L’univers quantique

Tout ce qui peut arriver arrive…

Brian Cox
Jeff Forshaw

L'univers quantique

Tout ce qui peut arriver arrive…

Traduit de l'anglais
par Guy Chouraqui

EKHO

L'édition originale de cet ouvrage a été publiée en anglais en 2011 par Penguin, sous le titre : *The Quantum Universe: Everything That Can Happen Does Happen.*

The original edition of this work has been published in English in 2011 by Penguin, under the title: *The Quantum Universe: Everything That Can Happen Does Happen.*

Copyright © Apollo's Children Limited
and Jeff Forshaw, 2011

Couverture : Delphine Dupuy

© Dunod, Paris, 2013, pour la traduction française
2018 pour cette édition
11 rue Paul Bert 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-077983-3

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), 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 ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).
Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

1

Trois pas dans l'étrange

Quantique – Quantum – Quanta : dès l'abord, ces mots inspirent-ils votre imagination, votre réflexion ou vos craintes ? C'est selon : pour certains, ces mots témoignent de la réussite de la science, pour d'autres, ils symbolisent les limites de l'intuition humaine lorsqu'elle est confrontée à l'indéniable étrangeté du domaine de l'atome. Pour le physicien, la mécanique quantique est l'un des trois grands piliers sur lesquels repose notre connaissance du monde. Les deux autres sont dus à Einstein : relativité restreinte et relativité générale, qui traitent de la nature de l'espace et du temps, et de la gravitation. Quant à la théorie quantique, elle traite de tout le reste ! Votre imagination, vos réflexions ou vos craintes n'y ont pas la moindre importance : elle est simplement là pour décrire le fonctionnement intime de la matière. Sous cet angle pragmatique, elle brille par sa précision et sa capacité d'explication. Prenons l'exemple d'un des tests de l'électrodynamique quantique, la première et la mieux connue des théories du domaine, dont le but est de décrire le comportement d'un électron dans un champ magnétique. D'un côté, les théoriciens ont effectué des calculs ardus, avec papier, crayon, ordinateur, pour prévoir le résultat de l'expérience. Pour leur part, en inventant les techniques les plus ingénieuses, les expérimentateurs ont

mesuré les phénomènes observés. Les deux camps ont abouti à des valeurs d'une précision telle, qu'on peut la comparer à une détermination de la largeur de l'Atlantique au centimètre près. D'une façon remarquable, ces valeurs – celles prévues et celles observées – se sont révélées parfaitement concordantes.

Certes, une telle perfection est impressionnante, mais elle demeure quelque peu ésotérique. Si cartographier le monde miniature est tout ce que peut offrir la théorie des quanta, à quoi bon faire tant d'histoires ? Voici un début de réponse : la science n'a pas pour but d'être utile, mais on connaît de nombreux exemples d'évolutions technologiques, ayant profondément marqué nos sociétés et changé nos vies qui sont nées de recherches fondamentales. Elles sont dues à des explorateurs modernes, dont la seule motivation était de mieux comprendre le monde qui nous entoure. Certes, nous devons à l'avancement de l'ensemble des disciplines scientifiques des bénéfices aussi divers que l'allongement de l'espérance de vie, les déplacements aériens intercontinentaux, les télécommunications modernes, une certaine indépendance vis-à-vis de l'agriculture de subsistance, et bien au-delà, une vue renouvelée de notre place dans le vaste univers, source de méditation et d'humilité. Mais ce ne sont là que des retombées secondaires d'une soif de savoir primordiale, sans rapport avec le désir d'en retirer du confort, ni même un regard nouveau sur notre monde.

La mécanique quantique est sans doute le meilleur exemple d'une théorie extrêmement ésotérique devenue profondément utile. Ésotérique, car sa description des phénomènes naturels implique qu'une particule se trouve réellement en plusieurs endroits à la fois, et ne se déplace qu'en explorant tout l'Univers simultanément. Utile, car comprendre le comportement des éléments les plus petits de

l'Univers sous-tend la compréhension de tout le reste. Tout le reste ? Voilà une affirmation qui semble déraisonnable, vu la diversité et la complexité des phénomènes naturels. Et pourtant, nous avons découvert qu'absolument tout est bâti à partir d'une poignée de particules élémentaires, obéissant aux lois de la théorie quantique ; et ces lois sont si simples qu'on pourrait les résumer au dos d'une enveloppe. Cela même est en soi l'un des plus grands mystères : pourquoi n'a-t-on pas besoin de toute une bibliothèque pour expliquer la nature essentielle des choses ?

Il se trouve que mieux nous comprenons les structures élémentaires du monde, plus il nous apparaît simple. Nous expliquerons, en temps voulu, ces lois fondamentales, et comment de minuscules briques élémentaires constituent la trame de la nature. Mais un mot d'avertissement est inévitable ici, pour éviter d'être ébloui à l'excès par la simplicité sous-jacente de l'Univers. Si les règles du jeu sont fondamentalement simples, leurs conséquences ne sont pas nécessairement évidentes à calculer. Notre expérience quotidienne du monde tient à des relations entre de vastes ensembles de milliards de milliards d'atomes et il serait insensé d'imaginer qu'on puisse déduire de principes fondamentaux le comportement des plantes ou des humains. Cette restriction ne réduit pourtant pas la radicalité du constat : tous les phénomènes sont réellement sous-tendus par la physique quantique des particules élémentaires.

Considérez le monde qui vous entoure. Vous avez en main un livre fait de papier, fabriqué à partir de la cellulose des arbres[1]. Ceux-ci sont des usines capables de se

1. À moins naturellement que vous ne soyez en train de lire la version électronique de ce livre, auquel cas il vous faudrait faire un petit effort d'imagination…

procurer des atomes et des molécules, de les décomposer et de les recombiner en colonies interdépendantes, composées de plusieurs milliards de milliards de constituants. Ils y parviennent grâce à la chlorophylle, molécule composée de guère plus de cent atomes de carbone, d'hydrogène et d'oxygène, imbriqués dans un échafaudage compliqué, comprenant aussi quelques atomes de magnésium et d'azote. Cet assemblage capture la lumière de notre étoile, située à 150 millions de kilomètres : le Soleil, qui est une fournaise nucléaire, d'un volume égal à un million de fois celui de la Terre. L'énergie de son rayonnement parvient au cœur des cellules des feuilles, où elle permet de construire des molécules à partir de gaz carbonique et d'eau, libérant ainsi l'oxygène vital. Les arbres, les êtres vivants et le papier de votre livre, sont le produit de telles machines moléculaires. Vous pouvez lire ce livre et en comprendre le texte car vos yeux convertissent la lumière diffusée par les pages en impulsions électriques, qu'interprétera votre cerveau, la structure la plus complexe connue dans l'Univers. Nous avons découvert que toutes ces choses ne sont rien de plus que des assemblages d'atomes, et que toute la diversité des atomes ne repose que sur trois particules : les électrons, les protons et les neutrons. Nous avons également découvert que les protons et les neutrons sont eux-mêmes constitués d'entités encore plus petites appelées quarks, et c'est là que notre description s'arrête, au stade actuel de nos connaissances. À la base de tout cela, il y a la théorie des quanta.

L'image de notre Univers, révélée par la physique moderne, est donc celle d'une simplicité sous-jacente ; d'élégants phénomènes dansent hors de notre vue, et en émerge l'extrême diversité du monde macroscopique. C'est peut-être là le couronnement de la science moderne, que cette réduction de la formidable complexité du monde,

êtres humains y compris, au comportement d'une poignée de particules subatomiques, et des quatre forces qui agissent entre elles. Les meilleures descriptions de trois de ces forces dont nous disposions – les forces nucléaires forte et faible, qui agissent au cœur du noyau atomique, et la force électromagnétique, qui sert de lien dans les atomes et les molécules – sont fournies par la théorie quantique. Actuellement, seule la force de gravitation, la plus faible mais la plus familière des quatre, ne dispose pas de description satisfaisante dans le cadre quantique.

Encore un mot d'avertissement, à propos cette fois de l'indéniable réputation d'étrangeté de la théorie des quanta. Elle a fait l'objet de nombreuses divagations : les chats peuvent être tout à la fois vivants et morts, les particules sont partout à la fois, et selon Heisenberg, tout est incertain. Il y a du vrai à la base de tout cela, et le monde des quanta présente des aspects bien étranges ; mais il ne faudrait certainement pas, comme c'est souvent le cas, en tirer la conclusion que nous baignons dans un mystère généralisé ! La « perception extra-sensorielle », les « guérisons mystiques », les « bracelets magnétiques qui protègent contre les rayonnements » – nous vous laissons le soin de compléter la liste – sont constamment introduits en contrebande dans le panthéon des choses possibles, sous couvert du jargon quantique. Toutes ces absurdités naissent d'esprits confus, procèdent de la pensée magique, proviennent de malentendus authentiques ou intentionnels – ou de toute combinaison malheureuse de ce qui précède. La théorie quantique décrit le monde avec précision, en utilisant des lois mathématiques avec autant de rigueur que Newton ou Galilée. C'est bien pourquoi le comportement d'un électron soumis à un champ magnétique peut être calculé avec une précision extraordinaire.

La théorie quantique fournit une description de la Nature qui, comme nous allons le découvrir, détient un immense pouvoir prédictif et explicatif, couvrant une vaste gamme de phénomènes, des puces de silicium au fonctionnement des étoiles.

Notre objectif en écrivant ce livre est de démystifier la théorie quantique, cadre théorique bien connu pour les difficultés d'interprétation qu'il a provoquées, même chez ses découvreurs. Notre approche consiste à adopter une perspective moderne, bénéficiant d'un siècle de progrès des connaissances. Pour planter le décor, cependant, nous commencerons notre voyage au tournant du XXe siècle pour analyser les problèmes qui ont conduit les physiciens à une rupture radicale avec ce qui prévalait.

La théorie des quanta est issue, comme c'est souvent le cas en science, de la découverte de phénomènes naturels ne pouvant être expliqués dans le cadre des paradigmes scientifiques de l'époque. Pour la théorie quantique, ils furent nombreux et variés. Une cascade de résultats inexplicables provoqua de l'excitation et de la confusion, et a catalysé une période d'innovation expérimentale et théorique exceptionnelle, qui mérite amplement cette dénomination stéréotypée : un âge d'or. Les noms des protagonistes sont gravés dans la mémoire de tous les étudiants en physique et ils dominent même aujourd'hui les cours des premières années d'université : Planck, Einstein, Rutherford, Bohr, de Broglie, Heisenberg, Pauli, Schrödinger, Dirac. Il n'y aura probablement plus jamais de moment de l'histoire où tant de savants prennent place parmi les plus grands, autour de la poursuite d'un unique objectif : une nouvelle théorie des atomes et des forces dominant le monde physique. En 1924, se remémorant les deux premières décennies de la mécanique quantique, Ernest Rutherford,

le physicien d'origine néo-zélandaise qui a découvert le noyau atomique à Manchester, écrivait : « L'année 1896 […] a marqué le début de ce qui a été justement appelé l'âge héroïque de la Science Physique. Jamais auparavant dans l'histoire de la physique, on n'a pu être témoin d'une période d'activité aussi intense, où les découvertes fondamentales se sont succédé avec une rapidité vertigineuse. »

Mais avant de nous rendre à Paris en 1896 pour assister à la naissance de la théorie des quanta, interrogeons-nous sur l'origine du mot « quantum » lui-même. En 1900, c'est Max Planck qui introduit ce terme en physique. Il cherchait à décrire le rayonnement lumineux émis par les corps chauds – nommé « rayonnement du corps noir » – apparemment suite à une commande que lui avait faite une société d'éclairage électrique : il arrive parfois que des causes bien prosaïques ouvrent les portes de l'Univers. Plus loin dans le livre, nous discuterons plus en détail de la grande idée de Planck, mais en cette brève introduction, qu'il nous suffise de dire que pour expliquer les propriétés de ce rayonnement, il formula l'hypothèse que la lumière est émise par petites quantités d'énergie, qu'il nomma « quanta ». Le mot lui-même désigne une quantité discontinue, un « paquet ». Au début, Planck considérait cette idée comme un pur artifice mathématique, mais en 1905, l'article d'Albert Einstein sur l'effet photoélectrique renforça son hypothèse. Ces résultats étaient d'une grande portée, car ils suggéraient que ces petits paquets d'énergie électromagnétique pouvaient être assimilés à des particules.

L'idée que la lumière puisse se comporter comme un flux de petits projectiles a une longue et illustre histoire, qui remonte à la naissance de la physique moderne et à Isaac Newton. Mais en 1864, le physicien écossais

James Clerk Maxwell balaya les incertitudes qui pouvaient subsister sur la nature ondulatoire de la lumière. Il publia une série d'articles, « la plus profonde et la plus féconde que la physique ait connue depuis l'époque de Newton », selon Albert Einstein. Maxwell y démontrait que la lumière est une onde électromagnétique traversant l'espace, sa nature ondulatoire était donc certaine et, semblait-il, inattaquable. Pourtant, lors d'une série d'expériences menées de 1923 à 1925 à l'université Washington à Saint-Louis (Missouri), Arthur Compton et ses collègues observèrent l'interaction d'un rayonnement lumineux avec des électrons : durant ce choc, les deux protagonistes se comportaient comme des boules de billard. Cela prouvait clairement que la conjecture de Planck était solidement fondée dans le monde réel. En 1926, les quanta de lumière ont été baptisés « photons ». On avait la preuve irréfutable que la lumière se comporte tout à la fois comme une onde et comme une particule : cela marqua la fin de la physique classique, et l'essor de la théorie quantique.

2
Le don d'ubiquité

Ernest Rutherford mentionne 1896 comme origine de la révolution quantique car c'est l'année où Henri Becquerel, travaillant dans son laboratoire à Paris, a découvert la radioactivité. Il essayait d'utiliser des composés d'uranium pour produire des rayons X, découverts quelques mois auparavant par Wilhelm Röntgen à Würzburg. Au lieu de cela, il observa que ces composés émettaient des « rayons uraniques », capables de noircir des plaques photographiques, même à travers un emballage parfaitement opaque. L'importance des rayons de Becquerel a été reconnue par Henri Poincaré dès 1897, dans un article publié dans la *Revue Scientifique*. Avec beaucoup de clairvoyance, voici ce qu'il disait de cette recherche : « on peut penser aujourd'hui qu'elle va nous ouvrir l'accès de tout un monde nouveau que nul ne soupçonnait.[2] » Le rayonnement radioactif observé

2. Henri Poincaré, « Les rayons cathodiques et les rayons Roentgen », *Revue Scientifique* 7 (1897), accessible par le lien suivant vers les Archives Henri Poincaré (université de Lorraine) :
http://www.univ-nancy2.fr/poincare/bhp/pdf/hp1897rs.pdf
Dans le même article, Poincaré ajoutait également, avec tout autant de clairvoyance : « Tous ces faits [rayons cathodiques, Roentgen, Becquerel] seront sans doute un jour reliés entre eux et rattachés à une même cause. Bien d'autres alors viendront sans doute se grouper autour d'eux et compléter un tableau dont nous commençons à entrevoir l'esquisse ».

par Becquerel présentait un caractère très bizarre, mais qui indiquait en même temps la piste de la nature du phénomène : rien ne semblait en déclencher l'émission ; les substances l'émettaient spontanément et de manière imprévisible.

Voici comment Rutherford posait le problème en 1900 : « Tous les atomes formés en même temps devraient avoir une durée de vie bien déterminée. Au contraire, les observations montrent que les atomes ont des durées de vie pouvant prendre n'importe quelle valeur entre zéro et l'infini. » Cet aspect aléatoire du monde microscopique représentait une rupture, car jusque-là, la physique était fondamentalement déterministe : si à un instant donné on connaissait tous les éléments d'une situation, on pensait qu'il serait possible de prévoir, avec une certitude absolue, ce qui se produirait par la suite. L'abandon de cet espoir est une caractéristique centrale de la théorie quantique, qui traite de probabilités, et non de certitudes ; ce n'est pas dû à un défaut de connaissances, mais au fait que certains aspects de la Nature sont intrinsèquement gouvernés par le hasard. C'est ainsi qu'il est impossible de prévoir à quel instant un atome particulier va se désintégrer. La radioactivité marque la première rencontre de la physique et du hasard dans les phénomènes naturels, et cela posera longtemps des problèmes à de nombreux physiciens.

L'intérieur des atomes suscitait donc beaucoup d'intérêt, même si sa structure demeurait totalement inconnue. Une découverte fondamentale fut réalisée par Rutherford en 1911, en utilisant une source radioactive pour bombarder une très mince feuille d'or avec ce que l'on nommait à l'époque les rayons alpha (des noyaux d'hélium). Avec ses collaborateurs Hans Geiger et Ernest

Marsden, il constata avec une immense surprise qu'une proportion d'environ une particule alpha sur huit mille ne traversait pas l'or, mais rebondissait vers l'arrière. Voici comment Rutherford décrivit plus tard ce moment, dans son langage coloré si caractéristique : « C'est l'événement le plus incroyable qui me soit arrivé. C'est presque comme si on tirait un obus de 15 pouces[3] sur une feuille de papier de soie, et qu'il revienne en arrière nous frapper. » D'après tous les témoignages, Rutherford était un homme très attachant, et plein de bon sens ; d'un personnage officiel imbu de lui-même, il dira un jour : « Il est exactement comme un point euclidien : il a une position, mais une grandeur nulle. »

Rutherford a calculé que ses résultats expérimentaux ne pouvaient s'expliquer que si l'atome était constitué d'un très petit noyau en son centre, avec des électrons en orbite autour de celui-ci. À l'époque, il avait probablement à l'esprit l'analogie des planètes tournant autour du Soleil. Le noyau représente la quasi-totalité de la masse de l'atome, ce qui explique qu'il soit capable d'arrêter les « obus » des particules alpha, et de les renvoyer vers l'arrière. L'atome d'hydrogène, l'élément le plus simple, comporte un noyau constitué d'un proton, dont le rayon est environ $1{,}75 \times 10^{-15}$ m (soit 0,000 000 000 000 001 75 mètre, autrement dit un peu moins de deux millionièmes de milliardièmes de mètre !).

Quant à l'unique électron, autant que nous puissions le dire aujourd'hui, ce n'est qu'un point, comme l'important personnage dépeint par Rutherford… Il est en orbite autour du noyau d'hydrogène, à un rayon environ 100 000 fois plus grand que le diamètre nucléaire. Le noyau

3. Environ 40 centimètres.

a une charge électrique positive et l'électron a une charge électrique négative, ce qui signifie qu'une force d'attraction s'exerce entre eux, analogue à la force de gravité qui maintient la Terre en orbite autour du Soleil. Les atomes ne sont en grande partie que de l'espace vide. Si le noyau avait la taille d'une balle de tennis, l'électron ne serait qu'un grain de poussière en orbite à une distance d'un kilomètre. Ces chiffres sont tout à fait surprenants, car l'aspect de la matière solide ne suggère nullement qu'elle est essentiellement vide.

L'atome nucléaire de Rutherford a posé toute une série de problèmes aux physiciens de l'époque. On savait parfaitement par exemple que l'électron en circulant sur son orbite devait perdre de l'énergie en émettant un rayonnement électromagnétique, comme toute charge électrique se déplaçant sur une trajectoire courbe. C'est le principe même de l'émetteur radio, dans lequel le mouvement des électrons s'accompagne d'émission d'ondes. Heinrich Hertz inventa cette technique en 1887, et au moment où Rutherford découvrait le noyau atomique, il existait une station de radio commerciale qui transmettait des messages à travers l'Atlantique, de l'Irlande jusqu'au Canada. La théorie électromagnétique était donc parfaitement établie, d'où la difficulté à admettre l'hypothèse d'un mouvement perpétuel des électrons autour du noyau.

Un autre phénomène lui aussi inexplicable, était celui de la mystérieuse lumière rayonnée par les atomes lorsqu'ils sont chauffés. Dès 1853, le scientifique suédois Anders Jonas Ångström avait analysé le rayonnement émis par une étincelle provoquée dans un tube empli d'hydrogène. On s'attendrait à ce qu'un gaz incandescent produise de la lumière blanche, réunissant toutes les couleurs de l'arc-en-ciel : après tout, qu'est-ce que le Soleil,

sinon une boule de gaz incandescente ? Au lieu de cela, Ångström observa que l'hydrogène émettait de la lumière de trois couleurs bien distinctes : rouge, bleu-vert et violet, une sorte d'arc-en-ciel réduit à trois arcs étroits de couleur pure. On a vite découvert que chacun des éléments chimiques se comportait de cette manière, émettant son propre « code-barres » de couleurs. Au moment où l'atome nucléaire de Rutherford a été conçu, un scientifique du nom de Heinrich Gustav Johannes Kayser avait rédigé un ouvrage de référence en six volumes regroupant 5 000 pages, intitulé *Handbuch der Spectroscopie* (Manuel de spectroscopie), recensant toutes les raies de couleur émises à partir des éléments connus. La question était, bien sûr : pourquoi ? Non pas seulement : « Pourquoi vous donner tout ce travail, Professeur Kayser ? » (nous vous laissons imaginer le succès qu'il pouvait remporter, lors des dîners en ville…), mais aussi « Pourquoi une telle profusion de lignes colorées ? » C'est que plus de soixante ans après sa découverte, la spectroscopie était tout à la fois une extraordinaire moisson d'observations et un désert théorique.

En mars 1912, un physicien danois, Niels Bohr, fasciné par le problème de la structure atomique, se rendit à Manchester pour rencontrer Rutherford. Plus tard, il compara la tentative de décoder le fonctionnement interne de l'atome à partir des données spectroscopiques, à l'espoir de déduire les bases de la biologie d'après l'observation des couleurs de l'aile d'un papillon. Le modèle de l'atome de Rutherford, conçu comme un système solaire, fournit à Bohr un point de départ, et en 1913, il publia la première théorie quantique de la structure atomique. Bien sûr, cette théorie rencontra des problèmes, mais elle recèle plusieurs idées clés qui sont à la base

du développement des théories quantiques modernes. Bohr parvint à la conclusion que les électrons ne peuvent occuper que certaines orbites, l'orbite de plus basse énergie se trouvant la plus proche du noyau. Ils sont capables de sauter d'une orbite à l'autre : parvenant à une orbite plus haute, quand ils reçoivent de l'énergie (à partir d'une étincelle dans un tube par exemple), et retombant au bout d'un certain temps, en émettant alors de la lumière. La couleur de la lumière est déterminée précisément par la différence d'énergie entre les deux orbites. La figure 2.1 illustre l'idée de base, la flèche représente un électron qui saute du troisième niveau d'énergie vers le second, en émettant de la lumière (représentée par la ligne ondulée). Dans le modèle de Bohr, l'électron ne peut emprunter que des orbites particulières, dites « quantifiées » ; une descente continue en spirale en direction du noyau est tout simplement interdite. De cette façon, le modèle de Bohr permet de calculer les longueurs d'onde (c'est-à-dire les couleurs) de la lumière observée par Ångström – elles sont attribuées à des sauts d'électrons de la cinquième orbite jusqu'à la deuxième (lumière violette), de la quatrième orbite jusqu'à la seconde (lumière bleu-vert) ou de la troisième orbite jusqu'à la seconde (lumière rouge). Ce modèle prévoit aussi correctement qu'il doit exister de la lumière émise à la suite d'un saut d'électrons vers la première orbite. Cependant, cette lumière représente la partie ultra-violette du spectre, invisible pour l'œil humain, et qui n'avait pas été détectée par Ångström. Elle fut repérée en 1906 par Theodore Lyman, physicien à Harvard, et le modèle de Bohr est en excellent accord avec les résultats de Lyman.

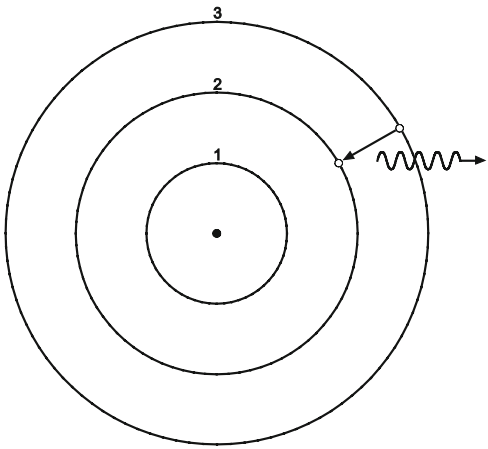

Figure 2.1 Le modèle atomique de Bohr, illustrant l'émission d'un photon (ligne ondulée) lorsqu'un électron (indiqué par la flèche) arrive sur une orbite d'énergie plus basse.

Même si Bohr n'a pas étendu son modèle au-delà de l'hydrogène, les idées qu'il avait introduites peuvent être appliquées à d'autres atomes. Si on admet en particulier que les atomes de chaque élément sont caractérisés par des orbites spécifiques, ils ne pourront jamais émettre que de la lumière appartenant à un ensemble de couleurs bien déterminées. La lumière émise par les atomes est un moyen de les identifier, un peu comme des empreintes digitales ; naturellement les astronomes ne tardèrent pas à exploiter l'unicité des raies spectrales, pour déterminer la composition chimique des étoiles.

Le modèle de Bohr constituait un bon départ, mais des questions embarrassantes subsistaient : qu'est-ce qui interdit au juste à l'électron d'évoluer en spirale en perdant de l'énergie par émission d'ondes électromagnétiques, une idée bien enracinée dans le réel depuis l'invention de la radio ?

Et tout d'abord, pourquoi les orbites sont-elles quantifiées ? Enfin, concernant les éléments plus lourds que l'hydrogène, comment allait-on pouvoir déchiffrer leur structure ?

Même incomplète, cette théorie marqua une étape décisive, et elle reste un bon exemple de la marche des sciences vers le progrès des connaissances. En effet, il ne faut surtout pas rester bloqué face à des questions non résolues, souvent totalement déconcertantes. Dans de tels cas, la stratégie des scientifiques est de formuler une conjecture, une hypothèse à peu près justifiée, avant de calculer les conséquences de cette supposition. Si cela fonctionne, au sens où la théorie est en accord avec l'expérience, alors on peut progresser de manière plus assurée, en tentant de justifier plus avant l'hypothèse de départ. L'approche de Bohr fut un succès, mais plusieurs de ses aspects demeurèrent inexpliqués pendant treize années encore.

Nous reviendrons sur l'histoire de ces premières idées quantiques au cours du livre ; pour l'instant attardons-nous sur la masse de résultats étranges et d'interrogations à demi résolues, auxquels les pionniers de la théorie quantique durent faire face. Faisons très brièvement le point : alors que Maxwell a démontré que la lumière est une onde, Planck, puis Einstein, réintroduisent l'idée que la lumière est composée de particules. Rutherford et Bohr ouvrent ensuite la voie à la compréhension de la structure des atomes, mais la façon dont les électrons s'y comportent ne concorde avec aucune théorie connue. Et les divers phénomènes, collectivement désignés sous le nom de radioactivité, dans lesquels les atomes se désintègrent spontanément sans raison repérable, restent un mystère, notamment parce qu'ils introduisent un troublant élément de hasard dans la physique. Il n'y a plus de doute : quelque chose d'étrange se passe dans le monde subatomique.

La première étape vers une vue cohérente et unifiée est unanimement attribuée au physicien allemand Werner Heisenberg : on lui doit tout simplement une approche totalement nouvelle de la théorie de la matière et des forces. En juillet 1925, il publia un article balayant tout l'échafaudage conceptuel ancien, ses incohérences et ses fragiles hypothèses – y compris le modèle atomique de Bohr ! – pour inaugurer une approche neuve de la physique. Voici les premiers mots de ce texte : « Cet article vise à fournir les bases d'une mécanique théorique quantique exclusivement fondée sur des relations entre des grandeurs en principe observables[4]. » C'est une étape importante, car Heisenberg y affirme que les mathématiques sous-jacentes à la théorie quantique ne correspondent pas nécessairement à quoi que ce soit de familier. Le propos de la théorie quantique doit être de prévoir des grandeurs directement observables, telles que la couleur de la lumière émise par des atomes d'hydrogène. Il ne faut pas s'attendre à obtenir quelque image mentale satisfaisante du fonctionnement interne de l'atome, par exemple la position ou la vitesse de l'électron sur une orbite, car d'une part cela n'est pas nécessaire, et cela peut même être impossible. D'un seul coup, Heisenberg élimine la prétention selon laquelle le fonctionnement de la Nature devrait nécessairement concorder avec le sens commun. Ce n'est pas qu'une théorie du monde subatomique n'ait pas à retrouver les résultats de notre expérience quotidienne, concernant le mouvement des objets de grande taille, les balles de tennis ou les avions. Il convient seulement, si les observations expérimentales

4. Werner Heisenberg, « Réinterprétation en théorie quantique de relations cinématiques et mécaniques » (Trad. B. Escoubès), dans José Leite Lopes, Bruno Escoubès, *Sources et évolution de la physique quantique : Textes fondateurs (EDP Sciences)*

l'exigent, d'abandonner le préjugé selon lequel, à l'échelle de l'atome ou de ses composants, tout devrait se passer comme avec des modèles réduits d'objets ordinaires.

S'il ne fait aucun doute que la théorie quantique est d'un maniement délicat, alors il ne fait strictement aucun doute que l'approche de Heisenberg est d'un maniement extrêmement délicat… Laissons à Steven Weinberg, lauréat du prix Nobel, l'un des plus grands physiciens vivants, le soin de donner son appréciation du mémoire de Heisenberg de 1925 :

> *« Si le lecteur ou la lectrice reste perplexe devant le travail de Heisenberg, qu'il ou elle sache que d'autres sont dans le même cas. J'ai tenté plusieurs fois de lire l'article que Heisenberg a écrit au retour de l'île d'Heligoland et, même si je crois que je comprends la mécanique quantique, je n'ai jamais saisi les raisons d'Heisenberg pour enchaîner les étapes mathématiques de cette publication. Les physiciens théoriciens dans leurs travaux les plus profonds ont tendance à jouer l'un des deux rôles suivants : ils sont soit des sages, soit des magiciens… Il n'est généralement pas difficile de comprendre les articles des physiciens-sages, mais ceux des physiciens-magiciens sont souvent incompréhensibles. En ce sens, le mémoire de Heisenberg de 1925 était pure magie. »*

La philosophie de Heisenberg, cependant, n'est pas « pure magie ». Elle est simple, et elle est au cœur de notre approche dans ce livre : le propos d'une théorie de la Nature est de prévoir les valeurs de quantités qui pourront être comparées à des résultats expérimentaux. Il ne s'agit pas de trouver une théorie en adéquation avec notre perception générale du monde. Pour notre part, bien que nous adoptions la philosophie de Heisenberg, nous aurons

la chance d'aborder plus tard dans ce livre l'approche plus transparente de Richard Feynman du monde quantique.

Nous avons utilisé le mot « théorie » assez librement dans les pages précédentes et, avant de continuer à construire la théorie quantique, il serait utile d'examiner en détail un exemple moins complexe. Une bonne théorie scientifique implique un ensemble de règles définissant ce qui peut ou non se produire dans un certain domaine. Elle doit permettre de faire des prévisions susceptibles d'être confrontées à l'observation. Si elles se révèlent fausses, la théorie est mauvaise et doit être remplacée. Si elles s'avèrent en accord avec l'observation, la théorie a simplement survécu à ce test ; car aucune théorie n'est « vraie », dans le sens où il doit toujours être possible de la mettre en défaut. Comme le biologiste Thomas Huxley l'a écrit : « La science est du bon sens organisé, où mainte belle théorie a été mise à mort par un vilain fait. » Toute théorie qui ne se prête pas à la réfutation n'est pas une théorie scientifique – en fait même, on peut aller jusqu'à affirmer qu'elle est dépourvue de toute information. C'est là ce qui différencie les théories scientifiques de simples questions d'opinion. D'ailleurs, le mot « théorie » lui-même n'a pas la même signification en science et dans le langage courant, où il connote souvent un certain degré de spéculation abstraite. Les théories scientifiques peuvent être purement spéculatives, au stade où elles n'ont pas encore été confrontées aux faits, mais une théorie établie est nécessairement soutenue par un grand nombre de preuves expérimentales. Les scientifiques s'efforcent de développer des théories englobant un éventail aussi large que possible de phénomènes, et les physiciens en particulier sont guidés par la perspective de décrire tout ce qui se passe dans le monde matériel, avec un minimum de règles.

Un exemple de bonne théorie, disposant d'une large gamme d'applications, est la théorie de la gravitation d'Isaac Newton, publiée le 5 juillet 1687 dans son traité *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. C'est la première théorie scientifique moderne, et même si, par la suite, elle s'est montrée inexacte dans certaines circonstances particulières, sa validité est si bonne qu'on l'utilise encore aujourd'hui. Ce n'est qu'en 1915 qu'une théorie plus précise de la gravitation, la relativité générale, fut développée par Einstein.

Une seule équation suffit pour représenter la théorie de la gravitation de Newton :

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Selon votre degré de familiarité avec les notations mathématiques, une telle équation vous paraîtra élémentaire ou complexe. Nous aurons d'autres occasions de rencontrer des équations, et nous vous suggérerons de sauter allègrement les passages qui vous paraissent difficiles, car nous nous efforcerons systématiquement d'exposer les idées clés indépendamment des mathématiques. En revanche, il est nécessaire d'avoir recours aux formules, car elles permettent de montrer pourquoi les choses sont ce qu'elles sont. Sans formules, il nous faudrait recourir à l'attitude du physicien-gourou, capable de faire surgir des idées profondes du néant, or aucun des auteurs ne se sentirait à l'aise dans le rôle de gourou.

Maintenant, revenons à l'équation de Newton. Imaginez une pomme, par un après-midi d'été, à peine accrochée à sa branche. Si l'on en croit la légende, c'est en réfléchissant à la cause de la chute de cette pomme mûre sur sa tête, que Newton fut mis sur la piste de sa théorie. Newton se dit que la pomme était soumise à la force de gravité, qui l'attirait

vers le sol ; cette force est symbolisée par F dans l'équation. L'équation permet donc de calculer la force exercée sur la pomme, à condition de préciser la signification des variables figurant dans le membre droit de l'équation. Le symbole r représente la distance entre le centre de la pomme et le centre de la Terre. C'est r^2 qui figure dans la formule, car Newton a découvert que la force dépend du carré de la distance entre les objets : si on double la distance, la force gravitationnelle est divisée par 4 ; si on triple la distance, elle diminue d'un facteur 9, et ainsi de suite. La force est inversement proportionnelle au carré de la distance. Le symbole m_1 représente la masse de la pomme et m_2 celle de la Terre. La force d'attraction gravitationnelle entre deux objets est donc proportionnelle au produit de leurs masses. Cela soulève alors la question : qu'est-ce que la masse ? C'est une question intéressante en elle-même, et pour utiliser la réponse la plus profonde disponible aujourd'hui, il nous faudra attendre d'étudier la particule quantique connue sous le nom de boson de Higgs. Pour l'instant, contentons-nous de dire que la masse mesure la quantité de matière contenue dans quelque chose ; la Terre est plus massive que la pomme. Telle quelle, cette définition est tout à fait insuffisante ; heureusement, Newton a également établi les trois lois du mouvement – les préférées de tous les apprentis physiciens… or la deuxième offre un moyen de mesurer la masse d'un objet indépendamment de la loi de la gravitation. Rappelons ces lois :

1) Chaque objet reste dans son état initial, au repos, ou en mouvement rectiligne uniforme, sauf s'il est soumis à une force ;

2) Un objet de masse m soumis à une force F subit une accélération a. L'équation s'écrit :

$$F = ma$$

3) Pour chaque action, il y a une réaction égale et opposée.

Ces trois lois de Newton fournissent un cadre pour décrire le mouvement des corps sous l'action d'une force. La première loi décrit ce qui arrive à un objet lorsqu'aucune force n'agit : l'objet reste immobile ou se déplace en ligne droite à vitesse constante. Plus tard, nous rechercherons un énoncé équivalent pour les particules quantiques, et ce n'est pas gâcher l'histoire que d'en révéler la fin : les particules quantiques ne restent jamais en place – elles sautent partout, même en l'absence de force. En fait, la notion même de « force » ne figure pas en théorie quantique, et ainsi la deuxième loi de Newton n'y a plus de sens. Soit dit en passant, cela ne signifie pas que les lois de Newton sont à rejeter parce qu'elles ne sont pas totalement exactes. Elles sont adéquates dans de nombreux cas, mais pas pour décrire les phénomènes quantiques. Les lois quantiques remplacent les lois de Newton et donnent une description plus précise du monde. La physique classique se déduit de la description quantique, et il est important de réaliser que la situation ne se résume pas à : « théorie de Newton pour le domaine macroscopique, et théorie quantique pour le microscopique » mais par : « théorie quantique dans tous les domaines ».

La troisième loi de Newton (loi de l'action et de la réaction) ne nous concerne pas directement ici, mais elle mérite un commentaire en passant. Selon cette loi, les forces agissent par paires, de directions opposées ; lorsque nous sommes debout, nos pieds exercent une pression sur la Terre, et celle-ci réagit en les repoussant. Dans un système « fermé », la somme des forces est nulle, ce qui signifie que la quantité de mouvement totale du système est conservée. Nous allons utiliser la notion de quantité de mouvement

(on emploie aussi le terme d'impulsion) tout au long de ce livre ; pour une particule, elle est définie comme le produit de la masse de la particule par sa vitesse : $p = mv$. Il faut noter que la conservation de la quantité de mouvement possède encore du sens en théorie quantique, même si l'idée de force n'en a plus.

Intéressons-nous pour l'instant à la deuxième loi de Newton. Selon l'équation $F = ma$, en appliquant une force connue à un corps quelconque et en mesurant l'accélération qui en résulte, on peut déduire la masse du corps, comme rapport de la force à l'accélération ; ce qui suppose à son tour de savoir définir la force, mais ceci n'est pas une question si difficile. Une façon simple (même si elle n'est pas très précise, ni pratique) consisterait à mesurer une force en fonction d'une traction exercée par une chose standardisée, disons une tortue de corpulence moyenne par exemple. Considérons la traction exercée par cette tortue, marchant en ligne droite avec un harnais attaché à l'objet tiré. Nous pourrions appeler notre tortue « Tortue SI », homologuée par le Système International d'unités, et la conserver avec toutes les précautions possibles au Bureau International des Poids et Mesures, au pavillon de Breteuil à Sèvres. Deux tortues attelées exerceraient le double de la force unité, trois le triple et ainsi de suite. Nous pourrions alors exprimer toute poussée ou traction en termes de Tortues SI.

Étant donné ce système – suffisamment ridicule pour être agréé par tout comité international de normalisation[5]– on peut simplement tirer un objet avec une tortue

5. Mais ce n'est pas si ridicule, quand on se souvient qu'il existe une unité classique de puissance, le cheval-vapeur, qui possède toute une série de variantes : le cheval-vapeur électrique, les chevaux fiscaux, etc.