



Guo Guangcan
Traduit par Olivier Courcelle

La seconde révolution quantique

Un regard chinois

La seconde révolution quantique

Un regard chinois

Guo Guangcan

Traduit par Olivier Courcelle

Depuis sa naissance il y a plus de cent ans, en nous apportant le transistor, l'électronique, l'ordinateur et Internet, la physique quantique a déjà bouleversé le monde. Elle s'apprête à le faire une seconde fois, en nous faisant entre autres passer de la civilisation du bit à celle du qubit, de l'information classique à l'information quantique.

Que représente exactement cette « seconde révolution quantique » ? Quel parcours historique a-t-elle suivi ? Quelles nouvelles technologies nous promet-elle ? Quels défis restent-ils à relever ?

Autant de questions abordées dans ce livre, rédigé par un maître de la physique quantique chinoise, très en pointe sur le sujet. Il entend offrir au grand public motivé ou à l'étudiant en sciences une vision panoramique du monde quantique, des fondements jusqu'aux frontières de la recherche.

Guangcan Guo, physicien spécialiste en optique et information quantique à l'Université des sciences et technologies de Chine (USTC), a été président de la Société chinoise d'optique et du comité d'optique quantique de la Société chinoise de physique. Membre de l'Académie chinoise des sciences (CAS) et de l'Académie mondiale des sciences (TWAS), il dirige le laboratoire LQCC à l'USTC et le programme de calcul quantique de la China Computer Federation. Reconnu comme l'un des fondateurs de l'optique quantique et de la science de l'information quantique en Chine, ses recherches couvrent l'optique quantique, la cryptographie, les communications et le calcul quantique.

978-2-7598-3835-6



 **edp sciences**
www.edpsciences.org

La seconde révolution quantique

La seconde révolution quantique

Un regard chinois

GUO GUANGCAN

Traduit par Olivier Courcelle



17, avenue du Hoggar – P.A. de Courtabœuf
BP 112, 91944 Les Ulis Cedex A

Cet ouvrage a bénéficié du financement **B&R Book Program**.

Version originale publiée en chinois :

颠覆：迎接第二次量子革命

édité par Guo Guangcan. Beijing: Science Press, 2022

Mise en pages: Flexedo

Imprimé en France

ISBN (papier) : 978-2-7598-3835-6

ISBN (ebook) : 978-2-7598-3840-0

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.

Ce livre ne peut être reproduit ni utilisé à des fins d'entraînement de systèmes d'intelligence artificielle. La fouille de textes et de données est interdite conformément à l'article 4 (3) de la Directive (UE) 2019/790.

© EDP Sciences, 2026

17 avenue du Hoggar – BP 112 – 91944 Les Ulis Cedex A – France

SOMMAIRE

<i>Préface</i>	7
<i>Avant-propos de l'auteur</i>	9
I. Qu'est-ce que la physique quantique ?	13
I.1 La naissance de la physique quantique	13
I.2 La dualité onde-particule.....	28
I.3 Le langage quantique.....	37
II. Le fantôme d'Einstein	45
II.1 La controverse entre Einstein et Bohr.....	45
II.2 Le paradoxe EPR.....	59
II.3 Les réactions	65
II.4 Le cœur de la discorde.....	75
II.5 Un fantôme plus rapide que la lumière?	81
III. Le miracle de la non-localité	85
III.1 Le théorème de Bell et la non-localité	85
III.2 L'intrication quantique.....	102
III.3 La téléportation quantique	111
IV. Vie et mort du chat de Schrödinger	121
IV.1 Le paradoxe du chat de Schrödinger	121
IV.2 L'interprétation de Copenhague, ou l'art de tuer le chat par la mesure	132
IV.3 Une décohérence induite par l'environnement?	139
IV.4 La mort naturelle du chat.....	148
V. La deuxième révolution quantique	157
V.1 Qu'est-ce que la deuxième révolution quantique?	157
V.2 L'unification de la théorie quantique et la relativité générale... ..	173
V.3 Quelle direction pour la théorie quantique traditionnelle?	181
V.4 Le vide, source de tout	192
VI. L'informatique quantique	199
VI.1 De la fin de la loi de Moore à la naissance du calcul quantique	199
VI.2 Le fonctionnement d'un ordinateur quantique	201
VI.3 Le codage quantique	207
VI.4 Les algorithmes quantiques	213
VI.5 Mise en œuvre pratique de l'informatique quantique	221
VI.6 État actuel et perspectives du calcul quantique	236
VI.7 L'impact révolutionnaire des ordinateurs quantiques	243

VII. La cryptographie quantique.....	249
VII.1 La cryptographie traditionnelle.....	249
VII.2 La naissance de la cryptographie quantique.....	263
VII.3 La cryptographie quantique appliquée.....	269
VII.4 Le développement de la cryptographie quantique	272
VII.5 La sécurité informatique à l'ère des technologies quantiques	276
VIII. Fascinante simulation quantique	279
VIII.1 Les principes de la simulation quantique	279
VIII.2 Le démon de Maxwell quantique	281
VIII.3 Les modes zéro de Majorana.....	285
VIII.4 Les phases topologiques	293
IX. La mémoire quantique.....	301
IX.1 Les fondements	301
IX.2 Les mémoires quantiques à l'état solide	310
IX.3 La réalisation d'une clé USB quantique.....	322
IX.4 Synthèse et perspectives	331
<i>Bibliographie sommaire</i>	<i>337</i>

PRÉFACE

Il faut bien reconnaître que le mot « quantique » envahit chaque jour un peu plus l'espace public. Souvent associé à des termes comme « intrication », « information », « informatique », « communication », « optique » ou « téléportation », il témoigne d'une réelle rupture scientifique et technique, tout en restant nimbé d'une aura de mystère et de toute-puissance – dont tire parti une multitude de nouveaux concepts ou produits plus ou moins sérieux.

Comment le monde quantique a-t-il conquis le devant de la scène ? Par quelles technologies va-t-il changer notre vie quotidienne ? Pourquoi révolutionne-t-il la science ? Pour répondre à ces questions et y voir plus clair en un domaine riche en idées reçues, il fallait le point de vue d'un spécialiste.

Et spécialiste, Guo Guangcan, l'auteur de ce livre, l'est assurément ! Ce membre de l'Académie chinoise des sciences se consacre depuis le début des années 1980 au développement de l'optique quantique en Chine. Il a été pionnier en matière d'information quantique dans les années 1990, alors que ce domaine émergeait à peine et qu'il était largement ignoré de la communauté scientifique. Entre sérieuses difficultés et solides remises en question, ce persévérant chercheur a su guider son équipe pour aboutir au fil des décennies à une série d'avancées majeures.

Qu'on en juge ! Guo Guangcan a notamment dirigé la mise en place du premier réseau gouvernemental quantique au monde, développé une mémoire quantique à l'état solide d'une fidélité exceptionnelle, et utilisé les technologies qu'il a contribué à fonder pour étudier des questions parmi les plus fondamentales de la physique. Il a ainsi pu vérifier de nouvelles formes du principe d'incertitude de Heisenberg, généré des états superposés arbitraires ondes/particules de photons, et remis en question les limites imposées par le principe de complémentarité de Bohr. Bref, nul n'est plus qualifié que cet homme pour nous éclairer sur les mystères de la physique quantique !

Au fond, cet ouvrage est à l'image de ce riche parcours. En s'appuyant sur le célèbre paradoxe EPR et le non moins célèbrissime chat de Schrödinger, il nous fait cheminer de la mécanique quantique des débuts au secteur clé de l'information quantique d'aujourd'hui. Vient ensuite l'exploration des différentes branches ou axes de recherche de ce large domaine, comme le calcul quantique, la cryptographie quantique, la simulation quantique ou les mémoires quantiques. L'ouvrage se clôt par une vision de nature plus prospective sur le profond impact que la deuxième révolution quantique, impulsée par l'information quantique, pourrait avoir sur la physique.

Ce livre de vulgarisation à destination du grand public et des étudiants met en lumière avec brio la beauté et l'immense potentiel de l'information quantique. Nul doute que sa lecture incitera une nouvelle génération de jeunes esprits à se tourner vers la recherche en la matière. C'est le vœu que l'on devine chez son auteur, un éminent savant qui, après avoir formé des générations de talents, continue ainsi à semer les graines de la curiosité scientifique.

Yang Guozhen

Membre de l'Académie chinoise des sciences

Chercheur à l'Institut de physique
de l'Académie chinoise des sciences

AVANT-PROPOS DE L'AUTEUR

Quand j'ai commencé à me consacrer à la recherche en optique quantique, au début des années 1980, puis, une décennie plus tard, au domaine alors naissant de l'information quantique, mes collègues physiciens regardaient ces champs de recherche avec un scepticisme marqué. Quant au grand public, je crois qu'il percevait la physique quantique comme un savoir ésotérique, inaccessible, pour ainsi dire suspendu au-dessus des amphithéâtres. Disons plus simplement qu'il s'en tenait à l'écart !

Les choses ont bien changé depuis. Le terme « quantique » s'entend et se lit partout aujourd'hui, aussi bien dans les laboratoires que dans l'espace médiatique. Le grand public lui confère souvent un pouvoir mystérieux, capable potentiellement de résoudre tous les grands problèmes du monde. Une communication parfois fallacieuse de certains chercheurs, jointe à un battage médiatique incontrôlé, a donné lieu à toutes sortes de théories étranges qui ne contribuent pas – c'est le moins qu'on puisse dire – à éclairer le débat !

Alors qu'en est-il vraiment ? C'est au fond à cette question que tente de répondre ce livre. Nous entrons dans une nouvelle ère technologique souvent qualifiée de « seconde révolution quantique ». La première révolution a engendré le développement de l'électronique, des ordinateurs, d'Internet, bref tout ce qui fait la technologie de

l'information couramment utilisée aujourd'hui, l'information dite *classique*. La seconde révolution quantique, en propulsant ces technologies de l'information vers un nouveau stade de développement, l'information dite *quantique*, conduira inévitablement elle aussi à de profonds bouleversements, y compris sociétaux. Pour nous préparer à ce monde nouveau, il importe de rendre accessibles la physique et l'information quantiques auprès de la jeune génération. Tel est le but de ce livre. Il s'adresse prioritairement aux étudiants, car la jeunesse représente l'avenir. Même s'ils ne s'engageaient pas dans la recherche – mais rien ne leur interdit! –, les futurs citoyens de cette nouvelle ère doivent posséder des connaissances de base en physique quantique.

Nous commencerons par la naissance de la « physique » ou « mécanique » quantique, en nous focalisant sur deux débats historiques majeurs: le paradoxe EPR et le chat de Schrödinger. Nous verrons comment ces questions centenaires ont favorisé le développement de la recherche et conduit aux débuts de l'information quantique. Dans un second temps, nous présenterons certaines de ces technologies de l'information quantique qui contribueront à bouleverser la productivité de nos sociétés.

Le livre est plus précisément divisé en deux parties: les cinq premiers chapitres décrivent différents phénomènes et concepts propres au monde quantique, ce qui permettra au lecteur d'acquérir des connaissances de base, tandis que les quatre derniers présentent les principales technologies de l'information quantique actuellement en phase de développement. Ce livre entend se concentrer sur les concepts physiques plus que sur les formules mathématiques compliquées. Il se veut compréhensible par des étudiants en sciences et en ingénierie, et ambitionne de fournir une vision claire et globale du monde quantique, des fondements jusqu'à la frontière de la recherche.

Cet ouvrage est en réalité une œuvre collective du Laboratoire d'information quantique de l'Académie chinoise des sciences. Un grand merci à ceux qui y ont contribué: Ye Xiangjun, Han Yongjian,

Cao Gang, Li Haiou, Yin Zhenqiang, Xu Jinshi, Zhou Zongquan et Duan Kaimin. Sans leurs efforts conjoints, ce livre n'aurait pas été aussi bien achevé en si peu de temps.

Qu'il me soit enfin permis de le dédier à la mémoire de ma mère qui m'a élevé en dépit des grandes difficultés qu'elle a traversées.

Guo Guangcan



Qu'est-ce que la physique quantique ?

*Bref, ce que j'ai fait peut être considéré
comme une tentative désespérée.*

Max Planck

I.1 LA NAISSANCE DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE

I.1.1 L'apogée de la physique classique

Au cours de leur longue quête pour percer les mystères de la nature, les hommes ont progressivement classé les phénomènes physiques, aussi complexes soient-ils, en trois grandes catégories : la mécanique, la thermodynamique et l'électromagnétisme – et se sont efforcés d'en découvrir les lois fondamentales.

En 1687, Isaac Newton publia ses *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (« Les principes mathématiques de la philosophie naturelle »), un livre fondateur, dans lequel il énonça les trois lois du mouvement et la loi de la gravitation universelle, établissant ainsi le

premier système mécanique unifié. Au cours du siècle suivant, grâce aux travaux de Leonhard Euler, Jean le Rond d'Alembert, Joseph-Louis Lagrange et Pierre-Simon Laplace, entre autres, émergea une alternative équivalente à la mécanique newtonienne, régie par l'équation dite *d'Euler-Lagrange* et fondée sur le principe de moindre action et le calcul des variations. En 1834, William Rowan Hamilton, en introduisant le principe et les équations canoniques qui portent son nom, proposa une troisième formulation des théories newtoniennes, qui paracheva ainsi la mécanique dite *classique*.

Au XIX^e siècle, cette mécanique était une théorie aboutie, qui s'appliquait avec précision dans de nombreux domaines. En 1843, par exemple, l'astronome britannique John Couch Adams calcula l'orbite d'Uranus et, constatant une légère anomalie, prédit l'existence d'une nouvelle planète, Neptune, qui fut effectivement observée en 1846. Cet accomplissement illustre la puissance inégalée de la mécanique classique : des corps célestes aux minuscules particules terrestres, tout pouvait être décrit par ses lois.

À la même époque, les lois de la thermodynamique étaient largement comprises. Josiah Willard Gibbs, s'appuyant sur les idées de James Clerk Maxwell et Ludwig Boltzmann, formalisa le concept d'ensemble en thermodynamique et développa une méthode statistique à leur sujet. Cette approche unifia les deux branches principales de la thermodynamique – la théorie phénoménologique et la théorie cinétique moléculaire – en un système cohérent.

Enfin, après la découverte en 1785 par Charles-Augustin de Coulomb de la loi portant son nom, qui marqua le début de l'étude quantitative des phénomènes électriques, les travaux de Hans Christian Ørsted, Jean-Baptiste Biot, Félix Savart, André-Marie Ampère, Carl Friedrich Gauss et Michael Faraday aboutirent aux équations de Maxwell, publiées en 1873 par James Clerk Maxwell dans *A Treatise on Electricity and Magnetism* (« Traité d'électricité et de magnétisme »). Encore aujourd'hui, ces équations restent un modèle de distinction scientifique : leur élégance, leur simplicité, leur

symétrie et leur profondeur ont inspiré des générations de physiciens. Boltzmann lui-même s'exclama à leur sujet : « Est-ce Dieu qui a écrit ces équations ? »

Les équations de Maxwell prédirent non seulement l'existence des ondes électromagnétiques, mais révélèrent aussi que la lumière en est une manifestation, unifiant ainsi l'électromagnétisme et l'optique. Cette prédiction fut confirmée expérimentalement par Heinrich Rudolf Hertz en 1887 (dont les expériences révélèrent aussi l'effet photoélectrique, comme nous le verrons bientôt), ce qui ouvrit l'ère des télécommunications.

À la fin du ^{xix}^e siècle, les trois piliers de la physique classique – la mécanique classique, la thermodynamique et l'électrodynamique – étaient solidement établis. Chacune de ces théories avait résisté à de multiples tests expérimentaux et trouvait des applications variées. Plus important encore, ces trois domaines étaient cohérents entre eux, formant un magnifique système unifié capable d'englober l'ensemble des phénomènes mécaniques, thermiques, optiques, électriques et acoustiques. Ce système, à la fois rigoureux et élégant, incarnait des concepts physiques riches et profonds.

Cette physique classique connut son âge d'or dans les années 1890. Jamais la science n'avait paru aussi puissante : presque tous les phénomènes connus pouvaient être expliqués par les théories existantes. Les plus grands physiciens de l'époque pensaient que les lois fondamentales les plus importantes avaient toutes été découvertes, et que la probabilité qu'elles soient un jour remplacées était extrêmement faible. Dans ce contexte, il ne restait plus qu'à peaufiner l'édifice théorique, en apportant çà et là quelques ajustements mineurs, comme des mesures plus précises de certaines constantes. L'un d'entre eux déclara même que « les découvertes futures devraient être cherchées à la sixième décimale ». L'avenir allait rapidement leur donner tort !

1.1.2 Deux petits nuages à l'horizon

Le 27 avril 1900, en effet, dans un discours prononcé à la Royal Institution de Londres, Lord Kelvin déclara en introduction que

« deux petits nuages assombrissent l'horizon clair et paisible¹ » de la physique. Le premier de ces nuages était lié à l'échec de l'expérience de Michelson-Morley. Dans le cadre de la physique classique, le temps et l'espace étaient considérés comme absolus, une conception qui impliquait l'existence d'un référentiel immobile, appelé *éther*. Tout mouvement par rapport à cet éther était considéré comme un mouvement absolu. L'objectif initial de l'expérience de Michelson-Morley était de mesurer la vitesse de la Terre par rapport à l'éther. La théorie électromagnétique de Maxwell offrait une méthode de mesure précise : en comparant le temps de parcours de la lumière dans des directions parallèles et perpendiculaires au mouvement terrestre, une différence infime devait être détectée si l'éther existait.

À partir de 1880, Albert Abraham Michelson, né en Europe mais ayant émigré aux États-Unis à l'âge de quatre ans, conçut et construisit un appareil ingénieux, l'interféromètre, grâce auquel il mena, d'abord seul puis en collaboration avec Edward Williams Morley, une série d'expériences de plus en plus précises pour tester le mouvement relatif de la Terre et de l'éther. Les résultats montrèrent sans ambiguïté qu'aucune différence de temps n'était perceptible entre les deux directions. Cette expérience, d'une précision inégalée à l'époque, valut à Michelson le prix Nobel de physique en 1907, faisant de lui le premier Américain à recevoir cette distinction.

Bien que l'expérience de Michelson-Morley ait remis en question la théorie de l'éther, la communauté scientifique ne réalisa pas immédiatement la gravité de la situation. Beaucoup, y compris Lord Kelvin lui-même, pensaient que l'idée pouvait être révisée. Ce n'est que plus tard, après des recherches approfondies, que l'on comprit vers quelle impasse menait cette théorie. L'abandon de l'éther et du concept de

1. Ce discours, intitulé « Nineteenth Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light » (« Les nuages du XIX^e siècle sur la théorie dynamique de la chaleur et la lumière ») a été complété et publié dans le numéro de juillet 1901 du *London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, série 6, volume 2, pages 1-40.

mouvement absolu conduisit finalement Albert Einstein à formuler la théorie de la relativité en 1905.

1.1.3 Le rayonnement du corps noir

Le deuxième nuage mentionné par Lord Kelvin concernait le problème de l'équipartition de l'énergie dans le rayonnement du corps noir. Le concept de corps noir avait été introduit en 1859 par Gustav Robert Kirchhoff², physicien à l'Université de Heidelberg, pour simplifier l'analyse des phénomènes de rayonnement. Un corps noir est un objet idéal qui absorbe toute la lumière qu'il reçoit et dont le spectre d'émission ne dépend que de sa température. Kirchhoff modélisa un tel corps par une cavité percée d'un petit trou : toute lumière entrant par ce trou serait réfléchi et absorbée jusqu'à disparaître. Il démontra que la distribution spectrale du rayonnement émis ne dépendait ni du matériau ni de la forme du corps noir, mais uniquement de sa température et de la longueur d'onde. À l'époque, toutefois, personne ne savait comment fabriquer un corps noir pour vérifier les conclusions de Kirchhoff...

Dans les années 1890, les entreprises allemandes, désireuses de développer des ampoules et des systèmes d'éclairage plus efficaces que ceux de leurs concurrents britanniques et américains, soutinrent massivement la recherche scientifique sur le rayonnement, ce qui permit un essor rapide des études expérimentales sur le corps noir. Pour gagner cette compétition technologique, l'Allemagne fonda en 1887 le célèbre *Physikalisch-Technische Reichsanstalt* (Institut impérial de physique technique) dans la banlieue de Berlin, un laboratoire équipé de matériels à la pointe de la technologie de l'époque. En 1893, Wilhelm Wien découvrit, par une approche thermodynamique, une relation simple entre la température d'un corps noir et la longueur d'onde du maximum du rayonnement : plus la température augmente, plus cette longueur d'onde diminue. Cette relation, appelée *loi du déplacement de Wien*, stimula les recherches sur

2. Il est aussi très connu pour les lois sur les circuits électriques qui portent aujourd'hui son nom et qu'il établit à l'âge de 21 ans.

le rayonnement. En 1896, Wien proposa également une formule décrivant la distribution spectrale complète de l'énergie rayonnée par un corps noir, là encore fondée sur des hypothèses thermodynamiques. Les expériences de Friedrich Paschen confirmèrent cette formule pour les courtes longueurs d'onde, mais Otto Lummer et Ernst Pringsheim rapportèrent en 1899 des écarts systématiques pour les grandes longueurs d'onde.

À l'été 1900, Heinrich Rubens et Ferdinand Kurlbaum effectuèrent des expériences minutieuses sur de très larges gammes de longueurs d'onde et de températures. Leurs résultats confirmèrent à nouveau que, pour ces grandes longueurs d'onde, l'écart entre observations et prédictions théoriques était considérable : la formule de Wien échouait complètement. Ils conclurent de même que la densité d'énergie dans ce domaine devait être proportionnelle à la température absolue. Ce problème incita les chercheurs à formuler une nouvelle loi.

Toujours en 1900, le physicien britannique Lord Rayleigh, cherchant à résoudre l'inadéquation de la formule de Wien pour les grandes longueurs d'onde, abandonna l'approche thermodynamique suivie jusque-là. En partant directement de la théorie classique de Maxwell, il obtint une expression aujourd'hui connue sous le nom de *loi de Rayleigh-Jeans*³. Cette formule fournissait une base théorique expliquant pourquoi la densité d'énergie du rayonnement était proportionnelle à la température absolue dans le domaine des grandes longueurs d'onde, en parfait accord avec les résultats expérimentaux. En revanche, elle donnait des résultats catastrophiques pour les courtes longueurs d'onde, conduisant à une divergence de l'énergie – un problème que Paul Ehrenfest baptisa plus tard « catastrophe ultraviolette ».

Ainsi, deux approches théoriques aboutissaient à des impasses : celle de la thermodynamique (Wien) ne fonctionnait qu'aux courtes longueurs d'onde, tandis que celle de l'électromagnétisme (Rayleigh-Jeans) n'était valable qu'aux grandes longueurs d'onde

3. Jeans a corrigé en 1905 une petite erreur dans la formule originale de Rayleigh.

(voir Figure 1-1). Comment concilier ces résultats ? La solution vint de Max Planck, un savant réputé pour sa prudence, qui pour le coup introduisit une idée révolutionnaire : le quantum.

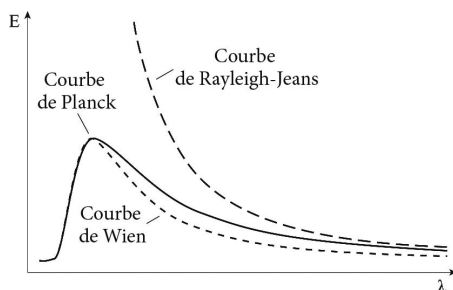


Figure 1-1 | Spectre de rayonnement d'un corps noir.

1.1.4 Le quantum selon Planck

Pour résoudre le problème du rayonnement du corps noir, il fallait donc trouver une formule conciliant ces trois faits expérimentaux :

- la formule de Wien est valable aux courtes longueurs d'onde ;
- cette même formule échoue dans le domaine des grandes longueurs d'onde, la densité d'énergie rayonnée étant proportionnelle à la température ;
- la loi du déplacement de Wien est valable sur l'ensemble du spectre.

Le 7 octobre 1900, Planck utilisa une méthode d'interpolation mathématique pour deviner une formule satisfaisant ces conditions. Le 19 octobre, il présenta cette formule – aujourd'hui appelée *loi de Planck* – à la Deutsche Physikalische Gesellschaft (Société allemande de physique). Son confrère Heinrich Rubens lui confirma peu après que la formule s'accordait aux données expérimentales, et cela avec une précision inespérée.

Conscient qu'une telle adéquation ne pouvait être fortuite, Planck passa les deux mois suivants à en rechercher la signification physique. Il réalisa alors qu'aucune loi classique ne permettait de dériver sa formule. S'inspirant des travaux de Boltzmann sur la thermodynamique statistique, Planck découvrit que l'hypothèse d'une émission

et d'une absorption discrètes de l'énergie – par « quanta », le pluriel latin de « quantum » – conduisait naturellement au résultat.

À l'époque, les physiciens, y compris Planck lui-même, considéraient le quantum comme une astuce mathématique provisoire plutôt que comme une réalité physique tangible. Pendant près de dix ans, Planck tenta en vain de dériver sa formule sans recourir à ce concept. Ces efforts infructueux confirmèrent cependant que le quantum était nécessaire et jouait un rôle fondamental en physique.

1.1.5 Le coup de génie d'Einstein

Lorsque Planck introduisit l'hypothèse du quantum, il supposa seulement que l'échange d'énergie entre la matière et le rayonnement se faisait par quantités discrètes, sans remettre en cause la nature continue du champ électromagnétique lui-même. C'est Einstein qui, en 1905, franchit le pas décisif en proposant que la lumière elle aussi soit quantifiée : elle serait composée de « quanta de lumière » – baptisés en 1926 « photons » par Gilbert N. Lewis. Cette idée permit d'expliquer directement l'effet photoélectrique et donna lieu au premier des cinq articles majeurs publiés par Einstein durant sa célèbre *Annus mirabilis* (« année des miracles »). Parmi ces cinq contributions, c'était d'ailleurs la seule qu'il considérait lui-même comme véritablement révolutionnaire. Elle lui valut également le prix Nobel de physique en 1921.

L'effet photoélectrique avait été découvert par hasard par Hertz en 1887, alors qu'il générait des ondes électromagnétiques et remarqua que la lumière ultraviolette favorisait l'émission d'étincelles électriques – que l'on reconnut plus tard comme des électrons. Bien qu'il décrivît les caractéristiques du phénomène, Hertz n'en perçut pas toute la portée. L'un de ses anciens assistants, Philipp Lenard, l'étudia de manière systématique en 1902 et mit en évidence une particularité déconcertante : l'énergie des électrons émis ne dépendait pas de l'intensité lumineuse, mais uniquement de sa fréquence. Ce résultat contredisait la théorie électromagnétique classique.

Einstein comprit que la quantification du champ lumineux résolvait naturellement ce paradoxe. Cependant, l'idée que la lumière puisse

être à la fois une onde et un flux de particules heurtait les conceptions établies depuis les travaux de Christiaan Huygens, Young et Fresnel, qui avaient définitivement invalidé une précédente théorie, la théorie corpusculaire de Newton.

L'opposition à la théorie des quanta de lumière fut incarnée par Robert Andrews Millikan, qui se lança dans une série d'expériences pour la réfuter... et la confirma malgré lui ! En dépit de ses propres résultats, qui lui valurent le prix Nobel en 1923, Millikan, comme beaucoup d'autres, rejeta longtemps l'interprétation quantique. Ce n'est qu'après le prix Nobel d'Einstein en 1921 et les expériences d'Arthur Compton en 1923 sur la diffusion des rayons X que la dualité onde-particule de la lumière fut universellement acceptée. Restait une question : cette dualité était-elle spécifique à la lumière ? C'est à un jeune aristocrate français, Louis Victor de Broglie, que revint l'honneur de répondre à cette question.

1.1.6 Un aristocrate français

Louis Victor de Broglie (1892-1987), septième duc de Broglie et physicien français, fut professeur à la Sorbonne de 1928 à 1962. Il reçut le prix Nobel de physique en 1929 pour sa découverte de la nature ondulatoire de l'électron et ses contributions à la théorie quantique.

La famille de Broglie, illustre lignée aristocratique française, a donné à l'histoire de nombreux maréchaux, ministres et hauts fonctionnaires. Louis de Broglie était le plus jeune des quatre membres de sa fratrie. Sous l'influence de son frère aîné Maurice, il commença à développer un goût prononcé pour la physique.

À cette époque, Niels Henrik David Bohr avait déjà appliqué le concept de quantification à l'atome, dans le but de résoudre le problème de la stabilité du modèle atomique de Rutherford. La solution de Bohr postulait que les électrons, dans certains états spécifiques, n'émettent pas d'énergie et restent ainsi stables. Cette hypothèse ne pouvait cependant être expliquée par aucune théorie physique établie.

Fervent admirateur d'Einstein, le jeune de Broglie avait adopté la théorie des quanta de lumière avant même que sa confirmation expérimentale par Millikan et Compton. En 1923, il comprit que la dualité onde-particule de la lumière devait s'appliquer à la matière en général : si les ondes pouvaient se comporter comme des particules, pourquoi les particules ne pourraient-elles pas se comporter comme des ondes ? Il découvrit ensuite qu'en associant une longueur d'onde à chaque électron – en considérant l'électron comme une onde –, on pouvait, grâce aux conditions de résonance des ondes stationnaires, déterminer les orbites quantifiées des électrons dans l'atome, telles que Bohr les avait postulées. Si cette hypothèse était juste, il restait une question : comment déterminer cette longueur d'onde de l'électron ? De Broglie, également adepte de la théorie de la relativité restreinte d'Einstein, utilisa l'équation masse-énergie ($E=mc^2$) pour établir un lien entre la masse de l'électron et sa longueur d'onde. Cette « onde de matière » fut par la suite nommée *onde de de Broglie*.

De Broglie résuma ses idées dans trois courts articles publiés dans les *Comptes Rendus* de l'Académie des sciences française. L'année suivante, en 1924, il approfondit ses réflexions en faisant des ondes de matière le sujet de sa thèse de doctorat. Bien qu'il l'ait finalement soutenue avec succès, les membres du jury ne cachèrent pas au début leur scepticisme, considérant l'onde de matière comme un simple artifice mathématique. Néanmoins, après avoir lu la thèse que Paul Langevin lui avait transmise, Einstein déclara qu'elle avait « levé un coin du grand voile ». Cet éloge joua un rôle décisif dans son acceptation et attira l'attention sur les idées de de Broglie. À juste titre, sa thèse est considérée comme l'une des plus brillantes de l'histoire. Grâce à elle, il reçut le prix Nobel de physique en 1929, devenant ainsi le premier des lauréats à être récompensé pour un travail de doctorat.

Mais, demandèrent les membres du jury, si l'électron était une onde, comment l'observer ? De Broglie prédit alors qu'un faisceau d'électrons traversant une petite ouverture produirait un phénomène

de diffraction observable, pourvu que cette ouverture soit suffisamment étroite. Effectivement, deux ans plus tard, Clinton Joseph Davisson, scientifique de la Western Electric Company (les futurs célèbres Bell Labs), observa une diffraction d'électrons dans un cristal – sans toutefois sur le coup en comprendre l'origine. Ce n'est qu'après avoir assisté à une conférence en Angleterre qu'il prit connaissance des ondes de de Broglie et comprit que son observation correspondait probablement à ce phénomène. De retour aux États-Unis, Davisson étudia tant bien que mal la théorie de de Broglie, encore peu accessible à l'époque, et confirma en 1927 qu'il avait bien observé des ondes de matière. Pour cette découverte, il reçut le prix Nobel de physique en 1937, partagé avec George Paget Thomson, qui avait également obtenu en Angleterre des figures de diffraction électronique identiques à celles des ondes lumineuses. Leurs expériences prouvèrent définitivement l'existence des ondes de de Broglie. Petit clin d'œil de l'histoire, le père de Thomson, J.J. Thomson, avait lui-même reçu le prix Nobel en 1906 pour la découverte de l'électron, liant ainsi à jamais le nom des Thomson à cette particule.

1.1.7 La mécanique matricielle de Heisenberg

Face au comportement déroutant du monde de l'infiniment petit, il fallait bâtir une théorie fondamentale, un rôle historique qui échut à Werner Heisenberg et Erwin Schrödinger.

Werner Heisenberg (1901-1976), physicien allemand, est l'un des fondateurs de la mécanique quantique et un membre emblématique de l'école de Copenhague. En 1932, il reçut le prix Nobel de physique « pour la création de la mécanique quantique, dont l'application a mené, entre autres, à la découverte des formes allotropiques de l'hydrogène ». Parmi ses contributions majeures à la physique figurent la formulation matricielle de la mécanique quantique (mécanique matricielle) et l'énoncé du principe d'incertitude. Son ouvrage *Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie* (« Les principes physiques de la théorie des quanta ») reste un texte fondamental de la physique quantique.

Heisenberg naquit en 1901 à Würzburg, en Bavière, alors que Planck avait déjà introduit le concept de quantum. Manifestant très tôt des talents exceptionnels en mathématiques et en physique, Heisenberg étudia au sein du « triangle d'or » de la recherche que constituaient alors les villes de Munich, Göttingen et Copenhague. Dès l'âge de 18 ans, il participa au séminaire d'Arnold Sommerfeld, un pionnier de la physique quantique à Munich et ami de son père. Comme Heisenberg le raconta plus tard, c'est dans le groupe de Sommerfeld qu'il acquit un état d'esprit optimiste et qu'il rencontra son futur ami et collaborateur scientifique de toujours, Wolfgang Ernst Pauli⁴. C'est d'ailleurs sous l'influence de ce dernier qu'il choisit le domaine quantique comme objet de recherche. Après son doctorat obtenu en 1922, Heisenberg devint l'assistant de Max Born à Göttingen. Selon Heisenberg lui-même, c'est là qu'il « apprit les mathématiques ». Il décrocha ensuite une bourse pour travailler avec Bohr à Copenhague, un séjour crucial pour son développement intellectuel. Heisenberg déclara y avoir cette fois « appris la physique » et tissé avec Bohr une relation quasi paternelle.

En 1925, Heisenberg retourna à Göttingen. Bloqué dans l'étude des raies spectrales de l'atome d'hydrogène, il décida d'adopter une nouvelle approche, en tentant d'établir un modèle de la dynamique atomique à partir des seules quantités effectivement observables. À cette fin, il commença à utiliser des tableaux plutôt que de simples nombres pour représenter des grandeurs physiques. Poursuivant cette idée, lors de vacances sur l'île d'Heligoland en mer du Nord durant l'été 1925, Heisenberg, alors âgé de 24 ans, fit une percée décisive. Il découvrit qu'en appliquant certaines règles opératoires à ces tableaux, il pouvait retrouver les résultats du modèle de Bohr. Mais que représentaient ces tableaux à l'efficacité redoutable ? Born

4. Physicien autrichien célèbre pour le principe d'exclusion entre autres travaux, réputé pour sa perspicacité profonde et ses remarques acerbes, Pauli était surnommé « la conscience de la mécanique quantique » et « le fouet de Dieu ». Ses critiques constructives sur les travaux de Heisenberg ont grandement contribué au développement de la physique quantique.

fut le premier à les identifier comme des *matrices*, des objets abstraits connus par ailleurs en mathématiques. Sur cette base, Heisenberg, Born et Jordan construisirent ensemble un tout nouveau système de mécanique quantique, la *mécanique matricielle*. Grâce à elle, ils purent non seulement expliquer des phénomènes physiques liés à l'atome d'hydrogène (que le modèle de Bohr avec ses hypothèses de quantification avait déjà partiellement éclaircis), mais aussi prédire des phénomènes inédits pour l'atome d'hélium (où les postulats de Bohr échouaient). Et c'est ainsi que le majestueux édifice de la physique quantique commença à se dessiner. Ces travaux valurent à Heisenberg le prix Nobel de physique en 1932.

Les physiciens de l'époque, cependant, connaissaient peu les abstraites matrices employées par Heisenberg et aspiraient à une théorie plus familière. Six mois plus tard, l'équation d'onde découverte par Schrödinger allait combler leurs vœux.

1.1.8 La mécanique ondulatoire de Schrödinger

Erwin Schrödinger (1887-1961), né à Vienne en Autriche, formula en 1926 l'équation de Schrödinger, posant ainsi les bases mathématiques essentielles de la physique quantique. Il est également connu pour avoir imaginé l'expérience de pensée du « chat de Schrödinger », visant à démontrer les limites de l'interprétation quantique dans le monde macroscopique. En 1933, il reçut le prix Nobel de physique, conjointement avec le physicien britannique Paul Dirac, pour « la découverte de nouvelles formes productives de la théorie atomique ».

Erwin Schrödinger commença à s'intéresser à la mécanique quantique et à la mécanique statistique relativement tard, à l'âge de 36 ans. Plutôt que d'étudier les problématiques en vogue comme celle des raies spectrales atomiques, Schrödinger porta son attention sur la théorie de Louis de Broglie – en vertu de laquelle toute particule de matière devait être associée à une onde et possédait donc un caractère continu. Pendant les fêtes de la Noël 1925, alors qu'il séjournait

dans les Alpes, Schrödinger fut saisi d'une illumination : en partant de l'équation dite de *Hamilton-Jacobi* en mécanique classique et en utilisant le calcul des variations combiné à la formule de de Broglie, il obtint une équation d'onde décrivant l'évolution d'une particule massive non relativiste, la fameuse *équation de Schrödinger*. Cette équation permettait d'obtenir naturellement les niveaux de quantification, ce qui conduisit Schrödinger à intituler son article historique « *Quantisierung als Eigenwertproblem* » (« La quantification comme problème aux valeurs propres »). Dans une série de travaux publiés en 1926, il démontra comment son équation d'onde pouvait résoudre de nombreux problèmes de physique atomique.

À l'exception notable des partisans de la mécanique matricielle menés par Heisenberg, l'apparition de l'équation de Schrödinger fut accueillie avec enthousiasme par la communauté scientifique. Einstein qualifia l'idée de fruit « d'un véritable génie », Planck y reconnut un travail d'une portée historique, et Born lui-même finit par changer de camp, considérant désormais la mécanique ondulatoire comme la plus profonde des théories quantiques.

Les physiciens, désormais en terrain familier avec cette équation d'onde, purent enfin respirer : plus besoin de s'arracher les cheveux en manipulant d'obscur matrices ! Mais une question cruciale demeurait : quel lien unissait ces deux formulations en apparence si différentes ? La théorie de Heisenberg se fondait sur le caractère discret des particules – et les opérations sur les matrices semblaient être une trouvaille aussi géniale qu'énigmatique. Celle de Schrödinger, au contraire, baignait dans la continuité ondulatoire, offrant une transition plus naturelle vers la mécanique classique et une approche conceptuellement plus accessible.

Peu après, Schrödinger, Pauli et Jordan démontrèrent chacun de leur côté l'équivalence mathématique complète des deux théories⁵.

5. Des éléments de rigueur supplémentaire ont été apportés plus tard par John von Neumann dans ses *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics* (« Les fondements mathématiques de la mécanique quantique »).

Pourtant, cette unification formelle ne résolvait pas le débat fondamental : Heisenberg partait de la nature corpusculaire de la matière, tandis que Schrödinger postulait d'abord son aspect ondulatoire. La question « onde ou particule ? » fut au cœur d'une controverse acharnée, chaque camp étant convaincu de détenir la clé de la nature ultime de la réalité physique.

1.1.9 La controverse autour de la fonction d'onde

Si l'équation de Schrödinger a été plus facilement acceptée par les physiciens que la mécanique matricielle de Heisenberg, la question de la signification physique de sa solution, la fonction d'onde, suscitait en revanche de vives interrogations. Conformément à la théorie des ondes de matière de de Broglie, Schrödinger voyait la fonction d'onde comme une vibration réelle de l'électron. Dans sa vision, en effet, il n'existait pas de sauts quantiques discontinus entre niveaux d'énergie à l'intérieur de l'atome, mais seulement des transitions douces et continues d'un état stationnaire à un autre. Le rayonnement n'était, selon lui, que le produit de phénomènes de résonance. Il pensait également que l'électron n'existait pas en tant que particule individuelle, mais comme un paquet d'ondes résultant de la superposition de plusieurs ondes de résonance. Par son caractère continu, causal et déterministe, la vision de Schrödinger reflétait donc celle de la physique classique.

Cette conception idéalisée se révéla toutefois incompatible avec la fonction d'onde décrite par son équation. D'abord parce que la solution de l'équation de Schrödinger est une fonction complexe, qui n'est pas directement une grandeur physique observable ; elle ne peut donc pas représenter une « vibration réelle » de l'électron. Ensuite parce que l'interprétation de l'électron comme paquet d'ondes posait problème en raison de la dispersion du paquet d'ondes et ne permettait pas d'expliquer l'effet Compton ou encore l'origine de la charge de l'électron.

Max Born, le chef de file de la recherche à Göttingen, proposa donc une interprétation radicalement différente de cette fonction d'onde. Comme indiqué plus tôt, il avait, avec Heisenberg et Jordan,

développé la mécanique matricielle dans une vision corpusculaire, c'est-à-dire discontinue, du monde de l'infiniment petit. Tout en acceptant la forme de l'équation de Schrödinger, représentative d'un monde continu, Born ne pouvait abandonner des concepts aussi fondamentaux que les particules et les sauts quantiques. Il devait concilier les deux visions, c'est-à-dire « sauver » le concept de particule à partir de la fonction d'onde de Schrödinger. Et contre toute attente, il y parvint.

En décembre 1926, il publia dans la *Zeitschrift für Physik* (« Journal de physique ») deux articles fondateurs, tous deux intitulés « Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge » (« Sur la mécanique quantique des processus de collision »), qui, bien plus tard, lui valurent le prix Nobel de physique en 1954. Born y introduisait la notion cruciale de probabilité. Dans cette perspective, la fonction d'onde de Schrödinger ne représentait pas directement une réalité physique, mais son module au carré exprimait une probabilité : celle de trouver une particule dans un état ou un lieu donné.

Max Born (1882-1970) est un physicien et mathématicien allemand qui a joué un rôle crucial dans le développement de la mécanique quantique, tout en apportant des contributions significatives à la physique du solide et à l'optique. Dans les années 1920 et 1930, il forma également de nombreux physiciens renommés. En 1954, Born reçut le prix Nobel de physique pour ses recherches fondamentales en mécanique quantique, et notamment pour son interprétation statistique de la fonction d'onde.

I.2 LA DUALITÉ ONDE-PARTICULE

I.2.1 L'expérience des fentes de Young

Comment l'interprétation de Born parvient-elle à concilier les aspects ondulatoire et corpusculaire des particules du monde de l'infiniment petit ? Partons de l'exemple classique de l'expérience des fentes de Young (voir Figure 1-2).

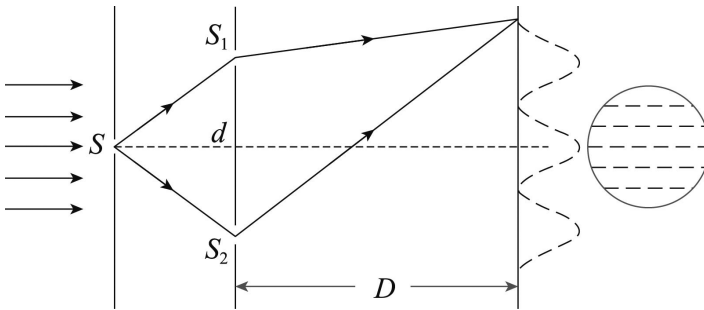


Figure 1-2 | Expérience des fentes de Young.

Dans cette expérience, un premier écran est percé de deux fentes parallèles très proches l'une de l'autre, derrière lequel est situé, à une distance beaucoup plus grande, un écran photosensible. Dans le cadre classique, lorsqu'un faisceau lumineux éclaire le premier écran, des franges d'interférence apparaissent sur le second. Ce phénomène s'explique par le principe de Huygens et a joué un rôle décisif dans la victoire de la théorie ondulatoire de la lumière face à la théorie corpusculaire lors d'une première grande controverse au XIX^{e} siècle. Si l'on réduit maintenant l'intensité lumineuse jusqu'à envoyer des photons un par un, exploitant ainsi leur caractère corpusculaire, la nature quantique de la lumière entre alors en jeu. Mais comment se manifeste son aspect ondulatoire ? Lorsqu'un photon passe à travers les doubles fentes et atteint l'écran photosensible, celui-ci enregistre sa position. Si le photon manifestait uniquement un caractère corpusculaire, il ne pourrait passer que par une seule fente à la fois, formant deux pics correspondant aux fentes sur l'écran, sans aucune frange d'interférence. En revanche, si le photon manifeste aussi un caractère ondulatoire, il se comporte comme une onde passant par les deux fentes simultanément et forme un motif d'interférence, ce que l'on observe effectivement.

Selon l'interprétation de Born, un photon unique est toujours détecté à un endroit précis de l'écran, ce qui exprime sa nature corpusculaire, mais sa probabilité d'apparition à un endroit donné dépend de l'intensité de l'interférence de l'onde à ce point, ce qui reflète sa

nature ondulatoire. Autrement dit, lorsque les photons traversent les fentes un par un, leur répartition sur l'écran finit par reproduire le motif d'interférence propre aux ondes.

L'interprétation probabiliste de Born réconcilie ainsi la dualité onde-corpuscule et contourne la difficulté posée par la nature complexe de la fonction d'onde. Cependant, ce compromis implique l'abandon du déterminisme et de la causalité classiques, ce qui a alimenté les débats déjà vifs autour de la mécanique quantique. Même Einstein rejetait l'idée que « Dieu joue aux dés » pour déterminer les lois physiques. Bien que l'interprétation de Born unifie avec élégance les dualités quantiques, beaucoup n'y voient qu'un pis-aller mathématique, non une explication physique véritable. Pourquoi la certitude classique s'efface-t-elle ? Est-ce une limite de notre connaissance, ou une propriété intrinsèque du monde de l'infiniment petit ?

1.2.2 Le principe d'incertitude de Heisenberg

Tandis que Born ébranlait ainsi le déterminisme classique, Heisenberg, à Copenhague, cherchait à donner un sens physique à sa mécanique matricielle, qu'il préférait à l'approche ondulatoire développée par Schrödinger. En février 1927, alors qu'il réfléchissait aux trajectoires des électrons dans une chambre à brouillard, il se demanda si la mécanique quantique imposait une limite aux types de grandeurs physiques que l'on peut mesurer en même temps. Peut-on déterminer simultanément la position et la vitesse d'un électron ? Il découvrit que non : si l'on mesure précisément la position d'un électron, sa vitesse devient indéterminée, et inversement.

Heisenberg établit alors une relation entre certaines grandeurs physiques qui ne peuvent être mesurées simultanément avec précision. Dans sa mécanique matricielle, ces grandeurs sont représentées par des matrices : lorsque deux matrices ne commutent pas, leurs valeurs ne peuvent être connues avec exactitude au même moment. Ce résultat, aujourd'hui appelé le *principe d'incertitude de Heisenberg*, fut publié en mars 1927 dans le *Zeitschrift für Physik* (« Journal de physique ») et marqua la mort du déterminisme classique.

1.2.3 Le principe de complémentarité de Bohr

Alors que Heisenberg, suivant Born, renonçait au déterminisme, Bohr s'interrogeait sur la coexistence des aspects ondulatoire et corpusculaire. Si ces deux aspects sont solidement établis, tant par la théorie que par l'expérience, sur quel fondement philosophique peut-on les concilier ? En février 1927, alors que Heisenberg formulait son principe d'incertitude, Bohr, en vacances en Norvège, conçut l'idée du principe de complémentarité. Selon celui-ci, la nature ondulatoire et la nature corpusculaire sont comme les deux faces d'une même pièce : un système quantique ne peut manifester qu'un seul de ces deux aspects à la fois. Ils s'excluent mutuellement dans l'observation, mais se complètent conceptuellement. Bohr considérait même que la complémentarité constituait un cadre théorique nécessaire, mais jusque-là négligé, de la mécanique quantique. Dans cette perspective, le principe d'incertitude découle du fait que les grandeurs impliquées expriment l'une la nature corpusculaire, l'autre la nature ondulatoire.

Après de nombreuses révisions, Bohr présenta sa théorie en septembre 1927 lors d'un congrès international de physique qui se tenait à Côme, en Italie. Il y développa ses idées sur la complémentarité, le rôle de la mesure en mécanique quantique et y intégra les apports de Born et Heisenberg. Cette contribution est un apport majeur à la façon de voir la physique quantique que l'on appelle encore aujourd'hui l'*interprétation de Copenhague* (ou *école de Copenhague*).

1.2.4 L'expérience de choix retardé de Wheeler

Mais si le principe de complémentarité permet de concilier l'aspect ondulatoire des particules, issu de la théorie de Schrödinger, et leur aspect corpusculaire, issu de la mécanique matricielle de Heisenberg, une question essentielle demeure : quand une particule choisit-elle son aspect ? Et ses deux aspects sont-ils vraiment irréconciliables ? C'est au physicien américain John Archibald Wheeler, élève de Bohr, qu'il revint de pousser plus loin cette réflexion.

John Archibald Wheeler (1911-2008), l'un des physiciens américains majeurs du xx^e siècle, élucida avec Bohr le mécanisme de la fission nucléaire en 1939 et participa ensuite au projet Manhattan, puis à la conception de la bombe à hydrogène. Auteur du monumental *Gravitation* (avec Charles W. Misner et Kip S. Thorne), il fut aussi l'un des pionniers de la décohérence quantique aux côtés de Wojciech Żurek. Comme Bohr, il forma une génération brillante de physiciens, parmi lesquels Richard Feynman et Hugh Everett.

Son expérience de pensée la plus célèbre, celle du choix retardé, proposée en 1979 lors du centenaire d'Einstein, prolongeait la vision de Copenhague : selon lui, « aucun phénomène n'est réel tant qu'il n'a pas été observé », et même « le passé n'existe pas s'il n'est pas enregistré dans le présent ».

Richard Feynman (1918-1988) était un physicien théoricien américain, l'un des fondateurs de l'électrodynamique quantique et considéré comme le père des nanotechnologies. Les diagrammes de Feynman, les règles de Feynman et les méthodes de renormalisation qu'il a proposées ou perfectionnées sont des outils essentiels pour l'étude de l'électrodynamique quantique et de la physique des particules.

Son directeur de thèse fut John Archibald Wheeler, alors jeune chercheur à l'Université de Princeton.

En 1965, Feynman reçut le prix Nobel de physique, conjointement avec Julian Schwinger et Shin'ichirō Tomonaga, pour leurs contributions à l'électrodynamique quantique.

Selon l'interprétation de Copenhague, le choix du caractère corpusculaire ou ondulatoire que manifeste un électron revient à la nature de l'appareil de mesure. Dans l'expérience des deux fentes de Young, par exemple, si l'on mesure par quelle fente passe l'électron, celui-ci adopte un comportement de particule ; en revanche, si l'on mesure directement l'impact sur l'écran situé à l'arrière, l'électron adopte une nature ondulatoire.