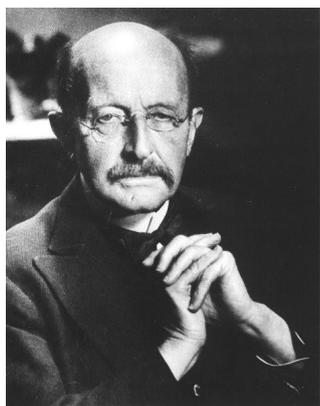


## La naissance de la Physique Quantique

Il existe une manière canonique de raconter la genèse de la physique quantique. C'est celle qui se trouve en introduction de la plupart des manuels d'enseignement. On commence par dire que le 14 décembre 1900, le physicien allemand Max Planck a lu devant l'Académie des sciences de Berlin un mémoire qui résolvait, grâce à une hypothèse révolutionnaire, le « problème du corps noir ».



Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947)

Qu'est-ce qu'un corps noir ? Un objet idéal, qui n'existe donc que sous forme d'approximations, dans lequel les interactions entre la matière et le rayonnement électromagnétique (la lumière) sont suffisamment nombreuses pour qu'il s'instaure un équilibre entre l'énergie sous forme de matière et sous forme de rayonnement. On peut alors définir la température d'un tel objet. Et en quoi consistait le « problème du corps noir » ? A la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, les physiciens cherchaient à expliquer les caractéristiques du rayonnement lumineux émis par les corps qu'on chauffe, qui passent au rougeâtre d'abord, puis au rouge vite, ensuite au jaune, puis au blanc, au fur et à mesure que leur température augmente (« température de couleur »).

Or, expliquent les manuels, les calculs classiques à propos de ces objets (dont le comportement est très proche de celui d'un corps noir) ne donnaient pas un résultat conforme aux observations ; pire, ils faisaient apparaître une grandeur infinie : la quantité d'énergie émise à une fréquence lumineuse donnée était censée augmenter avec la fréquence, de sorte que l'énergie totale rayonnée devait être infinie. Plus les mesures et les calculs se faisaient précis, plus cette contradiction, la fameuse « catastrophe ultraviolette », fut jugée insupportable.

Pour résoudre ce paradoxe, Planck finit par postuler que, contrairement à ce que les physiciens croyaient alors, les échanges d'énergie entre le rayonnement et la matière ne peuvent se faire que par paquets discontinus d'énergie, les quanta. Ces paquets sont d'autant plus importants que la fréquence est plus élevée : une lumière de fréquence  $\nu$  n'échange de l'énergie qu'en payant avec des « pièces de monnaie » qui sont des multiples entiers d'un quanta fondamental  $h\nu$  où  $h$  est une nouvelle constante de la physique, la constante de Planck.

$$h = 6,626\ 068\ 96 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

Cette hypothèse de quantification, au sujet de laquelle on s'empresse d'ajouter que Planck lui-même éprouvait la plus grande réticence, avait la vertu de produire un résultat qui s'accordait parfaitement avec les mesures expérimentales. Pour finir, la plupart des manuels précisent que Planck ne sut pas trop quel sens il convenait de donner à sa découverte, qu'il considéra longtemps comme un simple « truc ». Ce détail n'est toutefois jamais invoqué pour remettre en cause le fait principal, qui tient en ce que Planck signa là, de façon parfaitement consciente, l'acte de naissance de la physique quantique.

Mais cette vulgate est-elle vraie ? Pas complètement...

Car lorsqu'on regarde les choses de près, notamment les motivations de Planck s'intéressant au corps noir, on découvre qu'en réalité la genèse de la physique quantique n'est pas sans lien avec un autre problème qui se posait à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, celui du « paradoxe de la réversibilité » : dès lors que toutes les équations fondamentales de la physique sont réversibles (c'est-à-dire qu'elles ne font aucune distinction formelle entre passé et avenir), comment se fait-il que la plupart des phénomènes qui nous entourent soient irréversibles ? Et qu'en définitive, contrairement à ce qui est souvent répété, la naissance de la physique quantique doit moins à une faillite de la physique classique – que la catastrophe ultraviolette aurait incarnée – qu'à la réflexion menée par Planck à propos du Second Principe de la Thermodynamique<sup>1</sup>.

Le futur père de la physique quantique était littéralement fasciné par ce principe auquel il avait consacré sa thèse de doctorat, soutenue en 1879. Son seul et unique but fut d'essayer de comprendre l'irréversibilité des phénomènes macroscopiques à partir de la seule loi de croissance de l'entropie, considérée comme une grandeur fondamentale.

*L'entropie d'un système est une grandeur qui permet de caractériser sa capacité à subir des transformations spontanées : plus grande est la valeur de l'entropie, plus faible est la capacité de ce système à se transformer. Le Second Principe de la Thermodynamique précise que l'entropie d'un système fermé ne peut qu'augmenter au cours du temps. Cela signifie qu'en évoluant, il perd nécessairement de sa capacité à évoluer davantage. Un système fermé tend donc, naturellement, vers un état d'entropie maximale, dans lequel toute transformation spontanée lui deviendra impossible.*

Sa démarche était originale : Planck croyait en effet tellement au caractère fondamental du second principe qu'il éprouvait de la répugnance tant pour l'interprétation statistique de la thermodynamique, qui avait été proposée en 1872 par le physicien autrichien Ludwig Boltzmann (1844–1906)<sup>2</sup>, que pour l'hypothèse atomique, qui lui était sous-jacente (Boltzmann montrait que si l'on suppose que la matière est constituée d'atomes en très grand nombre, alors les lois de la thermodynamique peuvent être ramenées à celles de la mécanique).



Ludwig Boltzmann (1844-1906)

En 1883, il écrit : « En dépit des grands succès remportés par la théorie atomique jusqu'à présent, il faudra en dernier ressort l'abandonner au profit de l'hypothèse d'une matière continue ». Son attitude à l'égard de l'hypothèse atomique changea toutefois quelque peu en 1890, quand il se rendit compte qu'elle fournissait un principe unificateur particulièrement efficace. Il continua cependant d'ignorer la théorie statistique de Boltzmann, se contentant d'une thermodynamique macroscopique : l'entropie était, selon lui, un concept fondamental qui, de ce seul fait, n'avait pas à être interprété en termes de grandeurs microscopiques, telles les vitesses et les positions

<sup>1</sup> La thermodynamique est l'étude des transformations de l'énergie sous ses formes les plus diverses : travail, chaleur, mais aussi énergie de liaison chimique, énergie de cohésion des solides, énergie de rayonnement...

<sup>2</sup> Le discrédit jeté par la communauté scientifique sur les travaux théoriques de Boltzmann conduisit celui-ci sur une profonde dépression qui le mena jusqu'au suicide. Sa tombe porte une épitaphe originale, sa définition de l'entropie, qui constitue aujourd'hui l'un des fondements de la physique statistique dont il est le père.

d'hypothétiques atomes, ni même rapproché d'elles. Dès lors, ce qu'il cherchait à montrer, c'est que l'irréversibilité des phénomènes que nous observons à notre échelle est liée à l'interaction de la matière avec la lumière, non à des effets statistiques, et il pensait que l'étude du corps noir était le meilleur moyen de le prouver.



*Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887)*

L'étude du spectre du corps noir, c'est-à-dire de la distribution de sa puissance lumineuse sur les différentes fréquences possibles, avait débuté en 1859 avec les travaux du physicien allemand Gustav Kirchhoff montrant que le second principe de la thermodynamique appliqué à un rayonnement à l'équilibre thermique aboutissait à un spectre ne dépendant que de la température (et pas du tout du matériau constituant le corps noir). A partir de ce moment là, le rayonnement du corps noir apparut comme un phénomène dont l'étude pourrait conduire à l'identification de lois universelles. Pour cette raison, dans les années 1890, de plus en plus de physiciens s'y intéressèrent. Planck, bien sûr, fut l'un d'entre eux. Persuadé que les équations de Maxwell (qui décrivent l'ensemble des phénomènes électromagnétiques) font une distinction entre le passé et l'avenir, il en chercha d'abord l'explication du côté de l'électromagnétisme. Mais, en 1897, Boltzmann lui expliqua que cet argument ne tenait pas : les équations de Maxwell demeurent identiques à elles-mêmes lorsqu'on renverse le sens du cours du temps, de sorte qu'il y a réversibilité parfaite pour l'ensemble des processus qui sont sous leur coupe. Ce que Planck finit par admettre.



*Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien (1864-1928)*

En 1893, le physicien allemand Wilhelm Wien parvint à montrer que l'on pouvait calculer la forme générale du spectre du corps noir, désigné par  $u(\nu, T)$  où  $\nu$  est la fréquence et  $T$  la température, à partir d'arguments purement thermodynamiques. En 1896, il en proposa une forme particulière,

$$u(\nu, T) = \frac{\alpha \nu}{\exp\left(\frac{\beta \nu}{T}\right)}$$

Où  $\alpha$  et  $\beta$  sont deux constantes déterminées empiriquement. Planck ne se satisfait pas de cette formule, car elle n'avait pas de véritable fondement théorique. Même correctes, les lois empiriques ne l'intéressaient guère. Ce qu'il voulait, c'était mettre au jour les véritables invariants sur lesquels s'appuient les lois physiques. Il se posa donc la question suivante : comment parvenir à faire dériver la loi de Wien de principes fondamentaux ? En 1899, il élaborait un calcul permettant de quantifier l'entropie d'un « oscillateur » (c'est-à-dire d'un élément de matière susceptible d'émettre et d'absorber du rayonnement électromagnétique) de façon à aboutir à la formule que Wien venait de proposer. Cette formule acquit ainsi un statut plus fondamental. Planck en était d'autant plus satisfait qu'elle était en parfait accord avec les données expérimentales. C'est du moins ce qu'on crut dans un premier temps. Car, bien vite, des mesures faites à Berlin révélèrent qu'en réalité cette « formule de Wien-Planck » ne marchait pas pour les basses fréquences. Intrigué, Planck se remit au travail et proposa une nouvelle expression pour l'entropie d'un oscillateur, ce qui l'amena à une nouvelle formule pour le spectre du corps noir,

$$u(\nu, T) = \frac{\alpha \left(\frac{\nu}{c}\right)^3}{\exp\left(\frac{\beta \nu}{T}\right) - 1}$$

Le 19 octobre 1900, devant les membres de l'Académie des sciences de Berlin, Planck présenta cette formule, qui avait le mérite de se confondre avec la formule de Wien pour les grandes fréquences, et aussi de parfaitement s'accorder avec les mesures à basse fréquence, ainsi que Heinrich Rubens le vérifia dans la nuit même qui suivit l'exposé de Planck.

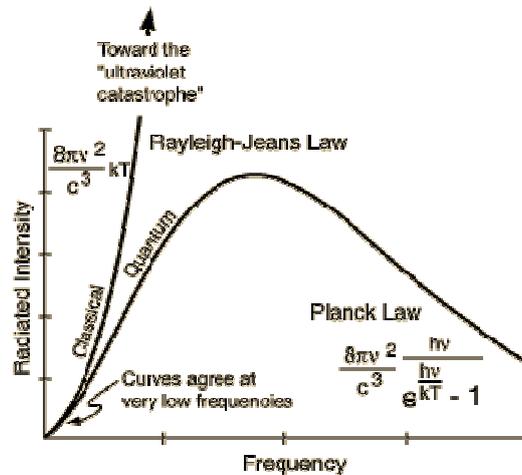
Le point important à noter ici est que, lors de l'élaboration de sa formule, Planck ne fit aucun usage d'une quelconque quantification de l'énergie, et encore moins de l'interprétation probabiliste de l'entropie que proposait Boltzmann. Cette seconde étape, vécue douloureusement par Planck, n'advint qu'au cours des deux mois suivants. Elle aboutit à la nouvelle formule que Planck présentera à la même Académie, le 14 décembre 1900,

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi h \left(\frac{\nu}{c}\right)^3}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1}$$

En plus de la célérité  $c$  de la lumière dans le vide et de la constante de Boltzmann  $k_B$ , cette formule contient une nouvelle constante fondamentale,  $h$ , qui allait devenir l'emblème du monde quantique. Avant d'évoquer le travail éprouvant qui amena Planck jusqu'à ce résultat, il faut dire un mot de la loi dite « de Rayleigh », dont on persiste à dire dans les manuels d'enseignement qu'elle déclencha presque à elle seule la révolution quantique. En juin 1900, six mois avant que Planck ne propose sa propre formule, le physicien anglais John Strutt, lord Rayleigh montra que la physique classique appliquée aux oscillateurs d'un corps noir donne une densité qui croît comme le carré de sa fréquence. Ce résultat conduisait, après intégration sur la fréquence, à une énergie totale infinie. C'est cette propriété, déjà évoquée, qui constitue la « catastrophe ultraviolette ». A-t-elle joué un rôle dans le travail du physicien allemand, conformément à ce que l'on raconte ? Non. Pourquoi ? Parce que lord Rayleigh s'était appuyé sur le postulat selon lequel l'énergie d'un corps noir est également distribuée entre tous les modes de rayonnement possibles (ce qu'on appelle l'équipartition de l'énergie). Or, Planck pensait que ce postulat n'avait rien de fondamental. Il n'a nullement été tourmenté par la catastrophe ultraviolette, qui n'a donc pas joué de rôle décisif dans la genèse de la physique quantique.



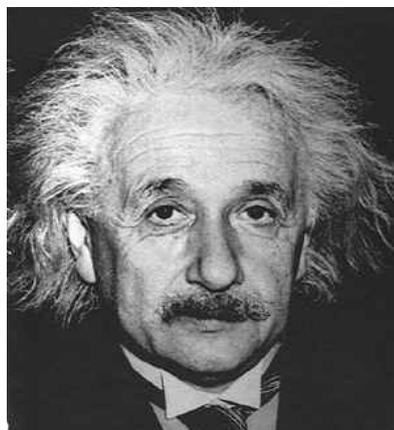
John William Strutt Rayleigh (1842-1919)



James Hopwood Jeans (1877-1946)

Mais revenons à octobre 1900 : Planck comprend que l'expression qu'il a proposée pour l'entropie d'un oscillateur a un statut très fragile. Pour le renforcer, il se tourne, à l'issue d'un « acte de désespoir », vers la conception probabiliste de l'entropie, qu'il avait si longtemps ignorée. Il pensait que la définition combinatoire de l'entropie proposée par Boltzmann aboutirait peut-être à un résultat intéressant. Il « joua » donc avec cette idée, l'adopta « pour voir » ce qu'elle donnerait mais, au fond de lui-même, il ne se convertit pas à la conception statistique de l'entropie, donc à l'interprétation probabiliste de l'irréversibilité, car il demeurait persuadé que la loi de l'entropie était absolue, et donc que son fondement était non probabiliste. Il introduisit seulement ce qu'il appela des « éléments d'énergie », c'est-à-dire l'idée que l'énergie totale des oscillateurs du corps noir,  $E$ , est divisée en portions d'énergie  $\varepsilon$ , proportionnelle à leur fréquence ( $\varepsilon = h\nu$ ), le facteur de proportionnalité étant précisément la constante de Planck  $h$ .

La naissance de la physique quantique apparaît ainsi comme une conséquence indirecte du paradoxe de la réversibilité des équations de la mécanique, que Planck a voulu résoudre hors des sentiers battus avant d'emprunter à Boltzmann, par simple curiosité, certains de ses arguments et certains de ses outils statistiques. La suite de l'histoire allait s'accélérer. Au cours de l'année 1905, un certain Albert Einstein rédige cinq articles, dont deux constituent des jalons importants de l'histoire de la physique quantique.



Albert Einstein (1879-1955)

Le premier d'intitule « *Sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière* ». Prenant au sérieux les calculs de Planck, Einstein y fait l'hypothèse que la lumière n'est pas un phénomène aussi continu qu'on a pu le penser, car elle est véhiculée par des quanta, c'est-à-dire des sortes de grains lumineux dont l'énergie est proportionnelle à la

fréquence de la lumière, le rapport de proportionnalité n'étant autre que la constante de Planck. Einstein étend ainsi à la lumière elle-même des considérations que Planck n'appliquait qu'aux interactions entre lumière et matière.

Le deuxième article d'Einstein, intitulé « *Sur le mouvement des particules en suspension dans un fluide au repos impliqué par la théorie cinétique moléculaire de la chaleur* », va rapidement conduire à la preuve expérimentale de l'existence de l'atome. Einstein s'intéresse à un phénomène en apparence insignifiant : le mouvement brownien. Ce terme désigne la valse incessante des particules qui s'agitent dans un fluide : si on verse des grains de pollen dans une goutte d'eau, on observe au microscope que ces grains décrivent des trajectoire folles, apparemment guidées par le seul hasard. Einstein fait l'hypothèse que les mouvements désordonnés de ces grains, loin d'être de simples caprices, reflètent un ordre sous-jacent : ce qui les détermine secrètement, c'est l'agitation des molécules d'eau qui ne cessent de heurter les grains de pollen, les obligeant à changer sans cesse de direction. En 1908, à Paris, Jean Perrin mène des expériences qui confirment les prédictions d'Einstein. La réalité des molécules, donc des atomes, encore contestée au tout début du XX<sup>ème</sup> siècle, est ainsi définitivement établie.



Jean Baptiste Perrin (1870-1942)

Mais, rapidement, les physiciens acquièrent le pressentiment que l'atome, composé d'un noyau autour duquel tournent des électrons (à la suite de l'expérience de Rutherford, en 1911, notamment), n'est pas un objet ordinaire. En 1913, le physicien danois Niels Bohr comprend même qu'il est une entité tout à fait originale, une sorte de nouveau continent invisible, dont l'exploration va conduire à la découverte de nouvelles lois physiques. Il n'hésite pas à en proposer un modèle révolutionnaire, basé sur deux hypothèses audacieuses qui sortent complètement du cadre de la physique classique.

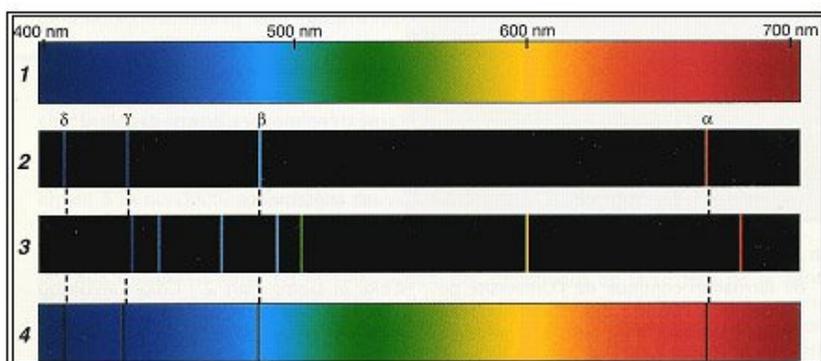


Niels Henrik David Bohr (1885-1962)

La première hypothèse consiste à dire que les électrons ne peuvent pas circuler sur n'importe quelle orbite autour du noyau. Seules certaines leur sont « autorisées », et toutes les autres « interdites ». A chacune des orbites autorisées correspond une énergie bien déterminée, qui la caractérise. Un électron dans un atome ne peut donc pas avoir n'importe quelle énergie : elle est « quantifiée ».

La seconde hypothèse concerne le rayonnement émis par l'atome. Bohr suppose que, lorsqu'un électron tourne sur son orbite (autorisée), il n'émet pas de lumière, contrairement à ce que prévoient les lois de l'électromagnétisme classique. Mais il a la possibilité de « sauter » d'une orbite à une autre, d'énergie moindre. Lorsqu'il effectue un tel saut, l'électron émet un grain de lumière qui emporte la différence d'énergie entre l'orbite de départ et celle d'arrivée. Dans ce processus, une fraction de l'énergie de l'électron se métamorphose soudainement en lumière.

Les orbites autorisées pour les électrons n'étant pas quelconques, leurs énergies respectives se répartissent sur une échelle dont les barreaux sont disposés de façon irrégulière, de sorte que le spectre du rayonnement lumineux émis par un atome n'est pas continu. Il ne contient pas toutes les fréquences. Il apparaît plutôt constitué de raies particulières, qui correspondent aux transitions de l'électron depuis une orbite autorisée vers une autre orbite autorisée. Ces raies forment une sorte de peigne aux dents irrégulières : on dit qu'un tel spectre est « discret », par opposition à « continu ».



- 1 : spectre d'un corps chauffé
- 2 : spectre d'émission de l'hydrogène atomique
- 3 : spectre d'émission de l'hélium
- 4 : spectre d'absorption de l'hydrogène atomique

Le modèle de Bohr, qui étend l'idée de quantification à la matière elle-même, remporte immédiatement un vaste succès, notamment parce qu'il rend compte de la structure en raies, de plus en plus finement mesurée par les expérimentateurs, du spectre de lumière émis par les atomes. Mais il manque de cohérence. Car, contrairement à ce qu'il énonce, on découvre que les électrons ne peuvent pas avoir de trajectoire bien définie au sein de l'atome. C'est du moins ce que stipule le « principe d'indétermination<sup>3</sup> » que le physicien allemand Werner Heisenberg énonce en 1927 : une particule comme l'électron ne peut se voir dotée simultanément d'une position et d'une vitesse bien définies, de sorte qu'on ne saurait lui assigner une orbite au sens propre. Les physiciens ne conserveront finalement du modèle de Bohr qu'une idée : les électrons d'un atome ne peuvent se trouver que dans certains états ; ces états sont caractérisés par leur énergie, et non par une trajectoire au sens classique du terme. Heisenberg, qui déclare s'intéresser à ce que les atomes font plutôt qu'à ce qu'ils sont, élabore, au printemps 1925, une représentation des atomes ne faisant appel qu'à des quantités physiques observables, par exemple les fréquences ou les intensités de la lumière qu'un atome peut émettre ou absorber. Pour décrire chacune de ces quantités, il utilise des objets mathématiques qui n'ont jamais eu d'application aussi évidente en physique : les matrices, c'est-à-dire des tableaux de nombres carrés ou rectangulaires. Ces matrices, bien qu'elles puissent sembler très abstraites, lui apparaissent mieux adaptées que les nombres ordinaires pour décrire les transitions des électrons entre les différents états d'énergie autorisés. Et il introduit une nouvelle notion, celle de « saut quantique », pour désigner le passage d'un électron d'un niveau d'énergie à un autre, avec émission d'un photon (c'est-à-dire d'un grain de lumière) emportant la différence d'énergie. Mais il ne s'agit, là encore, que d'une étape. Car, pour décrire l'atome, et plus généralement le monde à l'échelle microscopique, les physiciens vont devoir renoncer à d'illustres

<sup>3</sup> Plus souvent appelé « principe d'incertitude », mais il y va en réalité plus d'une « indétermination » que d'une « incertitude »...

credo, mettre sur pied de nouveaux concepts, parfois étranges, puis les agréger au sein d'un nouveau formalisme, celui qui va constituer ce qu'on appelle aujourd'hui la physique quantique.



*Werner Karl Heisenberg (1901-1976)*

Quelle bizarrerie... Tout en constituant une généralisation de la mécanique classique, la mécanique quantique ne peut être construite de façon indépendante de cette dernière, mais doit s'appuyer au contraire sur la limite classique pour être formulée en détails. A l'inverse, la Relativité restreinte repose sur deux postulats (et rien de plus), et conduit seule – dans la limite convenable – les mécanique de Galilée, Newton, Lagrange et Hamilton.

Les premiers pères fondateurs de la physique quantique sont honorés du prix Nobel de physique quelques années après leurs formulations (1932 pour Heisenberg, 1933 pour Dirac et Schrödinger), ce qui montre les réticences et les frilosités rencontrées par cette branche audacieuse de la physique – de par la complexité et le caractère novateur et abstrait des concepts qui ont été introduits.

La physique quantique présente aujourd'hui une cohérence remarquable, doublée d'un pouvoir explicatif incontesté : comme il est d'usage en physique, la théorie tient tant qu'elle n'est pas mise en défaut... ce qui est bien le cas de la mécanique quantique, jusqu'aux expériences (Alain Aspect, notamment) réalisées à partir des années 1980 sur les prédictions les plus paradoxales de la théorie quantique.

