie plus rapide que la lumière n'est impliqué, aucun problème de causalité n'apparaît. L'exemple suivant est donc plus intéressant. Prenez deux atomes identiques, un dans un état excité et l'autre dans son état fondamental, et appelez l la distance qui les sépare. L'intuition nous dit que si le premier atome retourne dans son état fondamental en émettant un photon, le deuxième atome ne pourra être excité par le photon que si un temps $t = l/c$ s'est écoulé, c.-à-d. après que le photon a voyagé vers le deuxième atome.

Cela pourra sans doute paraître étonnant, mais cette conclusion est fausse. Le deuxième atome dans son état fondamental a une probabilité non nulle de s'exciter au moment même où le premier se désexcite. Ceci a été montré, de la manière la plus simple
Ref. 112 qu'il puisse être, par Gerhard Hegerfeldt. Le résultat a également été confirmé expérimentalement.

Des études plus minutieuses montrent que le résultat dépend du type de superposition (cohérente ou incohérente) dans laquelle se trouvent les deux atomes au départ. Pour des superpositions incohérentes, le résultat intuitif est correct. Le résultat contre-intuitif n'apparaît que dans le cas de superposition cohérentes. Encore une fois, une discussion minutieuse montre qu'aucune non-localité réelle de l'énergie n'est impliquée.

En résumé, des vitesses plus rapides que celle de la lumière au cours de l'effondrement des fonctions d'onde ne contredisent aucunement la limite de la relativité restreinte sur la vitesse de transport de l'énergie. Les vitesses d'effondrement sont des vitesses de phase. Dans la nature, les vitesses de phase son illimitées. Les vitesses de phases illimitées n'impliquent jamais un transport d'énergie plus rapide que la lumière. De plus, on retrouve le résultat que les systèmes physiques ne sont clairement définis que s'ils interagissent de manière incohérente avec leur environnement.

Curiosités et défis amusants concernant les superpositions

Certains affirment à tort qu'il est possible de photographier des atomes dans une superposition de deux états centrés à des positions différentes. (Ce mensonge est même utilisé
Défi 128 e par des sectes, dans l'intention d'attirer des adeptes). Pourquoi ceci n'est-il pas vrai?

* *

Dans quelques cas, il est effectivement possible d'observer la superposition d'états macroscopiques différents en abaissant la température à des valeurs suffisamment petites et en choisissant minutieusement des masses ou des distance convenablement petites. Deux exemples bien connus de superpositions cohérentes sont ceux que l'on observe dans les
Ref. 102 détecteurs d'ondes gravitationnelles et dans les jonctions Josephson. Dans le premier cas, on observe une masse, qui peut aller jusqu'à 1000 kg, dans une superposition d'états situés en différents point de l'espace, séparés par une distance de l'ordre de 10^{-17} m. Dans le deuxième cas, on a utilisé des anneaux supraconducteurs pour produire des superpositions entre un état pour lequel un courant électrique macroscopique de l'ordre de 1 pA circule dans le sens des aiguilles d'une montre, et un autre pour lequel le courant circule
Ref. 113 dans le sens inverse.

* *

Pour plusieurs matériaux, il a été observé des superpositions d'aimantations dans les

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Ref. 114 deux directions «up» et «down» en même temps.

* *

Depuis les années 1990, un sport a pris son essor à travers le monde, il consiste à trouver et à jouer avec des nouveaux systèmes placés dans des superpositions macroscopiques Ref. 115 cohérentes. Les défis résident dans la rigueur des expériences nécessaires. Celles qui mettent en jeu des *atomes individuels* dans des superpositions d'états sont parmi les plus Ref. 116 populaires.

* *

En 1997, des ondes d'atomes cohérentes ont été extraites d'un nuage d'atomes de Ref. 117 sodium.

* *

Les objets macroscopiques sont habituellement dans des états incohérents. C'est la même situation que dans le cas de la lumière. Le monde est rempli de lumière «macroscopique», c.-à-d. incohérente. La lumière du jour ainsi que toute lumière provenant d'une lampe, d'un feu et d'un ver luisant est incohérente. Seules des sources très spéciales et fabriquées minutieusement, telles que les lasers ou des petites sources ponctuelles, émettent de la lumière cohérente. Seules ces sources permettent d'étudier les effets des interférences. En fait, les termes «cohérent» et «incohérent» proviennent de l'optique, car la différence entre les deux, à savoir la capacité à interférer, avait été observée dans le cas de la lumière plusieurs siècles avant qu'il ne le soit dans le cas de la matière.

La cohérence et l'incohérence se manifestent de façon différente lorsqu'elle concerne la lumière ou la matière, parce que la matière peut rester immobile alors que la lumière ne le peut pas, mais également parce que la matière est constituée de fermions alors que Page 158 la lumière est constituée de bosons. La cohérence peut s'observer facilement dans les systèmes composés de bosons, comme la lumière, le son dans les solides ou les paires d'électrons dans les supraconducteurs. Elle est moins facilement observable dans les systèmes de fermions, tels que les systèmes d'atomes avec leurs nuages électroniques. Cependant, dans les deux cas, il est possible de définir un temps de décohérence. Dans les deux cas, pour les systèmes composés d'un grand nombre de particules, la meilleure façon d'observer la cohérence est lorsque toutes les particules sont dans le même état (supraconductivité, lumière laser). De plus, dans les deux cas, la transition de la cohérence vers la décohérence est due à l'interaction avec un thermostat. Un faisceau est donc incohérent si ses particules arrivent aléatoirement en temps et en fréquence. Dans la vie quotidienne, la rareté de l'observation de superpositions de la matière cohérente a la même origine que la rareté de l'observation de la lumière cohérente.

* *

Nous discuterons de la relation entre l'environnement et la *désintégration* des systèmes Vol. V, page 47 instables plus loin. Le phénomène est complètement décrit par la décohérence.

* *

Défi 129 pe Pouvez-vous trouver une méthode pour mesurer le *degré* d'intrication? Pouvez-vous le faire pour un système constitué de nombreuses particules?

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

* *

L'étude de l'intrication conduit à une conclusion simple: *la téléportation contredit la corrélation*. Pouvez-vous le confirmer?
Défi 130 pe

* *

Les images fantômes des téléviseurs, souvent dues à des réflexions parasites, sont-elles des exemples d'interférences?
Défi 131 e

* *

Défi 132 d Que se passe-t-il lorsque deux électrons monochromatiques se superposent?

* *

Certains disent que la théorie quantique pourrait être utilisée pour fabriquer des ordinateurs quantiques, en utilisant des superpositions cohérentes de fonctions d'onde. Pouvez-vous donner une raison générale qui rende cet objectif très difficile (bien qu'il ne soit pas impossible) même sans savoir comment un tel ordinateur quantique fonctionne, ni ce que sont les fameux *qubits*?
Ref. 118
Défi 133 e

Pourquoi est-ce que les probabilités et l'effondrement des fonctions d'onde apparaissent lors des mesures?

Les mesures en mécanique quantique sont également déroutantes parce qu'elles conduisent à des énoncés dans lesquels apparaissent des *probabilités*. Par exemple, on parle de la probabilité de trouver un électron à une certaine distance du noyau de l'atome. Un tel énoncé fait partie d'une catégorie plus générale du genre: «lorsque l'on mesure l'observable A, il y a une probabilité p de trouver le résultat a». Dans ce qui suit, nous allons montrer que les probabilités évoquées dans ces énoncés sont inévitables pour n'importe quelle mesure, parce que, comme nous allons le montrer, (1) n'importe quelle mesure et n'importe quelle observation est un cas particulier de processus de décohérence ou de désintrication et (2) tous les processus de décohérence font intervenir le quantum d'action. (Historiquement, le processus de mesure avait été étudié *avant* celui, plus général, de décohérence. Ceci explique en partie pourquoi le sujet est si confus dans l'esprit de beaucoup de gens.)

Vol. III, page 267 Qu'est-ce qu'une mesure? Comme nous l'avons déjà mentionné plus tôt, une mesure est n'importe quelle interaction qui produit un enregistrement ou une mémorisation. (Tout effet de la vie quotidienne est un enregistrement, mais ceci n'est pas vrai dans le cas général. Pouvez-vous donner des exemples d'effets qui sont des enregistrements et d'autres qui n'en sont pas?) Des mesures peuvent être réalisées par des machines. Lorsqu'elles sont réalisées par des personnes, on les appelle des *observations*. En théorie quantique, le processus de mesure n'est pas aussi simple qu'en physique classique. Ceci se voit de manière particulièrement frappante lorsqu'un système quantique, tel qu'un électron individuel, est d'abord envoyé à travers une fente de diffraction, ou encore mieux, à travers une double fente (de façon à rendre apparent son aspect ondulatoire), pour le faire ensuite percuter une plaque photographique (de façon à faire également apparaître son aspect particulaire). L'expérience montre que le point noirci, l'endroit où l'électron a percuté l'écran, ne peut pas être déterminé à l'avance. (Ceci est
Défi 134 e

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

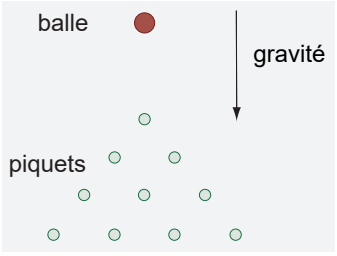


FIGURE 75 Un système montrant un comportement probabiliste: une balle tombant à travers un réseau de piquets horizontaux.

également vrai pour des photons ou pour n'importe quel autre type de particules.) En revanche, pour des grands nombres d'électrons, la distribution spatiale des points noirs, la *figure de diffraction*, peut être calculée à l'avance avec une grande précision.

Le résultat des expériences sur les systèmes microscopiques nous oblige donc à utiliser les probabilités pour décrire les microsystèmes. Nous trouvons que la distribution de probabilité $p(\boldsymbol{x})$ des points d'impact sur la plaque photographique peut se calculer à partir de la fonction d'onde ψ de l'électron à la surface de l'écran et qu'elle est donnée par $p(\boldsymbol{x}) = |\psi^\dagger(\boldsymbol{x})\psi(\boldsymbol{x})|^2$. Ceci est en fait un cas particulier de la *première propriété des mesures quantiques*:

▷ La mesure d'une observable A pour un système dans un état ψ produit un résultat qui est l'une des valeurs propres a_n, et la probabilité P_n d'obtenir le résultat a_n est donné par

$$P_n = |\varphi_n^\dagger \psi|^2 \,, \tag{79}$$

où φ_n est la fonction propre de l'opérateur A qui correspond à la valeur propre a_n.*

Les expériences montrent également une *deuxième propriété des mesures quantiques*:

▷ Après une mesure, le système quantique que l'on observe est dans l'état propre φ_n correspondant à la valeur propre a_n mesurée. On dit également que lors de la mesure, la fonction d'onde s'est *effondrée* de ψ vers φ_n.

Ref. 119

Ces deux propriétés expérimentales peuvent également s'étendre aux cas plus généraux des valeurs propres dégénérées et continues.

De toute évidence, les résultats expérimentaux sur le processus de mesure nécessitent une explication. À première vue, le type de probabilités que l'on rencontre en théorie quantique est différentes de celui de la vie quotidienne. Prenez une roulette, un dé, le système que montre la Figure 75, les machines pachinko ou encore la direction vers laquelle

* Toutes les transformations linéaires transforment certains vecteurs spéciaux, que l'on appelle des *vecteurs propres*, en des multiples d'eux-mêmes. Autrement dit, si T est une transformation, si e est un vecteur et si on a

$$T(e) = \lambda e \tag{80}$$

où λ est un scalaire, alors le vecteur e est appelé un *vecteur propre* de T, et λ est la *valeur propre* associée. L'ensemble de toutes les valeurs propres d'une transformation T s'appelle le *spectre* de T.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

un crayon reposant sur sa pointe va tomber: dans tous les cas, les mesures expérimentales montrent avec un grand niveau de précision que les résultats sont aléatoires (en supposant qu'il n'y ait pas de triche de la part du fabricant ou des opérateurs). Ces systèmes de notre quotidien ne nous intriguent pas pour autant. Inconsciemment, nous supposons que le résultat aléatoire provient des petites variations incontrôlables des conditions de départ ou de l'environnement chaque fois que l'on reproduit l'expérience.*

Mais les systèmes microscopiques semblent être différents. Les deux propriétés des mesures quantiques que nous venons de mentionner expriment ce que les physiciens observent lors de toutes les expériences, même si les conditions initiales sont *exactement* les même à chaque fois. Mais alors, pourquoi la position d'un seul électron, de même que la plupart des autres observables des systèmes quantiques, n'est-elle pas prévisible? Autrement dit, que se passe-t-il lors de l'effondrement de la fonction d'onde? Combien de temps cet effondrement prend-t-il? Aux débuts de la théorie quantique, il régnait cette perception que l'imprévisibilité des observations devait être due au manque d'information concernant l'état de la particule. Ceci a conduit de nombreux physiciens à rechercher ce que l'on appelait des «variables cachées». Mais toutes ces tentatives étaient vouées à l'échec. Il a fallu un certain temps à la communauté scientifique pour se rendre compte que l'imprévisibilité n'était *pas* due au manque d'information sur l'état de la particule, qui est en effet *complètement* décrit par le vecteur d'état ψ.

Pour pouvoir découvrir l'origine des probabilités, rappelons quelle est la nature d'une mesure, ou encore mieux, d'une observation en général:

▷ Toute observation est la production d'un enregistrement.

L'enregistrement peut être une mémoire visuelle ou auditive dans notre cerveau, ou bien un enregistrement écrit sur du papier, ou encore par un magnétophone, ou tout autre objet de ce type. Comme nous l'avons expliqué dans le volume précédent, un objet est un enregistrement s'il n'a pas pu apparaître ou disparaître par chance. Pour éliminer l'influence de la chance, tous les enregistrements doivent être protégés du mieux possible du monde *extérieur*. C'est pour cela que l'on place généralement les archives dans des bâtiments protégés contre les tremblements de terre et contre les incendies, que l'on conserve les documents dans un coffre-fort, que l'on évite autant que possible les lésions cérébrales, etc.

Vol. III, page 265

En plus de cela, les enregistrements doivent être protégés de leurs fluctuations *internes*. Ces fluctuation internes sont dues aux nombreux composants qui constituent n'importe quel appareil d'enregistrement. Si les fluctuations étaient trop importantes, elles rendraient impossible la distinction entre les contenus possibles d'une mémoire. Or, les fluctuations diminuent lorsque la taille d'un système augmente, typiquement comme la racine carrée de la taille. Par exemple, si une écriture à la main est trop petite, il est difficile de la lire si le papier devient friable. Ou encore, si les pistes magnétiques sur les bandes d'une cassette sont trop petites, elles peuvent se démagnétiser et perdre l'information qui y est stockée. Autrement dit, pour produire un enregistrement stable contre les fluctua-

* Pour apprécier les limites de ces hypothèses inconscientes, vous pouvez lire l'histoire, déjà mentionnée, de ces physiciens qui ont construit une machine capable de prédire le résultat d'une bille de roulette à partir de la vitesse initiale que lui communique le croupier.

Vol. I, page 127

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

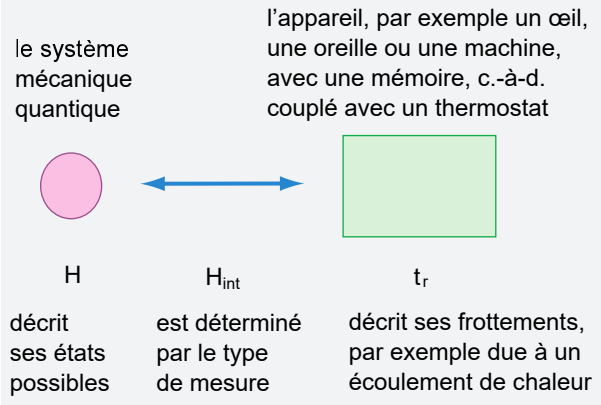


FIGURE 76 Les concepts utilisés pour la description des mesures.

tions internes, il faut qu'il ait une taille suffisante. Tout enregistrement est donc constitué de nombreux composants et est le siège de petites fluctuations.

On peut exprimer l'importance de la taille d'une autre façon: tout système ayant une mémoire, c.-à-d. tout système capable de produire un enregistrement, contient un *thermostat*. En résumé, l'affirmation selon laquelle toute observation consiste à produire un enregistrement peut être exprimée plus précisément par:

▷ Toute observation d'un système est le résultat d'une interaction entre ce système et un thermostat dans l'appareil d'enregistrement.

D'ailleurs, puisque les thermostats impliquent des frottements, on peut également dire: une mémoire a besoin de frottements. De plus, toute observation mesurant une grandeur physique utilise une interaction qui *dépend* de cette même grandeur. Avec ces remarques apparemment triviales, il est possible de décrire plus en détails le processus d'observation, ou, comme on l'appelle généralement en théorie quantique, le processus de mesure.

Tout *appareil* de mesure (ou *détecteur*) se caractérise par deux aspects principaux, qu'illustre la Figure 76: l'interaction qu'il a avec le système microscopique et le thermostat qu'il contient pour produire l'enregistrement. Toute description du processus de mesure est donc une description de l'évolution du système microscopique *et* du détecteur. On a donc besoin de l'hamiltonien de la particule, de l'hamiltonien de l'interaction et des propriétés du thermostat (tel que le temps de relaxation t_r). L'interaction spécifie ce qui est mesuré et le thermostat réalise la mémorisation.

Ref. 120

Nous savons que seuls les systèmes thermodynamiques classiques peuvent être irréversibles; les systèmes quantiques ne le sont pas. On en conclut donc qu'un système de mesure *doit* être décrit de façon classique, sinon il n'aurait pas de mémoire et ne serait pas un système de mesure: il ne produirait donc pas d'enregistrement! La mémoire est un effet classique. (Plus précisément, la mémoire est un effet qui n'apparaît que dans la limite classique.) Néanmoins, voyons ce qui se passe lorsque nous décrivons le système de mesure à l'aide de la mécanique quantique.

Appelons A l'observable que l'on mesure lors de l'expérience et φ_n ses fonctions

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

propres. Le système que l'on observe (souvent une particule) est décrit en mécanique quantique par un état ψ. L'état complet du système peut toujours s'écrire sous la forme

$$\psi = \psi_p \, \psi_{\text{autre}} = \sum_n c_n \varphi_n \, \psi_{\text{autre}} \, . \tag{81}$$

Ici, ψ_p est l'aspect de l'état (de la particule ou du système) que l'on veut mesurer, et ψ_{autre} représente tous les autres degrés de liberté, c.-à-d. ceux qui ne sont pas décrits (*engendrés*, en langage mathématique) par l'opérateur A correspondant à l'observable que l'on veut mesurer. Les nombres $c_n = |\varphi_n^\dagger \psi_p|$ fournissent l'expansion de l'état ψ_p, que l'on supposera normalisée, en termes de la base φ_n. Par exemple, lors de la mesure typique d'une position, les fonctions φ_n seraient les fonctions propres de la position et ψ_{autre} contiendrait les informations relatives à la quantité de mouvement, au spin et à toute autre propriétés de la particule.

À quoi ressemble l'interaction entre le système et le détecteur? Appelons l'état de l'appareil avant la mesure $\chi_{\text{début}}$. L'appareil de mesure lui-même, par définition, est un dispositif qui, lorsqu'il est percuté par une particule dans l'état $\varphi_n \psi_{\text{autre}}$, passe de l'état $\chi_{\text{début}}$ à l'état χ_n. On dit alors que l'appareil a *mesuré* la valeur propre a_n correspondant à la fonction propre φ_n de l'opérateur A. L'indice n est donc l'enregistrement de la mesure; on l'appelle l'indice *pointeur*. Cet indice nous dit dans quel état le système microscopique se trouvait avant l'interaction. Le point important, que l'on déduit de notre discussion précédente, est que les états χ_n, puisqu'ils sont des enregistrements, sont distincts sur le plan macroscopique, précisément au sens de la section précédente. S'ils ne l'étaient pas, ils ne seraient pas des enregistrements, et l'interaction avec le détecteur ne serait pas une mesure.

Bien sûr, au cours de la mesure, l'appareil sensible à φ_n change la partie ψ_{autre} de l'état de la particule en une autre situation $\psi_{\text{autre},n}$, qui dépend de la mesure et de l'appareil; nous n'avons pas besoin de le spécifier dans la discussion qui suit.* Mais faisons une vérification intermédiaire de notre raisonnement. Est-ce que des appareils tels que nous les décrivons ici existent? Oui, il en existe. Par exemple toute plaque photographique est un détecteur de position pour particules ionisantes. Une plaque photographique, et plus généralement n'importe quel appareil mesurant des positions, fait cette détection en modifiant sa quantité de mouvement d'une façon qui dépend de la position mesurée: l'électron est arrêté par la plaque photographique. Dans ce cas, $\chi_{\text{début}}$ est une plaque entièrement blanche, φ_n serait une particule localisée au point n, χ_n est la fonction décrivant une plaque noircie au point n et $\psi_{\text{autre,n}}$ décrit la quantité de mouvement et le spin

* À quoi ressemble l'interaction sur le plan mathématique? À partir de la description que l'on vient de donner, nous avons spécifié l'état final pour chaque état initial. Puisque les deux matrices densité sont liées par

$$\rho_{\text{f}} = T \rho_{\text{i}} T^\dagger \tag{82}$$

Défi 135 pe nous pouvons en déduire l'hamiltonien à partir de la matrice T. Pouvez-vous voir comment?

Au passage, notons que l'on peut généralement dire qu'un appareil mesurant une observable A possède un hamiltonien d'interaction entre le système et le détecteur qui dépend de la variable pointeur A, et pour lequel on a

$$[H + H_{\text{int}}, A] = 0 \, . \tag{83}$$

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

de la particule après qu'elle a percuté la plaque photographique au point n.

Nous sommes maintenant prêts à regarder le processus de mesure lui-même. Pour l'instant, ignorons le thermostat dans le détecteur, et décrivons simplement le détecteur lui aussi avec un état, que nous appelons $\chi_{\text{début}}$. Avant l'interaction entre la particule et le détecteur, le système combiné (incluant le détecteur) se trouvait dans l'état initial ψ_i donné simplement par

$$\psi_i = \psi_p \chi_{\text{début}} = \sum_n c_n \varphi_n \psi_{\text{autre}} \chi_{\text{début}} \,, \tag{84}$$

où ψ_p est l'état de la particule (du système). Après l'interaction, en utilisant les caractéristiques de l'appareil, connues expérimentalement et que nous venons juste de mentionner, l'état combiné ψ_a est

$$\psi_a = \sum_n c_n \varphi_n \psi_{\text{autre},n} \chi_n \,. \tag{85}$$

Cette évolution de ψ_i vers ψ_a est obtenue lorsque l'on applique l'équation d'évolution à l'ensemble formé par la particule et le détecteur. Or, l'état combiné ψ_a est une superposition d'états distincts sur le plan macroscopique: c'est une superposition d'états macroscopiques distincts du détecteur. Dans notre exemple, ψ_a pourrait correspondre à une superposition entre un état pour lequel un point situé en haut à gauche de la plaque, par ailleurs blanche, serait noirci, et un autre état pour lequel un point situé en bas à droite de la plaque, par ailleurs blanche, serait noirci. Une telle situation n'est jamais observée. Voyons pourquoi.

La matrice densité ρ_a de l'état combiné ψ_a après la mesure est donnée par

$$\rho_a = \psi_a \otimes \psi_a^\dagger = \sum_{n,m} c_n c_m^* (\varphi_n \psi_{\text{autre},n} \chi_n) \otimes (\varphi_m \psi_{\text{autre},m} \chi_m)^\dagger \,. \tag{86}$$

Elle contient des termes non diagonaux, c.-à-d. les termes pour lesquels $n \neq m$, et dont la valeur numérique est différente de zéro. Maintenant, réintroduisons le thermostat. Depuis la section précédente nous connaissons l'effet d'un thermostat sur une telle superposition macroscopique. Nous avons trouvé qu'une matrice densité telle que ρ_a perdait sa cohérence extrêmement rapidement. Nous supposerons ici que le temps de décohérence est petit et négligeable.* Après la décohérence, les termes non diagonaux s'annulent, et seule la matrice densité diagonale finale ρ_{f}, donnée par

$$\rho_{\text{f}} = \sum_n |c_n|^2 (\varphi_n \psi_{\text{autre},n} \chi_n) \otimes (\varphi_n \psi_{\text{autre},n} \chi_n)^\dagger \,. \tag{87}$$

reste, et elle a une pertinence expérimentale. Comme nous l'avons expliqué plus haut,

* Notez cependant qu'un temps de décohérence *strictement* nul (ce qui signifierait un nombre de degrés de liberté *strictement* infini pour le thermostat ou pour l'environnement) est en contradiction avec l'équation d'évolution, et en particulier avec l'unitarité, la localité et la causalité. Il est essentiel dans toute cette discussion de ne pas confondre les conséquences logiques d'un temps de décohérence extrêmement petit avec celles d'un temps de décohérence strictement nul.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

une telle matrice densité décrit un état mixte et les nombres $P_n = |c_n|^2 = |\varphi_n^\dagger \psi_p|^2$ fournissent la probabilité de mesurer la valeur a_n et de trouver la particule dans l'état $\varphi_n \psi_{\text{autre,n}}$ ainsi que le détecteur dans l'état χ_n. Mais ceci est exactement ce que les deux propriétés de la mesure quantique établissent.

Nous trouvons donc que lorsque l'on décrit une mesure comme une évolution d'un système quantique en interaction avec un détecteur macroscopique, lui-même contenant un thermostat, nous pouvons en *déduire* les deux propriétés de mesure quantique (le résultat probabiliste et l'effondrement de la fonction d'onde) à partir de l'équation d'évolution de la mécanique quantique. Le temps de décohérence t_d de la section précédente devient le temps d'effondrement dans le cas d'une mesure. De plus, nous trouvons que

$$t_\text{effondrement} = t_\text{d} < t_\text{r} \,. \tag{88}$$

Autrement dit, le temps d'effondrement est toujours plus petit que le temps de relaxation du thermostat. Nous avons donc une formule exprimant le temps qu'il faut à la fonction d'onde pour s'effondrer. Toutes les mesures expérimentales de temps d'effondrement ont confirmé ce résultat.

Ref. 104

Pourquoi $\hbar$ est-il nécessaire aux probabilités?

À première vue, on pourrait prétendre que les deux propriétés des mesures quantiques ne font pas intervenir $\hbar$, et qu'elles ne sont donc pas des conséquences de la théorie quantique. Mais cet argument est incorrect.

La décohérence est un processus quantique, parce que $\hbar$ apparaît dans l'expression du temps de décohérence. Puisque l'effondrement de la fonction d'onde est basé sur la décohérence, c'est également un processus quantique. Les probabilités sont, elles aussi, dues au quantum d'action.

De plus, nous avons vu que le concept de fonction d'onde apparaissait uniquement parce que le quantum d'action $\hbar$ n'était pas nul. Les fonctions d'onde, leur effondrement et les probabilités sont dues au quantum de changement $\hbar$.

Page 98

Ces résultats nous rappellent une affirmation que nous avons faite plus tôt: les probabilités apparaissent chaque fois qu'une expérience tente de détecter des changements (c.-à-d. des valeurs d'action) plus petites que $\hbar$. La plupart des casse-têtes que l'on se pose concernant les mesures sont dus à de telles tentatives. Cependant, la nature ne permet pas de telles mesures, et à chaque tentative des probabilités apparaissent.

Page 35

Défi 136 f

Les variables cachées

De nombreuses personnes ne sont pas satisfaites avec les explications concernant les probabilités du monde quantique. Elles aspirent à plus de mystère dans la théorie quantique. Elles n'aiment pas l'idée que les probabilités puissent être dues aux thermostats et au quantum d'action. Le préjudice le plus célèbre que ces personnes cultivent est l'idée que les probabilités sont dues à certains aspects cachés de la nature qui seraient encore inconnus des humains. Ce sont ces aspects imaginaires et inconnus que l'on appelle les *variables cachées*.

La beauté de la mécanique quantique est qu'elle permet des tests aussi bien conceptuels qu'expérimentaux sur la question de savoir si ces variables cachées existent (sans

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

même avoir besoin de les connaître). De toute évidence, des variables cachées contrôlant l'évolution des systèmes microscopiques contredirait l'affirmation que des valeurs d'action plus petites que $\hbar$ ne peuvent pas être détectées. La valeur d'action observable minimale est la raison même du comportement aléatoire des systèmes microscopiques. L'action minimale *exclue* donc les variables cachées. Mais essayons d'ajouter quelques arguments plus détaillés à la question.

Chronologiquement, le premier argument, quelque peu abstrait, contre les variables cachées a été fourni par John von Neumann.* Plus tard, un théorème d'impossibilité (appelé également théorème «no-go» [N.d.T.]) pour les variables cachées a été publié
Ref. 121 par Kochen et Specker en 1967, et indépendamment par John Bell en 1969. Le théorème établit que

▷ Des variables cachées non conceptuelles sont impossible si l'espace de Hilbert est de dimension supérieure ou égale à trois.

Le théorème concerne des variables *non contextuelles*, c.-à-d. des variables cachées *à l'intérieur* du système mécanique quantique. Le théorème de Kochen et Specker établit donc qu'il n'y a pas de modèle de variables cachées non contextuelles, parce que les mathématiques l'interdisent. Ce résultat élimine essentiellement toutes les possibilités de variables cachées, parce que les systèmes mécaniques quantiques habituels portent sur des espaces de Hilbert de dimensions supérieures à trois.

Il nous est impossible de ne pas constater qu'il n'existe pas de théorèmes restrictifs en ce qui concerne les variables cachées *conceptuelles*, c.-à-d. les variables de l'environnement et tout particulièrement celles des thermostats qu'il contient. En effet, nous avons montré leur nécessité plus haut!

Le bon sens élimine également les variables cachées, sans avoir recours aux mathématiques, avec un argument simple. Si un système mécanique quantique avait des variables internes cachées, l'appareil de mesure en aurait des quantités astronomiques.** Et cela signifierait qu'il ne pourrait pas fonctionner en tant que système de mesure.

Malgré tous les arguments, des chercheurs se sont toujours évertués à produire des tests expérimentaux sur les variables cachées. La plupart des tests sont basés sur la célèbre *inégalité de Bell*, une relation élégante et simple publiée par John Bell*** dans les années 1960.

Peut-on distinguer la théorie quantique et les théories réalistes locales qui utilisent des variables cachées? L'idée de départ de Bell était de le faire en mesurant la polarisation

* János Neumann (Budapest, 1903 – Washington DC, 1957) était un mathématicien influent. Un des esprits scientifiques les plus grands et les plus clairvoyants du XXe siècle, il résolut de nombreux problèmes, tout particulièrement en mathématique appliquée et en théorie quantique, qui continuent de nos jours à créer des difficultés à beaucoup de gens. Il travailla ensuite sur les bombes atomiques et à hydrogène, dans le domaine des missiles balistiques et sur des problèmes de défense en général. Au cours de la recherche sur les bombes, il a fortement influencé la construction des premiers ordinateurs électroniques, élargissant les idées de Konrad Zuse. Vers la fin de sa vie, il voulait modifier la météorologie en utilisant des bombes nucléaires. Il mourut d'un cancer qu'il contracta à la suite des radiations auxquelles il avait été exposé alors qu'il surveillait les tests des bombes nucléaires.

** Conduisant à la définition: une quantité astronomique est égale à 10^{23}.

*** John Stewart Bell (1928 – 1990), physicien théoricien qui travailla principalement sur les fondements de la théorie quantique.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

de deux photons corrélés. La théorie quantique dit que la polarisation des photons est fixée uniquement au moment où elle est mesurée, alors que les modèles réalistes locaux (le type de modèles de variables cachées le plus simple) prétendent que la polarisation est déjà fixée à l'avance par une variable cachée. Comme Bell le découvrit, il est possible d'utiliser des expériences pour déterminer laquelle des alternatives est correcte.

Imaginez que la polarisation soit mesurée en deux points distants A et B. Chaque observateur peut mesurer 1 ou −1 dans chacune de ses directions favorites. Supposons que chaque observateur choisisse deux directions, 1 et 2, et qu'ils appellent leurs résultats a_1, a_2, b_1 et b_2. Puisque les résultats de mesure ont tous pour valeur 1 ou −1, l'expression spécifique $(a_1 + a_2)b_1 + (a_2 - a_1)b_2$ a toujours pour valeur ±2.

Ref. 122 Imaginez que vous répétiez l'expérience de nombreuses fois, en supposant que les variables cachées apparaissent aléatoirement. Vous pouvez alors en déduire (un cas par-

Défi 137 f ticulier de) l'inégalité de Bell pour deux *variables cachées*. Elle prédit que

$$|(a_1b_1) + (a_2b_1) + (a_2b_2) - (a_1b_2)| \leqslant 2 \,. \tag{89}$$

Ici, les expressions entre parenthèses sont les moyennes des produits des mesures sur un grand nombre d'échantillons. Cette prédiction de variables cachées est valide indépendamment des directions des polariseurs impliqués.

D'autre part, dans le cas où les polariseurs 1 et 2 placés en A et leurs équivalents placés en B sont choisis à un angle $\pi/4$, la *théorie quantique* prédit que

$$|(a_1b_1) + (a_2b_1) + (a_2b_2) - (a_1b_2)| = 2\sqrt{2} > 2 \,. \tag{90}$$

Cette prédiction est en contradiction totale avec la prédiction de variables cachées.

Or, toutes les vérifications expérimentales de l'inégalité de Bell ont confirmé la mécanique quantique standard et falsifié les variables cachées. Il n'y a aucune exception.

Une autre contradiction mesurable entre la théorie quantique et les théories réalistes locales a été prédite par Greenberger, Horn et Zeilinger pour des systèmes de trois par-

Ref. 123 ticules intriquées. Encore une fois, la théorie quantique a été confirmée lors de toutes les expériences.

En résumé, *les variables cachées n'existent pas*. Bien sûr, ceci n'est pas réellement une surprise. La recherche des variables cachées est basée sur une mauvaise compréhension de la mécanique quantique ou sur des désirs personnels sur la façon dont le monde devrait être, au lieu de le prendre tel qu'il est: il existe une valeur d'action minimale $\hbar$ dans la nature.

Résumé sur les probabilités et le déterminisme

> Geometrica demonstramus quia facimus; si physica demonstrare possemus, faceremus.
>
> Giambattista Vico*

* «Nous pouvons démontrer les choses géométriques parce que nous les faisons; si nous pouvions démontrer les choses physiques, nous pourrions les faire.» Giovan Battista Vico (Naples, 1668 – Naples 1744), philosophe et penseur important. Dans cette phrase célèbre, il soulignait une distinction fondamentale entre les mathématiques et la physique.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Nous tirons ici un certain nombre de conclusions qui vont nous servir au cours du reste de notre ascension de la montagne. Notez que ces conclusions, bien qu'elles soient en accord avec toutes les expériences, ne sont pas encore partagées par tous les physiciens! L'ensemble du sujet est un problème pour les personnes qui préfèrent l'idéologie aux faits.

Dans la vie quotidienne, bien souvent, les probabilités n'apparaissent pas ou ne sont pas remarquées. La théorie quantique montre que

- ▷ Les probabilités apparaissent chaque fois qu'un processus essaye de faire la distinction entre des situations qui diffèrent d'environ un quantum d'action $\hbar$.
- ▷ Le mécanisme précis de l'apparition des probabilités est dû aux thermostats concernés.

En bref, les probabilités apparaissent chaque fois qu'une expérience tente de faire la distinction entre des *situations proches*. Pour plus de détails:

— Les probabilités apparaissent lors des mesures, non pas parce que l'état du système quantique est inconnu ou flou, mais parce que le système interagit avec un thermostat de l'environnement dont l'état n'est pas connu avec précision. Les probabilités de la mécanique quantique ont une origine statistique et sont dues aux thermostats de l'environnement ou des appareils de mesure, en combinaison avec le quantum d'action $\hbar$. Les probabilités sont dues au grand nombre de degrés de liberté contenus dans le thermostat. Ce grand nombre rend imprévisible le résultat des expériences (tout particulièrement celles dont les résultats possibles diffèrent d'environ $\hbar$). Si l'état du thermostat concerné était connu, le résultat d'une expérience pourrait être prédite. Les probabilités de la théorie quantique sont dues au quantum d'action et ont une origine thermodynamique.

  Autrement dit, il n'y a *pas de probabilités fondamentales* dans la nature. Toutes les probabilités de la nature sont dues à la décohérence. En particulier, toutes les probabilités sont dues à la statistique des nombreuses particules (certaines d'entre elles pouvant même être virtuelles) qui constituent les thermostats de l'environnement. En modifiant les mots bien connus d'Albert Einstein, nous pouvons nous mettre d'accord sur ce qui suit: «la nature ne joue pas aux dés.» En conséquence, nous appelons ψ la *fonction d'onde* (plutôt que «l'amplitude de probabilité», telle qu'elle est souvent appelée). Un terme encore meilleur serait la *fonction d'état*.

— Chaque observation de la vie quotidienne est un cas particulier de décohérence. Ce qui est habituellement appelé «l'effondrement de la fonction d'onde» est un processus de décohérence dû à l'interaction avec les thermostats présents dans l'environnement ou dans les appareils de mesure. Parce que les êtres humains ont le sang chaud et qu'ils ont une mémoire, ils sont eux-mêmes des appareils de mesure. Le fait que notre corps ait une température de 37°C est donc la raison pour laquelle nous ne voyons qu'un seul monde, et non pas des superpositions. (En réalité, il existe de nombreuses autres raisons. Pouvez-vous en nommer quelques-unes?)

Défi 138 e

— Toute mesure se termine lorsque le système microscopique a interagi avec le thermostat contenu dans l'appareil de mesure. La théorie quantique en tant que descrip-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

tion de la nature ne nécessite pas de détecteurs; l'équation d'évolution décrit tous les exemples de mouvement. Cependant, les *mesures* nécessitent l'existence de détecteurs. Un détecteur (un appareil de mesure) est une machine qui enregistre les observations. En conséquence, il doit inclure un thermostat, c.-à-d. qu'il doit être un objet classique, macroscopique. Dans ce contexte, on parle également d'un *appareil classique*. Cette nécessité qu'a un appareil de mesure à être classique avait déjà été soulignée lors des toutes premières étapes de la théorie quantique.

— Toutes les mesures, puisqu'elles sont des processus de décohérence impliquant des interactions avec des thermostats, sont des processus irréversibles et elles augmentent l'entropie.

— Chaque mesure, comme tout exemple de décohérence, est un cas particulier d'évolution en mécanique quantique, à savoir l'évolution de la combinaison entre un système quantique, un détecteur macroscopique et un thermostat. L'équation d'évolution étant invariante sur le plan de la relativité, aucun problème de causalité n'apparaît dans les mesures, de même que n'y apparaissent aucun problème de localité et aucun problème de logique.

— Étant donné que l'équation d'évolution et le processus de mesure n'impliquent pas de grandeurs autres que l'espace-temps, les hamiltoniens, les thermostats et les fonctions d'onde, aucune autre grandeur ne joue un rôle lors des mesures. En particulier, aucun observateur humain, ni aucune conscience quelconque n'est impliquée ni nécessaire. Une mesure est terminée lorsque le système microscopique a interagi avec le thermostat de l'appareil. La décohérence inhérente à chaque mesure a lieu même si personne ne regarde. Cette conséquence triviale est en accord avec les observations de la vie quotidienne, par exemple avec le fait que la Lune tourne autour de la Terre même si personne ne la regarde.* De même, un arbre qui tombe au milieu d'une forêt fait du bruit même si personne n'est là pour l'écouter. La décohérence est indépendante de l'observation humaine, de l'esprit humain et de l'existence humaine.

Vol. III, page 339

— Lors de chaque mesure, le système quantique interagit avec le détecteur. Puisqu'il existe une valeur minimale pour l'amplitude de l'action, tout *observation influence la chose observée*. Par conséquent, toute mesure *perturbe* le système quantique. Toute description précise des observations doit également inclure la description de ces perturbations. Dans cette section, la perturbation a été modélisée par le changement de l'état ψ_{autre} du système en $\psi_{\text{autre,n}}$. Sans un tel changement d'état, sans une perturbation du système quantique, aucune mesure ne serait possible.

— Puisque le processus de mesure est décrit entièrement par la mécanique quantique, l'unitarité est, et reste, la propriété fondamentale de l'évolution. Il n'existe pas de processus non unitaires en mécanique quantique.

— La description de l'effondrement de la fonction d'onde comme un processus de décohérence est une explication exactement dans le sens pour lequel le terme «explication» a été défini plus tôt: elle décrit la relation entre une observation et tous les autres aspects de la réalité (c.-à-d. le thermostat du détecteur ou de l'environnement dans notre cas). L'effondrement de la fonction d'onde a été mesurée, calculée et *expliquée*. L'effondrement n'est pas une question «d'interprétation», c.-à-d. d'opinion, comme

Vol. III, page 334

* Le point de vue opposé est parfois faussement attribué à Niels Bohr. La Lune est bien évidemment en contact avec de nombreux thermostat de rayonnement. Pouvez-vous en énumérer quelques-uns?

Défi 139 e

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

il est malheureusement souvent suggéré.*
— Il ne sert à rien de spéculer sur la possibilité ou non de déterminer l'évolution d'une *seule* mesure quantique si l'état de l'environnement autour du système était connu. Les mesures ont besoin de thermostats. Mais un thermostat est irréversible (à un niveau d'approximation excellent) et ne peut donc pas être décrit par une fonction d'onde, qui se comporte de manière réversible.**

En bref:

- ▷ La mécanique quantique est déterministe.
- ▷ Les thermostats sont probabilistes.
- ▷ Les thermostats sont probabilistes à cause du quantum d'action.

En résumé, il n'y a *pas* d'irrationalité dans la théorie quantique. Quiconque utilise la théorie quantique comme un argument pour des superstitions, des comportements irrationnels, des croyances New Age, ou encore des idéologies est coupable de désinformation. L'affirmation de Gell-Mann au début de ce chapitre en est un exemple. Un autre exemple est la déclaration suivante bien connue, mais incorrecte, de Richard Feynman:

Page 162

Ref. 125

... personne ne comprend la physique quantique.

De toute évidence, un prix Nobel n'empêche pas les vues déformées par l'idéologie. L'affirmation correcte est:

- ▷ Le quantum d'action et la décohérence sont les clefs pour comprendre la théorie quantique.

En fait, $\hbar$ et la décohérence permettent de clarifier de nombreuses autres questions. Explorons-en quelques-unes intéressantes.

Quel est la différence entre l'espace et le temps?

L'espace et le temps diffèrent. Les objets sont localisés dans l'espace mais pas dans le temps. Pourquoi en est-il ainsi? Dans la nature, la plupart des interactions entre un thermostat et un système sont arbitrées par un potentiel. Tous les potentiels dépendent, par définition, de la position. Par conséquent, tout potentiel, parce qu'il est fonction de la position $\boldsymbol{x}$, commute avec l'observable position (et donc avec l'hamiltonien de l'interaction). La décohérence induite par les thermostats (sauf si des précautions particulières sont prises) va donc tout d'abord détruire les éléments non diagonaux de chaque superposition d'états centrés en des endroits différents. En bref, *les objets sont localisés parce qu'ils interagissent avec des thermostats par l'intermédiaire de potentiels*.

* Cela implique que l'interprétation dite des «mondes multiples» est un vœu pieux. La conclusion se confirme lorsque l'on étudie les détails de cette approche religieuse. C'est un système de croyances, non basé sur des faits.

Ref. 124

** Ce type de déterminisme très fort sera défié vigoureusement dans la dernière partie de ce texte, où on montrera que le temps n'est pas un concept fondamental, et donc que le débat autour du déterminisme perd l'essentiel de son intérêt.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Pour la même raison, les objets n'ont qu'une seule orientation spatiale à la fois. Si l'interaction entre le système et le thermostat dépend du spin, le thermostat conduit à une «localisation» du spin. Ceci se produit pour tous les systèmes microscopiques en interaction avec des aimants. Une conséquence est qu'il n'est presque jamais possible d'observer des superpositions macroscopiques d'aimantation. Et puisque les électrons, les protons et les neutrons ont un moment magnétique et un spin, il est possible d'étendre cette conclusion: on ne trouve jamais les objets de la vie quotidienne dans des superpositions d'états de rotation différents, parce que leurs interactions avec les thermostats dépendent du spin.

En revanche, la plupart des systèmes ne sont pas localisés dans le temps, mais ils existent au contraire pendant des périodes de temps très longues, parce que, dans la pratique, toutes les interactions entre un système et un thermostat ne commutent *pas* avec le temps. En fait, c'est ainsi qu'un thermostat est défini en tout premier lieu. En bref, *les objets sont permanents parce qu'ils interagissent avec un thermostat*.

Pouvez-vous trouver une interaction qui dépende de la quantité de mouvement au lieu de dépendre de la position? Quelle est la conséquence pour les systèmes macroscopiques?

Défi 140 e

Autrement dit, contrairement à la relativité générale, la théorie quantique fournit une distinction entre l'espace et le temps. En fait, nous pouvons *définir* la position comme étant l'observable qui commute avec les hamiltoniens des interactions. Cette distinction entre l'espace et le temps est due aux propriétés de la matière et de ses interactions. Nous n'aurions pas pu déduire cette distinction en relativité générale.

Sommes-nous de bons observateurs?

Les êtres humains sont-ils des appareils de mesure classiques? Oui, ils le sont. Même si plusieurs physiciens éminents prétendent que le libre arbitre et les probabilités sont liés, une investigation détaillée montre que ce n'est pas le cas. Nos sens sont des machines classiques parce qu'ils obéissent à leur définition: les sens humains enregistrent les observations en interagissant avec un thermostat. Notre cerveau est également un appareil classique: les neurones sont immergés dans des thermostats. Les probabilités quantiques ne jouent *pas* un rôle déterminant pour le cerveau.

Ref. 126

Toute entité qui observe, qu'elle soit une machine ou un être humain, a besoin d'un thermostat et d'une mémoire pour enregistrer ses observations. Ceci signifie que les observateurs doivent être composés de matière et qu'ils ne peuvent pas être composés de rayonnement. Notre description de la nature est donc fortement biaisée: nous la décrivons du point de vue de la matière. C'est un peu comme si on décrivait les étoiles en plaçant la Terre au centre de l'Univers: nous plaçons toujours la matière au centre de notre description. Est-il possible d'éliminer cet anthropomorphisme de base? Nous le découvrirons en poursuivant notre aventure.

Défi 141 f

Vol. VI, page 83

Quel est le lien entre la théorie de l'information, la cryptologie et la théorie quantique?

Faire de la physique consiste à parler des observations de la nature. Comme toute observation, une mesure produit de l'information. Il est donc possible de traduire une grande partie de la théorie quantique (mais pas toute) dans le langage de la théorie de

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

l'information. En particulier, l'existence d'une valeur de changement minimale dans la nature a plusieurs conséquences: l'information concernant un système physique ne peut jamais être complète; le transport de l'information a ses limites; et on ne peut pas faire entièrement confiance à l'information. Les détails de ces études constituent un moyen fascinant de regarder le monde microscopique.

L'analogie entre la théorie quantique et la théorie de l'information devient encore plus intéressante lorsque les énoncés sont traduits dans le langage de la cryptologie. La cryptologie est la science qui transmet des messages cachés que seul le destinataire prévu peut déchiffrer. À notre époque moderne de surveillance permanente, la cryptologie est un outil important pour protéger la liberté individuelle.*

Ref. 127

Le quantum d'action implique que les messages peuvent être envoyés de façon (presque) fiable. Écouter un message est un processus de mesure. Puisqu'il y a une action minimale $\hbar$, il est possible de détecter si quelqu'un a essayé d'écouter le message que l'on a envoyé. Pour éviter une attaque de la part d'un intercepteur (quelqu'un qui prétend être le récepteur, puis envoie ensuite une copie du message au destinataire réellement prévu) on peut utiliser des systèmes *intriqués* comme signaux (messages) pour transmettre l'information. Si l'intrication est détruite, c'est que quelqu'un a écouté le message. Habituellement, les cryptologues quantiques utilisent des systèmes de communication basés sur des photons intriqués.

Le problème majeur de la *cryptologie quantique* (un vaste domaine de recherche moderne) est la question de la distribution des clefs. Toute communication sécurisée est basée sur une clef secrète qui est utilisée pour décoder le message. Même si le canal de communication est de la plus haute sécurité (comme dans le cas des photons intriqués), encore faut-il trouver un moyen pour envoyer à son partenaire de communication la clé secrète nécessaire au décodage du message. Trouver de tels moyens est l'objectif principal de la cryptologie quantique. Cependant, une investigation approfondie de la question montre que toutes les méthodes d'échange de clefs sont limitées en ce qui concerne leur niveau de sécurité.

En bref, à cause du quantum d'action, la nature impose des limites sur la possibilité d'envoyer des messages codés. L'énoncé de ces limites est (presque) équivalent à celui des limites que le quantum d'action impose aux changements possibles dans la nature.

L'Univers est-il un ordinateur?

Le quantum d'action fournit une limite à la sécurisation des échanges d'information. Ce constat nous permet d'écarter plusieurs affirmations incorrectes que l'on trouve souvent dans les médias. Affirmer que «l'Univers est de l'information» ou que «l'Univers est un ordinateur» est aussi raisonnable que de dire que l'univers est une observation ou un distributeur de chewing-gum. Tout expert du mouvement devrait se méfier de ces déclarations ainsi que d'autres toutes aussi louches. Soit les gens qui les utilisent se trompent eux-mêmes, soit ils essaient de tromper les autres.

Vol. VI, page 109

* La cryptologie englobe le domaine de la *cryptographie* (l'art d'encoder les messages) et le domaine de la *cryptanalyse* (l'art de déchiffrer les messages codés). Pour une bonne introduction à la cryptologie, on pourra se référer au texte par Albrecht Beutelspacher, Jörg Schwenk & Klaus-Dieter Wolfenstätter, *Moderne Verfahren der Kryptographie*, Vieweg 1995.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Est-ce que l'Univers a une fonction d'onde? Est-ce qu'il a des conditions initiales?

Lors des discussions sur la théorie quantique, on entend fréquemment parler de la fonction d'onde de l'Univers. Diverses conclusions sont déduites de cette idée, par exemple concernant l'irréversibilité du temps, l'importance des conditions initiales, les changements nécessaires à la théorie quantique, et bien d'autres. Ces arguments sont-ils corrects?

La première chose à clarifier est la signification du mot «Univers». Comme nous
Vol. II, page 223
l'avons déjà expliqué, le terme peut avoir deux sens: soit il représente l'ensemble de toute la matière et de tout le rayonnement, soit il représente ce même ensemble *auquel on rajoute* tout l'espace-temps. Rappelons également la signification du terme «fonction d'onde»: elle décrit l'*état* d'un système. L'état permet de faire la distinction entre deux systèmes qui seraient par ailleurs identiques. Par exemple, la position et la vitesse permettent de distinguer deux boules d'ivoire, par ailleurs identiques, sur une table de billard. Alternativement et de façon équivalente, l'état décrit les changements au cours du temps.

Est-ce que l'Univers a un état? Si on prend la signification la plus large de l'Univers, il n'en a pas. Parler de l'état de l'Univers est une contradiction: le concept d'état, défini
Vol. I, page 27
comme étant les aspects non permanents d'un objet, ne peut s'appliquer qu'à des *parties* de l'Univers.

On peut ensuite prendre le sens plus étroit du terme «Univers» (l'ensemble de toute la matière et de tout le rayonnement) et se poser à nouveau la même question. Pour déterminer l'état de toute la matière et de tout le rayonnement, il nous faut un moyen pour le mesurer: pour cela il nous faut un environnement. Mais le seul environnement de la matière et du rayonnement est l'espace-temps. Il n'est pas possible de déterminer des conditions initiales, car il nous faudrait des mesures pour pouvoir le faire, et donc un instrument. Un instrument est un système matériel auquel est attaché un thermostat, mais il n'existe pas de tel système en dehors de l'Univers.

En bref, la théorie quantique ne permet pas de faire des mesures de l'Univers.

▷ L'Univers n'a pas d'état.

Méfiez-vous de quiconque qui prétendrait connaître quelque chose à propos de la fonction d'onde de l'Univers. Posez-lui simplement la question de Wheeler: si vous connaissez la fonction d'onde de l'Univers, pourquoi n'êtes-vous pas riche?

Malgré cette conclusion, plusieurs physiciens célèbres ont proposé des équations d'évolution pour la fonction d'onde de l'Univers. (Ironiquement, la plus connue est
Ref. 128
l'équation de Wheeler-DeWitt.) Cela peut sembler quelque peu absurde, mais aucune prédiction de ces équations n'a été comparée à des expériences. Les arguments que l'on vient juste de donner rendent même cela impossible dans le principe. L'exploration de ces équations peut sembler intéressantes à première vue, mais il faut donc l'éviter si nous voulons terminer notre aventure sans nous perdre dans des croyances erronées.

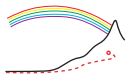
Il y a beaucoup d'autres perversions concernant cette histoire. L'une d'elles est que l'espace-temps lui-même, sans la matière, pourrait être un thermostat. On montrera que cette spéculation est correcte lors du dernier volume de cette aventure. Le résultat semble

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

permettre de pouvoir parler de la fonction d'onde de l'Univers. Mais là encore, il s'avère que le temps est *indéfini* aux échelles pour lesquelles l'espace-temps est un thermostat efficace. Ceci implique, encore une fois, que la notion d'état n'est pas applicable dans ce cas.

L'absence d'un «état» de l'Univers est une affirmation importante. Elle implique également l'absence de conditions initiales! Les arguments sont essentiellement les mêmes. C'est un résultat difficile. Nous sommes tellement habitués à penser que l'univers a des conditions initiales que nous ne remettons jamais en question le terme. (L'erreur peut même apparaître de temps en temps dans ce texte.) Mais l'Univers n'a pas de conditions initiales.

En guise de résumé, on peut retenir ceci (valide même à la lumière des dernières recherches): l'Univers n'est *pas* un système, il n'a *pas* de fonction d'onde et il n'a *pas* de conditions initiales, indépendamment de ce que l'on entend par «Univers».



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Chapitre 8

Les couleurs et autres interactions entre la lumière et la matière

« Rem tene; verba sequentur.** »

Les pierres et tous les autres objets ont des couleurs. Pourquoi? Autrement dit, par quel moyen spécifique les particules quantiques chargées que l'on trouve à l'intérieur des pierres, et à l'intérieur de tous les autres objets, interagissent-elles avec les champs électromagnétiques? Dans ce chapitre, nous allons d'abord donner un aperçu des différents processus par lesquelles le quantum d'action permet de produire les couleurs de la nature, c.-à-d. les interactions entre les quantons de matière et les photons. Ensuite, nous exploreront le plus simple de ces systèmes: nous montrerons comment le quantum d'action conduit aux différentes couleurs produites par les atomes d'hydrogène. Après cela, nous découvrirons que l'interaction entre la matière et le rayonnement conduit à d'autres effets surprenants, tout particulièrement lorsque l'on prend en compte la relativité.

Les origines de la couleur

La théorie quantique explique toutes les couleurs de la nature. En effet, toutes les couleurs que nous observons sont dues aux particules *chargées* électriquement. Plus précisément, les couleurs sont dues aux interactions des particules chargées avec les photons. Toutes les couleurs sont donc des effets quantiques.

Jusque-là, nous avons exploré le mouvement des quantons en les décrivant uniquement par leur masse. Maintenant, nous allons étudier le mouvement des particules qui sont électriquement chargées. Les particules chargées responsables de la plupart des couleurs sont les électrons et les noyaux, ainsi que leurs composites, depuis les ions, les atomes et les molécules, jusqu'aux fluides et aux solides. De nombreuses questions concernant les couleurs font toujours l'objet de recherches. Par exemple, jusqu'à récemment, les raisons exactes pour lesquelles l'asphalte est noir n'étaient pas clairement expliquées. La structure exacte des composés chimiques, les *asphaltènes* qui produisent la couleur d'un marron très foncé, était inconnue. Seules des recherches récentes ont permis de régler la question. En fait, le développement de nouveaux colorants et de nouveaux effets de couleur constitue une part importante de l'industrie moderne.

Ref. 130

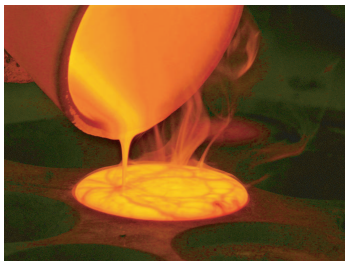
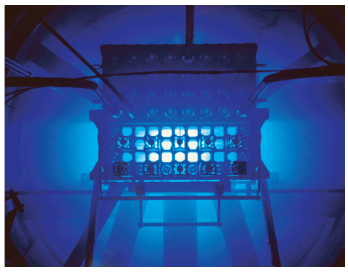
** «Possède ton sujet et les mots suivront.» Marcus Porcius Cato (234 – 149 av. J.-C.), dit Caton l'Ancien, était un homme politique romain, célèbre pour ces discours et son intégrité.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Ref. 129
Défi 142 e

Un aperçu des mécanismes spécifiques qui génèrent la couleur est donné dans le tableau suivant. Le tableau comprend toutes les couleurs qui apparaissent dans la vie de tous les jours. (Pouvez-vous en trouver une qui manque?)

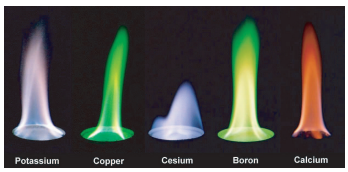
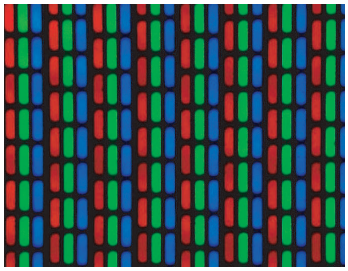
TABLEAU 7 Les origines des couleurs

TYPE DE COULEURS	EXEMPLES	DÉTAILS
Classe I: Couleurs dues à des excitations simples		
	1. Incandescence et rayonnement de charges libres	
	Lampe à arc au carbone, acier chaud, filament d'une ampoule, la plupart des étoiles, magma, lave, fusions à chaud	Les couleurs sont dues au spectre continu émis par toutes les matières chaudes; la séquence des couleurs, donnée par la loi de Wien, est: noir, rouge, orange, jaune, blanc, bleu-blanc (plomb et argent fondus © Graela)
	Feu de bois, bougie	Les flammes du bois et de la cire sont jaunes à cause d'une incandescence riche en carbone et pauvre en oxygène
	Feux d'artifice blanc, lampe de poche, cierges magiques	Dues à la transformation des métaux en oxyde par combustion à haute température, tel que le magnésium, le zinc, le fer, l'aluminium ou le zirconium (cierge magique © Sarah Domingos)
	Réacteurs nucléaires, sources de lumière synchrotron, lasers à électrons libres	Dues à des charges libres rapides: le rayonnement Vavilov–Čerenkov est dû à des particules plus rapides que la lumière dans la matière, le rayonnement de freinage* est dû au ralentissement des particules chargées (cœur d'un réacteur nucléaire au fond d'une piscine, aimablement fournie par la NASA)
	**2. Excitations des gaz atomiques**	

* La littérature anglaise utilise le terme allemand «bremsstrahlung» que l'on trouve également dans certains textes français [N.d.T.].

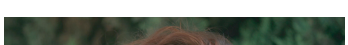
Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 7 Les origines des couleurs (continuation).

TYPE DE COULEURS	EXEMPLES	DÉTAILS
	Lampe à néon rouge, lampe à argon bleue, lampe à mercure UV, lampes de ville à sodium jaune, la plupart des lasers à gaz, lasers à vapeur métallique, certaines fluorescences	Les couleurs sont dues à des transitions entre les niveaux d'énergie atomiques (lampes à décharge de gaz © Pslawinski)
	Aurore polaire, triboluminescence dans les rubans adhésifs, cristalloluminescence dans le bromate de strontium	Dans l'air, les couleurs bleue et rouge sont dues aux niveaux d'énergie atomiques et moléculaires de l'azote, alors que les couleurs verte, jaune et orange sont dues à l'oxygène (aurore polaire © Jan Curtis)
	Éclaire, arcs électriques, étincelles, feux d'artifice colorés, la plupart des flammes colorées, certaines électroluminescences	La gamme de couleurs est due aux niveaux d'énergie d'atomes hautement excités (flammes de K, Cu, Cs, B, Ca © Philip Evans)
	3. Vibrations et rotations des molécules	
	Eau bleutée, glace bleue lorsqu'elle est claire, iode violet, brome rouge-marron, chlore jaune-vert, flammes rouges du CN ou flammes bleu-vert du CH, certains lasers à gaz, ozone bleue conduisant au ciel bleu et gris du soir	Les couleurs sont dues aux niveaux quantifiés de rotation et de vibration dans les molécules (iceberg bleu © Marc Shandro)
Classe II: Couleurs dues aux effets du champ de ligands		
	**4. Composés de métaux de transition**	
		

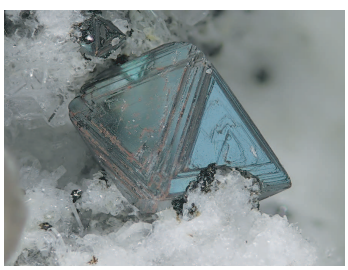
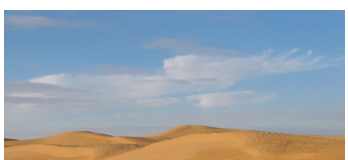
Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 7 Les origines des couleurs (continuation).

TYPE DE COULEURS	EXEMPLES	DÉTAILS
	Malachite $Cu_2CO_3(OH)_2$ verte, oxyde de cobalt bleu, azurite $Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$ bleue, hématite Fe_2O_3 rouge à marron, *MnO* vert, $Mn(OH)_2$ blanc, manganite marron, oxyde de chrome Cr_2O_3 vert, praséodyme vert, europium rose et les composés de samarium jaunes, $Cr_2O_3 - Al_2O_3$ UV par effet piézochromique et thermochromique et phosphores électroniques, scintillation, certaines fluorescences, certains lasers	Les couleurs sont dues aux états électroniques des ions; les phosphores sont utilisés dans les tubes cathodiques pour les écrans de télévision et d'ordinateurs ainsi que dans les tubes des lampes fluorescentes (malachite verte sur de la kasolite jaune, un minéral uranifère trouvé à Kolwezi, RDC, largeur de l'image: 5 mm © Stephan Wolfsried; photo d'un masque de télévision © Planemad)
	**5. Impuretés de métaux de transition**	
	Rubis, émeraude, alexandrite, pérovskites, lasers correspondants	Les états électroniques des ions des métaux de transition sont excités par la lumière et absorbent donc des longueurs d'onde spécifiques (un rubis sur de la calcite provenant de Mogok, Birmanie, largeur de l'image: 3 cm © Rob Lavinsky)
Class III: Couleurs dues aux orbitales moléculaires		
	**6. Composés organiques**	
		
		
		

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 7 Les origines des couleurs (continuation).

TYPE DE COULEURS	EXEMPLES	DÉTAILS
	Hémoglobine rouge du sang, hémocyanine bleue du sang, chlorophylle verte des plantes, carotènes jaunes ou oranges des carottes, fleurs et feuilles d'automne jaunes, anthocyanes rouges ou pourpres des baies, fleurs et feuilles d'automne rouges, indigo bleu, lycopène rouge des tomates, myoglobine contenant du fer dans la viande rouge, glucosamine marron dans la croute des aliments cuits au four, tannins marron, eumélanine noire dans la peau, les cheveux et les yeux humains, variété de phéomélanine riche en fer chez les rouquins, mélanine noire également dans les pommes et les bananes coupées ainsi que dans les sacs mobiles des caméléons, asphalte marron-noir, certaines fluorescences, chimiluminescence, phosphorescence, halochromisme, électrochromisme et thermochromisme, lasers à colorants	Les couleurs sont dues aux conjugaisons de liaisons π, c.-à-d. aux alternances de liaisons simples et doubles dans les molécules; les pigments floraux sont presque tous des anthocyanes, des bétalaïnes ou des carotènes; utilisés dans les colorants alimentaires et cosmétiques, dans les teintures textiles, dans les écrans électrochromes, dans les encres pour imprimantes couleurs, dans les photosensibilisateurs (narcisse © Thomas Lüthi; sang sur un doigt © Ian Humes; baies © Nathan Wall; cheveux, aimablement fournie par dusdin)
	Vers luisants, certaines bactéries et certains champignons, la plupart des poissons des eaux profondes, pieuvres, méduses, et autres animaux des eaux profondes	La bioluminescence est due à des molécules excitées, que l'on appelle généralement des *luciférines* (poisson-pêcheur, longueur: 4, 5 cm © Steve Haddock)
	**7. Transfert de charges inorganique**	
		

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 7 Les origines des couleurs (continuation).

TYPE DE COULEURS	EXEMPLES	DÉTAILS
	Saphir bleu, lapis-lazuli bleu, amazonite verte, magnétite Fe_3O_4 marron-noir et la plupart des autres minéraux ferreux (colorant le basalte noir, les bouteilles de bière marron, le sable de quartz jaune, et bien d'autres roches aux tons marrons ou rouges), graphite noir, permanganate pourpre, bichromate de potassium orange, molybdates jaunes, hématite Fe_2O_3 rouge, certaines fluorescences	La lumière provoque le changement de position d'un électron d'un atome à un autre; par exemple, dans le saphir bleu la transition se fait entre les impuretés Ti et Fe; de nombreux pigments de peinture utilisent des couleurs des transferts de charges; les réactifs analytiques fluorescents sont utilisés en médecine et en biologie moléculaire (magnétite trouvée à Laach, Allemagne, largeur de l'image 10 mm © Stephan Wolfsried; désert de sable Evelien Willemsen)
Classe IV: Couleurs dues aux effets de bande d'énergie		
	8. Les bandes métalliques	
	Or (vert en transmission), pyrite, fer, laiton, alliages, argent, cuivre, rubis doré	Les couleurs par réflexion et par transmission sont dues à des transitions d'électrons entre bandes qui se chevauchent (saxophone © Selmer)
	9. Bandes dans les semi-conducteurs purs	
	Silicium, GaAs, galène PbS noire, cinabre HgS rouge, cadmium CdS jaune, CdSe noir, CdS_xSe_{1-x} rouge, ZnO blanc, HgS orange-vermillon, diamant incolore, SmS piézochromique noir à or	Les couleurs sont dues à des transitions d'électrons entre des bandes séparées; la série de couleurs est: noir, rouge, orange, jaune, blanc/incolore; certaines sont utilisés comme pigments (oxyde de zinc, aimablement fournie par Walkerma)
	10. Bandes dans les semi-conducteurs dopés	
		

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

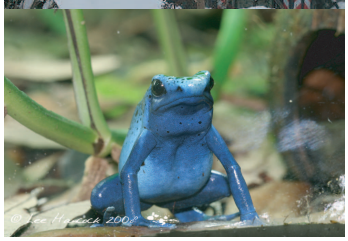
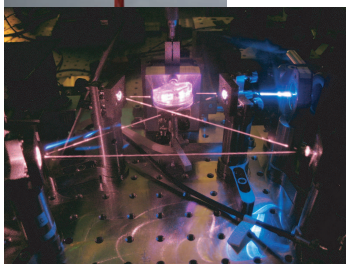
TABLEAU 7 Les origines des couleurs (continuation).

TYPE DE COULEURS	EXEMPLES	DÉTAILS
	Diamant bleu, jaune, vert et noir; LEDs; lasers à semi-conducteurs; cellules photovoltaïques; phosphores à base de ZnS et $Zn_xCd_{1-x}S$ et autres phosphores	Les couleurs sont dues aux transitions entre les bandes des dopants et du semi-conducteur (ex: diamant bleu: accepteurs de bore, diamant noir: donneurs d'azote) (points quantiques © Andrey Rogach)
	11. Centres de couleur	
	Améthyste, quartz fumé, fluorite, diamants verts, topaze bleue, jaune et marron, sel brun, couleur pourpre du verre irradié contenant du Mn^{2+}, lyoluminescence, certaines fluorescences, lasers à centre F	Les couleurs sont dues aux centres de couleur, c.-à-d. aux électrons ou aux trous liés aux lacunes cristallines; les centres de couleur sont généralement créés par rayonnement (améthyste © Rob Lavinsky)
	Certaines lunettes de soleil dont la teinte varie avec la lumière	La coloration photochromique est due aux centres de couleur formés par la lumière UV du Soleil
Classe V: Couleurs dues à l'optique physique et géométrique		
	12. Réfraction dispersive et polarisation	
	Diamant taillé, zircone taillée, halos et chiens du soleil* formés par des cristaux de glace dans l'air	La décomposition spectrale (étincelle ou «feu» des pierres précieuses) est due à la dispersion dans les cristaux (zircone © Gregory Phillips)
	Arc-en-ciel	Les couleurs de l'arc primaire et secondaire sont dues à la dispersion dans les gouttelettes d'eau
	Rayons verts	La dispersion dans l'atmosphère décale les couleurs du soleil
	13. Diffusion	

* Phénomène météorologique dont le nom scientifique est «parhélies» et que l'on nomme également «faux soleil», «soleil double» ou «œil de bouc» [N.d.T.].

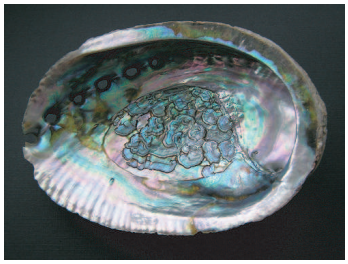
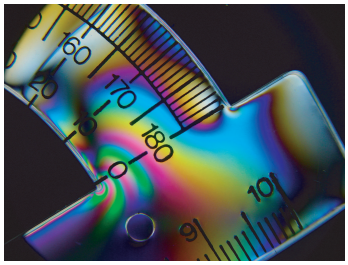
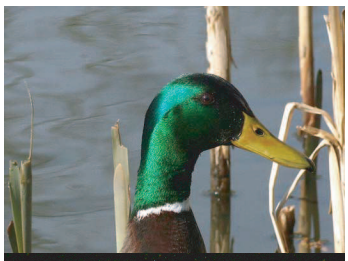
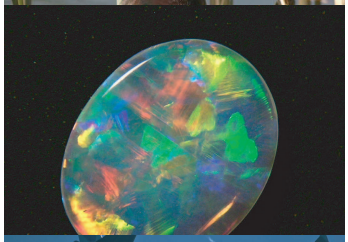
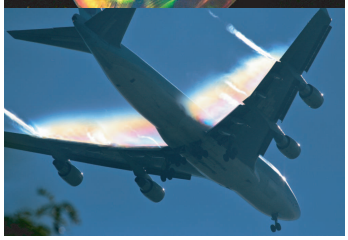
Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 7 Les origines des couleurs (continuation).

TYPE DE COULEURS	EXEMPLES	DÉTAILS
	Ciel bleu, coloration bleutée des montagnes lointaines, coucher de soleil rouge; intensification des couleurs par la pollution; quartz bleu	La lumière bleue est plus diffusée que la lumière rouge par diffusion de Rayleigh lorsque les diffuseurs (molécules, poussières) sont plus petits que la longueur d'onde de la lumière (coucher de soleil sur Tokyo © Altus Plunkett; quartz bleu © David Lynch)
		
	Couleur des cheveux blancs, lait, mousse de bière, nuages, brouillard, fumée de cigarette sortant des poumons, neige, crème fouettée, shampoing, étoiles dans les pierres précieuses	La couleur blanche est due à la diffusion de Mie indépendante de la longueur d'onde, c.-à-d. la diffusion par des particules plus grandes que la longueur d'onde de la lumière (bonhomme de neige © Andreas Kostner)
	Couleur bleue de la peau humaine par temps froid, yeux bleus et verts chez l'homme, peau de singe bleu, cou de dinde bleu, la plupart des poissons bleus, reptiles bleus, fumée de cigarette bleue	Les couleurs bleu Tyndall sont dues à la diffusion par des petites particules devant un fond sombre (grenouille venimeuse bleue, *Dendrobates azureus* © Lee Hancock)
	Rubis doré	La couleur rouge du verre de Murano est due à la diffusion par de minuscules particules d'or colloïdales incrustées dans le verre en combinaison avec la structure des bandes métalliques de l'or (rubis doré © murano-glass-shop.it)
	Non-linéarités, effet Raman, dihydrogénophosphate de potassium (KDP)	La diffusion par décalage de fréquence, la génération de deuxième harmonique ainsi que d'autres non-linéarités de certains matériaux modifient la couleur de la lumière incidente aux intensités élevées (gyrolaser doubleur de fréquence de 800 nm à 400 nm © Jeff Sherman)

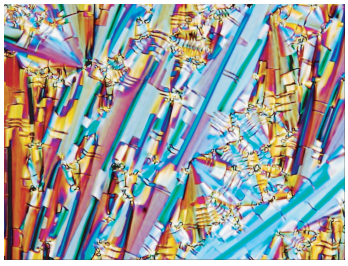
Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 7 Les origines des couleurs (continuation).

TYPE DE COULEURS	EXEMPLES	DÉTAILS
	**14. Interférences (sans diffraction)**	
	Nacre, films d'huile, bulles de savon, revêtements des lentilles de caméra, œil du chat dans le noir, ailes de mouches et de libellules, écailles de poisson, certains serpents, perles, couleurs de l'acier trempé	L'interférence par des couches minces produit une séquence de couleurs standard qui permet une détermination précise de l'épaisseur (coquille d'ormeau © Anne Elliot)
	Couleurs de polarisation de fines couches de cristaux biréfringents ou de couches plus épaisses de polymères contrains	Les couleurs sont dues aux interférences, comme le montre la dépendance avec l'épaisseur de la couche (photoélasticité, aimablement fournie par Nevit Dilmen)
	Arcs-en-ciel surnuméraires (voir page 102 du volume III)	Dû aux interférences, comme le montre la dépendance avec la taille des gouttes
	Scarabées irisés, papillons et plumes d'oiseaux, couleurs irisées sur les billets de banque et sur les voitures	Dû à la diffusion par des petites structures ou par des nanoparticules, comme le montre la dépendance de la couleur avec l'angle (canard colvert © Simon Griffith)
	15. Diffraction (avec interférences)	
	Opale	Les couleurs sont dues aux minuscules sphères incluses dans l'eau à l'intérieur de l'opale; les couleurs peuvent changer lorsque l'opale sèche (opale brésilienne polie © Opalsnopals)
	Halo, gloire, couronne	Les couleurs sont dues à la diffraction par des gouttelettes de brume minuscules (irisation du nuage de condensation d'un avion © Franz Kerschbaum)

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 7 Les origines des couleurs (continuation).

TYPE DE COULEURS	EXEMPLES	DÉTAILS
	Réseaux de diffraction, CDs, disques vinyles, certains scarabées et serpents	Les couleurs sont dues à la diffraction et aux interférences par de minuscules creux réguliers (CD éclairé par une lampe de poche © Alfons Reichert)
	Cristaux photoniques	Un sujet de la recherche moderne
	Cristaux liquides cholestériques, certains scarabées	Les couleurs sont dues à la diffraction et aux interférences dans les couches internes des matériaux (couleurs de cristaux liquides © Ingo Dierking)
Classe VI: Couleurs dues aux limitations de l'œil		
Couleurs de Fechner, telles que sur lite.bu.edu/vision/applets/Color/Benham/Benham.html	Disque ou toupie de Benham	Les couleurs sont dues à une réponse différente à la vitesse par les différents photorécepteurs
Production de couleur interne lorsque les yeux sont stimulés	Phosphènes	Produit par pression (frottement, éternuement) ou par des champs électriques ou magnétiques
Couleurs de polarisation	Pinceaux d'Haidinger	Voir page 113 du volume III
Illusions de couleur, telles que sur www.psy.ritsumei.ac.jp/~akitaoka/color9e.html	Couleurs qui apparaissent et disparaissent	Les effets sont dus à des combinaisons de traitements cérébraux et de limitations oculaires
Fausse couleur produite par l'œil, comme décrit à la page 196 du volume III	De la lumière rouge peut être vue verte	Observable en optique adaptative, si de la lumière rouge est focalisée sur un cône sensible au vert
Personne daltonienne, voir page 209 du volume III, avec spectre de couleurs réduit	Protanopie, deutéranopie, tritanopie	Chaque type limite la perception des couleurs d'une manière différente

Les couleurs fascinent. La fascination permet toujours les bonnes affaires. En effet, une grande partie de l'industrie chimique est dédiée à la synthèse de colorants pour les

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

peintures, les encres, les vêtements, la nourriture et les produits cosmétiques. L'évolution utilise également la fascination des couleurs pour ses propres affaires, à savoir perpétuer la vie. Les spécialistes dans ce domaine sont les plantes florales. La chimie de la production des couleurs par les plantes est extrêmement complexe et au moins aussi intéressante que la production des couleurs par les usines. Pratiquement tous les colorants que l'on trouve dans les fleurs, depuis le blanc, le jaune, l'orange, le rouge jusqu'au bleu, appartiennent à trois classes chimiques: les *caroténoïdes*, les *anthocyanes* (flavonoïdes) et les *bétalaïnes*. Ces colorants sont stockés dans les pétales, à l'intérieur de compartiments dédiés, les *vacuoles*. Il existe de nombreux articles de revue de synthèse excellents four-
Ref. 131 nissant les détails.

Même si les couleurs sont courantes chez les plantes et les animaux, la plupart des animaux supérieurs ne produisent pas beaucoup de colorants eux-mêmes. Par exemple, le corps humain ne produit qu'un seul colorant: la *mélanine*. (L'*hémoglobine*, qui colore le sang en rouge, n'est pas un colorant dédié, mais transporte l'oxygène depuis les poumons vers l'ensemble du corps. De même, la *myoglobine* rose dans les muscles n'est pas un colorant dédié.) De nombreux animaux supérieurs, comme les oiseaux, doivent *manger* les colorants qui sont pourtant si caractéristiques de leur apparence. La couleur jaune des pattes des pigeons en est un exemple. Il a été démontré que le lien entre la couleur et la nutrition est régulièrement utilisé par les couples potentiels pour juger à partir des couleurs corporelles si un partenaire qui se présente est suffisamment sain et donc
Ref. 132 suffisamment attrayant.

Par-dessus tout, le tableau présenté ci-dessus distingue six grandes classes parmi les origines des couleurs. L'étude de la première classe, les couleurs de l'incandescence, avait conduit Max Planck à découvrir le quantum d'action. Depuis cette découverte, des recherches ont confirmé que dans chaque classe, toutes les couleurs étaient dues au quantum d'action $\hbar$. La relation entre le quantum d'action et les propriétés matérielles des atomes, des molécules, des liquides et des solides est tellement bien comprise que les colorants peuvent désormais être conçu à l'aide d'ordinateurs.

En résumé, une exploration des origines des couleurs que l'on trouve dans la nature confirme que toutes les couleurs sont dues à des effets quantiques. Nous le montrons en explorant l'exemple le plus simple: les couleurs des excitations des gaz atomiques.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

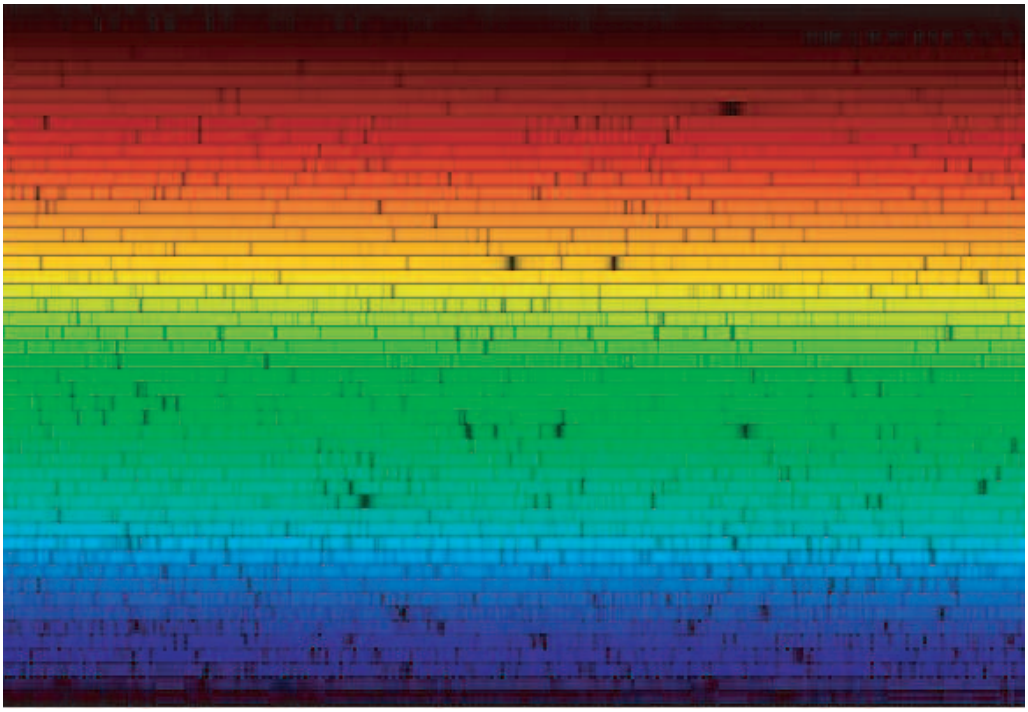


FIGURE 77 Le spectre de la lumière du jour: une image composée par empilement d'un arc-en-ciel étendu, montrant ses raies de Fraunhofer (© Nigel Sharp, NOAO, FTS, NSO, KPNO, AURA, NSF).

DÉTERMINER LA COMPOSITION DES ÉTOILES EN UTILISANT L'ARC-EN-CIEL

Vers le début du XVIIIe siècle, le fabriquant d'instruments bavarois Joseph Fraunhofer* et le physicien anglais William Wollaston avaient noté qu'il *manquait* certaines couleurs à l'arc-en-ciel. Ces couleurs apparaissent comme des raies noires lorsque l'arc-en-ciel est étalé sur une largeur suffisante. La Figure 77 montre les raies en détail. De nos jours on les appelle les *raies de Fraunhofer*. En 1860, Gustav Kirchhoff et Robert Bunsen ont montré que les couleurs *manquantes* dans l'arc-en-ciel étaient exactement celles que certains éléments *émettaient* lorsqu'on les chauffait. De cette façon, ils ont réussi à montrer que le sodium, le calcium, le baryum, le nickel, le magnésium, le zinc, le cuivre et le fer étaient présents dans le Soleil. Regarder l'arc-en-ciel nous permet de déterminer la composition

* Joseph Fraunhofer (Straubing, 1787 – Munich, 1826) étant devenu orphelin à l'âge de 11 ans, apprit le polissage des lentilles. Il étudia l'optique par lui-même à partir de livres. Il entra dans une entreprise d'optique à l'âge de 19 ans, assurant le succès de son activité en produisant les meilleurs lentilles, télescopes, micromètres, réseaux optiques et systèmes optiques disponibles en son temps. Il inventa le spectroscope et l'héliomètre. Il découvrit et compta 476 raies dans le spectre du Soleil; ces raies portent désormais son nom. (Aujourd'hui, les raies de Fraunhofer sont encore utilisées comme étalons de mesure: la seconde et le mètre sont définis à partir d'elles.) Des physiciens du monde entier venaient acheter les instruments qu'il fabriquait, lui rendaient visite et lui demandaient des exemplaires de ses publications. Même après sa mort, ses instruments sont restés inégalés pendant des générations. Avec les télescopes de Fraunhofer, Bessel réussit en 1837 à effectuer la première mesure de la parallaxe d'une étoile, et en 1846 Johann Gottfried Galle découvrit Neptune. Fraunhofer devint professeur en 1819. Il mourut jeune, des conséquences des années passées à travailler en présence de plomb et de poudre de verre.

Vol. II, page 312

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

du Soleil.

Parmi les 476 raies de Fraunhofer que Kirchhoff et Bunsen avaient observé, 13 ne correspondaient à aucun élément connu. En 1868, Jules Janssen et Joseph Lockyer prédirent indépendamment que ces raies inconnues devaient provenir d'un élément inconnu. Cet élément fut finalement trouvé sur Terre en 1895, dans un minerai uranifère que l'on appelle la clévéite. Le nouvel élément fut appelé *hélium*, du mot grec ἥλιος «helios» qui signifie Soleil.

En 1925, en utilisant une équation développée par Saha et Langmuir, la jeune physicienne Cecilia Payne (Wendover, Angleterre, 1900 – Cambridge, Massachusetts, 1979) montra au monde comment déduire le pourcentage de masse de chaque élément à partir du spectre lumineux d'une étoile. Elle le fit au cours de sa brillante thèse doctorale. Pardessus tout, elle montra que l'hydrogène et l'hélium étaient les deux éléments les plus abondants dans le Soleil, dans les étoiles, et donc dans tout l'Univers. Cela allait complètement à l'encontre des idées de l'époque, mais de nos jours, ce fait est de notoriété publique. Payne avait terminé ses études de physique à Cambridge, au Royaume-Uni, mais n'y avait pas obtenu de diplôme parce qu'elle était une femme. Elle partit donc pour les États-Unis, où la situation était quelque peu meilleure, et où elle prépara sa thèse doctorale. Finalement, elle devint professeur à l'Université Harvard, puis, plus tard, chef du département d'astronomie. Avant tout, Payne est devenue un modèle important pour de nombreuses femmes scientifiques.

Bien qu'il soit le deuxième élément le plus abondant dans l'univers, l'hélium est rare sur Terre car c'est un gaz noble léger qui ne forme pas de composés chimiques. Sur Terre, les atomes d'hélium montent dans l'atmosphère et finissent par s'échapper dans l'espace.

Comprendre les raies de couleur produites par chaque élément était déjà devenu intéressant bien avant la découverte de l'hélium. Mais par la suite, l'intérêt s'est accru grâce au nombre grandissant d'applications utilisant les connaissances sur les couleurs, en chimie, en physique, en technologie, en cristallographie, en biologie et dans le domaine des lasers. Les couleurs ont une grande importance sur le plan économique, comme le montrent l'industrie de la mode, les médias et le monde de la publicité.

Vol. III, page 125

En résumé, les couleurs sont des mélanges spécifiques de fréquences lumineuses. La lumière est une onde électromagnétique et est émise par des charges en mouvement. Pour le physicien, les couleurs résultent donc de l'interaction de la matière chargée avec le champ électromagnétique. Or, ces raies de couleur *nettes* ne peuvent pas être expliquées par l'électrodynamique classique. Nous avons besoin de la théorie quantique pour le faire.

Qu'est-ce qui détermine les couleurs des atomes?

Les couleurs les plus simples que l'on peut étudier sont les raies de couleurs bien nettes qui sont émises ou absorbées par des atomes individuels. On trouve de tels atomes individuels dans les gaz. L'atome le plus simple à étudier est celui de l'hydrogène. Comme le montre la Figure 78, un gaz d'hydrogène chaud émet de la lumière. La lumière consiste en une poignée de raies spectrales bien nettes que l'on peut voir sur la partie gauche de la Figure 79. Dès 1885, l'instituteur suisse Johann Balmer (1828 – 1898) avait découvert

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

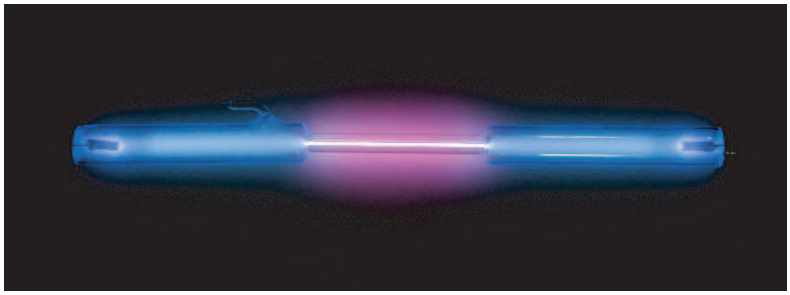


FIGURE 78 Décharge d'hydrogène à basse pression dans un tube de verre de 20 cm de long (© Jürgen Bauer sur www.smart-elements.com).

que les longueurs d'onde des raies visibles de l'hydrogène obéissaient à la formule:

$$\frac{1}{\lambda_m} = R\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{m^2}\right) \quad \text{pour} \quad m = 3, 4, 5, \ldots . \tag{91}$$

Des mesures minutieuses, comprenant celles des raies spectrales de l'hydrogène dans l'infrarouge et dans l'ultraviolet, ont permis à Johannes Rydberg (1854 – 1919) de généraliser cette formule en:

$$\frac{1}{\lambda_{mn}} = R\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right) , \tag{92}$$

où n et $m > n$ sont des entiers positifs et où la constante R, dite *constante de Rydberg*, a la valeur $10,97\,\mu m^{-1}$ (plus facile à mémoriser, la valeur inverse est $1/R = 91,16\,nm$). Toutes les raies de couleurs émises par l'hydrogène satisfont à cette formule simple. La physique classique ne peut pas du tout expliquer ce résultat. La théorie quantique a donc un défi clairement déterminé: expliquer la formule et la valeur de R.

Accessoirement, la transition λ_{21} de l'hydrogène s'appelle la *raie de Lyman-alpha*. Sa longueur d'onde, 121, 6 nm, se situe dans l'ultra-violet. Elle peut facilement s'observer à l'aide de télescopes, car la plupart des étoiles visibles sont constituées d'hydrogène excité. La raie de Lyman-alpha est couramment utilisée pour déterminer la vitesse des étoiles ou des galaxies lointaines, car l'*effet Doppler* modifie la longueur d'onde lorsque la vitesse est importante. Le record, datant de 2004, est une galaxie dont la raie de Lyman-alpha était décalée à 1337 nm. Pouvez-vous calculer la vitesse à laquelle elle s'éloigne de la Terre?

Ref. 133

Défi 143 e

Depuis le début, il était clair que les couleurs de l'hydrogène étaient dues au mouvement de ses électrons. (Pourquoi?) La première façon de déduire la formule de Balmer à partir du quantum d'action a été trouvée par Niels Bohr en 1903. Bohr avait compris que contrairement aux planètes qui tournent autour du Soleil, l'électron se déplaçant autour du proton n'avait qu'un nombre discret d'états de mouvements possibles: le moment cinétique de l'électron est quantifié. Si on suppose que le moment cinétique de l'électron est un multiple entier de $\hbar$ on obtient directement la formule de Balmer et il est possible d'expliquer la valeur numérique de la constante de Rydberg R. Ce calcul est tellement célèbre qu'il se trouve dans de nombreux manuels de l'enseignement secondaire. Le résultat avait également renforcé la décision de Bohr de consacrer sa vie à l'exploration de la structure de l'atome.

Défi 144 f

Page 91

Défi 145 f

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

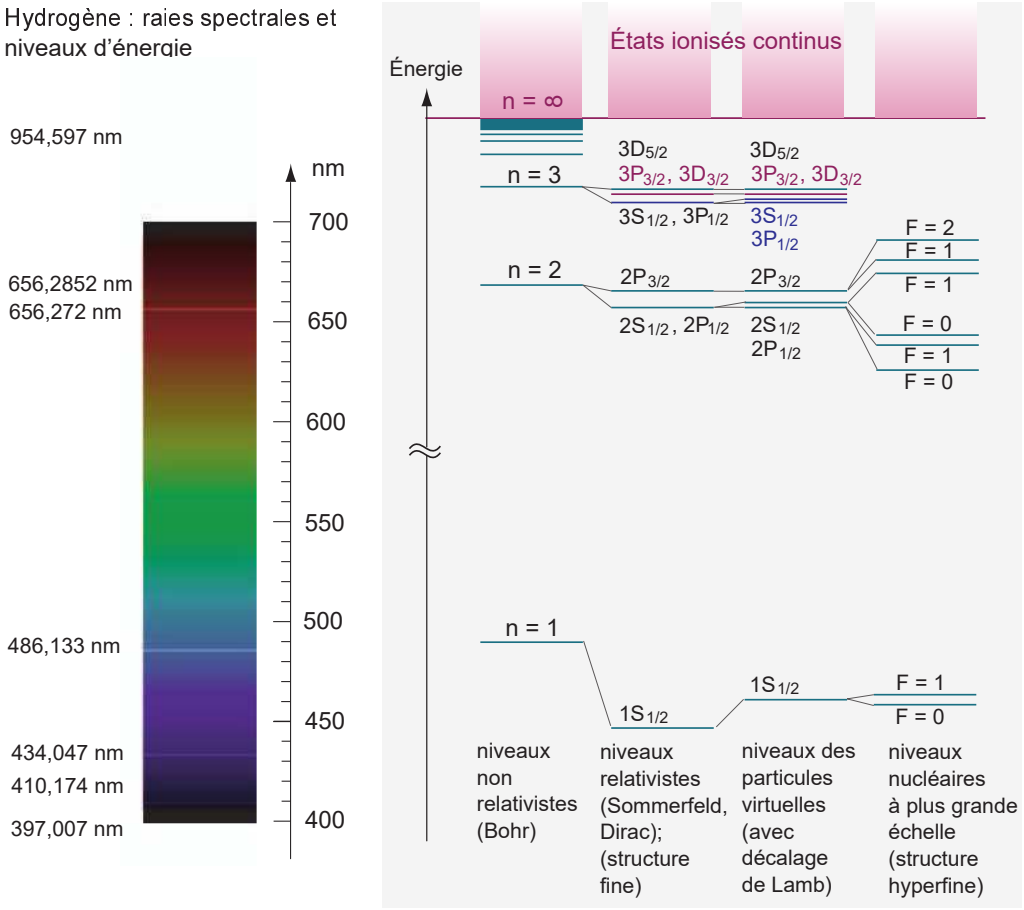


FIGURE 79 L'hydrogène atomique: le spectre visible de l'hydrogène (NASA) et ses niveaux d'énergie calculés en utilisant quatre approximations de plus en plus précises. Pouvez-vous associer les raies visibles avec les niveaux de transition auquel elles correspondent?

Vingt ans plus tard, en 1926, Erwin Schrödinger résolvait sont équation du mouvement pour un électron se déplaçant dans le potentiel électrostatique $V(r) = e^2/4\pi\varepsilon_0 r$ produit par un proton considéré comme ponctuel. Ce faisant, Schrödinger reproduisait les résultats de Bohr, déduisait la formule de Balmer et devint célèbre dans le monde de la physique. Cependant, ce calcul important est long et compliqué. On peut le simplifier.

Pour comprendre les couleurs de l'hydrogène, il n'est pas nécessaire de résoudre une équation du mouvement pour l'électron. Il suffit de comparer les énergies de l'état initial et de l'état final de l'électron. Ceci peut se faire le plus simplement possible en remarquant qu'une forme spécifique de l'action doit être un multiple de $\hbar/2$. Cette approche, qui est une généralisation de l'explication de Bohr, a été développée par Einstein, Brillouin et Keller, et s'appelle aujourd'hui la quantification EBK. Elle s'appuie sur le fait
Ref. 134 que l'action S de tout système quantique obéi à

$$S = \frac{1}{2\pi}\oint \mathrm{d}q_i p_i = \left(n_i + \frac{\mu_i}{4}\right)\hbar \qquad (93)$$

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

pour chaque coordonnée q_i et sa quantité de mouvement conjuguée p_i. L'expression reflète la similarité entre le moment cinétique et l'action. Ici, n_i peut être zéro ou n'importe quel entier positif, et μ_i est l'*indice de Maslov*, un entier pair qui, dans le cas des atomes, a la valeur 2 pour la coordonnée radiale r et la coordonnée azimutale θ, et la valeur 0 pour l'angle de rotation φ. L'intégrale est prise sur une orbite complète. Plus simplement, *l'action S est un multiple demi-entier du quantum d'action*. Ce résultat peut s'utiliser pour calculer les niveaux d'énergie des systèmes quantiques périodiques. Faisons ce calcul dans le cas de l'atome d'hydrogène.

Tout mouvement de rotation dans un potentiel sphérique $V(r)$ est caractérisé par une énergie constante E et des moments cinétiques constant L et L_z. Donc, les variables quan-
Défi 146 pe tité de mouvement conjuguées* des coordonnées r, θ et φ sont:

$$\begin{aligned} p_r &= \sqrt{2m(E - V(r)) - \frac{L^2}{r^2}} \\ p_\theta &= \sqrt{L^2 - \frac{L_z^2}{\sin^2\theta}} \\ p_\varphi &= L_z \,. \end{aligned} \tag{94}$$

En utilisant ces expressions dans l'équation (93) et en posant $n = n_r + n_\theta + n_\varphi + 1$, on obtient** le résultat

$$E_n = -\frac{1}{n^2}\frac{me^4}{2(4\pi\varepsilon_0)^2\hbar^2} = -\frac{Rhc}{n^2} = -\frac{c^2 m\alpha^2}{2n^2} \approx -\frac{2,19\,\mathrm{aJ}}{n^2} \approx -\frac{13,6\,\mathrm{eV}}{n^2} \,. \tag{97}$$

Ces *niveaux d'énergie* E_n (les niveaux de Bohr non relativistes) sont représentés sur la Figure 79. En utilisant l'idée qu'un atome d'hydrogène n'émet qu'un seul photon lorsque son électron passe d'un état E_n à un état E_m, nous obtenons exactement la formule
Défi 148 f qu'avaient déduite Balmer et Rydberg à partir des observations! La concordance entre l'observation et le calcul est d'environ quatre chiffres significatifs. Pour la première fois (ou presque), une propriété de la matière (la couleur de l'atome d'hydrogène) avait été expliquée à partir d'un principe fondamental de la nature. Le quantum d'action $\hbar$ était un élément clef pour cette explication. (Toute la discussion suppose que les électrons au

* Les variables quantité de mouvement conjuguées sont également appelées «moments conjugués» ou «impulsions conjuguées» [N.d.T.].

** Le calcul est assez simple. Après avoir inséré $V(r) = e/4\pi\varepsilon_0 r$ dans l'équation (94), il faut effectuer
Défi 147 pe l'intégration (un peu compliquée). En utilisant le résultat général

$$\frac{1}{2\pi}\oint \frac{\mathrm{d}z}{z}\sqrt{Az^2 + 2Bz - C} = -\sqrt{C} + \frac{B}{\sqrt{-A}} \tag{95}$$

on obtient:

$$\left(n_r + \frac{1}{2}\right)\hbar + L = n\hbar = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}\sqrt{\frac{m}{-2E}} \,. \tag{96}$$

Ceci nous conduit à la formule (97) pour l'énergie.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

sein des atomes d'hydrogène qui émettent la lumière sont dans des états propres. Pouvez-
Défi 149 e vous expliquer pourquoi c'est le cas?)

En bref, le quantum d'action implique que seules certaines valeurs spécifiques de l'énergies sont permises pour un électron dans un atome. Le niveau d'énergie le plus bas, pour $n = 1$, est appelé l'*état fondamental*. La valeur de l'énergie correspondante, 2, 19 aJ, est l'*énergie d'ionisation* de l'hydrogène. Si cette énergie est ajoutée à celle de l'état fondamental, l'électron n'est plus lié au noyau. L'énergie d'ionisation joue donc le même rôle pour les électrons autour des atomes que la *vitesse de libération* (ou plutôt l'*énergie* de libération) joue pour les satellites ou les fusées qui veulent s'extraire de l'attraction des planètes.

De la même façon que le quantum d'action détermine les couleurs de l'atome d'hydrogène, il détermine les couleurs de tous les autres atomes. Toutes les raies de
Page 205 Fraunhofer, qu'elles soient observées dans l'infrarouge, le visible ou l'ultraviolet, sont dues au quantum d'action. En fait, toutes les couleurs dans la nature sont dues à des mélanges de raies de couleur, de sorte que toutes les couleurs, même celles des solides et des liquides, sont déterminées par le quantum d'action.

La forme des atomes

Les atomes libres sont sphériques. Les atomes placés dans des champs externes se déforment. Mais quelle que soit la situation, la forme des atomes est due à la forme de leur fonction d'onde. Le cas le plus simple est celui de l'atome d'hydrogène. Ses fonctions d'onde (plus précisément les fonctions propres de quelques-uns de ses premiers niveaux d'énergie) sont illustrées sur la partie droite de la Figure 81. Ces fonctions avaient déjà été calculées par Erwin Schrödinger en 1926 et on les trouve dans tous les manuels. Dans ce texte, nous montrons simplement les résultats sans faire les calculs.

Le carré de la fonction d'onde est la densité de probabilité de l'électron. Cette densité diminue rapidement lorsque la distance au noyau augmente. Comme dans le cas d'un nuage réel, la densité ne s'annule jamais, même aux grandes distances. On pourrait donc prétendre que tous les atomes ont une taille infinie, mais en pratique, les liaisons chimiques ou l'arrangement des atomes dans les solides montrent qu'il est beaucoup plus approprié d'imaginer les atomes comme des nuages de taille finie.

Cela peut paraître surprenant, mais la première expérience ayant permis de mesurer la fonction d'onde d'un atome ne date que de 2013. Elle a été réalisée à l'aide d'une
Ref. 138 technique astucieuse de photoionisation par Aneta Stodolna et son équipe. Leur résultat expérimental superbe est illustré sur la Figure 80. Les figures confirment que les fonctions d'onde, contrairement aux densités de probabilité, ont des nœuds, c.-à-d. des lignes (ou plutôt des surfaces) le long desquelles leur valeur est nulle.

En résumé, toutes les expériences confirment que l'électron au sein de l'atome d'hydrogène forme des fonctions d'onde exactement de la manière prédite par la théorie quantique. En particulier, la forme des atomes est en accord avec le calcul de la mécanique quantique.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

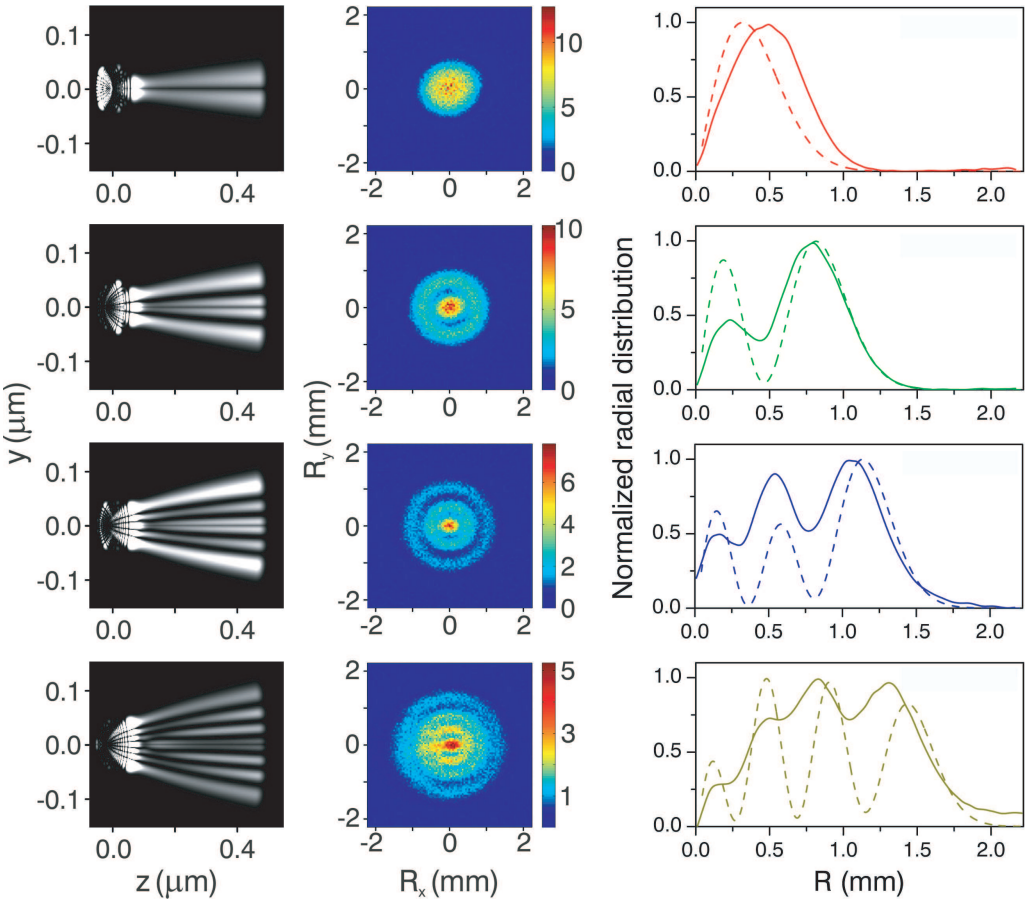


FIGURE 80 La figure montre la structure nodale calculée et mesurée de l'atome d'hydrogène placé dans un champ électrique externe faible, amplifié par une lentille électrostatique. Les motifs sont les ombres d'interférences bidimensionnelles des fonctions d'onde. Colonne de gauche: comment la fonction d'onde se projette depuis les atomes vers l'écran macroscopique; colonne centrale: la structure nodale mesurée; colonne de droite: comparaison entre les densités électroniques mesurées (trait plein) et calculées (pointillés) (© Aneta Stodolna/APS, reproduit de Ref. 138).

La taille des atomes

Le calcul des niveaux d'énergie de l'hydrogène permet également de déterminer le rayon effectif des orbites de l'électron. Il est donné par

$$r_n = n^2 \frac{\hbar^2 4\pi\varepsilon_0}{m_e e^2} = n^2 \frac{\hbar}{m_e c\alpha} = n^2 a_0 \approx n^2\, 52,918\,937\ \text{pm}\ , \text{ avec } n = 1, 2, 3, \ldots \qquad (98)$$

Nous voyons à nouveau que la théorie quantique, contrairement à la physique classique, n'autorise que certaines orbites spécifiques autour du noyau. (Pour plus de détails sur la constante de structure fine α, voir ci-dessous.) Pour être plus précis, ces rayons sont les tailles moyennes des nuages électroniques entourant le noyau. La plus petite valeur du rayon orbital, 53 pm pour $n = 1$, est appelée le *rayon de Bohr* et est notée a_0.

Page 213, page 222

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

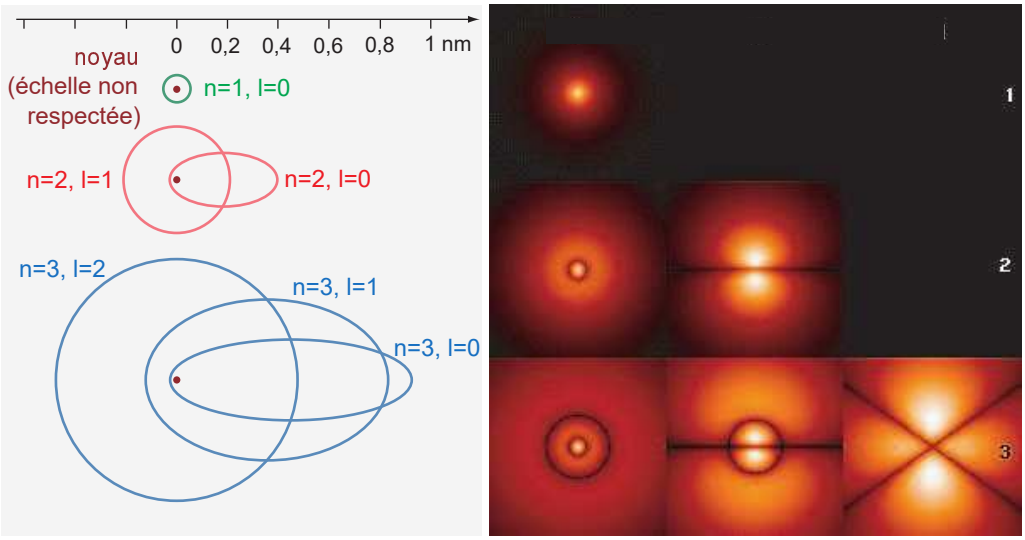


FIGURE 81 Les orbites électroniques imaginées (qui n'existent pas et sont donc fausses) du modèle de Bohr-Sommerfeld de l'atome d'hydrogène (à gauche) et la description correcte qui utilise la densité de probabilité de l'électron dans les différents états (à droite) (© Wikimedia)

Dans un gaz d'atomes d'hydrogène, la plupart des atomes sont dans l'état fondamental décrit par $r_1 = a_0$ et E_1. D'un autre côté, la théorie quantique implique qu'un atome d'hydrogène excité au niveau $n = 500$ a une taille d'environ 12 µm: plus gros que de nombreuses bactéries! De tels atomes démesurés, que l'on appelle généralement des *atomes de Rydberg*, ont en effet été observés en laboratoire, bien qu'ils soient extrêmement sensibles aux perturbations.

Ref. 135

En bref, le quantum d'action détermine *la taille des atomes*. Le résultat confirme donc la prédiction par Arthur Erich Haas de 1910. Autrement dit,

Page 23

▷ Le quantum d'action détermine la taille de toutes choses.

En 1915, Arnold Sommerfeld comprit que l'analogie du mouvement des électrons avec le mouvement gravitationnel orbital pouvait se prolonger de deux façons. Tout d'abord, les électrons peuvent se déplacer, en moyenne, sur des *ellipses* plutôt que sur des cercles. La quantification du moment cinétique implique alors que seules certaines excentricités sont possibles. Plus le moment cinétique est élevé, plus le nombre de possibilités est grand: les quelques premières sont représentées sur la Figure 81. L'excentricité la plus forte correspond à la valeur minimale $l = 0$ du nombre quantique dit azimutal, alors que les cas $l = n-1$ correspondent à des orbites circulaires. De plus, les ellipses peuvent avoir des orientations différentes dans l'espace.

Ref. 137

Le deuxième point relevé par Sommerfeld était que les vitesses de l'électron dans l'hydrogène étaient (quelque peu) relativistes: les valeurs de la vitesse ne sont pas négligeables par rapport à la vitesse de la lumière. En effet, la fréquence orbitale de l'électron

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

dans l'hydrogène est

$$f_n = \frac{1}{n^3}\frac{e^4 m_e}{4\varepsilon_0^2 h^3} = \frac{1}{n^3}\frac{m_e c^2 \alpha^2}{h} \approx \frac{6,7\,\mathrm{PHz}}{n^3} \tag{99}$$

et sa vitesse est

$$v_n = \frac{1}{n}\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 \hbar} = \frac{\alpha c}{n} \approx \frac{2,2\,\mathrm{Mm/s}}{n} \approx \frac{0,007\ c}{n}\,. \tag{100}$$

Comme on peut s'y attendre, plus l'orbite de l'électron est éloignée du noyau, plus il se déplace lentement. Ce résultat peut également être vérifié expérimentalement: en remplaçant l'électron par un muon, il est possible de mesurer la dilatation temporelle de sa durée de vie. Les mesures sont en excellent accord avec les calculs. Ref. 136

En bref, Sommerfeld avait remarqué que le calcul de Bohr ne prenait pas en compte les effets relativistes. Et en effet, des mesures de haute précision montrent de légères différences entre les niveaux d'énergie non relativistes de Bohr et ceux que l'on mesure. Le calcul doit être amélioré.

L'hydrogène relativiste

La mesure des niveaux d'énergie atomique est possible avec une précision beaucoup plus élevée que la mesure des fonctions d'onde. En particulier, les mesures de niveau d'énergie permettent d'observer des effets relativistes.

Dans le cas relativiste, l'action EBK doit également être un multiple de $\hbar/2$. À partir de l'expression relativiste de l'énergie cinétique de l'électron dans un atome d'hydrogène Ref. 134

$$E + c^2 m = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} - \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r} \tag{101}$$

nous obtenons l'expression Défi 150 f

$$p_r^2 = 2mE\left(1 + \frac{E}{2c^2 m}\right) + \frac{2me^2}{4\pi\varepsilon_0 r}\left(1 + \frac{E}{c^2 m}\right)\,. \tag{102}$$

Nous introduisons maintenant, par commodité, la *constante de structure fine*, définie par $\alpha = e^2/(4\pi\varepsilon_0\hbar c) = \sqrt{4\pi\hbar R/mc^3} \approx 1/137,036$ (α est une constante sans dimension; $R = 10,97\,\mu\mathrm{m}^{-1}$ est la constante de Rydberg). L'action radiale EBK implique alors que Défi 151 f

$$E_{nl} + c^2 m = \frac{c^2 m}{\sqrt{1 + \frac{\alpha^2}{\left(n - l - \frac{1}{2} + \sqrt{(l+\frac{1}{2})^2 - \alpha^2}\right)^2}}}\,. \tag{103}$$

Ce résultat, trouvé pour la première fois par Arnold Sommerfeld en 1915, est correct pour des électrons ponctuels, c.-à-d. qui ne tournent pas sur eux-mêmes. En réalité, l'électron a un spin 1/2; les niveaux d'énergie relativistes corrects apparaissent donc lorsque nous

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

fixons $l = j \pm 1/2$ dans la formule ci-dessus. Le résultat peut être approximé par

$$E_{nj} = -\frac{R}{n^2}\left(1 + \frac{\alpha^2}{n^2}\left(\frac{n}{j+\frac{1}{2}} - \frac{3}{4}\right) + \ldots\right) . \tag{104}$$

Il reproduit le spectre de l'hydrogène avec une précision extrêmement bonne. Lorsque l'on compare ce résultat avec celui non relativiste, on note que chaque niveau non relativiste n est séparé en n niveaux différents. Cette séparation est illustrée sur la Figure 79.
Page 208
Lors d'expériences précises, la séparation des raies du spectre de l'hydrogène est bien visible; c'est ce que l'on appelle la *structure fine*. L'amplitude de la structure fine dépend de α, une constante fondamentale de la nature. Puisque c'est dans ce contexte qu'Arnold Sommerfeld a découvert l'importance de cette constante fondamentale, le nom qu'il avait choisi, la *constante de structure fine*, a été repris à travers le monde. La constante
Page 222
de structure fine décrit la *force* de l'interaction électromagnétique. Elle est la constante de couplage électromagnétique.

Des expériences modernes de haute précision montrent des effets supplémentaires qui modifient les couleurs de l'hydrogène atomique. Ils sont également illustrés sur la
Page 208
Figure 79. Les effets des particules virtuelles et le couplage du spin du proton apportent des corrections supplémentaires. Mais ce n'est pas tout: des effets isotopiques, des décalages Doppler et des décalages de niveau dus aux champs électriques et magnétiques de l'environnement influencent également le spectre de l'hydrogène. L'effet final sur le
Vol. V, page 125
spectre de l'hydrogène, le fameux décalage de Lamb, sera traité plus tard.

LES ÉQUATIONS D'ONDE RELATIVISTES – À NOUVEAU

> "The equation was more intelligent than I was.*"
> Paul Dirac, à propos de son équation, répétant une déclaration faite par Heinrich Hertz.

Quelle est l'équation d'évolution de la fonction d'onde dans le cas où la relativité, le spin et les interactions avec le champ électromagnétique sont pris en compte? On pourrait essayer de généraliser la représentation du mouvement relativiste donnée par
Page 118
Foldy et Wouthuysen au cas des particules en interaction avec un champ électromagnétique. Malheureusement, ce n'est pas un problème simple. L'identité simple entre la description classique et celle de la mécanique quantique disparait lorsque l'on introduit l'électromagnétisme.

La meilleure façon de décrire les particules quantiques *chargées* est d'utiliser une autre représentation équivalente de l'hamiltonien, qui avait été découverte beaucoup plus tôt, en 1926, par le physicien britannique Paul Dirac.** Dirac avait trouvé une belle astuce

* «L'équation était plus intelligente que je ne l'étais.»

** Paul Adrien Maurice Dirac (Bristol, 1902 – Tallahassee, 1984), physicien bilingue, il étudia l'électrotechnique à Bristol, puis est allé à Cambridge, où il est finalement devenu professeur, occupant la chaire que Newton avait autrefois occupée. Entre les années 1925 et 1933, il publia un grand nombre d'articles, dont plusieurs méritaient le prix Nobel (prix qu'il reçut en 1933). Dirac unifia la relativité restreinte et la théorie quantique, prédit l'antimatière, travailla sur le spin et les statistiques, prédit les monopôles magnétiques, spécula sur la loi des grands nombres, et bien d'autres. Son introversion, sa gentillesse et sa timidité, ainsi que sa profonde connaissance de la nature, combinées à un dévouement à la beauté de

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net



FIGURE 82 Paul Dirac (1902 – 1984).

pour extraire la racine carrée apparaissant dans l'opérateur d'énergie relativiste. Dans la représentation de Dirac, l'opérateur hamiltonien est donné par

$$H_{\text{Dirac}} = \beta m + \boldsymbol{\alpha} \cdot p \,. \tag{105}$$

La grandeur β et les trois composantes $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = \boldsymbol{\alpha}$ se trouvent être des matrices complexes 4×4.

La représentation de Dirac comporte certaines particularités: l'opérateur de position x n'est pas la position de la particule, mais il a des termes supplémentaires; l'opérateur vitesse a seulement deux valeurs propres (plus ou moins la vitesse de la lumière); l'opérateur vitesse n'est pas simplement relié à l'opérateur de quantité de mouvement; l'équation du mouvement contient le fameux terme «Zitterbewegung»; le moment cinétique orbital et le spin ne sont pas des constantes du mouvement séparées.

Mais alors pourquoi utiliser cet hamiltonien horrible? Parce que seul l'hamiltonien de Dirac peut s'utiliser facilement dans le cas des particules chargées. En effet, il se transforme en hamiltonien couplé au champ électromagnétique à l'aide de ce que l'on nomme le *couplage minimal*, c.-à-d. par la substitution

Vol. III, page 85

$$\boldsymbol{p} \to \boldsymbol{p} - q\boldsymbol{A} \,, \tag{106}$$

qui traite l'impulsion électromagnétique comme la quantité de mouvement d'une particule. Avec cette prescription, l'hamiltonien de Dirac décrit le mouvement des particules chargées en interaction avec un champ électromagnétique $\boldsymbol{A}$. La substitution par le couplage minimale n'est pas possible avec l'hamiltonien de Foldy-Wouthuysen. Dans la représentation de Dirac, les particules sont des charges électriques pures, ponctuelles et sans structures, alors qu'avec la représentation de Foldy-Wouthuysen elles acquièrent un rayon de charge et une interaction de leur moment magnétique. (Nous en viendrons aux raisons plus loin, dans la section sur QED.)

Ref. 139

Pour plus de détails, la description la plus simple d'un électron (ou de toute autre particule élémentaire de spin 1/2, stable et chargée électriquement) est donnée par l'action

la physique théorique, ont fait de lui une légende dans le monde entier de son vivant. Pendant la seconde moitié de sa vie, il a essayé, sans succès, de trouver une alternative à l'électrodynamique quantique, dont il avait été le fondateur, car les problèmes liés à l'infini le repoussaient. Il est mort en Floride, où il avait vécu et travaillé après sa retraite de Cambridge.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

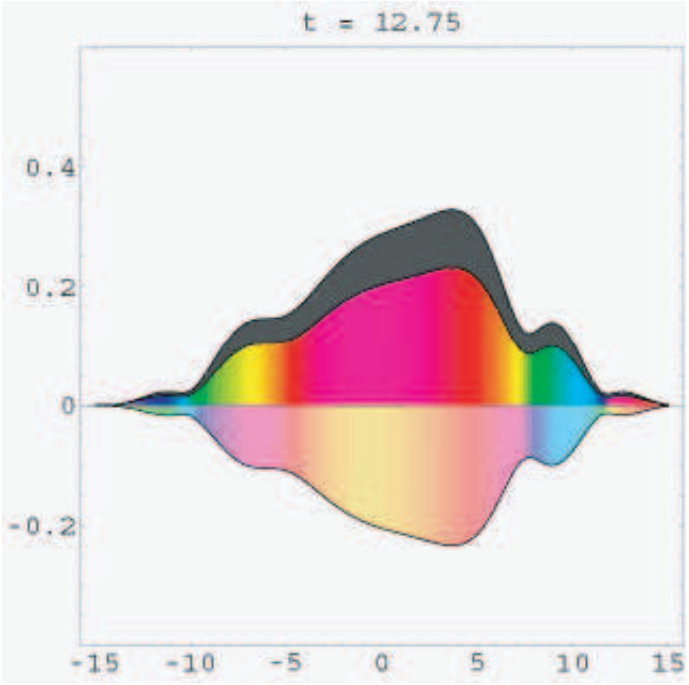


FIGURE 83 Le célèbre «Zitterbewegung» (que l'on peut traduire de l'allemand par «mouvement de tremblement» [N.d.T.]): la superposition d'états d'énergie positifs et négatifs conduit à une oscillation autour d'une vallée moyenne. La couleur indique la phase; deux courbes colorées sont représentées, car l'équation de Dirac pour une seule dimension n'a que deux composantes (et non pas quatre); la courbe grise est la densité de probabilité. (Film QuickTime © Bernd Thaller)

S et le lagrangien

$$S = \int \mathcal{L}_{\text{QED}} d^4x \quad \text{où} \tag{107}$$

$$\mathcal{L}_{\text{QED}} = \overline{\psi}\,(i\hbar c \not{D} - c^2 m)\,\psi - \frac{1}{4\mu_0} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \quad \text{et}$$

$$\not{D}_\mu = \gamma^\mu (\partial_\mu - ieA_\mu)$$

Le premier terme du lagrangien (le terme de matière) conduit à l'équation de Dirac: il décrit comment le mouvement des particules élémentaires chargées et de spin 1/2 est affecté par les champs électromagnétiques. Le deuxième terme (le terme de rayonnement) conduit aux équations de Maxwell et décrit comment le mouvement des champs électromagnétiques est affecté par la fonction d'onde des particules chargées. Avec quelques astuces de calcul, ces équations décrivent ce que l'on appelle généralement l'*électrodynamique quantique*, ou QED* en abrégé.

Pour autant que l'on sache aujourd'hui, la description relativiste du mouvement de la matière chargée et des champs électromagnétiques à partir du lagrangien QED (107) est *parfaite*: aucune différence entre la théorie et l'expérience n'a jamais été trouvée, malgré des recherches intensives et malgré une récompense élevée pour quiconque en trouverait une. Toutes les prédictions connues sont entièrement en accord avec les mesures faites. Dans les cas les plus spectaculaires, la théorie et les mesures s'accordent avec plus de

* L'acronyme QED provient du terme anglais «quantum electrodynamics» [N.d.T.].

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

treize chiffres significatifs. Mais au-delà de la précision de QED, certaines de ses caractéristiques qui manquent à l'électrodynamique classique sont encore plus intéressantes. Faisons-en une description rapide.

Une première familiarisation avec l'équation de Dirac

Le lagrangien QED implique que la fonction d'onde d'une particule chargée placée dans un potentiel suit l'équation de Dirac:

$$i\hbar\gamma^{\mu}(\partial_{\mu} - ieA_{\mu})\psi = mc\psi \,. \tag{108}$$

Les nombreux indices ne doivent pas nous faire oublier que cette équation établit simplement que la valeur propre de l'opérateur impulsion-énergie est la masse au repos (multipliée par la vitesse de la lumière c). Autrement dit, l'équation établit que l'onde ψ se déplace avec une vitesse de phase c.

La fonction d'onde ψ a quatre composantes complexes. Deux décrivent le mouvement de particules, et deux le mouvement d'antiparticules. Chaque type de particule a besoin de deux composantes complexes, parce que l'équation décrit le spin et la densité de particule. Le spin est une rotation et une rotation nécessite trois paramètres réels. Le spin et la densité nécessitent donc quatre paramètres réels en tout, qui peuvent être combinés en deux nombres complexes pour les particules, et deux pour les antiparticules.

Chacune des quatre composantes de la fonction d'onde d'une particule relativiste
Défi 152 f tournant sur elle-même suit l'équation relativiste de Schrödinger-Klein-Gordon. Cela signifie que la relation impulsion-énergie relativiste s'applique à chaque composante séparément.

La fonction d'onde relativiste ψ a une propriété importante: une rotation de 2π change
Défi 153 f son signe; seule une rotation de 4π laisse la fonction d'onde inchangée. Ceci correspond au comportement typique des particules de spin 1/2. Pour cette raison, la fonction d'onde à quatre composantes d'une particule de spin 1/2 s'appelle un *spineur*.

L'antimatière

Le terme «antimatière» est aujourd'hui familier. Il est intéressant de noter que le concept est apparu *avant* même que l'on ait pu en apporter des évidences expérimentales. L'expression relativiste de l'énergie E d'un électron de charge e placé dans un champ produit par une charge Q est

$$E + \frac{Qe}{4\pi\varepsilon_0 r} = \sqrt{m^2c^4 + p^2c^2} \,. \tag{109}$$

Celle expression autorise également des solutions avec une énergie *négative* et une charge opposée $-e$ lorsque l'on utilise la racine négative. La théorie quantique montre que ceci est une propriété générale, et ce sont ces solutions que l'on appelle l'*antimatière*.

En effet, l'antiparticule compagnon de l'électron a été prédite dans les années 1920 par Paul Dirac à partir de son équation (108), qui est basée sur la relation d'énergie relativiste (109). Sans même connaître cette prédiction, Carl Anderson découvrit l'antiparticule de l'électron en 1932, et lui donna le nom de «*positron*». (Le nom correct aurait dû être «po-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

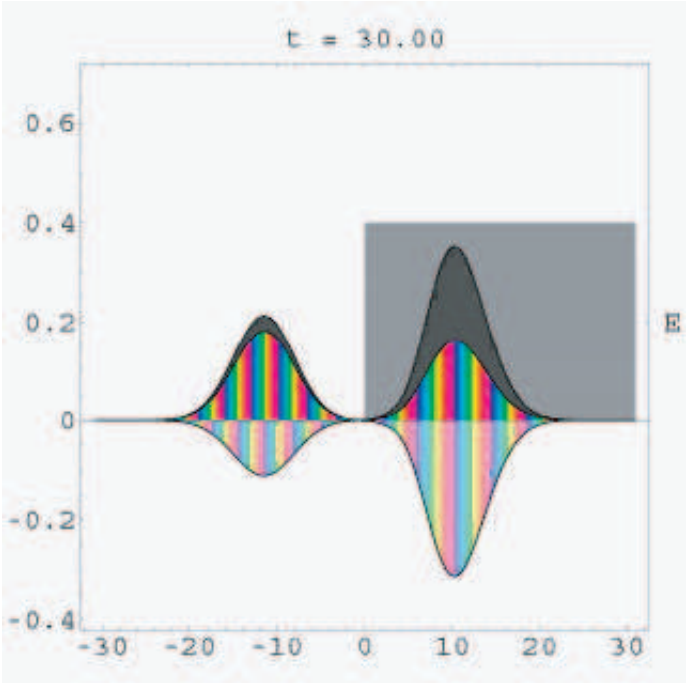


FIGURE 84 Le paradoxe de Klein: le mouvement d'une fonction d'onde relativiste lorsqu'elle rencontre un potentiel abrupt. Une partie de la fonction d'onde est transmise. Cette partie correspond à de l'antimatière, comme le montre la composante inférieure plus importante. (Film QuickTime © Bernd Thaller)

siton», sans le «r», qui est utilisé par la langue française.*) Anderson étudiait les rayons cosmiques, et il remarqua que certains «électrons» tournaient dans le mauvais sens dans le champ magnétique auquel il soumettait son appareil. Il vérifia minutieusement son installation et en déduisit finalement qu'il avait trouvé une particule de même masse que l'électron mais avec une charge électrique positive.

L'existence des positons a de nombreuses implications étranges. Dès 1928, avant même leur découverte, le théoricien suédois Oskar Klein avait fait remarquer que l'équation de Dirac faisait une prédiction étrange pour les électrons: lorsqu'un électron percutait une barrière de potentiel suffisamment abrupte, le coefficient de réflexion était plus grand que l'unité. Une telle barrière réfléchissait donc *plus* que ce qu'elle recevait. D'autre part, une grande partie de la fonction d'onde était transmise à travers la barrière. En 1935, après la découverte du positon, Werner Heisenberg et Hans Euler expliquèrent le
Ref. 140 paradoxe. Ils trouvèrent que l'équation de Dirac prédisait que chaque fois qu'un champ électrique excédait la valeur critique

$$E_c = \frac{m_e c^2}{e\lambda_e} = \frac{m_e^2 c^3}{e\hbar} = 1,3\,\mathrm{EV/m}\,, \tag{110}$$

le vide générait spontanément des paires électron-positon, qui étaient alors séparées par le champ. En conséquence le champ initial était réduit. Ce phénomène, que l'on appelle

* Bien que la forme incorrecte «positron» soit parfois également utilisée, de même que le terme «antiélectron» [N.d.T.].

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

la *polarisation du vide*, est la raison pour le coefficient de réflexion plus grand que l'unité qu'avait trouvé Klein. En effet, les potentiels abrupts correspondent à des champs électriques élevés.

La polarisation du vide montre que, contrairement à la vie quotidienne, le *nombre* de particules n'est pas constant dans le domaine microscopique. Il se trouve que c'est uniquement la *différence* entre le nombre de particules et le nombre d'antiparticules qui se conserve. La polarisation du vide limite donc notre capacité à compter les particules dans la nature!

La polarisation du vide est un effet faible. Il n'a été observé que lors des collisions entre particules de hautes énergies. Dans ces cas, l'effet augmente même la constante de structure fine! Vol. V, page 153 Plus loin, nous décrirons des exemples vraiment gigantesques de polarisation du vide qui sont postulés autour de trous noirs chargés.

Bien sûr, la génération de paires électron-positon n'est pas une *création* à partir de rien, mais une *transformation* d'énergie en matière. De tels processus font partie de toute description relativiste de la nature. Malheureusement, les physiciens ont l'habitude d'appeler cette transformation une «création de paire», ce qui ajoute une certaine confusion à la question. La transformation est décrite par la théorie quantique des champs, que nous explorerons dans le prochain volume.

Les particules virtuelles

Malgré ce que nous avons dit jusqu'à présent, les valeurs d'action plus petites que l'action minimale ont tout de même un rôle à jouer. Nous avons déjà rencontré un exemple: lors d'une collision entre deux électrons, il se produit un échange de photons virtuels. Page 71 Nous avons appris que les photons virtuels échangés ne pouvaient pas être observés. En effet, l'action S pour cet échange obéit à

$$S \leqslant \hbar \,. \tag{111}$$

En bref, les particules *virtuelles* n'apparaissent qu'en tant que médiateurs des interactions. On ne peut pas les observer. Au contraire des particules *réelles* ordinaires, les particules virtuelles n'obéissent pas à la relation $E^2 - p^2c^2 = m^2c^4$. Par exemple, leur énergie cinétique peut être négative. En effet, les particules virtuelles sont l'opposé des particules «libres» (ou réelles). Il est possible de les observer dans le vide si le temps de mesure est très court. Elles ont intrinsèquement des durées de vie très courtes.

Les photons virtuels sont à l'origine des potentiels électrostatiques, des champs magnétiques, de l'effet Casimir, de l'émission spontanée, des forces de van der Waals et du décalage de Lamb dans les atomes. Un traitement plus approfondit montre que dans chaque situation qui fait intervenir des photons virtuels il y a aussi, avec une probabilité encore plus faible, des électrons et des positons virtuels.

Les particules virtuelles massiques sont essentielles à la polarisation du vide, à la limite du nombre d'éléments dans la nature, au rayonnement d'évaporation des trous noirs et à l'effet Unruh. Les particules virtuelles massiques jouent également un rôle dans l'interaction forte, où ce sont elles qui maintiennent les nucléons ensemble dans le noyau, ainsi que dans l'interaction nucléaire faible, où elles expliquent pourquoi le rayonnement beta existe et pourquoi le Soleil brille.

En particulier, les paires particule-antiparticule virtuelles massiques et les particules

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

virtuelles de rayonnement forment ensemble ce que l'on appelle le *vide*. En plus de cela, les particules virtuelles de rayonnement forment ce que l'on appelle habituellement les champs statiques. Les particules virtuelles sont nécessaires pour une description complète de toutes les interactions. En particulier, les particules virtuelles sont responsables de tous les processus de désintégration.

Curiosités et défis amusants concernant la couleur et les atomes

Où trouve-t-on la mer la plus bleue? L'eau de mer, comme l'eau douce, est bleue parce qu'elle absorbe la lumière rouge et la lumière verte. L'absorption est due à une bande de vibration de la molécule d'eau qui est la conséquence d'une combinaison d'extensions moléculaires symétriques et asymétriques. L'absorption est faible, mais perceptible. À 700 nm (rouge), la profondeur d'eau qui produit une absorption de $1/e$ est de 1 m.

Ref. 141

L'eau de mer peut également être de couleur vive si le fond marin réfléchit la lumière. De plus, l'eau de mer peut être verte, si elle contient des petites particules qui diffusent ou absorbe la lumière bleue. Le plus souvent, ces particules sont de la terre ou du plancton. (Les satellites peuvent mesurer la concentration de plancton à partir de l'intensité du vert dans la couleur de la mer.) La mer est donc essentiellement bleue si elle est profonde, calme et froide; dans ce cas, le fond est loin de la surface, la terre ne se mélange pas à l'eau et la concentration de plancton est faible. La mer des Sargasses fait 5 km de profondeur, elle est calme et froide durant une grande partie de l'année. On dit souvent qu'elle est la *plus bleue* de toutes les eaux de la Terre.

Les lacs peuvent également être bleu s'ils contiennent des petites particules minérales. Les particules diffusent la lumière et donnent une couleur bleue pour une raison similaire à celle qui donne sa couleur bleue au ciel. On trouve de tels lacs bleus dans de nombreux endroits sur Terre.

* *

Concernant les mesures modernes de haute précision des spectres de l'hydrogène, vous pouvez écouter le maître incontesté dans le domaine: profitez de la conférence de 2012 de Theodor Hänsch, qui a consacré une grande partie de sa vie au sujet. Elle se trouve sur www.mediatheque.lindau-nobel.org.

* *

L'atome d'hydrogène présente de nombreux aspects fascinants. En 2015, Friedmann et Hagen ont montré qu'une formule bien connue pour $\pi = 3,14159265...$ pouvait être extraite du spectre des couleurs. La mécanique quantique et les couleurs sont en effet de bien beaux sujets.

Ref. 142

* *

Si les atomes contiennent des électrons qui circulent sur des orbites, la rotation de la Terre, via l'accélération de Coriolis, devrait avoir un effet sur leur mouvement, et donc sur la couleur des atomes. Cette belle prédiction est due à Mark Silverman, mais l'effet est cependant si faible qu'il n'a pas encore été mesuré.

Ref. 136

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

* *

La lumière est diffractée par des réseaux de matière. La matière peut-elle être diffractée par des réseaux de lumière? Aussi surprenant que cela puisse paraître, elle le peut, comme l'avaient prédit Dirac et Kapitza en 1937. Cela a été réalisé pour la première fois en 1986, en utilisant des atomes. Pour des électrons libres, l'exploit est plus difficile. La confirmation la plus claire est survenue en 2001, lorsqu'une nouvelle technologie de lasers a été utilisée pour produire des mesures superbes de maximums de diffraction typiques des électrons diffractés par un réseau de lumière.

Ref. 143

* *

La lumière est totalement réfléchie lorsqu'elle est dirigée vers un matériau dense sous un angle suffisamment grand pour qu'elle ne puisse pas pénétrer dans le matériau. Un groupe de physiciens russes a montré que si le matériau dense était excité, l'intensité du faisceau totalement réfléchi pouvait être *amplifiée*. On ne sait pas encore si cela conduira un jour à des applications.

Ref. 136

* *

La façon dont les gens manipulent des atomes *individuels* avec des champs électromagnétiques fournit un grand nombre de jolis exemples de technologies modernes appliquées. De nos jours, il est possible de faire léviter, de piéger, d'exciter, de photographier, de désexciter et de déplacer des atomes individuels simplement en les éclairant. En 1997, le prix Nobel de physique a été décerné aux initiateurs de ce domaine: Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji et William Philips.

Vol. I, page 344
Ref. 144

* *

En utilisant deux miroirs et quelques photons, il est possible de capturer un atome et de le faire flotter entre les deux miroirs. Cet exploit, l'une des nombreuses façons qui permettent d'isoler des atomes individuels, est désormais une pratique courante en laboratoires. Pouvez-vous imaginer comment le faire?

Ref. 145
Défi 154 e

* *

Un exemple de recherche moderne est l'étude des atomes *creux*, c.-à-d. des atomes auxquels il manque un certain nombre d'électrons internes. Ils ont été découverts en 1990 par J.P. Briand et son équipe. Ils apparaissent lorsqu'un atome complètement ionisé, c.-à-d. sans électrons, est mis en contact avec un métal. Les électrons acquis orbitent alors sur les couches externes, laissant les couches internes vides, en contraste frappant avec les atomes habituels. De tels atomes creux peuvent également être produits par un rayonnement laser intense.

Ref. 146

* *

Les effets quantiques relativistes peuvent être observés à l'œil nu. Les deux plus importants concernent l'or et le mercure. La couleur jaune de l'or (dont le numéro atomique est 79) est due à l'énergie de la transition entre les électrons 5d et 6s, qui absorbe la lumière bleue. Sans effets relativistes, cette transition se situerait dans l'ultraviolet, similaire à la transition entre les électrons 4d et 5s de l'argent, et l'or serait incolore. La couleur jaune de l'or est donc un effet relativiste.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Le mercure (dont le numéro atomique est 80) a sa couche 6s remplie. En raison des mêmes effets relativistes qui apparaissent dans le cas de l'or, ces couches sont contractées et n'aiment pas former des liaisons. Pour cette raison, le mercure est encore liquide à température ambiante, contrairement à tous les autres métaux. La relativité est donc la raison pour laquelle le mercure est liquide, et que les thermomètres fonctionnent.

* *

Défi 155 e Le phosphore est-il phosphorescent?

* *

Il est possible de détecter le passage d'un seul photon à travers un appareil sans
Défi 156 pe l'absorber. Comment feriez-vous cela?

Les propriétés des matériaux

Comme pour la taille de l'atome d'hydrogène, la taille de tous les autres atomes est également fixée par le quantum d'action. En effet, le quantum d'action détermine dans une large mesure les interactions entre les électrons. Ce faisant, le quantum de changement détermine toutes les interactions entre les atomes dans la matière quotidienne. Il détermine donc toutes les autres propriétés des matériaux. L'élasticité, la plasticité, la fragilité, les propriétés magnétiques et électriques des matériaux sont également fixées par le quantum d'action. C'est $\hbar$ à lui seul qui rend l'électronique possible! Nous étudierons quelques exemples de propriétés des matériaux dans le prochain volume. Divers détails de la relation générale entre $\hbar$ et les propriétés des matériaux sont encore un sujet de recherche, bien qu'aucun ne soit en contradiction avec le quantum d'action. La recherche dans le domaine des matériaux est l'une des plus importantes de la science moderne, et la plupart des améliorations de notre niveau de vie en résultent. Nous explorerons quelques-uns de ces aspects dans le prochain volume.

En résumé, la science des matériaux a confirmé que la physique quantique était également la description correcte de tous les matériaux. La physique quantique a confirmé que toutes les propriétés des matériaux de la vie quotidienne avaient une origine électromagnétique. La physique quantique a également confirmé que toutes les propriétés des matériaux de la vie quotidienne étaient dues à des interactions impliquant des électrons.

Un défi de taille: la force de l'électromagnétisme

Le grand physicien Wolfgang Pauli répétait souvent qu'après sa mort, la première chose qu'il demanderait à Dieu serait d'expliquer la constante de structure fine de Sommerfeld. (D'autres avaient l'habitude de commenter qu'après que Dieu le lui aura expliqué, il réfléchirait un peu, puis s'exclamerait: «Faux!»)

La *constante de structure fine*, introduite par Arnold Sommerfeld, est la constante de
Ref. 147 la nature sans dimension dont la valeur est mesurée comme étant égale à

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c} \approx \frac{1}{137,035\,999\,679(94)} \approx 0,007\,297\,352\,5376(50)\,. \qquad (112)$$

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Ce nombre est apparu pour la première fois lors de l'explication de la structure fine du spectre des couleurs émises par les atomes, d'où son nom étrange. Sommerfeld avait été
Ref. 148 le premier à comprendre son importance générale. Elle est fondamentale en électrodynamique quantique pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, la constante de structure fine décrit la *force* de l'électromagnétisme. Le nombre α résulte de l'interaction entre deux charges électriques e. Si on écrit la loi de Coulomb pour la force F entre deux électrons sous la forme

$$F = \alpha \frac{\hbar c}{r^2} \,, \tag{113}$$

il apparaît clairement que la constante de structure fine décrit la force de l'électromagnétisme. Une valeur plus élevée de la constante de structure fine α signifierait une attraction ou une répulsion plus forte entre les objets chargés. C'est donc la valeur de α qui détermine la taille des atomes (et donc de toutes choses), de même que toutes les couleurs dans la nature.

Deuxièmement, c'est seulement parce que la constante de structure fine α est très petite que l'on peut parler de particules. En effet, ce n'est que parce que la constante de structure fine est bien plus petite que 1 qu'il est possible de distinguer les particules les unes des autres. Si la valeur de α était proche de 1, ou plus grande, les particules interagiraient si fortement qu'il ne serait pas possible de les observer séparément, ni même de parler de particules.

Ceci nous amène à la troisième raison de l'importance de la constante de structure fine. Puisqu'il s'agit d'un nombre sans dimension, elle implique un mécanisme encore inconnu qui fixe sa valeur. Découvrir ce mécanisme est l'un des défis qu'il nous reste à relever avant de terminer notre aventure. Tant que le mécanisme reste inconnu (comme c'est toujours le cas en 2016), nous ne pouvons comprendre la couleur et la taille d'aucune des choses qui nous entourent!

Des petites variations de la force d'attraction électromagnétique entre les électrons et les protons auraient de nombreuses conséquences importantes. Pouvez-vous décrire ce qui se passerait pour la taille des gens, pour la couleur des objets, pour la couleur du Soleil, ou pour le fonctionnement des ordinateurs si la force devait doubler? Et que se passerait-il si elle devait graduellement diminuer jusqu'à la moitié de sa valeur habi-
Défi 157 e tuelle?

Depuis les années 1920, expliquer la valeur de α a été considéré comme l'un des défis les plus difficiles auxquels la physique moderne ait été confrontée. C'est la raison pour les idées fantasques de Pauli. En 1946, lors de son discours de prix Nobel, il avait répété l'affirmation selon laquelle une théorie qui ne déterminait pas ce nombre ne pouvait pas
Ref. 149 être complète. Depuis cette époque, les physiciens semblent se diviser en deux classes: ceux qui n'ont pas osé relever le défi, et ceux qui n'en ont aucune idée. Cette histoire fascinante n'est toujours pas terminée.

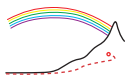
Le problème de la constante de structure fine est si profond que beaucoup s'égarent en chemin. Par exemple, il est parfois prétendu qu'il est impossible de changer les unités physiques de telle sorte que $\hbar$, c et e seraient toutes égales à 1 en même temps, car cela changerait la valeur de $\alpha = 1/137,036...(1)$. Pouvez-vous expliquer pourquoi cet
Défi 158 e argument est faux?

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

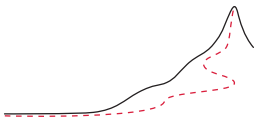
Un résumé sur les couleurs et les matériaux

En résumé, le quantum d'action $\hbar$ (lorsqu'on l'associe à l'interaction entre les champs électromagnétiques et les électrons au sein des atomes, des molécules, des liquides et des solides) détermine la taille, la forme, la couleur et les propriétés matérielles de toutes les choses qui nous entourent. Le quantum d'action détermine les propriétés mécaniques telles que la dureté ou l'élasticité, les propriétés magnétiques, les propriétés thermiques telles que la capacité thermique ou la chaleur latente de condensation, les propriétés optiques telle que la transparence, et les propriétés électriques telle que la brillance des métaux. De plus, le quantum d'action détermine tous les aspects chimiques et biologiques de la matière. Ces aspects font l'objet de notre prochain volume.

La force de l'interaction électromagnétique est décrite par la constante de structure fine $\alpha \approx 1/137,036$. Sa valeur est toujours inexpliquée.



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net



Chapitre 9

Pour résumer la physique quantique

Si on la compare à la physique classique, la théorie quantique est nettement plus compliquée. Pourtant, l'idée fondamentale est simple: dans la nature, il y a un changement minimal (une action minimale) de valeur $\hbar = 1,1 \cdot 10^{-34}$ Js. Plus précisément, toute la théorie quantique peut se résumer en une seule phrase:

▷ Dans la nature, des actions (des changements) plus petites que $\hbar = 1,054\,571\,800(13) \cdot 10^{-34}$ Js ne sont jamais observées.

Cette valeur d'action minimale, le *quantum d'action*, conduit à toutes les observations étranges que l'on fait dans le domaine microscopique. Ce sont par exemple, le comportement ondulatoire de la matière, les relations d'indétermination, la décohérence, le caractère aléatoire des mesures, l'indistinguabilité, la quantification du moment cinétique, l'effet tunnel, la création de paires, la désintégration et les réactions entre particules.

Le point essentiel de la théorie quantique est donc l'absence de changement infiniment petit. Les mathématiques de la théorie quantique sont cependant abstraites et compliquées. Cette partie de notre promenade en valait-elle la peine? Elle la valait: les résultats sont profonds et l'exactitude de la description est *complète*. Dans ce chapitre, nous commençons par un aperçu de ces résultats, puis nous nous penchons sur les questions qui ne sont pas encore résolues.

Les résultats physiques de la théorie quantique

L'existence d'une valeur d'action minimale dans la nature conduit directement à la leçon principale que nous avons apprise sur le mouvement au cours de la partie quantique de notre aventure:

▷ Tout ce qui est en mouvement est constitué de quantons (de particules quantiques).

Cette affirmation s'applique à tous les systèmes physiques, et donc à tous les objets et à toutes les images, c.-à-d. à toute matière et à tout rayonnement. Les choses qui se déplacent sont constituées de *quantons*. Les pierres, les ondes à la surface de l'eau, la lumière, les ondes sonores, les tremblements de terre, la gélatine et toutes les autres choses avec lesquelles nous pouvons interagir, sont constitués de particules quantiques.

Au cours de notre exploration de la relativité, nous avons découvert que les horizons

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

et le vide pouvaient également se déplacer. Mais si toutes les entités qui se déplacent sont constituées de particules quantiques, quelles sont les implications pour les horizons et l'espace vide? Nous pouvons prétendre que l'on ne s'attend à aucun problème fondamental avec les horizons, parce qu'une façon de les décrire est de les considérer comme étant dans un état extrême de la matière. Mais les détails de l'aspect quantique du vide ne sont pas simples. Ils feront l'objet de la dernière partie de notre aventure.

Un peu plus tôt dans notre aventure nous nous sommes posé la question: que sont la matière, le rayonnement et les interactions? Maintenant nous le savons: ils sont des composites de particules quantiques élémentaires. En particulier, les interactions sont des échanges de particules quantiques élémentaires.

Vol. II, page 293
Vol. II, page 322

Une *particule quantique élémentaire* est une entité que l'on peut compter et qui est plus petite que sa propre longueur d'onde de Compton. Toutes les particules élémentaires sont décrites par leur impulsion-énergie, leur masse, leur spin et leurs parités C, P et T. Pourtant, comme nous le verrons dans le prochain volume, ceci n'est toujours pas la liste complète des propriétés des particules. En ce qui concerne les propriétés *intrinsèques* des particules quantiques, c.-à-d. celles qui ne dépendent pas de l'observateur, la théorie quantique affirme simplement que

> ▷ Dans la nature, toutes les propriétés intrinsèques des particules quantiques (à l'exception de la masse), telles que le spin, la charge électrique, la charge de couleur*, les parités, etc., apparaissent comme des multiples entiers d'une unité de base. Et étant donné que tous les systèmes physiques sont constitués de particules quantiques, toutes les propriétés intrinsèques des systèmes composites (à l'exception de la masse**) soit s'additionnent soit se multiplient.

Page 143

En résumé, toutes les entités qui se déplacent sont constituées de particules quantiques décrites par des propriétés intrinsèques *discrètes*. Pour comprendre à quel point ce résultat est profond, vous pouvez l'appliquer à toutes les entités qui se déplacent et pour lesquelles il est habituellement oublié, tel qu'aux fantômes, aux esprits, aux anges, aux nymphes, aux démons, aux diables, aux dieux, aux déesses et aux âmes. Vous pouvez vérifier par vous-même ce qui se passe lorsque leur nature particulaire est prise en compte.

Défi 159 f

> « Deorum injuriae diis curae.*** »
> Tibère, tel que rapporté par Tacite.

Résultats concernant le mouvement des particules quantiques

Les quantons (les particules quantiques) diffèrent des particules de la vie quotidienne car elles *interférent* et elles se comportent comme un mélange de particules et d'ondes. Cette propriété découle directement de l'existence de $\hbar$, la plus petite action possible dans la

* La charge de couleur est une propriété liée à l'interaction forte [N.d.T.].
** Plus précisément, en plus de la masse, les angles de mélange ne sont pas non plus quantifiés. Ces propriétés seront définies dans le prochain volume.
*** «C'est aux Dieux seuls de se soucier des offenses faites aux Dieux.» (Traduction donnée par Voltaire dans son Traité sur la tolérance [N.d.T.].)

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

nature. À partir de l'existence de $\hbar$, la théorie quantique déduit tous ses énoncés relatifs au mouvement des particules quantiques. Nous résumons ici les principaux.

Il n'y a *pas de repos* dans la nature. Tous les objets obéissent à la relation d'indétermination qui établit que les indéterminations sur la position x et sur la quantité de mouvement p vérifient

$$\Delta x \Delta p \geqslant \hbar/2 \quad \text{avec} \quad \hbar = 1,1 \cdot 10^{-34}\,\text{Js}\,, \tag{114}$$

ce qui rend impossible le repos. L'état des particules quantiques est défini par les mêmes observables qu'en physique classique, à la différence près que les observables ne commutent pas. La physique classique apparait dans la limite où la constante de Planck $\hbar$ peut effectivement être réduite à zéro.

La théorie quantique introduit un *élément probabiliste* dans le mouvement. Les probabilités résultent du quantum d'action au travers des interactions avec les thermostats qui font partie de l'environnement de tout système physique. De manière équivalente, les probabilités apparaissent lors de toute expérience qui tente de produire un changement plus petit que le quantum d'action.

Les particules quantiques *se comportent comme des ondes*. La longueur d'onde de de Broglie λ qui leur est associée est donnée par la quantité de mouvement p suivant la relation

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{2\pi\hbar}{p} \tag{115}$$

qui est valide aussi bien dans le cas de la matière que dans celui du rayonnement. Cette relation est à l'origine du comportement ondulatoire de la lumière et de la matière. Les particules de lumière s'appellent des photons. Leur observation est désormais une pratique courante. La théorie quantique stipule que les ondes de particules, comme toutes les ondes, interfèrent, se réfractent, se dispersent, s'amortissent, peuvent être amorties et peuvent être polarisées. Ceci s'applique aux photons, aux électrons, aux atomes et aux molécules. Toutes les ondes étant constituées de particules quantiques, elles peuvent toutes être vues, touchées et déplacées. La lumière, par exemple, peut être «vue» par diffusion photon-photon dans le vide à haute énergie, elle peut être «touchée» en utilisant l'effet Compton et elle peut être «déplacée» par courbure gravitationnelle. Les particules de matière, telles que les molécules ou les atomes, peuvent être vues à l'aide de microscopes électroniques et peuvent être touchées et déplacées à l'aide de microscopes à force atomique. L'interférence et la diffraction des ondes de particules sont observées quotidiennement au microscope électronique.

On peut s'imaginer les ondes de matière comme des nuages qui *tournent localement* sur eux même. Dans la limite où la taille du nuage est négligeable, les particules quantiques peuvent être imaginées comme des petites flèches tournantes. De manière équivalente, les quantons ont une *phase*.

Des particules *ne peuvent pas être enfermées* pour toujours. Même si la matière est impénétrable, la théorie quantique montre qu'il n'existe pas de boîtes hermétiques ou d'obstacles insurmontables. L'enfermement n'est jamais éternel. Attendre assez longtemps nous permet toujours de surmonter n'importe quelle barrière, car il existe une probabilité non nulle de surmonter n'importe quel obstacle. Ce processus est appelé

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

l'*effet tunnel* lorsqu'il est vu du point de vue spatial, et *désintégration* lorsqu'il est vu du point de vue temporel. L'effet tunnel explique le fonctionnement des tubes de télévision ainsi que la décroissance radioactive.

Il est *possible de faire tourner* toutes les particules et tous les faisceaux de particules. Les particules possèdent un moment cinétique intrinsèque appelé le *spin*, qui spécifie leur comportement lors des rotations. Les bosons sont de spin entier, alors que les fermions sont de spin demi-entier. Un nombre pair de fermions liés ou un nombre quelconque de bosons liés produit un boson composite. Un nombre impair de fermions liés produit un fermion de faible énergie. Les solides sont impénétrables en raison du caractère fermionique des électrons au sein des atomes.

Les particules identiques sont *indistinguables*. Le rayonnement est constitué de particules indistinguables que l'on appelle des bosons alors que la matière est constituée de fermions. Lors d'un échange de deux fermions situés en deux points ayant une séparation de genre espace, la fonction d'onde change de signe, alors que pour deux bosons la fonction d'onde reste inchangée. Toutes les autres propriétés des particules quantiques sont les mêmes que pour les particules classiques, à savoir: la possibilité de les compter, les interactions, la masse, la charge, le moment cinétique, l'énergie, la quantité de mouvement, la position, ainsi que l'impénétrabilité dans le cas de la matière et la pénétrabilité dans le cas du rayonnement. Les duplicateurs parfaits n'existent pas.

Lors des collisions, les particules *interagissent localement* par échange d'autres particules. Lorsque des particules de matière entrent en collision, elles interagissent par l'échange de bosons virtuels.* Le changement du mouvement est donc dû à un échange de particules. Les bosons d'échange de spin pair ne contrôlent que les interactions attractives. Les bosons d'échange de spin impair contrôlent aussi les interactions répulsives.

Les propriétés des collisions impliquent la non-conservation du nombre de particules. Au cours des collisions, des particules peuvent apparaître (c'est-à-dire qu'elles peuvent être «créées») ou disparaître (c'est-à-dire qu'elles peuvent être «annihilées»). Ceci est valable à la fois pour les bosons et pour les fermions.

Les propriétés des collisions impliquent l'existence d'*antiparticules*, que l'on observe régulièrement au cours des expériences. Les fermions élémentaires, contrairement à de nombreux bosons élémentaires, diffèrent de leurs antiparticules: ils ne peuvent être créés et annihilés que par paires. Les fermions élémentaires ont une masse non nulle et se déplacent plus lentement que la lumière.

Les particules peuvent se *désintégrer* et se *transformer*. Des investigations détaillées montrent que les collisions impliquent la non-conservation du type de particules. Au cours des collisions, certaines particules peuvent modifier leurs propriétés intrinsèques. Cette observation sera détaillée dans le prochain volume. De plus, le quantum d'action implique que les choses se *cassent* et que les êtres vivants *meurent*.

Les images, constituées de rayonnement, sont décrites par les mêmes observables que la matière: position, phase, vitesse, masse, quantité de mouvement, etc. (bien que leurs valeurs et leurs relations diffèrent). Les images ne peuvent être localisées qu'avec une précision équivalente à la longueur d'onde λ du rayonnement qui les produit.

L'apparition de la constante de Planck $\hbar$ implique que des *échelles de longueur* et

* Les particules virtuelles sont parfois qualifiées de «off shell» ou encore de «off the mass shell» dans la littérature anglaise [N.d.T.].

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

des *échelles de temps* existent dans la nature. La théorie quantique introduit des sautillements fondamentaux dans chaque exemple de mouvement. Ainsi, l'infiniment petit est éliminé. De cette façon, il apparaît des limites inférieures aux dimensions structurelles et à de nombreuses autres quantités mesurables. En particulier, la théorie quantique montre qu'il est impossible que de petites créatures puissent vivre sur les électrons d'un atome de la même manière que les êtres humains vivent sur la Terre tournant autour du Soleil. La théorie quantique montre que Lilliput ne peut pas exister.

Les horloges et les règles à mesurer ont une *précision finie*, du fait de l'existence d'une action minimale ainsi que de leurs interactions avec des thermostats. D'autre part, tous les appareils de mesure doivent contenir des thermostats, car sinon ils ne seraient pas en mesure d'enregistrer des résultats.

Ref. 150 Les effets quantiques ne laissent aucune place à la fusion froide, à l'astrologie, à la téléportation, à la télékinésie, aux phénomènes surnaturels, à la création à partir de rien, aux univers multiples ou aux phénomènes plus rapides que la lumière (malgré le paradoxe Page 173 EPR).

Réalisations en termes d'exactitude et de précision

Outre les changements conceptuels, la théorie quantique a amélioré la précision des prédictions. En mécanique classique, on obtient couramment une précision de quelques chiffres significatifs (lorsqu'il y en a). La mécanique quantique, en revanche, apporte une précision comparable au nombre total de chiffres significatifs (parfois jusqu'à treize) qu'il est actuellement possible de mesurer. La limite de la précision n'est généralement *pas* due à l'inexactitude de la théorie, mais à la précision des mesures. En d'autres termes, l'accord entre la théorie et l'expérience n'est limité que par la somme d'argent que l'expérimentateur est prêt à dépenser. Le Tableau 8 montre cela plus en détail.

TABLEAU 8 Quelques comparaisons choisies entre la physique classique, la théorie quantique et l'expérience.

Observable	Prédiction classique	Prédiction de la théorie quantique[a]	Mesure	Estimation du coût
Mouvement simple des corps				
Indétermination	0	$\Delta x \Delta p \geqslant \hbar/2$	$(1 \pm 10^{-2})\,\hbar/2$	10 k€
Longueur d'onde de la matière	aucune	$\lambda p = 2\pi\hbar$	$(1 \pm 10^{-2})\,\hbar$	10 k€
Longueur d'onde de Compton	aucune	$\lambda_c = h/m_e c$	$(1 \pm 10^{-3})\,\lambda$	20 k€
Taux de création de paire	0	σE	en accord	100 k€
Temps de décroissance radioactive de l'hydrogène	aucune	$\tau \sim 1/n^3$	(1 ± 10^{-2})	5 k€
Moment cinétique minimum	0	$\hbar/2$	$(1 \pm 10^{-6})\,\hbar/2$	10 k€

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

OBSERVABLE	PRÉDICTION CLASSIQUE	PRÉDICTION DE LA THÉORIE QUANTIQUE[a]	MESURE	ESTIMATION DU COÛT
Effet/pression Casimir	0	$p = (\pi^2\hbar c)/(240r^4)$	(1 ± 10^{-3})	30 k€
Couleurs des objets				
Spectre des objets chauds	diverge	$\lambda_{max} = hc/(4,956\,kT)$	$(1 \pm 10^{-4})\ \Delta\lambda$	10 k€
décalage de Lamb	aucune	$\Delta\lambda = 1057,86(1)$ MHz	$(1 \pm 10^{-6})\ \Delta\lambda$	50 k€
Constante de Rydberg	aucune	$R_\infty = m_e c\alpha^2/2h$	$(1 \pm 10^{-9})\ R_\infty$	50 k€
Constante de Stefan-Boltzmann	aucune	$\sigma = \pi^2 k^4/60\hbar^3 c^2$	$(1 \pm 3 \cdot 10^{-8})\,\sigma$	20 k€
Constante de la loi du déplacement de Wien	aucune	$b = \lambda_{max} T$	$(1 \pm 10^{-5})\ b$	20 k€
Indice de réfraction de l'eau	aucune	1,34	à quelques % près	1 k€
Diffusion photon-photon	0	selon QED: non nulle	en accord	50 M€
Rapport gyromagnétique de l'électron	1 ou 2	2,002 319 304 365(7)	2,002 319 304 361 53(53)	30 M€
Moment magnétique anormal du muon	0	$11\,659\,1827(63) \cdot 10^{-11}$	$11\,659\,2080(60) \cdot 10^{-11}$	100 M€
Propriétés de la matière composite				
Durée de vie des atomes	≈ 1 µs	∞	$> 10^{20}$ a	1 €
Séparation hyperfine du muonium	aucune	4 463 302 542(620) Hz	4 463 302 765(53) Hz	1 M€
Taille et forme des molécules	aucune	selon QED	à 10^{-3} près	20 k€

a. Toutes ces prédictions sont calculées à partir des constantes physiques fondamentales données en annexe A.

Page 243

Nous remarquons que les valeurs prédites *ne diffèrent pas* de celles mesurées. Si on se souvient que la physique classique ne permet de calculer aucune des valeurs mesurées, on se fait une idée des progrès réalisés par la physique quantique. Cette avancée dans la compréhension est due à l'introduction du quantum d'action $\hbar$. De manière équivalente, nous pouvons affirmer qu'aucune description de la nature n'est complète sans le quantum d'action.

En résumé, la théorie quantique est précise et exacte. Dans le domaine microscopique, la théorie quantique est en concordance *parfaite* avec la nature. Malgré des perspectives de gloire et de richesse, et malgré le plus grand nombre de chercheurs que l'on ait jamais eu, aucune contradiction entre l'observation et la théorie n'a été trouvée à ce jour. Mais d'un autre côté, expliquer la valeur que l'on mesure pour la constante de structure fine, $\alpha = 1/137,035\,999\,074(44)$, est toujours d'actualité en ce qui concerne l'interaction électromagnétique.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

La théorie quantique est-elle magique?

Étudier la nature, c'est un peu comme faire l'expérience de la magie. La nature a souvent une apparence différente de ce qu'elle est. Lors d'une séance de magie nous sommes trompés (mais seulement si nous oublions nos propres limites). Lorsque nous commençons à nous considérer comme faisant partie du jeu, nous commençons à comprendre les astuces. C'est tout le plaisir de la magie. Il en va de même pour le mouvement quantique.

* *

La nature semble irréversible, bien qu'elle ne le soit pas. Nous ne nous souvenons jamais du futur. Nous sommes trompés parce que nous somme macroscopiques.

* *

La nature semble privilégier la décohérence bien que ce ne soit pas le cas. Encore une fois, nous sommes trompés parce que nous somme macroscopiques.

* *

Il n'y a pas d'horloges dans la nature. Nous sommes trompés par celles de la vie quotidienne parce que nous sommes entourés par un nombre gigantesque de particules.

* *

Le mouvement semble souvent disparaître, alors qu'il est éternel. Nous sommes encore trompés, car nos sens ne peuvent pas expérimenter le domaine microscopique.

* *

Il semble que les objets soient distinguables, bien que les propriétés statistiques de leurs composants montrent qu'il n'en est rien. Nous sommes trompés parce que nous vivons à des énergies faibles.

* *

La matière semble continue, bien qu'elle ne le soit pas. Nous sommes trompés à cause des limites de nos sens.

* *

Le mouvement semble déterministe au sens classique du terme, alors qu'il est aléatoire. Nous sommes à nouveau trompés parce que nous sommes macroscopiques.

* *

En bref, notre condition humaine nous trompe en permanence. La réponse à la question de l'entête de cette section est que la physique classique est comme la magie et que les astuces sont révélées par la théorie quantique. C'est là son principal attrait.

La théorie quantique est exacte, mais elle peut faire mieux

Nous pouvons résumer cette partie de notre aventure avec une déclaration toute simple:

▷ La physique quantique est la description de la matière et du rayonnement

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

sans le concept de l'infiniment petit.

Tout changement dans la nature (en fait, toute chose) est décrit par des quantités *qui ne sont pas infiniment petites* et par-dessus tout, par le plus petit changement possible dans la nature, le quantum d'action $\hbar = 1,054\,571\,800(13) \cdot 10^{-34}$ Js.

Toutes les expériences, sans exception, montrent que le quantum d'action $\hbar$ est le plus petit changement observable. La description de la nature avec le quantum d'action est donc *exacte* et *définitive*. L'action mesurable minimale $\hbar$, tout comme la vitesse maximale de l'énergie c, est une propriété fondamentale de la nature. On pourrait tout aussi bien les appeler toutes les deux des *vérités fondamentales*.

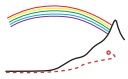
Puisque la théorie quantique découle logiquement et entièrement de l'action mesurable minimale $\hbar$, le moyen le plus simple (qui est en fait le seul) pour réfuter la théorie quantique est de trouver une observation qui contredise la valeur du changement minimale $\hbar$. Essayez!

Défi 160 f

Bien que nous ayons déduit une propriété fondamentale de la nature, lorsque nous retournons au tout début de notre exploration de la théorie quantique, nous ne pouvons cacher une certaine déception: nous savons que la physique classique ne peut pas expliquer la vie. En recherchant les détails du mouvement microscopique, nous avons rencontré de si nombreux aspects intéressants que nous n'avons *pas encore* réussi à expliquer la vie. Par exemple, nous savons ce qui détermine la vitesse des électrons dans les atomes, mais nous ne savons pas ce qui détermine la vitesse de course d'un athlète. En fait, nous n'avons même pas discuté des propriétés d'un solide ou d'un liquide, et encore moins de celles de structures plus complexes telles que les êtres vivants.

Page 16

Autrement dit, après cette introduction sur la théorie quantique, il nous reste encore à relier les processus quantiques à notre monde quotidien. C'est pourquoi le prochain volume portera sur l'exploration du mouvement des êtres vivants, mais aussi des mouvements qui règnent à l'intérieur des êtres vivants, ainsi qu'à l'intérieur de toutes les formes de matières, depuis les solides jusqu'aux étoiles, en utilisant le quantum d'action comme fondement. Après cela, nous explorerons le mouvement de l'espace vide.



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Annexe A

Les unités, les mesures et les constantes

Mesurer consiste à comparer avec un étalon de référence. Les étalons sont basés sur des unités. De nombreux systèmes d'unités différents ont été utilisées à travers le monde. La plupart de ces étalons confèrent du pouvoir à l'organisme qui en a la charge. Un tel pouvoir peut être utilisé abusivement: c'est le cas aujourd'hui, par exemple dans l'industrie informatique, et il en était de même par le passé. La solution est identique dans les deux cas: mettre en place un étalon indépendant et général. Concernant les unités de mesure, c'est ce qui s'est passé au XVIIIe siècle lorsqu'un groupe de scientifiques, d'hommes politiques et d'économistes se sont mis d'accord sur un ensemble d'unités. Leur but était d'éviter les abus de la part d'institutions autoritaires, d'éliminer les problèmes relatifs à des étalons différents, changeants et non reproductibles, et (ce n'est pas une blague) de simplifier et de rendre plus équitable le recouvrement des impôts. Cet ensemble d'unités s'appelle le *Système international d'unités*, abrégé en *SI*, et il est défini par un traité international, la «Convention du Mètre». Les unités sont régies par une organisation internationale, la «Conférence générale des poids et mesures» (CGPM), ainsi que par ses organisations filles, la «Commission internationale des poids et mesures» et le «Bureau international des poids et mesures» (BIPM). Toutes ont vu le jour peu de temps avant la Révolution française.

Ref. 151

Les unités du SI

Toutes les unités du SI sont construites à partir de sept *unités de base*. Leurs définitions simplifiées sont données ci-dessous, avec les dates de leur formulation et quelques commentaires:

- «La *seconde*, symbole s, est l'unité de durée du SI. Elle est définie comme étant la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133.» (1967) La définition de 2019 est équivalente, mais beaucoup moins claire.*
- «Le *mètre*, symbole m, est l'unité de longueur du SI. Il est défini comme étant la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299 792 458 de seconde.» (1983) La définition de 2019 est équivalente, mais beaucoup moins claire.*
- «Le *kilogramme*, symbole kg, est l'unité de masse du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique de la constante de Planck, h, fixée à $6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$ lorsqu'elle est exprimée en $\mathrm{J \cdot s}$, unité égale à $\mathrm{kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}}$.» (2019)*
- «L'*ampère*, symbole A, est l'unité de courant électrique du SI. Il est défini en fixant la valeur numérique de la charge élémentaire, e, égale à $1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$ lorsqu'elle est

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

exprimée en C, unité égale à A · s.» (2019)* Cette définition est équivalente à: un ampère correspond à $6,241\,509\,074... \cdot 10^{18}$ charges élémentaires par seconde.

- «Le *kelvin*, symbole K, est l'unité de température thermodynamique du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la constante de Boltzmann, k, égale à $1,380\,649 \cdot 10^{-23}$ lorsqu'elle est exprimée en $J \cdot K^{-1}$, unité égale à $kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$.» (2019)*
- «La *mole*, symbole mol, est l'unité de quantité de matière du SI. Une mole contient exactement $6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$ entités élémentaires.» (2019)*
- «La *candela*, symbole cd, est l'unité d'intensité lumineuse du SI. Elle est définie comme étant l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence $540 \cdot 10^{12}$ hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est 1/683 watt par stéradian.» (1979). La définition de 2019 est équivalente, mais beaucoup moins claire.*

On notera que les unités de temps et de longueur sont toutes les deux définies à partir de certaines propriétés d'un exemple de mouvement standard, à savoir celui de la lumière. Autrement dit, la Conférence générale des poids et mesures insiste aussi sur le fait que l'observation du mouvement est une *condition préalable* à la définition et à la construction du temps et de l'espace. *Le mouvement est le fondement de toute observation et de toute mesure*. Par ailleurs, l'utilisation de la lumière pour les définitions avait déjà été proposée en 1827 par Jaques Babinet.**

À partir de ces unités de base, toutes les autres unités se définissent par des multiplications et des divisions. Par conséquent, toutes les unités du SI possèdent les propriétés suivantes:

- Les unités du SI forment un système ayant une *précision à la pointe de la technologie*: toutes les unités sont définies avec une précision qui est meilleure que la précision des mesures couramment pratiquées. De plus, la précision des définitions est régulièrement améliorée. L'incertitude relative actuelle pour la définition de la seconde est autour de 10^{-14}, elle est environ de 10^{-10} pour le mètre, environ de 10^{-9} pour le kilogramme, de 10^{-7} pour l'ampère, de moins de 10^{-6} pour la mole, de 10^{-6} pour le kelvin et de 10^{-3} pour la candela.
- Les unités du SI forment un système *absolu*: toutes les unités sont définies de façon à pouvoir être reproduites dans n'importe quel laboratoire convenablement équipé, de manière indépendante, et avec une grande précision. Cela permet d'éviter autant que possible tout abus de la part de l'organisation qui établit les étalons. En fait, les unités du SI sont aujourd'hui aussi proches que possible des unités naturelles de Planck, qui sont présentées plus loin. En pratique, le SI est aujourd'hui un standard international définissant les valeurs numériques des sept constantes $\Delta\nu_{Cs}$, c, $\hbar$, e, k, N_A et K_{cd}. Après plus de 200 ans de discussions, la CGPM n'a plus grand-chose à faire.

* Les symboles des sept unités sont s, m, kg, A, K, mol et cd. Les définitions officielles complètes se trouvent sur www.bipm.org. Pour plus de détails concernant les niveaux de l'atome de césium, vous pouvez consulter un livre de physique atomique. L'échelle de température Celsius θ est définie par $\theta/°C = T/K - 273,15$. Notez la petite différence avec le nombre figurant dans la définition du kelvin. Dans la définition de la candela, la fréquence de la lumière correspond à 555, 5 nm, c.-à-d. à la couleur verte, proche de la longueur d'onde à laquelle l'œil est le plus sensible.

Ref. 152

** Jaques Babinet (1794 – 1874), physicien français qui publia d'importants travaux en optique.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

▪ Les unités du SI forment un système *pratique*: les unités de base sont des quantités dont les grandeurs nous sont familières. Les unités couramment utilisées ont des noms et des abréviations standard. La liste complète comprend les sept unités de base que l'on vient de décrire, les unités supplémentaires, les unités dérivées et les unités admises.

Le SI a deux unités *supplémentaires*: l'unité d'angle (dans le plan) est le *radian* (rad), défini comme étant le rapport de la longueur de l'arc au rayon; l'unité d'angle solide est le *stéradian* (sr), défini comme étant le rapport de la surface sous-tendue au carré du rayon.

Les unités *dérivées* ayant un nom particulier sont, dans leur désignation officielle française, c.-à-d. sans lettres majuscules:

Nom	Abréviation	Nom	Abréviation
hertz	$Hz = 1/s$	newton	$N = kg\,m/s^2$
pascal	$Pa = N/m^2 = kg/m\,s^2$	joule	$J = Nm = kg\,m^2/s^2$
watt	$W = kg\,m^2/s^3$	coulomb	$C = As$
volt	$V = kg\,m^2/As^3$	farad	$F = As/V = A^2s^4/kg\,m^2$
ohm	$\Omega = V/A = kg\,m^2/A^2s^3$	siemens	$S = 1/\Omega$
weber	$Wb = Vs = kg\,m^2/As^2$	tesla	$T = Wb/m^2 = kg/As^2 = kg/Cs$
henry	$H = Vs/A = kg\,m^2/A^2s^2$	degré Celsius	°C (voir la définition du kelvin)
lumen	$lm = cd\,sr$	lux	$lx = lm/m^2 = cd\,sr/m^2$
becquerel	$Bq = 1/s$	gray	$Gy = J/kg = m^2/s^2$
sievert	$Sv = J/kg = m^2/s^2$	katal	$kat = mol/s$

On notera que dans toutes les définitions des unités, le kilogramme n'apparaît qu'à la puissance 1, 0 ou −1. Pouvez-vous essayer d'en formuler la raison? Défi 161 e

Les unités *admises*, ne faisant pas partie du SI, sont: la *minute*, l'*heure* et le *jour* (pour les durées), le *degré* $1° = \pi/180$ rad, la *minute* $1' = \pi/10\,800$ rad, la *seconde* $1'' = \pi/648\,000$ rad (pour les angles), le *litre* et la *tonne*. Il faut éviter toutes les autres unités.

Toutes les unités du SI sont rendues plus pratiques par l'introduction de noms et d'abréviations standard pour les puissances de dix, que l'on nomme *préfixes*:*

* Certains de ces noms ont été inventés (yocto pour que sa sonorité ressemble au latin *octo* «huit»; zepto pour que sa sonorité ressemble au latin *septem*; yotta et zetta pour que leur sonorité ressemble à celle des deux précédents; exa et peta pour que leur sonorité ressemble aux mots grecs ἑξάκις et πεντάκις pour «six fois» et «cinq fois»; les noms qui ne sont pas officiels pour que leur sonorité ressemble aux mots grecs signifiant neuf, dix, onze et douze). Certains proviennent du danois/norvégien (atto de *atten* «dix-huit»; femto de *femten* «quinze»). Certains proviennent du latin (de *mille*; de *centum* «cent»; de *decem* «dix»; de *nanus* «nain»). Certains dérivent de l'italien (de *piccolo* «petit»). Certains sont grecs (micro vient de μικρός «petit»; deca/deka de δέκα «dix»; hecto de ἑκατόν «cent»; kilo de χίλιοι «mille»; mega de μέγας «gros»; giga de γίγας «géant»; tera de τέρας «monstre»). Interprétez: j'étais pris dans un tel embouteillage qu'il m'a fallu un microsiècle pour avancer d'un picoparsec et que la consommation de carburant de ma voiture a été de deux dixièmes d'un millimètre carré. Défi 162 f

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Puissance	Nom		Puissance	Nom		Puissance	Nom		Puissance	Nom	
10^{1}	deca	da	10^{-1}	deci	d	10^{18}	Exa	E	10^{-18}	atto	a
10^{2}	hecto	h	10^{-2}	centi	c	10^{21}	Zetta	Z	10^{-21}	zepto	z
10^{3}	kilo	k	10^{-3}	milli	m	10^{24}	Yotta	Y	10^{-24}	yocto	y
10^{6}	Mega	M	10^{-6}	micro	μ	non officiel:			Ref. 153		
10^{9}	Giga	G	10^{-9}	nano	n	10^{27}	Xenta	X	10^{-27}	xenno	x
10^{12}	Tera	T	10^{-12}	pico	p	10^{30}	Wekta	W	10^{-30}	weko	w
10^{15}	Peta	P	10^{-15}	femto	f	10^{33}	Vendekta	V	10^{-33}	vendeko	v
						10^{36}	Udekta	U	10^{-36}	udeko	u

- Les unités du SI forment un système *complet*: elles couvrent de façon systématique l'ensemble complet des observables de la physique. Qui plus est, elles établissent également les unités de mesure de toutes les autres sciences.
- Les unités du SI forment un système *universel*: elles peuvent être utilisées dans le monde des affaires, de l'industrie, du commerce, à la maison, pour l'éducation et pour la recherche. Elles pourraient même être utilisées par des civilisations extraterrestres s'il en existait.
- Les unités du SI forment un système *auto-cohérent*: le produit ou le quotient de deux unités du SI est lui-même une unité du SI. Cela signifie qu'en principe, la même abréviation, «SI» par exemple, pourrait être utilisée pour chaque unité.

Les unités du SI ne forment pas l'unique ensemble possible qui puisse satisfaire toutes ces exigences, mais elles forment le seul système existant qui le fasse.*

La signification de la mesure

Toute mesure est une comparaison avec un étalon de référence. Donc, toute mesure nécessite de la *matière* pour réaliser l'étalon (même pour un étalon de vitesse) et du *rayonnement* pour accomplir la comparaison. Le concept de mesure suppose donc que la matière et le rayonnement existent et qu'ils puissent être distinctement dissociés l'un de l'autre.

Défi 163 f

Chaque mesure est une comparaison. Mesurer implique donc que l'espace et le temps existent, et qu'ils diffèrent l'un de l'autre.

Chaque mesure produit un résultat. Donc, chaque mesure implique un *stockage* du résultat. Le processus au moyen duquel on fait la mesure implique donc que la situation

* En plus des unités internationales, il existe aussi des unités *régionales*. La plupart des unités régionales qui sont encore en usage sont d'origine romaine. Le mile vient de *milia passum*, qui valait à l'époque mille (doubles) enjambées de 1480 mm chacune. Le mille nautique, qui valait jadis une minute d'arc de la surface de la Terre, est aujourd'hui défini comme étant exactement 1852 m. Le pouce («inch» en anglais [N.d.T.]) vient de *uncia*/*onzia* (un douzième, aujourd'hui d'un pied). La livre (dont la traduction anglaise «pound» vient de *pondere* «peser») est utilisée comme la traduction de *libra* (balance) qui est à l'origine de son abréviation lb. Même l'habitude de compter en douzaines au lieu de dizaines est d'origine romaine. Ces unités, ainsi que bien d'autres toutes aussi cocasses (tel que le système dans lequel toutes les unités commencent par un «f» et qui utilise le furlong par quinzaine de jours comme unité de vitesse), sont maintenant définies de façon officielle comme des multiples des unités du SI.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

avant la mesure et la situation après la mesure peuvent être distinguées. Autrement dit, chaque mesure est un processus *irréversible*.

Chaque mesure est un processus. Donc, chaque mesure nécessite une certaine quantité de temps et une certaine quantité d'espace.

Toutes ces propriétés de la mesure sont simples mais importantes. Méfiez-vous de quiconque qui les ignorerait.

Les unités naturelles de Planck

Puisque la forme exacte de nombreuses équations dépend du système d'unités utilisé, les physiciens théoriciens utilisent souvent des systèmes d'unités optimisés pour produire des équations simples. Les unités choisies et les valeurs des constantes de la nature sont liées. En physique microscopique, on utilise fréquemment le système des *unités naturelles de Planck*. Elles sont définies en posant $c = 1$, $\hbar = 1$, $G = 1$, $k = 1$, $\varepsilon_0 = 1/4\pi$ et $\mu_0 = 4\pi$. Les unités de Planck sont ainsi définies à partir de combinaisons des constantes fondamentales. Celles qui correspondent aux unités fondamentales du SI sont données dans le Tableau 10.* Le tableau permet également de convertir les équations écrites avec les unités naturelles en leur unité équivalent du SI: il suffit de remplacer X par X/X_{Pl} pour chaque grandeur.

Défi 164 f

TABLEAU 10 Les unités naturelles (non corrigées) de Planck.

Nom	Définition	Valeur
Les unités de base		
la longueur de Planck	$l_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar G/c^3}$	$= 1,616\,0(12) \cdot 10^{-35}$ m
le temps de Planck	$t_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar G/c^5}$	$= 5,390\,6(40) \cdot 10^{-44}$ s
la masse de Planck	$m_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar c/G}$	$= 21,767(16)$ µg
le courant électrique de Planck	$I_{\text{Pl}} = \sqrt{4\pi\varepsilon_0 c^6/G}$	$= 3,479\,3(22) \cdot 10^{25}$ A
la température de Planck	$T_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar c^5/Gk^2}$	$= 1,417\,1(91) \cdot 10^{32}$ K
Les unités triviales		
la vitesse de Planck	$v_{\text{Pl}} = c$	$= 0,3$ Gm/s
le moment cinétique de Planck	$L_{\text{Pl}} = \hbar$	$= 1,1 \cdot 10^{-34}$ Js
l'action de Planck	$S_{\text{aPl}} = \hbar$	$= 1,1 \cdot 10^{-34}$ Js
l'entropie de Planck	$S_{\text{ePl}} = k$	$= 13,8$ yJ/K
Les unités composées		
la masse volumique de Planck	$\rho_{\text{Pl}} = c^5/G^2\hbar$	$= 5,2 \cdot 10^{96}$ kg/m^3

* Les unités naturelles x_{Pl} qui sont données ici sont celles qui sont couramment utilisées aujourd'hui, c.-à-d. celles qui sont définies en utilisant la constante $\hbar$, et non, comme Planck le fit initialement, en utilisant la constante $h = 2\pi\hbar$. Les unités de l'électromagnétisme peuvent également se définir à l'aide d'autres facteurs que $4\pi\varepsilon_0$ dans les expressions: par exemple, en utilisant $4\pi\varepsilon_0\alpha$ (avec la *constante de structure fine* α) on obtient $q_{\text{Pl}} = e$. Pour les explications à propos des nombres entre parenthèses, voir plus loin dans le texte.

Page 222

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 10 Les unités naturelles (non corrigées) de Planck (continuation).

NOM	DÉFINITION	VALEUR
l'énergie de Planck	$E_{\mathrm{Pl}} = \sqrt{\hbar c^5/G}$	$= 2,0\,\mathrm{GJ} = 1,2 \cdot 10^{28}\,\mathrm{eV}$
la quantité de mouvement de Planck	$p_{\mathrm{Pl}} = \sqrt{\hbar c^3/G}$	$= 6,5\,\mathrm{Ns}$
la puissance de Planck	$P_{\mathrm{Pl}} = c^5/G$	$= 3,6 \cdot 10^{52}\,\mathrm{W}$
la force de Planck	$F_{\mathrm{Pl}} = c^4/G$	$= 1,2 \cdot 10^{44}\,\mathrm{N}$
la pression de Planck	$p_{\mathrm{Pl}} = c^7/G\hbar$	$= 4,6 \cdot 10^{113}\,\mathrm{Pa}$
l'accélération de Planck	$a_{\mathrm{Pl}} = \sqrt{c^7/\hbar G}$	$= 5,6 \cdot 10^{51}\,\mathrm{m/s^2}$
la fréquence de Planck	$f_{\mathrm{Pl}} = \sqrt{c^5/\hbar G}$	$= 1,9 \cdot 10^{43}\,\mathrm{Hz}$
la charge électrique de Planck	$q_{\mathrm{Pl}} = \sqrt{4\pi\varepsilon_0 c\hbar}$	$= 1,9\,\mathrm{aC} = 11,7\,\mathrm{e}$
la tension électrique de Planck	$U_{\mathrm{Pl}} = \sqrt{c^4/4\pi\varepsilon_0 G}$	$= 1,0 \cdot 10^{27}\,\mathrm{V}$
la résistance électrique de Planck	$R_{\mathrm{Pl}} = 1/4\pi\varepsilon_0 c$	$= 30,0\,\Omega$
la capacité électrique de Planck	$C_{\mathrm{Pl}} = 4\pi\varepsilon_0\sqrt{\hbar G/c^3}$	$= 1,8 \cdot 10^{-45}\,\mathrm{F}$
l'inductance électrique de Planck	$L_{\mathrm{Pl}} = (1/4\pi\varepsilon_0)\sqrt{\hbar G/c^7}$	$= 1,6 \cdot 10^{-42}\,\mathrm{H}$
le champ électrique de Planck	$E_{\mathrm{Pl}} = \sqrt{c^7/4\pi\varepsilon_0\hbar G^2}$	$= 6,5 \cdot 10^{61}\,\mathrm{V/m}$
la densité de flux magnétique de Planck	$B_{\mathrm{Pl}} = \sqrt{c^5/4\pi\varepsilon_0\hbar G^2}$	$= 2,2 \cdot 10^{53}\,\mathrm{T}$

Les unités naturelles sont importantes pour une autre raison: chaque fois qu'une quantité est imprudemment qualifiée «d'infiniment petite (ou grande)», l'expression correct devrait être «aussi petite (ou grande) que l'unité de Planck corrigée correspondante». Comme expliqué tout au long de ce texte, et tout particulièrement dans la dernière partie, cette substitution est possible parce que presque toutes les unités de Planck fournissent, dans la limite d'un facteur de correction de l'ordre de 1, la valeur extrême de l'observable correspondante (certaines comme limite supérieure et d'autres comme limite inférieure). Malheureusement, ces facteurs de correction ne sont pas encore largement répandus. La valeur extrême exacte pour chacune des observables de la nature est obtenue lorsque G est substitué par $4G$ et $4\pi\varepsilon_0$ par $4\pi\varepsilon_0\alpha$ dans toutes les quantités de Planck. Ces valeurs extrêmes, ou *unités de Planck corrigées*, sont les véritables *unités naturelles*. Il est possible de dépasser les valeurs extrêmes uniquement pour quelques grandeurs extensives. (Pouvez-vous trouver lesquelles?)

Vol. VI, page 37

Défi 165 e

LES AUTRES SYSTÈMES D'UNITÉS

Un objectif central de la recherche en physique des hautes énergies est de calculer les intensités de toutes les interactions. Par conséquent, il n'est pas pratique de fixer la constante de gravitation G à la valeur 1, comme dans le système des unités de Planck. Pour cette raison, les physiciens des hautes énergies, bien souvent, fixent uniquement $c = \hbar = k = 1$ et $\mu_0 = 1/\varepsilon_0 = 4\pi$,* laissant seulement la constante de gravitation G dans

* D'autres définitions pour les constantes de proportionnalité en électrodynamique conduisent, entre autres, au système d'unités gaussiennes qui sont souvent utilisé dans les calculs théoriques, au système d'unités Heaviside-Lorentz, au système d'unités électrostatiques et au système d'unités électromagnétiques.

Ref. 154

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

l'équation.

Dans ce système, il n'existe qu'une seule unité fondamentale, mais son choix est libre. Souvent, une longueur standard est choisie comme unité fondamentale, car elle est l'archétype d'une grandeur mesurée. Les observables physiques les plus importantes sont ainsi liées par les relations suivantes:

$$\begin{aligned} 1/[l^2] &= [E]^2 = [F] = [B] = [E_{\text{électrique}}] \,, \\ 1/[l] &= [E] = [m] = [p] = [a] = [f] = [I] = [U] = [T] \,, \\ 1 &= [v] = [q] = [e] = [R] = [S_{\text{action}}] = [S_{\text{entropie}}] = \hbar = c = k = [\alpha] \,, \\ [l] &= 1/[E] = [t] = [C] = [L] \quad \text{et} \\ [l]^2 &= 1/[E]^2 = [G] = [P] \end{aligned} \tag{116}$$

où on écrit $[x]$ pour représenter l'unité de la grandeur x. Cependant, l'utilisation de la même unité pour le temps, la capacité électrique et l'inductance n'est pas du goût de tout le monde, et par conséquent les électriciens n'utilisent pas ce système.*

Souvent, afin d'avoir une perception des énergies nécessaires pour observer un effet que l'on est en train d'étudier, une énergie standard est choisie comme unité fondamentale. En physique des particules, l'unité d'énergie la plus courante est l'*électronvolt* eV, définie comme étant l'énergie cinétique acquise par un électron lorsqu'il est accéléré par une différence de potentiel électrique de 1 volt («protonvolt» serait un nom plus approprié). Ainsi, nous avons $1\,\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}\,\text{J}$, ou approximativement

$$1\,\text{eV} \approx \tfrac{1}{6}\,\text{aJ} \tag{117}$$

qu'il est facile de mémoriser. La simplification $c = \hbar = 1$ conduit à $G = 6,9 \cdot 10^{-57}\,\text{eV}^{-2}$ et permet également d'utiliser l'unité eV pour la masse, la quantité de mouvement, la température, la fréquence, le temps et la longueur, avec les correspondances respectives
Défi 166 f $1\,\text{eV} \equiv 1,8 \cdot 10^{-36}\,\text{kg} \equiv 5,4 \cdot 10^{-28}\,\text{Ns} \equiv 242\,\text{THz} \equiv 11,6\,\text{kK}$ et $1\,\text{eV}^{-1} \equiv 4,1\,\text{fs} \equiv 1,2\,\mu\text{m}$.

Pour pouvoir se représenter l'unité eV, les relations suivantes sont utiles. La température ambiante, généralement considérée comme étant de 20 °C ou 293 K, correspond à une énergie cinétique par particule de 0,025 eV ou 4,0 zJ. La plus grande énergie que l'on ait mesurée jusqu'à présent pour une seule particule appartient à un rayon cosmique
Ref. 155 d'une énergie de $3 \cdot 10^{20}$ eV ou 48 J. Ici-bas sur Terre, on a construit un accélérateur capable de produire une énergie d'environ 105 GeV ou 17 nJ pour des électrons et des anti-électrons, et un autre, capable de produire des protons d'une énergie de 14 TeV ou 2,2 µJ. Tous les deux appartiennent au CERN à Genève et ont une circonférence de 27 km.

* Dans cette liste, l est la longueur, E l'énergie, F la force, $E_{\text{électrique}}$ le champ électrique, B le champ magnétique, m la masse, p la quantité de mouvement, a l'accélération, f la fréquence, I l'intensité du courant électrique, U la tension électrique, T la température, v la vitesse, q la charge électrique, R la résistance électrique, P la puissance et G la constante de gravitation.

La page internet www.chemie.fu-berlin.de/chemistry/general/units_en.html fournit un outil pour convertir diverses unités les unes vers les autres.

Les chercheurs en relativité générale emploient fréquemment un autre système, dans lequel le *rayon de Schwarzschild* $r_S = 2Gm/c^2$ est utilisé pour mesurer les masses, en posant $c = G = 1$. Dans ce cas, la masse et la longueur possèdent la *même* dimension, et $\hbar$ a la dimension d'une surface.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

La température la plus basse mesurée jusqu'à présent est de 280 pK, dans un sys-
Ref. 156 tème de noyau de rhodium maintenu au sein d'un dispositif de refroidissement spécial. L'intérieur de ce cryostat serait même le point le plus froid de tout l'univers. L'énergie cinétique par particule correspondant à cette température est aussi la plus petite jamais mesurée: elle correspond à 24 feV ou $3,8\,\mathrm{vJ} = 3,8 \cdot 10^{-33}$ J. Pour des particules isolées, le record semble être détenu par des neutrons: des énergies cinétiques aussi faibles que 10^{-7} eV ont été obtenues, ce qui correspond à des longueurs d'onde de de Broglie de 60 nm.

Curiosités et défis amusants concernant les unités

La longueur de Planck est approximativement la longueur d'onde de de Broglie $\lambda_B = h/mv$ d'un homme marchant à un pas confortable ($m = 80\,\mathrm{kg}$, $v = 0,5\,\mathrm{m/s}$). Ce mouve-
Ref. 157 ment est par conséquent appelé à juste titre la «promenade de Planck».

* *

La masse de Planck est égale à la masse d'environ 10^{19} protons. C'est approximativement la masse d'un embryon humain âgé d'environ dix jours.

* *

Les grandeurs de la nature mesurées avec le plus de précision sont les fréquences de
Ref. 158 certains pulsars milliseconde, la fréquence de certaines transitions atomiques étroites et la constante de Rydberg de l'atome d'*hydrogène*. Elles peuvent toutes être mesurées avec autant de précision que la définition de la seconde. La transition du césium qui définit la seconde possède une largeur de raie spectrale finie, ce qui restreint la précision accessible: cette limite est d'environ 14 chiffres significatifs.

* *

L'horloge la plus précise jamais fabriquée, en utilisant des micro-ondes, possède une
Ref. 159 stabilité de 10^{-16} pendant une durée de fonctionnement de 500 s. Pour des durées plus longues, le record en 1997 était d'environ 10^{-15}, mais des valeurs avoisinant les 10^{-17}
Ref. 160 semblent technologiquement accessibles. La précision des horloges est limitée par le bruit de fond parasite pour les durées de mesure courtes, et par des biais, c.-à-d. par des effets systématiques, pour les durées de mesure longues. La région pour laquelle la stabilité est la plus élevée dépend du type d'horloge. Elle se situe généralement entre 1 ms pour les horloges optiques et 5000 s pour les masers. Les pulsars constituent le seul type d'horloges pour lequel cette région n'est pas encore connue. Elle se situe vraisemblablement à plus de 20 ans, la durée qui s'est écoulée depuis leur découverte et l'instant où ces lignes ont été écrites.

* *

Les durées les plus courtes qui ont été mesurées sont les durées de vie de certaines particules «élémentaires». En particulier, la durée de vie de certains mésons D a été mesurée
Ref. 161 à moins de 10^{-23} s. De telles durées sont mesurées à l'aide d'une chambre à bulles, au sein de laquelle la trace laissée par la particule est photographiée. Pouvez-vous estimer
Défi 167 e quelle est la longueur de cette trace? (C'est une question piège: si votre longueur ne peut

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

pas être observée à l'aide d'un microscope optique, c'est que vous avez fait une erreur dans vos calculs.)

* *

Les durées les plus longues que l'on rencontre dans la nature sont les durées de vie de certains isotopes radioactifs, plus de 10^{15} ans, et la limite inférieure de certaines désintégrations de protons, plus de 10^{32} ans. Ces durées sont donc bien plus grandes que l'âge de l'univers, estimé à quatorze mille millions d'années.

Ref. 162

* *

Les variations des grandeurs sont souvent beaucoup plus faciles à mesurer que leurs valeurs. Par exemple, dans les détecteurs d'ondes gravitationnelles, la sensibilité atteinte en 1992 était $\Delta l/l = 3 \cdot 10^{-19}$ pour des longueurs de l'ordre de 1 m. Autrement dit, pour un bloc de métal d'environ un mètre cube, il est possible de mesurer des variations de longueur à peu près 3000 fois plus petites que le rayon d'un proton. Ces dispositifs sont aujourd'hui en train de se faire surpasser par les interféromètres en anneau. Des interféromètres en anneau mesurant des différences de fréquences de 10^{-21} ont déjà été construits, et ils sont toujours en cours de perfectionnement.

Ref. 163

Ref. 164

La précision et l'exactitude des mesures

Les mesures sont à la base de la physique. Toute mesure comporte une *erreur*. Les erreurs sont dues à un manque de précision ou à un manque d'exactitude. La *précision* exprime de degré de reproductibilité d'un résultat lorsque la mesure est réitérée. L'*exactitude* exprime le degré de correspondance entre la mesure et la valeur réelle.

Le manque de précision est dû à des erreurs accidentelles ou *aléatoires*. La meilleure façon de les quantifier consiste à évaluer leur *écart type*, généralement noté σ. Il est défini par

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2 \,, \tag{118}$$

où $\bar{x}$ représente la moyenne des mesures x_i. (Pouvez-vous imaginer pourquoi on utilise $n-1$ dans la formule plutôt que n?)

Défi 168 e

Pour la plupart des expériences, lorsque l'on augmente le nombre de mesures, la distribution des valeurs obtenues tend vers une loi normale, que l'on appelle également la loi de Gauss*. Cette distribution, que l'on a reproduite sur la Figure 85, est décrite par l'expression

$$N(x) \approx \mathrm{e}^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} \,. \tag{119}$$

Le carré de l'écart type σ^2 est également appelé la *variance*. Pour une distribution gaussienne des valeurs de mesures, $2,35\sigma$ est la largeur à mi-hauteur.

Défi 169 f

Le manque d'exactitude est dû à des *erreurs systématiques*. En général, ces dernières ne peuvent être que des estimations, qui sont souvent ajoutée aux erreurs aléatoires

* La loi de Gauss est aussi appelée loi gaussienne, ou encore loi de Laplace-Gauss [N.d.T.].

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

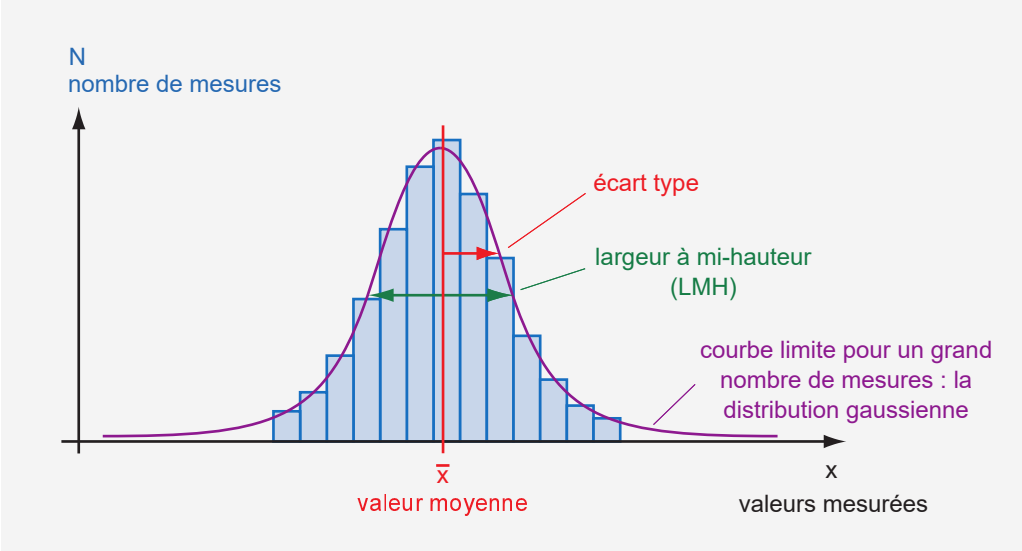


FIGURE 85 Une expérience de précision et sa distribution de mesures. La précision est élevée si la largeur de la distribution est étroite. L'exactitude est élevée si le centre de la distribution est en accord avec la valeur réelle.

Ref. 165 pour fournir une *erreur!expérimentale totale*, que l'on appelle parfois l'*incertitude!totale*. L'*erreur!relative* (l'incertitude relative) est le rapport entre l'erreur et la valeur mesurée.

Par exemple, une mesure faite par des professionnels donnera un résultat sous la forme 0, 312(6) m. Le nombre entre parenthèse est l'écart type σ, exprimé dans la même unité que la dernière décimale. Comme ci-dessus, on suppose une distribution gaussienne des résultats des mesures. Par conséquent, une valeur de 0, 312(6) m implique
Défi 170 f que l'on s'attend à ce que la valeur réelle se trouve

— à moins de 1σ avec une probabilité de 68,3 %, ce qui correspond (pour cet exemple) à $0, 312 \pm 0, 006$ m;
— à moins de 2σ avec une probabilité de 95,4 %, ce qui correspond à $0, 312 \pm 0, 012$ m;
— à moins de 3σ avec une probabilité de 99,73 %, ce qui correspond à $0, 312 \pm 0, 018$ m;
— à moins de 4σ avec une probabilité de 99,9937 %, ce qui correspond à $0, 312 \pm 0, 024$ m;
— à moins de 5σ avec une probabilité de 99,999 943 %, ce qui correspond à $0, 312 \pm 0, 030$ m;
— à moins de 6σ avec une probabilité de 99,999 999 80 %, ce qui correspond à $0, 312 \pm 0, 036$ m;
— à moins de 7σ avec une probabilité de 99,999 999 999 74 %, ce qui correspond à $0, 312 \pm 0, 041$ m.

Défi 171 e (Est-ce que les derniers nombres vous paraissent sensés?)

Notez que l'écart type n'est donné qu'avec un seul chiffre significatif. Il faudrait être un expert mondial pour en donner deux, et un demeuré pour en utiliser plus. Si aucun écart type n'est fourni, on le supposera égale à (1). Par conséquent, parmi les profession-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

nels, 1 km et 1000 m ne sont *pas* les mêmes longueurs!

Que se passe-t-il pour les erreurs lorsque deux valeurs de mesure A et B sont ajoutées ou soustraites? Si toutes les mesures sont indépendantes (non corrélées) l'écart type de la somme *et* celui de la différence sont tous les deux donnés par $\sigma = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2}$. Pour le produit ou pour le rapport entre les valeurs C et D de deux valeurs mesurées et non corrélées, le résultat est $\rho = \sqrt{\rho_C^2 + \rho_D^2}$ où les termes ρ sont les écarts types *relatifs*.

Supposez que vous mesuriez qu'un objet se déplace de 1 m en 3 s. Quelle sera la valeur mesurée pour la vitesse? Défi 172 e

Les limites de la précision

Quelles sont les limites de l'exactitude et de la précision? Il n'existe aucun moyen, même dans le principe, pour mesurer une longueur x avec une *précision* de plus 61 chiffres significatifs environ, car dans la nature, le rapport entre la plus petite et la plus grande longueur mesurable est $\Delta x/x > l_{\text{Pl}}/d_{\text{horizon}} = 10^{-61}$. (Ce rapport est-il également valide pour les forces et pour les volumes?) Dans la dernière partie de ce texte, l'étude des horloges et des mètres étalons renforcera cette limite théorique. Défi 173 f Vol. VI, page 94

Mais il n'est pas difficile de déduire des limites pratiques plus rigoureuses. Il n'est pas possible d'imaginer une machine qui puisse mesurer des quantités avec une précision meilleure que celle obtenue en mesurant le diamètre de la Terre avec une précision égale à la plus petite longueur jamais mesurée, environ 10^{-19} m. Cela fait environ 26 chiffres significatifs. En utilisant la limite plus réaliste d'une machine d'une taille de 1000 m on obtient une limite de 22 chiffres significatifs. Si, comme nous l'avons prédit ci-dessus, les mesures de durées permettent réellement d'obtenir 17 chiffres significatifs, alors, elles s'approchent de la limite pratique, car mise à part la taille, il existe une contrainte pratique supplémentaire: le coût. En effet, un chiffre significatif supplémentaire dans la précision d'une mesure signifie souvent un chiffre supplémentaire pour le coût des équipements.

Les constantes physiques

En physique, les observations les plus générales sont déduites à partir d'observations plus fondamentales. Par conséquent, de nombreuses mesures peuvent être déduites à partir de mesures plus fondamentales. Les mesures les plus fondamentales sont celles des constantes physiques.

Les tableaux qui suivent fournissent les meilleures valeurs du monde pour les constantes physiques et les propriétés des particules les plus importantes (en unités SI ainsi que dans quelques autres unités courantes) telles qu'on les trouve dans les références officielles. Les valeurs sont les moyennes mondiales des meilleurs mesures effectuées jusqu'à présent. Comme d'habitude, les erreurs expérimentales, incluant à la fois les erreurs aléatoires et les erreurs systématiques estimées, sont exprimées en donnant l'écart type sur les dernières décimales. En fait, derrière chaque nombre des tableaux suivants, se cache une longue histoire qu'il serait digne de raconter, mais pour lesquelles nous n'avons pas assez de place ici. Ref. 166 Ref. 167

En principe, *toutes* les propriétés quantitatives de la matière peuvent se calculer à l'aide de la théorie quantique (plus précisément à l'aide des équations du modèle standard des particules) et d'un ensemble de constantes fondamentales qui sont données Vol. V, page 261

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

dans les tableaux suivants. Par exemple, la couleur, la densité et les propriétés élastiques de n'importe quel matériau peuvent être prédites, en principe, de cette façon.

TABLEAU 11 Constantes physiques fondamentales.

Quantité	Symbole	Valeur en unité SI	Incert.[a]
Constantes qui définissent les unités de mesures du SI			
Vitesse de la lumière dans le vide [c]	c	299 792 458 m/s	0
Constante de Planck initiale [c]	h	$6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$ Js	0
Constante de Planck réduite ou quantum d'action	$\hbar$	$1,054\,571\,817\ldots \cdot 10^{-34}$ Js	0
Charge du positon [c]	e	0,160 217 6634 aC	0
Constante de Boltzmann [c]	k	$1,380\,649 \cdot 10^{-23}$ J/K	0
Nombre d'Avogadro	N_A	$6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$ 1/mol	0
Constantes qui *devraient* définir les unités de mesures du SI			
Constante gravitationnelle	G	$6,674\,30(15) \cdot 10^{-11}$ Nm^2/kg^2	$2,2 \cdot 10^{-5}$
Autres constantes fondamentales			
Nombre de dimensions de l'espace-temps		3 + 1	0 [b]
Constante de structure fine [d] ou	$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c}$	1/137,035 999 084(21)	$1,5 \cdot 10^{-10}$
constante de couplage e.m.	$= g_{em}(m_e^2c^2)$	$= 0,007\,297\,352\,5693(11)$	$1,5 \cdot 10^{-10}$
Constante de couplage de Fermi [d] ou	$G_F/(\hbar c)^3$	$1,166\,3787(6) \cdot 10^{-5}$ GeV^{-2}	$5,1 \cdot 10^{-7}$
constante de couplage faible	$\alpha_w(M_Z) = g_w^2/4\pi$	1/30,1(3)	$1 \cdot 10^{-2}$
Constante de couplage fort [d]	$\alpha_s(M_Z) = g_s^2/4\pi$	0,1179(10)	$8,5 \cdot 10^{-3}$
Angle de mélange électrofaible	$\sin^2\theta_W(\overline{MS})$	0,231 22(4)	$1,7 \cdot 10^{-4}$
	$\sin^2\theta_W$ (enveloppe) $= 1 - (m_W/m_Z)^2$	0,222 90(30)	$1,3 \cdot 10^{-3}$
Matrice CKM de transformation des quarks	$\lvert V\rvert$	$\begin{pmatrix} 0,97383(24) & 0,2272(10) & 0,00396(9) \\ 0,2271(10) & 0,97296(24) & 0,04221(80) \\ 0,00814(64) & 0,04161(78) & 0,999100(34) \end{pmatrix}$	
Invariant de Jarlskog	J	$3,08(18) \cdot 10^{-5}$	
Matrice PMNS de transformation des neutrinos	$\lvert P\rvert$	$\begin{pmatrix} 0,82(2) & 0,55(4) & 0,150(7) \\ 0,37(13) & 0,57(11) & 0,71(7) \\ 0,41(13) & 0,59(10) & 0,69(7) \end{pmatrix}$	
Masse de l'électron	m_e	$9,109\,383\,7015(28) \cdot 10^{-31}$ kg	$3,0 \cdot 10^{-10}$
		$5,485\,799\,090\,65(16) \cdot 10^{-4}$ u	$2,9 \cdot 10^{-11}$
		0,510 998 950 00(15) MeV	$3,0 \cdot 10^{-10}$
Masse du muon	m_μ	$1,883\,531\,627(42) \cdot 10^{-28}$ kg	$2,2 \cdot 10^{-8}$
		105,658 3755(23) MeV	$2,2 \cdot 10^{-8}$
Masse du tau	m_τ	1,776 82(12) GeV/c^2	$6,8 \cdot 10^{-5}$
Masse du neutrino électronique	m_{ν_e}	< 2 eV/c^2	
Masse du neutrino muonique	m_{ν_μ}	< 2 eV/c^2	
Masse du neutrino tauique	m_{ν_τ}	< 2 eV/c^2	

MS Non Mountain – The Adventures of Physics copyright © Christophe Billiet June 1994–05 2022 Free pdf at www.nonmountain.net

TABLEAU 11 Constantes physiques fondamentales (continuation).

Quantité	Symbole	Valeur en unité SI	Incert.[a]
Masse du quark haut (up)	u	$21,6(+0,49/-0,26)\,\mathrm{MeV}/c^2$	
Masse du quark bas (down)	d	$4,67(+0,48/-0,17)\,\mathrm{MeV}/c^2$	
Masse du quark étrange (strange)	s	$93(+11/-5)\,\mathrm{MeV}/c^2$	
Masse du quark charme (charm)	c	$1,27(2)\,\mathrm{GeV}/c^2$	
Masse du quark dessous (bottom)	b	$4,18(3)\,\mathrm{GeV}/c^2$	
Masse du quark dessus (top)	t	$172,9(0,4)\,\mathrm{GeV}/c^2$	
Masse du photon	γ	$< 2 \cdot 10^{-54}\,\mathrm{kg}$	
Masse du boson W	$W^{\pm}$	$80,379(12)\,\mathrm{GeV}/c^2$	
Masse du boson Z	Z^0	$91,1876(21)\,\mathrm{GeV}/c^2$	
Masse du boson de Higgs	H	$125,10(14)\,\mathrm{GeV}/c^2$	
Masse du gluon	$g_{1\ldots8}$	$\approx 0\,\mathrm{MeV}/c^2$	

a. Incertitude: écart type des erreurs de mesures.
b. Mesurées seulement de 10^{-19} m à 10^{26} m.
c. Constante servant de définition.
d. Toutes les constantes de couplage dépendent du transfert du quadrivecteur impulsion-énergie, comme expliqué dans la section sur la renormalisation. La *constante de structure fine* est le nom traditionnel de la constante de couplage électromagnétique g_{em} dans le cas d'un transfert de quadrivecteur impulsion-énergie de $Q^2 = m_e^2 c^2$, qui est la plus petite valeur possible. Pour des transferts d'impulsion-énergie plus élevés, elle possède une valeur plus grande, par exemple, $g_{\mathrm{em}}(Q^2 = M_W^2 c^2) \approx 1/128$. En revanche, la constante de couplage de l'interaction forte possède des valeurs plus faibles aux transferts d'impulsion-énergie plus élevés. Par exemple, $\alpha_s(34\,\mathrm{GeV}) = 0,14(2)$.

Page 131

Pourquoi toutes ces constantes fondamentales ont-elles les valeurs qu'elles ont? Pour chaque constante fondamentale *ayant une dimension*, tel que le quantum d'action $\hbar$, la valeur numérique a seulement une signification historique. Elle est de $1,054 \cdot 10^{-34}$ Js à cause de la définition SI du joule et de la seconde. La question de savoir pourquoi la valeur d'une constante *dimensionnelle* n'est ni plus grande ni plus petite, nécessite donc toujours de comprendre l'origine de certains nombres *sans dimension* qui fournissent le rapport entre la constante et l'*unité naturelle* correspondante, qui est elle-même définie à l'aide de c, G, k, N_A et $\hbar$. Plus de détails, ainsi que les valeurs des unités naturelles, sont donnés dans la section dédiée. En d'autres termes, comprendre les tailles des atomes, des gens, des arbres et des étoiles, la durée des processus moléculaires et atomiques, ou encore la masse des noyaux ou des montagnes, implique de comprendre les ratios entre ces valeurs et les unités naturelles correspondantes. La clef pour la compréhension de la nature se trouve donc dans la compréhension de tous les ratios, et donc de toutes les constantes sans dimension. Cette quête, y compris la compréhension de la constante de structure fine α elle-même, ne s'achèvera que dans le volume final de notre aventure.

Page 237

Les constantes fondamentales conduisent aux observations, utiles et de grande précision, suivantes.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 12 Constantes physiques dérivées.

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR EN UNITÉ SI	INCERT.
Perméabilité magnétique du vide	μ_0	1, 256 637 062 12(19) µH/m	$1,5 \cdot 10^{-10}$
Permittivité diélectrique du vide	$\varepsilon_0 = 1/\mu_0 c^2$	8, 854 187 8128(13) pF/m	$1,5 \cdot 10^{-10}$
Impédance caractéristique du vide	$Z_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$	376, 730 313 668(57) Ω	$1,5 \cdot 10^{-10}$
Nombre de Loschmidt à 273, 15 K et 101 325 Pa	N_L	$2,686\,780\,111... \cdot 10^{25}$ 1/m^3	0
Constante de Faraday	$F = N_A e$	96 485, 332 12... C/mol	0
Constante universelle des gaz parfaits	$R = N_A k$	8, 314 462 618... J/(mol K)	0
Volume molaire d'un gaz parfait à 273, 15 K et 101 325 Pa	$V = RT/p$	22, 413 969 54... l/mol	0
Constante de Rydberg [a]	$R_\infty = m_e c\alpha^2/2h$	10 973 731, 568 160(21) m^{-1}	$1,9 \cdot 10^{-12}$
Quantum de conductance	$G_0 = 2e^2/h$	77, 480 917 29... µS	0
Quantum de flux magnétique	$\varphi_0 = h/2e$	2, 067 833 848... fWb	0
Constante de Josephson	$2e/h$	483, 597 8484... THz/V	0
Constante de Von Klitzing	$h/e^2 = \mu_0 c/2\alpha$	25 812, 807 45... Ω	0
Magnéton de Bohr	$\mu_B = e\hbar/2m_e$	9, 274 010 0783(28) yJ/T	$3,0 \cdot 10^{-10}$
Rayon classique de l'électron	$r_e = e^2/4\pi\varepsilon_0 m_e c^2$	2, 817 940 3262(13) fm	$4,5 \cdot 10^{-10}$
Longueur d'onde de Compton de l'électron	$\lambda_C = h/m_e c$	2, 426 310 238 67(73) pm	$3,0 \cdot 10^{-10}$
	$\lambda\!\!\!^{-}_c = \hbar/m_e c = r_e/\alpha$	0, 386 159 267 96(12) pm	$3,0 \cdot 10^{-10}$
Rayon de Bohr [a]	$a_\infty = r_e/\alpha^2$	52, 917 721 0903(80) pm	$1,5 \cdot 10^{-10}$
Quantum de circulation	$h/2m_e$	3, 636 947 5516(11) cm^2/s	$3,0 \cdot 10^{-10}$
Charge spécifique du positon	e/m_e	175, 882 001 076(55) GC/kg	$3,0 \cdot 10^{-10}$
Fréquence cyclotron de l'électron	$f_c/B = e/2\pi m_e$	27, 992 489 872(9) GHz/T	$3,0 \cdot 10^{-10}$
Moment magnétique de l'électron	μ_e	−9, 284 764 7043(28) yJ/T	$3,0 \cdot 10^{-10}$
	μ_e/μ_B	−1, 001 159 652 181 28(18)	$1,7 \cdot 10^{-13}$
	μ_e/μ_N	$-1\,838,281\,971\,88(11) \cdot 10^3$	$6,0 \cdot 10^{-11}$
Facteur de Landé de l'électron	g_e	−2, 002 319 304 362 56(35)	$1,7 \cdot 10^{-13}$
Rapport de masse muon-électron	m_μ/m_e	206, 768 2830(46)	$2,2 \cdot 10^{-8}$
Moment magnétique du muon	μ_μ	$-4,490\,448\,30(10) \cdot 10^{-26}$ J/T	$2,2 \cdot 10^{-8}$
Facteur de Landé du muon	g_μ	−2, 002 331 8418(13)	$6,3 \cdot 10^{-10}$
Unité de masse atomique	$1\,u = m_{^{12}C}/12$	$1,660\,539\,066\,60(50) \cdot 10^{-27}$ kg	$3,0 \cdot 10^{-10}$
Masse du proton	m_p	$1,672\,621\,923\,69(51) \cdot 10^{-27}$ kg	$3,1 \cdot 10^{-10}$
		1, 007 276 466 621(53) u	$5,3 \cdot 10^{-11}$
		938, 272 088 16(29) MeV	$3,1 \cdot 10^{-10}$
Rapport de masse proton-électron	m_p/m_e	1 836, 152 673 43(11)	$6,0 \cdot 10^{-11}$
Charge spécifique du proton	e/m_p	$9,578\,833\,1560(29) \cdot 10^7$ C/kg	$3,1 \cdot 10^{-10}$
Longueur d'onde de Compton du proton	$\lambda_{C,p} = h/m_p c$	1, 321 409 855 39(40) fm	$3,1 \cdot 10^{-10}$
Magnéton nucléaire	$\mu_N = e\hbar/2m_p$	$5,050\,783\,7461(15) \cdot 10^{-27}$ J/T	$3,1 \cdot 10^{-10}$
Moment magnétique du proton	μ_p	$1,410\,606\,797\,36(60) \cdot 10^{-26}$ J/T	$4,2 \cdot 10^{-10}$

Motion Mountain – The Adventure of Physics – Copyright © Christoph Schiller 1990–2025 – All rights reserved – www.motionmountain.net

TABLEAU 12 Constantes physiques dérivées (continuation).

Quantité	Symbole	Valeur en unité SI	Incert.
	μ_p/μ_B	$1,521\,032\,202\,30(46)\cdot 10^{-3}$	$3,0\cdot 10^{-10}$
	μ_p/μ_N	$2,792\,847\,344\,63(82)$	$2,9\cdot 10^{-10}$
Rapport gyromagnétique du proton	$\gamma_p = 2\mu_p/h$	42,577 478 518(18) MHz/T	$4,2\cdot 10^{-10}$
Facteur de Landé du proton	g_p	5,585 694 6893(16)	$2,9\cdot 10^{-10}$
Masse du neutron	m_n	$1,674\,927\,498\,04(95)\cdot 10^{-27}$ kg	$5,7\cdot 10^{-10}$
		1,008 664 915 95(43) u	$4,8\cdot 10^{-10}$
		939,565 420 52(54) MeV	$5,7\cdot 10^{-10}$
Rapport de masse neutron-électron	m_n/m_e	1 838,683 661 73(89)	$4,8\cdot 10^{-10}$
Rapport de masse neutron-proton	m_n/m_p	1,001 378 419 31(49)	$4,9\cdot 10^{-10}$
Longueur d'onde de Compton du neutron	$\lambda_{C,n} = h/m_n c$	1,319 590 905 81(75) fm	$5,7\cdot 10^{-10}$
Moment magnétique du neutron	μ_n	$-0,966\,236\,51(23)\cdot 10^{-26}$ J/T	$2,4\cdot 10^{-7}$
	μ_n/μ_B	$-1,041\,875\,63(25)\cdot 10^{-3}$	$2,4\cdot 10^{-7}$
	μ_n/μ_N	$-1,913\,042\,73(45)$	$2,4\cdot 10^{-7}$
Constante de Stefan-Boltzmann	$\sigma = \pi^2 k^4/60\hbar^3 c^2$	56,703 744 19... nW/m^{2}K^4	0
Constante de la loi du déplacement de Wien	$b = \lambda_{max} T$	2,897 771 955... mmK	0
		58,789 257 57... GHz/K	0
Électronvolt	eV	0,160 217 6634... aJ	0
Constante de conversion de bits en entropie	$k \ln 2$	10^{23} bit = 0,956 994... J/K	0
Contenu énergétique du TNT		entre 3,7 et 4,0 MJ/kg	$4\cdot 10^{-2}$

a. Pour une masse infinie du noyau.

Quelques propriétés utiles de notre environnement local sont énumérées dans le tableau qui suit.

TABLEAU 13 Constantes astronomiques.

Quantité	Symbole	Valeur
Année tropique 1900 [a]	a	31 556 925,974 7 s
Année tropique 1994	a	31 556 925,2 s
Jour sidéral moyen	d	$23^h 56' 4,090\,53''$
Distance moyenne de la Terre au Soleil [b]		149 597 870,691(30) km
Unité astronomique [b]	AU	149 597 870 691 m
Année lumière, basée sur le calendrier Julien [b]	al	9,460 730 472 5808 Pm
Parsec	pc	30,856 775 806 Pm = 3,261 634 al
Masse de la Terre	$M_{\oplus}$	$5,973(1)\cdot 10^{24}$ kg
Constante de gravitation géocentrique	GM	$3,986\,004\,418(8)\cdot 10^{14}$ m^3/s^2
Longueur gravitationnelle de la Terre	$l_{\oplus} = 2GM/c^2$	8,870 056 078(16) mm
Rayon équatorial de la Terre [c]	$R_{\oplus eq}$	6378,1366(1) km
Rayon polaire de la Terre [c]	$R_{\oplus p}$	6356,752(1) km

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 13 Constantes astronomiques (continuation).

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR
Distance des pôles à l'équateur [c]		10 001, 966 km (en moyenne)
Aplatissement de la Terre aux pôles [c]	$e_{\oplus}$	1/298, 25642(1)
Densité moyenne de la Terre	$\rho_{\oplus}$	5, 5 Mg/m^3
Âge de la Terre	$T_{\oplus}$	4, 50(4) Ga = 142(2) Ps
Gravité normale de la Terre	g	9, 806 65 m/s^2
Pression atmosphérique standard sur la Terre	p_0	101 325 Pa
Rayon de la Lune	$R_{\leftmoon\,\mathrm{v}}$	1738 km dans la direction de la Terre
Rayon de la Lune	$R_{\leftmoon\,\mathrm{h}}$	1737, 4 km dans les deux autres directions
Masse de la Lune	$M_{\leftmoon}$	7, 35 · 10^{22} kg
Distance moyenne de la Lune [d]	$d_{\leftmoon}$	384 401 km
Distance de la Lune à son périgée [d]		typiquement 363 Mm, minimum historique 359 861 km
Distance de la Lune à son apogée [d]		typiquement 404 Mm, maximum historique 406 720 km
Taille apparente (angulaire) de la Lune [e]		moyenne 0, 5181° = 31, 08′, minimum 0, 49°, maximum 0, 55°
Densité moyenne de la Lune	$\rho_{\leftmoon}$	3, 3 Mg/m^3
Gravité à la surface de la Lune	$g_{\leftmoon}$	1, 62 m/s^2
Pression atmosphérique sur la Lune	$p_{\leftmoon}$	entre 10^{-10} Pa (la nuit) et 10^{-7} Pa (le jour)
Masse de Jupiter	$M_{♃}$	1, 90 · 10^{27} kg
Rayon équatorial de Jupiter	$R_{♃}$	71, 398 Mm
Rayon polaire de Jupiter	$R_{♃}$	67, 1(1) Mm
Distance moyenne de Jupiter au Soleil	$D_{♃}$	778 412 020 km
Gravité à la surface de Jupiter	$g_{♃}$	24, 9 m/s^2
Pression atmosphérique sur Jupiter	$p_{♃}$	entre 20 kPa et 200 kPa
Masse du Soleil	$M_{\odot}$	1, 988 43(3) · 10^{30} kg
Longueur gravitationnelle du Soleil	$2GM_{\odot}/c^2$	2, 953 250 08(5) km
Constante de gravitation héliocentrique	$GM_{\odot}$	132, 712 440 018(8) · 10^{18} m^3/s^2
Luminosité du Soleil	$L_{\odot}$	384, 6 YW
Rayon équatorial du Soleil	$R_{\odot}$	695, 98(7) Mm
Taille apparente (angulaire) du Soleil		0, 53° en moyenne; minimum le 4 juillet (aphélie) 1888″; maximum le 4 janvier (périhélie) 1952″
Densité moyenne du Soleil	$\rho_{\odot}$	1, 4 Mg/m^3
Distance moyenne du Soleil	AU	149 597 870, 691(30) km
Âge du Soleil	$T_{\odot}$	4, 6 Ga
Vitesse du Soleil autour du centre de la galaxie	$v_{\odot\mathrm{g}}$	220(20) km/s
Vitesse du Soleil par rapport au fond cosmique	$v_{\odot\mathrm{b}}$	370, 6(5) km/s

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2024 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 13 Constantes astronomiques (continuation).

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR
Gravité à la surface du Soleil	$g_\odot$	$274\,\mathrm{m/s^2}$
Pression photosphérique basse du Soleil	$p_\odot$	15 kPa
Distance du centre de la Voie lactée		8, 0(5) kpc = 26, 1(1, 6) kal
Âge de la Voie lactée		13, 6 Ga
Taille de la Voie lactée		$\approx 10^{21}$ m or 100 kal
Masse de la Voie lactée		10^{12} masses solaires, $\approx 2 \cdot 10^{42}$ kg
Le plus lointain groupe de galaxies connu	SXDF-XCLJ 0218-0510	$9,6 \cdot 10^9$ al

a. Constante servant de définition, d'un équinoxe vernal à l'autre équinoxe vernal. Elle était autrefois utilisée pour définir la seconde. (Souvenez-vous: π secondes représente environ un nanosiècle.) La valeur en 1990 compte approximativement 0, 7 s de moins, ce qui correspond à un ralentissement d'environ 0, 2 ms/a. (Mais attention: pourquoi?) Il existe même une formule empirique pour estimer la variation de la longueur de l'année au cours du temps.

Défi 174 e

Ref. 168

b. La précision de seulement 30 m sur la distance moyenne entre la Terre et le Soleil est tout à fait surprenante. Elle résulte des durées de propagation moyennes des signaux envoyés par les orbiteurs et les atterrisseurs martiens du programme Viking, qui ont été collectées sur une période de plus de vingt ans. Notez que l'Union astronomique internationale (UAI) fait la distinction entre la distance moyenne entre la Terre et le Soleil et l'*unité astronomique* elle-même. Cette dernière étant définie comme une longueur fixe et exacte. De même, l'*année lumière* est une unité définie comme un nombre exact par l'UAI. Pour plus de détails, consultez www.iau.org/public/measuring.

c. La forme de la Terre est décrite de la façon la plus précise par le Système géodésique mondial. La dernière édition date de 1984. Pour une présentation approfondie de son contexte et de ses détails, consultez le site Web www.wgs84.com. L'Union géodésique et géophysique internationale a révisé les données en 2000. Les rayons et l'aplatissement aux pôles qui sont fournis ici sont ceux correspondant au système de marée dénommé «mean tide system». Ils diffèrent des valeurs du système de marée «zero tide system», ainsi que de celles provenant d'autres systèmes, d'environ 0, 7 m. Les détails dans ce domaine constituent une science en eux-mêmes.

d. Mesurée de centre à centre. Pour trouver la position précise de la Lune à une date donnée, voir la page www.fourmilab.ch/earthview/moon_ap_per.html. Pour les planètes, consultez la page www.fourmilab.ch/solar/solar.html ainsi que les autres pages du même site.

e. Les angles sont définis de la façon suivante: 1 degré = $1^\circ = \pi/180$ rad, 1 (première) minute d'arc = $1' = 1°/60$, 1 seconde (minute) d'arc = $1'' = 1'/60$. Les anciennes unités «troisième minute d'arc» et «quatrième minute d'arc», chacune correspondant à un soixantième de la précédente, ne sont plus utilisées. («Minute» signifiait à l'origine «très petit», ce qui est toujours le cas en anglais moderne.*)

Quelques propriétés de la nature plus générales sont énumérées dans le tableau qui suit. (Si vous voulez un défi, essayez de déterminer si des propriétés de l'Univers lui-même y sont énumérées?)

Défi 175 e

* La langue française l'utilise toujours dans le mot «minuscule» [N.d.T.].

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 14 Constantes cosmologiques.

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR
Constante cosmologique	Λ	$\approx 1 \cdot 10^{-52}\,\mathrm{m}^{-2}$
Âge de l'Univers [a]	t_0	$4,333(53) \cdot 10^{17}\,\mathrm{s} = 13,8(0,1) \cdot 10^{9}\,\mathrm{a}$
(déterminée à partir de l'espace-temps, via l'expansion, d'après la relativité générale)		
Âge de l'Univers [a]	t_0	plus de $3,5(4) \cdot 10^{17}\,\mathrm{s} = 11,5(1,5) \cdot 10^{9}\,\mathrm{a}$
(déterminée à partir de la matière, via les galaxies et les étoiles, d'après la théorie quantique)		
Constante de Hubble [a]	H_0	$2,3(2) \cdot 10^{-18}\,\mathrm{s}^{-1} = 0,73(4) \cdot 10^{-10}\,\mathrm{a}^{-1}$
	$= h_0 \cdot 100\,\mathrm{km/s\,Mpc} = h_0 \cdot 1,0227 \cdot 10^{-10}\,\mathrm{a}^{-1}$	
Constante de Hubble réduite [a]	h_0	0,71(4)
Paramètre de décélération [a]	$q_0 = -(\ddot{a}/a)_0/H_0^2$	−0,66(10)
Distance de l'horizon de l'Univers [a]	$d_0 = 3ct_0$	$40,0(6) \cdot 10^{26}\,\mathrm{m} = 13,0(2)\,\mathrm{Gpc}$
Topologie de l'Univers		triviale jusqu'à 10^{26} m
Nombre de dimension spatiales		3, jusqu'à 10^{26} m de distance
Densité critique	$\rho_c = 3H_0^2/8\pi G$	$h_0^2 \cdot 1,878\,82(24) \cdot 10^{-26}\,\mathrm{kg/m}^3$
de l'Univers		$= 0,95(12) \cdot 10^{-26}\,\mathrm{kg/m}^3$
Paramètre de densité (totale) [a]	$\Omega_0 = \rho_0/\rho_c$	1,02(2)
Paramètre de densité baryonique [a]	$\Omega_{B0} = \rho_{B0}/\rho_c$	0,044(4)
Paramètre de densité de la matière noire froide [a]	$\Omega_{CDM0} = \rho_{CDM0}/\rho_c$	0,23(4)
Paramètre de densité des neutrinos [a]	$\Omega_{\nu 0} = \rho_{\nu 0}/\rho_c$	entre 0,001 et 0,05
Paramètre de densité de l'énergie sombre [a]	$\Omega_{X0} = \rho_{X0}/\rho_c$	0,73(4)
Paramètre de l'équation d'état de l'énergie sombre	$w = p_X/\rho_X$	−1,0(2)
Masse des baryon	m_b	$1,67 \cdot 10^{-27}\,\mathrm{kg}$
Densité du nombre de baryons		$0,25(1)\,/\mathrm{m}^3$
Densité de matière lumineuse		$3,8(2) \cdot 10^{-28}\,\mathrm{kg/m}^3$
Nombre d'étoiles dans l'Univers	n_s	$10^{22\pm1}$
Nombre de baryons dans l'Univers	n_b	$10^{81\pm1}$
Température du fond diffus micro-onde [b]	T_0	2,725(1) K
Nombre de photons dans l'Univers	n_γ	10^{89}
Densité d'énergie des photons	$\rho_\gamma = \pi^2 k^4/15T_0^4$	$4,6 \cdot 10^{-31}\,\mathrm{kg/m}^3$
Densité du nombre de photons		$410,89\,/\mathrm{cm}^3$ ou $400\,/\mathrm{cm}^3 (T_0/2,7\,\mathrm{K})^3$
Amplitude des perturbations de densité	$\sqrt{S}$	$5,6(1,5) \cdot 10^{-6}$
Amplitude des ondes gravitationnelles	$\sqrt{T}$	$< 0,71\sqrt{S}$
Fluctuation de masse sur 8 Mpc	σ_8	0,84(4)
Indice spectral scalaire	n	0,93(3)
Variation de l'indice spectral scalaire	$\mathrm{d}n/\mathrm{d}\ln k$	−0,03(2)
Longueur de Planck	$l_{Pl} = \sqrt{\hbar G/c^3}$	$1,62 \cdot 10^{-35}\,\mathrm{m}$
Temps de Planck	$t_{Pl} = \sqrt{\hbar G/c^5}$	$5,39 \cdot 10^{-44}\,\mathrm{s}$
Masse de Planck	$m_{Pl} = \sqrt{\hbar c/G}$	21,8 µg
Nombre d'instants dans l'histoire [a]	t_0/t_{Pl}	$8,7(2,8) \cdot 10^{60}$

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1997–2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

TABLEAU 14 Constantes cosmologiques(continuation).

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR
Nombre de points d'espace-temps à l'intérieur de l'horizon [a]	$N_0 = (R_0/l_{Pl})^3 \cdot (t_0/t_{Pl})$	$10^{244\pm1}$
Masse à l'intérieur de l'horizon	M	$10^{54\pm1}$ kg

a. L'indice 0 indique des valeurs contemporaines.
b. Le rayonnement a été initié lorsque l'Univers était âgé de 380 000 ans et avait une température d'environ 3000 K. Les fluctuations ΔT_0 qui ont conduit à la formation des galaxies sont aujourd'hui d'environ $16 \pm 4\,\mu K = 6(2) \cdot 10^{-6}\, T_0$.

Vol. II, page 231

NOMBRES UTILES

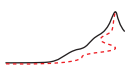
π	$3,14159\,26535\,89793\,23846\,26433\,83279\,50288\,41971\,69399\,37510_5$
e	$2,71828\,18284\,59045\,23536\,02874\,71352\,66249\,77572\,47093\,69995_9$
γ	$0,57721\,56649\,01532\,86060\,65120\,90082\,40243\,10421\,59335\,93992_3$
$\ln 2$	$0,69314\,71805\,59945\,30941\,72321\,21458\,17656\,80755\,00134\,36025_5$
$\ln 10$	$2,30258\,50929\,94045\,68401\,79914\,54684\,36420\,76011\,01488\,62877_2$
$\sqrt{10}$	$3,16227\,76601\,68379\,33199\,88935\,44432\,71853\,37195\,55139\,32521_6$

Ref. 169

Si le nombre π est *normal*, c.-à-d. si tous les chiffres et toutes les combinaisons de chiffres de son expansion décimale apparaissent avec la même fréquence, alors tous les textes qui ont déjà été écrits ou qui ne l'ont pas encore été, de même que toutes les paroles qui ont déjà été prononcées ou qui ne l'ont pas encore été, peuvent être retrouvés encodés dans sa séquence. La propriété de *normalité* n'a pas encore été démontrée, bien que l'on suspecte qu'elle soit valide. Cela signifie-t-il que toute la sagesse soit encodée dans un simple cercle? Non. La propriété n'a rien de particulier: elle s'applique également au nombre $0,12345678910111213141516171819202 1...$ et à de nombreux autres. Pouvez-vous en citer quelques exemples?

Défi 176 e

Par ailleurs, sur la courbe de la fonction exponentielle e^x, le point $(0, 1)$ est le seul point ayant deux coordonnées rationnelles. Si vous vous imaginez en train de marquer en bleu tous les points du plan ayant deux coordonnées rationnelles, le plan vous paraîtra quasiment entièrement bleu. Pourtant, la courbe ne passe que par un seul de ces points et parvient à éviter tous les autres.



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Annexe B

Les nombres et les espaces vectoriels

> A mathematician is a machine that transforms coffee into theorems.
>
> Paul Erdős**

Tous les concepts mathématiques peuvent s'exprimer en termes «d'ensembles» et de «relations». De nombreux concepts fondamentaux ont déjà été présentés dans les volumes précédents. Comment se fait-il, étant donné ces fondements simples, que les mathématiques puissent devenir une passion chez certaines personnes? Comment des ensembles et des relations peuvent-ils devenir le centre d'intérêt de la vie d'une personne? Les annexes mathématiques présentent quelques concepts avancés supplémentaires, aussi simplement et d'une manière aussi vivante que possible, pour tous ceux et celles qui veulent comprendre et ressentir la passion pour les mathématiques.

Vol. III, page 285

Ref. 170

Malheureusement, la passion pour les mathématiques n'est pas simple à repérer, parce que comme pour de nombreuses autres professions, les mathématiciens *cachent* eux-aussi leurs passions. En mathématiques, ceci se produit au travers du formalisme et en se détachant de façon apparente de l'intuition. Pourtant, un bon enseignement des mathématiques place l'intuition en premier. Dans cette annexe, nous allons introduire les structures *algébriques* les plus simples. Une annexe du prochain volume présentera quelques structures algébriques plus compliquées, puis, les structures *topologiques* les plus importantes. Le troisième type de structures mathématiques fondamentales, les structures *ordonnées*, n'est pas aussi important en physique (avec une exception: la définition des nombres réels contient une structure ordonnée).

Les mathématiciens s'intéressent non seulement à l'exploration des concepts, mais également à leur *classification*. Chaque fois qu'un nouveau concept mathématique est introduit, les mathématiciens tentent d'en classifier tous les cas et tous les types possibles. Cet objectif a été remplis de façon tout à fait spectaculaire pour les différents types de nombres, pour les groupes finis les plus simples et pour de nombreux types d'espaces et de variétés.

** «Un mathématicien est une machine qui transforme le café en théorèmes.» Paul Erdős (Budapest, 1913 – Varsovie, 1996).

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Les nombres en tant que structures mathématiques

Défi 177 pe

> A person who can solve $x^2 - 92y^2 = 1$ in less than a year is a mathematician.
>
> Brahmagupta*

Les enfants le savent: les nombres sont des entités que l'on peut additionner et multiplier. Les mathématiciens sont plus avisés. Tout système mathématique ayant les mêmes propriétés fondamentales que les *entiers naturels* s'appelle un *semi-anneau*. Tout système mathématique ayant les mêmes propriétés fondamentales que les *entiers relatifs*, s'appelle un *anneau*. (Les termes sont dus à David Hilbert. Les deux structures peuvent également être finies plutôt qu'infinies.) Plus précisément, un *anneau* $(R, +, \cdot)$ est un ensemble R d'éléments muni de deux opérations binaires, que l'on appelle l'*addition* et la *multiplication*, que l'on écrit habituellement + et · (le dernier symbole pouvant être simplement sous-entendu, donc sans notation explicite) et pour lesquelles les propriétés suivantes sont valides quels que soient les éléments $a, b, c \in R$:

— R est un groupe commutatif par rapport à l'addition, c.-à-d. $a + b \in R$, $a + b = b + a$, $a + 0 = a$, $a + (-a) = a - a = 0$ et $a + (b + c) = (a + b) + c$;
— la multiplication est une loi de composition interne dans R, c.-à-d. $ab \in R$;
— la multiplication est associative, c.-à-d. $a(bc) = (ab)c$;
— la multiplication est distributive par rapport à l'addition, c.-à-d. $a(b + c) = ab + ac$ et $(b + c)a = ba + ca$.

De nombreux auteurs ajoutent l'axiome suivant:

— la multiplication possède un élément neutre (ou élément unité), c.-à-d. $1a = a1 = a$.

Des propriétés servant à définir (telles que celles que l'on vient de citer) s'appellent des *axiomes*. Il faut bien comprendre que les axiomes *ne sont pas* des croyances fondamentales, tel qu'il est souvent affirmé ou sous-entendu. Les axiomes sont les propriétés fondamentales utilisées pour définir un concept: celui de l'anneau dans ce cas. Avec le dernier axiome, on parle également d'*anneau unitaire*.

Un *semi-anneau* est un ensemble qui satisfait tous les axiomes d'un anneau, excepté que l'existence d'un élément neutre et des éléments négatifs pour l'addition est remplacé par l'exigence plus faible que si $a + c = b + c$ alors $a = b$. En langage plus familier, un semi-anneau est un anneau «sans» éléments négatifs.

Pour incorporer la division et définir les nombres rationnels, il nous faut un autre concept. Un *corps* K est un anneau ayant

— un élément neutre 1 pour la multiplication, de sorte que tout élément a obéisse à $1a = a$;
— au moins un élément différent de zéro; et, le plus important
— un inverse (multiplicatif) a^{-1} pour tout élément $a \neq 0$.

Un anneau ou un corps est dit *commutatif* si la multiplication est commutative. Un corps non commutatif est aussi appelé un *corps gauche*. Les corps peuvent être finis ou infinis.

* «Une personne qui peut résoudre $x^2 - 92y^2 = 1$ en moins d'un an est un mathématicien.» Brahmagupta (Sindh, 598 – 668) (sous-entendu: résoudre pour des nombres entiers).

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

(Un corps ou un anneau se caractérise par sa *caractéristique p*, qui est le plus petit nombre de fois qu'il est nécessaire d'additionner 1 avec lui-même pour donner zéro. Si un tel nombre n'existe pas, la caractéristique est considérée égale à 0. La caractéristique p est toujours un nombre premier ou zéro.) Tout corps fini est commutatif. Dans un corps, toute équation du type $cx = b$ et $xc = b$ ($c \neq 0$) a des solutions pour x. De plus, la solution est unique si $b \neq 0$. Pour résumer, en langage commun et en se concentrant sur la propriété la plus importante, un corps est un ensemble d'éléments pour lesquels, outre l'addition, la soustraction et la multiplication, on définit également une *division* (par les éléments non nuls). Les *nombres rationnels* forment le corps le plus simple qui incorpore les entiers.

Le système des *nombres réels* est l'extension minimale des nombres rationnels qui soit complète et totalement ordonnée.* Pouvez-vous montrer que $\sqrt{2}$ est un nombre réel,
Défi 178 f mais pas un nombre rationnel?

En physique classique et en théorie quantique, on insiste toujours sur le fait que les résultats des mesures sont et doivent être des nombres réels. Mais tous les nombres réels peuvent-ils être des résultats de mesures? Autrement dit, est-ce que tous les résultats de
Défi 179 e mesure ne forment qu'un sous-ensemble des réels?

Cependant, le concept de «nombre» n'est pas limité à ces exemples. Il peut se gé-
Ref. 171 néraliser de plusieurs façons. La généralisation la plus simple s'obtient en étendant les nombres réels à des variétés de dimension supérieure à 1.

Les nombres complexes

Dans la nature, les nombres complexes sont un moyen utile pour décrire sous forme compacte des systèmes et des situations qui font intervenir une *phase*. Les nombres complexes sont donc utiles pour décrire tous les types d'ondes.

Les nombres complexes forment une variété de dimension 2. Un nombre complexe est défini, sous sa forme cartésienne, par $z = a + ib$, où a et b sont deux nombres réels, et i est un nouveau symbole, que l'on appelle l'*unité imaginaire*. Lorsqu'ils sont multipliés entre eux, les deux générateurs de nombres complexes, 1 et i, obéissent à

$$\begin{array}{c|cc} \cdot & 1 & i \\ \hline 1 & 1 & i \\ i & i & -1 \end{array} \qquad (120)$$

* Un ensemble est mathématiquement *complet* si les physiciens le qualifient de continu. Plus précisément, un ensemble de nombres est *complet* si tout sous-ensemble non vide ayant des majorants a une borne supérieure.

Un ensemble est *totalement ordonné* s'il existe une relation binaire $\leqslant$ entre les paires d'éléments telle que pour tout éléments a et b

— si $a \leqslant b$ et $b \leqslant c$, alors $a \leqslant c$;
— si $a \leqslant b$ et $b \leqslant a$, alors $a = b$;
— on a toujours soit $a \leqslant b$ soit $b \leqslant a$.

En résumé, un ensemble est totalement ordonné s'il existe une relation binaire qui permette de dire pour chaque couple d'éléments lequel est le prédécesseur de l'autre de façon cohérente. Ceci est la structure ordonnée fondamentale que l'on utilise en physique (et c'est également la seule).

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

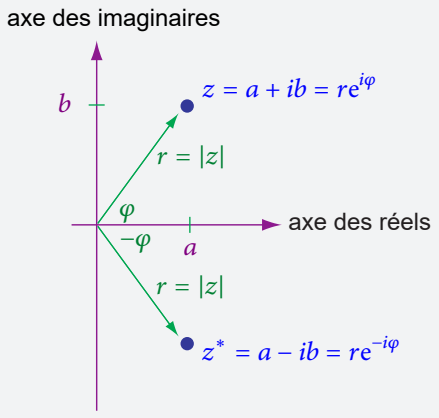


FIGURE 86 Les nombres complexes sont des points sur le plan de dimension 2. Un nombre complexe z et sont conjugué z^* peuvent être décrits sous leur forme cartésienne ou sous leur forme polaire.

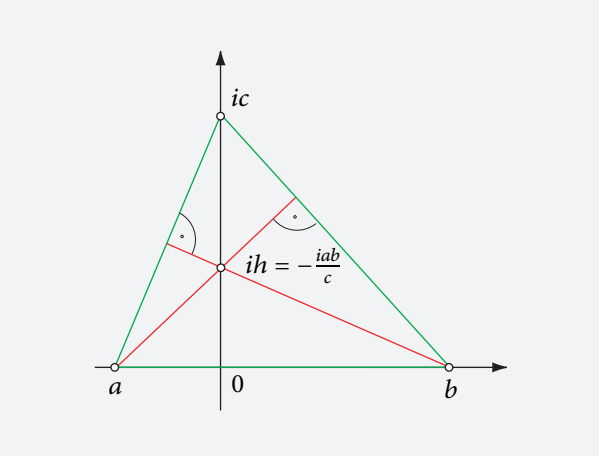


FIGURE 87 Une propriété des triangles facilement démontrable à l'aide des nombres complexes.

que l'on résume souvent en $i = +\sqrt{-1}$. Pour un nombre complexe $z = a + ib$, a s'appelle la *partie réelle* et b la *partie imaginaire*. Elles sont illustrées sur la Figure 86.

Le *complexe conjugué* z^*, que l'on écrit aussi $\bar{z}$, d'un nombre complexe $z = a + ib$ est défini par $z^* = a - ib$. La *valeur absolue* $|z|$ d'un nombre complexe est définie par $|z| = \sqrt{zz^*} = \sqrt{z^*z} = \sqrt{a^2 + b^2}$. Elle définit une *norme* sur l'espace vectoriel des nombres complexes. À partir de $|wz| = |w|\,|z|$ on en déduit le *théorème des deux carrés*:

$$(a_1^2 + a_2^2)(b_1^2 + b_2^2) = (a_1b_1 - a_2b_2)^2 + (a_1b_2 + a_2b_1)^2 \,. \tag{121}$$

Il est valide pour tous nombres réels a_i et b_i. Il était déjà connu, dans sa version pour les entiers, par Diophante d'Alexandrie au IIIe siècle de notre ère.

Les nombres complexes peuvent également s'écrire comme des paires ordonnées (a, A) de nombres réels, avec leur addition définie par $(a, A) + (b, B) = (a + b, A + B)$ et leur multiplication définie par $(a, A) \cdot (b, B) = (ab - AB, aB + bA)$. Cette notation nous permet d'identifier les nombres complexes avec les *points* d'un plan ou, si on préfère, les *flèches* d'un plan. Traduire la définition de la multiplication en un langage géométrique

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Défi 180 f nous permet de démontrer rapidement certains théorèmes géométriques, tel que celui de la Figure 87.

Les nombres complexes $a+ib$ peuvent également se représenter par des matrices 2×2

$$\begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix} \quad \text{avec} \quad a, b \in \mathbb{R} \,. \tag{122}$$

L'addition et la multiplication des matrices correspondent alors à l'addition et à la multiplication des nombres complexes. De cette façon, les nombres complexes peuvent se représenter par un type particulier de matrices réelles. À quoi correspond $|z|$ en termes
Défi 181 e de langage matriciel?

L'ensemble $\mathbb{C}$ des nombres complexes, muni de l'addition et de la multiplication telles que définies ci-dessus, forme un corps commutatif de dimension 2 ainsi qu'un espace
Page 265 vectoriel sur $\mathbb{R}$. Dans le corps des nombres complexes, l'équation quadratique $az^2+bz+c=0$, où z est l'inconnue, a toujours *deux* solutions (si $a \neq 0$ et en comptant les solutions
Défi 182 f multiples).

Les nombres complexes peuvent être utilisés pour décrire les points d'un plan. Une rotation autour de l'origine peut être décrite à l'aide de la multiplication par un nombre complexe de longueur unité. D'autres grandeurs de dimension 2 peuvent également être décrites en utilisant les nombres complexes. Les ingénieurs électriciens utilisent les nombres complexes pour décrire des grandeurs comportant des phases, tel que les courants alternatifs ou les champs électriques dans l'espace.

Écrire les nombres complexes de longueur unité sous la forme $\cos\theta + i\sin\theta$ est une méthode utile pour se rappeler les formules d'addition des angles. Puisque l'on a $\cos n\theta + i\sin n\theta = (\cos\theta + i\sin\theta)^n$, il est facile de déduire des formules telle que $\cos 2\theta = \cos^2\theta - \sin^2\theta$ et $\sin 2\theta = 2\sin\theta\cos\theta$. Par ailleurs, les nombres complexes de longueur unité
Défi 183 f
Défi 184 f forment le groupe de Lie SO(2)=U(1).

Tout nombre complexe peut s'écrire sous la forme

$$z = re^{i\varphi} \,. \tag{123}$$

Cette forme polaire de l'écriture des nombres complexes est la raison pour laquelle ils ont été introduits initialement. L'angle φ s'appelle la *phase* (ou encore l'argument [N.d.T.]); le nombre réel $r = |z|$ s'appelle la *valeur absolue* ou le *module* ou encore la *norme*. Lors de l'utilisation des nombres complexes pour décrire des oscillations ou des ondes, il est logique d'appeler r l'*amplitude*. La fonction exponentielle complexe est périodique de période $2\pi i$. Autrement dit, nous avons

$$e^1 = e^{1+2\pi i} \,, \tag{124}$$

qui montre la propriété à laquelle on s'attend pour un angle de phase.

Si on utilise la dernière équation deux fois, il est possible d'écrire

$$e^1 = e^{1+2\pi i} = (e^{1+2\pi i})^{1+2\pi i} = e^{(1+2\pi i)(1+2\pi i)} = e^{1-4\pi^2+4\pi i} = e^{1-4\pi^2} \,. \tag{125}$$

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Défi 185 f Oh là là, ceci implique $\pi = 0$! Qu'y a-t-il de faux ici?

Les nombres complexes peuvent également être utilisés pour décrire la géométrie plane euclidienne. Les rotations, les translations et autres isométries, mais aussi les réflexions, les réflexions glissées et les changements d'échelles se décrivent facilement par des opérations simples sur les nombres complexes qui représentent les coordonnées des points.

Par ailleurs, il y a exactement le même nombre de nombres complexes qu'il y a de
Défi 186 e nombres réels. Pouvez-vous le démontrer?

> Love is complex: it has real and imaginary parts.*
>
> Anonyme

Les quaternions

Les positions des points sur une lignes peuvent se décrire avec les nombres réels. Les nombres complexes peuvent être utilisés pour décrire les positions des points sur un plan. Il semble naturel d'essayer de généraliser l'idée d'un nombre pour un espace de dimension supérieure. Cependant, il se trouve qu'il n'est possible de définir aucun système de nombres utile dans un espace de dimension 3. Il est possible de construire un nouveau système de nombres, les *quaternions*, qui correspondent aux points d'un espace de dimension 4, mais seulement au prix du sacrifice de la commutativité de la multiplication. Aucun système de nombres utile ne peut être défini pour des dimensions autres que 1, 2 et 4.

Les quaternions ont été découverts par plusieurs mathématiciens au cours du XIXe siècle, parmi lesquels Hamilton,** qui les étudia durant une grande partie de sa vie. En fait, la théorie de l'électrodynamique de Maxwell avait été formulée en termes de qua-
Ref. 173 ternions avant que les vecteurs de dimension 3 ne soient utilisés.

Vol. V, page 358 Munis de la multiplication, les quaternions $\mathbb{H}$ forment une algèbre de dimension 4 sur les réels avec pour base $1, i, j, k$ satisfaisant:

$$\begin{array}{c|cccc} \cdot & 1 & i & j & k \\ \hline 1 & 1 & i & j & k \\ i & i & -1 & k & -j \\ j & j & -k & -1 & i \\ k & k & j & -i & -1 \end{array} \tag{126}$$

Ces relations sont également souvent écrites $i^2 = j^2 = k^2 = -1$, $ij = -ji = k$, $jk = -kj = i$, $ki = -ik = j$. Les quaternions $1, i, j, k$ sont également appelés les *unités de base* ou les *générateurs*. L'absence de symétrie par rapport à la diagonale du tableau montre la non-commutativité de la multiplication quaternionique. C'est avec les quaternions que l'idée d'un produit non-commutatif est apparue pour la première fois en mathématique. En revanche, la multiplication des quaternions *est* associative. Une conséquence de la

* «L'amour est complexe, il a des parties réelles et des parties imaginaires.»

** William Rowan Hamilton (Dublin, 1805 – Dunsink, 1865), enfant prodige et mathématicien célèbre, il donna leur nom aux quaternions d'après une expression de la Vulgate (Acte des Apôtres 12:4).

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

non-commutativité est que les équations polynomiales de quaternions ont beaucoup plus de solutions que celles des nombres complexes (recherchez simplement les solutions de l'équation $X^2 + 1 = 0$ pour vous en convaincre).

Défi 187 e

Tout quaternion X peut s'écrire sous la forme

$$X = x_0 + x_1 i + x_2 j + x_3 k = x_0 + \boldsymbol{v} = (x_0, x_1, x_2, x_3) = (x_0, \boldsymbol{v}) \,, \tag{127}$$

où x_0 s'appelle la *partie scalaire* et $\boldsymbol{v}$ la *partie vectorielle*. La multiplication est donc définie par $(x, \boldsymbol{v})(y, \boldsymbol{w}) = (xy - \boldsymbol{v} \cdot \boldsymbol{w}, x\boldsymbol{w} + y\boldsymbol{v} + \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{w})$. La multiplication de deux quaternions sous leur forme la plus générale peut s'écrire

$$\begin{aligned}(a_1, b_1, c_1, d_1)(a_2, b_2, c_2, d_2) = (a_1a_2 - b_1b_2 - c_1c_2 - d_1d_2 \,,\ a_1b_2 + b_1a_2 + c_1d_2 - d_1c_2,\\ a_1c_2 - b_1d_2 + c_1a_2 + d_1b_2, a_1d_2 + b_1c_2 - c_1b_2 + d_1a_2) \,.\end{aligned} \tag{128}$$

Le quaternion conjugué $\overline{X}$ est défini par $\overline{X} = x_0 - \boldsymbol{v}$, de sorte que $\overline{XY} = \overline{Y}\ \overline{X}$. La *norme* $|X|$ d'un quaternion X est définie par $|X|^2 = X\overline{X} = \overline{X}X = x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 = x_0^2 + \boldsymbol{v}^2$. La norme est multiplicative, c.-à-d. $|XY| = |X|\ |Y|$.

Contrairement aux nombres complexes, chaque quaternion est lié à son conjugué par la relation

$$\overline{X} = -\tfrac{1}{2}(X + iXi + jXj + kXk) \,. \tag{129}$$

Il n'existe pas de relation de ce type pour les nombres complexes. Dans le langage de la physique, un nombre complexe et son conjugué sont des variables indépendantes, alors que ce n'est pas le cas pour les quaternions. Par conséquent, les fonctions de quaternions sont moins utiles en physique que les fonctions de variables complexes.

La relation $|XY| = |X|\ |Y|$ implique le *théorème des quatre carrés*:

$$\begin{aligned}&(a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + a_4^2)(b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 + b_4^2)\\ &= (a_1b_1 - a_2b_2 - a_3b_3 - a_4b_4)^2 + (a_1b_2 + a_2b_1 + a_3b_4 - a_4b_3)^2\\ &+ (a_1b_3 + a_3b_1 + a_4b_2 - a_2b_4)^2 + (a_1b_4 + a_4b_1 + a_2b_3 - a_3b_2)^2\end{aligned} \tag{130}$$

qui est valide pour tous nombres réels a_i et b_i, et donc également pour n'importe quel ensemble de huit entiers. Il fut découvert en 1748 par Leonhard Euler (1707 – 1783) alors qu'il essayait de démontrer que tout entier était la somme de quatre carrés. (Ce dernier fait ne fut démontré qu'en 1770 par Joseph Lagrange.)

Hamilton pensait qu'un quaternion dont la partie scalaire était nulle, qu'il appelait simplement un *vecteur* (un terme qu'il inventa), pouvait être identifié à un vecteur de translation ordinaire en dimension 3. Mais ceci est faux. Un tel quaternion s'appelle aujourd'hui un quaternion *purement imaginaire*, ou *homogène*, ou simplement *imaginaire*. Le produit de deux quaternions purement imaginaires $V = (0, \boldsymbol{v})$ et $W = (0, \boldsymbol{w})$ est donné par $VW = (-\boldsymbol{v} \cdot \boldsymbol{w}, \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{w})$, où $\cdot$ dénote le produit scalaire et $\times$ dénote le produit vectoriel. Notez que tout quaternion peut s'écrire comme le rapport de deux quaternions purement imaginaires.

En réalité, un quaternion purement imaginaire $(0, \boldsymbol{v})$ ne se comporte pas comme un

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

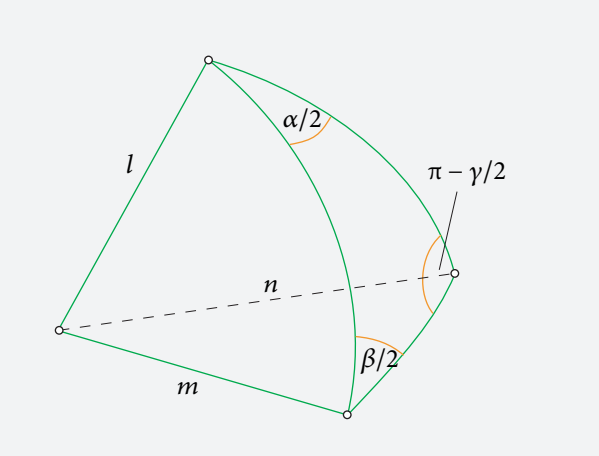


FIGURE 88 Combinaisons de rotations.

vecteur de translation lors des transformations de coordonnées. En fait, un quaternion purement imaginaire représente une *rotation* d'angle π ou 180° autour de l'axe défini par la direction $\boldsymbol{v} = (v_x, v_y, v_z)$.

Défi 188 pe

Il se trouve que dans un espace de dimension 3, une rotation *générale* autour de l'origine peut être décrite par un quaternion *unitaire* Q, que l'on appelle aussi un quaternion *normé*, pour lequel $|Q| = 1$. Un tel quaternion peut s'écrire $(\cos\theta/2, \boldsymbol{n}\sin\theta/2)$, où $\boldsymbol{n} = (n_x, n_y, n_z)$ est le vecteur normé décrivant la direction de l'axe de rotation et θ est l'angle de rotation. Un tel quaternion unitaire $Q = (\cos\theta/2, \boldsymbol{n}\sin\theta/2)$ fait tourner un quaternion purement imaginaire $V = (0, \boldsymbol{v})$ en un autre quaternion purement imaginaire $W = (0, \boldsymbol{w})$ obtenu par

$$W = QVQ^* \,. \tag{131}$$

Donc, si on utilise des quaternions purement imaginaires tels que V et W pour décrire les positions, on peut utiliser les quaternions unitaires pour décrire les rotations et pour calculer les transformations de coordonnées. La concaténation de deux rotations s'obtient alors par le produit des quaternions unitaires correspondants. En effet, une rotation d'angle α autour d'un axe $\boldsymbol{l}$ suivi d'une rotation d'angle β autour d'un axe $\boldsymbol{m}$ produit une rotation d'un angle γ autour d'un axe $\boldsymbol{n}$, avec les valeurs déterminées par

$$(\cos\gamma/2, \boldsymbol{n}\sin\gamma/2) = (\cos\beta/2, \boldsymbol{m}\sin\beta/2)(\cos\alpha/2, \boldsymbol{l}\sin\alpha/2) \,. \tag{132}$$

Une façon de montrer le résultat graphiquement est donné par la Figure 88. En traçant un triangle sur une sphère de rayon 1, et en prenant soin de se rappeler du facteur 1/2 pour les angles, la combinaison de deux rotations se détermine simplement.

L'interprétation des quaternions comme étant des rotations, est également illustrée, d'une façon quelque peu différente, par le mouvement de n'importe quelle main. Pour vous en rendre compte, prenez un marqueur vert et écrivez les lettres 1, i, j et k sur votre main, comme le montre la Figure 89. En définissant les trois axes possibles pour des rotations de 180° comme ils sont positionnés sur la figure, et en utilisant la concaténation comme multiplication, le mouvement de la main droite suit les mêmes «lois» que celles

Ref. 174

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

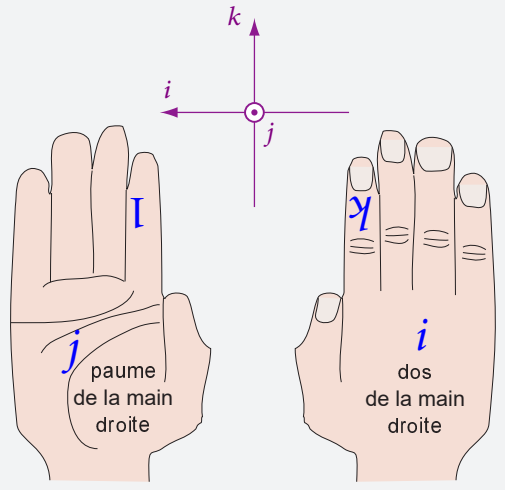


FIGURE 89 La paume et le dos de la main droite, et les quaternions.

Défi 189 f

des quaternions unitaires purement imaginaires. (Il faut distinguer $+i$ et $-i$, de même que pour les autres unités, par le sens de la torsion du bras. Le résultat d'une multiplication est la lettre qui peut être lue par une personne qui vous fait face.) Vous pouvez montrer

Défi 190 e

que $i^2 = j^2 = k^2 = -1$, que $i^4 = 1$, et vous pouvez retrouver toutes les autres relations des quaternions. Le modèle montre également que l'angle de rotation du bras est la moitié de l'angle de rotation du quaternion correspondant. Autrement dit, les quaternions peuvent être utilisés pour décrire le tour (l'astuce) de la ceinture, si on considère que la multiplication VW de deux quaternions signifie que la rotation V se produit *après* la

Page 147

rotation W. Les quaternions, comme les mains humaines, se comporte donc comme des particules de spin 1/2. Les quaternions et les spineurs sont isomorphes.

La raison du comportement des rotations en demi-angle peut se préciser plus en détails en utilisant le langage mathématique. Les rotations autour d'un point en dimension 3 forment le «groupe spécial orthogonal» de dimension 3, que l'on appelle SO(3). Mais les mouvements d'une main attachée à une épaule par un bras forment un groupe différent, isomorphe au groupe de Lie SU(2). La différence est due à l'apparition des demi-angles dans la paramétrisation des rotations. En effet, les paramétrisations ci-dessus impliquent qu'une rotation de 2π corresponde à une multiplication par -1. Ce n'est seulement qu'au XXe siècle que l'on s'est rendu compte qu'il existait des observables physiques fondamentales qui se comportaient comme des mains attachées à des bras: on les appelle des *spineurs*. Vous trouverez plus de détails sur les spineurs dans la section sur

Vol. V, page 369

Page 147

les symétries de permutations, où les ceintures sont utilisées comme analogie, de même que les bras. En bref, le groupe SU(2) formé des quaternions unitaires est le *revêtement*

Ref. 175

double du groupe de rotations SO(3).

La représentation simple des rotations et des positions à l'aide des quaternions est utilisée dans les programmes informatiques en robotique, en astronomie et dans les simulateurs de vol. Dans les logiciels utilisés pour créer des images ou des animations en trois dimensions (les logiciels de visualisation), les quaternions sont souvent utilisés pour calculer la trajectoire que suivent les rayons lumineux qui se réfléchissent de nombreuses fois, ce qui donne ainsi une apparence réaliste aux surfaces.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

L'algèbre des quaternions est la seule algèbre normée, associative, non-commutative et de dimension finie sur le corps des nombres réels ayant un élément unité. Les quaternions forment un corps non-commutatif, c.-à-d. un corps gauche, pour lequel l'inverse d'un quaternion X est $\overline{X}/|X|$. On peut donc définir une division pour les quaternions (tout en prenant soin de distinguer XY^{-1} et $Y^{-1}X$). Par conséquent, on dit que les quaternions forment une *algèbre à division*. En fait, les quaternions $\mathbb{H}$, les nombres complexes $\mathbb{C}$ et les nombres réels $\mathbb{R}$ sont les trois seules algèbres à division de dimension finie et associatives. Autrement dit, le corps gauche des quaternions est la seule algèbre de dimension finie, réelle, associatives et non-commutative sans diviseur de zéro. Le *centre* des quaternions, c.-à-d. l'ensemble des quaternions qui commutent avec tous les autres quaternions, est simplement l'ensemble des nombres réels.

Les quaternions peuvent se représenter par des matrices de la forme

$$\begin{pmatrix} A & B \\ -B^* & A^* \end{pmatrix} \quad \text{avec} \quad A, B \in \mathbb{C} \quad \text{donc} \quad A = a + ib, B = c + id \,, \tag{133}$$

ou, alternativement, par

$$\begin{pmatrix} a & b & c & d \\ -b & a & -d & c \\ -c & d & a & -b \\ -d & -c & b & a \end{pmatrix} \quad \text{avec} \quad a, b, c, d \in \mathbb{R} \,, \tag{134}$$

où le quaternion X est alors donné par $X = A + Bj = a + ib + jc + kd$. L'addition et la multiplication des matrices correspondent alors à l'addition et à la multiplication des quaternions.

Les générateurs des quaternions peuvent s'obtenir par

$$1 : \sigma_0 \quad , \quad i : -i\sigma_1 \quad , \quad j : -i\sigma_2 \quad , \quad k : -i\sigma_3 \,, \tag{135}$$

où les σ_n sont les matrices de spin de Pauli.*

Les représentations réelles 4×4 ne sont pas uniques, comme le montre la représentation alternative suivante.

$$\begin{pmatrix} a & b & -d & -c \\ -b & a & -c & d \\ d & c & a & b \\ c & -d & -b & a \end{pmatrix} \tag{137}$$

Défi 191 pe Aucune représentation des quaternions par des matrices 3×3 n'est possible.

* Les *matrices de spin de Pauli* sont les matrices hermitiennes complexes

$$\sigma_0 = \mathbf{1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad , \quad \sigma_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad , \quad \sigma_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \quad , \quad \sigma_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \tag{136}$$

qui ont toutes pour valeurs propres ± 1. Elles satisfont les relations $[\sigma_i, \sigma_k]_+ = 2\,\delta_{ik}$ et $[\sigma_i, \sigma_k] = 2i\,\varepsilon_{ikl}\,\sigma_l$. Les combinaisons linéaires $\sigma_\pm = \frac{1}{2}(\sigma_1 \pm \sigma_2)$ sont aussi fréquemment utilisées. Par ailleurs, une autre représentation possible des quaternions est $i : i\sigma_3$, $j : i\sigma_2$, $k : i\sigma_1$.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Ces matrices contiennent des éléments réels et complexes, qui ne présentent aucuns problèmes particuliers. Par contre, quand on construit des matrices avec des éléments quaternioniques, il faut faire attention, parce que la multiplication quaternionique n'est pas commutative, de sorte que certaines relations simples, tel que $\mathrm{tr}AB = \mathrm{tr}BA$, ne sont en général *pas* valides.

Que peut-on apprendre des quaternions concernant la description de la nature? Tout d'abord, nous voyons que les rotations binaires sont similaires aux positions, et donc aux translations: toutes sont représentées par des vecteurs de dimension 3. Les rotations sont-elles les opérations fondamentales de la nature? Est-il possible que les translations ne soient que les «ombres» des rotations? Le lien entre les translations et les rotations est étudié dans le dernier volume de notre ascension de la montagne.

Vol. VI, page 174

Lorsque Maxwell écrivait ses équations de l'électrodynamique, il utilisait la notation des quaternions. (La notation d'aujourd'hui utilisant des vecteurs de dimension 3, fut introduite plus tard par Hertz et Heaviside.) Les équations peuvent s'écrire de différentes façons en utilisant les quaternions. La plus simple est celle qui consiste à garder la distinction entre $\sqrt{-1}$ et les unités i, j, k des quaternions. Il est alors possible d'écrire toute l'électrodynamique en une équation simple:

Vol. III, page 76

Ref. 173

Défi 192 e

$$\mathrm{d}F = -\frac{Q}{\varepsilon_0} \tag{138}$$

dans laquelle F est le champ électrodynamique généralisé et Q la charge généralisée. Ils sont définis par

$$\begin{aligned} F &= E + \sqrt{-1}\,cB \\ E &= iE_x + jE_y + kE_z \\ B &= iB_x + jB_y + kB_z \\ \mathrm{d} &= \delta + \sqrt{-1}\,\partial_t/c \\ \delta &= i\partial_x + j\partial_y + k\partial_z \\ Q &= \rho + \sqrt{-1}\,J/c \end{aligned} \tag{139}$$

où les champs E et B et les distributions de charge ρ et J ont les significations habituelles. Le contenu de l'équation (138) pour le champ électromagnétique est exactement le même que la formulation habituelle.

Malgré leur charme et le fait qu'ils soient de dimension 4, les quaternions ne semble pas être d'une grande utilité pour la reformulation de la relativité restreinte. La raison principale à ceci est le signe dans l'expression de leur norme. Par conséquent, la relativité et l'espace-temps sont généralement décrits en utilisant les nombres réels. Et même si les quaternions étaient utiles, ils n'apporteraient pas d'éléments supplémentaires à la compréhension de la physique ou de la nature.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Les octonions

De la même façon que les quaternions sont construits à partir des nombres complexes, les *octonions* peuvent se construire à partir des quaternions. Ils ont été étudiés pour la première fois par Arthur Cayley (1821 – 1895). Munis de la multiplication, les *octonions* (que l'on appelle encore les *octaves*) sont les éléments d'une algèbre de dimension 8 sur les réels avec les générateurs $1, i_n$ pour $n = 1 \dots 7$ satisfaisant:

$\cdot$	1	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6	i_7
1	1	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6	i_7
i_1	i_1	-1	i_3	$-i_2$	i_5	$-i_4$	i_7	$-i_6$
i_2	i_2	$-i_3$	-1	i_1	$-i_6$	i_7	i_4	$-i_5$
i_3	i_3	i_2	$-i_1$	-1	i_7	i_6	$-i_5$	$-i_4$
i_4	i_4	$-i_5$	i_6	$-i_7$	-1	i_1	$-i_2$	i_3
i_5	i_5	i_4	$-i_7$	$-i_6$	$-i_1$	-1	i_3	i_2
i_6	i_6	$-i_7$	$-i_4$	i_5	i_2	$-i_3$	-1	i_1
i_7	i_7	i_6	i_5	i_4	$-i_3$	$-i_2$	$-i_1$	-1

(140)

En fait, 479 autres tables de multiplication équivalentes sont également possibles. Cette algèbre s'appelle l'*algèbre de Cayley*; elle a un élément unité et une division unique. L'algèbre n'est pas commutative, et n'est pas non plus associative. En revanche, elle est *alternative*, ce qui signifie que pour tout éléments x et y, on a $x(xy) = x^2 y$ et $(xy)y = xy^2$: une propriété quelque peu plus faible que l'associativité. C'est la seule algèbre réelle, alternative, de dimension 8 n'ayant pas de diviseurs de zéro. Parce qu'il n'est pas associatif, l'ensemble $\mathbb{O}$ de tous les octonions ne constitue pas un corps, ni même un anneau, de sorte que l'ancienne désignation de «nombres de Cayley» a été abandonnée. Les octonions sont les «nombres» hypercomplexes les plus généraux dont la norme est multiplicative. Ses générateurs obéissent à $(i_n i_m) i_l = \pm i_n (i_m i_l)$, où le signe moins, qui montre la non-associativité, est valide pour les combinaisons d'indices qui ne sont pas quaternioniques, tel que 1-2-4.

Les octonions peuvent se représenter par des matrices de la forme

$$\begin{pmatrix} A & B \\ -\bar{B} & \bar{A} \end{pmatrix} \text{ où } A, B \in \mathbb{H}\,, \quad \text{ou encore par des matrices réelles } 8 \times 8. \tag{141}$$

La multiplication des matrices donne alors le même résultat que la multiplication des octonions.

La relation |wz|=|w||z| nous permet de déduire l'impressionnant]théorème des huit

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

carrés:

$$\begin{aligned}(a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + a_4^2 + a_5^2 + a_6^2 + a_7^2 + a_8^2)(b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 + b_4^2 + b_5^2 + b_6^2 + b_7^2 + b_8^2) \\ = (a_1b_1 - a_2b_2 - a_3b_3 - a_4b_4 - a_5b_5 - a_6b_6 - a_7b_7 - a_8b_8)^2 \\ + (a_1b_2 + a_2b_1 + a_3b_4 - a_4b_3 + a_5b_6 - a_6b_5 + a_7b_8 - a_8b_7)^2 \\ + (a_1b_3 - a_2b_4 + a_3b_1 + a_4b_2 - a_5b_7 + a_6b_8 + a_7b_5 - a_8b_6)^2 \\ + (a_1b_4 + a_2b_3 - a_3b_2 + a_4b_1 + a_5b_8 + a_6b_7 - a_7b_6 - a_8b_5)^2 \\ + (a_1b_5 - a_2b_6 + a_3b_7 - a_4b_8 + a_5b_1 + a_6b_2 - a_7b_3 + a_8b_4)^2 \\ + (a_1b_6 + a_2b_5 - a_3b_8 - a_4b_7 - a_5b_2 + a_6b_1 + a_7b_4 + a_8b_3)^2 \\ + (a_1b_7 - a_2b_8 - a_3b_5 + a_4b_6 + a_5b_3 - a_6b_4 + a_7b_1 + a_8b_2)^2 \\ + (a_1b_8 + a_2b_7 + a_3b_6 + a_4b_5 - a_5b_4 - a_6b_3 - a_7b_2 + a_8b_1)^2 \end{aligned} \tag{142}$$

qui est valide pour tous nombres réels a_i et b_i et donc en particulier pour tous les entiers. (Il existe de nombreuses variantes de cette expression, avec différentes combinaisons possibles pour les signes.) Le théorème a été découvert en 1818 par Carl Ferdinand Degen (1766 – 1825), puis ensuite redécouvert en 1844 par John Graves et en 1845 par Arthur Cayley. Il n'existe pas de généralisation pour un nombre plus élevé de carrés, un fait démontré par Adolf Hurwitz (1859 – 1919) en 1898.

Les octonions peuvent être utilisés pour montrer qu'un produit vectoriel peut être défini dans des espaces de dimension supérieure à 3. Un produit vectoriel est une opération $\times$ (noté également $\cap$ dans la littérature française [N.d.T.]) satisfaisant

$$\begin{aligned} u \times v = -v \times u \quad & \textit{anticommutativité} \\ (u \times v)\, w = u\, (v \times w) \quad & \textit{règle d'échange.} \end{aligned} \tag{143}$$

En utilisant la définition

$$X \times Y = \frac{1}{2}(XY - YX)\ , \tag{144}$$

les produits vectoriels de quaternions purement imaginaires, c.-à-d. de quaternions de type $(0, \boldsymbol{u})$, sont eux aussi purement imaginaires, et correspondent au produit vectoriel usuel en dimension 3, satisfaisant donc à (143). Il est intéressant de noter qu'il est également possible d'utiliser la définition (144) pour les *octonions*. Dans ce cas, le produit d'octonions purement imaginaires est aussi purement imaginaire, et (143) est à nouveau satisfaite. Il se trouve que ceci est le seul autre exemple non trivial de produit vectoriel.

Ref. 171
Défi 193 f

En résumé, *le produit vectoriel n'existe qu'en dimension* 3 *et en dimension* 7. De nombreux érudits ont conjecturé que cette relation pouvait avoir un rapport avec la possibilité que la nature puisse être de dimension 10. Cependant, ces spéculations n'ont pas rencontré beaucoup de succès.

Les symétries des forces de la nature conduisent à une question bien connue. Les nombres complexes unitaires forment le groupe de Lie U(1) et les quaternions unitaires forment le groupe de Lie SU(2). Est-ce que les octonions unitaires forment le groupe de Lie SU(3)?

Défi 194 e

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

D'AUTRES TYPES DE NOMBRES

Le processus de construction de nouveaux systèmes de «nombres» hypercomplexes (de nouvelles algèbres réelles) en «doublant» un système existant, peut se répéter à l'infini. Cependant, les octonions, les *sédénions* et tous les doublements suivants sont ni des anneaux ni des corps, mais seulement des algèbres non associatives ayant un élément unité. D'autres algèbres de dimension finie sur les réels et ayant un élément unité (que l'on appelait autrefois des «nombres» hypercomplexes) peuvent également être définies. Ce sont par exemple les ensembles que l'on appelle «nombres duaux», «nombres doubles», «nombres de Clifford-Lifshitz», etc. Ces algèbres ne jouent aucun rôle en physique.

Les mathématiciens ont également défini des corps de nombres qui sont de dimension «un et un chouïa», tels que les corps de nombres algébriques. Il existe également une
Ref. 176 généralisation du concept d'entiers au domaine complexe: les *entiers!de Gauss*, définis par $n+im$, où n et m sont des entiers ordinaires. Gauss avait même défini ce qui est connu
Défi 195 e aujourd'hui comme les *nombres premiers de Gauss*. (Pouvez-vous trouver comment?) Ils ne sont pas utilisés pour la description de la nature, mais sont importants en théorie des nombres, qui explore les propriétés des entiers.

Les physiciens avaient l'habitude d'appeler les opérateurs de la mécanique quantique les «nombres q». Mais ce terme n'est plus de mode aujourd'hui.

Une autre façon d'étendre les nombres naturels est de leur ajouter des nombres plus
Ref. 177 grands que l'infini. Les plus importantes catégories de ses *nombres transfinis* sont les nombres *ordinaux* transfinis, les nombres *cardinaux* transfinis et les *nombres surréels*.
Vol. III, page 293 Les nombres ordinaux transfinis sont essentiellement une extension des entiers au-delà de l'infini, alors que les nombres surréels sont une extension continue des réels, également au-delà de l'infini. Pour parler plus simplement: parmi les nombres transfinis, les nombres ordinaux transfinis jouent un rôle similaire à celui que les entiers jouent parmi les nombres réels: les nombres surréels comblent les trous entre les ordinaux transfinis, tout comme les réels le font pour les entiers. Il est intéressant de noter que de nombreuses séries qui divergent dans $\mathbb{R}$ convergent dans l'ensemble des nombres surréels. Pouvez-
Défi 196 pe vous trouver un exemple?

Les nombres surréels incluent les nombres infiniment petits, tout comme le font les
Ref. 171 nombres de l'*analyse non standard*, que l'on appelle également les *nombres hyperréels*. Dans les deux systèmes de nombres, au contraire des nombres réels, les nombres 1 et $0,999\,999\ldots$ (où l'on suppose une suite infinie, mais hyperfinie, de neuf) ne coïncident
Vol. III, page 295 pas, mais sont séparés par un nombre infini d'autres nombres. Nous avons exploré les nombres surréels un peu plus tôt. Les nombres non standards permettent de définir la
Ref. 172 notion d'infinitésimal que l'on utilise en calcul intégral et différentiel, même au lycée.

DES ESPACES VECTORIELS AUX ESPACES DE HILBERT

Les espaces vectoriels (parfois appelés *espaces linéaires*) sont des généralisations mathématiques de certains aspects de l'espace de dimension 3 intuitif. Un ensemble dont les éléments peuvent être additionnés deux par deux et peuvent être multipliés individuellement par un nombre, s'appelle un espace vectoriel si les résultats font également partie de l'ensemble et si les règles usuelles de calcul s'appliquent.

Plus précisément, un *espace vectoriel* sur un corps K est un ensemble d'éléments, appelés *vecteurs*, pour lesquels une addition vectorielle et une *multiplication par un scalaire*

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

sont définies, de sorte que pour tout vecteurs a, b, c et pour tout nombre s et r de K on a

$$\begin{aligned}
(a+b)+c = a+(b+c) = a+b+c &\quad \textit{associativité de l'addition des vecteurs} \\
n+a = a &\quad \textit{existence d'un vecteur nul} \\
(-a)+a = n &\quad \textit{existence d'un vecteurs opposé} \\
1a = a &\quad \textit{régularité de la multiplication par un scalaire} \\
(s+r)(a+b) = sa+sb+ra+rb &\quad \textit{distributivité complète de la multiplication par un scalaire}
\end{aligned} \tag{145}$$

Si le corps K, dont les éléments sont appelés des *scalaires* dans ce contexte, est choisis comme étant celui des nombres réels (ou des nombres complexes, ou des quaternions), on parle alors d'espace vectoriel réel (ou complexe, ou quaternionique). Les espaces vectoriels sont parfois appelés *espace vectoriel!linéaires* ou simplement *espaces linéaires*.

Les nombre complexes, l'ensemble de toutes les fonctions réelles définies sur la droite des réels, l'ensemble de tous les polynôme, l'ensemble des matrices ayant un nombre de lignes et un nombre de colonnes donnés, forment tous des espaces vectoriels. En mathématiques, un vecteur est donc un concept beaucoup plus général qu'en physique. (Quel est l'espace vectoriel mathématique le plus simple possible?)

Défi 197 e

En physique, le terme «vecteur» est réservé aux éléments d'espaces vectoriels d'un type plus spécialisé, du fait qu'il possède une norme dérivant d'un produit scalaire. Pour pouvoir les définir, nous avons d'abord besoin du concept d'espace métrique.

Un *espace!métrique* est un ensemble muni d'une métrique, c.-à-d. un moyen de définir des distances entre ses éléments. Une fonction réelle $d(a,b)$ entre éléments s'appelle une métrique si

$$\begin{aligned}
d(a,b) \geqslant 0 &\quad \textit{positivité de la métrique} \\
d(a,b)+d(b,c) \geqslant d(a,c) &\quad \textit{inégalité triangulaire} \\
d(a,b) = 0 \quad \text{si et seulement si} \quad a = b &\quad \textit{régularité de la métrique}
\end{aligned} \tag{146}$$

Un exemple non trivial est le suivant. Nous définissons une distance spéciale d entre villes. Si les deux villes se situent sur une ligne qui passe par Paris, nous utilisons la distance usuelle. Dans tous les autres cas, nous définissons la distance d comme étant la plus courte distance lorsque l'on voyage d'une ville à l'autre via Paris. Cette méthode étrange définit une métrique entre toutes les villes de France, que l'on appelle la *distance ferroviaire française*.

Défi 198 e

Un espace vectoriel *normé* est un espace vectoriel muni d'une norme (ou «longueur») associée à chaque vecteur. Une *norme* est un nombre positif ou nul $\|a\|$ défini pour chaque vecteur a et ayant les propriétés

$$\begin{aligned}
\|ra\| = |r|\,\|a\| &\quad \textit{linéarité de la norme} \\
\|a+b\| \leqslant \|a\| + \|b\| &\quad \textit{inégalité triangulaire} \\
\|a\| = 0 \quad \text{seulement si} \quad a = 0 &\quad \textit{régularité.}
\end{aligned} \tag{147}$$

En règle générale, il existe de nombreuses façons de définir une norme pour un espace vectoriel donné. Notez qu'il est toujours possible de définir une métrique à partir d'une

Défi 199 pe

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

norme en posant

$$d(a,b) = \|a - b\| \tag{148}$$

de sorte que tous les espaces normés sont également des espaces métriques. Ceci est la définition de la distance *naturelle* (contrairement aux distances non naturelles telle que celle que nous avons définie ci-dessus entre les villes françaises).

La norme est souvent définie à l'aide d'un produit scalaire. En effet, la classe d'espaces vectoriels la plus intéressante est celle des *espaces vectoriels munis d'un produit scalaire*[*] $\cdot$ (qui ne doit pas être confondu avec la multiplication par un scalaire!) qui associe un nombre à toute paire de vecteurs. Un espace vectoriel munis d'un produit scalaire sur $\mathbb{R}$ satisfait

$$\begin{aligned}
a \cdot b &= b \cdot a && \textit{commutativité du produit scalaire} \\
(ra) \cdot (sb) &= rs(a \cdot b) && \textit{bilinéarité du produit scalaire} \\
(a+b) \cdot c &= a \cdot c + b \cdot c && \textit{distributivité à droite du produit scalaire} \\
a \cdot (b+c) &= a \cdot b + a \cdot c && \textit{distributivité à gauche du produit scalaire} \\
a \cdot a &\geqslant 0 && \textit{positivité du produit scalaire} \\
a \cdot a = 0 \quad &\text{si et seulement si} \quad a = 0 && \textit{régularité du produit scalaire}
\end{aligned} \tag{149}$$

pour tout vecteur a, b, c et pour tout scalaire r, s. Un espace vectoriel *réel* de dimension finie munis d'un produit scalaire s'appelle également un *espace vectoriel!euclidien*. L'ensemble de toutes les vitesses, l'ensemble de toutes les positions, ou l'ensemble de toutes les quantités de mouvement forment de tels espaces.

Un espace vectoriel munis d'un produit scalaire sur $\mathbb{C}$ satisfait[**]

$$\begin{aligned}
a \cdot b &= \overline{b \cdot a} = \overline{b} \cdot \overline{a} && \textit{propriété hermitienne} \\
(ra) \cdot (sb) &= r\overline{s}(a \cdot b) && \textit{sesquilinéarité du produit scalaire} \\
(a+b) \cdot c &= a \cdot c + b \cdot c && \textit{distributivité à droite du produit scalaire} \\
a \cdot (b+c) &= a \cdot b + a \cdot c && \textit{distributivité à gauche du produit scalaire} \\
a \cdot a &\geqslant 0 && \textit{positivité du produit scalaire} \\
a \cdot a = 0 \quad &\text{si et seulement si} \quad a = 0 && \textit{régularité du produit scalaire}
\end{aligned} \tag{150}$$

pour tout vecteur a, b, c et tout scalaire r, s. Un espace vectoriel *complexe* de dimension finie munis d'un produit scalaire s'appelle également un espace vectoriel *unitaire* ou *hermitien*. Si l'espace vectoriel muni d'un produit scalaire est *complet*, il est appelé *espace!de Hilbert*, tout particulièrement dans le cas d'un espace complexe de dimension infinie. L'espace de tous les états possibles d'un système quantique constitue un espace de Hilbert.

Page 254

Tous les espaces vectoriels munis d'un produit scalaire sont aussi des espaces mé-

[*] Le produit scalaire est parfois appelé *produit intérieur* [N.d.T.].

[**] Il existe deux formes non-équivalentes de l'axiome de sesquilinéarité. La seconde est $(ra)\cdot(sb) = \overline{r}s(a\cdot b)$. Le terme sesquilinéaire vient du latin et signifie «une fois et demie linéaire».

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

triques, et donc également des espaces normés, si la métrique est définie par

$$d(a,b) = \sqrt{(a-b)\cdot(a-b)}\,. \tag{151}$$

Ce n'est que dans ce contexte d'espace vectoriel muni d'un produit scalaire que l'on peut parler d'angles (ou de différence de phase) entre des vecteurs, comme on en a l'habitude en physique. Bien sûr, tout comme pour les espaces normés, les espaces vectoriels munis d'un produit scalaire nous permettent également de parler de la longueur des vecteurs et de définir une *base* (le concept mathématique nécessaire pour définir un système de coordonnées). Quels sont les espaces vectoriels, ou les espaces vectoriels munis d'un produit scalaire, qui sont importants en physique?

Défi 200 e

La *dimension* d'un espace vectoriel est le nombre de vecteurs de base linéairement indépendants. Pouvez-vous définir ces termes plus précisément?

Défi 201 e

Un *espace!de Hilbert* est un espace vectoriel réel ou complexe muni d'un produit scalaire, qui est aussi un espace métrique *complet*. Autrement dit, dans un espace de Hilbert, les distances varient de façon continue et se comportent comme on peut s'y attendre naïvement. Les espaces de Hilbert ont en général, mais pas tout le temps, un nombre infini de dimensions.

La définition des espaces de Hilbert et des espaces vectoriels suppose dès le départ des ensembles continus. Si la nature n'était pas continue, pourrions-nous encore utiliser le concept?

Défi 202 e

Curiosités mathématiques et défis amusants

Les mathématiques produisent de nombreux résultats contre-intuitifs. La lecture d'un bon livre sur le sujet, tel que celui de Bernard R. Gelbaum & John M. H. Olmsted, *Theorems and Counterexamples in Mathematics*, Springer, 1993, peut vous aider à affiner votre esprit et à vous faire savourer encore plus la beauté des mathématiques.

* *

Il est possible de tracer une courbe qui passe par tous les points d'un carré ou par tous les points d'un cube. Ceci est démontré, par exemple, dans le texte de Hans Sagan, *Space Filling Curves*, Springer Verlag, 1994. Par conséquent, la distinction entre une, deux et trois dimensions n'est pas nette en mathématiques pures. En revanche, en physique, les dimensions sont bel et bien clairement définies: chaque objet de la nature a trois dimensions.

Défi 203 f

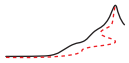
* *

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Défi 204 pe Montrez que deux opérateurs A et B obéissent à

$$\begin{aligned} e^A e^B = \exp(A + B + \frac{1}{2}[A, B] \\ + \frac{1}{12}[[A, B], B] - \frac{1}{12}[[A, B], A] \\ - \frac{1}{48}[B, [A, [A, B]]] - \frac{1}{48}[A, [B, [A, B]]] \\ + \ldots) \end{aligned} \tag{152}$$

pour la plupart des opérateurs A et B. Ce résultat est souvent appelé la *formule de Baker-Campbell-Hausdorff* (ou *formule BCH*).



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Indices et solutions des défis

> Never make a calculation before you know the answer.*
>
> Devise de John Wheeler

Défi 1, page 10: N'hésitez pas à être exigeants et stricts. La prochaine édition du texte en bénéficiera.

Défi 2, page 18: La physique classique ne permet d'expliquer aucune des propriétés des matériaux, telle que la couleur ou la rugosité. Les propriétés des matériaux résultent des interactions de la nature et sont donc inévitablement quantiques. Les explications des propriétés des matériaux nécessitent, sans exception, l'utilisation des particules et de leurs propriétés quantiques.

Défi 3, page 19: La physique classique permet à n'importe quelle observable de changer sa valeur *de façon continue, sans échelons* au cours du temps. En physique classique, il n'y a pas de valeur minimale pour les grandeurs physiques observables.

Défi 4, page 21: Parce que l'action est une masse multipliée par une vitesse multipliée par une distance, plus la masse est élevée, moins le quantum d'action introduit de flou dans le mouvement: pour une masse importante, les variations sur la vitesse et sur la distance sont faibles.

Défi 5, page 22: La durée la plus simple est $\sqrt{G\hbar/c^5}$. Le facteur numérique n'est bien évidement pas établi et sera changé un peu plus tard. En utilisant $4G$ au lieu de G cette durée devient le plus petit intervalle de temps qu'il soit possible de mesurer dans la nature.

Défi 7, page 23: La charge de l'électron est particulière aux interactions électromagnétiques: elle ne prend pas en compte les interactions nucléaires ni la gravité. La raison pour laquelle la longueur définie avec la charge élémentaire e devrait être importante pour les systèmes neutres ou pour l'espace vide n'est pas clairement établie. D'un autre côté, le quantum d'action $\hbar$ est valide pour *toutes* les interactions et pour *toutes* les observations.

De plus, il est possible de soutenir que les deux options pour définir la longueur fondamentale (avec le quantum d'action ou avec le quantum de charge) ne sont pas si différentes l'une de l'autre: la charge de l'électron est liée au quantum d'action par la relation $e = \sqrt{4\pi\varepsilon_0 \alpha c \hbar}$. Les deux échelles de longueur définies par chacune des deux options diffèrent seulement par un facteur d'environ $11,7$. Il se trouve que les deux échelles sont des échelles *quantiques*.

Défi 8, page 23: Sur un plan purement dimensionnel, le rayon d'un atome doit être

$$r \approx \frac{\hbar^2 4\pi\varepsilon_0}{m_e e^2} \,, \tag{153}$$

Page 211 ce qui fait environ 53 nm. Il se trouve que cette estimation est excellente: ce n'est autre que le rayon de Bohr.

* «Ne faites jamais de calcul avant de connaître la réponse».

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Défi 9, page 23: À cause du quantum d'action, les atomes qui composent toutes les personnes, qu'elles soient géantes ou minuscules, ont la même taille. Ceci implique que les géants ne peuvent pas exister, comme l'avait déjà démontré Galilée. L'argument est basé sur la robustesse conférée aux matériaux, et sur le fait qu'une robustesse qui serait identique en tout point équivaut à des propriétés des atomes identiques en tout point. Que des personnes minuscules ne puissent pas exister est dû à une raison similaire: la nature n'est pas capable de faire les gens plus petits qu'à l'ordinaire (même dans l'utérus, ils diffèrent remarquablement des adultes) car cela nécessiterait des atomes plus petits.

Vol. I, page 338

Défi 12, page 30: La disparition d'une masse m pendant une durée Δt correspond à un changement d'action $c^2 m \Delta t$. Ce qui est bien plus que $\hbar$ pour tous les objets de la vie quotidienne.

Défi 14, page 32: Un lion qui s'échapperait par effet tunnel aurait besoin d'une action dont la valeur serait de l'ordre de $S = 100\,\mathrm{kgm^2/s} \gg \hbar$. Ceci ne peut pas se produire spontanément.

Défi 15, page 32: Toutes les mémoires, que ce soit la mémoire humaine ou bien une mémoire électronique d'ordinateur, doivent éviter de se désintégrer. Et les désintégrations ne peuvent être limitées que par l'utilisation de barrières élevés et par des taux d'effet tunnel faibles.

Défi 16, page 33: Oui! Beaucoup de croyances et de mythes, depuis la loterie jusqu'aux fantômes, sont le résultat d'avoir négligé les effets quantiques.

Défi 17, page 33: Un écoulement parfaitement continu est contradictoire avec le flou du mouvement induit par le quantum d'action.

Défi 18, page 34: L'impossibilité de suivre deux particules le long de leur trajectoire apparaît lorsque leur distance mutuelle d est plus petite que l'indétermination sur leur position du fait de leur quantité de mouvement relative p, donc lorsque $d < \hbar/p$. Vous pouvez vérifier les valeurs pour les électrons, les atomes, les molécules, les bactéries, les gens et les galaxies.

Défi 19, page 34: Les photons sont, eux aussi, indistinguables. Voir page 70.

Défi 21, page 40: Dans les matériaux qui composent le mécanisme de l'échappement.

Défi 22, page 40: La croissance n'est pas proportionnelle à l'intensité lumineuse ni à sa fréquence, mais présente des *seuils* d'intensité et de fréquence. Ceux-ci sont des effets quantiques.

Défi 23, page 40: Tous les effets mentionnés jusqu'ici, tels que l'effet tunnel, les interférences, la désintégration, les transformations, le fait que l'espace vide ne soit pas vide, l'indétermination et le caractère aléatoire s'observent également dans le domaine du nucléaire.

Défi 24, page 40: Ceci n'est pas évident au regard de ce que l'on vient de dire, mais il se trouve que c'est correct. En fait, il n'y a pas d'autre alternative, comme vous le constaterez si vous essayez d'en trouver une.

Défi 25, page 41: Tom Pouce est supposé être aussi intelligent que les êtres humains de taille normale. Mais le cerveau ne peut pas être miniaturisé. Les fractales contredisent l'existence de la longueur de Planck et la loi de Moore contredit l'existence des atomes.

Défi 26, page 41: C'est le moment cinétique total qui compte, et il inclut le moment cinétique orbital. Le moment cinétique orbital $\boldsymbol{L}$ est donné par, en utilisant le rayon et la quantité de mouvement, $\boldsymbol{L} = \boldsymbol{r} \times \boldsymbol{p}$. Le moment cinétique total est un multiple de $\hbar$.

Défi 27, page 41: Oui, nous aurions pu le faire!

Défi 28, page 41: C'est tout simplement la relation d'indétermination. Bohr développa cette idée pour l'appliquer à toutes sortes d'autres paires de concepts, plutôt dans le domaine philosophique, tel que la clarté et la précision des explications: elles ne peuvent pas être toutes les deux élevées en même temps.

Défi 29, page 43: Par exemple, le big-bang n'a pas pu être un évènement.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

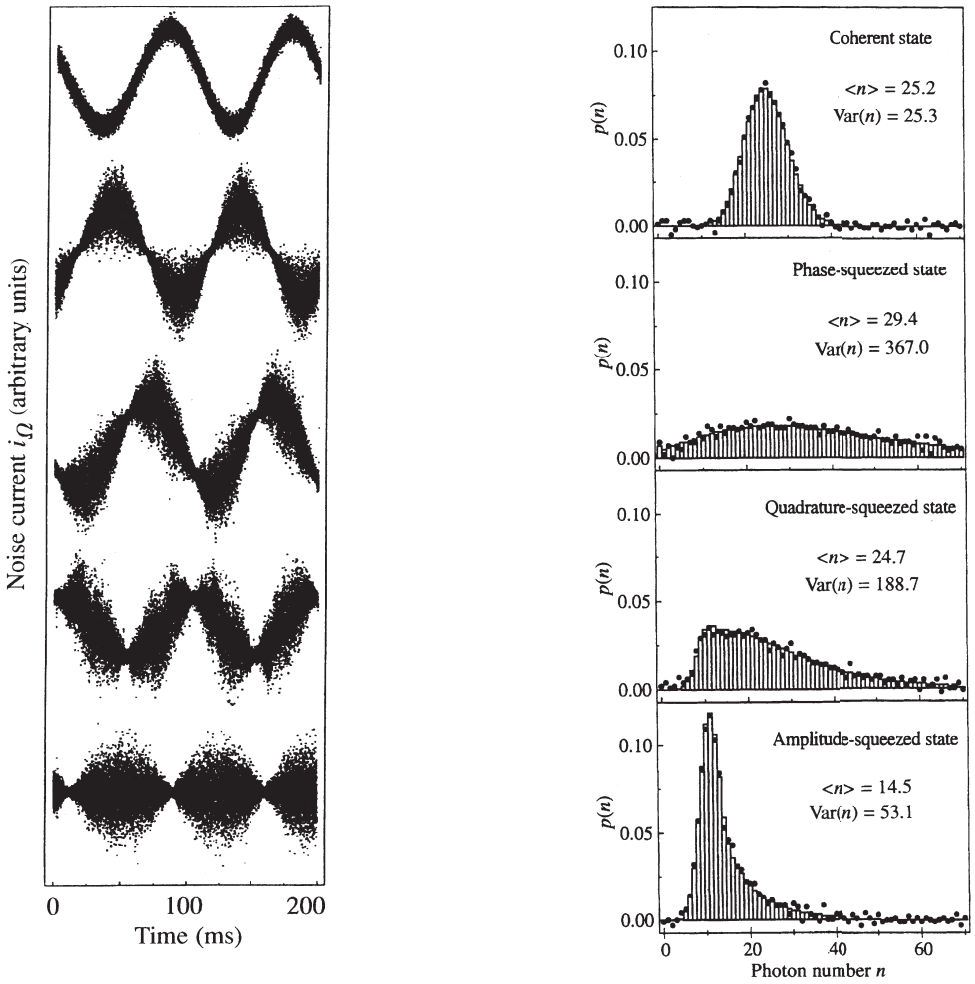


FIGURE 90 À gauche, de haut en bas: le champ électrique et son flou mesurés dans le cas d'un état cohérent, d'un état de vide compressé, d'un état compressé en phase, d'un état mixte et compressé en quadrature et d'un état compressé en amplitude, tous avec un petit nombre de photons. À droite: les distributions du nombre de photons correspondant à quatre de ces états. (© G. Breitenbach/Macmillan, reproduit de Ref. 19)

Défi 32, page 49: Des photons chargés seraient déviés par les champs électriques ou magnétiques. En particulier, ils ne se croiseraient pas sans être perturbés. Ce n'est pas ce que l'on observe. Des photons massiques seraient déviés par d'autres masses, telles que celle du Soleil, beaucoup plus que ce que l'on observe.

Défi 34, page 50: Pour mesurer la quantité de mouvement on a besoin d'un instrument de mesure qui soit étendu spatialement. Pour mesurer la position on a besoin d'un instrument de mesure localisé.

Défi 35, page 52: Les photons sont élémentaires parce qu'ils vérifient l'action minimale, parce qu'ils ne peuvent pas se désintégrer, parce qu'ils ne peuvent pas être déformés ni divisés, parce qu'ils n'ont pas de masse, pas de charge électrique et pas d'autres nombres quantiques, et parce qu'ils apparaissent dans le Lagrangien de l'électrodynamique quantique.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Défi 36, page 55: Les champs électriques et la distribution de photons que l'on mesure sont représentés sur les graphes célèbres reproduits sur la Figure 90.

Défi 38, page 56: Ceci est un problème qui n'est pas posé de façon claire. Le rayonnement est thermique, mais le nombre de photons dépend du volume considéré.

Défi 40, page 62: Les photons radio peuvent être comptés en utilisant des expériences de pompage optique au cours desquelles les états des atomes sont séparés, à l'aide de champs magnétiques, par des petites quantités d'énergies. De même, les horloges atomiques au césium détectent les photons radio par des moyens optiques. L'effet Josephons et l'imagerie par résonance magnétique sont d'autres méthodes de détection des photons radio.

Défi 41, page 64: Pour pouvoir être observées à l'œil nu, les franges d'interférences doivent restées visibles pendant environ 0, 1 s. Cela implique une différence de fréquence maximale d'environ 10 Hz entre les deux faisceaux. Ceci est réalisable uniquement si le même faisceau est partagé en deux, ou si les deux faisceaux proviennent de lasers stabilisés et de haute précision.

Défi 42, page 69: L'idée qu'une seule particule quantique soit décrite par une seule flèche est implicite dans le modèle des flèches.

Défi 48, page 71: Malgré un grand nombre de tentatives, et la promesse d'une renommée éternelle, ceci est la conclusion la plus raisonnable.

Défi 53, page 77: Oui, l'argument est correct. En fait, des discussions plus détaillées montrent que l'électrodynamique classique est en contradiction avec *toutes* les couleurs que l'on observe dans la nature.

Ref. 178 **Défi 57**, page 82: Le calcul n'est pas facile, mais pas trop difficile non plus. À partir d'une orientation initiale *proche* de la verticale, il se trouve que le temps de chute T est

$$T = \frac{1}{2\pi} T_0 \ln \frac{8}{\alpha} \,, \tag{154}$$

où α est l'angle de départ, et où l'on suppose une chute d'un angle π. Ici, T_0 est la période d'oscillation du crayon pour les petits angles. (Pouvez-vous la déterminer?) La relation d'indétermination pour la pointe du crayon conduit à un angle de départ *minimal*, parce qu'il n'est pas possible de rendre l'indétermination sur la quantité de mouvement arbitrairement grande. Vous devriez pouvoir en fournir une limite supérieure. Une fois que cet angle est connu, vous pouvez calculer le temps maximal.

Défi 58, page 83: Utilisez la température pour calculer l'énergie cinétique moyenne, et ensuite la vitesse moyenne des atomes.

Défi 59, page 83: À des températures aussi basses, les atomes ne peuvent pas être entièrement distingués, ils forment un état de la matière aux propriétés bizarres, que l'on appelle un *condensat*. Le condensat n'est pas au repos non plus, mais à cause de sa grande masse, ses fluctuations sont considérablement réduites si on les compare à celles d'un seul atome.

Défi 61, page 88: Seules des variables dont le produit a les mêmes unités que l'action physique (Js) peuvent être complémentaires l'une de l'autre.

Défi 62, page 89: Utilisez $\Delta E < E$ et $a\ \Delta t < c$.

Défi 67, page 96: Le quantum d'action ne s'applique pas uniquement aux mesures, il s'applique au mouvement lui-même, et en particulier, à tous les mouvements. Les effets des forces nucléaires, des particules nucléaires et des particules de rayonnement nucléaire doivent également se conformer à la limite. Et les expériences montrent que c'est en effet le cas. En fait, si elles ne s'y conformaient pas, il serait possible de se dispenser du quantum d'action dans les situations électrodynamiques, comme vous pouvez le vérifier.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Défi 74, page 108: À l'extérieur du garage, tous les atomes doivent à nouveau former la même structure solide.

Défi 75, page 109: Les puces électroniques d'un téraoctet auraient besoin de petites cellules mémoire. Des petites cellules impliquent des barrières minces. Des barrières minces impliquent des probabilités d'effet tunnel élevées. L'effet tunnel implique la perte de mémoire.

Défi 81, page 121: Si une particule n'était pas élémentaire, ces constituants seraient liés par une interaction. Mais il n'y a aucune interaction connue en dehors de celles décrites par le modèle standard.

Défi 82, page 122: Les difficultés que l'on rencontre lorsque l'on essaye de voir les atomes d'hydrogène sont dues à leur petite taille et à leur petit nombre d'électrons. Pour ces raisons, les atomes d'hydrogène produisent des contrastes faibles lors d'imagerie par rayons X. De même, il est difficile de les visualiser en utilisant des électrons: le rayon de Bohr de l'hydrogène est à peine plus grand que la longueur d'onde de Compton de l'électron.

Pour la première fois, en 2008, un groupe de recherche a prétendu avoir visualisé des atomes d'hydrogène absorbés sur du graphène à l'aide d'un microscope électronique en transmission. Pour plus de détails, voir J. C. Meyer, C. O. Grit, M. F. Crommle & A. Zetti, *Imaging and dynamics of light atoms and molecules on graphene*, Nature **454**, pp. 319–322, 2008. Cependant, il semblerait que l'information n'ait pas encore été confirmée par un autre groupe. D'autres images d'hydrogène sont apparues ces dernières années. Vous pourrez par exemple rechercher olympicène sur internet. Pour un autre résultat récent concernant des images de l'hydrogène, Page 211 voir ci-dessus.

Défi 84, page 123: Ceci n'est pas simple! Pouvez-vous utiliser le concept d'action pour montrer qu'il existe en effet une différence fondamentale entre des opérateurs très semblables et des opérateurs très différents?

Défi 86, page 123: $r = 86\,\mathrm{pm}$, donc $T = 12\,\mathrm{eV}$. Ceci est comparable à la valeur actuelle de $13,6\,\mathrm{eV}$. L'astuce pour dériver la formule est d'utiliser $\langle\psi\,|\,r_x^2\,|\,\psi\rangle = \frac{1}{3}\langle\psi\,|\,\boldsymbol{rr}\,|\,\psi\rangle$, une relation valable pour les états sans moment cinétique orbital. Elle est valable pour toutes les coordonnées et également pour les trois observables de la quantité de mouvement, tant que le système n'est pas relativiste.

Défi 87, page 124: Une fluctuation quantique nécessiterait que l'Univers existe déjà. De telles affirmations, que l'on trouve régulièrement dans la presse, sont complètement absurdes.

Défi 88, page 126: Des particules ponctuelles ne peuvent pas être marquées et des particules ponctuelles proches ne peuvent pas être distinguées, à cause du quantum d'action.

Défi 89, page 126: La solution est de *deux* gants. Dans la situation initiale, si deux hommes et deux femmes veulent faire l'amour sans danger, en théorie, ils n'ont besoin que de *deux* préservatifs.

Défi 94, page 128: Le meilleur moyen de déduire la formule de Sackur-Tetrode est le suivant. On part d'un gaz parfait monochromatique de volume V, comportant N particules et ayant une énergie totale U. Dans l'espace des phases, la *fonction de partition* Z est donnée par

$$Z = \frac{V^N}{N!}\frac{1}{\Lambda^{3N}}\,. \tag{155}$$

Nous avons utilisé l'approximation de Stirling pour $N! \approx N^N/e^N$, ainsi que la définition de l'entropie par $S = \partial(kT\ln Z)/\partial T$. En introduisant la définition de Λ, on obtient l'équation de Sackur-Tetrode.

Défi 96, page 132: Pour pouvoir écrire noir sur blanc quelque choses à propos de deux particules, il est nécessaire de les distinguer, même si la distinction est arbitraire.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Défi 99, page 138: Cette idée, que l'on appelle aussi l'*argent quantique*, n'est pas compatible avec les exigences de taille et de durée d'existence des vrais billets de banque.

Défi 100, page 139: Les jumeaux diffèrent par la façon dont leurs intestins sont repliés, par les lignes de leurs mains et par d'autres replis de leur peau. Parfois, mais pas toujours, certains traits, comme les points noirs de la peau, sont inversés par symétrie miroir entre les deux jumeaux.

Défi 109, page 153: Trois.

Défi 110, page 153: Pas avec un matelas. Ceci n'est pas facile à se représenter.

Défi 111, page 154: Les anges sont distinguables par leur nom; ils peuvent parler et ils peuvent chanter. Ils sont donc constitués d'un grand nombre de fermions. Il se trouve que de nombreux anges ont une taille humaine, de sorte qu'ils ne peuvent même pas se tenir sur la pointe d'une épingle.

Défi 117, page 159: Un boson peut être représenté comme un objet collé à un fil infiniment fin dont les deux queues s'étendent à l'infini.

Défi 118, page 159: Les arbres, comme tous les objets macroscopiques, ont une valeur de spin qui dépend de leur moment cinétique. Étant des objets classiques, dont la phase peut être observée, la valeur de leur spin est incertaine. Cela n'a aucun sens de se demander si les arbres ou les autres objets macroscopiques sont des bosons ou des fermions, car ce ne sont pas des quantons.

Défi 121, page 161: Les fantômes, comme les anges, sont distinguables par leur nom; ils peuvent parler et il est possible de les voir. C'est donc qu'ils contiennent des fermions. Cependant, ils peuvent passer à travers les murs et ils sont transparents. Ils ne peuvent donc pas être constitués de fermions, mais doivent être des images, constituées de bosons. Ceci est une contradiction.

Défi 122, page 164: Il n'est pas possible de dessiner des superpositions macroscopiques, car l'observation implique une interaction avec un thermostat, ce qui détruit la superposition macroscopique.

Défi 124, page 166: La perte des éléments non diagonaux conduit à une augmentation des éléments de la diagonale, et donc de l'entropie.

Défi 127, page 173: La vitesse de l'énergie est donnée par la progression des deux queues extérieures. Cette vitesse n'est jamais plus grande que la vitesse de la lumière.

Défi 128, page 176: Non, parce que prendre une photo implique une interaction avec un thermostat, ce qui détruirait la superposition. Pour plus de détails: une photographie nécessite un éclairage; un éclairage est un champ électromagnétique macroscopique; un champ macroscopique est un thermostat; un thermostat implique la décohérence; la décohérence détruit les superpositions.

Défi 131, page 178: Cela dépend. Elles peuvent être dues à des interférences ou à des sommes d'intensités. Dans le cas de la radio, l'effet est plus simple à comprendre. Si, à une fréquence particulière, le signal change périodiquement entre une station et une autre, on a un effet d'interférence bien réel.

Défi 132, page 178: Ils interfèrent. Mais c'est une question piège: qu'est-ce qu'un électron monochromatique? Est-il possible d'en produire en laboratoire?

Défi 133, page 178: Un tel ordinateur nécessite des relations de phase bien déterminées entre ses composants. De telles relations de phase sont extrêmement sensibles aux perturbations extérieures. À l'heure actuelle, elles ne tiennent pas plus d'une centaine de microsecondes, alors que les programmes informatiques les plus longs nécessitent des minutes voire des heures pour s'exécuter.

Défi 134, page 178: Un enregistrement est un effet produit par un processus qui doit être *difficile à inverser ou à défaire*. Les traces laissées par un œuf cassé sont faciles à enlever lorsqu'elles

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

sont sur une grande assiette en verre, mais difficiles si elles sont dans la laine d'un mouton. Des dents cassées, des vêtements déchirés, ou des rayures sur une grande surface sont de bons enregistrements. Les médecins légistes connaissent de nombreux autres exemples.

Défi 138, page 187: N'importe quel autre thermostat fera également l'affaire, comme l'atmosphère, des vibrations sonores, un champ électromagnétique, etc.

Défi 139, page 188: La Lune est en contact avec des thermostats tels que le vent solaire, les chutes de météorites, le rayonnement de fond diffus électromagnétique de l'Univers, le flux de neutrinos provenant du Soleil, le rayonnement cosmique, etc.

Défi 140, page 190: Les potentiels périodiques dans l'espace ont cette propriété. La décohérence conduit alors à la diagonalisation de la quantité de mouvement.

Défi 142, page 195: Si vous en trouvez une, faites-le savoir à l'auteur.

Défi 143, page 207: La valeur du décalage vers le rouge est $z = 9,9995$. À partir de la formule du décalage Doppler longitudinal on obtient $v/c = ((z+1)^2 - 1)/((z+1)^2 + 1)$, ce qui donne $0,984$ dans le cas présent. La galaxie s'éloigne donc de la Terre à 98,4 % de la vitesse de la lumière.

Défi 149, page 210: Les atomes d'hydrogène sont dans des états propres pour les raisons expliquées au chapitre sur les superpositions et les probabilités: dans un gaz, les atomes font partie d'un thermostat, et ainsi, sont presque toujours dans des états propres de l'énergie.

Défi 154, page 221: Si plusieurs faisceaux lumineux sont focalisés dans l'espace compris entre les miroirs, et si la fréquence des faisceaux lumineux est correctement ajustée par rapport aux fréquences d'absorption des atomes, les atomes subiront une force de rappel chaque fois qu'ils tentent de s'éloigner de la région de focalisation. En faisant converger des faisceaux lumineux vers la région de focalisation depuis six directions, les atomes sont piégés. La technique du refroidissement des atomes par laser est aujourd'hui largement utilisée dans les laboratoires de recherche.

Défi 155, page 222: Non, malgré son nom, le phosphore n'est pas phosphorescent, mais il est chimioluminescent.

Défi 157, page 223: C'est une question piège. Un changement de la valeur de α nécessite un changement de la valeur de c, de $\hbar$, de e ou de ε_0. Aucun de ces changements n'est possible, ni observable, car tous nos appareils de mesure sont basés sur ces unités. Les spéculations sur le changement de α, malgré leur fréquentes apparitions dans la presse et dans les revues scientifiques, sont des paroles vaines.

Défi 158, page 223: Un changement des unités physique tel que $\hbar = c = e = 1$ changerait la valeur de ε_0 de sorte que $4\pi\varepsilon_0 = 1/\alpha \approx 137,036$.

Défi 161, page 235: La masse est une mesure de la quantité d'énergie. Le «carré de la masse» n'a pas de sens.

Défi 165, page 238: Les limites de Planck peuvent être dépassées pour des observables extensives pour lesquelles les systèmes composés de nombreuses particules peuvent dépasser les limites d'une particule unique, tel que la masse, la quantité de mouvement, l'énergie ou la résistance électrique.

Défi 167, page 240: N'oubliez pas la dilatation relativiste du temps.

Défi 168, page 241: La formule avec $n - 1$ convient mieux. Pourquoi?

Défi 171, page 242: Non! Ils sont beaucoup trop précis pour paraître sensés. Nous les donnons uniquement en guise d'illustration pour le comportement de la distribution gaussienne. En réalité, les distributions de mesures ne sont pas gaussiennes si on considère le niveau de précision que ces nombres impliquent.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Défi 172, page 243: Environ 0, 3 m/s. Ce n'est *pas* 0, 33 m/s, ce n'est *pas* 0, 333 m/s et ce n'est *aucune* suite de trois plus longue.

Défi 174, page 249: Le ralentissement évolue avec le temps *de façon quadratique*, parce que chaque nouveau ralentissement en rajoute au précédent!

Défi 175, page 249: Non, seules des propriétés portant sur des parties de l'Univers y sont énumérées. L'Univers lui-même n'a pas de propriétés, comme nous le verrons dans le dernier volume.

Vol. VI, page 112

Défi 176, page 251: Le double de ce nombre, le nombre construit avec la suite de tous les nombres pairs, etc.

Défi 179, page 254: Nous découvrirons dans le dernier volume que tous les résultats de mesures ont des majorants et des minorants. Nous découvrirons également que deux résultats de mesure physique ne peuvent tout simplement pas différer à partir de, disons, la 300ième position décimale. Donc tous les résultats de mesure sont bien des nombres réels, mais l'inverse n'est pas vrai. Il nous faut toutefois insister qu'en ce qui concerne la théorie quantique, la relativité et la physique de Galilée, cette restriction n'a, de toutes façons, aucune conséquence.

Défi 181, page 256: $|z|^2$ est le *déterminant* de la matrice $z = \begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix}$.

Défi 186, page 257: Utilisez l'argument de la diagonale de Cantor comme pour le défi 274 du volume III.

Défi 187, page 258: Tout quaternion $X = ai + bj + ck$ avec $a^2 + b^2 + c^2 = 1$ résout l'équation $X^2 + 1 = 0$. Aux solutions purement imaginaires $+i$ et $-i$ s'ajoutent donc une sphère continue de solutions dans l'espace des quaternions.

Défi 190, page 260: Toute rotation d'angle 2π est décrite par -1. Seule une rotation d'angle 4π est décrite par $+1$. Les quaternions décrivent donc bien les spineurs.

Défi 192, page 262: Vérifiez simplement le résultat une composante après l'autre. Voir également la référence mentionnée.

Défi 194, page 264: Non. Parce que les octonions unitaires ne sont pas associatifs pour la multiplication, ils ne forment même pas un groupe. Outre son attrait superficiel, cette ligne de raisonnement n'a conduit à aucune avancée quant à la nature des interactions fondamentales.

Défi 195, page 265: Pour qu'un entier de Gauss $n + im$ soit premier, l'entier $n^2 + m^2$ doit être premier, et en plus, une condition sur n mod 3 doit être satisfaite. (Laquelle et pourquoi?)

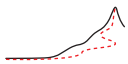
Défi 197, page 266: L'ensemble contenant uniquement le vecteur nul.

Défi 198, page 266: La métrique est régulière, définie positive et obéit à l'inégalité triangulaire.

Défi 200, page 268: Essentiellement, ce sont uniquement les espaces vectoriels qui sont énumérés dans l'annexe (ou dans le livre).

Défi 201, page 268: Si vous ne le pouvez pas, il faut le reprocher à votre prof de math de lycée, puis regardez les définitions. Ce n'est pas un sujet difficile.

Défi 202, page 268: Des espaces pourraient exister de façon approximative, en tant que moyennes de structures non continues. Cette idée est en cours d'exploration par la recherche moderne. Un exemple sera donné dans le dernier volume de cette série.



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Bibliographie

> No man but a blockhead ever wrote except for money.*
>
> Samuel Johnson

> As soon as you write, no time to read remains.**
>
> Anonymous

1 Giuseppe Fumagalli, *Chi l'ha detto?*, Hoepli, Milano, 1983. Cité à la page 16.

2 Le quantum d'action a été introduit dans Max Planck, *Über irreversible Strahlungsvorgänge*, Sitzungsberichte der Preußischen Akademie der Wissenschaften, Berlin pp. 440–480, 1899. Dans l'article, Planck utilisait la lettre *b* pour ce que l'on nomme aujourd'hui *h*. Cité à la page 18.

3 Bohr avait expliqué l'indivisibilité du quantum d'action dans sa célèbre conférence de Côme. Voir N. Bohr, *Atomtheorie und Naturbeschreibung*, Springer, 1931. À la page 16 il écrivait: «Il n'est pas davantage probable que les concepts fondamentaux des théories classiques deviennent un jour superflus pour la description de l'expérience physique. Non seulement la reconnaissance de l'indivisibilité du quantum d'action et la détermination de sa grandeur dépendent d'une analyse des mesures basée sur des concepts classiques, mais c'est toujours l'application de ces seuls concepts qui permet de relier le symbolisme de la théorie quantique aux données de l'expérience.» Il écrivait également: «...le postulat fondamental de l'indivisibilité du quantum d'action est lui-même, du point de vue classique, un élément irrationnel qui nous oblige inévitablement à renoncer à un mode de description causal et qui, du fait du couplage entre les phénomènes et leur observation, nous oblige à adopter un nouveau mode de description désigné comme complémentaire, en ce sens que toute application de concepts classiques exclut l'utilisation simultanée d'autres concepts classiques qui, sous un rapport différent, sont tout aussi nécessaires à l'élucidation des phénomènes ...» et «...la grandeur non infiniment nulle du quantum d'action empêche complètement qu'il puisse être fait une distinction nette entre un phénomène et le mécanisme par lequel il est observé, distinction qui sous-tend le concept coutumier d'observation et, par conséquent, constitue la base des idées classiques du mouvement.» D'autres déclarations sur l'indivisibilité du quantum d'action se trouvent dans N. Bohr, *Atomic Physics and Human Knowledge*, Science Editions, 1961. Voir également Max Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, Wiley, first edition, 1974, pp. 90–91. Cité à la page 19.

4 Pour quelques-unes des rares publications modernes mettant en avant le quantum d'action, voir M. B. Mensky, *The action uncertainty principle and quantum gravity*, Physics Letters A **162**, p. 219, 1992, et M. B. Mensky, *The action uncertainty principle in continuous*

* «Aucun homme, à part un imbécile, n'a jamais écrit si ce n'est pour de l'argent.»

** «Dès que l'on écrit, il ne reste plus de temps pour lire.»

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

quantum measurements, Physics Letters A **155**, pp. 229–235, 1991. Le principe de l'action quantique de Schwinger est également utilisé dans Richard F. W. Bader, *Atoms in Molecules – A Quantum Theory*, Oxford University Press, 1994.

Il existe un grand nombre de manuels généraux sur la théorie quantique. Il y en a pour tous les goûts.

Une introduction *conceptuelle* bien connue est Jean-Marc Lévy-Leblond & Françoise Balibar, *Quantique – Rudiments*, Masson, 1997, traduite en anglais sous le titre *Quantics*, North-Holland, 1990.

Un des plus beaux livres est Julian Schwinger, *Quantum Mechanics – Symbolism of Atomic Measurements*, édité par Berthold-Georg Englert, Springer Verlag, 2001.

Une approche moderne avec une belle introduction est Max Schubert & Gerhard Weber, *Quantentheorie – Grundlagen und Anwendungen*, Spektrum Akademischer Verlag, 1993.

Un texte standard pour débutant est C. Cohen-Tannoudji, B. Diu & F. Laloë, *Mécanique quantique I et II*, Hermann, Paris, 1977. Il est également disponible en plusieurs autres langues.

Un bon texte est Asher Peres, *Quantum Theory – Concepts and Methods*, Kluwer, 1995.

Pour une approche vivante, voir Vincent Icke, *The Force of Symmetry*, Cambridge University Press, 1994.

De nouveaux manuels sont publiés régulièrement partout dans le monde. Cité aux pages 19 et 287.

5 La meilleure source concernant l'histoire de la promenade en forêt de Planck avec son fils Erwin est de Hans Roos & Armin Hermann, editors, *Max Planck – Vorträge, Reden, Erinnerungen*, Springer, 2001, page 125. Comme l'explique le texte, l'histoire avait été racontée par Erwin Planck à au moins deux personnes différentes. Erwin Planck lui-même avait fait partie du complot manqué contre Hitler en 1944 et fut pendu en janvier 1945. Cité à la page 22.

6 Max Born, *Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge (vorläufige Mitteilung)*, Zeitschrift für Physik **37**, pp. 863–867, 1926, et Max Born, *Quantenmechanik der Stoßvorgänge*, Zeitschrift für Physik **38**, pp. 803–827, 1926. Cité à la page 26.

7 Voir par exemple les articles de Jan Hilgevoord, *The uncertainty principle for energy and time*, American Journal of Physics **64**, pp. 1451–1456, 1996, et de Paul Busch, *On the time–energy uncertainty reaction, parts 1 & 2*, Foundations of Physics **20**, pp. 1–43, 1990. Un classique est l'article de Eugene P. Wigner, *On the time–energy uncertainty relation*, dans Abdus Salam & Eugene P. Wigner, éditeurs, *Aspects of Quantum Theory*, Cambridge University Press, 1972. Cité à la page 28.

8 Voir également le livret de Claus Mattheck, *Warum alles kaputt geht – Form und Versagen in Natur und Technik*, Forschungszentrum Karlsruhe, 2003. Cité à la page 32.

9 R. Clifton, J. Bub & H. Halvorson, *Characterizing quantum theory in terms of information-theoretic constraints*, arxiv.org/abs/quant-ph/0211089. Cité à la page 39.

10 Cette façon de voir les boites de haricots remonte au texte de Susan Hewitt & Edward Subitzky, *A call for more scientific truth in product warning labels*, Journal of Irreproducible Results **36**, nr. 1, 1991. Cité à la page 41.

11 J. Malik, *The yields of the Hiroshima and Nagasaki nuclear explosions*, Technical Report LA-8819, Los Alamos National Laboratory, September 1985. Cité à la page 42.

12 Les citations sur le mouvement se trouvent au chapitre VI de F. Engels, *Herrn Eugen Dührings Umwälzung der Wissenschaft*, Verlag für fremdsprachliche Literatur, 1946. Le livre

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

est communément appelé *Anti-Dühring*. Cité aux pages 43 et 83.

13 Rodney Loudon, *The Quantum Theory of Light*, Oxford University Press, 2000. Cité à la page 44.

14 E. M. Brumberg & S. I. Vavilov, Izvest. Akad. Nauk. Omen Ser. 7, p. 919, 1933. Cité à la page 44.

15 Pour la détection des photons par l'œil humain, voir la revue de synthèse influente de F. Rieke & D. A. Baylor, *Single-photon detection by rod cells of the retina*, Reviews of Modern Physics **70**, pp. 1027–1036, 1998. On peut la trouver sur internet au format pdf. Cité à la page 47.

16 F. Rieke & D. A. Baylor, *Single-photon detection by rod cells of the retina*, Reviews of Modern Physics **70**, pp. 1027–1036, 1998. Ils mentionnent également que l'œil fonctionne habituellement pour des flux de photons compris entre 10^8 /μm^{2}s (lumière du Soleil) et 10^{-2} /μm^{2}s (lumière des étoiles). Les cônes de la rétine détectent (en couleur) les intensités lumineuses correspondant aux sept ou huit ordres de grandeur les plus élevés, tandis que les bâtonnets détectent (en noir et blanc) les intensités lumineuses les plus faibles. Cité aux pages 48 et 49.

17 E. Fischbach, H. Kloor, R. A. Langel, A. T. Y. Lui & M. Peredo, *New geomagnetic limit on the photon mass and on long-range forces coexisting with electromagnetism*, Physical Review Letters **73**, pp. 514–517, 1994. Cité à la page 49.

18 A. H. Compton, *The scattering of X-rays as particles*, American Journal of Physics **29**, pp. 817–820, 1961. Ceci est une présentation pédagogique des découvertes qu'il fit en 1923. Cité à la page 50.

19 L'article de référence sur le sujet est G. Breitenbach, S. Schiller & J. Mlynek, *Measurement of the quantum states of squeezed light*, **387**, pp. 471–475, 1997. Il est disponible gratuitement sur gerdbreitenbach.de/publications/nature1997.pdf. Cité aux pages 54 et 272.

20 L'article célèbre est R. Hanbury Brown & R. Q. Twiss, Nature **178**, p. 1046, 1956. Ils ont eu l'idée de mesurer la lumière de cette façon à la suite d'un de leurs précédents travaux qui utilisait la même méthode avec des ondes radio: R. Hanbury Brown & R. Q. Twiss, Nature **177**, p. 27, 1956. La discussion complète se trouve dans leurs articles R. Hanbury Brown & R. Q. Twiss, *Interferometry of the intensity fluctuations in light. I. Basic theory: the correlation between photons in coherent beams of radiation*, Proceedings of the Royal Society A **242**, pp. 300–324, 1957, et dans R. Hanbury Brown & R. Q. Twiss, *Interferometry of the intensity fluctuations in light. II. An experimental test of the theory for partially coherent light*, Proceedings of the Royal Society A **243**, pp. 291–319, 1958. Ils sont téléchargeables tous les deux gratuitement depuis internet et valent la peine d'être lus. Cité à la page 58.

21 J. Glanz, *First light from a space laser*, Science **269**, p. 1336, 1995. Cité à la page 59.

22 A. Einstein, *Über einen die Erzeugung und Umwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Standpunkt*, Annalen der Physik **17**, pp. 132–184, 1905. Cité à la page 60.

23 Voir le résumé de P. W. Milonni, *Answer to question 45: What (if anything) does the photoelectric effect teach us?*, American Journal of Physics **65**, pp. 11–12, 1997. Cité à la page 61.

24 Pour une description détaillée, voir J. J. Prentis, *Poincaré's proof of the quantum discontinuity of nature*, American Journal of Physics **63**, pp. 339–350, 1995. Les articles originaux sont Henri Poincaré, *Sur la théorie des quanta*, Comptes Rendus de l'Académie des

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Sciences (Paris) **153**, pp. 1103–1108, 1911, et Henri Poincaré, *Sur la théorie des quanta*, Journal de Physique (Paris) **2**, pp. 5–34, 1912. Cité à la page 61.

25 J. Jacobson, G. Björk, I. Chang & Y. Yamamoto, *Photonic de Broglie waves*, Physical Review Letters **74**, pp. 4835–4838, 1995. Le premier résultat de mesure a été publié par E. J. S. Fonseca, C. H. Monken & S. de Pádua, *Measurement of the de Broglie wavelength of a multiphoton wave packet*, Physical Review Letters **82**, pp. 2868–2671, 1995. Cité à la page 61.

26 Pour l'état de trois photons, voir M. W. Mitchell, J. S. Lundeen & A. M. Steinberg, *Super-resolving phase measurements with a multiphoton entangled state*, Nature **429**, pp. 161–164, 2004, et pour l'état de quatre photons, voir, dans la même édition, P. Walther, J.-W. Pan, M. Aspelmeyer, R. Ursin, S. Gasparoni & A. Zeilinger, *De Broglie wavelength of a non-local four-photon state*, Nature **429**, pp. 158–161, 2004. Cité à la page 61.

27 Pour une introduction sur la lumière compressée, voir L. Mandel, *Non-classical states of the electromagnetic field*, Physica Scripta T **12**, pp. 34–42, 1986. Cité à la page 62.

28 Friedrich Herneck, *Einstein und sein Weltbild: Aufsätze und Vorträge*, Buchverlag Der Morgen, 1976, page 97. Cité à la page 63.

29 La citation célèbre à propos de l'interférence d'un seul photon se trouve à la page 9 du manuel célèbre et de toute beauté, mais difficile, P. A. M. Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics*, Clarendon Press, 1930. Le phénomène est également abordé, de façon quelque peu confuse, dans l'article par ailleurs informatif de H. Paul, *Interference between independent photons*, Reviews of Modern Physics **58**, pp. 209–231, 1986. Cité aux pages 66 et 74.

30 Il y a trois articles originaux sur les états cohérents: R. J. Glauber, *The quantum theory of optical coherence*, Physical Review **130**, pp. 2529–2539, 1963, J. R. Klauder, *Continuous-representation theory*, I and II, Journal of Mathematical Physics **4**, pp. 1055–1058, 1963, et E. C. G. Sudarshan, *Equivalence of semiclassical and quantum mechanical descriptions of statistical light beams*, Physical Review Letters **10**, p. 227, 1963. Cité à la page 70.

31 Voir par exemple le texte merveilleux Richard P. Feynman, *QED – The Strange Theory of Light and Matter*, pp. 73–75, Princeton University Press, 1988, ou Richard P. Feynman & Steven Weinberg, *Elementary Particles and the Laws of Physics*, p. 23, Cambridge University Press 1987. Cité à la page 70.

32 Wolfgang Tittel, J. Brendel, H. Zbinden & N. Gisin, *Violation of Bell inequalities by photons more than 10 km apart*, Physical Review Letters **81**, pp. 3563–3566, 26 October 1998. Cité à la page 71.

33 N. Bohr & L. Rosenfeld, *Zur Frage der Meßbarkeit der elektromagnetischen Feldgrößen*, Mat.-fys. Medd. Danske Vid. Selsk. **12**, p. 8, 1933. Les résultats ont été publiés plus tard en anglais dans N. Bohr & L. Rosenfeld, *Field and charge measurements in quantum electrodynamics*, Physical Review **78**, pp. 794–798, 1950. Cité à la page 73.

34 Des affirmations trompeuses sont données dans l'introduction et dans la conclusion de la revue de synthèse de H. Paul, *Interference between independent photons*, Review of Modern Physics **58**, pp. 209–231, 1986. Cependant, dans le corps de l'article, l'auteur rétracte pratiquement la déclaration (à la page 221). Cité à la page 74.

35 G. Magyar & L. Mandel, *Interference fringes produced by superposition of two independent maser light beams*, Nature **198**, pp. 255–256, 1963. Cité à la page 74.

36 R. Kidd, J. Aedini & A. Anton, *Evolution of the modern photon*, American Journal of Physics **57**, pp. 27–35, 1989, Cité à la page 79.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

37 L'ensemble des atomes se comporte comme une seule molécule; on parle d'un condensat de Bose-Einstein. Les premières observations, dignes d'un prix Nobel, ont été faites par M.H. Anderson & al., *Observation of Bose–Einstein condensation in a dilute atomic vapour*, Science **269**, pp. 198–201, 1995, par C. C. Bradley, C. A. Sackett, J. J. Tollett & R. G. Hulet, *Evidence of Bose–Einstein condensation in an atomic gas with attractive interactions*, Physical Review Letters **75**, pp. 1687–1690, 1995, et par K. B. Davis, M. -O. Mewes, M. R. Andrews, N. J. van Druten, D. S. Durfee, D. M. Kurn & W. Ketterle, *Bose–Einstein condensation in a gas of sodium atoms*, Physical Review Letters **75**, pp. 3969–3973, 1995. Pour une introduction simple, voir W. Ketterle, *Experimental studies of Bose–Einstein condensation*, Physics Today pp. 30–35, December 1999. Cité à la page 83.

38 J. L. Costa-Krämer, N. Garcia, P. García-Mochales & P. A. Serena, *Nanowire formation in macroscopic metallic contacts: a universal property of metals*, Surface Science Letters **342**, pp. L1144–L1152, 1995. Voir également J. L. Costa-Krämer, N. Garcia, P. A. Serena, P. García-Mochales, M. Marqués & A. Correia, *Conductance quantization in nanowires formed in macroscopic contacts*, Physical Review B p. 4416, 1997. Cité à la page 84.

39 Les belles expériences de premier cycle universitaire rendues possibles par cette découverte sont décrites dans E. L. Foley, D. Candela, K. M. Martini & M. T. Tuominen, *An undergraduate laboratory experiment on quantized conductance in nanocontacts*, American Journal of Physics **67**, pp. 389–393, 1999. Cité aux pages 84 et 85.

40 L. de Broglie, *Ondes et quanta*, Comptes rendus de l'Académie des Sciences **177**, pp. 507–510, 1923. Cité à la page 85.

41 C. Jönsson, *Interferenz von Elektronen am Doppelspalt*, Zeitschrift für Physik **161**, pp. 454–474, 1961, et C. Jönsson, *Electron diffraction at multiple slits*, American Journal of Physics **42**, pp. 4–11, 1974. À cause de la charge des électrons, cette expérience n'est pas facile à réaliser: toutes les parties du montage qui sont isolantes se chargent et déforment l'image. C'est pourquoi l'expérience a été réalisée avec des électrons beaucoup plus tard qu'elle ne l'a été avec des atomes, des neutrons et des molécules. Cité à la page 87.

42 M. Arndt, O. Nairz, J. Vos-Andreae, C. Keller, G. van der Zouw & A. Zeilinger, *Wave–particle duality of C60 molecules*, Nature **401**, pp. 680–682, 14 October 1999. Voir également l'observation de la tétraphénylporphyrine et du $C_{60}F_{48}$ par la même équipe et publiée dans L. Hackermüller & al., *Wave nature of biomolecules and fluorofullerenes*, Physical Review Letters **91**, p. 090408, 2003.

Aucun phénomène de la théorie quantique n'a été autant étudié expérimentalement que les interférences quantiques. La transition de l'interférence vers la non-interférence a également été explorée, comme par exemple dans P. Facchi, A. Mariano & S. Pascazio, *Mesoscopic interference*, Recent Developments in Physics **3**, pp. 1–29, 2002. Cité à la page 87.

43 G. Papini, *Shadows of a maximal acceleration*, arxiv.org/abs/gr-qc/0211011. Cité à la page 89.

44 J. Perrin, *Discours de réception de son prix Nobel*, que l'on peut trouver sur www.nobel.se, et H. Nagaoka, *Kinetics of a system of particles illustrating the line and the band spectrum and the phenomena of radioactivity*, Philosophical Magazine S6, 7, pp. 445–455, March 1904. Cité à la page 89.

45 N. Bohr, *On the constitution of atoms and molecules: Introduction and Part I – binding of electrons by positive nuclei*, Philosophical Magazine **26**, pp. 1–25, 1913, *On the constitution of*

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

atoms and molecules: Part II – systems containing only a single nucleus, ibid., pp. 476–502, et *On the constitution of atoms and molecules: Part III*, ibid., pp. 857–875. Cité à la page 89.

46 Robert H. Dicke & James P. Wittke, *Introduction to Quantum Theory*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1960. Voir également Stephen Gasiorowicz, *Quantum Physics*, John Wiley & Sons, 1974. Cité à la page 91.

47 P. Carruthers & M. M. Nieto, *Phase and angle variables in quantum mechanics*, Review of Modern Physics **40**, pp. 411–440, 1968. Cité à la page 92.

48 La relation d'indétermination pour le mouvement de rotation est très bien expliquée par W. H. Louisell, *Amplitude and phase uncertainty relations*, Physics Letters **7**, p. 60, 1963. Cité à la page 92.

49 S. Franke-Arnold, S. M. Barnett, E. Yao, J. Leach, J. Courtial & M. Padgett, *Uncertainty principle for angular position and angular momentum*, New Journal of Physics **6**, p. 103, 2004. Le journal est accessible gratuitement sur internet. Cité à la page 92.

50 W. Gerlach & O. Stern, *Der experimentelle Nachweis des magnetischen Moments des Silberatoms*, Zeitschrift für Physik **8**, p. 110, 1921. Voir également l'explication pédagogique de M. Hannout, S. Hoyt, A. Kryowonos & A. Widom, *Quantum measurement and the Stern–Gerlach experiment*, American Journal of Physics **66**, pp. 377–379, 1995. Cité à la page 94.

51 J. P. Woerdman, G. Nienhuis, I. Kuščer, *Is it possible to rotate an atom?*, Optics Communications **93**, pp. 135–144, 1992. Nous parlons ici d'atomes tournant autour de leur centre d'inertie. Les atomes peuvent bien évidemment tourner autour d'autres corps, comme il est expliqué dans M. P. Silverman, *Circular birefringence of an atom in uniform rotation: the classical perspective*, American Journal of Physics **58**, pp. 310–317, 1990. Cité à la page 96.

52 J. Schmiedmayer, M. S. Chapman, C. R. Ekstrom, T. D. Hammond, S. Wehinger & D. E. Pritchard, *Index of refraction of various gases for sodium matter waves*, Physical Review Letters **74**, p. 1043-1046, 1995. Cité à la page 96.

53 Le résultat initial est dû à V. de Sabbata & C. Sivaram, *A minimal time and time-temperature uncertainty principle*, Foundations of Physics Letters **5**, pp. 183–189, 1992. Les détails expérimentaux se trouvent, par exemple, dans G. T. Gillies & S. W. Allison, *Experimental test of a time-temperature formulation of the uncertainty principle via nanoparticle fluorescence*, Foundations of Physics Letters **18**, pp. 65–74, 2005. Cité à la page 97.

54 Albert Einstein & Max Born, *Briefwechsel 1916 bis 1955*, Rowohlt, 1969, tel qu'il est cité à la page 34. Cité à la page 98.

55 E. Schrödinger, *Quantisierung als Eigenwertproblem I*, Annalen der Physik **79**, pp. 361–376, 1926, et *Quantisierung als Eigenwertproblem II*, Annalen der Physik **79**, pp. 489–527, 1926. Cité à la page 103.

56 C. G. Gray, G. Karl & V. A. Novikov, *From Maupertius to Schrödinger. Quantization of classical variational principles*, American Journal of Physics **67**, pp. 959–961, 1999. Cité à la page 103.

57 Y. Aharonov & D. Bohm, *Significance of electromagnetic potentials in the quantum theory*, Physical Review **115**, pp. 485–491, 1959. Cité à la page 110.

58 R. Colella, A. W. Overhauser & S. A. Werner, *Observation of gravitationally induced quantum interference*, Physical review Letters **34**, pp. 1472–1474, 1975. Cité à la page 112.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

59 Le résultat précurseur qui a lancé cette exploration était Hans-Werner Fink & al., *Atomic resolution in lens-less low-energy electron holography*, Physical Review Letters **67**, pp. 1543–1546, 1991. Cité à la page 113.

60 L. Cser, Gy. Török, G. Krexner, I. Sharkov & B. Faragó, *Holographic imaging of atoms using thermal neutrons*, Physical Review Letters **89**, p. 175504, 2002. Cité à la page 113.

61 G. E. Uhlenbeck & S. Goudsmit, *Ersetzung der Hypothese vom unmechanischen Zwang durch eine Forderung bezüglich des inneren Verhaltens jedes einzelnen Elektrons*, Naturwissenschaften **13**, pp. 953–954, 1925. Cité à la page 116.

62 L. Thomas, *The motion of the spinning electron*, Nature **117**, p. 514, 1926. Cité à la page 117.

63 K. von Meyenn & E. Schucking, *Wolfgang Pauli*, Physics Today pp. 43–48, February 2001. Cité à la page 117.

64 T. D. Newton & E. P. Wigner, *Localized states for elementary systems*, Review of Modern Physics **21**, pp. 400–406, 1949. et L. L. Foldy & S. A. Wouthuysen, *On the Dirac theory of spin 1/2 particles and its nonrelativistic limit*, Physical Review **78**, pp. 29–36, 1950. Tous les deux sont des articles classiques. Cité à la page 118.

65 J. P. Costella & B. H. J. McKellar, *The Foldy–Wouthuysen transformation*, American Journal of Physics **63**, pp. 1119–1121, 1995. Cité à la page 119.

66 Pour un compte rendu de la première mesure du facteur de Landé de l'électron, voir H. R. Crane, *How we happended to measure g-2: a tale of serendipity*, Physics in Perspective **2**, pp. 135–140, 2000. La partie la plus intéressante est celle qui montre comment les expérimentalistes ont dû surmonter la conviction qu'avaient presque tous les théoriciens que la mesure était impossible dans le principe. Cité à la page 120.

67 Les facteurs de Landé des noyaux composites sont brièvement expliqués sur en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_magnetic_moment et les valeurs mesurées se trouvent sur www-nds.iaea.org. Voir également H. Dehmelt, *Is the electron a composite particle?*, Hyperfine Interactions **81**, pp. 1–3, 1993. Cité aux pages 121 et 286.

68 L'image d'un atome d'hydrogène la plus approchante que l'on ait pu produire à ce jour se trouve dans A. Yazdani, *Watching an atom tunnel*, Nature **409**, pp. 471–472, 2001. Les expériences sur les condensats de Bose-Einstein sont également des candidats pour des images d'atomes d'hydrogène. La société Hitachi s'est ridiculisée en 1992 en affirmant dans un communiqué de presse que son tout nouveau microscope électronique pouvait produire des images d'atomes d'hydrogène. Cité à la page 122.

69 A. M. Wolsky, *Kinetic energy, size, and the uncertainty principle*, American Journal of Physics **42**, pp. 760–763, 1974. Cité à la page 123.

70 Pour un résumé fascinant, voir M. A. Cirone, G. Metikas & W. P. Schleich, *Unusual bound or localized states*, pré-imprimé sur arxiv.org/abs/quant-ph/0102065. Cité à la page 124.

71 Voir l'article de Martin Gardner, *Science fiction puzzle tales*, Clarkson Potter, **67**, pp. 104–105, 1981, ou son livre *Aha! Insight*, Scientific American & W.H. Freeman, 1978. Plusieurs versions sont fournies par A. Hajnal & P. Lovász, *An algorithm to prevent the propagation of certain diseases at minimum cost*, dans *Interfaces Between Computer Science and Operations Research*, édité par J. K. Lenstra, A. H. G. Rinnooy Kan & P. Van Emde Boas, Mathematisch Centrum, Amsterdam 1978, alors que l'euphémisme informatique est utilisé par A. Orlitzky & L. Shepp, *On curbing virus propagation*, Technical memorandum, Bell Labs 1989. Cité à la page 126.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

72 Une discussion complète du problème se trouve au chapitre 10 de Ilan Vardi, *Computational Recreations in Mathematica*, Addison Wesley, 1991. Cité à la page 127.

73 Concernant le paradoxe de Gibbs, voir votre manuel préféré de thermodynamique ou de mécanique statistique. Voir également W. H. Zurek, *Algorithmic randomness and physical entropy*, Physical Review A **40**, pp. 4731–4751, 1989. Zurek montre que la formule de Sackur-Tetrode peut se déduire à partir de considérations d'entropie algorithmique. Cité à la page 128.

74 S. N. Bose, *Plancks Gesetz und Lichtquantenhypothese*, Zeitschrift für Physik **26**, pp. 178–181, 1924. La théorie a ensuite été étendue par A. Einstein, *Quantentheorie des einatomigen idealen Gases*, Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin **22**, pp. 261–267, 1924, A. Einstein, *Quantentheorie des einatomigen idealen Gases. Zweite Abhandlung*, Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin **23**, pp. 3–14, 1925, et A. Einstein, *Zur Quantentheorie des idealen Gases*, Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin **23**, pp. 18–25, 1925. Cité à la page 133.

75 C. K. Hong, Z. Y. Ou & L. Mandel, *Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference*, Physical Review Letters **59**, pp. 2044–2046, 1987. Voir également T. B. Pittman, D. V. Strekalov, A. Migdall, M. H. Rubin, A. V. Sergienko & Y. H. Shih, *Can two-photon interference be considered the interference of two photons?*, Physical Review Letters **77**, pp. 1917–1920, 1996. Cité à la page 134.

76 Un exemple d'une telle expérience réalisée avec des électrons plutôt que des photons est décrite dans E. Bocquillon, V. Freulon, J.-M. Berroir, P. Degiovanni, B. Plaçais, A. Cavanna, Y. Jin & G. Fève, *Coherence and indistinguishability of single electrons emitted by independent sources*, Science **339**, pp. 1054–1057, 2013. Voir également le commentaire C. Schönenberger, *Two indistinguishable electrons interfere in an electronic device*, Science **339**, pp. 1041–1042, 2013. Cité à la page 134.

77 M. Schellekens, R. Hoppeler, A. Perrin, J. Viana Gomes, D. Boiron, C. I. Westbrook & A. Aspect, *Hanbury Brown Twiss effect for ultracold quantum gases*, Science **310**, p. 648, 2005, pré-imprimé sur arxiv.org/abs/cond-mat/0508466. J. Viana Gomes, A. Perrin, M. Schellekens, D. Boiron, C. I. Westbrook & M. Belsley, *Theory for a Hanbury Brown Twiss experiment with a ballistically expanding cloud of cold atoms*, Physical Review A **74**, p. 053607, 2006, pré-imprimé sur arxiv.org/abs/quant-ph/0606147. T. Jeltes, J. M. McNamara, W. Hogervorst, W. Vassen, V. Krachmalnicoff, M. Schellekens, A. Perrin, H. Chang, D. Boiron, A. Aspect & C. I. Westbrook, *Comparison of the Hanbury Brown-Twiss effect for bosons and fermions*, Nature **445**, p. 402, 2007, pré-imprimé sur arxiv.org/abs/cond-mat/0612278. Cité à la page 135.

78 L'expérience est décrite dans E. Ramberg & G. A. Snow, *Experimental limit on a small violation of the Pauli principle*, Physics Letters B **238**, pp. 438–441, 1990. D'autres tests expérimentaux ont été passés en revue dans O. W. Greenberg, *Particles with small violations of Fermi or Bose statistics*, Physical Review D **43**, pp. 4111–4120, 1991. Cité à la page 137.

79 La version initiale du théorème de l'impossibilité du clonage quantique et de D. Dieks, *Communication by EPR devices*, Physics Letters A **92**, pp. 271–272, 1982, et de W. K. Wootters & W. H. Zurek, *A single quantum cannot be cloned*, Nature **299**, pp. 802–803, 1982. Pour une discussion sur le *clonage des photons* et des systèmes comportant plusieurs particules, voir N. Gisin & S. Massar, *Optimal quantum cloning machines*, Physics Review Letters **79**, pp. 2153–2156, 1997. L'ensemble du sujet a été pré-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

senté en détails par V. Buzek & M. Hillery, *Quantum cloning*, Physics World **14**, pp. 25–29, November 2001. Cité à la page 138.

80 S. J. Wiesner, *Conjugate Coding*, **SIGACT News**, **15**, pp. 78–88, 1983. Cet article, très largement cité, a été l'un des points de départ de la théorie de l'information quantique. Cité à la page 138.

81 Les résultats expérimentaux et théoriques les plus récents sur le clonage physique sont décrits dans A. Lamas-Linares, C. Simon, J. C. Howell & D. Bouwmeester, *Experimental quantum cloning of single photons*, Science **296**, pp. 712–714, 2002, dans D. Collins & S. Popescu, *A classical analogue of entanglement*, pré-imprimé sur arxiv.org/abs/quant-ph/0107082, 2001, et dans A. Daffertshofer, A. R. Plastino & A. Plastino, *Classical no-cloning theorem*, Physical Review Letters **88**, p. 210601, 2002. Cité à la page 139.

82 E. Wigner, *On unitary representations of the inhomogeneous Lorentz group*, Annals of Mathematics **40**, pp. 149–204, 1939. Cet article célèbre résume les travaux qui lui ont par la suite apporté le prix Nobel de physique. Cité aux pages 141 et 155.

83 Pour une liste complète des isotopes, voir R. B. Firestone, *Table of Isotopes, Eighth Edition, 1999 Update*, avec CDROM, John Wiley & Sons, 1999. Cité à la page 146.

84 Ceci est déduit à partir des mesures de $g-2$, comme expliqué lors de son discours de réception du prix Nobel par Hans Dehmelt, *Experiments with an isolated subatomic particle at rest*, Reviews of Modern Physics **62**, pp. 525–530, 1990. Concernant le même sujet, voir également son article Ref. 67 et dans Hans Dehmelt, *Is the electron a composite particle?*, Hyperfine Interactions **81**, pp. 1–3, 1993. Pas de citation.

85 G. Gabrielse, H. Dehmelt & W. Kells, *Observation of a relativistic, bistable hysteresis in the cyclotron motion of a single electron*, Physical Review Letters **54**, pp. 537–540, 1985. Pas de citation.

86 W. Pauli, *The connection between spin and statistics*, Physical Review **58**, pp. 716– 722, 1940. Cité à la page 150.

87 Le tour de la ceinture a été popularisé par Dirac, Feynman et bien d'autres. Un exemple est R. P. Feynman, *The reason for antiparticles*, dans *Elementary Particles and the Laws of Physics: The 1986 Dirac Memorial Lectures*, Cambridge University Press, 1987. Le tour de la ceinture est également expliqué, par exemple, à la page 1148 de C. W. Misner, K. S. Thorne & J. A. Wheeler, *Gravitation*, Freeman, 1973. Il est appelé le *tour des ciseaux* à la page 43 de volume 1 de R. Penrose & W. Rindler, *Spinors and Spacetime*, 1984. Il est également cité et discuté par R. Gould, *Answer to question #7*, American Journal of Physics **63**, p. 109, 1995. Pourtant, certains physiciens n'aiment pas l'image du tour de la ceinture pour les particules de spin 1/2; pour un exemple, voir I. Duck & E. C. G. Sudarshan, *Toward an understanding of the spin-statistics theorem*, American Journal of Physics **66**, pp. 284–303, 1998. Cité à la page 150.

88 M. V. Berry & J. M. Robbins, *Indistinguishability for quantum particles: spin, statistics and the geometric phase*, Proceedings of the Royal Society in London A **453**, pp. 1771–1790, 1997. Voir également les commentaires sur ce résultat de J. Twamley, *Statistics given a spin*, Nature **389**, pp. 127–128, 11 September 1997. Leurs résultats les plus récents sont dans M. V. Berry & J. M. Robbins, *Quantum indistinguishability: alternative constructions of the transported basis*, Journal of Physics A (Letters) **33**, pp. L207–L214, 2000, et dans M. V. Berry & J. M. Robbins, in *Spin–Statistics*, eds. R. Hilborn & G. Tino, American Institute of Physics, 2000, pp. 3–15. Voir également la page internet de Michael Berry sur www.phy.bris.ac.uk/people/berry_mv. Cité à la page 151.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

89 R. W. Hartung, *Pauli principle in Euclidean geometry*, American Journal of Physics **47**, pp. 900–910, 1979. Cité à la page 153.

90 La question est traitée dans sa *Somme théologique*, question 52 de la première partie. Le texte complet, plusieurs milliers de pages, se trouve sur le site www.newadvent.org. Les angélologues d'aujourd'hui, qui sont peu nombreux à travers le monde, sont également d'accord avec Thomas d'Aquin. Cité à la page 154.

91 Le fait de pouvoir considérer le spin comme une rotation avait déjà été évoqué par F. J. Belinfante, *On the spin angular momentum of mesons*, Physica **6**, p. 887, 1939, et reprise à nouveau par Hans C. Ohanian, *What is spin?*, American Journal of Physics **54**, pp. 500–505, 1986. Voir également E. Duran & A. Erschow, Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion **12**, p. 466, 1937. Cité à la page 156.

92 Voir le livre de Jean-Marc Lévy-Leblond & Françoise Balibar in Ref. 4. Cité à la page 159.

93 Les généralisations des bosons et des fermions ont fait l'objet d'une revue de synthèse dans l'article (sérieux!) de O. W. Greenberg, D. M. Greenberger & T. V. Greenbergest, *(Para)bosons, (para)fermions, quons and other beasts in the menagerie of particle statistics*, at arxiv.org/abs/hep-th/9306225. Un résumé plus récent se trouve dans O. W. Greenberg, *Theories of violation of statistics*, pré-imprimé en version électronique sur arxiv.org/abs/hep-th/0007054. Cité à la page 161.

94 Gell-Mann avait écrit ceci pour la Conférence Nobel de 1976 (pas pour son discours de réception du prix Nobel; il est le seul lauréat qui ne l'a jamais publié). M. Gell-Mann, *What are the building blocks of matter?*, dans D. Huff & O. Prewitt, editors, *The Nature of the Physical Universe*, New York, Wiley, 1979, p. 29. Cité à la page 162.

95 Voir par exemple les réimpressions de ces articles dans la collection standard de John A. Wheeler & Wojciech H. Zurek, *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, 1983. Cité à la page 163.

96 H. D. Zeh, *On the interpretation of measurement in quantum theory*, Foundations of Physics **1**, pp. 69–76, 1970. Cité à la page 163.

97 Linda Reichl, *A Modern Course in Statistical Physics*, Wiley, 2nd edition, 1998. Une excellente introduction à la thermodynamique. Cité à la page 165.

98 E. Joos & H. D. Zeh, *The emergence of classical properties through interactions with the environment*, Zeitschrift für Physik B **59**, pp. 223–243, 1985. Voir également Erich Joos, *Decoherence and the appearance of a classical world in quantum theory*, Springer Verlag, 2003. Cité à la page 168.

99 M. Tegmark, *Apparent wave function collapse caused by scattering*, Foundation of Physics Letters **6**, pp. 571–590, 1993, pré-imprimé sur arxiv.org/abs/gr-qc/9310032. Voir également son article démontrant que le cerveau n'est pas un ordinateur quantique, M. Tegmark, *The importance of quantum decoherence in brain processes*, Physical Review E **61**, pp. 4194–4206, 2000, pré-imprimé sur arxiv.org/abs/quant-ph/9907009. Cité à la page 168.

100 La valeur maximale du temps de décohérence est limitée par le temps de relaxation. Voir A. O. Caldeira & A. J. Leggett, *Influence of damping on quantum interference: an exactly soluble model*, Physical Review A **31**, 1985, pp. 1059–1066. Ceci est la référence principale en ce qui concerne les effets de la décohérence sur un oscillateur harmonique. L'approche générale pour relier la décohérence à l'influence de l'environnement est due à Niels Bohr, et a été reprise en détail par Hans Dieter Zeh. Cité à la page 169.

101 G. Lindblad, *On the generators of quantum dynamical subgroups*, Communications in Mathematical Physics **48**, pp. 119–130, 1976. Cité à la page 169.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

102 Wojciech H. Zurek, *Decoherence and the transition from quantum to classical*, Physics Today pp. 36–44, October 1991. Un article facile mais quelque peu confus. Sa réponse aux nombreuses lettres qui questionnaient l'article se trouve dans Physics Today, April 1993, pp. 13–15, et pp. 81–90, ou il expose ses idées de manière plus claire et donne un avant-goût des discussions animées sur le sujet. Cité aux pages 170 et 176.

103 John Bardeen, l'expliquait régulièrement dans les conférences de synthèse qu'il donnait à la fin de sa vie, comme celle que l'auteur entendit à Tokyo en 1990. Cité à la page 170.

104 Des temps d'effondrement ont été mesurés pour la première fois par l'équipe de Serge Haroche à Paris. Voir M. Brune, E. Hagley, J. Dreyer, X. Maitre, A. Maali, C. Wunderlich, J. M. Raimond & S. Haroche, *Observing the progressive decoherence of the "meter" in a quantum measurement*, Physical Review Letters 77, pp. 4887–4890, 1996. Voir également C. Guerlin, J. Bernu, S. Deléglise, C. Sayrin, S. Gleyzes, S. Kuhr, M. Brune, J. -M. Raimond & S. Haroche, *Progressive field-state collapse and quantum non-demolition photon counting*, Nature **448**, pp. 889–893, 2007. Cité aux pages 170 et 184.

105 Des expériences confirmant par la suite les prédictions numériques de la décohérence ont été publiées par C. Monroe, D. M. Meekhof, B. E. King & D. J. Wineland, *A "Schrödinger cat" superposition state of an atom*, Science **272**, pp. 1131–1136, 1996, par W. P. Schleich, *Quantum physics: engineering decoherence*, Nature **403**, pp. 256–257, 2000, et par C. J. Myatt, B. E. King, Q. A. Turchette, C. A. Sackett, D. Kielpinski, W. M. Itano, C. Monroe & D. J. Wineland, *Decoherence of quantum superpositions through coupling to engineered reservoirs*, Nature **403**, pp. 269–273, 2000. Voir également le résumé de W. T. Strunz, G. Alber & F. Haake, *Dekohärenz in offenen Quantensystemen*, Physik Journal **1**, pp. 47–52, November 2002. Cité à la page 170.

106 L. Hackermüller, K. Hornberger, B. Brezger, A. Zeilinger & M. Arndt, *Decoherence of matter waves by thermal emission of radiation*, Nature **427**, pp. 711–714, 2004. Cité à la page 170.

107 K. Baumann, *Quantenmechanik und Objektivierbarkeit*, Zeitschrift für Naturforschung **25a**, pp. 1954–1956, 1970. Cité à la page 171.

108 Voir par exemple D. Styer, Physics Today p. 11, September 2000. Cité à la page 174.

109 David Bohm, *Quantum Theory*, Prentice-Hall, 1951, pp. 614–622. Cité à la page 174.

110 A. Einstein, B. Podolsky & N. Rosen, *Can quantum-mechanical description of reality be considered complete?*, Physical Review **48**, pp. 696–702, 1935. Cité à la page 174.

111 A. Aspect, J. Dalibard & G. Roger, *Experimental tests of Bell's inequalities using time-varying analyzers*, Physical Review Letters **49**, pp. 1804–1807, 1982, Cité à la page 175.

112 G. C. Hergerfeldt, *Causality problems for Fermi's two-atom system*, Physical Review Letters **72**, pp. 596–599, 1994. Cité à la page 176.

113 Une mesure expérimentale de superpositions de courants de 10^{10} électrons s'écoulant vers la gauche et vers la droite a été faite par J. E. Mooij, T. P. Orlando, L. Levitov, L. Tian, C. H. van der Wal & S. Lloyd, *Josephson persistent-current qubit*, Science **285**, pp. 1036–1039, 1999. En 2000 il a été détecté des superpositions de courants de 1 µA dans le sens des aiguilles d'une montre et dans le sens inverse. Pour plus de détails voir J. R. Friedman & al., *Quantum superposition of distinct macroscopic states*, Nature **406**, p. 43, 2000. Cité à la page 176.

114 Il existe de nombreux articles sur la superposition des magnétisations dans les directions «up» et «down». Des expériences récentes sur la question de l'effet tunnel quan-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

tique dans les systèmes magnétiques sont décrites dans D. D. Awschalom, J. F. Smith, G. Grinstein, D. P. DiVicenzo & D. Loss, *Macroscopic quantum tunnelling in magnetic proteins*, Physical Review Letters **88**, pp. 3092–3095, 1992, et dans C. Paulsen & al., *Macroscopic quantum tunnelling effects of Bloch walls in small ferromagnetic particles*, Europhysics Letters **19**, pp. 643–648, 1992. Cité à la page 177.

115 Par exemple, des superpositions dans les jonctions Josephson ont été observées par R. F. Voss & R. A. Webb, *Macroscopic quantum tunnelling in 1 mm Nb Josephson junctions*, Physical Review Letters **47**, pp. 265–268, 1981, Cité à la page 177.

116 S. Haroche, *Entanglement, decoherence and the quantum-classical transition*, Physics Today **51**, pp. 36–42, July 1998. Une expérience plaçant un atome à deux endroits en même temps, à une distance d'environ 80 nm, a été publiée par C. Monroe, C. Monroe, D. M. Meekhof, B. E. King & D. J. Wineland, *A 'Schroedinger Cat' Superposition of an Atom*, Science **272**, pp. 1131–1136, 1996. Cité à la page 177.

117 M. R. Andrews, C. G. Townsend, H. -J. Miesner, D. S. Durfee, D. M. Kurn & W. Ketterle, *Observations of interference between two Bose condensates*, Science **275**, pp. 637–641, 31 January 1997. Voir également le site Web www.aip.org/physnews/special.htm. Cité à la page 177.

118 Une discussion claire se trouve dans S. Haroche & J. -M. Raimond, *Quantum computing: dream or nightmare?*, Physics Today **49**, pp. 51–52, 1996, de même que les commentaires dans Physics Today **49**, pp. 107–108, 1996. Cité à la page 178.

119 La référence la plus célèbre sur l'effondrement de la fonction d'onde est le chapitre IV du livre de Kurt Gottfried, *Quantum Mechanics*, Benjamin, New York, 1966. C'était la référence préférée de Victor Weisskopf, qu'il citait à toutes les occasions qu'il avait de parler du sujet. Cité à la page 179.

120 La prédiction que l'effet tunnel quantique pouvait être observable lorsque l'interaction dissipative avec le reste du monde était suffisamment petite, a été faite par Leggett. On peut en trouver une revue de synthèse dans A. J. Leggett, S. Chahravarty, A. T. Dorsey, M. P. A. Fisher, A. Garg & W. Zwerger, *Dynamics of dissipative 2-state systems*, Review of Modern Physics **59**, pp. 1–85, 1987. Cité à la page 181.

121 S. Kochen & E. P. Specker, *The problem of hidden variables in quantum mechanics*, Journal of Mathematics and Mechanics **17**, pp. 59–87, 1967. Cité à la page 185.

122 J. F. Clauser, M. A. Horne, A. Shimony & R. A. Holt, *Proposed experiment to test local hidden-variable theories*, Physical Review Letters **23**, pp. 880–884, 1969. Le résultat original, et plus général, se trouve dans J. S. Bell, *On the Einstein Podolsky Rosen Paradox*, Physics **1**, p. 195, 1964. Cité à la page 186.

123 D. M. Greenberger, M. A. Horne & A. Zeilinger, *Going beyond Bell's theorem*, réimpression de l'article de 1989 sur arxiv.org/abs/0712.0912. La première observation était de D. Bouwmeester, J. -W. Pan, M. Daniell, H. Weinfurter & A. Zeilinger, *Observation of three-photon Greenberger-Horne–Zeilinger entanglement*, pré-imprimé sur arxiv.org/abs/quant-ph/9810035. Cité à la page 186.

124 Bryce de Witt & Neill Graham, eds., *The Many–Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, 1973. Cette interprétation parle d'entités qui ne peuvent pas être observées, à savoir les mondes multiples, et suppose souvent que la fonction d'onde de l'univers existe. Les deux habitudes sont des croyances et en contradiction avec les faits. Cité à la page 189.

125 «D'autre part, je pense pouvoir affirmer sans crainte que personne ne comprend la mécanique quantique.» de Richard P. Feynman, *The Character of Physical Law*, MIT Press,

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Cambridge, 1965, p. 129. Il a fait cette déclaration à de nombreuses reprises, par exemple dans l'introduction, par ailleurs excellente, de *QED – The Strange Theory of Light and Matter*, Penguin Books, 1990. Cité à la page 189.

126 M. Tegmark, *The importance of quantum decoherence in brain processes*, Physical Review D **61**, pp. 4194–4206, 2000, ou également arxiv.org/abs/quant-ph/9907009. Cité à la page 190.

127 On pourra suivre les liens entre la théorie quantique et la théorie de l'information dans la revue International Journal of Quantum Information. Cité à la page 191.

128 J. A. Wheeler, pp. 242–307, dans *Batelle Recontres: 1967 Lectures in Mathematics and Physics*, C. DeWitt & J. A. Wheeler, éditeurs, W.A. Benjamin, 1968. Pour une explication pédagogique, voir John W. Norbury, *From Newton's laws to the Wheeler-DeWitt equation*, arxiv.org/abs/physics/980604 ou European Journal of Physics **19**, pp. 143–150, 1998. Cité à la page 192.

129 Le livre le plus fascinant sur le sujet est de Kurt Nassau, *The Physics and Chemistry of Color – the Fifteen Causes of Color*, 1983, ainsi que l'excellent site Web webexhibits.org/causesofcolour. Cité à la page 195.

130 Y. Ruiz-Morales & O. C. Mullins, *Measured and Simulated Electronic Absorption and Emission Spectra of Asphaltenes*, Energy & Fuels **23**, pp. 1169–1177, 2009. U. Bergmann, H. Groenzin, O. C. Mullins, P. Glatzel, J. Fetzer & S. P. Cramer, *Carbon K-edge X-ray Raman spectroscopy supports simple, yet powerful description of aromatic hydrocarbons and asphaltenes*, Chemical Physics Letters **369**, pp. 184–191, 2003. Cité à la page 194.

131 Deux revues de synthèses excellentes, avec de nombreuses photographies sont de E. Grotewohl, *The genetics and biochemistry of floral pigments*, Annual Reviews of Plant Biology **57**, pp. 761–780, 2006, et de Y. Tanaka, N. Sasaki & A. Ohmiya, *Biosynthesis of plant pigments: anthocyanins, betalains and carotenoids*, The Plant Journal **54**, pp. 733–749, 2008. Cité à la page 204.

132 L. Pérez-Rodriguez & J. Viñuda, *Carotenoid-based bill and eye coloration as honest signals of condition: an experimental test in the red-legged partridge (Alectoris rufa)*, Naturwissenschaften **95**, pp. 821–830, 2008, Cité à la page 204.

133 R. Pello, D. Schaerer, J. Richard, J.-F. Le Borgne & J.-P. Kneib, *ISAAC/VLT observations of a lensed galaxy at z=10,0*, Astronomy and Astrophysics **416**, p. L35, 2004. Cité à la page 207.

134 Une introduction pédagogique est fournie par L. J. Curtis & D. G. Ellis, *Use of the Einstein–Brillouin–Keller action quantization*, American Journal of Physics **72**, pp. 1521–1523, 2004. Voir également l'introduction de A. Klein, *WKB approximation for bound states by Heisenberg matrix mechanics*, Journal of Mathematical Physics **19**, pp. 292–297, 1978. Cité aux pages 208 et 213.

135 J. Neukammer & al., *Spectroscopy of Rydberg atoms at n ~ 500*, Physical Review Letters **59**, pp. 2947–2950, 1987. Cité à la page 212.

136 Mark P. Silverman, *And Yet It Moves: Strange Systems and Subtle Questions in Physics*, Cambridge University Press 1993. Un très beau livre par un expert sur le mouvement. Cité aux pages 213, 220 et 221.

137 Ceci est expliqué par J. D. Hey, *Mystery error in Gamow's Tompkins reappears*, Physics Today pp. 88–89, May 2001. Cité à la page 212.

138 Cette belle expérience a été publiée pour la première fois dans A. S. Stodolna, A. Rouzée, F. Lépine, S. Cohen, F. Robicheaux, A. Gijsbertsen, J. H. Jungmann,

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

C. Bordas & M. J. J. Vrakking, *Hydrogen atoms under magnification: direct observation of the nodal structure of Stark states*, Physical Review Letters **110**, p. 213001, 2013. Cité aux pages 210 et 211.

139 L. L. Foldy, *The electromagnetic properties of Dirac particles*, Physical Review **83**, pp. 688–693, 1951, L. L. Foldy, *The electron–neutron interaction*, Physical Review **83**, pp. 693–696, 1951, et L. L. Foldy, *Electron–neutron interaction*, Review of Modern Physics **30**, pp. 471–481, 1952. Cité à la page 215.

140 H. Euler & B. Kockel, *Über die Streuung von Licht an Licht nach der Diracschen Theorie*, Naturwissenschaften **23**, pp. 246–247, 1935, H. Euler, *Über die Streuung von Licht an Licht nach der Diracschen Theorie*, Annalen der Physik **26**, p. 398, 1936, et W. Heisenberg & H. Euler, *Folgerung aus der Diracschen Theorie des Electrons*, Zeitschrift für Physik **98**, pp. 714–722, 1936. Cité à la page 218.

141 Voir l'explication simple de L. J. F. Hermans, *Blue skies, blue seas*, Europhysics News **37**, p. 16, 2006, et l'explication détaillée de C. L. Braun & S. N. Smirnov, *Why is water blue?*, Journal of Chemical Education **70**, pp. 612–614, 1993. Cité à la page 220.

142 La découverte a été publiée dans T. Friedmann & C. R. Hagen, *Quantum Mechanical Derivation of the Wallis Formula for* π , Journal of Mathematical Physics **56**, p. 112101, 2015, pré-imprimé sur arxiv.org/1510.07813. Voir également I Chashchina & Z. K. Silagadze, *On the quantum mechanical derivation of the Wallis formula for* π, pré-imprimé sur arxiv.org/1704.06153. Cité à la page 220.

143 Pour le cas utilisant des atomes, voir P. L. Gould, G. A. Ruff & D. E. Pritchard, *Diffraction of atoms by light: the near resonant Kapitza–Dirac effect*, Physical Review Letters **56**, pp. 827–830, 1986. Un grand nombre des tentatives expérimentales initiales pour observer la diffraction des électrons par la lumière, en particulier celles réalisées dans les années 1980, étaient controversées; la plupart ne montraient que la déflexion des électrons, comme expliqué par H. Batelaan, Contemporary Physics **41**, p. 369, 2000. Plus tard, avec l'aide de son équipe, il réalisa l'expérience la plus récente et la plus spectaculaire, démontrant une diffraction réelle, y compris les effets d'interférences. Elle est décrite dans D. L. Freimund, K. Aflatooni & H. Batelaan, *Observation of the Kapitza–Dirac effect*, Nature **413**, pp. 142–143, 2001. Cité à la page 221.

144 Un laser n'utilisant qu'un seul atome a été construit en 1994 par K. An, J. J. Childs, R. R. Dasari & M. S. Feld, *Microlaser: a laser with one atom in an optical resonator*, Physical Review Letters **73**, p. 3375, 1994. Cité à la page 221.

145 Une introduction est donnée dans P. Pinkse & G. Rempe, *Wie fängt man ein Atom mit einem Photon?*, Physikalische Blätter **56**, pp. 49–51, 2000. Cité à la page 221.

146 J.P. Briand & al., *Production of hollow atoms by the excitation of highly charged ions in interaction with a metallic surface*, Physical Review Letters **65**, pp. 159–162, 1990. Voir également G. Marowsky & C. Rhodes, *Hohle Atome und die Kompression von Licht in Plasmakanälen*, Physikalische Blätter **52**, pp. 991–994, Oktober 1996. Cité à la page 221.

147 G. Gabrielse, D. Hanneke, T. Kinoshita, M. Nio & B. Odom, *New determination of the fine structure constant from the electron g value and QED*, Physical Review Letters **97**, p. 030802, 2006. Cité à la page 222.

148 A. Sommerfeld, *Zur Quantentheorie der Spektrallinien*, Annalen der Physik **51**, pp. 1–94, 1916, et le reste de l'article sous le même titre aux pp. 125–167 du même volume. La constante de structure fine avait été introduite dans le premier article, mais Sommerfeld expliquait que l'article était une transcription des conférences qu'il avait donnée en 1915. Cité à la page 223.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

149 Wolfgang Pauli, *Exclusion principle and quantum mechanics*, discours de réception de son prix Nobel, le 13 Décembre 1946, dans *Nobel Lectures, Physics*, Volume 3, 1942–1962, Elsevier, 1964. Cité à la page 223.

150 Un récit informatif du monde de la psychokinésie et du paranormal est donné par le célèbre magicien professionnel James Randi, *Flim-flam!*, Prometheus Books, Buffalo 1987, ainsi que dans plusieurs de ses autres livres. Voir également le site Web www.randi.org. Cité à la page 229.

151 *Le Système International d'Unités*, Bureau International des Poids et Mesures, Pavillon de Breteuil, Parc de Saint Cloud, 92310 Sèvres, France. Tous les nouveaux développements concernant les unités SI sont publiés dans la revue *Metrologia*, éditée par le même organisme. Pour vous montrer la lenteur d'une ancienne institution, le BIPM n'a lancé un site Web qu'en 1998. Il est désormais joignable sur www.bipm.fr. Voir également le site Web www.utc.fr/~tthomass/Themes/Unites/index.html, qui inclue les biographies des personnes qui ont donné leurs noms aux différentes unités. Le site de son équivalent britannique, www.npl.co.uk/npl/reference, est bien meilleur. Il fournit de nombreux détails ainsi que la version en langue anglaise des définitions des unités SI. Cité à la page 233.

152 La bible dans le domaine de la mesure du temps est le travail en deux volumes de J. Vanier & C. Audoin, *The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards*, Adam Hilge, 1989. Un compte rendu populaire est celui de Tony Jones, *Splitting the Second*, Institute of Physics Publishing, 2000.

Le site opdaf1.obspm.fr/www/lexique.html donne un glossaire des termes utilisés dans le domaine. Pour les mesures précises des *longueurs*, les outils de choix sont des lasers spéciaux, tels que les lasers à verrouillage de mode (ou blocage de mode, ou en anglais «mode-locked» [N.d.T.]) et les peignes de fréquence. Il existe une abondante littérature sur ces sujets. La littérature sur les mesures précises des *courants électriques* est tout aussi importante. Une compétition est en cours pour tenter de trouver la meilleure façon de le faire: compter les charges ou mesurer les forces magnétiques. La question fait toujours débat. En ce qui concerne les mesures de *masses* et de masses atomiques, voir le volume II, à la page 71. Sur les mesures de *températures* de haute précision, voir le volume I, à la page 548. Cité à la page 234.

153 Les préfixes SI non officiels ont été proposés pour la première fois dans les années 1990 par Jeff K. Aronson de l'Université d'Oxford, et pourraient devenir d'usage courant à l'avenir. Voir New Scientist **144**, p. 81, 3 Décember 1994. D'autres propositions moins sérieuses existent également. Cité à la page 236.

154 Pour plus de détails sur les systèmes d'unités électromagnétiques, voir le texte standard de John David Jackson, *Classical Electrodynamics*, 3rd edition, Wiley, 1998. Cité à la page 238.

155 D.J. Bird & al., *Evidence for correlated changes in the spectrum and composition of cosmic rays at extremely high energies*, Physical Review Letters **71**, pp. 3401–3404, 1993. Cité à la page 239.

156 P. J. Hakonen, R. T. Vuorinen & J. E. Martikainen, *Nuclear antiferromagnetism in rhodium metal at positive and negative nanokelvin temperatures*, Physical Review Letters **70**, pp. 2818–2821, 1993. Voir également son article dans Scientific American, January 1994. Cité à la page 240.

157 A. Zeilinger, *The Planck stroll*, American Journal of Physics **58**, p. 103, 1990. Pouvez-vous trouver un autre exemple similaire? Cité à la page 240.

Défi 205 f

158 Un aperçu de ce travail fascinant est donné par J. H. Taylor, *Pulsar timing and relativistic*

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

gravity, Philosophical Transactions of the Royal Society, London A **341**, pp. 117–134, 1992. Cité à la page 240.

159 L'horloge la plus précise construite en 2004, une horloge atomique à fontaine de césium, avait une précision d'un sur 10^{15}. Il a été annoncé qu'une précision plus élevée devrait bientôt être possible, entre autres par M. Takamoto, F.-L. Hong, R. Higashi & H. Katori, *An optical lattice clock*, Nature **435**, pp. 321–324, 2005. Cité à la page 240.

160 J. Bergquist, ed., *Proceedings of the Fifth Symposium on Frequency Standards and Metrology*, World Scientific, 1997. Cité à la page 240.

161 Voir l'information concernant les mésons $D_s^{\pm}$ sur le site du «Particle Data Group» sur pdg.web.cern.ch/pdg. Cité à la page 240.

162 Concernant la longue durée de vie du tantale 180, voir D. Belic & al., *Photoactivation of* $^{180}Ta^{m}$ *and its implications for the nucleosynthesis of nature's rarest naturally occurring isotope*, Physical Review Letters **83**, pp. 5242–5245, 20 December 1999. Cité à la page 241.

163 Voir la revue de synthèse par L. Ju, D. G. Blair & C. Zhao, *The detection of gravitational waves*, Reports on Progress in Physics **63**, pp. 1317–1427, 2000. Cité à la page 241.

164 Voir l'article clair et détaillé de G. E. Stedman, *Ring laser tests of fundamental physics and geophysics*, Reports on Progress in Physics **60**, pp. 615–688, 1997. Cité à la page 241.

165 Les différents concepts font même l'objet d'une norme internationale distincte, ISO 5725, intitulée *Exactitude (justesse et fidélité)* des résultats et méthodes de mesure. Une bonne introduction est celle de John R. Taylor, *An Introduction to Error Analysis: the Study of Uncertainties in Physical Measurements*, 2nd edition, University Science Books, Sausalito, 1997. Cité à la page 242.

166 P. J. Mohr, B. N. Taylor & D. B. Newell, *CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2010*, pré-imprimé sur arxiv.org/abs/1203.5425. Il s'agit de l'ensemble des constantes résultant d'un ajustement international et qui sont recommandées pour les utilisations internationales par le Comité de données pour la science et la technologie (CODATA), lui-même un organe du Conseil international des unions scientifiques, qui regroupe l'Union internationale de physique pure et appliquée (IUPAP), l'Union internationale de chimie pure et appliquée (IUPAP) ainsi que d'autres organisations. Le site Web de l'IUPAP est www.iupac.org. Cité à la page 243.

167 On peut trouver quelques-unes des histoires dans le texte de N. W. Wise, *The Values of Precision*, Princeton University Press, 1994. Le domaine des mesures de haute précision, dont sont issus les résultats de ces pages, est un monde à lui seul. Une belle introduction en est donnée par J. D. Fairbanks, B. S. Deaver, C. W. Everitt & P. F. Michaelson, eds., *Near Zero: Frontiers of Physics*, Freeman, 1988. Cité à la page 243.

168 Pour plus de détails, voir la célèbre référence en astronomie de P. Kenneth Seidelmann, *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*, 1992. Cité à la page 249.

169 Voir la référence correspondante dans le premier volume. Cité à la page 251.

170 Une bonne référence est *Encyclopedia of Mathematics*, en 10 volumes, Kluwer Academic Publishers, 1988–1993. Elle explique la plupart des concepts utilisés en mathématiques. Passer une heure à y rechercher des mots-clés apparentés est un moyen efficace pour obtenir une introduction sur n'importe quelle branche des mathématiques, en particulier sur le vocabulaire et les principaux liens.

L'approche inverse, pour rendre les choses aussi compliquées que possible, est adoptée dans le charmant texte de Carl E. Linderholm, *Mathematics Made Difficult*, 1971. Cité à la page 252.

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

171 Une excellente introduction sur les systèmes de nombres en mathématique, y compris les nombres hyperréels (ou non standards), les quaternions, les octonions, les nombres p-adiques et les nombres surréels, est celle du livre de Heinz-Dieter Ebbinghaus, Hans Hermes, Friedrich Hirzebruch, Max Koecher, Klaus Mainzer, Jürgen Neukirch, Alexander Prestel & Reinhold Remmert, *Zahlen*, 3rd edition, Springer Verlag, 1993. Il est également disponible en anglais sous le titre *Numbers*, Springer Verlag, 1990. Cité aux pages 254, 264 et 265.

172 Pour un livre expliquant comment utiliser les nombres hyperréels au Lycée, voir Helmut Wunderling, *Analysis als Infinitesimalrechnung*, Duden Paetec Schulbuchverlag, 2007. Cité à la page 265.

173 A. Waser, *Quaternions in Electrodynamics*, 2001. Il est possible de télécharger le texte depuis plusieurs sites Web. Cité aux pages 257 et 262.

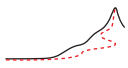
174 S. L. Altman, *Rotations, Quaternions and Double Groups*, Clarendon Press, 1986, et également S. L. Altman, *Hamilton, Rodriguez and the quaternion scandal*, Mathematical Magazine **62**, pp. 291–308, 1988. Voir également J. C. Hart, G. K. Francis & L. H. Kauffman, *Visualzing quaternion rotation*, ACM Transactions on Graphics **13**, pp. 256–276, 1994. Ce dernier peut être téléchargé depuis plusieurs sites sur internet. Cité à la page 259.

175 Voir l'excellent livre de Louis H. Kauffman, *Knots and Physics*, World Scientific, 2nd edition, 1994, qui fournit une introduction visuelle et claire des mathématiques des nœuds et de leurs applications principales en physique. Cité à la page 260.

176 Les entiers de Gauss sont explorés par G. H. Hardy & E. M. Wright, *An Introduction to the Theory of Numbers*, 5th edition, Clarendon Press, Oxford, 1979, dans les sections 12.2 'The Rational Integers, the Gaussian Integers, and the Integers', pp. 178–180, et 12.6 'Properties of the Gaussian Integers' pp. 182–183. Pour des défis concernant les entiers de Gauss voir www.mathpuzzle.com/Gaussians.html. Cité à la page 265.

177 Concernant les nombres transfinis, voir le somptueux livre en édition de poche de Rudy Rucker, *Infinity and the Mind – the Science and Philosophy of the Infinite*, Bantam, 1983. Cité à la page 265.

178 E. I. Butikov, *The rigid pendulum – an antique but evergreen physical model*, European Journal of Physics **20**, pp. 429–441, 1999, et D. Easton, *The quantum mechanical tipping pencil – a caution for physics teachers*, European Journal of Physics **28**, pp. 1097–1104, 2007. Cité à la page 273.



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Crédits

Remerciements

Nombreux sont ceux qui, ayant su entretenir leur don de curiosité, ont apporté leur soutien afin de mener à bien ce projet. Par-dessus tout, Peter Rudolph et Saverio Pascazio ont été (présents ou non) une référence permanente pour ce projet. Fernand Mayné, Ata Masafumi, Roberto Crespi, Serge Pahaut, Luca Bombelli, Herman Elswijk, Marcel Krijn, Marc de Jong, Martin van der Mark, Kim Jalink, mes parents Peter et Isabella Schiller, Mike van Wijk, Renate Georgi, Paul Tegelaar, Barbara et Edgar Augel, M. Jamil, Ron Murdock, Carol Pritchard, Richard Hoffman, Stephan Schiller, Franz Aichinger et avant tout, mon épouse Britta ont tous apporté des conseils et des encouragements précieux.

De nombreuses personnes ont contribué au projet et à la collecte des documents et informations. Parmi les plus pertinentes, se trouvent l'aide de Mikael Johansson, de Bruno Barberi Gnecco et de Lothar Beyer, les innombrables améliorations de la part de Bert Sierra, les suggestions détaillées de Claudio Farinati, les nombreuses améliorations de la part d'Eric Sheldon, les suggestions détaillées d'Andrew Young, l'aide et les conseils continus de Jonatan Kelu, les corrections d'Elmar Bartel, et en particulier l'aide étendue, passionnée et consciencieuse d'Adrian Kubala.

Des documents importants ont été fournis par 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, Igor Ivanov, Doug Renselle, Wim de Muynck, Steve Carlip, Tom Bruce, Ryan Budney, Gary Ruben, Chris Hillman, Olivier Glassey, Jochen Greiner, squark, Martin Hardcastle, Mark Biggar, Pavel Kuzin, Douglas Brebner, Luciano Lombardi, Franco Bagnoli, Lukas Fabian Moser, Dejan Corovic, Paul Vannoni, John Haber, Saverio Pascazio, Klaus Finkenzeller, Leo Volin, Jeff Aronson, Roggie Boone, Lawrence Tuppen, Quentin David Jones, Arnaldo Uguzzoni, Frans van Nieuwpoort, Alan Mahoney, Britta Schiller, Petr Danecek, Ingo Thies, Vitaliy Solomatin, Carl Offner, Nuno Proença, Elena Colazingari, Paula Henderson, Daniel Darre, Wolfgang Rankl, John Heumann, Joseph Kiss, Martha Weiss, Antonio González, Antonio Martos, André Slabber, Ferdinand Bautista, Zoltán Gácsi, Pat Furrie, Michael Reppisch, Enrico Pasi, Thomas Köppe, Martin Rivas, Herman Beeksma, Tom Helmond, John Brandes, Vlad Tarko, Nadia Murillo, Ciprian Dobra, Romano Perini, Harald van Lintel, Andrea Conti, François Belfort, Dirk Van de Moortel, Heinrich Neumaier, Jarosław Królikowski, John Dahlman, Fathi Namouni, Paul Townsend, Sergei Emelin, Freeman Dyson, S.R. Madhu Rao, David Parks, Jürgen Janek, Daniel Huber, Alfons Buchmann, William Purves, Pietro Redondi, Damoon Saghian, Wladimir Egorov, Markus Zecherle, Miles Mutka, ainsi que par un certain nombre de personnes qui ont souhaité rester anonymes.

Les outils logiciels ont été affinés grâce à l'aide considérable de Michael Zedler et de Achim Blumensath pour ce qui est des polices de charactères et de la mise en page, ainsi que grâce à

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

l'assistance précieuse et répétée de Donald Arseneau. Une aide a également été apportée par Ulrike Fischer, Piet van Oostrum, Gerben Wierda, Klaus Böhncke, Craig Upright, Herbert Voss, Andrew Trevorrow, Danie Els, Heiko Oberdiek, Sebastian Rahtz, Don Story, Vincent Darley, Johan Linde, Joseph Hertzlinger, Rick Zaccone, John Warkentin, Ulrich Diez, Uwe Siart, Will Robertson, Joseph Wright, Enrico Gregorio, Rolf Niepraschk et Alexander Grahn.

La mise en page et le design de ce livre sont dus aux conseils professionnels d'Ulrich Dirr. La typographie a été considérablement améliorée avec l'aide de Johannes Küster et de sa police de caractères Minion Math. Le design de l'ouvrage et de son site Web doit également beaucoup aux suggestions et au soutien de mon épouse Britta.

Je remercie également les législateurs et les contribuables allemands qui, contrairement à la plupart des autres pays du monde, autorisent leurs résidents à utiliser les bibliothèques universitaires locales.

Entre 2007 et 2011, l'édition électronique et la distribution du texte de *Motion Mountain* ont été généreusement soutenues par la Fondation Klaus Tschira.

Crédits filmographiques

L'image et l'animation des orbitales de l'atome d'hydrogène de la page 90 ont été produites avec une copie sponsorisée du progiciel *Atom in a Box* de Dean Dauger disponible sur daugerresearch.com.

Les animations en couleur des fonctions d'onde de la page 101, de la page 106, de la page 107, de la page 111, de la page 123, de la page 216 et de la page 218 sont protégées par droits d'auteur et aimablement fournies par Bernd Thaller; on peut les trouver sur son magnifique site Web vqm.uni-graz.at ainsi que sur les CDs qui accompagnent ses deux beaux livres: Bernd Thaller, *Visual Quantum Mechanics* Springer, 2000, et Bernd Thaller, *Advanced Visual Quantum Mechanics* Springer, 2004. Ces livres sont les meilleurs que l'on puisse lire pour acquérir une compréhension intuitive des fonctions d'onde et de leur évolution.

L'animation du tour de la ceinture de la page 148 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Greg Egan; on peut la trouver sur son site Web www.gregegan.net/APPLETS/21/21.html.

La belle animation du tour de la ceinture de la page 148 et la merveilleuse animation (jusqu'à présent unique) de l'échange de fermions de la page 152 sont protégées par droits d'auteur et aimablement fournies par Antonio Martos; on peut les trouver sur vimeo.com/62228139 et sur vimeo.com/62143283.

Crédits photographiques

La photographie de la face est du mont Langtang Lirung dans l'Himalaya népalais, que montre le plat avant de la couverture, est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Kevin Hite; on peut la trouver sur son blog thegettingthere.com. La photographie d'un ver luisant de la page 15 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par John Tyler; on peut la trouver sur son joli site Web www.johntyler.co.uk/gwfacts.htm. La photographie d'un papillon aux ailes transparentes de la page 17 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Linda de Volder; on peut la trouver sur son site www.flickr.com/photos/lindadevolder. La photographie d'une fenêtre de train de la page 36 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Greta Mansour; on peut la trouver sur son site Web www.flickr.com/photos/wireful/. Le graphique du spectre de couleurs de la page 45 est protégé par droits d'auteur et aimablement fourni par Andrew Young; des explications sont données sur son site Web mintaka.sdsu.edu/GF/explain/optics/rendering.html. Les images de pellicules photographiques de la page 46 sont protégées par droits d'auteur et aimablement fournies par Rich Evans. Les images de photomultipli-

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

cateurs de la page 46 sont protégées par droits d'auteur et aimablement fournies par Hamamatsu Photonics. Les images de l'expérience produisant des interférences de photons de faible intensité de la page 47 sont protégées par droits d'auteur de Delft University of Technology et aimablement fournies par Silvania Pereira; on peut les trouver sur le site Web www.optica.tn.tudelft.nl/education/photons.asp. La photographie de l'appareil à effet Compton de la page 50 a été prise par Helene Hoffmann et est aimablement fournie par Arne Gerdes de l'Université de Göttingen; on peut la trouver sur le site Web de l'enseignement de la physique lp.uni-goettingen.de. Le graphe de la page 55 est protégé par droits d'auteur et aimablement fourni par Rüdiger Paschotta; on peut le trouver sur sa merveilleuse encyclopédie du laser, disponible gratuitement sur www.rp-photonics.com. La photographie de l'interféromètre de Mach-Zehnder de la page 57 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Félix Dieu et Gaël Osowiecki; on peut la trouver sur leurs sites Web www.flickr.com/photos/felixdieu/sets/72157622768433934/ et www.flickr.com/photos/gaeloso/sets/72157623165826538/. La photographie de la page 58 est protégée par droits d'auteur de John Davis et est aimablement fournie par la NASA. L'image d'interférence produite par un miroir de télescope de la page 63 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Mel Bartels; on peut la trouver sur son site www.bbastrodesigns.com. L'image de la figure de granularité laser est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Epzcaw; on peut la trouver sur Wikimedia Commons. À la page 64, les figures d'interférences produites par deux fentes sont protégées par droits d'auteur et aimablement fournies par Dietrich Zawischa; on peut les trouver sur son site Web www.itp.uni-hannover.de/~zawischa dédié à la beauté et à la science. La figure d'interférence des faisceaux gaussiens est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Rüdiger Paschotta; on peut le trouver sur son encyclopédie du laser, disponible gratuitement sur www.rp-photonics.com. La photographie du ciel bleu de la page 77 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Giorgio di Iorio; on peut la trouver sur son site Web www.flickr.com/photos/gioischia/. Les images de l'expérience des fils métalliques qui se croisent à la page 85 sont protégées par droits d'auteur et aimablement fournies par José Costa-Krämer et par l'AAPT. La célèbre photographie de diffraction d'électrons de la page 86 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Claus Jönsson. La photographie presque aussi célèbre qui montre la formation de la diffraction des électrons à la page 86 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Tonomura Akira/Hitachi; on peut la trouver sur le site Web www.hqrd.hitachi.co.jp/em/doubleslit.cfm. Le graphe de l'hydrogène de la page 96 est protégé par droits d'auteur et aimablement fourni par Peter Eyland. Les photographies de l'effet Aharonov-Bohm de la page 111 sont protégées par droits d'auteur et aimablement fournies par Doru Cuturela. Les images de molécules d'ADN de la page 113 sont protégées par droits d'auteur et aimablement fournies par Hans-Werner Fink; elles ont été utilisées avec la permission de Wiley VCH. Les images de l'expérience montrant le regroupement et l'anti-regroupement de ^{3}He et ^{4}He à la page 134 proviennent du site Web atomoptic.iota.u-psud.fr/research/helium/helium.html; elles sont protégées par droits d'auteur et aimablement fournies par Denis Boiron et Jerome Chatin. La photographie de métal fondu de la page 195 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Graela; on peut la trouver sur flickr.com/photos/alaig. La photographie du cierge magique de la page 195 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Sarah Domingos; on peut la trouver sur son site Web flickr.com. La photographie du cœur de réacteur de la page 195 est aimablement fournie par la NASA; on peut la trouver sur le site Web grin.hq.nasa.gov. Les photographies de lampes à décharges de la page 195 sont protégées par droits d'auteur et aimablement fournies par Pslawinski; on peut les trouver sur www.wikimedia.org. La photographie de l'aurore polaire de la page 196 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Jan Curtis; on peut la trouver sur son site Web climate.gi.alaska.edu/Curtis/curtis.html. La photographie des flammes colorées de la page 196 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Philip Evans; on peut la trouver sur son site

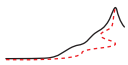
Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Web community.webshots.com/user/hydrogen01. La photographie de l'iceberg de la page 196 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Marc Shandro; on peut la trouver sur son site Web flickr.com/photos/mshandro. La photographie de malachite de la page 196 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Stephan Wolfsried; on peut la trouver sur le site Web www.mindat.org. La photographie du masque de télévision de la page 196 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Planemad; on peut la trouver sur le site Web www.wikimedia.org. Les photographies de minéraux de la page 197 et des pages suivantes sont protégées par droits d'auteur et aimablement fournies par Rob Lavinsky sur irocks.com; elles proviennent de sa vaste et somptueuse collection sur ce site ainsi que sur www.mindat.org/photo-49529.html. La photographie d'un narcisse de la page 197 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Thomas Lüthi; on peut la trouver sur son site Web www.tiptom.ch/album/blumen/. La photographie du doigt avec une goutte de sang de la page 197 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Ian Humes; on peut la trouver sur son site Web www.flickr.com/photos/ianhumes. La photographie de baies de la page 197 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Nathan Wall; on peut la trouver sur son site Web www.flickr.com/photos/ozboi-z. La photographie de la femme aux cheveux roux de la page 197 est de dusdin et est aimablement fournie par Wikimedia. La photographie rare d'un poisson pêcheur vivant de la page 198 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Steve Haddock; on peut la trouver sur son site Web www.lifesci.uscb.edu/~biolum/. La photographie de magnétite de la page 198 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Stephan Wolfsried; on peut la trouver sur le site Web www.mindat.org. La photographie du désert de la page 198 est protégée par droits d'auteur d'Evelien Willemsen et est aimablement fournie par Raf Verbeelen; on peut la trouver sur www.flickr.com/photos/verbeelen. La photographie du saxophone ténor de la page 199 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Selmer sur www.selmer.fr. La photographie de l'oxyde de zinc de la page 199 est de Walkerma et est aimablement fournie par Wikimedia. La photographie des points quantiques fluorescents de la page 199 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Andrey Rogach du Center de nanosciences de Munich. La photographie de zircone de la page 200 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Gregory Phillips; on peut la trouver sur le site Web commons.wikimedia.org. Le coucher de soleil sur Tokyo de la page 201 est protégé par droits d'auteur et aimablement fourni par Altus Plunkett on peut le trouver sur son site Web www.flickr.com/photos/altus. La photographie de quartz bleu de la page 201 est protégée par droits d'auteur de 2008 et aimablement fournie par David K. Lynch; on peut la trouver sur son site Web www.thulescientific.com. La photographie du bonhomme de neige de la page 201 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Andreas Kostner; on peut la trouver sur son site Web www.flickr.com/photos/bytesinmotion. La photographie de la grenouille venimeuse bleue en voie de disparition de la page 201 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Lee Hancock; on peut la trouver sur le site Web www.treewalkers.org. La photographie de rubis doré de la page 201 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par le Murano Glass Shop; on peut la trouver sur leur site Web murano-glass-shop.it. La photographie du gyrolaser avec génération de deuxième harmonique de la page 201 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Jeff Sherman; on peut la trouver sur son site Web flickr.com/photos/fatllama. La photographie de l'ormeau de la page 202 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Anne Elliot; on peut la trouver sur son site Web flickr.com/photos/annkelliot. La photographie des couleurs de polarisation de la page 202 est protégée par droits d'auteur de Nevit Dilmen et aimablement fournie par Wikimedia. La photographie du canard colvert de la page 202 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Simon Griffith; on peut la trouver sur son site Web www.pbase.com/simon2005. La photographie de l'opale de la page 202 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Opalsnopals; on peut la trouver sur le site Web www.

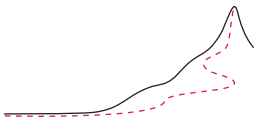
Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

flickr.com. La photographie de la condensation par un avion de la page 202 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Franz Kerschbaum; on peut la trouver sur le site Web epod.usra.edu. La photographie de CD de la page 203 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Alfons Reichert; on peut la trouver sur son site Web www.chemiephysikskripte.de/artikel/cd.htm. La figure de cristaux liquides de la page 203 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Ingo Dierking et Wiley/VCH; on peut la trouver dans son livre somptueux Ingo Dierking, *Textures of Liquid Crystals*, Wiley-VCH, 2003. Voir également son site Web reynolds.ph.man.ac.uk/people/staff/dierking/gallery. Le spectre de couleurs mesuré de la page 205 est protégé par droits d'auteur et aimablement fourni par Nigel Sharp, NOAO, FTS, NSO, KPNO, AURA et NSF. La photographie d'une décharge d'hydrogène de la page 207 est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par Jürgen Bauer; on peut la trouver sur le joli site Web www.smart-elements.com. Les illustrations des orbitales de l'hydrogène de la page 212 sont aimablement fournies par Wikimedia. Les images des structures atomiques nodales de la page 211 sont aimablement fournies par Aneta Stodolna et protégées par droits d'auteur et aimablement fournies par l'American Physical Society; on peut les trouver sur journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.110.213001. Les graphes des états de lumière compressée de la page 272 sont aimablement fournis par G. Breitenbach et S. Schiller; ils sont protégés par droits d'auteur de Macmillan.

Les portraits historiques des physiciens qui apparaissent dans le texte sont du domaine public, excepté lorsque nous avons mentionné le contraire. La photographie sur le plat arrière de la couverture d'un lézard basilic courant sur l'eau est protégée par droits d'auteur et aimablement fournie par le groupe belge TERRA vzw; on peut la trouver sur leur site Web www.terravzw.org. Tous les dessins sont protégés par droits d'auteur de Christoph Schiller. Si vous soupçonnez que votre droit d'auteur n'a pas été correctement attribué ou obtenu, cette erreur n'est pas intentionnelle et vous êtes aimablement invité à contacter l'auteur dans ce cas.



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net



Index des noms

A
AAPT 85, 297
Aedini, J. 281
Aflatooni, K. 291
Aharonov, Y. 283
Aichinger, Franz 295
Alber, G. 288
Allison, S.W. 283
Altman, S.L. 294
An, K. 291
Anderson, Carl 217
Anderson, M.H. 282
Andrews, M.R. 282, 289
Anton, A. 281
APS 211
Arndt, M. 282, 288
Aronson, Jeff K. 292
Aronson, Jeff K. 295
Arseneau, Donald 296
Aspect, A. 285, 288
Aspect, Alain 175
Aspelmeyer, M. 281
Ata Masafumi 295
Audoin, C. 292
Augel, Barbara 295
Augel, Edgar 295
Awschalom, D.D. 289

B
Babinet, Jaques
  sa vie 234
Bader, Richard F.W. 279
Baez, John 295
Bagnoli, Franco 295
Balibar, Françoise 279, 287
Balmer, Johann 206
Barberi Gnecco, Bruno 295
Bardeen, John 288
Barnett, S.M. 283
Bartel, Elmar 295
Bartels, Mel 63, 297
Batelaan, H. 291
Bauer, Jürgen 207, 299
Baumann, K. 288
Bautista, Ferdinand 295
Baylor, D.A. 280
Beaty, William 295
Beeksma, Herman 295
Belfort, François 295
Belic, D. 293
Belinfante, F.J. 287
Bell, J. 185
Bell, John 289
Bell, John
  sa vie 185
Belsley, M. 285
Bergmann, U. 290
Bergquist, J. 293
Bernard Shaw, George 81
Bernu, J. 288
Berroir, J.-M. 285
Berry, M.V. 286
Berry, Michael 286
Bessel 205
Beutelspacher, Albrecht 191
Beyer, Lothar 295
Biggar, Mark 295
Bird, D.J. 292
Björk, G. 281
Blair, D.G. 293
Blumensath, Achim 295
Boas, P. Van Emde 284
Bocquillon, E. 285
Bohm, D. 283
Bohm, David 288
Bohr, N. 278, 281, 282
Bohr, Niels 19, 41, 73, 88, 89, 162, 163, 188, 207, 287
  sa vie 19
Boiron, D. 285
Boiron, Denis 134, 297
Bombelli, Luca 295
Boone, Roggie 295
Bordas, C. 291
Borgne, J.-F. Le 290
Born, Max 279, 283
Born, Max 28, 98, 101
  sa vie 24
Bose, S.N. 285
Bouwmeester, D. 286, 289
Bradley, C.C. 282
Brahmagupta 253
Brandes, John 295
Braun, C.L. 291
Brebner, Douglas 295
Breitenbach, G. 280
Breitenbach, G. 272, 299
Brendel, J. 281
Brezger, B. 288
Briand, J.P. 291
Briand, J.P. 221
Brillouin, Léon 208
Broglie, L. de 282
Bronshtein, Matvei 8
Brown, R. Hanbury 280
Bruce, Tom 295
Brumberg, E.M. 280
Brumberg, E.M. 44

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

B

BRUNE

Brune, M. 288
Bub, J. 279
Buchmann, Alfons 295
Budney, Ryan 295
Bunsen, Robert 205
Busch, Paul 279
Butikov, E.I. 294
Buzek, V. 286
Böhncke, Klaus 296

C
Caldeira, A.O. 287
Candela, D. 282
Carlip, Steve 295
Carr, Jim 295
Carruthers, P. 283
Cato, Marcus Porcius 194
Cavanna, A. 285
Cayley, Arthur 263, 264
Center de nanosciences de Munich 298
Chahravarty, S. 289
Chang, H. 285
Chang, I. 281
Chapman, M.S. 283
Chashchina, O.I 291
Chatin, Jerome 134, 297
Childs, J.J. 291
Chu, Steven 221
Cicero, Marcus Tullius 81
Cirone, M.A. 284
Clauser, J.F. 289
Clifton, R. 279
Cohen, S. 290
Cohen-Tannoudji, C. 279
Cohen-Tannoudji, Claude 221
Colazingari, Elena 295
Colella, R. 283
Collins, D. 286
Compton, A.H. 280
Compton, Arthur 50
Conti, Andrea 295
Corovic, Dejan 295
Correia, A. 282
Costa-Krämer, J.L. 282
Costa-Krämer, José 84, 85, 297
Costella, J.P. 284
Courtial, J. 283
Cramer, S.P. 290
Crane, H.R. 284
Crespi, Roberto 295
Crommle, M.F. 274
Cser, L. 284
Curtis, Jan 196, 297
Curtis, L.J. 290
Cuturela, Doru 111, 297

D
d'Aquin, Thomas 154
Daffertshofer, A. 286
Dahlman, John 295
Dalibard, J. 288
Danecek, Petr 295
Daniell, M. 289
Darley, Vincent 296
Darre, Daniel 295
Dasari, R.R. 291
Dauger, Dean 90, 296
Davis, John 58, 297
Davis, K.B. 282
de Broglie, Louis 85
sa vie 37
de Volder, Linda 17
Deaver, B.S. 293
Degen, Carl Ferdinand 264
Degiovanni, P. 285
Dehmelt, H. 284, 286
Dehmelt, Hans 286
Delft University of Technology 47, 297
Deléglise, S. 288
DeWitt, C. 290
di Iorio, Giorgio 77
Dicke, Robert H. 283
Dieks, D. 285
Dieks, Dennis 138
Dierking, Ingo 299
Dierking, Ingo 203, 299
Dieter Zeh, Hans 287
Dieu, Félix 57, 297
Diez, Ulrich 296
DiFilippo, Frank 295
Dilmen, Nevit 202, 298
Diophante d'Alexandrie 255
Dirac 221
Dirac, P.A.M. 281
Dirac, Paul 66, 74, 214
sa vie 214
Dirr, Ulrich 296
Diu, B. 279
DiVicenzo, D.P. 289
Dobra, Ciprian 295
Domingos, Sarah 195, 297
Dorsey, A.T. 289
Dreyer, J. 288
Druten, N.J. van 282
Duck, I. 286
Duran, E. 287
Durfee, D.S. 282, 289
dusdin 198, 298
Dyson, Freeman 295

E
Easton, D. 294
Ebbinghaus, Heinz-Dieter 294
Egan, Greg 148, 296
Egorov, Wladimir 295
Einstein, A. 280, 285, 288
Einstein, Albert 283
Einstein, Albert 33, 60, 63, 118, 133, 208
Ekstrom, C.R. 283
Elitzur, Avshalom 77
Elliot, Anne 202, 298
Ellis, D.G. 290
Els, Danie 296
Elswijk, Herman B. 295
Emelin, Sergei 295
Engels, F. 279
Engels, Friedrich 43, 83
Englert, Berthold-Georg 279
Epzcaw 63, 297
Erdős, Paul
sa vie 252
Erich Haas, Arthur 23, 212
Erschow, A. 287
Euler, H. 291
Euler, Hans 218
Euler, Leonhard 258
Evans, Philip 196, 297
Evans, Rich 46, 296
Everitt, C.W. 293
Eyland, Peter 96, 297

F
Facchi, P. 282

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

F

FAIRBANKS

Fairbanks, J.D. 293
Faragó, B. 284
Farinati, Claudio 295
Feld, M.S. 291
Fermani, Antonio 295
Fermi, Enrico
  sa vie 133
Fetzer, J. 290
Feynman, R. P. 286
Feynman, Richard 189
Feynman, Richard P. 281, 289
Feynman,
  Richard («Dick») Phillips
  sa vie 67
Fink, Hans-Werner 284
Fink, Hans-Werner 113, 297
Finkenzeller, Klaus 295
Firestone, R.B. 286
Fischbach, E. 280
Fischer, Ulrike 296
Fisher, M.P.A. 289
Foldy, L.L. 284, 291
Foldy, L.L. 118
Foley, E.L. 282
Fondation Klaus Tschira 296
Fonseca, E.J.S. 281
Francis, G.K. 294
Franke-Arnold, S. 283
Fraunhofer, Joseph
  sa vie 205
Freimund, D.L. 291
Freulon, V. 285
Friedman, J.R. 288
Friedmann, T. 291
Fumagalli, Giuseppe 278
Furrie, Pat 295
Fève, G. 285

G

Gabrielse, G. 286, 291
Galilei, Galileo 22, 26
Garcia, N. 282
García-Mochales, P. 282
Gardner, Martin 284
Garg, A. 289
Gasiorowicz, Stephen 283
Gasparoni, S. 281
Gauß, Carl-Friedrich 265
Gelbaum, Bernard R. 268
Gell-Mann, M. 287
Gell-Mann, Murray 162, 163, 189
Georgi, Renate 295
Gerdes, Arne 297
Gerlach, W. 283
Gerlach, Walther
  sa vie 94
Gijsbertsen, A. 290
Gillies, G.T. 283
Gisin, N. 281, 285
Glanz, J. 280
Glassey, Olivier 295
Glatzel, P. 290
Glauber, R.J. 281
Glauber, Roy 70
Gleyzes, S. 288
González, Antonio 295
Gottfried, Kurt 289
Goudsmit, S. 284
Goudsmit, Samuel 116
Gould, P.L. 291
Gould, R. 286
Graela 195, 297
Graham, Neill 289
Grahn, Alexander 296
Graves, John 264
Gray, C.G. 283
Greenberg, O.W. 285, 287
Greenberg, Oscar 161
Greenberger, D.M. 287, 289
Greenbergest, T.V. 287
Gregorio, Enrico 296
Greiner, Jochen 295
Griffith, Simon 202, 298
Grinstein, G. 289
Grit, C.O. 274
Groenzin, H. 290
Grotewohl, E. 290
Guerlin, C. 288
Gácsi, Zoltán 295

H

Haake, F. 288
Haber, John 295
Hackermüller, L. 282
Hackermüller, L. 288
Haddock, Steve 198, 298
Hagen, C. R. 291
Hagley, E. 288
Hajnal, A. 284
Hakonen, P.J. 292
Haley, Stephen 295
Halvorson, H. 279
Hamamatsu Photonics 46
Hamilton 258
Hammond, T.D. 283
Hanbury Brown, Robert 58
Hancock, Lee 201, 298
Hanneke, D. 291
Hannout, M. 283
Hardcastle, Martin 295
Hardy, G.H. 294
Haroche, S. 288, 289
Haroche, Serge 170, 288
Hart, J.C. 294
Hartung, R.W. 287
Hausherr, Tilman 295
Hayes, Allan 295
Heaviside 262
Hegerfeldt, Gerhard 176
Heisenberg, W. 291
Heisenberg, Werner 27, 88, 218
  sa vie 26, 28
Helmond, Tom 295
Henderson, Paula 295
Hergerfeldt, G.C. 288
Hermann, Armin 279
Hermans, L.J.F. 291
Hermes, Hans 294
Herneck, Friedrich 281
Hertz 262
Hertz, Heinrich 60, 214
Hertzlinger, Joseph 296
Hess, Victor 103
Heumann, John 295
Hewitt, Susan 279
Hey, J.D. 290
Higashi, R. 293
Hilbert, David 253
Hilborn, R. 286
Hilgevoord, Jan 279
Hillery, M. 286
Hillman, Chris 295
Hirzebruch, Friedrich 294
Hitachi 86, 297
Hite, Kevin 296

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

H

HITLER

Hitler, Adolf 18
Hoffman, Richard 295
Hoffmann, Helene 50, 297
Hogervorst, W. 285
Holt, R.A. 289
Hong, C.K. 285
Hong, F.-L. 293
Hoppeler, R. 285
Hornberger, K. 288
Horne, M.A. 289
Howell, J.C. 286
Hoyt, S. 283
Huber, Daniel 295
Huff, D. 287
Hulet, R.G. 282
Humes, Ian 198, 298
Hurwitz, Adolf 264
Hänsch, Theodor 220

I
Icke, Vincent 279
Iorio, Giorgio di 297
Itano, W.M. 288
Ivanov, Igor 295

J
Jackson, John David 292
Jacobson, J. 281
Jalink, Kim 295
Jamil, M. 295
Jammer, Max 278
Janek, Jürgen 295
Janssen, Jules 206
Jeltes, T. 285
Jin, Y. 285
Johann Gottfried Galle 205
Johansson, Mikael 295
Johnson, Samuel 278
Jones, Quentin David 295
Jones, Tony 292
Jong, Marc de 295
Joos, E. 287
Joos, Erich 287
Jordan, Pascual 26, 28
Joseph Bohm, David
  sa vie 174
Joyce, James 173
Ju, L. 293
Jungmann, J.H. 290
Jönsson, C. 282
Jönsson, Claus 86, 87, 297

K
K. Lynch, David 298
Köppe, Thomas 295
Kan, A.H.G. Rinnooy 284
Kapitza 221
Karl, G. 283
Katori, H. 293
Kauffman, L.H. 294
Kauffman, Louis H. 294
Keller, C. 282
Keller, Joseph 208
Kells, W. 286
Kelu, Jonatan 295
Kerschbaum, Franz 202, 299
Ketterle, W. 282, 289
Kidd, R. 281
Kielpinski, D. 288
King, B. E. 289
King, B.E. 288
Kinoshita, T. 291
Kirchhoff, Gustav 205
Kiss, Joseph 295
Klauder, J.R. 281
Klein, A. 290
Klein, Oskar 218
Kloor, H. 280
Kneib, J.-P. 290
Kochen, S. 289
Kochen, S. 185
Kockel, B. 291
Koecher, Max 294
Kostner, Andreas 201, 298
Krachmalnicoff, V. 285
Krexner, G. 284
Krijn, Marcel 295
Kronig, Ralph 116
Kryowonos, A. 283
Królikowski, Jarosław 295
Kubala, Adrian 295
Kuhr, S. 288
Kurn, D.M. 282, 289
Kuzin, Pavel 295
Kuščer, I. 283
Küster, Johannes 296

L
Lagrange, Joseph 258
Laloë, F. 279
Lamas-Linares, A. 286
Langel, R.A. 280
Lavinsky, Rob 197, 200, 298
Leach, J. 283
Leggett, A.J. 287, 289
Lenstra, J.K. 284
Leonardo da Vinci 91
Levitov, L. 288
Lindblad, G. 287
Linde, Johan 296
Linderholm, Carl E. 293
Lintel, Harald van 295
Lloyd, S. 288
Lockyer, Joseph 206
Lombardi, Luciano 295
Loss, D. 289
Loudon, Rodney 280
Louisell, W.H. 283
Lovász, P. 284
Lui, A.T.Y. 280
Lundeen, J.S. 281
Lynch, David 201
Lépine, F. 290
Lévy-Leblond, Jean-Marc 279,
  287
Lüthi, Thomas 198, 298

M
Maali, A. 288
Macmillan 272, 299
Magyar, G. 281
Magyar, G. 74
Mahoney, Alan 295
Mainzer, Klaus 294
Maitre, X. 288
Malik, J. 279
Mandel, L. 281, 285
Mandel, L. 74
Mansour, Greta 36, 296
Mariano, A. 282
Mark, Martin van der 295
Marowsky, G. 291
Marqués, M. 282
Martikainen, J.E. 292
Martini, K.M. 282
Martos, Antonio 148, 152, 295,

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

M

MASSAR

296
Massar, S. 285
Mattheck, Claus 279
Maxwell 262
Mayné, Fernand 295
Mayr, Peter 295
McKellar, B.H.J. 284
McNamara, J.M. 285
McQuarry, George 295
Meekhof, D. M. 289
Meekhof, D.M. 288
Mensky, M.B. 278
Merrit, John 295
Metikas, G. 284
Mewes, M.-O. 282
Meyenn, K. von 284
Meyer, J.C. 274
Michaelson, P.F. 293
Miesner, H.-J. 289
Migdall, A. 285
Milonni, P.W. 280
Misner, C.W. 286
Mitchell, M.W. 281
Mlynek, J. 280
Mohr, P.J. 293
Monken, C.H. 281
Monroe, C. 288, 289
Mooij, J.E. 288
Moortel, Dirk Van de 295
Moser, Lukas Fabian 295
Mullins, O.C. 290
Murdock, Ron 295
Murillo, Nadia 295
Mutka, Miles 295
Muynck, Wim de 295
Myatt, C.J. 288

N

Nagaoka Hantaro 89
Nagaoka, H. 282
Nairz, O. 282
Namouni, Fathi 295
NASA 297
Nassau, Kurt 290
Nath Bose, Satyenra
sa vie 133
Neukammer, J. 290
Neukirch, Jürgen 294
Neumaier, Heinrich 295
Neumann, János
sa vie 185
Newell, D.B. 293
Newton 79
Newton, T.D. 284
Newton, T.D. 118
Nienhuis, G. 283
Niepraschk, Rolf 296
Nieto, M.M. 283
Nieuwpoort, Frans van 295
Nio, M. 291
Norbury, John W. 290
Novikov, V.A. 283

O

Oberdiek, Heiko 296
Oberquell, Brian 295
Odom, B. 291
Offner, Carl 295
Ohanian, Hans C. 287
Ohmiya, A. 290
Olmsted, John M.H. 268
Oostrum, Piet van 296
Opalsnopals 202, 298
Orlando, T.P. 288
Orlitzky, A. 284
Osowiecki, Gaël 57, 297
Ou, Z.Y. 285
Overhauser, A.W. 283

P

Padgett, M. 283
Page, Don 295
Pahaut, Serge 95, 295
Pan, J.-W. 281, 289
Papini, G. 282
Parks, David 295
Pascal, Blaise
sa vie 51
Pascazio, S. 282
Pascazio, Saverio 295
Paschotta, Rüdiger 55, 64, 297
Pasi, Enrico 295
Paul, H. 281
Pauli, W. 286
Pauli, Wolfgang 292
Pauli, Wolfgang 28, 67, 150, 222
sa vie 117
Paulsen, C. 289
Payne, Cecilia
sa vie 206
Peeters, Bert 295
Pello, R. 290
Penrose, R. 286
Peredo, M. 280
Pereira, Silvania 297
Peres, Asher 279
Perini, Romano 295
Perrin, A. 285
Perrin, J. 282
Perrin, Jean 89
Philips, William 221
Phillips, Gregory 200, 298
Photonics, Hamamatsu 297
Pinkse, P. 291
Pittman, T.B. 285
Planck, Erwin 279
Planck, Max 278
Planck, Max 22, 52, 61, 118
sa vie 18
Planemad 197, 298
Plastino, A. 286
Plastino, A.R. 286
Plaçais, B. 285
Plunkett, Altus 201, 298
Podolsky, B. 288
Poincaré, Henri 280, 281
Poincaré, Henri 61
Popescu, S. 286
Prentis, J.J. 280
Prestel, Alexander 294
Prewitt, O. 287
Pritchard, Carol 295
Pritchard, D.E. 283, 291
Pritchard, David 96
Proença, Nuno 295
Pslawinski 196, 297
Purves, William 295
Pádua, de 61
Pádua, S. de 281
Pérez-Rodriguez, L. 290

R

Rahtz, Sebastian 296
Raimond, J.-M. 288, 289
Raimond, J.M. 288
Ramberg, E. 285

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

R

RAMBERG

Ramberg, E. 137
Randi, James 292
Rankl, Wolfgang 295
Redondi, Pietro 295
Reichert, Alfons 203, 299
Reichl, Linda 287
Remmert, Reinhold 294
Rempe, G. 291
Renselle, Doug 295
Reppisch, Michael 295
Rhodes, C. 291
Richard, J. 290
Rieke, F. 280
Rindler, W. 286
Rivas, Martin 295
Robbins, J.M. 286
Robertson, Will 296
Robicheaux, F. 290
Rogach, Andrey 200, 298
Roger, G. 288
Roos, Hans 279
Rosen, N. 288
Rosenfeld 73
Rosenfeld, L. 281
Rouzée, A. 290
Rowan Hamilton, William
  sa vie 257
Ruben, Gary 295
Rubin, M.H. 285
Rucker, Rudy 294
Rudolph, Peter 295
Ruff, G.A. 291
Ruiz-Morales, Y. 290
Rydberg, Johannes 207

S

S.R. Madhu Rao 295
Sabbata, V. de 283
Sackett, C.A. 282, 288
Sackur, Otto 128
Sagan, Hans 268
Saghian, Damoon 295
Salam, Abdus 279
Sasaki, N. 290
Sayrin, C. 288
Schaerer, D. 290
Schellekens, M. 285
Schiller, Britta 295, 296
Schiller, Christoph 299
Schiller, Friedrich
  sa vie 44
Schiller, Isabella 295
Schiller, Peter 295
Schiller, S. 280
Schiller, S. 299
Schiller, Stephan 295
Schleich, W.P. 284, 288
Schmiedmayer, J. 283
Schrödinger, E. 283
Schrödinger, Erwin 39, 208
  sa vie 103
Schubert, Max 279
Schucking, E. 284
Schwenk, Jörg 191
Schwinger, Julian 279
Schwinger, Julian 115, 116
Schönenberger, C. 285
Scott, Jonathan 295
Seidelmann, P. Kenneth 293
Selmer 199, 298
Serena, P.A. 282
Sergienko, A.V. 285
Shandro, Marc 196, 298
Sharkov, I. 284
Sharp, Nigel 205, 299
Sheldon, Eric 295
Shepp, L. 284
Sherman, Jeff 201, 298
Shih, Y.H. 285
Shimony, A. 289
Siart, Uwe 296
Sierra, Bert 295
Silagadze, Z.K. 291
Silverman, M.P. 283
Silverman, Mark 220
Silverman, Mark P. 290
Simon, C. 286
Simon, Julia 295
Singleton, Douglas 295
Sivaram, C. 283
Slabber, André 295
Smirnov, S.N. 291
Smith, J.F. 289
Snow, G.A. 285
Snow, G.A. 137
Solomatin, Vitaliy 295
Sommerfeld, A. 291
Sommerfeld, Arnold 212–214, 222
Specker, E.P. 289
Specker, E.P. 185
Stedman, G.E. 293
Steinberg, A.M. 281
Stern, O. 283
Stern, Otto
  sa vie 94
Stodolna, A.S. 290
Stodolna, Aneta 210, 211, 299
Story, Don 296
Strekalov, D.V. 285
Strunz, W.T. 288
Styer, D. 288
Subitzky, Edward 279
Sudarshan, E. C. G. 286
Sudarshan, E.C.G. 281
Surdin, Vladimir 295

T

Tacite 226
Takamoto, M. 293
Tanaka, Y. 290
Tarko, Vlad 295
Taylor, B.N. 293
Taylor, J.H. 292
Taylor, John R. 293
Tegelaar, Paul 295
Tegmark, M. 287, 290
Tetrode, Hugo 128
Thaler, Jon 295
Thaller, Bernd 296
Thaller, Bernd 101, 106, 107, 111, 123, 216, 218, 296
Thies, Ingo 295
Thomas, L. 284
Thomas, Llewellyn 117
Thorne, K.S. 286
Tian, L. 288
Tibère 226
Tino, G. 286
Tittel, Wolfgang 281
Tollett, J.J. 282
Tonomura Akira 86, 297
Townsend, C.G. 289
Townsend, Paul 295
Trevorrow, Andrew 296
Tschira, Klaus 296
Tuominen, M.T. 282

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Tuppen, Lawrence 295
Turchette, Q.A. 288
Twamley, J. 286
Twiss, R.Q. 280
Twiss, Richard 58
Tyler, John 18, 296
Török, Gy. 284

U
Uguzzoni, Arnaldo 295
Uhlenbeck, G.E. 284
Uhlenbeck, George 116
Upright, Craig 296
Ursin, R. 281

V
Vaidman, Lev 77
Vanier, J. 292
Vannoni, Paul 295
Vardi, Ilan 285
Vassen, W. 285
Vavilov, S.I. 280
Vavilov, S.I. 44
Verbeelen, Raf 298
Viana Gomes, J. 285
Vico, Giambattista
  sa vie 186
Viñuda, J. 290
Volder, Linda de 296
Volin, Leo 295
Voltaire 226
von Neumann, John 163
  sa vie 185
Vos-Andreae, J. 282
Voss, Herbert 296
Voss, R.F. 289
Vrakking, M.J.J. 291
Vuorinen, R.T. 292

W
Wal, C.H. van der 288
Walkerma 199, 298
Wall, Nathan 198, 298
Walther, P. 281
Warkentin, John 296
Waser, A. 294
Webb, R.A. 289
Weber, Gerhard 279
Wehinger, S. 283
Weinberg, Steven 281
Weinberg, Steven 121, 163
Weinfurter, H. 289
Weiss, Martha 295
Weisskopf, Victor 289
Werner, S.A. 283
Westbrook, C.I. 285
Weyl, Hermann 147
Wheeler, J.A. 286, 290
Wheeler, John 270
Wheeler, John A. 287
Widom, A. 283
Wierda, Gerben 296
Wierzbicka, Anna 295
Wiesner, S.J. 286
Wiesner, Stephen 138
Wigner, E. 286
Wigner, E.P. 284
Wigner, E.P. 118
Wigner, Eugene
  sa vie 141
Wigner, Eugene P. 279
Wijk, Mike van 295
Wikimedia 212, 298, 299
Wiley VCH 113, 297
Wiley/VCH 299
Willard Gibbs, Josiah
  sa vie 128
Willemsen, Evelien 199, 298
Wineland, D. J. 289
Wineland, D.J. 288
Wise, N.W. 293
Witt, Bryce de 289
Wittke, James P. 283
Woerdman, J.P. 283
Wolfenstätter, Klaus-Dieter 191
Wolfsried, Stephan 197, 199, 298
Wollaston, William 205
Wolsky, A.M. 284
Wootters, W.K. 285
Wootters, W.L. 138
Wouthuysen, S.A. 284
Wouthuysen, S.A. 118
Wright, E.M. 294
Wright, Joseph 296
Wunderlich, C. 288
Wunderling, Helmut 294

Y
Yamamoto, Y. 281
Yao, E. 283
Yazdani, A. 284
Young, Andrew 45, 295, 296

Z
Zaccone, Rick 296
Zalm, Peer 295
Zawischa, Dietrich 64, 297
Zbinden, H. 281
Zecherle, Markus 295
Zedler, Michael 295
Zeh, H.D. 287
Zeh, Heinz-Dieter 163
Zeilinger, A. 281, 282, 288, 289, 292
Zeilinger, Anton 122
Zetti, A. 274
Zhao, C. 293
Zouw, G. van der 282
Zurek, W.H. 285
Zurek, W.H. 138
Zurek, Wojciech H. 287, 288
Zuse, Konrad 185
Zwerger, W. 289

Épicure 44, 48

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

Index des sujets

A
acausalité 173
accélération
  de Planck 238
  maximale 89
accélération
  limite quantique 89
acier chaud 195
action
  de Planck 237
  voir action, quantum d'
  EBK 213
  quantique, principe de 116
  quantum d' 225
action $\hbar$, quantum d' 19
action quantique 115
addition 253
adjoint
  opérateur 136
Aharonov-Bohm
  effet 110
Aharonov-Casher
  effet 112
algèbre alternative 263
algèbre de Cayley 263
algèbre à division 261
alternative
  algèbre 263
amortissement 168
amplitude
  d'un nombre complexe 256
amplitude de probabilité 187
ampoule 195
ampère
  définition 233
analyse non standard 265
ange 226
anges
  et la théorie quantique 153–155
  et principe d'exclusion 154
angle
  de mélange électrofaible 244
angélologie 287
animation
  dans le coin inférieur gauche 173
anneau 253
anneau unitaire 253
annihilation
  opérateur d' 136
annulation
  des termes non-diagonaux 164
année lumière 247, 249
année tropique 247
anthocyanes 204
anti-commutateur 137
anti-regroupement 60
antimatière *voir* antiparticule
antimatière 217
antiparticules 228
anyon 161
aphélie 248
aplatissement de la Terre aux pôles 248
apogée 248
appareil
  définition 181
  irréversible 188
appareil
  classique 188
  de mesure 188
apprendre
  meilleur méthode pour 9
  sans marqueurs 9
  sans écran 9
APS 299
arbre
  bruit lorsqu'il tombe 188
arc
  lampe à 195
arc-en-ciel
  et composition du Soleil 205
  et les éléments dans le Soleil 205
argent quantique 275
argon
  lampe à 196
asphaltènes 194
assiette
  tour de l' 149
astrologie 229
atome
  et l'électronium 123
  creux 221
  forme des 210
  individuel, manipulation 221
  rouler 96
  taille d'un 23
  taille non nulle des 154
atome
  et sens 18
  individuel 177

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

A

ATOME

atome d'hydrogène 284
atome d'hélium 124
atomes
taille des 223
atomes
durée de vie des 230
atomes de Rydberg 212
attaché
objet 147–153
attendre
comme effet quantique 22
atto 236
aurore polaire 196
avocat 43
Avogadro
nombre d' 244
axe
de rotation 93
axiome
définition 253
azimutal
nombre quantique 212

B

Baker-Campbell-Hausdorff
formule de 269
bande d'énergie 145
baryon
densité du nombre de 250
bas
quark 144
base
unités de 233
base
d'un espace vectoriel 268
BCH
formule 269
beauté 146
becquerel 235
Bell
inégalité de 185, 186
belt trick 148
Benham
disque ou toupie 203
Bennett-Brassard
protocole 139
bioluminescence 198
biphoton 61
BIPM 233
bit
constante de conversion en entropie 247
bleu
couleur de l'eau 220
couleur de la mer 220
Bohm
expérience de pensée de 174
Bohr
magnéton de 117, 246
rayon de 211, 246
boites de haricots, danger des 41
Boltzmann
constante de 169
physique et constante de 8
Boltzmann
constante de 244
découverte de la constante de 18
bombe
amorcée par un seul photon 77
bord
n'est jamais net 122
Bose-Einstein
condensat de 284
Bose-Einstein
condensat de 83
boson 136
intermédiaire 120
boson de Higgs
masse du 245
boson de Higgs 121, 145
boson W 144
masse du 245
boson Z 144
masse du 245
bosons 70, 133
bottom
quark 145
bottomness 146
bougie
couleur d'une 195
bras 260
bras 149
bremsstrahlung 195
brome 196
Bronshtein
cube de 8
Bureau international des poids et mesures 233
bâtonnets de la rétine 280
bétalaïnes 204

C

cachée
variable 186
cachée
variable 184
candela
définition 234
caractéristique 254
cardinaux 265
caroténoïdes 204
Casimir
effet 230
casse-tête du gant 126
causalité 183
Cayley
algèbre de 263
nombres de 263
ceinture
tour de la 149, 296
cellule de l'espace des phases 67
centi 236
centre, quaternion 261
CERN 239
cerveau 109
CGPM 233, 234
changement
minimisation du *voir* moindre action
quantum de 19
quantum de, valeur précise du 244
changement
mesure par l'action 19
changement de point de vue 99
charge
du positon ou de l'électron, valeur de la 244
élémentaire *e*, physique et 8
charge faible 145

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

C

CHARGES

charges inorganique
transfert de 198
charme
quark 145
chat de Schrödinger 163, 172
chimique, liaison 90
chimère 139
chlore 196
chute libre 21
cierge magique
couleur d'un 195
circulation
quantum de 246
ciseaux
tour des 149, 286
CKM
matrice de transformation des quarks 244
classification
des concepts 252
cloche
et principe d'exclusion 153
clonage des photons 285
clone
physique 138–140
clone
biologique 139
clévéite 206
CODATA 293
cohérence 177
des voitures 87
des électrons 113–114
longueur de 57, 67
temps de 57, 59
transversale 113
volume de 67
cohérence 172
définition 114
cohérence, longueur de 59
cohérente
superposition 164
Commission internationale
des poids et mesures 233
commutatif 253
commutation des opérateurs
hamiltonien et quantité de mouvement 123
commutation, manque de 39
complet
propriété d'un ensemble 254
complexe conjugué 255
complémentarité, principe de 88
composite
critère pour être 120–122
composite 120
comprendre
théorie quantique 43
compressée, lumière 54, 62
Compton
longueur d'onde de 121
Compton
longueur d'onde de 229, 246
concepts
classification des 252
condensat 273
condensat de Bose-Einstein 83, 284
conductance
quantum de 246
conductivité
quantification de la 84–85
configurations
espace des 152
Conférence générale des poids et mesures 233, 234
conscience 188
conscience
pas importante en théorie quantique 188
constant
de Boltzmann 169
constante
cosmologique 250
de Boltzmann 244
de couplage électromagnétique
voir constante de structure fine
de la loi du déplacement de Wien 247
de Planck
voir action, quantum d'
de Stefan-Boltzmann 230, 247
des gaz parfaits 246
constante
de couplage de Fermi 244
de couplage fort 244
de Faraday 246
de gravitation géocentrique 247
de gravitation héliocentrique 248
de Hubble 250
de Josephson 246
de Planck 49
de Planck, valeur de la 244
de Rydberg 230, 246
de structure fine 211, 213, 214, 222, 223, 230, 237, 244, 245
de Von Klitzing 246
gravitationnelle 244
constante de Rydberg 207
constante gravitationnelle *G*
physique et 8
constantes
astronomiques, tableau des 247
cosmologiques, tableau des 250
physiques dérivées, tableau des 246
physiques fondamentales, tableau des 244
Convention du Mètre 233
coordonnées rationnelles 251
copie parfaite 138
Coriolis
accélération de, dans les atomes 220
corps 253
rigide 41
corps gauche 253
corps lumineux 51
cosmologique
constante 250
couches atomiques 154
couleur
centres de 200
origine des 194
premier résumé sur 224
tableau sur l'origine des 195

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

C

COULEUR

couleur 49, 223
  charge de 145
couleurs
  tableau sur l'origine des 203
Coulomb
  jauge de 174
coulomb 235
couplage minimal 215
couplage électromagnétique
  constante de
  voir constante de structure fine
courant
  de Planck 237
courbe
  remplissant l'espace 268
CPT 117
croissance 34
cryptanalyse 191
cryptographie 191
cryptographie quantique 139
cryptologie 191
cryptologie quantique 191
crème fouettée 24
création
  opérateur de 136
création 219
création de paire 229
cube
  de Bronshtein 8
  de la physique 8
cyclotron
  fréquence 246
cônes de la rétine 280

D

danse des bougies balinaises 149
danse du vin des Philippines 149
de Broglie
  longueur d'onde
  thermique de 170
deca 236
deci 236
degré
  Celsius 235
degré
  unité d'angle 235
demi-vie 145
densité
  matrice 164
dessous
  quark 145
dessus
  quark 145
deux carrés
  théorème des 255
deuxième propriété des mesures quantiques 179
diable 226
dieu 226
dieux 187
dieux 222
diffraction
  de la matière par la lumière 221
  des états quantiques 105
diffraction
  comme origine des couleurs 202
  de Bragg 78
  définition de la 67
  et diffusion 78
  figure de 179
  par un réseau 69
diffusion 200
  définition 77
  types de 77
diffusion
  Brillouin 78
  Compton 78
  de Mie 78
  de Rayleigh 78
  de Von Laue 78
  géométrique 78
  photon-photon 230
  Raman 78
  inverse 78
  Thomson 78
  Tyndall 78
diffusion Smekal-Raman 78
dimension 268
dimensions
  spatiales, trois 152
dispersion 200
  de la fonction d'onde 106
dispersion 106
dispositifs supraconducteurs à interférence quantique 112
distance ferroviaire française 266
distinct
  photons 66
distinction
  macroscopique 163
distribution de probabilité 90
division 254
dons à ce livre 10
Doppler
  effet 207
double
  nombre 265
down
  quark 144
dualité onde-particule 51
duplicateur 39
  absence de 139
  définition 138
  fonction 138
durée de vie 145
dyatique
  produit 164
décalage de Lamb 230
décohérence 165–189
  de la lumière 177
  temps de 166, 169
décohérence 40
  processus de 165, 178
décomposition 32
décroissance radioactive 229
déesse 226
défis
  classification 9
démon 226
désinformation 43
désintrication 172
désintrication 165
  processus de 178
désintégration 228
détachable 172
détecteur 181
détecteur de mouvement
  de nos sens 18
déterminisme 189

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

E
EAU

E
eau
couleur bleu 220
eau
couleur bleu 196
EBK
quantification 208
effet Aharonov-Bohm 110
effet Aharonov-Casher 112
effet Doppler 207
effet Hall quantique
fractionnel 161
effet Josephson 112
effet tunnel 107–109
pour la lumière 109
effet tunnel 31, 107, 108, 228
effondrement
de la fonction d'onde 173, 184, 187
temps d' 184
effondrement
de la fonction d'onde 105
définition 179
immédiat du spin 175
Einstein-Podolsky-Rosen
paradoxe de 174
Ekert
protocole 139
enchevêtrement 39
enchevêtrement 172
endoctrinement 43
enregistrement 178
enseignement
meilleur méthode pour 10
ensemble 128
entiers 253
entiers
de Gauss 265
entropie
constante de conversion en bit 247
de Planck 237
environnement 166
EPR 139, 174
erreur
systématique 241
totale 241
erreur
de mesure 241
relative 242
erreurs aléatoires 241
escrime 158
espace
vectoriel 265
espace
de Hilbert 99, 102, 267, 268
de phases 54
des configurations 152
métrique 266
espace vectoriel
muni d'un produit scalaire 267
espace vectoriel 265
euclidien 267
hermitien 267
linéaires 266
unitaire 267
espaces linéaires 265, 266
esprit 188, 226
euclidien
espace vectoriel 267
eumélanine 198
europium 197
Exa 236
exactitude
limites de l' 243
exactitude 241
excitations dans les gaz 195
exclusion
principe d' 153–155
expansion
décimale périodique 265
explication 188
expérience
de Hanbury Brown et Twiss 134
de pensée de Bohm 174
expérience
de Stern et Gerlach 94, 98

F
facteur de Landé 117, 120
de l'électron 246
du muon 246
du proton 247
faible
charge 145
isospin 145
fantôme 226
fantômes 161
farad 235
Faraday
constante de 246
femto 236
fenêtre dans le train 36
fenêtre dans le train 36
fer à cheval 41
Fermi
constante de couplage de 244
fermion
pas de cohérence 160
fermion 137
fermions 133
feu
couleur du 195
feu d'artifice
couleur d'un 195
ficelles
tour des 149
film
dans le coin inférieur gauche 173
film
et action 19
fine
structure 214
fleur 204
flou
fondamental 83
fluctuation
du point zéro 83
fluctuations 165
flux magnétique
quantum de 246
flèche tournante 100
fonction d'onde
dispersion de la 106
effondrement de la 105, 184
est un nuage 122
phase d'une 109–113
symétrie de la 132
visualisation 100
étalement de la 106
fonction d'onde 100, 102, 103, 187
effondrement de la 173

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

F

FONCTION

en tant que nuage tournant 109
phase de la 109
visualisation 103
fonction d'état 187
fonction de partition 274
fonction propre 182
fonctionnelle densité 164
fond diffus micro-onde
température du 250
fondamental
état 210
force de l'électromagnétisme 222
forme 23, 89
formulation de l'intégrale de chemin 115
formule
de Balmer 207
formule
BCH 269
de Baker-Campbell-Hausdorff 269
de Sackur-Tetrode 128
fractales
n'apparaissent pas dans la nature 95
fractales 40
frapper
et le caractère fermionique de la matière 154
sur les tables 84
Fraunhofer
raies de 205
freinage
rayonnement de 195
frottement 168
fréquence cyclotron 246

G

G
parité 145
Galilée et les quanta 26
gant
casse-tête du 126
problème du 126
gant 139
Gauss
distribution de 241
entiers de 265
loi de 241
nombre premier de 265
gaussiennes
système d'unités 238
gaz 127
simple 128
gaz parfaits 246
gaz parfaits
constante universelle des 246
Gedankenexperiment *voir* expérience de pensée
Gibbs
paradoxe de 128
Giga 236
glace
couleur 196
Glauber, état de 53
gluon 144
masse du 245
graviton 38, 146
gravité
à la surface du Soleil 249
gray 235
groupe 253
de Lorentz inhomogène 142
de Poincaré 141
spécial orthogonal 260
groupe de Lorentz
inhomogène 141
Gulliver
les voyages de 23
gyromagnétique
rapport 120
géants
pas dans la nature 23
gélatine 225
génie 61
générateurs
des quaternions 257
Göttingen 26

H

H_2O 24
Hamilton
function de 118
hamiltonien 103
Hanbury Brown et Twiss
expérience de 70
Hanbury Brown et Twiss
effet 62
haricots
danger des boites de 41
hasard
et quantum d'action 35–36
expérimental 180
haut
quark 144
Heaviside-Lorentz
système d'unités 238
hecto 236
Heisenberg
représentation d' 162, 175
henry 235
hermitien
espace vectoriel 267
hertz 235
heure 235
Higgs
boson de 121
Higgs
masse du boson de 245
Hilbert
espace de 99, 102, 267, 268
Hiroshima 42
Hitachi 284
hologramme
faisceaux d'électrons 113
horizon
mouvement et aspects quantiques 226
horloges 29
Hubble
constante de 250
huit carrés
théorème des 264
hydrogène
atome d' 284
couleurs de l' 206–210
dans l'eau 23
dans le Soleil 206
images d' 274
niveaux d'énergie 104
orbitales 90
taille atomique 123

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

H

HYDROGNE

taille de l'atome 89
hydrogène
atomes, existence des 122
couleurs de l'atome d' 240
hypercomplexe
nombre 263
hyperréel
nombre 265
hélicité 50, 143
hélium
atome d' 124
dans le Soleil 206
découverte de l' 206
hélium 120, 170, 206
regroupement 134
hémoglobine 204

I

images 228
impossibilité du clonage quantique
théorème de l' 138, 139, 285
impulsion-énergie
quadrivecteur 142
impénétrabilité
de la matière 32, 158
impénétrabilité
de la matière 160, 228
impôts
recouvrement des 233
incandescence 19
incandescence 195
incertitude *voir* indétermination
incertitude
relation d' 88
relative 242
totale 242
incohérente
superposition 165
indice de Maslov 209
indistinguables 128
indétermination
relation d' 88
infographie
en trois dimensions 260
informatique
et théorie quantique 39
interférence 163
de photons 74
des électrons 113
et les bombes 77
et les photons 63–67
quantique 105
interférence
comme origine des couleurs 202
d'ondes 74
franges 63
radio 74
interféromètre 56
photo d'un 57
interféromètre 241
en anneau 241
à onde de matière 87
intermédiaire
boson 120
interprétation
de la mécanique quantique 163, 189
interpénétration
des atomes et des liaisons 90
interpénétration
de la matière 154
lumière contre matière 158
intrication 39
degré d' 177
intrication 172, 175
intégrale de chemin
formulation de l' 115
invariant
de Lorentz 142
voir aussi action, quantum d'
voir aussi invariance de Lorentz
voir aussi unités de Planck
voir aussi vitesse de la lumière
inversion de charge 143
inversion de mouvement 143
inégalité de Bell 185, 186
iode 196
ionisation
énergie d' 210
irréductible
représentation 141, 142
irréversible 168
isospin faible 145
isotopes 138
IUPAC 293
IUPAP 293

J

Jarlskog
invariant de 244
jauge de Coulomb 174
Josephson
constante de 246
effet 112
joule 235
jour
sidéral moyen 247
jour
unité de temps 235
Journal of Irreproducible Results 279
jumeaux
échange de 136
Jupiter
propriétés de 248

K

katal 235
kelvin
définition 234
kilo 236
kilogramme
définition 233
kilotonne 42
Korteweg-de Vries
équation de 123

L

La Montagne Mouvement
aider le projet 10
but de la série de livres 7
soutenir le projet 10
lacs
couleur bleu 220
lagrangien
opérateur 115
lagrangien 115
Lamb
décalage de 230
lampe

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

à néon 196
de poche, couleur 195
de ville à sodium 196
à argon 196
à mercure 196
Landé
facteur de 117, 120
laplacien
opérateur 104
largeur à mi-hauteur 241
laser
refroidissement des atomes par 276
épée 158
laser
cavité 52
cohérence 59
à gaz 196
lave
couleur de la 195
lego 18
liaison chimique 90
libération
vitesse de 210
Lilliput 229
limites
de l'exactitude 243
de la précision 243
linéarité de la mécanique quantique 163
litre 235
localité 183
loi de Gauss 241
loi de Moore 41
loi normale 241
longueur
de cohérence 67
de Planck 237
échelle de 228
échelle, pas en physique classique 16
longueur
d'onde de Compton 121
d'onde thermique de de Broglie 170
de cohérence 57, 59
gravitationnelle
de la Terre 247
Lorentz
groupe de 141
groupe de, inhomogène 142
symétrie de
voir invariance de Lorentz
Loschmidt
nombre de 246
lumen 235
luminosité du Soleil 248
lumière
voir aussi vitesse de la lumière
compressée 52–56
effet tunnel pour la 109
est constituée de bosons 158
incohérente 177
macroscopique 177
non classique 52–56
non-classique 61
réseau de 221
lumière 51
cohérente 53, 55
compressée 54, 62
non-classique 54
thermique 53
Lune
densité 248
Lune
propriétés de la 248
lux 235
Lyman-alpha
raie de 207

M

macroscopique
système 172
magie 231
magma
couleur du 195
magnétite 199
magnéton 120
de Bohr 117, 246
nucléaire 246
maillons ouverts 161
main
pour visualiser les quaternions 259
marqueur
mauvais pour apprendre 9
Maslov
indice de 209
masse
atomique, unité de 145, 246
de l'électron 244
de Planck 237
du boson de Higgs 245
du boson W 245
du boson Z 245
du gluo 245
du muon 244
du neutrino muonique 244
du neutrino tauique 244
du neutrino électronique 244
du photon 245
du quark bas (down) 245
du quark charme (charm) 245
du quark dessous (bottom) 245
du quark dessus (top) 245
du quark haut (up) 245
du quark étrange (strange) 245
du tau 244
masse
de la Terre 247
du Soleil 248
rapport de
muon-électron 246
neutron-proton 247
neutron-électron 247
proton-électron 246
masse volumique
de Planck 237
matière
densité de la 159
interpénétration de la 154
mouvement de la 81–125
taille de la 159
matière
longueur d'onde de la 229
matrice densité 164
matrices de spin de Pauli 261
matériau
propriétés 222
propriétés des, premier

L
Land

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

M

MATRIAU

résumé sur 224
recherche 222
science des 222
matériau
optiquement dense 69
Mega 236
mer
couleur bleu 220
la plus bleau 220
mercure
lampe à 196
mercure
état liquide du 221
mesure
appareil 188
comparaison 236
comparaison avec l'état 98–100
définition 233, 236
erreur de 241
irréversibilité 236
pas de précision infinie 82
processus 237
précision *voir* précision
signification 236
mesure
perturbe 188
mesures 99, 178
mi-hauteur
largeur à 241
micro 236
microscope 26
microscope
à force de résonance magnétique 117
microscopique
système 171
mile 236
milli 236
minimisation
du changement
voir moindre action
Minion Math, police de caractères 296
minute 235
minute d'arc
définition 249
unité d'angle 235
miroir 67, 109
mixte
état 164
moindre action
principe de 114
mole 138
définition 234
molécules
taille des 230
vibration et rotation des 196
moment cinétique
relation d'indétermination 92
moment cinétique
de l'électron 156
intrinsèque 93
minimum mesuré 229
mondes multiples 189
mort 170
mort 32
mouvement
de la matière 81–125
de quantons liés 120
des quantons 124
est fondamental 234
et les unités de mesure 234
quanton et 225
mouvement
en remontant le temps 29
luminaire 51
moyenne 169
mozzarella 25
multiples
mondes 189
multiplication 253
muon
facteur de Landé 246
muon 144
masse du 244
moment magnétique 246
moment magnétique anormal du 230
muon-électron
rapport de masse 246
muonium
séparation hyperfine du 230
myoglobine 204
mythe du spin 155
mètre
définition 233
mécanique quantique
appliquée aux évenements individuels 189
interprétation de la 163
voir aussi physique quantique
voir aussi théorie quantique
mécanique quantique
origine du terme 24
mégatonne 42
mélanine 204
mémoire 109, 181
mémoire vive 108
mémorisation 178
métalliques
bandes 199
métaux de transition
composés de 196
impuretés de 197
métrique
espace 266

N

nano 236
nature
et informatique 39
nature 187
naturelle
unité 245
neutrino
matrice PMNS de transformation des 244
neutrino 167
masse du 244
muonique 144
électronique 144
neutrino tauique 144
neutron 120
longueur d'onde de Compton 247
masse du 247
moment magnétique du 247
neutron-proton
rapport de masse 247
neutron-électron

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

N
New

rapport de masse 247
New Age 189
newton 235
niveaux d'énergie 209
nombre
hypercomplexe 263, 265
théorie des 265
nombre
de Cayley 263
de Loschmidt 246
double 265
hyperréel 265
premier de Gauss 265
q 265
quantique 143, 145
rationnel 254
réel 254
transfini 265
nombre complexe 254–257
représentation 256
représenté par une flèche 255
nombre complexe 254
nombre surréel 265
nombres 252–265
non locale 173
non standard
analyse 265
non-classique
lumière 61
non-unitarité 188
normale
distribution 241
loi 241
normalité de π 251
norme 255, 258, 266
noyau
de sodium 93
noyau 93
nuage
en théorie quantique 90
quantique 103
nuage
en théorie quantique 95
quantique 90
nymphe 226
néon
lampe à 196

O
objet
attaché 147–153
faits de particules 225
objet 171
observables
ne commutent pas 39
observables 99
observateur
sont faits de rayonnement 190
observateur
humain 188
observation 180, 181
observation 178
octaves 263
octonions 263
ohm 235
onde
des photons aux 70–71
interférence 74
onde
et nombre complexe 254
évanescente 109
opérateur 99
adjoint 136
d'annihilation 136
de création 136
lagrangien 115
laplacien 104
or
couleur jaune 221
orbite
à l'intérieur des atomes 206
ordinateur
l'Univers n'est pas un 191
ordinateur
quantique 139, 178
ordinaux 265
ordonné
totalement 254
organique
composé 197
origine
de la physique quantique 18
des couleurs, tableau de l' 195–203
oxygène
dans l'eau 23

P
paire
création de 229
papillon 16, 17
paradoxe
EPR 174
paradoxe
de Gibbs 128
parité 145
G 145
spatiale 143
parsec 247
particule
simple 128
virtuelle, définition 219
vitesse d'une 105
voir aussi particule élémentaire
voir aussi matière
voir aussi quanton
voir aussi particule virtuelle
élémentaire
voir aussi particule
particule 135
dénombrable 132
virtuelle 72, 131
particule quantique
flèche et 227
interactions 228
nuage et 227
onde et 227
phase et 227
résumé du mouvement des 124
vue comme un renflement 135
particule quantique
indistinguabilité 228
particule réelle
définition 219
particule élémentaire 226
particules
limites du dénombrement des 219
partition

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

P

PASCAL

fonction de 274
pascal 235
passion
cacher 252
Paul
piège de 124
Pauli
matrices de spin de 261
pression de 154
principe d'exclusion 158, 159
principe d'exclusion de
voir principe d'exclusion, 137, 150, 153
équation de 118
permanence 190
permanence 30
permanganate 199
permittivité
diélectrique du vide 246
permutation
de particules 126–140
symétrie de 131
perméabilité
magnétique du vide 246
personne
minuscule, pas dans la nature 23
Peta 236
phase
d'une fonction d'onde 109–113
espace de 54
phase 37
définition 256
et nombre complexe 254
quantique 100
thermodynamique 128
philosophes 51
phosphore 222
photochromisme 200
photon
clonage des 285
comme particule élémentaire 52
comme une flèche 64
des, aux ondes 70
détection des ondes radio 273
détection sans absorption 222
et interférence 67
et œil nu 44
interférence 74
intriqués 61
localisation 56–60
plus rapide que la lumière 71–72
position d'un 56–60
position of 56
virtuel 72
photon 38, 44, 51, 143
densité du nombre de 250
individuel, détecté par l'œil 48
masse du 245
spin du 50
photon-photon
diffusion 230
photons
des, aux ondes 71
et interférence 63
photons 47, 70, 227
physique
carte de la 8
cube de 8
physique classique
limites de la 16
manque de précision 229–230
ne définit pas d'échelles 16
ne permet pas les mesures 17
pas d'échelles de longueur et de temps 16
physique newtonienne
voir physique galiléenne
physique quantique
voir aussi théorie quantique
découverte fondamentale 18
et la magie 231
et la vie 232
la vie et la 16
pas d'infiniment petit 225
pour les poètes 16
probabilités en 227
précision de la 229–230
précision finie et 229
résumé de la 225–232
phénomènes surnaturels 229
phéomélanine 198
pico 236
pierre 33, 38, 69, 85, 153, 225
piège de Paul 124
plaisir
est un processus quantique 18
plaisir 18
Planck
accélération de 238
action de 237
voir action, quantum d'
constante de
voir action, quantum d'
courant électrique de 237
entropie de 237
longueur de 237
masse de 237
masse volumique de 237
promenade de 240
quantité de mouvement de 238
temps de 237
température de 237
unités naturelles de 237
valeur de la constante de 244
vitesse de 237
énergie de 238
Planck
constante (non réduite) 19
constante de 19
constante de, découverte de la 18
plancton 220
plantes
florales 204
PMNS
matrice de transformation des neutrinos 244
Poincaré
groupe de 141
point de vue
changement de 99
point zéro

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

P

POINTEUR

fluctuation du 83
pointeur 182
polarisation 200
de la lumière 50
polarisation 70
du vide 219
police 108
position 190
positon 217
charge spécifique 246
valeur de la charge du 244
positron
nom incorrecte du positon 217
potentiel sphérique 209
praséodyme 197
première propriété des mesures quantiques 179
pression
atmosphérique 248
de Pauli 154
photosphérique basse du Soleil 249
principe
d'exclusion 153–155
d'exclusion, et les anges 154
d'incertitude
voir relation d'indétermination
d'indétermination
voir relation d'indétermination quantique 18
principe
d'exclusion de Pauli 137, 150, 153
de complémentarité 41, 88
de l'action quantique 116
de moindre action 114
principe d'exclusion de Pauli 158, 159
principe d'indétermination
température et temps 96
principe quantique 19
prison 43
probabilité 179
amplitude de 187
en physique quantique 227
problème du gant 126
problème du préservatif 126
produit dyatique 164
produit intérieur 267
produit scalaire 267
espace vectoriel muni d'un 267
produit tensoriel 164
produit vectoriel 264
promenade de Planck 240
propriété
intrinsèque 226
proton
facteur de Landé 247
rayon du 120
proton 120
charge spécifique du 246
longueur d'onde de Compton 246
masse du 246
moment magnétique du 246
rapport gyromagnétique 247
proton-électron
rapport de masse 246
protonvolt 239
précision
de la physique quantique 229–230
limites de la 243
pas infinie lors d'une mesure 82
précision 241
préfixe
SI 236
unités SI, tableau 235
préfixes 235, 292
préservatif
problème du 126
pur
état 163
pénétrabilité
de la matière 32
périgée 248
périhélie 248
pôle Nord 93

Q

q
nombre 265
QED 216
quadrivecteur
impulsion-énergie 142
quanta
et Galilée 26
quanta
de lumière 44, 51
quanti
piccolissimi 26
quantification
EBK 208
quantification 48
quantique
argent 275
cryptographie 139
cryptologie 191
interférence 105
nombre 143, 145
ordinateur 139, 178
origine du terme 24–26
électrodynamique 216
quantique
système 171
quantité de mouvement
de Planck 238
quanton
voir aussi particule
mouvement d'un 226–229
résumé du mouvement des 124
vitesse d'un 105
élémentaire 226
quanton 51, 84, 225
quantum
d'action 225
de conductance 246
de flux magnétique 246
quantum
d'action 18, 19
d'action, valeur précise du 244
de changement 19
de circulation 246
de lumière 38
quantum computing 289
quantum d'action $\hbar$

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

physique et 8
quark
matrice CKM de transformation des 244
quark
bas (down) 144
charme (charm) 145
dessous (bottom) 145
dessus (top) 145
haut (up) 144
étrange (strange) 144
quark bas (down)
masse du 245
quark charme (charm)
masse du 245
quark dessous (bottom)
masse du 245
quark dessus (top)
masse du 245
quark haut (up)
masse du 245
quark étrange (strange)
masse du 245
quaternion 257
conjugué 258
homogène 258
imaginaire pur 258
partie scalaire d'un 258
partie vectorielle d'un 258
purement imaginaire 258
unitaire 259
unités de base 257
quaternions
en astronomie 260
quatre carrés
théorème des 258
qubit 178

R

radian 235
radio
interférence 74
radioactive
décroissance 229
radioactivité 128
raie
de Lyman-alpha 207
RAM 108
random access memory 108
rapport gyromagnétique 120
électron 230
rationnelles
coordonnées 251
rayon
de Bohr 211, 246
de Schwarzschild 239
polaire de la Terre 247
équatorial de la Terre 247
rayon du proton 120
rayonnement
observateurs sont faits de 190
rayonnement
de freinage 195
rayons X 50
reconnaissance 136
refroidissement
des atomes par laser 276
relation
d'incertitude
voir aussi relation d'indétermination
d'indétermination, pour un grand nombre de fermions 159
d'indétermination, étendue 159
relation
d'incertitude 28, 88
d'indétermination 88
d'indétermination, pour le moment cinétique 92
relations d'indétermination 27
relative
erreur 242
incertitude 242
relaxation 168
renflement
visualisant une particule quantique 135
repos
absence de 81–83
repos 21
n'existe pas 227
représentation 261, 263
représentation
d'Heisenberg 162
de Schrödinger 162
irréductible 142
représentation d'Heisenberg 175
représentation irréductible 141
revêtement double 260
robotique 260
rotation
axe de 93
des atomes 96
et spin 156
rotation 259
rubis doré 201
Rydberg
atomes de 212
constante de 230, 246
règle graduée 29
réaction 34
réelle
particule, définition 219
réflexion
totale, et amplification de lumière 221
réflexion 67
réfraction 69, 200
des ondes de matière 96
réfraction
et photons 75
réseau 69
de lumière 221
réservoir
thermodynamique 165
résonance magnétique
microscope à force de 117
résultats de mesures 99
rétine
bâtonnets de la 280
cônes de la 280

S

Sackur-Tetrode
formule de 128
samarium 197
sang
couleur du 198
sans dimension 245
saphir 199
Sargasses

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

S

SCALAIRE

mer des 220
scalaire 266
multiplication 265
Schrödinger
chat de 163, 172
représentation de 162
équation de 103–105
équation du mouvement de 103
Schwarzschild
rayon de 239
science-fiction 158
seconde
définition 233
seconde d'arc
définition 249
unité d'angle 235
semi-anneau 253
semi-conducteurs
bandes 199
sens 18
comme détecteur de mouvement 18
serment
et le quantum d'action 43
sexualité 34
SI
définition des unités 233
préfixes
tableau des 235
préfixes des unités 235
unités 243
unités dérivées 235
unités supplémentaires 235
SI
unités 233
siemens 235
sievert 235
simulateurs de vol 260
SO(3) 142
sodium
lampe de ville à 196
sodium 96
sol
pourquoi il ne tombe pas 154
Soleil
gravité à la surface du 249
luminosité du 248
masse du 248
pression photosphérique basse du 249
soliton 123
sources 74
soutien à ce livre 10
spectre 179
des objets chauds 230
spermatozoïde 25
spin 116–118
1/2 116
définition de l'amplitude 142
utilisation de la valeur du 142
spin 93, 116, 141, 142, 228
1/2, et les quaternions 260
mythe 155
spin et rotation 156
spin-statistique
théorème 158
spineur 152, 217, 260
spineurs 260
sponsor de ce livre 10
squark 295
Stefan-Boltzmann
constante de 230, 247
Stern et Gerlach
expérience de 94
strange
quark 144
structure fine
constante de 211, 213, 214, 222, 223, 230, 237, 244, 245
structure fine 214
structure ordonnée 254
stéradian 235
surréel
nombre 265
symétrie
de Lorentz
voir invariance de Lorentz
symétrie
d'un système physique 142
de permutation 131
Système
géodésique mondial 249
système
définition en physique quantique 175
lié 123
microscopique 27
système 162, 171
classique 28
d'unités gaussiennes 238
d'unités Heaviside-Lorentz 238
d'unités électromagnétiques 238
d'unités électrostatiques 238
macroscopique 27, 172
macroscopique, clonage de 139
microscopique 26, 27
microscopique, définition 26
mésoscopique 26
nanoscopique 26
Système international d'unités (SI) 233
systèmes intriqués 39
sédénions 265
séparabilité 172

T

T.N.T. 42
tableau
de l'origine des couleurs 195–203
des précisions de la physique quantique 229–230
tableau
périodique des éléments 154
tachyons 29
taille
de toutes choses 223
taille
des atomes 223
tau 144
masse du 244
temps
de Planck 237
échelle de 229
échelle, pas en physique classique 16

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

T

TEMPS

temps
d'effondrement 184
de cohérence 57, 59
de décohérence 166, 169
température
de Planck 237
tensoriel
produit 164
Tera 236
Terre
aplatissement aux pôles 248
longueur gravitationnelle de la 247
masse de la 247
rayon polaire de la 247
rayon équatorial de la 247
Terre
densité moyenne de la 248
gravité normale de la 248
âge de la 248
tesla 235
thermodynamique
troisième loi de la 81
thermostat 172
physique 165
théorie des nombres 265
théorie quantique
voir aussi physique quantique
et informatique 39
résumé et principaux résultats de la 225–232
théorie quantique 26
des champs 137
théorème
de l'impossibilité du clonage quantique 138, 139, 285
des deux carrés 255
des huit carrés[263
des quatre carrés 258
spin-statistique 158
TNT
contenu énergétique du 247
Tom Pouce 40
tonne 235
top
quark 145
topness 146
totalement ordonné 254
toucher
pourquoi peut-on 158
tour de l'assiette 149
tour de la ceinture 149, 157–160, 260
tour de la ceinture 260, 296
tour des ciseaux 149, 286
tour des ficelles 149
trace 165
trajectoires 37
transfini
nombre 265
nombre ordinal 265
troisième loi de la thermodynamique 81
troyens
électrons 124
tube de télévision 108
tunnel
effet 228
télékinésie 229
téléphone portable
mauvais pour apprendre 9
téléportation 229
télévision
tube de 108
téraoctet 108
tête nucléaire 42

U

udeko 236
Udekta 236
Union astronomique internationale 249
Union géodésique et géophysique internationale 249
unitaire
espace vectoriel 267
unitarité 183, 188
unité
astronomique 247
unité
astronomique 249
de masse atomique 145, 246
unité naturelle 245
unités
de Planck 237
de Planck, correction 238
de Planck, en tant que limite 238
naturelles
voir aussi unités de Planck
naturelles de Planck*voir* unités de Planck, unités naturelles
régionales 236
unités
de base 233
de Planck corrigées 238
naturelles de Planck 237
naturelles véritables 238
unités non SI 236
unités SI
définition 233
préfixes des 235
unités SI 243
dérivées 235
supplémentaires 235
Univers
fonction d'onde de 192
n'est pas un ordinateur 191
pas de conditions initiales 193
up
quark 144

V

vacuoles 204
valeur absolue 255
valeur propre 99, 100
définition 179
et mesure 179
valeurs propres
de la vitesse 119
variable cachée 184–186
variance 241
Vavilov–Čerenkov
rayonnement 195
vecteur 258, 265
vecteur propre 99, 100, 179
définition 179
vectoriel
produit 264

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

V

VENDEKO

vendeko 236
Vendekta 236
ver luisant 18
ver luisant 198
vide 220
  voir aussi espace
  mouvement et aspects quantiques 226
  permittivité diélectrique du 246
  perméabilité magnétique du 246
  polarisation du 219
vide 130, 220
  impédance caractéristique du 246
  état de 136
vidéo
  mauvais pour apprendre 9
vie
  est un processus quantique 18
  et la physique quantique 16, 232
vieillissement 32
vin
  et eau 168
  verre de 81
virtuel
  photon 72
virtuelle
  particule, définition 219
virtuelle
  particule 72
vitesse
  de la lumière *c*
  physique et 8
  de Planck 237
  maximale
  voir vitesse de la lumière *c*
  valeurs propres de la 119
vitesse
  de groupe 105
  de libération 210
Voie lactée
  masse de la 249
  taille de la 249
  âge de la 249
voiture
  et garage 108
  sur l'autoroutes 87
  voleur de 108
volt 235
volume
  de cohérence 67
volume
  molaire 246
Von Klitzing
  constante de 246
von Neumann
  équation de 164
voyages dans le temps 30
vérité 146
  fondamentale 232

W

watt 235
weber 235
weko 236
Wekta 236
Wheeler-DeWitt
  équation de 192
Wien
  constante de la loi du déplacement de 230, 247

X

xenno 236
Xenta 236

Y

yocto 236
Yotta 236

Z

zepto 236
Zetta 236

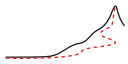
âge du Soleil 248
âme 226
écart type
  illustration 242
écart type 241
échelle
  de longueur 228
  de temps 229
écoulements
  doivent fluctuer 83
  sont constitués de particules 84
électrodynamique 257
  quantique 216
électromagnétiques
  système d'unités 238
électromagnétisme
  force de l' 222
électron
  cohérence des 113–114
  facteur de Landé 246
  interférence d' 113
  moment cinétique de 156
  rayon 156
électron 144
  masse de l' 244
  moment magnétique de 246
  rayon classique de 246
  troyen 124
électronium 123
électronvolt 239
  valeur de l' 247
électrostatiques
  système d'unités 238
élémentaire
  particule, définition d'une 142
émotion
  est un processus quantique 18
énergie
  bande d' 145
  de Planck 238
  niveaux d' 209
énergie
  d'ionisation 210
équation
  de Pauli 118
  de Schrödinger 103–105
équation
  d'onde 104
  d'évolution 103
  de Korteweg-de Vries 123
  de von Neumann 164
  de Wheeler-DeWitt 192
  du mouvement de Schrödinger 103
équilibre 165

Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net

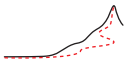
étalement 106
de la fonction d'onde 106
état
comparaison avec la mesure 98–100
est une flèche tournante 100
lié 123
lié, inhabituel 124
quantique 100
état 162, 192
cohérent 53
de Fock 55
de Glauber 53
de nombres 55
fondamental 210
état mixte 164
état propre 100
état pur 163
état quantique 103
états 99
étincelles 196
étoile
couleur d'une 195
étrange
quark 144
évanescente
onde 109
évenements individuels
en mécanique quantique 189
évolution
équation d' 103
évolution
équation du premier ordre 105

Čerenkov
rayonnement 195

œil
et la détection des photons 44



Motion Mountain – The Adventure of Physics copyright © Christoph Schiller June 1990–05 2022 free pdf file available at www.motionmountain.net



LA MONTAGNE MOUVEMENT

L'aventure de la physique – Vol. IV

Le quantum de changement



Comment peut-on voir des photons individuels?
Comment les couleurs se manifestent-elles dans la nature?
Que signifie «quantique»?
Quels sont les dangers d'une boite de haricots?
Pourquoi les voyages de Gulliver sont-ils impossibles?
L'espace vide est-il vraiment vide?
Quelle est l'origine de la désintégration?
Pourquoi la nature est-elle aléatoire?
Les duplicateurs parfaits existent-ils?

En répondant à ces questions relatives au mouvement, ainsi qu'à bien d'autres, cette série donne une introduction divertissante et convaincante de la physique moderne, une introduction qui apporte des surprises et propose des défis à chacune de ses pages. En partant de la vie quotidienne, cette aventure fournit une vue d'ensemble des résultats modernes en mécanique, en thermique, en électromagnétisme, en relativité, en physique quantique et en théorie d'unification.

Christoph Schiller, PhD, Université libre de Bruxelles, est physicien et vulgarisateur de la physique. Il a écrit ce livre pour ses enfants ainsi que pour tous les étudiants, enseignants et lecteurs intéressés par la physique, la science du mouvement.

Ce fichier pdf est disponible gratuitement sur
www.motionmountain.net