

JIM BAGGOTT/JOHN HEILBRON

Traduction de
GUILLAUME MERLE

Préface de
Franck Laloë

L'ODYSSÉE QUANTIQUE

De la controverse entre
Einstein et Bohr
à l'énigme de
l'intrication

DBS

JIM BAGGOTT / JOHN L. HEILBRON

Traduction de
GUILLAUME MERLE

Préface de
Franck Laloë

L'ODYSSÉE QUANTIQUE

De la controverse entre
Einstein et Bohr
à l'énigme de
l'intrication

DBS

Édition originale

Quantum Drama © Jim Baggott and John L. Heilbron, 2024, Oxford University Press.

Quantum Drama, was originally published in English in 2024. This translation is published by arrangement with Oxford University Press. De Boeck Supérieur is solely responsible for this translation from the original work and Oxford University Press shall have no liability for any errors, omissions or inaccuracies or ambiguities in such translation or for any losses caused by reliance thereon.

L'Odyssée quantique, a été initialement publié en anglais en 2024. Cette traduction est publiée en accord avec Oxford University Press. De Boeck Supérieur est seul responsable de cette traduction de l'œuvre originale et Oxford University Press n'est pas responsable des erreurs, omissions, inexactitudes ou ambiguïtés dans cette traduction ou des pertes causées par le recours à celle-ci.

© De Boeck Supérieur s.a.,
Rue du Bosquet, 7 - B-1348 Louvain-la-Neuve

Tous droits réservés pour tous pays.

Il est interdit, sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, de reproduire (notamment par photocopie) partiellement ou totalement le présent ouvrage, de le stocker dans une banque de données ou de le communiquer au public, sous quelque forme et de quelque manière que ce soit.

Dépôt légal :

Bibliothèque Nationale, Paris : mai 2025

ISBN : 978-2-8073-6884-2

Bibliothèque royale de Belgique, Bruxelles : 2025/13647/062

Pour Latha

Table des matières

À propos des auteurs	7
Préface	9
Prologue	11
 I De la correspondance à la complémentarité	 19
Une admiration mutuelle	21
D'honorables funérailles	35
De nouvelles manières de calculer	45
De nouvelles manières de penser	57
 II De l'incertitude à l'orthodoxie	 67
Des conceptions incompatibles	69
Mesure et impossibilité	81
EPR, Faust et le chat	89
Les missionnaires de l'esprit de Copenhague	107
 III De l'orthodoxie à l'incertitude	 121
Les hostilités d'après-guerre	123
Escarmouches à Princeton	137

Un déviationnisme juvénile	147
La transmission du flambeau	155
 IV Des inégalités productives	 169
Le théorème de John S. Bell	171
Les tests de Bell	185
Pendant que les photons dansent	201
Aventures dans l'information quantique	215
Où couper ? Quelle direction prendre ?	231
 Épilogue	 245
 <i>Remerciements</i>	 251
<i>Crédits pour les figures et les photographies</i>	253
<i>Notes de fin de texte</i>	255
<i>Sources</i>	283
<i>Index</i>	313

À propos des auteurs

Jim Baggott est rédacteur scientifique indépendant. Il obtint une licence de chimie (1978) à l'université de Manchester et un doctorat (1981) à l'université d'Oxford. Il travailla comme chercheur de troisième cycle à l'université d'Oxford et à l'université Stanford en Californie, avant de retourner en Angleterre pour occuper un poste de professeur de chimie à l'université de Reading. Après cinq ans de vie universitaire, il décida de changer complètement de carrière et travailla dans l'industrie pétrolière pendant 11 ans avant de créer sa propre entreprise indépendante de conseil et de formation. Il s'intéresse à la science, à la philosophie et à l'histoire, et écrit sur ces sujets pendant le temps libre qu'il parvient à trouver. Il reçut la médaille Marlow de la Royal Society of Chemistry en 1989 et le prix Glaxo Science Writer en 1992. Son livre *Mass: The quest to understand matter from Greek atoms to quantum fields* remporta le Prix « Cosmos » pour la rédaction scientifique en 2020.

John L. Heilbron (1934-2023) était professeur d'histoire et vice-chancelier émérite de l'université de Californie à Berkeley, membre honoraire du Worcester College à Oxford, et parfois professeur invité à Cornell, à Yale, et à l'institut de technologie de Californie. Il obtint son Bachelor of Arts (1955) et son Master of Arts (1958) en physique et son doctorat (1964) en histoire à l'université de Californie à Berkeley. Ses travaux ont été récompensés par des prix de l'History of Science Society (médaille George-Sarton), de l'Académie internationale d'histoire des sciences (médaille Alexandre-Koyré), de la Royal Society of London (Wilkins Prize Lectureship), de l'université de Pise (Premio internazionale Galileo Galilei), et de la Société américaine de physique et de l'American Institute of Physics (prix Abraham-Pais) « pour ses études historiques novatrices et vastes, allant de l'utilisation des églises de la Renaissance pour l'astronomie à la mécanique quantique moderne, en passant par la science électrique des XVII^e et XVIII^e siècles ».

« Lors de la rencontre suivante avec Einstein... nos discussions
prirent une tournure assez odysséenne »

—*Niels Bohr*

Préface

Chacun connaît l'*Odyssée* ! Homère y relate en vingt-quatre chants le long voyage d'Ulysse, les nombreuses étapes périlleuses qu'il a dû traverser avant de retourner dans son île d'Ithaque, et enfin s'y établir de façon stable et heureuse. Or la mécanique quantique, pilier central dans nos connaissances scientifiques actuelles, est elle aussi passée par bien des étapes mouvantes, aux fondements logiques incertains. Ceci peut paraître bien surprenant pour la composante d'une science dite « exacte » ! C'est non pas en vingt-quatre, mais en quatre chants seulement (quatre grands chapitres), que le présent ouvrage nous décrit l'émergence de cette extraordinaire théorie telle que nous la connaissons. Le style est accessible à de nombreux lecteurs, car il se concentre sur les idées générales et non sur les aspects mathématiques. L'un des auteurs, John Heilbron, hélas tout récemment décédé, a pu rencontrer au cours de sa carrière un grand nombre des acteurs principaux de cette grande histoire scientifique ; il a accumulé des trésors d'informations, en particulier par la consultation de copies de lettres. Ainsi, en plus de l'évolution générale des idées, le présent livre contient une foule de petites informations amusantes et intéressantes qui sont un plaisir à lire, même pour celui qui comme moi pensait déjà avoir une certaine connaissance de cette période de l'histoire des sciences. On ne s'ennuie pas à cette lecture !

Le *premier chant* nous fait revivre la préhistoire de la mécanique quantique ; il passe bien sûr par l'atome de Bohr, la mécanique des matrices de Heisenberg, la théorie concurrente de Schrödinger avec son équation, ainsi que par les notions de dualité et de complémentarité chères à Bohr. L'intensité des discussions de l'époque, non seulement entre physiciens, mais aussi avec les philosophes, y apparaît clairement.

Le *deuxième chant* commence par relater le célèbre congrès Solvay de 1927. On y découvre en particulier qu'à cette époque Einstein avait déjà fait des calculs (non publiés) montrant la non-séparabilité quantique. Ce congrès a également vu la présentation de la théorie de l'onde pilote par de Broglie, les fameux échanges contradictoires entre Einstein et Bohr sur des expériences de pensée, les idées révolutionnaires de Heisenberg et Born, et bien d'autres. S'ensuit le congrès Solvay de 1930, le fameux argument d'Einstein, Podolsky et Rosen en 1935, l'inévitable chat de Schrödinger, ainsi que la contribution de von Neumann. Tous les éléments de la théorie « orthodoxe » sont alors en place.

Le *troisième chant* décrit la période consécutive à la fin de la Seconde Guerre mondiale, l'affrontement entre positions philosophiques diverses sur la mécanique quantique, mais aussi les problèmes moraux liés à la bombe nucléaire se mêlant aux difficultés politiques. Celles créées par le maccarthysme ont particulièrement et injustement affecté David Bohm, qui a cependant grandement développé et rénové la théorie de l'onde pilote en 1952.

Le *quatrième et dernier chant* démarre sur la contribution de Bell et de son fameux théorème de 1964, qui a depuis stimulé tant d'expériences. Il relate ensuite une autre

odyssée, le dur et long chemin suivi par John Clauser. Il est le premier à avoir réalisé les expériences montrant une violation quantique des inégalités de Bell, dans un contexte difficile où la plupart des physiciens étaient indifférents au sujet, parfois hostiles. Obtenir ce résultat, devenu historique, était d'autant plus remarquable que les motivations de Clauser étaient opposées : il espérait montrer que les inégalités ne seraient pas violées, mais dut se résoudre à conclure le contraire, alors même que toute imperfection expérimentale aurait pu aller dans le sens qu'il espérait. Le lecteur découvre ensuite un autre chemin difficile et remarquable, celui suivi par Alain Aspect, chemin qui devait aboutir à la réalisation de trois fameuses expériences magnifiques à l'Institut d'Optique d'Orsay. Est également soulignée la grande importance du colloque « thinkshop » (« atelier de réflexion ») d'Erice en 1976, organisé par Bell et d'Espagnat, et des multiples collaborations qu'il a permises plus tard. Enfin sont décrits les aspects contemporains du sujet, les applications à la cryptographie et au calcul quantiques, les concepts généraux d'intrication et de non-séparabilité, et la variété des positions fondamentales des physiciens actuels sur ce sujet. Ainsi s'achève cette belle odyssée, victorieuse en un sens, avec ses héros – mais nous menant à une situation où l'on n'a toujours pas vraiment l'impression de tout comprendre de la mécanique quantique.

Guillaume Merle nous propose une traduction en français à la fois fluide et précise, fort agréable à lire. De plus, comme certaines erreurs s'étaient glissées dans le texte en anglais (probablement du fait du décès prématuré de John Heilbron), il a pu les corriger dans des notes lorsque nécessaire. Je pense que le lecteur appréciera ce texte tout autant que cela a été le cas pour moi !

Franck Laloë

Prologue

Notre odyssée est un épisode d'une longue histoire. Elle est liée à la propension proprement humaine à diviser le monde en domaines définis par des règles et des attentes. De tels domaines, comme la religion et la physique, peuvent s'adapter à un large éventail d'expériences humaines. Ils peuvent également encourager les fondamentalistes à poursuivre l'objectif illusoire d'une théorie finale du tout appartenant au domaine. Leur objectif est la fermeture ; il s'agit d'offrir une preuve incontestable de la finalité et de déclarer qu'aucune alternative plausible n'est possible. Le théoricien américain Stephen Weinberg a clairement expliqué ce qui est en jeu : « Une théorie finale ne sera finale qu'en un seul sens : elle mettra fin à une certaine forme de science, l'ancienne recherche de ces principes qui ne peuvent être expliqués par des principes plus profonds »¹.

Mais la fermeture d'un domaine d'expérience régi par une théorie particulière suppose l'existence de critères permettant de déterminer sans ambiguïté si un fait ou une question relève de la compétence de cette théorie. Et comme le montre la longue histoire de la géométrie euclidienne, il n'est pas toujours facile d'en décider.

Le domaine de la géométrie plane euclidienne comprend toutes les figures qui peuvent être construites à l'aide d'une règle non graduée et d'un compas, et sa théorie dominante est exprimée par un ensemble d'axiomes supposés vrais, à partir desquels tout le reste peut être déduit. Les géomètres grecs déduisirent, entre autres, qu'il n'est possible de construire que quatre polygones réguliers fondamentaux. Ceux-ci possèdent 3 (triangle équilatéral), 4 (carré), 5 (pentagone) ou 15 côtés. Une infinité d'autres peuvent être construits par bissection continue des côtés de n'importe lequel des polygones fondamentaux. Dans cette optique, aucune construction conforme aux axiomes et au principe de la règle et du compas ne peut produire un autre polygone régulier. Et pourtant, seulement 2000 ans après Euclide, Carl Friedrich Gauss découvrit que des polygones réguliers fondamentaux possédant un nombre étrange de côtés, comme par exemple 17, sont théoriquement possibles.

À la même époque, de nombreux géomètres euclidiens croyaient à tort que les règles de leur science permettaient la construction d'un carré de même aire qu'un disque. Ils n'avaient pas les moyens de prouver l'impossibilité de la tâche. Il fallut deux millénaires pour montrer que π est un nombre transcendant (aucune algèbre ne permet de le calculer) et que la quadrature du cercle est impossible. Les mathématiciens ouvrirent le domaine longtemps fermé de la géométrie plane euclidienne pour admettre des polygones réguliers étranges et le refermèrent pour exclure la quadrature du cercle. Notre odyssée quantique est centrée sur la question de savoir si les phénomènes quantiques sont comme la quadrature du cercle ou comme des polygones réguliers étranges lorsqu'ils sont testés par les définitions fondamentales et les attentes de la physique « classique » que nos principaux héros, Niels Bohr et Albert Einstein, ont apprise à l'école. L'analogie avec la géométrie euclidienne n'est pas parfaite. La physique ne se

cantonne pas à des types idéaux limités arbitrairement et ne s'arrête pas pour prouver l'impossibilité d'une théorie avant d'en adopter une autre. Pourtant, nous pensons que l'analogie est valable. Ceux qui sont en désaccord, ceux qui, presque par obligation, résistent aux revendications de fermeture avancées par les fondamentalistes, ceux qui s'obstinent à chercher des polygones réguliers étranges peuvent précipiter d'importantes découvertes.

Les adeptes de la physique classique d'Isaac Newton déclarèrent qu'en réduisant les propriétés de la matière à la taille, à la forme et au mouvement, la physique rivale de René Descartes ne pouvait rendre compte de la gravité de manière satisfaisante. Les cartésiens répliquèrent en attribuant à Newton le concept d'une force gravitationnelle agissant à distance et en la rejetant comme non physique, incompréhensible et « occulte ». Newton accepta l'objection mais affirma qu'elle ne s'appliquait pas. « Le fait qu'un corps puisse agir sur un autre à distance dans le vide sans la médiation d'aucune autre chose par laquelle leur action ou leur force puisse être transmise de l'un à l'autre est pour moi une telle absurdité que je crois qu'aucun homme ayant en matière philosophique une faculté de penser compétente ne pourra jamais s'y laisser prendre »². Cependant, il ne proposa aucune autre explication : « Je n'ai pas été capable de découvrir la cause de ces propriétés de la gravité à partir des phénomènes, et je n'é mets aucune hypothèse ; car tout ce qui n'est pas déduit des phénomènes est une hypothèse, et les hypothèses, qu'elles soient métaphysiques ou mécaniques, n'ont pas leur place dans la philosophie expérimentale »³.

Le malaise lié à l'admission de forces non mécaniques et non locales dans la physique conduisit finalement à l'introduction de théories des champs qui incorporaient des éléments des deux systèmes précédents. En 1900, le président de la Société Française de Physique, lors de l'ouverture d'un congrès international de physique à Paris, put fièrement proclamer qu'une fois de plus, « l'esprit de Descartes plan[ait] sur la physique moderne »⁴. Dans notre odyssée, Einstein joue le rôle de Gauss cherchant des polygones réguliers étranges, de Descartes rejetant l'action à distance comme non physique et inintelligible, et de Newton excluant par définition certains types d'« hypothèses ». Bohr joue le rôle de l'euclidien déclarant la fermeture de son domaine et du newtonien acceptant d'admettre l'inintelligible et le non-intuitif en échange d'une explication quantitative cohérente des faits. Comme nous le verrons, l'instinct de rejet de l'action à distance motiva de nombreux épisodes de notre odyssée.

Les absurdités ou, comme Bohr préférait les appeler, les « irrationalités » abondèrent dans l'élaboration de la mécanique quantique et, pour de nombreux physiciens, dont Bohr et Einstein, dans le produit final. Le confort relatif de l'absurde et de l'ambiguïté a marqué le fossé qui les séparait. Bien qu'il n'ait jamais été résolu, leur désaccord donna lieu à des débats fructueux car ils ne perdirent jamais leur admiration mutuelle et partageaient la conviction que les physiciens ont le devoir de découvrir et d'énoncer les fondements de la philosophie naturelle. Leurs débats, considérés comme « philosophiques » (et donc sans intérêt) par de nombreux physiciens, n'ont pas abouti à des tests expérimentaux de leur vivant, mais leur approche du problème a fini par susciter une série de découvertes expérimentales extraordinaires.

Ces découvertes, qui permettent des applications pratiques telles que le chiffrement, la téléportation et l'informatique quantiques, eurent lieu un demi-siècle et non deux

millénaires après la déclaration, par l'école de Bohr, de la fermeture du domaine théorique concerné : la mécanique quantique. Le rythme de la science s'est accéléré depuis Euclide. Néanmoins, la vitesse à laquelle Bohr et son école ont cherché à clore la mécanique quantique, dans les deux ou trois années qui ont suivi les découvertes sur lesquelles ils fondaient leur opinion, est stupéfiante. Einstein et ses disciples s'opposèrent à leur renoncement trop rapide à la possibilité d'alternatives plus conformes à une intuition ancrée dans la physique classique. La question n'était pas de savoir si la lumière devait être représentée comme des ondes ou des particules, ou les atomes comme des systèmes solaires, mais de savoir si le monde microscopique pouvait être représenté. Avec suffisamment de temps et de talent, ne serait-il pas possible de montrer que le prétendu échec de la causalité stricte dans le monde microscopique était aussi erroné que l'exclusion d'un polygone régulier à 17 côtés de la géométrie euclidienne ? Pourquoi la décision de clore des questions aussi fondamentales fut-elle si rapide ? Pourquoi l'opposition fut-elle si inefficace ?

Pour répondre, nous devons invoquer non seulement l'état de la science, mais aussi les engagements sociaux et culturels et les motivations psychologiques des participants. La Première Guerre mondiale marqua un tournant pour la physique comme pour d'autres activités culturelles de haut niveau en Europe occidentale. Elle sépara les créateurs de la physique quantique, qui resteraient proches des idées classiques, des créateurs de la mécanique quantique qui, à quelques exceptions facilement explicables, commencèrent leur carrière avec l'esprit plein d'idées quantiques. La première génération grandit entre la guerre franco-prussienne de 1870 et la Première Guerre mondiale, une ère de paix relative, de stabilité, de confiance, de sécurité, et de complaisance associée à l'ère victorienne. La deuxième génération commença sa carrière après avoir connu les angoisses et les pénuries de la guerre et une paix troublée, et tout en faisant face aux menaces que représentaient l'attrait politique croissant du fascisme et du communisme⁵.

La physique classique, qui met l'accent sur les modèles mécaniques ou picturaux, les principes globaux de la thermodynamique et les notions quotidiennes d'espace, de temps et de causalité, reflétait la stabilité politique et sociale de son apogée. La mécanique quantique, avec son rejet des normes associées au régime qui avait provoqué la guerre et l'accent mis sur le comportement incontrôlable, acausal et incertain du monde microscopique, s'accordait bien avec les incertitudes de son développement dans les années 1920 et 1930.

Dès 1900, les physiciens classiques avaient des raisons de s'inquiéter des fondations. Ils avaient les nouvelles découvertes expérimentales des rayons X, de la radioactivité et de l'électron à absorber, et leurs plus grandes réalisations théoriques, l'électrodynamique et la mécanique statistique, avaient rencontré de sérieux problèmes. Lord Kelvin, l'un des grands architectes de la physique classique, qualifia ces problèmes de « nuages » assombrissant l'avenir de la discipline. La même analogie fut invoquée par les commentateurs de la scène politique pour faire référence à la montée du socialisme et du nationalisme, ainsi qu'à la concurrence coloniale et commerciale, à l'intérieur des grandes puissances et entre ces dernières. Mais dans l'ensemble, l'état d'esprit des physiciens et de la société qui les soutenait à l'époque victorienne était optimiste et cosmopolite. Nous serions bien en peine de rendre compte d'une physique de la fin du

XIX^e siècle marquée par le doute et d'une physique des années 1920 marquée par la certitude.

Nombreux étaient ceux qui, parmi les inquiets, entretenaient l'idée que la physique visait non pas la vérité fondamentale des choses, mais seulement une description précise des phénomènes. Sans doute le « descriptionnisme », comme on peut appeler l'ensemble des philosophies instrumentalistes de la fin du siècle, n'était-il pas plus utile dans le travail quotidien des scientifiques à l'époque qu'il ne l'est aujourd'hui. Mais il était omniprésent dans les conférences et les essais généraux, comme le célèbre discours que le mathématicien et physicien Henri Poincaré prononça à l'ouverture du Congrès international de physique de 1900. Vous ne devriez pas vous croire au-dessus des bibliothécaires, déclara Poincaré à son auditoire étonnamment réceptif, car vos théories ne sont pas plus fondamentales que les principes d'un catalogue de bibliothèque et, comme lui, devraient être jugées en fonction de leur efficacité à accueillir les nouvelles acquisitions⁶. Le descriptiviste le plus influent pour ce qui nous concerne fut le physicien autrichien Ernst Mach, qui retint pendant un temps l'attention d'Einstein.

Mach enseignait que la science s'appuyait sur l'expérience sensorielle et la prédisait, et que la théorie ne devait pas tenter de faire plus que de relier l'entrée à la sortie. Dans sa version extrême, la physique de Mach dénigrait les modèles du monde, comme les atomes ou les éthers, et n'accordait aucune priorité à la mécanique. Tous les schémas réductionnistes, tous les systèmes qui renvoient l'expérience sensorielle aux activités d'hypothétiques particules submicroscopiques, étaient intrinsèquement trompeurs et incompatibles avec une science saine. Parmi ceux qui partageaient les critiques de Mach à l'égard de l'atomisme se trouvait le professeur de physique théorique de l'université de Berlin, Max Planck. C'est l'une des raisons pour lesquelles, au début du siècle, il travaillait sur un problème censé céder le pas aux équations combinées de la thermodynamique et de l'électrodynamique sans avoir recours aux théories atomiques.

Le problème concernait les propriétés d'un rayonnement maintenu à une température constante à l'intérieur d'un récipient cylindrique en porcelaine fermé à l'exception d'un petit trou. Cette construction en faisait une bonne approximation d'un « corps noir » idéal, capable d'absorber et d'émettre des rayonnements de toutes les fréquences. Le dispositif peut sembler obscur en théorie et loin d'être utile, mais il s'avéra toucher des questions fondamentales et avoir une application pratique dans l'industrie, alors nouvelle, de l'éclairage électrique. Lorsque le récipient est chauffé, son intérieur brille comme un four, rouge, orange, jaune vif ou blanc étincelant selon la température. Le problème de Planck était de trouver une « loi du rayonnement » décrivant la distribution des couleurs (l'intensité de l'énergie rayonnante à chaque fréquence) en fonction de la température et de la fréquence. Il ne parvint pas à en trouver une qui corresponde à l'expérience, jusqu'à ce qu'il fasse ce qui revenait à supposer que le rayonnement dans le récipient ne pouvait échanger de l'énergie avec ses parois que sous la forme de quantités discrètes ou *quanta* d'énergie, et que ces quantités autorisées devaient être proportionnelles à la fréquence du rayonnement participant à l'échange. En tant que théoricien, Planck chercha une théorie qui permettrait l'existence des quanta. Dans ce qu'il décrivit plus tard comme un acte de désespoir, il se tourna

vers des idées atomistes qui lui fournirent ce dont il avait besoin. Elles semblaient non seulement fonder sa théorie, mais lui permirent également de déduire des informations fiables sur la taille des atomes. Avec cette réalisation, Planck contribua à l'accumulation de preuves en faveur de l'atomisme, comme par exemple la radioactivité et le mouvement brownien, et à la vigoureuse discussion contemporaine sur son statut. Les physiciens devraient-ils considérer la théorie atomique comme un simple outil permettant de décrire un nombre croissant de phénomènes, ou comme une découverte de l'état réel, véritable et objectif de la matière? Les théories de la désintégration radioactive et les premiers succès du modèle nucléaire favorisaient l'atomisme. Les paradoxes du comportement des rayons X et des molécules de gaz favorisaient une physique de la description, voire des descriptions contraires. La théorie atomique était déjà confuse bien avant l'invention de la mécanique quantique.



Les deux premiers chants de notre odyssée sont centrés sur les questions soulevées lors des querelles entre Einstein et Bohr et leurs principaux partisans. Le chant I couvre la génération née avant 1900 et s'étend jusqu'à l'invention de la mécanique quantique en 1925/1926. Cette invention fut réalisée principalement par de jeunes hommes qui entamèrent leur carrière après la guerre catastrophique qui marqua un tournant en physique comme dans la plupart des autres secteurs de la haute culture européenne. Bohr et Einstein appartenaient à la génération précédente. Ils établirent les positions à partir desquelles ils entamèrent leur débat tout en apportant les contributions pour lesquelles ils reçurent le prix Nobel au début des années 1920.

Le chant II s'ouvre sur le débat suscité par l'invention de la mécanique quantique, à partir du cinquième congrès Solvay qui se tint à Bruxelles en 1927. Le chant se poursuit avec la consolidation de l'« esprit de Copenhague » (l'approche de l'école de Bohr) et se termine par l'effort de diffusion de ses idées en psychologie, en biologie et dans la pensée en général. La Guerre mondiale intervint ensuite à nouveau pour changer fondamentalement la situation. Avec la mobilisation et l'américanisation de la physique, l'intérêt pour les problèmes fondamentaux s'effondra. Des questions qui étaient d'une importance capitale pour Bohr et Einstein disparurent de l'ordre du jour.

Le débat fut relancé par l'opposition à l'esprit de Copenhague parmi les anticonformistes de Princeton, où Einstein vécut et travailla jusqu'à sa mort en 1955. À ce moment-là, quelques-uns de ses disciples de gauche relevèrent le défi de rouvrir la question supposée close de l'interprétation. Ils finirent par concevoir des expériences cruciales qui, comme certains d'entre eux l'avaient prévu, allaient donner tort à Bohr. C'est l'affaire du chant III, au cours duquel Bohr, en tant que porte-parole international de la science, fut occupé à d'autres choses. Il mourut en 1962, avant que les techniques permettant de réaliser les expériences cruciales n'aient été mises au point. Ces dernières, et les développements surprenants auxquels elles donnèrent lieu, occupent le chant IV.

L'entrée d'expérimentateurs dans notre odyssée précipita un changement d'orientation. Bien qu'ils soient ouvertement à la recherche d'une réponse à l'éternelle question de la fermeture, leurs efforts mirent en évidence un polygone quantique régulier étrange qui résidait, auparavant seulement entrevu, dans le domaine de la mécanique quantique. Il s'agit de l'intrication. La démonstration pratique de l'intrication sur de grandes distances favorisa de nouveaux développements technologiques qui pourraient transformer notre monde.

Les questions au cœur de notre débat quantique demeurent ouvertes. Les partisans de Bohr continuent de penser que la théorie quantique sous sa forme actuelle est définitive, et que le domaine de la mécanique quantique est clos. Les partisans d'Einstein continuent à chercher des preuves qui saperont la prétention à la finalité ou qui soutiendront un défi cartésien à l'action occulte à distance que l'intrication semble impliquer. Leur opposition, qui repose sur des idées contradictoires sur le but ultime de la science, a été fructueuse et source d'inspiration ; d'un « profond intérêt humain », même pour le bouledogue de Bohr, Léon Rosenfeld, qui n'avait que peu de sympathie pour Einstein⁷. C'est une erreur, commise dans de nombreux comptes-rendus du débat, académiques, populaires, passés ou récents, d'attribuer à l'un ou l'autre camp le mérite de suivre le seul droit chemin. Le mouvement était, et continue d'être, nécessairement en zigzag, dialectique, réciproque.

Galilée informa le monde que « [La physique] est écrite dans la langue des mathématiques et ses caractères sont des triangles, des cercles et d'autres figures géométriques, sans lesquels il est humainement impossible d'en comprendre le moindre mot ; sans eux, on erre dans un sombre labyrinthe »⁸. Et même avec eux. Les calculs du physicien commencent par traduire un problème du langage ordinaire en symboles, se poursuivent en manipulant les symboles selon l'algèbre applicable, et se terminent par la traduction des résultats en langage ordinaire pour la discussion ou l'expérimentation. Au cours de la manipulation, les symboles peuvent s'apparenter au langage ordinaire d'une manière nouvelle, non perçue par l'algébriste. Une façon de décrire les conséquences est la confusion. Une élucidation plus fructueuse attire l'attention sur le contenu polyvalent d'un symbole, qui n'est pas toujours présent à l'esprit de l'algébriste.

Un exemple simple est celui de la « fréquence ». Sa signification première, à savoir le nombre de récurrences en un temps donné, est familière, à la fois en termes de concept et de quantité, du fait des 440 impulsions d'air par seconde qui permettent à un orchestre de s'accorder. Le même concept s'applique à la lumière visible, bien que sa fréquence soit dix milliards de fois supérieure à celle du son et que l'« éther » censé transporter ses vibrations n'existe pas. Représenter les deux par le même symbole, ν , présente des risques évidents ainsi que la fécondité potentielle de l'ambiguïté. En voici deux exemples. La découverte et la clarification de l'ambiguïté de ν en tant que fréquence à laquelle un électron parcourt son orbite et de ν en tant que fréquence de la lumière ainsi générée furent fondamentales pour l'atome quantifié de Bohr. Et la contradiction non résolue entre ν en tant que fréquence de la lumière et ν en tant que mesure de l'énergie lumineuse fut fondamentale pour poser et élucider la « dualité onde-corpuscule ».

Nous donnons ces exemples pour souligner le pouvoir et annoncer les dangers des représentations symboliques qui, en fin de compte, doivent être traduites en langage ordinaire. Bohr exprima la situation plus parfaitement qu'il ne le pensait lorsque, substituant involontairement une métaphore danoise à un idiomme anglais, il déclara que nous sommes « accrochés au » (dans le sens de « dépendants du ») langage. Dans cette position inconfortable, les physiciens quantiques générèrent de nombreux paradoxes apparents, qui incitèrent Bohr à inventer sa doctrine, d'une grande portée et souvent contestée, de la complémentarité. Son principal opposant était Einstein.

Galilée n'avait qu'à moitié raison lorsqu'il déclara que personne ne peut comprendre le livre de la nature s'il ne peut en lire les symboles mathématiques. Nous pensons, comme Bohr et Einstein, que les concepts fondamentaux de la physique peuvent être compris sans en maîtriser l'argot. Tout ce qu'il faut, c'est l'attention nécessaire à l'acquisition d'idées non familières. Nous avons cependant utilisé quelques symboles mathématiques afin d'éviter les ambiguïtés et les circonlocutions, et l'histoire et la concision ont parfois nécessité une courte équation, comme $E = mc^2$. Ces symboles et ces équations appartiennent à la rhétorique de notre sujet, tout comme « ex nihilo nihil fit » (rien ne vient de rien) appartient à la philosophie, à la cosmologie et à la cuisine. Le symbole h (la constante de Planck) désigne une grandeur quantique ; des expressions telles que $E = h\nu$ et $\Delta q \Delta p \sim h$ expriment des constructions physiques, des relations mathématiques et des slogans qui sont le moteur de notre odyssée.

Dans l'espoir que cela puisse être utile à la compréhension de notre approche de cette odyssée, nous terminons ce prologue par quelques mots sur ce que chacun d'entre nous apporte à notre collaboration. La fascination de Jim Baggott pour la mécanique quantique, qui s'est éveillée alors qu'il était étudiant en 1975, a tourné à l'obsession une douzaine d'années plus tard, lorsqu'il a découvert qu'utiliser la mécanique quantique n'est en aucun cas synonyme de la comprendre. Il a écrit plusieurs livres sur ce sujet pour le grand public, le premier ayant été publié en 1992. Une rencontre avec John l'amena à proposer une collaboration sur *Quantum drama*. Nous avons décidé d'essayer d'écrire un livre qui rende compte des énigmes les plus profondes de ce sujet et qui humanise les personnes qui les ont créées et qui se sont battues avec elles.

John Heilbron eut la chance de participer, en tant qu'étudiant diplômé, à un projet visant à interviewer des physiciens actifs dans les premiers temps de la physique quantique et à recueillir et microfilmer leur correspondance. Il vécut à Copenhague en 1962/1963 et rencontra Bohr et d'autres physiciens associés aux interprétations dominantes de la physique quantique, parmi lesquels Werner Heisenberg, Pascual Jordan, Oskar Klein et Léon Rosenfeld. Après s'être immergé dans la science du début des temps modernes, il revint au XX^e siècle pour écrire une brève biographie de Bohr et, à la suggestion de Jim, pour collaborer à l'exploration de la suite de l'histoire de la physique quantique qu'il commença à étudier à Copenhague il y a 60 ans.

CHANT I

De la correspondance à la complémentarité

Une admiration mutuelle

L'Académie royale des sciences de Suède, qui décerne le prix Nobel de physique et de chimie, a agi avec prudence et neutralité durant la Première Guerre mondiale. Lorsqu'elle ne put pas mettre en balance un vainqueur des puissances alliées et un vainqueur des puissances centrales, elle ne rendit pas son jugement. D'après ses règles, si elle ne trouve pas de récipiendaire pour un prix différé au cours de l'année suivante, le prix disparaît et l'académie conserve le montant du prix. L'Académie récompensa deux Allemands durant la première année après la guerre : le prix de 1919 fut décerné à Johannes Stark pour une découverte expérimentale effectuée en 1913, et le prix réservé de 1918 fut décerné à Max Planck pour l'introduction des quanta en physique en 1900. Ils formaient un couple mal assorti. Planck était un fervent partisan du Juif libéral Einstein ; Stark allait devenir un nazi et un féroce opposant à la relativité et à la théorie quantique, la « physique juive » d'Einstein et de Bohr.

L'Académie aurait été étrangement insensible, n'eût-elle pas choisi quelqu'un du côté des Alliés pour le prix de physique de 1920. Son comité compétent choisit l'incarnation même de la science qu'il admirait. Il s'agissait de Charles Édouard Guillaume, le directeur français du Bureau international des poids et mesures, « pour ses mesures de précision ». Et pour 1921 ? Étonnamment, l'Académie ne parvint pas à trouver de récipiendaire digne du prix. Entre-temps, Einstein avait été nommé environ 45 fois au total par d'anciens belligérants des deux côtés et Bohr, citoyen du Danemark neutre, 9 fois.

En 1922, la pression devint trop forte pour être ignorée : Einstein reçut 17 nominations et Bohr, 11. L'Académie décerna le prix de 1922 à Bohr et le prix réservé de 1921 à Einstein. Dans la brève explication de leur choix d'Einstein, les juges de Stockholm révélèrent la résistance que nombre de physiciens éprouvaient alors encore au sujet de l'orientation de leur science. Ils dirent qu'Einstein méritait son prix « pour ses contributions à la physique théorique, spécialement pour sa découverte de la loi de l'effet photoélectrique ». Il s'agit de la libération d'électrons de la surface d'un métal sous l'action de la lumière. Pas un mot sur son invention de la relativité ou ses contributions fondamentales à la théorie quantique ; son mérite n'était qu'une équation, bien que l'on y retrouve la simplicité et la puissance de sa célèbre déclaration, $E = mc^2$.



L'équation qui valut à Einstein son prix, $T = h\nu$, indique que l'énergie du mouvement (l'énergie cinétique T) de l'électron libéré est proportionnelle à la fréquence ν de la lumière[†]. Le coefficient de proportionnalité, h , est la constante de Planck. Il s'agit

[†]. *N.d.T.* : cette équation, $T = h\nu$, contient une erreur typographique dans le texte anglais. L'équation proposée par Einstein est plutôt de la forme $T = h\nu - W$, où W , appelé *travail d'extraction*

d'un petit nombre, $6,6.10^{-34}$, dans le système d'unités utilisé actuellement en physique atomique. Sa présence faisait de l'équation d'Einstein bien plus qu'une simple loi empirique de l'effet photoélectrique. Il avait la même valeur que le « quantum d'action » que Planck avait été obligé d'inclure dans sa formulation de la loi du rayonnement du corps noir en décembre 1900. La loi d'Einstein était, comme la formule de Planck, impliquée dans les profonds mystères de la lumière.

Einstein avait déduit sa loi de l'hypothèse selon laquelle l'énergie à l'origine de l'effet photoélectrique se présentait sous forme de paquets de particules (des « quanta de lumière »), l'énergie de chaque paquet étant déterminée par la fréquence de la lumière selon $h\nu$. Cela revenait à réduire l'effet photoélectrique à un jeu de billes dans lequel le tireur (la lumière) possède une énergie mystérieusement proportionnelle à sa fréquence. Il eût été beaucoup plus raisonnable de supposer que l'énergie effective des quanta de lumière dépend de leur nombre et non de leur fréquence : un grand nombre de quanta devrait impliquer une forte intensité, et ainsi une énergie élevée, et ce indépendamment de leur fréquence. Mais seuls les quanta de lumière dont la fréquence dépasse un seuil caractéristique d'un métal délogeront ses électrons. Pas étonnant que le comité Nobel et la plupart des autres physiciens aient rejeté la théorie d'Einstein !

Le jeu de billes ne pouvait tout au plus représenter la lumière que dans son interaction avec l'électron, car chacun savait que la lumière se comporte comme une onde lorsqu'elle se propage dans l'espace, se faufile dans de petits trous, passe devant des arêtes vives, ou se reflète sur des nappes de pétrole. Dans ces différents cas, son signe distinctif était la « superposition », la propriété qu'ont les ondes qui se recouvrent à combiner leurs mouvements. La démonstration standard de cette propriété, à laquelle les physiciens ont si souvent fait appel au cours de l'élaboration de la théorie quantique qu'elle peut être considérée comme une héroïne de notre odyssée, date des environs de 1700, lorsque la théorie ondulatoire est entrée en concurrence avec les « rayons de lumière » particuliers de Newton. Cette démonstration ou, mieux, cette icône porte le nom d'« expérience de la double fente » et fut décrite pour la première fois par l'esprit universel anglais Thomas Young dans des conférences publiées en 1807¹.

Dans l'expérience de Young, de la lumière provenant d'une source ponctuelle située à gauche de l'écran (non représentée) passe à travers deux minuscules trous ou fentes étroites A et B qui servent de sources de lumière secondaires, comme illustré sur la figure 1(a), adaptée de *A course of lectures on natural philosophy and the mechanical arts*, de Young. Les deux faisceaux de lumière qu'ils produisent, qui se comportent comme des ondes, se superposent ou interfèrent en chaque point situé à droite de l'écran. Lorsque deux extrema du même type se superposent, l'amplitude de l'onde résultante est doublée et la lumière est vive ; lorsque deux extrema opposés se superposent, l'amplitude de l'onde résultante est réduite à zéro et la lumière s'éteint. La figure 1(b) montre une version moderne de l'expérience avec une figure d'interférence constituée d'une alternance de franges claires et sombres produites par les faisceaux

ou *travail de sortie*, correspond à l'énergie nécessaire pour extraire l'électron du métal et dépend de la configuration des atomes à la surface de ce dernier. Cette équation signifie donc qu'une partie de l'énergie fournie par la lumière est utilisée pour extraire l'électron du métal, et que l'énergie cinétique de l'électron libéré correspond au « surplus » d'énergie.

superposés sur un écran ou une plaque photographique parallèle au plan des deux fentes.

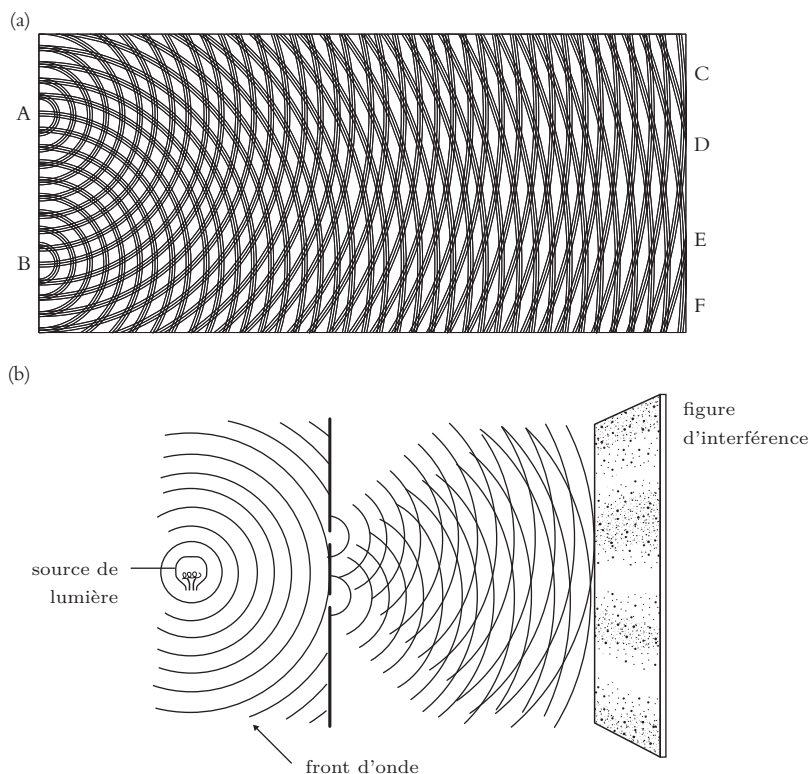


FIGURE 1 – (a) Description de Thomas Young de l'interférence à deux fentes, tirée de son ouvrage *A course of lectures on natural philosophy and the mechanical arts* [1807], Kelland, ed. (1845). Une lumière cohérente passant à travers deux trous ou fentes étroites aux points A et B interfère pour produire des franges aux points C à F. Ceci est illustré plus clairement sur (b).

Young observa que les deux fentes doivent être ouvertes pour produire les phénomènes d'interférences que nous venons de décrire. Si l'une d'elles est fermée, la lumière passant par l'autre produit une figure de « diffraction » sur l'écran due à la superposition des faisceaux se propageant depuis les bords de la fente. Il est cependant impossible de construire la figure d'interférence à deux fentes à partir de lumière diffractée tour à tour par une fente puis par l'autre, comme on pourrait s'y attendre si la lumière était un flot de particules. Une situation semblable se produit lorsque la lumière rencontre un obstacle minuscule. Les interférences qui se produisent derrière l'obstacle peuvent être éliminées en bloquant la lumière d'un seul côté de l'obstacle, « une expérience cruciale », comme le fit remarquer à juste titre l'un des défenseurs de Young². Grâce à

son principe de superposition, Young put expliquer tout ceci ainsi que des phénomènes plus compliqués tels que la couleur des plaques minces qui, comme il le dit lui-même, posait des « difficultés absolument insurmontables » à la théorie particulière³.

Même si, à la fin du XIX^e siècle, la théorie ondulatoire était capable d'expliquer toutes sortes de phénomènes optiques et électromagnétiques, elle allait se heurter à des difficultés qui, à leur tour, allaient s'avérer être insurmontables. Personne n'était parvenu à trouver une explication plausible à l'entité censée transporter les ondes. Puisque la lumière se propage dans le « vide », cette entité qui transporte la lumière (l'« éther luminifère ») ne pouvait pas être une substance matérielle comme l'air qui propage le son ou l'eau qui transporte les ondes. Young considérait la découverte de l'éther omniprésent comme plus importante que celle de la théorie ondulatoire qui y avait conduit, car elle représentait « un apport substantiel à notre compréhension du monde naturel, grâce à notre connaissance d'un milieu si puissant et si universel auquel la propagation de la lumière doit être attribuée »⁴.

Le milieu ne put assumer ses grandes responsabilités une fois la lumière devenue un phénomène électromagnétique, et Einstein se sentit obligé de l'éliminer de sa théorie de la relativité. Cela se passa en 1905, dans un article publié trois mois après son application du quantum de lumière à l'effet photoélectrique. Il y coupla ainsi la relativité et la théorie du rayonnement en éliminant l'éther des deux théories. Il était cependant beaucoup plus facile d'assécher l'éther que ses ondes, et Einstein n'insista pas. Son quantum de lumière n'était qu'une « hypothèse heuristique », utile là où il l'utilisait mais impuissante face aux nombreux phénomènes traités correctement par la théorie de la lumière de Young.

Lorsque les partisans d'Einstein présentèrent sa candidature à l'Académie des sciences de Berlin en 1913, ils se sentirent obligés de s'excuser pour son rejet insensé des ondes lumineuses. « Il ne faut pas trop lui reprocher le fait que ses spéculations dépassent parfois les bornes, à l'instar de son hypothèse des quanta de lumière »⁵. Bohr était l'un des plus fervents et des plus persistants opposants à son hypothèse. Il la condamna non seulement parce qu'elle ne pouvait pas expliquer les effets découlant de la « superposition », mais aussi pour des raisons de logique élémentaire. Le quantum de lumière se contredisait lui-même. Sa définition nécessitait une fréquence, dit Bohr, et la fréquence est un concept associé aux ondes.



Le prix Nobel fut décerné à Bohr « pour ses contributions à la recherche sur la structure des atomes et sur le rayonnement qu'ils émettent ». Cela pourrait suggérer que les recherches de Bohr recoupaient celles d'Einstein, puisqu'elles portaient toutes deux sur les interactions entre lumière et matière. Il n'en est rien. Bohr gagna ses lettres de noblesse en ignorant la nature physique du rayonnement. Il s'attacha à calculer les fréquences ou les couleurs de la lumière absorbée et émise par divers atomes, leurs « raies spectrales ». Dans le cas le plus simple, celui de l'atome d'hydrogène, le spectre d'un ensemble de ses fréquences d'émission discrètes couvrant le domaine

visible pouvait être exprimé par une simple formule empirique déduite en 1885 par un mathématicien numérologue du nom de Johann Balmer. Sa formule, écrite pour les fréquences (il utilisait les longueurs d'onde), est presque aussi simple que $T = h\nu$. Elle s'écrit $\nu_n = R \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right)$, où l'entier n prend des valeurs strictement supérieures à $2^\dagger$. Cela signifie que les fréquences des raies de la série Balmer croissent selon une progression simple jusqu'à atteindre un maximum de $\frac{1}{4}R$, où R est une constante.

Ce même R apparaissait dans des expressions similaires à celle de Balmer pour les séries spectrales d'autres éléments. De toute évidence, il s'agissait d'une grandeur importante indiquant, comme la constante de Planck h , quelque chose de plus profond qu'un nombre issu de l'expérience.

La structure fondamentale de l'atome de Bohr était un essaim d'électrons disposés en orbites circulaires concentriques autour d'un noyau central, à l'instar des particules des anneaux de Saturne ou, dans sa forme la plus simple, du système Terre-Lune. Bohr prit ce système « planétaire » comme modèle pour l'hydrogène, le plus simple de tous les atomes chimiques, constitué d'un noyau chargé positivement et d'un unique électron chargé négativement en orbite. Dans de tels systèmes, il existe une relation simple entre la distance r entre la lune et sa planète, ou entre la planète et son étoile centrale, et sa fréquence orbitale ω , « omega » en grec, le nombre de fois où la planète parcourt son orbite en une unité de temps. Cette relation, $\omega^2 \propto \frac{1}{r^3}$, est la troisième loi de Kepler sur le mouvement des planètes ($\propto$ signifie « est proportionnel(le) à »). Elle précède de deux siècles la théorie de la lumière de Young.

Pourquoi quiconque aurait-il dû être surpris que le modèle planétaire ne s'applique pas sans restriction au domaine atomique ? La gravité régit le système solaire, qui est mille milliards de milliards de fois plus grand qu'un atome, et permet aux planètes de circuler à n'importe quelle distance du Soleil, alors que tous les atomes d'un même élément ont une taille fixée dans leur état normal, qui est supposée être la même où qu'ils se trouvent dans l'univers (cette supposition a également un ancien pedigree : il s'agit d'une application de la troisième règle de raisonnement en philosophie de Newton⁶). Qu'est-ce qui fixe cette taille, en supposant que l'analogie partielle avec un système solaire tienne la route ? Bohr suggéra une relation quantique du type de celle d'Einstein et Planck : $T = \frac{1}{2}h\omega$, où T représente à nouveau l'énergie cinétique,

mais maintenant celle de l'électron en orbite, et non celle d'un électron délogé par son interaction avec la lumière.

On peut appeler une relation de ce type, qui contient la constante de Planck h , une « règle quantique » et une relation qui ne la contient pas, comme la troisième loi de

[†] *N.d.T.* : la formule de Balmer est à lire sous la forme $\nu_n = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ avec $m = 2$, et donne la fréquence ν_n des raies associées aux transitions d'un état excité n ($> m$) vers le premier état excité $m = 2$. Les raies associées aux transitions d'un état excité n ($> m$) vers l'état fondamental $m = 1$ (constituant la série Lyman) ont des fréquences qui sont trop loin dans le domaine ultraviolet pour être vues.

Kepler, une « règle classique ». Sur une orbite caractérisée par $T = \frac{1}{2}h\omega$ et la troisième loi de Kepler (un mélange embarrassant de règles quantique et classique), l'atome a une taille fixe mais, selon la théorie de Bohr, il ne peut pas communiquer avec le monde extérieur. Pour le faire « parler », c'est-à-dire absorber et émettre de la lumière, Bohr dut le doter d'états excités dans lesquels l'électron tourne sur des orbites plus grandes que celle de son état de plus basse énergie, appelé « état fondamental ». Bohr caractérisa ces orbites plus grandes par une généralisation simple, bien qu'arbitraire, de la relation de l'état fondamental : $T_n = \frac{1}{2}nh\omega_n$, où n est un entier et T_n et ω_n sont l'énergie cinétique et la fréquence orbitale de la n -ième orbite. Géométriquement, n mesure le diamètre de l'orbite circulaire ou le grand axe d'une orbite elliptique. Tôt ou tard, d'autres « nombres quantiques » allaient entrer en jeu, qui seraient associés à d'autres caractéristiques de l'orbite électronique, comme son excentricité.

Un électron décrivant une orbite définie par la généralisation $T_n = \frac{1}{2}nh\omega_n$ demeure muet tant qu'il reste sur la n -ième orbite. Son état, dans la terminologie de Bohr, est « stationnaire ». Bohr n'autorisa son atome à rompre le silence, c'est-à-dire à absorber ou émettre une onde lumineuse de fréquence ν , que par le biais d'une transition de son électron d'une orbite à une autre qui est abrupte et impossible à analyser. Un tel *saut quantique* deviendrait le symbole du modèle de Bohr, tout aussi déroutant et désagréable que le quantum de lumière d'Einstein.

Le processus d'émission de lumière de Bohr anticipait la raison d'être du prix Nobel d'Einstein car Bohr, tout comme les juges de Stockholm, fit appel à la formule des quanta de lumière tout en rejetant la théorie. Il supposa que l'énergie émise lors du saut valait $h\nu$, ν étant la fréquence ou la couleur de la lumière émise. Avec la relation postulée entre l'énergie cinétique T et la fréquence orbitale ω , la spécification que l'énergie émise vaut $h\nu$ avait une formidable et désagréable conséquence. Elle impliquait que la fréquence ν de la lumière émise n'est *pas* égale à la fréquence ω du mouvement électronique qui la produit. Cela violait une hypothèse de base de la théorie ondulatoire du rayonnement électromagnétique.

Il est utile de voir comment cette catastrophe se produisit pour comprendre la stratégie fondamentale de Bohr dans l'élaboration des principes physiques. Chaque saut quantique fait intervenir deux orbites et donc deux ω différents, mais ne donne lieu qu'à un seul ν . On peut facilement démontrer la catastrophe en observant que des forces comme la gravitation et l'électrodynamique, dont l'intensité diminue comme le carré de la distance entre les corps en interaction, possèdent la propriété agréable que l'énergie totale E de la planète ou de l'électron en rotation est l'opposée de son énergie cinétique, $E = -T$ (cette relation dépend de la convention selon laquelle un électron libre, éloigné « à l'infini » de son noyau, possède une énergie « potentielle » nulle ; puisqu'il faut lui fournir de l'énergie pour l'éloigner de son noyau, son énergie est négative par rapport à ce zéro arbitraire lorsqu'il est lié).

Supposons que l'électron saute de l'état n à un état m d'énergie inférieure. Il devient plus fortement lié et perd donc une quantité $T_m - T_n$ d'énergie. L'énergie perdue est émise sous la forme de $h\nu$. Pour une bonne comptabilité, il nous faut étiqueter cette

fréquence (celle de la lumière émise) à l'aide des nombres quantiques des deux orbites impliquées dans le saut de l'électron. Bohr obtint ainsi

$$h\nu_{mn} = E_n - E_m = T_m - T_n = \frac{1}{2}h(m\omega_m - n\omega_n),$$

une formule pour le moins étrange, peu révélatrice et rebutante. La figure 2 illustre la relation entre les orbites électroniques de Bohr et trois raies d'émission visibles importantes de la série Balmer, notées H_α (à l'extrémité rouge du spectre), H_β (raie bleue) et H_γ (raie violette), qui correspondent respectivement à des sauts quantiques vers $m = 2$ depuis $n = 3$, $n = 4$ et $n = 5$.

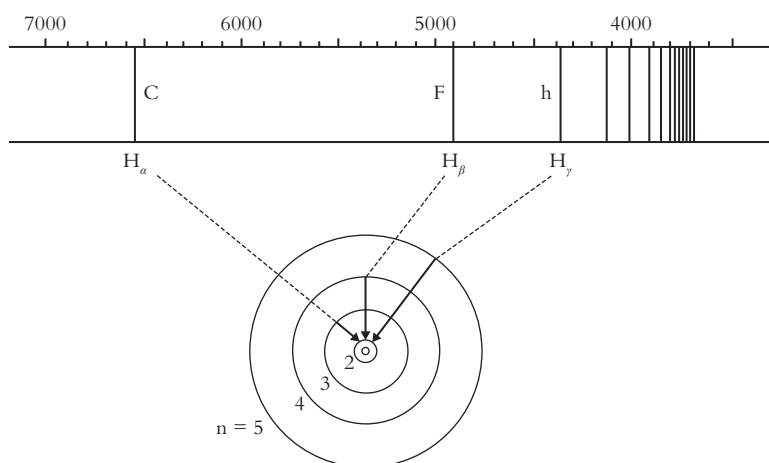


FIGURE 2 – Le spectre de l'hydrogène atomique dans la partie supérieure de la figure apparaît dans *Lærebog i fysik* (1910), de Christian Christiansen, le professeur de physique de Bohr à l'université de Copenhague. Les longueurs d'onde sont indiquées en Ångströms (dizièmes de milliardièmes de mètre) dans la partie supérieure. La partie inférieure de la figure montre comment Bohr a relié les raies spectrales caractéristiques H_α , H_β et H_γ aux sauts quantiques entre orbites électroniques.

Des expériences réalisées en 1913 et 1914 montrèrent que les fréquences ν_{mn} des raies spectrales émises par l'hydrogène et l'hélium ionisé correspondaient exactement à celles prévues par l'étrange calcul de Bohr. Seuls les audacieux pouvaient en être satisfaits. Einstein jugea immédiatement que la théorie était « une énorme réussite »⁷. Elle soutenait indirectement le quantum de lumière en ébranlant la règle classique selon laquelle des électrons qui oscillent produisent un rayonnement électromagnétique à la fréquence de leur mouvement (et à ses multiples). Einstein apprécia également indubitablement le fait que la méthode de Bohr révéla la signification universelle de la constante R . En multipliant les deux membres de la formule de Balmer par h et en lisant le résultat comme une équation énergétique, Bohr put en déduire que $T = \frac{hR}{n^2}$.

Ceci rendit possible une démonstration qui figure en bonne place dans la poésie de la physique : R , tout comme h , est un nombre ayant une signification universelle.

En utilisant le postulat $T_n = \frac{1}{2}nh\omega_n$ et la loi de Kepler appliquée à un électron de charge $-e$ et de masse m_e en orbite autour d'un noyau d'hydrogène de charge opposée $+e$, Bohr calcula l'énergie cinétique T_n en fonction de la charge e de l'électron, de sa masse m_e , de la constante de Planck h et du nombre quantique n . Ce sont toutes des constantes physiques fondamentales à l'exception de n ; mais les n se simplifièrent, et Bohr aboutit au magnifique résultat $R = \frac{2\pi^2 m_e e^4}{h^3}$. Avec les valeurs de ces constantes

physiques dont il disposait, Bohr obtint une valeur de R pour l'atome d'hydrogène correspondant au résultat expérimental à 0,06% près. En établissant une relation précise entre R et cette étrange série de constantes, Bohr parvint à convaincre de nombreux physiciens de la raison d'être de son modèle atomique métissé.

Nous avons mentionné que Bohr tourna à son avantage la différence gênante entre fréquence orbitale et fréquence du rayonnement sans se préoccuper de ses implications potentiellement destructrices pour la théorie ondulatoire de la lumière. Mais la théorie ondulatoire fonctionnait très bien dans son domaine. Bohr imposa donc une condition qui allait à la fois aider et hanter les physiciens quantiques pendant des décennies. À une certaine limite, les grandeurs atomiques calculées à l'aide de règles quantiques doivent coïncider avec les grandeurs similaires calculées à l'aide de règles classiques. Aux bordures extrêmes d'un atome, qui correspondent à de très grandes valeurs de n , les fréquences ω d'orbites adjacentes sont presque identiques. Bohr constata que, en imposant à cette fréquence ω commune d'être égale à la fréquence ν du rayonnement émis lors d'un saut entre les orbites, il retrouvait sa formule pour R . Il transforma cette coïncidence en une vague exigence qu'il nomma « principe de correspondance ». À des limites appropriées de hautes énergies, les valeurs *numériques* d'une grandeur observable devraient être les mêmes, qu'elles aient été calculées en utilisant des règles classiques ou quantiques.

La théorie de la relativité restreinte d'Einstein se réduit mathématiquement à la physique ordinaire pour des situations où toutes les vitesses sont très inférieures à la vitesse de la lumière. Il est séduisant de penser que quelque chose de similaire se produit entre la mécanique quantique et la mécanique classique dans la limite des grands nombres quantiques, où les effets de la petitesse de h peuvent être négligés. Mais une différence majeure s'impose. La vitesse de la lumière, facteur de mérite dans la relation entre relativité et mécanique classique, est un concept de physique classique, alors que le quantum y est totalement étranger. La question de savoir si la mécanique classique peut être considérée comme un cas limite de la physique quantique est encore contestée. D'après Bohr, elle ne le peut pas.

Le fait que Bohr ait pu faire des progrès essentiels grâce à son principe de correspondance fondamentalement ambigu illustre son génie insolite. La plupart des physiciens quantiques n'arrivaient pas à le faire fonctionner. Le professeur de physique théorique de l'université de Munich, Arnold Sommerfeld, qui développa une grande partie des premiers mécanismes de la théorie quantique des orbites électroniques, exprima de

la perplexité ainsi que de l'admiration face à ce que Bohr pouvait faire avec ce que Sommerfeld appela la « baguette magique » de la correspondance⁸.



En pleine Première Guerre mondiale, Einstein avait arrêté de prêcher le pacifisme et de perfectionner la théorie de la relativité pour apporter une contribution décisive à la théorie quantique de l'atome. Son intervention eut pour conséquences involontaires de montrer à Bohr où appliquer le plus efficacement le principe de correspondance, et d'introduire une idée qu'Einstein lui-même regrettera ultérieurement. Ce jouet des circonstances était la *probabilité*.

Lorsqu'un ensemble d'atomes est soumis à un rayonnement de fréquence suffisamment élevée, les électrons de ces atomes sautent d'un état à l'autre. À l'équilibre, le nombre de sauts vers le haut d'un état m vers un état n situé plus haut doit être égal, en moyenne, au nombre de sauts vers le bas de n vers m . Einstein fit l'hypothèse que le taux de dépeuplement de l'état inférieur doit être proportionnel à la fois à l'intensité du rayonnement et à la probabilité des sauts vers le haut. Il considéra que le taux correspondant de dépeuplement de l'état supérieur avait deux sources : un saut spontané vers le bas et un autre « stimulé » par le rayonnement. Cette « émission stimulée », concept purement théorique inventé par Einstein, a eu des applications pratiques plus révolutionnaires que l'équivalence masse-énergie de la relativité, car l'amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement (**light amplification by the stimulated emission of radiation** en anglais) est le principe du laser. Le but qu'avait Einstein en introduisant des probabilités était de fournir une nouvelle méthode plus satisfaisante d'obtention de la loi de Planck sur le rayonnement, qui découle effectivement de l'égalisation des nombres de sauts vers le haut et vers le bas. Du point de vue du principe de correspondance, le traitement d'Einstein introduisit un nouvel ensemble de grandeurs atomiques : les probabilités de sauts (ou, de manière moins pittoresque, de transitions) entre deux états, qui sont nécessairement étiquetées par deux nombres.

Il n'est pas facile de dire ce qu'Einstein entendait par les probabilités de transition. Il comparait la probabilité d'émission spontanée à celle d'une désintégration radioactive, mais considérait comme une faiblesse le fait que « la durée et le sens des processus élémentaires soient régis par le "hasard" »⁹. La plupart des physiciens avaient accepté qu'une désintégration radioactive se produit spontanément et tout à fait par hasard, signature de la chance et du caractère aléatoire. Bien qu'Einstein ait introduit le concept de probabilité dans son analyse, il rejeta par la suite explicitement l'assimilation de l'émission de lumière à la radioactivité. Son aversion pour cette idée lui a valu sa célèbre boutade selon laquelle il préférerait travailler dans une maison de jeux qu'être physicien s'il devait accepter l'idée que les électrons peuvent sauter quand et où ils le souhaitent¹⁰.

Tout cela nous a fait oublier ce qu'Einstein considérait comme le résultat le plus important de son analyse : l'attribution au quantum de lumière d'une propriété essentielle d'une particule. Dans des considérations antérieures, lui et d'autres n'avaient

attribué qu'une énergie au quantum de lumière. Désormais, pour assurer l'équilibre entre rayonnement et molécules dont il avait besoin pour obtenir la formule de Planck, il devait permettre à un quantum de lumière de transporter une quantité de mouvement orientée : il doit se déplacer (à la vitesse de la lumière) dans une direction donnée de l'espace. Les molécules doivent atteindre l'équilibre thermique sous les effets combinés des collisions mécaniques, de la résistance qu'oppose le rayonnement à leur mouvement, et de l'émission et l'absorption. Les collisions mettaient en jeu des échanges de quantité de mouvement ; les processus radiatifs devaient donc faire de même. Einstein se donna beaucoup de mal pour prouver cette affirmation plausible. Dorénavant, un quantum de lumière d'énergie $h\nu$, qu'il existe ou non, possédait une quantité de mouvement orientée $\frac{h\nu}{c}$ ¹¹.



Par son tempérament et la trajectoire de ses recherches, Bohr était un réformateur d'une toute autre trempe qu'Einstein. Bohr n'avait aucun scrupule à donner aux électrons carte blanche pour sauter à leur guise, et il acceptait les probabilités de transition dans le sens radical qu'elles possèdent dans la désintégration radioactive. Avec l'aide du principe de correspondance et d'un étudiant qui devint un collaborateur essentiel, Hendrik Kramers, il parvint à associer les probabilités de transition d'Einstein aux intensités des raies spectrales émises lors de sauts entre orbites elliptiques. Afin de ne pas en faire tout un mystère, mentionnons que cette association fut faite en utilisant une technique standard pour décomposer le mouvement elliptique de l'électron en une somme d'oscillations de fréquences multiples entières de la fréquence orbitale (c'est-à-dire une analyse de Fourier). Mais lorsque cette technique et d'autres versions élaborées de mécanique classique furent en désaccord avec la correspondance dans des cas compliqués, Bohr envisagea allègrement de violents remplacements ou reformulations d'idées classiques. En 1920, il envisagea l'abattage d'une vache aussi sacrée que la conservation de l'énergie.

Derrière cette audace viking se cachait une lignée de penseurs danois dont Bohr avait étudié les travaux avec le professeur de philosophie de l'université de Copenhague, Harald Høffding. Dans son enseignement pertinent, Høffding soutenait qu'avec le temps, toute théorie physique se heurte à un mur qui ne peut être surmonté que par une démarche qui semble irrationnelle du point de vue de la théorie. Il incombait au vrai scientifique de rechercher, d'amplifier et de surmonter ces impasses. Bohr accueillit l'atome nucléaire planétaire comme site de recherche parce qu'il décrivait correctement certains phénomènes selon certaines règles classiques mais ne parvenait pas du tout à rester stable selon d'autres. Il surmonta l'impasse en introduisant des états « stationnaires », des sauts quantiques, et une relation irrationnelle entre la couleur de la lumière observée et les mouvements des électrons qui en sont responsables.

Il reconnut pleinement les incohérences de sa création mais s'y accrocha à l'aide de vagues jeux de mots. En utilisant une terminologie qui résonnerait faiblement en physique pendant plus d'un siècle, il qualifia les grandeurs classiques définissant les

orbites comme étant purement « symboliques ». Elles servaient de substituts aux grandeurs quantiques dont il attendait qu'elles remplacent son enchevêtrement classique-quantique. Pour identifier ces grandeurs et leurs relations, il analysa les mouvements orbitaux des électrons de façon toujours plus précise dans l'espoir que le principe de correspondance permettrait de traduire les concepts classiques en un langage quantique qui pourrait ensuite se développer indépendamment.

L'arène où se déroula sa lutte fut l'Institut de physique théorique qu'il créa à Copenhague au début des années 1920, avec des fonds publics et privés. Il y installa Kramers, diplômé de l'illustre école hollandaise de physique classique de l'université de Leyde, ainsi qu'un ensemble de jeunes hommes brillants et ambitieux avides de se faire une réputation en résolvant « l'énigme quantique ». Les circonstances étaient propices à l'éclosion d'une nouvelle philosophie naturelle. La guerre avait mis à mal de nombreuses hypothèses traditionnelles, et l'agitation qui régnait en Europe poursuivait la destruction. Bohr dirigea la recherche d'une physique atomique cohérente avec l'énergie incandescente et fit de son institut une pépinière d'hybrides à croissance rapide entre idées quantiques et classiques. Et il disposait du pouvoir de persuasion de la bourse, proposant des allocations en couronnes danoises stables alors que l'inflation galopante en Allemagne rendait la vie plus précaire que d'habitude pour les jeunes universitaires¹².

Il recruta deux de ses jeunes génies, Wolfgang Pauli et Werner Heisenberg, lors de conférences qu'il donna à l'université de Göttingen pendant l'été 1922. Ils étaient tous deux étudiants de Sommerfeld, qui avait introduit de nouveaux nombres quantiques afin d'étendre le champ d'application de l'atome de Bohr aux orbites elliptiques et à des spectres plus complexes que celui de l'hydrogène. Sommerfeld avait écrit le premier manuel de physique quantique, *Atombau und Spektrallinien (Structure atomique et raies spectrales)*, dans lequel il chantait la « musique atomique des sphères » et la transcrivait en formules faisant intervenir ses nombreux nombres quantiques. La première édition d'*Atombau* vit le jour en 1919, un an après l'entrée à l'université de Pauli. Pauli maîtrisa rapidement à la fois l'ouvrage et les nouveautés en plein essor qu'il aida Sommerfeld à intégrer dans les éditions suivantes. En tant qu'assistant de Sommerfeld, Pauli avait pour tâche d'aider à instruire Heisenberg, qui entra à l'université en 1920 et se lança immédiatement dans la recherche d'harmonies quantiques. Heisenberg était un musicien expert et il ne tarda pas à manipuler la musique atomique aussi bien qu'il jouait du piano¹³.

Ces brillants jeunes gens étaient des éléments exotiques issus de familles universitaires. Le père de Pauli enseignait la biochimie à l'université de Vienne, celui d'Heisenberg, le grec byzantin à l'université de Munich. Pauli senior comptait Mach, le physicien-philosophe dont Einstein avait jadis admiré l'approche positiviste et antimétaphysique, parmi ses amis proches. Mach lui rendit la pareille au point d'être le parrain de Pauli junior lors d'une cérémonie de baptême qu'il considérait comme un non-sens. La magie de Mach s'avéra plus forte que celle du prêtre ; Pauli devint un piètre catholique, mais un bon positiviste. C'était un bien meilleur mathématicien et physicien. Lorsqu'il quitta le lycée, il était capable de rédiger un article d'encyclopédie sur la relativité, entreprenant une mission initialement acceptée par Sommerfeld. Einstein fut étonné qu'un homme de moins de 20 ans ait maîtrisé une théorie qui

déconcertait alors encore la plupart des physiciens professionnels¹⁴. Et Bohr fut stupéfait lorsque Heisenberg, à 21 ans, eut les connaissances et la confiance nécessaires pour le questionner en public devant une centaine de scientifiques venus l'écouter à Göttingen.

La confiance en soi de Heisenberg et de Pauli trouve une origine improbable dans la situation chaotique qui régnait à Munich lorsqu'ils entrèrent à l'université. La fin de la guerre avait apporté l'anarchie dans la ville, ainsi que les gouvernements socialistes et communistes, les assassinats politiques, les terreurs rouge puis blanche, et les pénuries alimentaires. Heisenberg et ses compagnons scouts (les « Éclaireurs ») se glissaient à travers les barrages pour se procurer de la nourriture pour leurs familles et guidaient les partisans du camp qu'ils aidaient dans et hors de la ville. Néanmoins, la vie à l'institut de Sommerfeld se poursuivait comme à l'accoutumée, ou plutôt avec plus de fébrilité qu'auparavant. Repliés sur eux-mêmes, les étudiants compétents et dévoués ne faisaient rien d'autre que de la physique, et certains, presque rien d'autre que de la physique quantique. Heisenberg obtint une note médiocre à son examen de doctorat car il était incapable de répondre à des questions simples sur des phénomènes physiques ordinaires¹⁵. Après avoir obtenu son diplôme sur le front de la recherche, armé des techniques de Sommerfeld, Pauli et lui passèrent chacun du temps à Göttingen en tant qu'assistants du professeur de physique, Max Born, afin d'apprendre les mathématiques plus sophistiquées qui y étaient pratiquées.

Le professeur et ses deux assistants, tous trois futurs architectes de la mécanique quantique, étaient particulièrement mal assortis. Born, pointilleux, juif, aussi bien mathématicien que physicien, doutait souvent de lui-même. Pauli, arrogant, juif d'origine, catholique non pratiquant à la suite de la conversion de son père, était surnommé le « Fléau de Dieu » pour ses critiques impitoyables de lui-même et des autres. Heisenberg, luthérien, immature, sportif, musicien et compétitif, n'avait aucun doute. Aucun des deux assistants n'aimait Göttingen, mais pour des raisons opposées. Heisenberg lui reprochait d'être un « trou perdu » car il n'y avait pas d'éclaireurs sains. Pauli la considérait comme provinciale car il n'y avait pas de vie nocturne malsaine. Il trouva malgré tout suffisamment de choses à faire pour rester au lit jusqu'à tard dans la journée. Il ratait souvent les conférences matinales de Born, auxquelles il était censé assister, mais s'efforçait d'assister à l'exposé de Bohr sur la physique quantique¹⁶.

Les conférences de Bohr à Göttingen représentèrent une performance grandiose, le point culminant de la carrière de l'atome planétaire. À la stupéfaction générale, il décrivit les orbites individuelles (supposées elliptiques) de tous les électrons de tous les atomes du tableau périodique des éléments et affirma que ses attributions avaient été approuvées par le principe de correspondance. La description faisait appel à deux nombres quantiques, n , qui mesure l'énergie et le grand axe des orbites, et k , qui mesure le moment cinétique et l'excentricité de l'orbite. Une planche dépliant accompagnant la version imprimée des conférences représentait ces structures, la plus grande, celle du radium, comportant chacune de ses 88 orbites (voir figure 3).

Ce chef-d'œuvre de la méthode symbolique ne dérivait que rhétoriquement du principe de correspondance. Bohr attribuait les valeurs de n et k en grande partie à partir de considérations chimiques et spectroscopiques et, surtout, de considérations de symétrie à la limite de la numérogie. La symétrie exigeait qu'un espace vacant dans le



« La question n'était pas de savoir si la lumière devait être représentée comme des ondes ou des particules, ou les atomes comme des systèmes solaires, mais de savoir si le monde microscopique pouvait être représenté. »

Le célèbre affrontement entre Albert Einstein et Niels Bohr a dépassé le cadre de la physique quantique pour remettre en cause les fondements mêmes de notre compréhension de la science. Face aux étrangetés déroutantes de cette nouvelle théorie, deux visions irréconciliables se sont opposées.

Bohr, avec sa notion de « complémentarité », acceptait les absurdités apparentes du monde microscopique et considérait les concepts quantiques comme purement « symboliques ». Einstein, refusant cette « philosophie tranquillisante », exigeait une explication plus profonde et rejetait les « actions fantômes à distance » que semblait impliquer l'intrication quantique.

Leur dialogue intense et passionné s'acheva dans les années 1930 sur une victoire apparente de Bohr, tandis que l'attention se tournait vers la physique nucléaire et des particules. Mais l'histoire ne s'arrête pas là...

S'appuyant sur leurs échanges épistolaires et les découvertes qui ont suivi, ce récit captivant nous plonge au cœur de ce débat fondateur. Entre personnalités exceptionnelles, tensions intellectuelles et avancées scientifiques, il éclaire d'un jour nouveau un affrontement dont les répercussions résonnent encore aujourd'hui.

