

Physique quantique

La **physique quantique** est l'appellation générale d'un ensemble de théories physiques nées au xx^e siècle qui, comme la théorie de la relativité, marque une rupture avec ce que l'on appelle maintenant la physique classique, qui regroupe par définition les théories et principes physiques connus auix^e siècle.

Les théories dites « quantiques » décrivent le comportement des atomes et des particules — ce que la physique classique (notamment la mécanique newtonienne et la théorie électromagnétique de Maxwell) n'avait pu faire — et permettent d'élucider en particulier certaines propriétés du rayonnement électromagnétique qui restaient inexplicées par la physique classique.



Max Planck est considéré comme le père de la physique quantique. La constante de Planck, ***h***, joue un rôle central dans la physique quantique, bien au-delà de ce qu'il imaginait lorsqu'il l'a introduite.

Sommaire

Histoire

Panorama général

Le quantique et le vivant

Liste des expériences

- Fentes de Young
- Effet Aharonov-Bohm (Ehrenberg et Siday)
- Expérience de Stern et Gerlach
- Expérience d'Aspect
- Expérience de la gomme quantique à choix retardé

Interprétations

Genèse de la physique quantique

- Corps noir et catastrophe ultraviolette
- Introduction des quanta en physique
- Quantification du rayonnement et des atomes
- Effet photoélectrique
- Limites de la théorie électromagnétique classique
- L'hypothèse quantique

Dans la culture

Notes et références

Voir aussi

- Bibliographie
 - Ouvrages de vulgarisation
 - Manuels universitaires
 - Développement historique des concepts
 - Comparaisons des différentes approches théoriques de la physique quantique
 - Autres ouvrages
- Sur Wikibooks
- Articles connexes
- Liens externes

Histoire

Au cours du XIX^e siècle, les cristallographes et les chimistes essaient de prouver l'existence des atomes, mais ce n'est qu'au début du XX^e siècle qu'ils seront définitivement mis en évidence, grâce à la diffraction des rayons X. Pour les modéliser, la quantification de la matière est un passage obligé, ce qui donne naissance à la physique quantique¹. En 1900, Max Planck émet l'hypothèse que les échanges d'énergie avec la matière se font par petites quantités : les «quanta»².

Louis de Broglie initie alors la mécanique quantique qui permet de modéliser correctement l'atome. La physique quantique finit par absorber tous les domaines de la physique classique en une seule discipline. Les accélérateurs de particules montrent alors que les atomes sont composés de particules plus élémentaires, comme le proton ou le neutron, eux-mêmes composés de quarks. C'est la théorie quantique des champs construite à partir de l'électrodynamique quantique qui décrira l'ensemble des particules élémentaires².

Panorama général

La physique quantique a apporté une révolution conceptuelle ayant des répercussions jusqu'en philosophie (remise en cause du déterminisme) et en littérature (science-fiction). Elle a permis nombre d'applications technologiques : énergie nucléaire, imagerie médicale par résonance magnétique nucléaire, diode, transistor, circuit intégré, microscope électronique et laser. Un siècle après sa conception, elle est abondamment utilisée dans la recherche en chimie théorique (chimie quantique), en physique (mécanique quantique, théorie quantique des champs, physique de la matière condensée, physique nucléaire, physique des particules, physique statistique quantique, astrophysique, gravité quantique), en mathématiques (formalisation de la théorie des champs) et, récemment, en informatique (ordinateur quantique, cryptographie quantique). Elle est considérée avec la relativité générale d'Einstein comme l'une des deux théories majeures du XX^e siècle.

La physique quantique est connue pour être contre-intuitive, choquer le « sens commun » et nécessiter un formalisme mathématique ardu. Feynman, l'un des plus grands théoriciens spécialistes de la physique quantique de la seconde moitié du XX^e siècle, a ainsi écrit :

« Je crois pouvoir affirmer que personne ne comprend vraiment la physique quantique³. »

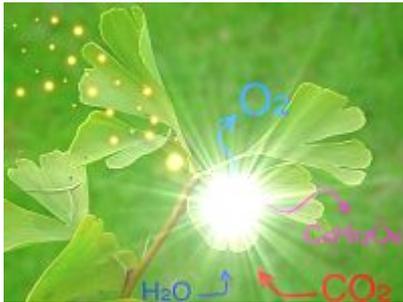
La raison principale de ces difficultés est que le monde quantique (limité à *l'infiniment petit*, mais pouvant avoir des répercussions à plus grande échelle⁴) se comporte très différemment de l'environnement macroscopique auquel nous sommes habitués. Quelques différences fondamentales qui séparent ces deux mondes sont par exemple :

- **la quantification** : Un certain nombre d'observables, par exemple énergie émise par un atome lors d'une transition entre états excités, sont quantifiés, c'est-à-dire qu'ils ne peuvent prendre leur valeur que dans un ensemble discret de résultats. *A contrario*, la mécanique classique prédit le plus souvent que ces observables peuvent prendre continûment n'importe quelle valeur ;
- **la dualité onde-particule** : Les notions d'onde et de particule, qui sont séparées en mécanique classique, deviennent deux facettes d'un même phénomène, décrit de manière mathématique par fonction d'onde. En particulier, l'expérience prouve que la lumière peut se comporter comme des particules photons, mis en évidence par l'effet photoélectrique ou comme une onde (rayonnement produisant des interférences) selon le contexte expérimental, les électrons et autres particules pouvant également se comporter de manière ondulatoire ;
- **le principe d'indétermination de Heisenberg** : Une indétermination fondamentale empêche la mesure exacte simultanée de deux grandeurs conjuguées. Il est notamment impossible d'obtenir une grande précision sur la mesure de la vitesse d'une particule sans obtenir une précision médiocre sur sa position, *et vice versa*. Cette incertitude est structurelle et ne dépend pas du soin que l'expérimentateur prend à ne pas « déranger » le système ; elle constitue une limite à la précision de tout instrument de mesure ;
- **le principe d'une nature qui joue aux dés** : Si l'évolution d'un système est bel et bien déterministe (par exemple, la fonction d'onde régie par l'équation de Schrödinger), la mesure d'une observable d'un système dans un état donné connu peut donner aléatoirement une valeur prise dans un ensemble de résultats possibles ;
- **l'observation influe sur le système observé** : Au cours de la mesure d'une observable, un système quantique voit son état modifié. Ce phénomène, appelé réduction du paquet d'onde est inhérent à la mesure et ne dépend pas du soin que l'expérimentateur prend à ne pas « déranger » le système ;
- **la non-localité ou intrication** : Des systèmes peuvent être intriqués de sorte qu'une interaction en un endroit du système a une répercussion immédiate en d'autres endroits. Ce phénomène contredit en apparence la relativité restreinte pour laquelle il existe une vitesse limite à la propagation de toute information, la vitesse de la lumière ; toutefois, la non-localité ne permet pas de transférer de l'information ;

- la **contrafactualité** : Des évènements qui auraient pu se produire, mais qui ne se sont pas produits, influent sur les résultats de l'expérience.

Le quantique et le vivant

Existe-t-il dans le monde du vivant des phénomènes obéissant à ces règles de l'infiniment petit ? Depuis quelques années, des études dans divers domaines de la biologie indiquent que c'est le cas. Ces résultats vont à contre-courant de l'idée généralement admise que le monde macroscopique est trop chaotique pour permettre des effets de cohérence quantique. Le vivant serait capable de tirer parti de cette agitation désordonnée des particules, du moins en ce qui concerne la photosynthèse⁵. Les récepteurs de l'odorat semblent dépendre de l'effet tunnel, pour acheminer des électrons à l'intérieur même des molécules odorantes, ce qui permet de les distinguer d'autres molécules structurellement analogues⁵. Certaines structures protéiques bactériennes se comportent comme des ordinateurs quantiques primitifs, « calculant » le meilleur canal de transport de électrons parmi tous les chemins possibles⁶.



Les réactions physicochimiques présidant à la photosynthèse sont bien comprises mais l'efficacité du processus en biologie était demeurée une énigme, jusqu'à la découverte d'une coordination supramoléculaire de ces opérations par la cohérence quantique, qui est une « influence à distance ».

De récents travaux sur la photosynthèse ont révélé que l'intrication des photons joue un rôle essentiel à cette opération fondamentale du règne végétal⁷, phénomène que l'on tente actuellement d'imiter pour optimiser la production d'énergie solaire.

L'adhérence aux surfaces des setæ des geckos fonctionne grâce aux forces de van der Waals, des interactions de nature quantique qui font intervenir des particules virtuelles sans aucune interaction moléculaire classique⁸. Ce phénomène est également à l'étude en vue d'applications militaires et civiles.



Les setæ des geckos adhèrent au verre par un processus inexplicable en physique classique.

Liste des expériences

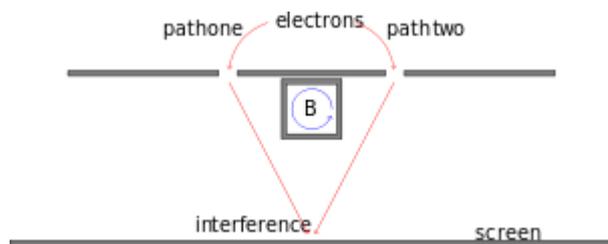
Des physiciens américains sont parvenus à observer la trace des premiers instants du Big Bang, atteignant un des « objectifs les plus importants de la cosmologie aujourd'hui » selon les termes de John Kovac, professeur à Harvard et responsable de l'équipe à l'origine de cette découverte en mars 2014. La survenue du Big Bang marquant la naissance de l'Univers il y a 13,8 milliards d'années, s'est accompagnée de l'émission d'ondes gravitationnelles primordiales. L'observation de l'empreinte que ces ondes ont laissée sur le rayonnement fossile a été effectuée via le télescope Bicep 2.

Ces données confirment « la relation profonde entre la mécanique quantique et la théorie de la relativité générale ». Pour Tom Le Compte, physicien au CERN, cette découverte « est la plus grande annonce en physique depuis des années », et « peut être couronnée d'un prix Nobel » pour leurs auteurs^{9,10}. Mais cette annonce a été démentie par les mesures faites par le satellite Planck, ce dernier étant capable de différencier les effets de poussières de la Galaxie¹¹.

Fentes de Young

L'expérience originelle de Thomas Young avait mis en évidence le comportement ondulatoire de la lumière en montrant que deux faisceaux lumineux pouvaient entrer en interférence. L'expérience des fentes de Young, effectuée avec une seule particule (en faisant en sorte que la source d'émission n'émette qu'*un quantum à la fois*), montrera qu'un seul électron « interfère avec lui-même » et produit des franges d'interférences au sortir des *deux* fentes, comme s'il s'agissait de deux flux de particules interférant l'un avec l'autre.

Effet Aharonov-Bohm (Ehrenberg et Siday)



La figure d'interférence entre deux faisceaux d'électrons peut être modifiée par la présence d'un champ magnétique en dehors des trajectoires classiques des électrons.

Dans la mécanique classique, la trajectoire d'une particule chargée ne peut pas être affectée par la présence d'un champ magnétique si elle se trouve hors de ce champ.

L'effet Aharonov-Bohm est un phénomène quantique décrit en 1949 par Ehrenberg et Siday et redécouvert en 1959 par David Bohm et Yakir Aharonov. Il décrit le paradoxe suivant :

« Un champ magnétique (le cercle bleu **B**, ci-contre) peut affecter une région de l'espace à distance, le potentiel vecteur n'ayant par contre pas disparu. »

L'effet Aharonov-Bohm démontre donc que ce sont les potentiels électromagnétiques, et non les champs électriques et magnétiques, qui fondent la mécanique quantique. En physique quantique, une entité mathématique utile, le potentiel vecteur magnétique, peut avoir de véritables effets.

Expérience de Stern et Gerlach

L'expérience de Stern et Gerlach fut l'une des premières à mettre en évidence la nature purement quantique du monde microscopique et plus particulièrement du spin. Construite en 1921-1922 pour tester l'hypothèse de quantification spatiale, elle ne put obtenir une description théorique satisfaisante que cinq ans plus tard grâce au développement de la mécanique quantique.

Expérience d'Aspect

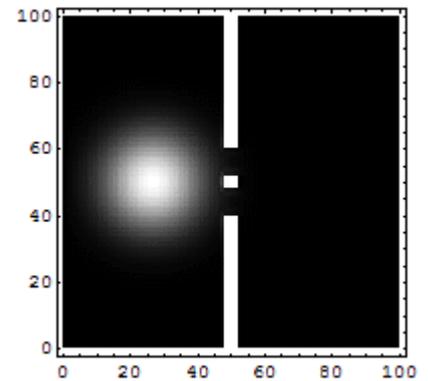
L'expérience d'Aspect est, historiquement, la première expérience qui a réfuté de manière satisfaisante les inégalités de Bell dans le cadre de la physique quantique, validant ainsi le phénomène d'intrication quantique, et apportant une réponse expérimentale au paradoxe EPR.

Concrètement, elle consiste à produire deux photons dans un état intriqué $\frac{1}{\sqrt{2}} \{ |\uparrow, \uparrow\rangle + |\rightarrow, \rightarrow\rangle \}$ puis à les séparer pour réaliser enfin la mesure de leur polarisation. La mesure du premier photon a alors 50 % de chance de donner \uparrow et autant de donner \rightarrow tandis que le second photon est immédiatement projeté dans ce même état. Le paradoxe provient du fait que les deux photons semblent s'échanger cette information à une vitesse supérieure à celle de la lumière. Ce point n'est cependant pas pertinent car aucune information ne peut être transmise par ce moyen.

L'intrication quantique permet cependant d'échanger une clé de chiffrement de manière sûre, ce qu'exploite la cryptographie quantique.

Expérience de la gomme quantique à choix retardé

L'expérience de la gomme quantique à choix retardé¹² constitue une extension de celle d'Alain Aspect et des fentes d'Young, mais y introduit ce qui semble être une rétroaction implicite dans le temps: un effet du présent sur le passé.

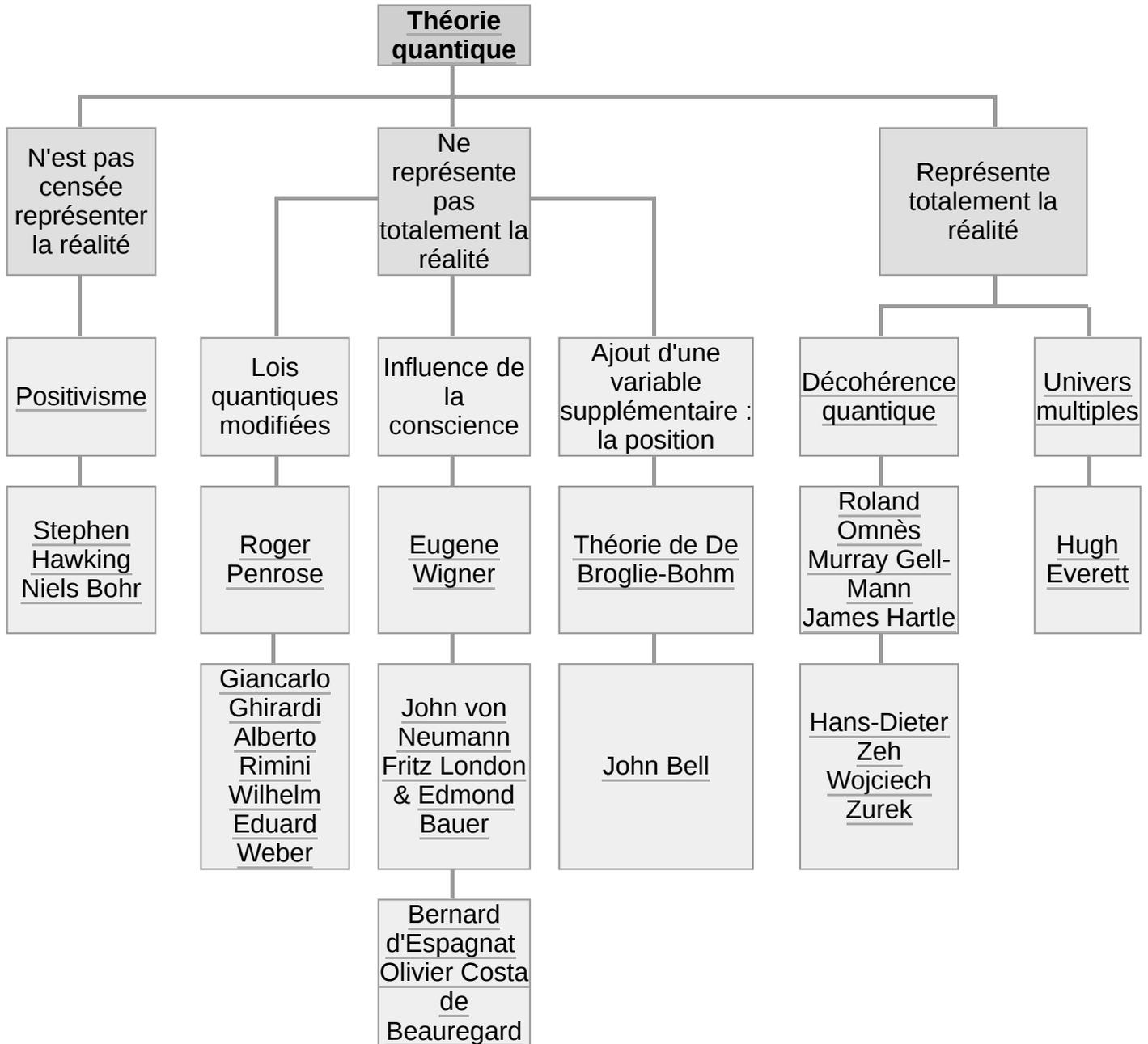


Densité de probabilité d'un seul électron au passage des deux fentes.

Interprétations

Les paradoxes liés à la mesure amènent à se poser la question : la physique quantique décrit-elle la réalité ?

Arbre des solutions du problème de la mesure



- Décohérence quantique
- École de Copenhague
- Interprétation transactionnelle
- Théorie d'Everett des mondes multiples

Théories « à variables cachées »

- Théorie de De Broglie-Bohm Théorie de l'onde pilotée de De Broglie

Genèse de la physique quantique

Corps noir et catastrophe ultraviolette

D'après les théories classiques de la physique, un corps noir à l'équilibre thermodynamique est censé rayonner un flux infini. Plus précisément, l'énergie rayonnée par bande de longueur d'onde doit tendre vers l'infini quand la longueur d'onde tend vers zéro, dans l'ultraviolet pour les physiciens de l'époque, puisque ni les rayons X ni les rayons gamma n'étaient alors connus. C'est la catastrophe ultraviolette.

Introduction des quanta en physique

Elle remonte aux travaux effectués en 1900 par Max Planck sur le rayonnement du corps noir à l'équilibre thermique. Une cavité chauffée émet un rayonnement électromagnétique (lumière) aussitôt absorbé par les parois. Pour rendre compte du spectre lumineux par le calcul théorique des échanges d'énergie d'émission et d'absorption (dE), Planck dut faire l'hypothèse que ces échanges sont discontinus et proportionnels aux fréquences (ν) du rayonnement lumineux : $dE = nh\nu$.

- n est un nombre entier
- h est le quantum d'action qui apparut bientôt comme l'une des constantes fondamentales de la nature (constante de Planck)
- ν est la fréquence de la lumière

Quantification du rayonnement et des atomes

En 1905, à la suite d'un raisonnement thermodynamique dans lequel il donnait aux probabilités un sens physique (celui de fréquence d'états pour un système), Einstein fut amené à considérer que ce ne sont pas seulement les échanges d'énergie qui sont discontinus, mais l'énergie du rayonnement lumineux elle-même. Il montra que cette énergie est proportionnelle à la fréquence de l'onde lumineuse : $E=h\nu$. Cela donnait immédiatement l'explication de l'effet photoélectrique observé 20 ans auparavant par Hertz.

Effet photoélectrique

L'énergie $E = h\nu$ apportée par le quantum de lumière à l'électron lié dans un atome permet à celui-ci de se libérer si cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie de liaison de l'électron, nommée également travail de sortie W , en vertu de la relation :

$$h\nu = W + E_c$$

où E_c est l'énergie cinétique acquise par ce dernier. Cet effet de seuil était inexplicable dans la conception continue de l'énergie lumineuse de la théorie électromagnétique classique.

Limites de la théorie électromagnétique classique

Einstein s'aperçut alors que cette propriété du rayonnement était en opposition de manière irréductible avec la théorie électromagnétique classique (élaborée par Maxwell). Dès 1906, il annonça que cette théorie devrait être modifiée dans le domaine atomique. La manière dont cette modification devrait être obtenue n'était pas évidente puisque la physique théorique reposait sur l'utilisation d'équations différentielles, dites équations de Maxwell, correspondant à des grandeurs à variation continue.

L'hypothèse quantique

Malgré la puissance de la théorie des quanta, peu de physiciens étaient enclins à imaginer que la théorie électromagnétique classique puisse être invalidée. Einstein s'efforça alors de mettre en évidence d'autres aspects des phénomènes atomiques et du rayonnement qui rompaient avec la description classique. Il étendit ainsi l'hypothèse quantique, par-delà les propriétés du rayonnement, à l'énergie des atomes, par ses travaux sur les chaleurs spécifiques aux basses températures. Il retrouvait l'annulation des chaleurs spécifiques des corps au zéro absolu, phénomène observé mais inexplicable par la théorie classique. D'autres physiciens (P. Ehrenfest, W. Nernst, H.-A. Lorentz, H. Poincaré) le rejoignirent peu à peu pour conclure au caractère inéluctable de l'hypothèse quantique que Planck lui-même hésitait à admettre. Elle n'était cependant encore acceptée généralement que pour les échanges d'énergie. ^[réf. souhaitée]

Dans la culture

Roman

- José Rodrigues Dos Santos, *La clé de Salomon*, Éditions Hervé Chopin, Paris, 2014. (ISBN 9-7823-5720-1767)

Il s'agit d'un roman « prétexte » à la vulgarisation de la physique quantique.

Bande dessinée

- Thibault Damour et Mathieu Burniat, *Le Mystère du monde quantique* Paris, Dargaud, 2016, 160 p. (ISBN 978-2205075168)

Notes et références

1. Hladik 2008, p. 3.
2. Hladik 2008, p. 4.
3. Richard Feynman, in *The Character of Physical Law* (1965).
4. *Pour la science*^o 407, septembre 2011, p. 22 et suivantes, « *Vivre dans un monde quantique* », par Vátko Vedral.
5. Ball P. *Physics of life: The dawn of quantum biology* (<http://www.nature.com/news/2011/110615/pdf/474272a.pdf>) Nature. 2011 Jun 15;474(7351):272-4.
6. (en) Mark Anderson, « *Discovermagazine.com* » (http://discovermagazine.com/2009/feb/13-is-quantum-mechanics-controlling-your-thoughts/article_view?b_start:int=1&-C) Discovermagazine.com, 13 janvier 2009 (consulté le 23 octobre 2010)
7. (en) « *Quantum mechanics boosts photosynthesis* » (<http://physicsworld.com/cws/article/news/41632>) physicsworld.com (consulté le 23 octobre 2010)
8. (en) « *Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae* » (https://web.archive.org/web/20120414144734/http://polypedal.berkeleyedu/twiki/pub/PolyPEDAL/PolyPedalPublications/63_evidofvanderwaals2.pdf#search=%22aristotele%20gecko%22) (*version du 14 avril 2012 sur Internet Archive*), article scientifique sur les propriétés des setæ [**PDF**]
9. David Larousserie, « *Depuis le pôle sud, des échos du Big Bang* » (https://www.lemonde.fr/sciences/article/2014/03/17/des-physiciens-observent-les-premiers-instants-de-l-univers_4384658_1650684.html) sur *lemonde.fr*, 17 mars 2014 (consulté le 21 novembre 2015).
10. David Larousserie, « *L'enfance de l'Univers dévoilée* » (https://www.lemonde.fr/planete/article/2013/03/21/l-enfance-de-l-univers-devoilee_1851505_3244.html) sur *lemonde.fr*, 21 mars 2013 (consulté le 21 novembre 2015).
11. (en) « *Une nouvelle analyse infirme la détection d'ondes gravitationnelles* » (<http://www.perimeterinstitute.ca/fr/news/une-nouvelle-analyse-infirme-la-d-tection-d-ondes-gravitationnelles>) sur *Institut Périmètre de physique théorique* 3 février 2015 (consulté le 15 octobre 2015).
12. *A Delayed Choice Quantum Eraser* (<http://fr.arxiv.org/abs/quant-ph/9903047>)

Voir aussi

Bibliographie

Ouvrages de vulgarisation

Ouvrages récents

- Brian Clegg, *Trois minutes pour comprendre les cinquante plus grandes théories de la physique quantique* Le Courrier du Livre, 2015
- Bruce Colin, *Les Lapins de M. Schrödinger ou comment se multiplient les univers quantique* Édition Le Pommier 2006
- Alain Connes, Danye Chéreau, Jacques Dixmier *Le théâtre quantique*, Odile Jacob, 2013
- Serge Haroche, *Physique quantique*, Leçon inaugurale au Collège de France, coédition Collège de France/Fayard, 2004

- Jean Hladik, *Pour comprendre simplement les origines et l'évolution de la Physique quantique* Paris, Ellipses, 2008, 320 p. (ISBN 978-2-7298-3738-9). 📖
- Étienne Klein, *Petit Voyage dans le monde des quantas* Flammarion, collection Champs n°557, 2004 (ISBN 2-08-080063-9)
- Manjit Kumar, *Le grand roman de la physique quantique* Jean-Claude Lattès, 2011
- Michel Le Bellac, *Introduction à la physique quantique* Belin, 2005
- Amaury Mouchet, *L'étrange subtilité quantique* Dunod, 2010
- Roland Omnès, *Les indispensables de la mécanique quantique* Odile Jacob, 2006
- Sven Ortoli et Jean-Pierre Pharabod, *Le Cantique des quantiques* La Découverte, Collection Essais, 2004 (ISBN 2-7071-4356-1)
- Sven Ortoli et Jean-Pierre Pharabod, *Métaphysique quantique* La Découverte, Collection Cahiers libres, 2011 (ISBN 2-7071-6995-1)
- Vincent Rollet, *La physique quantique (enfin) expliquée simplement* Institut Pandore, 2014 (ISBN 979-10-94547-03-8)
- François Rothen, *Aux limites de la physique : les paradoxes quantiques* Presses polytechniques et universitaires romandes, 2012
- Valerio Scarani (préface de Jean-Marc Lévy-Leblond), *Initiation à la physique quantique* Vuibert, 2006

Ouvrages plus anciens

- Stéphane Deligeorges (ed), *Le Monde quantique*, Le Seuil, collection Point-Science n°46, 1984 (ISBN 2-02-008908-4)
- Bernard d'Espagnat, *À la recherche du réel* Fayard, 1979
- Banesh Hoffman et Michel Paty, *L'étrange histoire des quantas* Le Seuil, collection Points-Sciences n°26, 1981 (ISBN 2-02-005417-5)
- Émile Noël (ed), *La Matière aujourd'hui* Le Seuil, collection Points-Sciences n° 24, 1981 (ISBN 2-02-005739-5)
- Erwin Schrödinger, *Physique quantique et représentation du monde* Le Seuil, collection Points Sciences n°78, 1992 (ISBN 2-02-013319-9)
- Paul Taunton (P.T.) Matthews, *Introduction à la mécanique quantique* Dunod, 1966

Manuels universitaires

- Michel Le Bellac, *Physique quantique*, CNRS édition.
- Eyvind H. Wichmann (Author), *Quantum Physics (Berkeley Physics Course, Volume 4)*. Traduction française *Physique quantique - Berkeley Cours de physique, volume 4*, ed. Armand Colin.

Développement historique des concepts

- Jagdish Mehra & Helmut Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory* Springer-Verlag (1982-2002), (ISBN 0-387-95262-4). Coffret de 6 volumes, 9 livres, 5889 pages 📖 Livres disponibles séparément :
 - Vol. 1 : *The Quantum Theory of Planck, Einstein, Bohr & Sommerfeld: It's Foundations & the Rise of Its Difficulties (1900-1925)* Part 1 : (ISBN 978-0-387-95174-4).
 - Vol. 1 : *The Quantum Theory of Planck, Einstein, Bohr & Sommerfeld: It's Foundations & the Rise of Its Difficulties (1900-1925)* Part 2 : (ISBN 0-387-95175-X).
 - Vol. 2 : *The Discovery of Quantum Mechanics, 1925* (ISBN 0-387-95176-8).
 - Vol. 3 : *The Formulation of Matrix Mechanics & It's Modifications. 1925-1926* (ISBN 0-387-95177-6).
 - Vol. 4, Part 1 : *The Fundamentals Equations of Quantum Mechanics (1925-1926)* Part 2 : *The Reception of the New Quantum Mechanics* (ISBN 0-387-95178-4).
 - Vol. 5 : *Erwin Schrödinger & the Rise of Wave Mechanics*, Part 1 : *Schrödinger in Vienna and Zurich (1887-1925)*, ISBN ??
 - Vol. 5 : *Erwin Schrödinger & the Rise of Wave Mechanics*, Part 2 : *The Creation of Wave Mechanics: Early Responses & Applications (1925-1926)* (ISBN 0-387-95180-6).
 - Vol. 6 : *The Completion of Quantum Mechanics (1926-1941)* Part 1 : *The Probability Interpretation & the Statistical Transformation Theory the Physical Interpretation and the Empirical & Mathematical Foundations of Quantum Mechanics (1926-1932)* (ISBN 0-387-95181-4)
 - Vol. 6 : *The Completion of Quantum Mechanics (1926-1941)* Part 2 : *The Conceptual Completion & the Extensions of Quantum Mechanics (1932-1941) - Epilogue : Aspects of the Further Development of Quantum Theory (1942-1999)* (ISBN 0-387-95182-2).
- John von Neumann *Fondements mathématiques de la mécanique quantique* & The Mathematical Foundations of Quantum Mechanics », éd. Jacques Gabay 1992, (ISBN 978-2-87647-047-7)

Comparaisons des différentes approches théoriques de la physique quantique

- Daniel F. Styer, Miranda S. Balkin, Kathryn M. Becker, Matthew R. Burns, Christopher E. Dudley, Scott T. Forth, Jeremy S. Gaumer, Mark A. Kramer, David C. Oertel, Leonard H. Park, Marie TRinkoski, Clait T. Smith, et Timothy D. Wotherspoon, *Nine Formulations of Quantum Mechanics* *American Journal of Physics* 70 (3), mars 2002, 288–297.

Autres ouvrages

- Thierry Lombry, *Un siècle de physique : 1 - La Physique quantique*, Aegeus, 2005
- Carlos Calle *et al.*, *Supercordes et autres ficelles : Voyage au cœur de la physique*, Dunod, 2004
- Gordon Kane, *Supersymétrie*, Le Pommier, 2003
- Robert Gilmore, *Alice au pays des quanta*, Le Pommier-Fayard, 2000
- Brian Greene, *L'Univers élégant (supercordes et théorie M)*, Robert Laffont, 2000
- Maurice Duquesne, *Matière et antimatière*, PUF, coll. Que sais-je ?, 767, 2000
- Martin Gardner, *L'Univers ambidextre*, Seuil, 1995
- Murray Gell-Mann, *Le Quark et le jaguar Voyage au cœur du simple et du complexe*, Albin Michel Sciences, 1995
- Forum mégascience de l'OCDE, *Physique des particules*, OCDE, 1995
- Bernard d'Espagnat, *Le Réel voilé, analyse des concepts quantiques*, Fayard, 1994
- Sven Ortoli et J.-M. Pelhate, *Aventure quantique*, Belin, 1993
- Paul Davies, *La nouvelle physique*, Sciences Flammarion, 1993
- Jean-Pierre Pharabod et B. Pire, *Le rêve des physiciens*, Odile Jacob, 1993
- Bernard d'Espagnat et Etienne Klein, *Regards sur la matière*, Fayard, 1993
- Robert Forward et Joel Davis, *Les Mystères de l'antimatière*, Ed. du Rocher, 1991
- J. Briggs et D. Peat, *Un miroir turbulent*, InterEditions, 1990
- Émile Meyerson, *Réel et déterminisme dans la physique quantique*, 1933
- Françoise Balibar, Alain Laverne, Jean-Marcl Lévy-Lebond, Dominique Mouhanna, *Quantique : éléments*, CEL, 2007 ([lire en ligne](#))

Sur Wikibooks

- Thierry Dugnon, [Théorie quantique de l'observation](#)
- [This quantum world](#)

Articles connexes

- [Calculateur quantique](#)
- [Information quantique](#)
- [Informatique quantique](#)
- [Logique quantique](#)
- [Modèle standard](#)
- [Postulats de la mécanique quantique](#)
- [Quantum](#)
- [Théorie des quanta](#)

Liens externes

- [Physique quantique : définition](#), Futura Sciences

La dernière modification de cette page a été faite le 16 juin 2018 à 12:32.

Droit d'auteur : les textes sont disponibles sous licence Creative Commons attribution, partage dans les mêmes conditions ; d'autres conditions peuvent s'appliquer. Voyez les conditions d'utilisation pour plus de détails, ainsi que les crédits graphiques. En cas de réutilisation des textes de cette page, voyez comment citer les auteurs et mentionner la licence.

Wikipedia® est une marque déposée de la Wikimedia Foundation, Inc, organisation de bienfaisance régie par le paragraphe 501(c)(3) du code fiscal des États-Unis.