

LA THÉORIE QUANTIQUE

EN IMAGES



→ Aperçu

LA THÉORIE QUANTIQUE

J.P. MCEVOY & OSCAR ZARATE

edp sciences

La théorie quantique nous révèle d'étranges paradoxes, en contradiction apparemment avec les lois et la logique de la physique classique. Au niveau sous-atomique, chaque particule semble savoir ce que font les autres et, selon le principe d'incertitude d'Heisenberg, il y aurait même une limitation de la précision avec laquelle nous pouvons mesurer les phénomènes naturels.

Et pourtant, la théorie est étonnamment précise en soi et connaît de larges applications, expliquant toute la chimie et l'essentiel de la physique. Ce guide de la physique quantique nous invite à faire un large tour d'horizon, étape par étape, à la rencontre de personnalités telles que Planck, Einstein, Bohr, Heisenberg et Schrödinger. Chacun a apporté au moins un concept à l'édifice théorique.

On y trouvera le mystère de la dualité onde/particule et des détails sur deux questions qui s'opposaient à l'« interprétation de Copenhague » – à savoir le dilemme du chat vivant ou mort soulevé par Schrödinger et le paradoxe dit EPR (des initiales des auteurs, Einstein, Podolsky et Rosen).

Ces deux questions n'ont pas trouvé de réponse aujourd'hui.

Dans la même collection :

Le temps, C. Callender, R. Edney

La physique des particules, T. Whyntie, O. Pugh

La psychologie, N. Benson

Édition originale : Quantum Theory, © Icon Books Ltd, London, 2013.

Traduction : Alan Rodney

Imprimé en France par Présence Graphique, 37260 Monts

Mise en page de l'édition française : studiowakeup.com

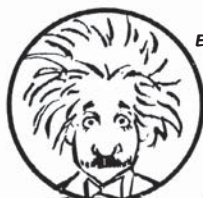
ISBN : 978-2-7598-1229-5

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences, 2014

La théorie quantique, c'est quoi au juste ?

La théorie quantique constitue l'un des ensembles d'idées les plus réussies jamais conçues par l'être humain. Elle explique la table périodique des éléments et les réactions chimiques. Elle fournit des prédictions précises sur le fonctionnement de lasers et des micropuces électroniques, la stabilité de l'ADN et comment les particules alpha quittent le noyau atomique par un effet dit de « tunnel ».



EINSTEIN

LA THÉORIE QUANTIQUE N'EST PAS INTUITIVE ET NE S'ANALYSE PAS SIMPLEMENT.



PAULI

LES CONCEPTS « QUANTIQUES » ONT RÉCEMMENT ÉTÉ COMPARÉS À CEUX DE LA PHILOSOPHIE ORIENTALE ET SONT UTILISÉS POUR SONDER LES SECRETS DE LA CONSCIENCE, DU LIBRE ARBITRE ET DU MONDE PARANORMAL.



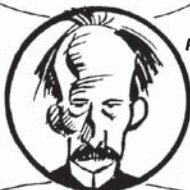
DIRAC

CE LIVRE APPORTE DES RÉPONSES À LA QUESTION : QUELLE EST L'ORIGINE DE LA THÉORIE QUANTIQUE ?



SCHRÖDINGER

LA THÉORIE QUANTIQUE N'A JAMAIS ÉTÉ PRISE EN DÉFAUT.



PLANCK

LA THÉORIE QUANTIQUE, POUR L'ESSENTIEL, EST DE NATURE MATHÉMATIQUE.



BORN

SA STRUCTURE A RÉVOLUTIONNÉ LA MANIÈRE DONT ON PERÇOIT LE MONDE.



BOHR



DE BROGLIE



HEISENBERG

La présentation qu'en a faite Niels Bohr en 1927 reste la version orthodoxe aujourd'hui. Mais les expérimentations impliquant la pensée qu'avait imaginées Einstein dans les années 1930 soulèvent encore bien des débats, tant elles mettent en doute la validité fondamentale de la théorie. Est-ce que Einstein avait raison, une fois de plus ? Ou manquait-il quelque chose dans son raisonnement ? Alors, pour y voir clair, commençons par le commencement...

À la découverte de la théorie quantique...

VOUS SAVEZ, IL EST PLUS FACILE D'EXPLIQUER LA THÉORIE QUANTIQUE À UN DÉBUTANT COMPLET QU'À UN PHYSICIEN BIEN FORMÉ À LA PHYSIQUE CLASSIQUE.



VOUS ME FAITES MARCHER, NON ? QUEL EST LE PROBLÈME DE CES TYPES «CLASSIQUES» AVEC LA THÉORIE MODERNE ?

Voici en quoi consiste le problème. Juste avant le début du xx^e siècle, les physiciens étaient si convaincus de la justesse de leurs idées relatives à la nature de la matière et du rayonnement que tout nouveau concept en contradiction avec **leur vision classique** était aussitôt réfuté, balayé.

Non seulement le formalisme mathématique d'**Isaac Newton** (1642–1727) et celui de **James Clerk Maxwell** (1831–1879) étaient jugés impeccables, mais les prévisions basées sur leurs théories avaient été confirmées par des expérimentations très détaillées au fil des années. L'âge de raison était devenu celui de la certitude !

Les physiciens dits classiques

Quelle définition donne-t-on
à « classique » ?

Le qualificatif « **classique** » sert à désigner les physiciens de la fin du XIX^e siècle qui avaient été élevés à la « nourriture académique », combinant la mécanique de Newton et l'électromagnétisme de Maxwell – les deux synthèses les mieux réussies des phénomènes physiques que le monde ait jamais conçues.



Le fait de tester des théories par des observations sur le terrain a toujours été le signe, la marque de confiance de la « bonne physique » depuis **Galilée** (1563–1642). Celui-là a enseigné comment prendre des mesures et comparer les résultats obtenus avec les prévisions des lois mathématiques.

L'interaction théorie/expérimentation constitue toujours la meilleure manière de procéder dans un monde de sciences aux résultats jugés « acceptables ».

Tout est validé (et classique) ...

Depuis les XVIII^e et XIX^e siècles, les lois du mouvement (dynamique) de Newton ont été revisitées de fond en comble et vérifiées par des tests fiables.



Pas étonnant alors que les physiciens classiques aient gardé toute confiance dans leurs travaux et leurs découvertes !

«... à la sixième place après la virgule»

Un physicien de l'université de Glasgow, **Lord Kelvin** (1824–1907), professeur d'influence, a jeté deux ombres sur l'horizon newtonien.



COMMENT POURRAIS-JE SAVOIR QUE L'UN DE CES NUAGES ALLAIT SE DISSIPER SEULEMENT AVEC L'ARRIVÉE DU CONCEPT DE LA RELATIVITÉ ET QUE L'AUTRE ALLAIT DÉBOUCHER SUR LA THÉORIE QUANTIQUE ?

En juin 1894, le prix Nobel américain **Albert Michelson** (1852–1931) pensait paraphraser Kelvin dans une remarque qu'il allait regretter le restant de sa vie.



Les hypothèses fondamentales de la physique classique

Les physiciens avaient bâti un ensemble d'hypothèses pour les aider à focaliser leurs réflexions et recherches en un corpus qui rendait difficilement acceptable l'arrivée de nouvelles idées. Voici la liste de **ce dont ils étaient convaincus**, relatif au monde matériel...

1) *L'Univers est comme une machine géante dans un cadre de temps et d'espace absolus. Un mouvement complexe peut être interprété comme un mouvement simple de rouages à l'intérieur de cette machine, même si ces rouages ne peuvent être visualisés.*

2) *La synthèse newtonienne implique que tout mouvement nécessite une cause. Si un corps s'avère être en mouvement, on peut toujours identifier ce qui produirait le mouvement observé. C'était une simple affaire de **cause et d'effet** et personne ne contestait l'analyse.*

3) *Si l'état du mouvement peut être connu à un moment dans le temps – disons le présent –, il peut aussi être calculé pour tout autre moment dans le passé ou dans le futur. Rien n'est indéterminé, mais simplement la conséquence d'une cause antérieure. Le **déterminisme** était né.*



4) Les propriétés de la lumière sont **complètement décrites** dans la théorie des **ondes** électromagnétiques de Maxwell et avaient été observées par les réseaux d'interférence constatés lors d'une simple expérience de double fente, en 1802, qui porte le nom du découvreur Thomas Young.

5) Il existe deux modèles physiques pour représenter l'énergie en mouvement: l'un est représenté par **une particule**, sphère impénétrable comme une bille de billard, l'autre par **une onde** qui, telle une vague, se propage vers les plages à la surface de l'océan. Ces deux modèles, exclusifs l'un de l'autre, impliquent que l'énergie doit être considérée comme constituée soit d'ondes, soit de particules.

6) Il est possible de mesurer les propriétés d'un système, comme la température ou la vitesse, avec toute la précision souhaitée. Il suffit de réduire l'intensité du sondage de l'observateur ou de le corriger avec un ajustement dicté par la théorie. On croyait alors que les systèmes atomiques n'échapperaient pas à la règle.

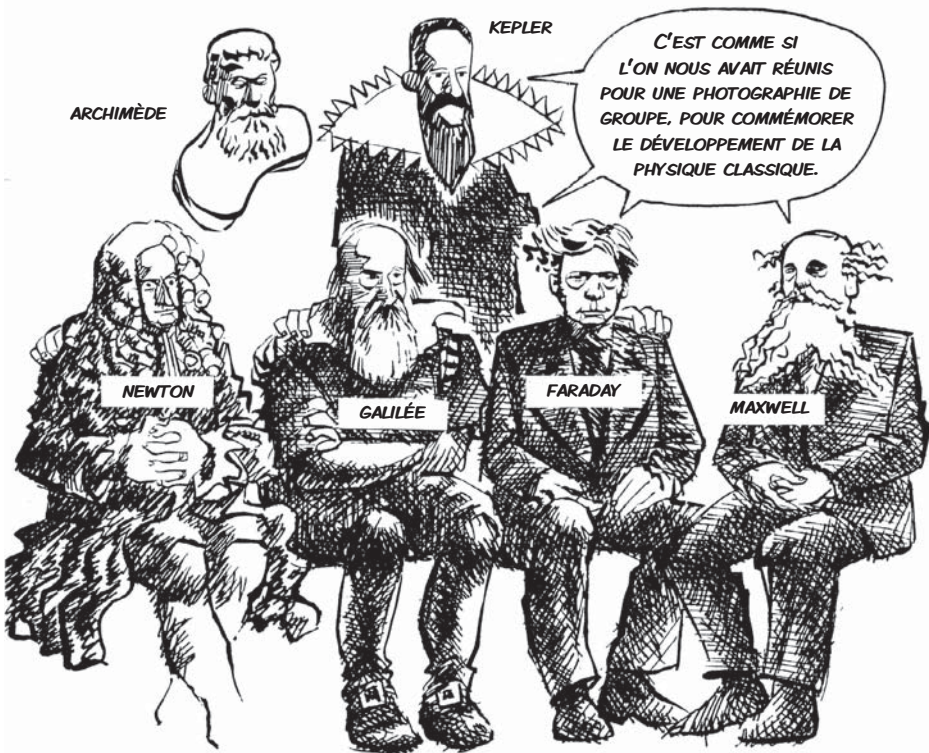
Les physiciens classiques pensaient que ces six affirmations étaient **absolument vraies**. Il se trouve que **toutes** ont finalement été **mises en doute**. Et les premiers à le faire étaient membres d'un groupe qui s'est réuni, le 24 octobre 1927, à l'Hôtel Métropole à Bruxelles.



La conférence de Solvay de 1927 – la formulation de la théorie quantique

Quelques années avant le déclenchement de la Première Guerre mondiale, un industriel belge, **Ernest Solvay** (1836–1922), a sponsorisé la première d'une série de rencontres de physique à Bruxelles. Les participants, limités à 30 environ sur invitation personnelle, devaient traiter en priorité d'un sujet établi et approuvé à l'avance.

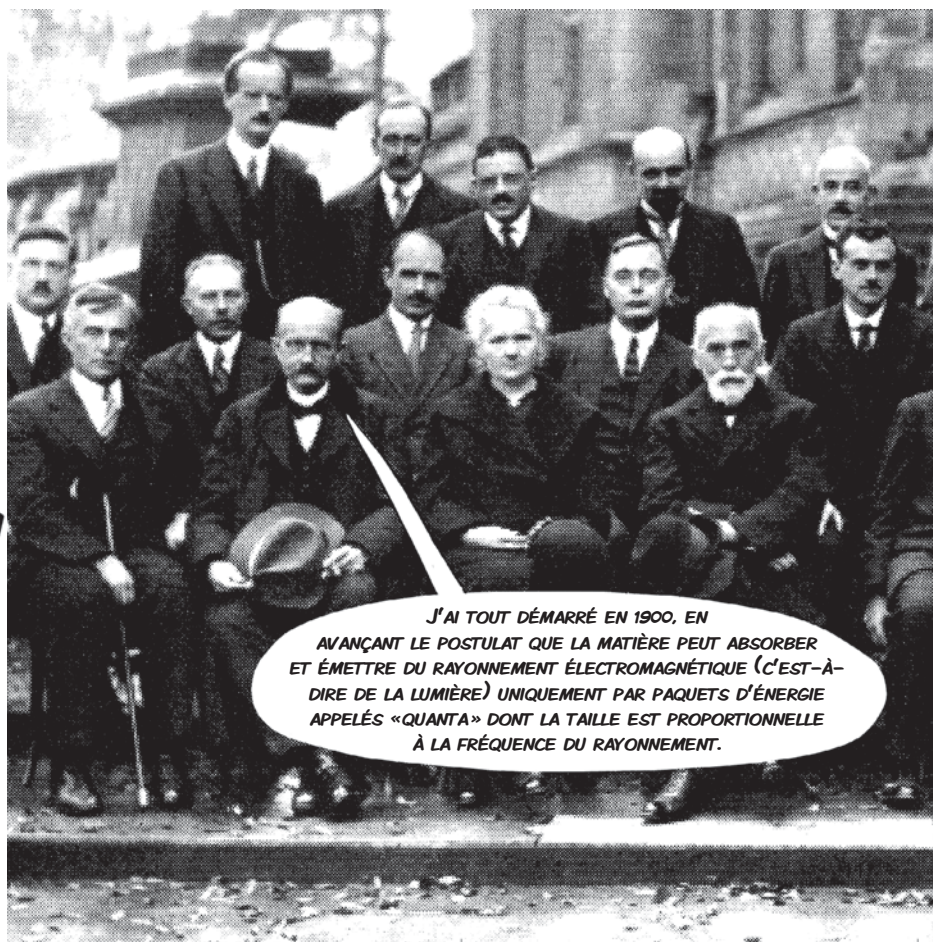
Les cinq premières rencontres se sont tenues entre 1911 et 1927, et le récit qui en a été fait témoigne, de façon remarquable, des développements de la physique au début du xx^e siècle. La conférence de 1927 était centrée sur la physique quantique et a réuni pas moins de **neuf** physiciens théoriques qui avaient tous réalisé des apports majeurs en termes de théorie. Chacun a d'ailleurs reçu un prix Nobel pour sa contribution personnelle.



La photographie du groupe de la conférence de Solvay de 1927 constitue un excellent point de départ pour présenter les principaux acteurs du développement de la théorie la plus « moderne » de la physique. Les générations à venir vont s'émerveiller devant l'échelle de temps réduite et la proximité géographique qui a réuni en 1927 ces géants de la physique quantique.

On ne connaît guère de période dans l'histoire des sciences qui a vu autant de clarifications apportées par si peu d'hommes en si peu de temps.


Contemplez **Max Planck** (1858–1947), au regard si triste, assis au premier rang à côté de **Marie Curie** (1867–1934). Chapeau et cigare en main, Planck semble avoir perdu sa vitalité, épuisé après tant d'années et de tentatives pour réfuter sa propre vision révolutionnaire sur la matière et le rayonnement.



J'AI TOUT DÉMARRÉ EN 1900, EN
AVANÇANT LE POSTULAT QUE LA MATIÈRE PEUT ABSORBER
ET ÉMETTRE DU RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE (C'EST-À-
DIRE DE LA LUMIÈRE) UNIQUEMENT PAR PAQUETS D'ÉNERGIE
APPELÉS «QUANTA» DONT LA TAILLE EST PROPORTIONNELLE
À LA FRÉQUENCE DU RAYONNEMENT.

Quelques années plus tard, en 1905, un jeune clerc d'un bureau des brevets en Suisse, **Albert Einstein** (1879–1955), a donné une portée générale aux concepts de Planck.

Voici donc Einstein, au premier rang en plein centre, un peu rigide dans son accoutrement formel. Cela fait plus de 20 ans qu'il ressasse la problématique quantique sans avoir effectué de réelles avancées depuis son article fondateur en 1905. Pendant tout ce temps, cependant, il a continué à contribuer au développement de la théorie, approuvant les idées originales de ses pairs avec une certitude et une confiance en lui qui défient l'imagination. Son œuvre la plus connue, la *théorie générale de la relativité*, celle qui lui a conféré une renommée internationale, datait déjà d'une décennie.



J'AI DÉMONTRÉ QUE
LA LUMIÈRE EXISTE TOUJOURS SOUS
LA FORME DE QUANTA ET C'EST POUR
CELA QUE LA MATIÈRE L'ABSORBE ET ÉMET
SI BIEN. DOMMAGE QUE PLANCK N'AIT
JAMAIS VOULU ME CROIRE !

À Bruxelles, Einstein avait débattu des conclusions étranges de la théorie quantique avec son défenseur le plus respecté et déterminé, le «grand Danois» **Niels Bohr** (1885–1962). Bohr, plus que quiconque, devait être associé à la lutte pour interpréter et comprendre cette théorie. On le voit ici, détendu et confiant, à l'extrémité droite du rang du milieu; à 42 ans, le professeur Bohr était à l'apogée de sa puissance intellectuelle.

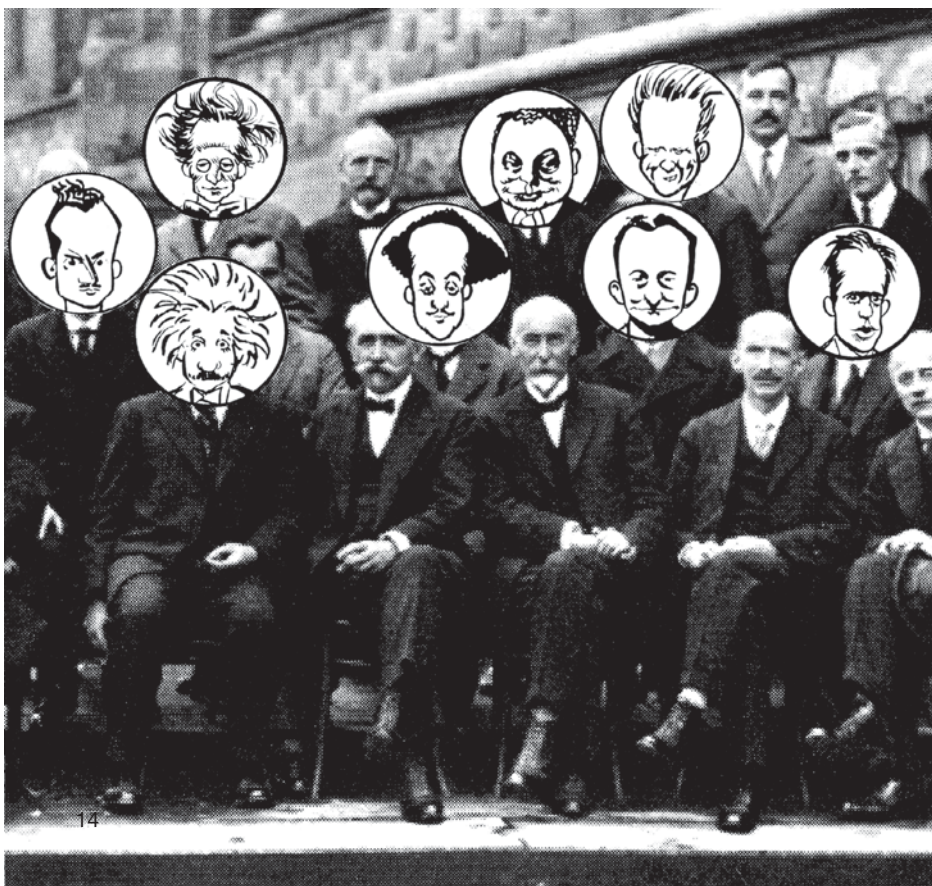
LORS DE
MA CONFÉRENCE,
J'AI PASSÉ EN REVUE
L'INTERPRÉTATION
PROBABILISTE DE LA
THÉORIE QUANTIQUE,
APPAREMMENT À
LA SATISFACTION
DE TOUS, SAUF
D'EINSTEIN.



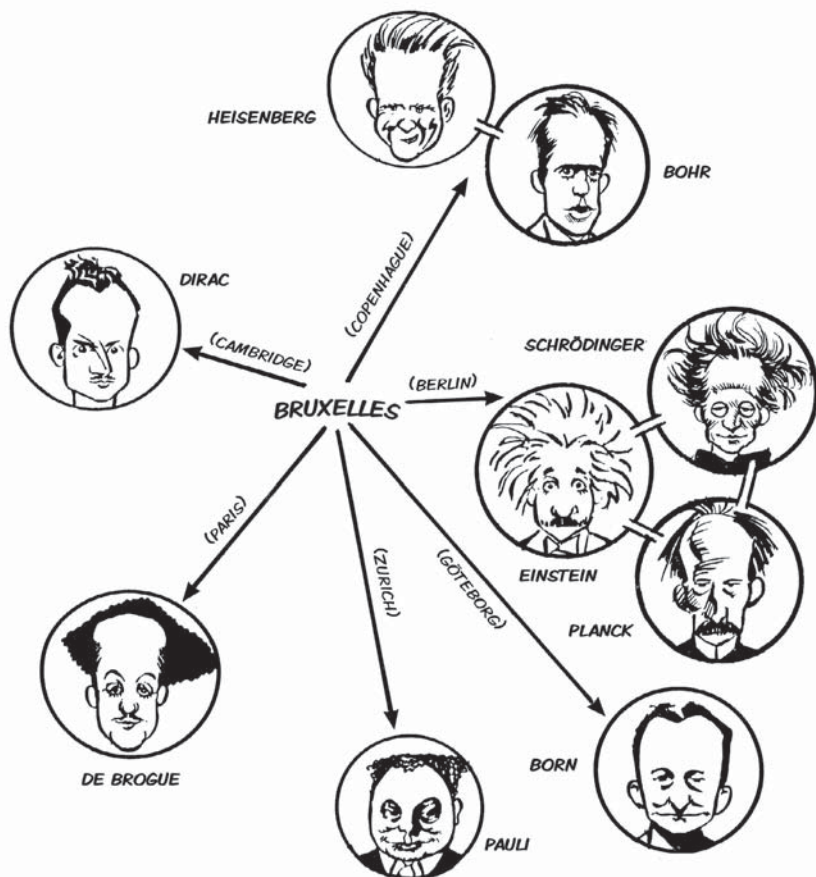
Ainsi naquit une opposition qui se poursuivra sans relâche entre ces deux maîtres de la physique du xx^e siècle, lutte qui ne devait se terminer qu'à la mort d'Einstein en 1955.

Au dernier rang, juste derrière Einstein, on aperçoit **Erwin Schrödinger** (1887–1961), qui paraît particulièrement à l’aise dans sa veste de sport et arborant un nœud papillon. Sur la gauche, en sautant une place, nous voyons les « jeunes Turcs » **Wolfgang Pauli** (1900–1958) et **Werner Heisenberg** (1901–1976) – chacun allant sur leurs 30 ans – et devant eux, **Paul Dirac** (1902–1984), **Louis de Broglie** (1892–1987), **Max Born** (1882–1970) et Niels Bohr. Ces hommes sont aujourd’hui immortalisés par leur association avec les propriétés fondamentales de l’infiniment petit : *l’équation d’onde* de Schrödinger, *le principe d’exclusion* de Pauli, *le principe d’incertitude* d’Heisenberg, *le modèle atomique* selon Bohr... et ainsi de suite.

Tous étaient présents – depuis Planck, le plus âgé à 69 ans, qui avait démarré tous ces travaux en 1900, jusque Dirac, le plus jeune à 25 ans, qui compléta la théorie en 1928.



Au lendemain de cette photo, le 30 octobre 1927, leurs esprits bruissant encore des épiques échanges entre Bohr et Einstein, les congressistes prirent le train à la gare centrale de Bruxelles pour Berlin, Paris, Cambridge, Göteborg, Copenhague, Vienne ou encore Zurich.



Ils emportaient avec eux le plus étrange ensemble d'idées jamais émises par des scientifiques. Au fond d'eux-mêmes, la plupart étaient probablement d'accord avec Einstein, à savoir que cette « folie » appelée « théorie quantique » serait une marche vers une théorie plus complète, mais qui serait renversée pour laisser la place à quelque chose de meilleur, qui plus est en phase avec le bon sens.

Mais comment la théorie quantique est-elle née ? Quelles expérimentations ont convaincu ces hommes parmi les plus circonspects d'ignorer les défenseurs de la physique classique et de proposer des idées sur la Nature qui défiaient justement le bon sens ?



Avant d'évoquer et d'analyser ces paradoxes expérimentaux, nous avons besoin de quelques notions de base sur **la thermodynamique** et sur **les statistiques**, notions fondamentales au développement de la théorie quantique.

Qu'est-ce que la thermodynamique ?

Ce mot signifie étymologiquement mouvement de la chaleur, laquelle se déplace toujours du corps ayant la température plus élevée vers celui à température plus basse, jusqu'à ce que la température des deux corps soit la même. Cet état porte le nom **d'équilibre thermique**.

La chaleur peut être correctement décrite comme **une sorte de vibration...**

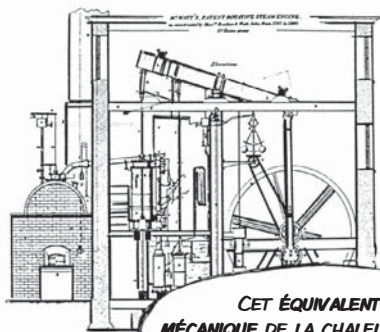
CE SIÈGE
EST CHAUD. Y
AVIEZ-VOUS LAISSÉ
QUELQUE CHOSE DE
«THERMIQUE» ?



NON, C'EST JUSTE
QUE LES MOLÉCULES DU SIÈGE
VIBRENT ENCORE AU MÊME RYTHME
QUE CELLES DE MON CORPS - LEQUEL,
DE TOUTE ÉVIDENCE, EST PLUS RAPIDE
QUE LE VÔTRE. PAR CONSÉQUENT,
LE SIÈGE VOUS PARAÎT
CHAUD.

Premier principe de la thermodynamique

Des modèles mécaniques pour expliquer les flux de chaleur se sont développés rapidement en Grande-Bretagne au cours du XIX^e siècle, suivant les travaux de **James Watt** (1736–1819), un Écossais qui avait construit une machine à vapeur fonctionnelle.

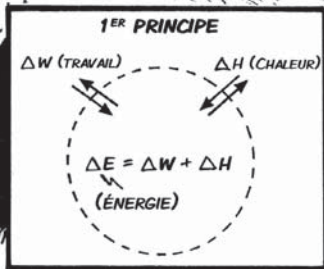


CET ÉQUIVALENT
MÉCANIQUE DE LA CHALEUR MARQUE
LES DÉBUTS DES ÉTUDES DE
THERMODYNAMIQUE.

Peu de temps après, le fils d'un brasseur de Manchester, **James Prescott Joule** (1818–1889), a démontré qu'à une certaine quantité de chaleur correspondait une certaine quantité de travail mécanique.

Puis quelqu'un a affirmé : « puisque la chaleur peut être transformée en travail, elle doit être une forme d'énergie » (le mot grec désignant l'énergie signifie « qui contient du travail »). Mais il a fallu attendre 1847 pour qu'un scientifique respecté et académicien de surcroît, **Hermann von Helmholtz** (1824–1898), avance l'idée que :

DÈS LORS QUE L'ON
CONSTATE QU'UNE CERTAINE QUANTITÉ
D'ÉNERGIE DISPARAIT D'UN ENDROIT DONNÉ,
UNE QUANTITÉ ÉQUIVALENTE DOIT
APPARAÎTRE AILLEURS MAIS DANS
LE MÊME SYSTÈME.

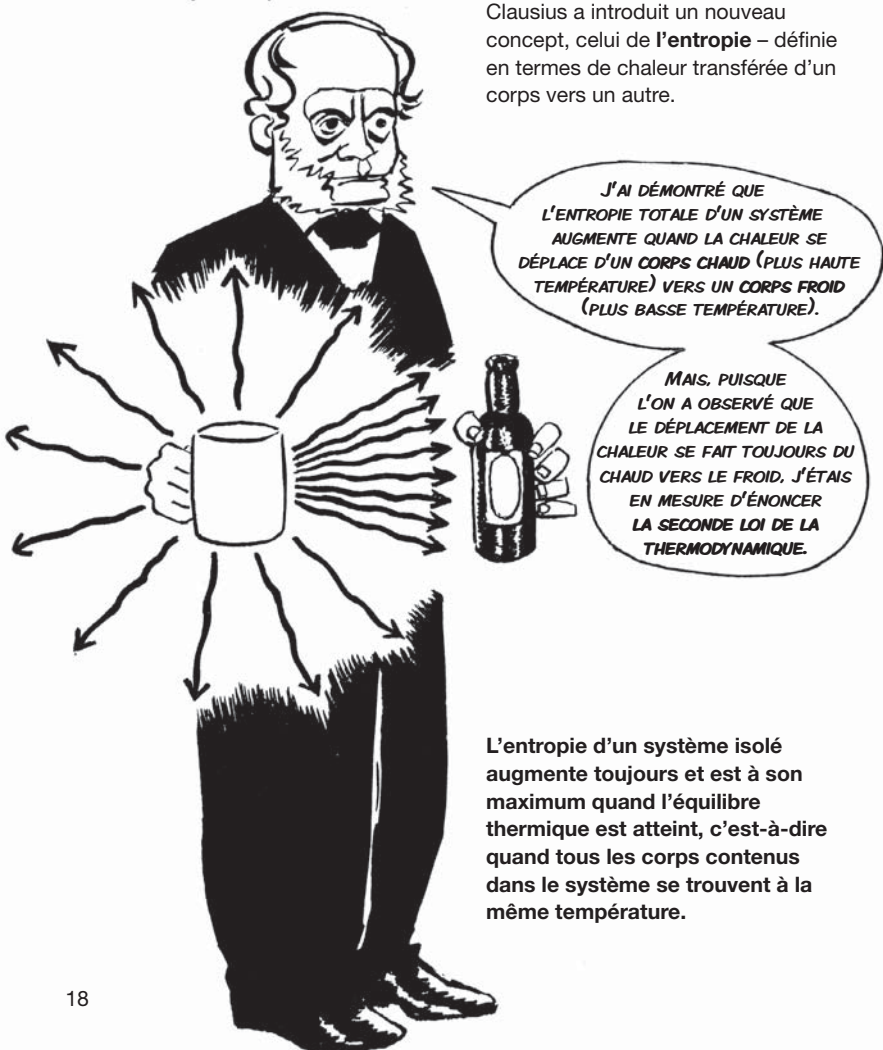


Cette équation s'appelle **la loi de la conservation d'énergie**. Elle constitue l'un des fondements de la physique moderne et est restée inchangée par les théories modernes.

Rudolph Clausius, auteur de deux lois

En 1850, le physicien allemand **Rudolf Clausius** (1822–1888) publie un article dans lequel il donne le nom de première loi de la thermodynamique à la conservation de l'énergie. Dans le même temps, il avance l'argument qu'il y a **un second principe de la thermodynamique** aux termes duquel il y aura toujours une dégradation de l'énergie totale du système, une création de chaleur non utile dans les processus thermodynamiques.

Clausius a introduit un nouveau concept, celui de **l'entropie** – définie en termes de chaleur transférée d'un corps vers un autre.



L'entropie d'un système isolé augmente toujours et est à son maximum quand l'équilibre thermique est atteint, c'est-à-dire quand tous les corps contenus dans le système se trouvent à la même température.

L'existence des atomes

Un philosophe grec du nom de **Démocrite** (circa 460–370 avant J.-C.) avait été le premier à proposer le concept de l'atome (du grec, signifiant « indivisible »).



Ce concept a été remis en cause par Aristote et le débat à ce sujet a duré des siècles avant que le chimiste britannique **John Dalton** (1766–1844) s'en serve pour prévoir les propriétés chimiques des éléments isolés ou composés, en 1806.



ELEMENTS		
Hydrogen 1	Strontian 88	
Nitrogen 5	Barytes 137	
Carbon 5	Iron 56	
Oxygen 8	Zinc 65	
Phosphorus 31	Copper 63	
Sulphur 32	Lead 207	
Magnesia 24	Silver 197	
Lime 28	Gold 197	
Soda 23	Platinum 195	
Potash 39	Mercury 200	

C'est seulement un siècle plus tard qu'un calcul théorique d'Einstein et des expérimentations conduites par un Français, **Jean Perrin** (1870–1942), ont fini par convaincre les sceptiques d'accepter l'existence des atomes comme un fait scientifiquement établi.

Cependant, pendant tout le XIX^e siècle, même sans preuve physique de cette existence, nombre de théoriciens les avaient déjà intégrés à leurs travaux.



Suggestions de lectures complémentaires

Force est de constater que nous ne pouvons pas expliquer la théorie quantique. Des physiciens et des mathématiciens de renom, de Niels Bohr à Roger Penrose, ont dit clairement que cela n'avait pas de sens. Toutefois, nous pouvons découvrir comment les idées se sont développées et comment ou à quoi la théorie s'applique. Notre ouvrage a pris le parti d'explorer surtout la genèse et le développement des idées. Nous faisons ici quelques recommandations de lectures supplémentaires.

Développement de la théorie quantique

The Quantum World [Le monde quantique], J. C. Polkinghorne, Éd. Penguin, 1990. Dense mais excellent, de la plume d'un scientifique élève de Dirac.

Thirty Years that Shook Physics [Les trente ans qui ont fait trembler la physique], George Gamov, Éd. Doubleday, 1966. Une perle pour ce physicien/dessinateur humoristique qui avait le premier appliqué la théorie quantique dans les années 1930. Disponible aussi chez Dover (livre de poche).

In Search of Schrödinger's Cat [À la recherche du chat de Schrödinger], John Gribbin, Éd. Bantam, 1984. Voici le meilleur guide de l'amateur existant aujourd'hui sur la genèse des idées qui sous-tendent la théorie quantique. Ce livre offre des exemples d'application de la théorie, décrit aussi l'électrodynamique quantique de Feynman et résume les interprétations « modernes » de l'époque.

Taking the Quantum Leap [Vers le bond quantique], Fred Alan Wolf, Éd. Harper & Row, 1989. Présentation haute en couleurs des idées de base (mais qui restent surprenantes) de la théorie quantique.

La vie et l'œuvre des principaux acteurs

The Dilemmas of an Upright Man [Les affres d'un honnête homme], J. L. Heilbron, Éd. Uni. of California Press, 1986. Biographie complète et agréable de Max Planck, « découvreur » du quantum.

Subtle is the Lord [Que le Seigneur est malin], Abraham Pais, Éd. Oxford University Press, 1982. Parmi quelques dizaines de récits biographiques sur Einstein, celui-ci doit être l'ouvrage de référence.

Neils Bohr's Times [Du temps de Niels Bohr], Abraham Pais, Éd. Oxford University Press, 1991. Une approche anecdotique qui nous révèle l'homme qui avançait à tâtons au travers de la physique atomique de son siècle, mais qui en était aussi le leader.

Physics and Philosophy [La physique et la philosophie], Werner Heisenberg, Éd. Harper, 1958. Ce livre, écrit par le découvreur de la mécanique matricielle et du principe de l'incertitude, soulève la question de l'interprétation dite de Copenhague et son importance pour les philosophes, le tout couvrant une période de 30 ans.

The Restless Universe [Un Univers agité], Max Born, Éd. Dover, 1951. Un « classique » facile à lire sur la physique du xx^e siècle, comprenant des passages qui expliquent certains aspects statistiques de la théorie quantique. Les coins de page servent à illustrer des séquences temporelles.

Matter and Light [La matière et la lumière], Louis de Broglie, Éd. Norton, 1939 (existe aussi chez Dover en livre de poche). Le point de vue du prince français, raconté par lui-même.

Schrödinger: Life and Thought [Schrödinger: sa vie, sa pensée], Walter Moore, Cambridge University Press, 1989. Biographie universellement acclamée du « polymatheux » autrichien. Tout y passe, verrues comprises !

Beyond the Atom: Philosophical Thoughts of Wolfgang Pauli [Au-delà de l'atome: la pensée philosophique de Wolfgang Pauli], Laurikainen, Éd. Springer-Verlag, 1985. On y trouve

un homme cynique qui a rêvé du principe d'exclusion mais qui, un jour, en a décrit la théorie comme d'autant plus mauvaise « qu'elle n'était même pas fausse ».

Directions in Physics [Où va la physique ?], Paul Dirac, Éd. Wiley, 1978. Ensemble de cours/conférences donnés par Dirac, comprenant son point de vue sur des travaux non encore achevés de théoriciens fondamentalistes.

Interprétations de la théorie quantique

Quantum Reality, Beyond the New Physics [Au-delà de la nouvelle physique], Nick Herbert, Éd. Bantam, 1985. L'auteur résume plusieurs interprétations de la théorie quantique, certaines ayant perdu depuis toute crédibilité.

The Ghost in the Atom [Le fantôme dans l'atome], série d'entretiens rassemblés et présentés par P. C. W. Davies et J. R. Brown, Cambridge University Press, 1986. Interviews de John Bell, Alain Aspect, John Wheeler et d'autres qui décrivent bien l'état de l'art sur la question de la non-localisation il y a environ 190 ans. Introduction et fond de deux paradoxes qui remontent à 1935 ; le chat de Schrödinger et l'EPR (voir intra).

Quantum Theory on the Internet [La théorie quantique sur Internet]. Il est possible de télécharger des séquences vidéo montrant des fonctions d'ondes qui prouvent le principe d'incertitude et l'éparpillement quantique. Formats – Windows® et MacIntosh®.

Mots de recherche – Visual Quantum Mechanics Project ou demander un lien par mail à kzollman@bluegiant.phys.ksu.edu.

Remerciements

Ce livre était plus difficile à écrire que je ne l'avais imaginé. Mais je bénis les dieux d'avoir eu Oscar Zarate comme partenaire, car cela soulignait le fait que ce récit était, avant tout, une aventure humaine. Des conversations avec John Polkinghorne, Chris Isham et John Wheeler se sont révélées très utiles à l'ouvrage, et le livre qu'a écrit Abraham Pais sur Bohr s'est avéré être une source biographique essentielle. Je dois beaucoup à l'historien des sciences Martin Klein, dont les articles publiés dans *The Natural Philosopher* sur les premiers travaux de Planck et d'Einstein m'ont ouvert les yeux il y a 25 ans. Ma femme Pat et d'autres membres de la famille étaient on ne peut plus patients quand je m'emmurais dans des silences ombrageux.

(« Joe ») **J. P. McEvoy** a été enseignant et chercheur avant de devenir journaliste et auteur scientifique. On lui doit notamment *Stephen Hawking for Beginners* [Stephen Hawking pour les débutants] ; il a obtenu un MS en physique à Uni. Pennsylvania et un Ph.D. de l'université de Londres. Aux États-Unis, il était chercheur associé des laboratoires de recherche de RCA, à Princeton. Il a ensuite passé 15 ans dans le domaine de la physique à l'état solide, aux États-Unis, en Suisse et au Royaume Uni. En octobre 2006, l'American School in London lui a conféré la prestigieuse récompense dite du Fondateur pour « son dévouement et ses services de grande inspiration en faveur de l'éducation ».

Oscar Zarate a précédemment illustré *Freud, Lenin, Mafia, Machiavelli et Stephen Hawking for Beginners*, et signé bon nombre de romans graphiques internationalement reconnus. *A small killing* [Un petit meurtre] coécrit avec Alan Moore a reçu le prix Will Eisner – « meilleur roman graphique 1994 ». Oscar Zarate a achevé *It's dark in London* [Il fait sombre à Londres], une série d'histoires graphiques destinées aux éditions *Serpent's Tail*, en septembre 1996.

Les diagrammes et graphiques sont de **Judy Groves**.

Les crédits photographiques

Pages 10, 11 : Institut de Solvay.

Pages 164, 172 : Niels Bohr Archive.