Dragi Karevski

LA PHYSIQUE QUANTIQUE

Deuxième édition corrigée
4e mille

Que sais-je?

À lire également en
Que sais-je ?

COLLECTION FONDÉE PAR PAUL ANGOULVENT

Yves Gingras, *Histoire des sciences*, n° 3495.
Matteo Smerlak, *Les Trous noirs*, n° 4003.
Françoise Combes, *Le Big Bang*, n° 4123.
Grégory Chambon, *Histoire des nombres*, n° 4154.
Jean-Michel Sallese, *Les Nanotechnologies*, n° 4190.
Cédric Lewandowski, *Le Nucléaire*, n° 4212.

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

ISBN 978-2-13-089947-1
ISSN 0768-0066

Dépôt légal – 1re édition : 2024
2e édition corrigée : 2026, octobre

© Que sais-je ?/Presses Universitaires de France, 2026
5, allée de la 2e DB, 75015 Paris

Introduction

Le 14 décembre 1900, juste avant le nouveau siècle, Planck présentait ses travaux sur le rayonnement du corps noir devant la Société de physique de Berlin. En introduisant une nouvelle constante, il ouvrait la voie à la physique quantique. Einstein prit le relais avec sa théorie de l'effet photoélectrique, réhabilitant une conception corpusculaire de la lumière. Du côté atomique vinrent Bohr et son modèle d'orbites électroniques quantifiées à même d'expliquer les raies spectrales. Le prince de Broglie postula une dualité onde-corpuscule : si la lumière pouvait présenter des aspects à la fois ondulatoires et corpusculaires, pourquoi les particules matérielles n'auraient-elles pas un pendant ondulatoire ? Suivirent les pères fondateurs de Göttingen, Born, Heisenberg et Jordan, qui introduisirent la mécanique des matrices. Pauli postula un principe d'exclusion pour les électrons, suivi de très près, à Vienne, par Schrödinger, publiant sa célèbre équation en 1926, qu'il appliqua dans le même article à l'atome d'hydrogène, le plus simple de tous les atomes.

Les succès furent fulgurants et la généralisation dans le domaine relativiste, par Dirac, quasi immédiate. Von Neumann mit un peu d'ordre mathématique dans la nouvelle théorie que l'on appelait déjà mécanique quantique. Au début des années 1930, la machine était lancée et rien ne l'arrêterait plus. Des cohortes de physiciens se précipitèrent dans toutes les directions, explorant avec les outils quantiques les propriétés électroniques des solides, le magnétisme, la physique

atomique et moléculaire, développant la chimie quantique, l'optique quantique, la physique nucléaire et la physique des particules élémentaires.

Malgré ces succès, la nouvelle mécanique restait étrange. Dans une expérience de type fentes de Young, un électron passait-il réellement au travers des deux fentes ? Un chat pouvait-il être à la fois vivant et mort ?

Sous l'impulsion du positivisme logique viennois, les fondateurs, autour de Bohr, guidés par le principe d'incertitude de Heisenberg et la règle probabiliste de Born, forgèrent l'interprétation de Copenhague. Celle-ci ne tarda pas à devenir l'orthodoxie mondiale, excluant les aspects non observables de la théorie et rejetant le réalisme aux oubliettes de l'histoire des sciences. Bohr l'avait dit : la mécanique quantique était complète et donnait une description complète du monde. En somme, circulez, il n'y a rien à voir ou, dans le contexte : « *Shut up and calculate.* » La messe était dite !

Einstein ne renonça pas et, comme à son habitude, guidé par une expérience de pensée, il proposa en 1935 avec ses collègues Podolsky et Rosen un paradoxe dont la reformulation par Bell en 1964 sous la forme d'inégalités permit de trancher expérimentalement entre une vision réaliste du monde et l'interprétation orthodoxe de Copenhague. En 1981, les expériences d'Aspect violaient les inégalités de Bell et montraient de manière spectaculaire qu'il fallait renoncer *a minima* soit au principe de localité, soit au réalisme. Mais dans tous les cas le réalisme local d'Einstein fut éliminé.

L'objet de ce petit livre est de raconter cette histoire.

Nous présentons la formulation standard de la physique quantique, tout en laissant une place, modeste, à quelques interprétations alternatives. Nous terminons par l'exploration de l'intrication quantique, un des aspects les plus étonnants de la nature.

CHAPITRE PREMIER

Fiat lux

I. – Planck évite la catastrophe

Le 14 mai 2009, un lanceur Ariane 5 emporte sur orbite le satellite Planck. Sa mission est de dresser la carte la plus précise des infimes variations de température du fond diffus cosmologique. Découvert par hasard en 1964 par Arno Penzias et Robert Wilson des laboratoires Bell, le fond diffus cosmologique est le meilleur exemple de rayonnement de corps noir que l'on connaisse à ce jour. Quasi isotrope et non polarisé, né du découplage primordial entre le rayonnement et la matière, quelque 380 000 ans après le *Big Bang*, ce rayonnement électromagnétique fossile est parfaitement décrit par la loi de Planck associée à la température de 2,728 ± 0,002 kelvins.

Au moment où la température de l'univers, du fait de son expansion, est passée sous la barre des 3 000 kelvins, la recombinaison de la matière principalement sous la forme d'atomes d'hydrogène le rend d'un seul coup transparent : « *Fiat lux !* »

Les photons, jusque-là en équilibre thermique avec le plasma de matière, peuvent alors se propager librement à travers l'univers. L'expansion de l'univers se poursuivant, ces premiers témoins du découplage primordial sont peu à peu décalés vers le rouge, abaissant ainsi la température du rayonnement jusqu'aux 2,7 kelvins actuels[1].

1. Voir F. Combes, *Le Big Bang*, Paris, Que sais-je ?, 2e éd., 2024, no 4123.

Cette cosmogonie contemporaine, fille d'un prince de Sérendip, n'aurait pas vu le jour sans la matrice de la physique quantique dont la genèse est sans conteste liée à l'analyse du rayonnement électromagnétique émis par un corps incandescent.

Lorsque l'on considère la situation idéale où le corps est parfaitement capable d'absorber le rayonnement à n'importe quelle fréquence, on parle de corps noir. Sur la base d'un raisonnement thermodynamique, Gustav Kirchhoff, un siècle avant la découverte fortuite de Penzias et Wilson, en 1859, a montré que la densité d'énergie $u(T,\nu)$ rayonnée à une fréquence ν par un corps noir à la température T doit être une fonction universelle indépendante de la nature de ce corps. Wilhelm Wien, en 1894, affine l'analyse thermodynamique de Kirchhoff en considérant une cavité matérielle, en l'occurrence un four, à l'intérieur de laquelle le rayonnement électromagnétique est à l'équilibre thermique avec les parois. Il montre que la fonction universelle de Kirchhoff doit être de la forme $\nu^3 f(\nu/T)$. Sur une base empirique, il propose que la fonction f soit une simple exponentielle décroissante, $e^{-\alpha\nu/T}$ où α est une constante positive fixée par l'analyse des données expérimentales. L'accord de cette prédiction avec les données expérimentales est relativement bon sans toutefois être parfait.

En juin 1900, John William Strutt, *alias* Lord Rayleigh, fait l'hypothèse que l'on peut traiter la matière du corps noir comme si elle était composée de simples oscillateurs chargés à l'équilibre thermique entrant en résonance avec les modes électromagnétiques propres de la cavité. Ces modes sont les équivalents lumineux des ondes sonores stationnaires que l'on observe par exemple sur une corde de violon ou encore sur une peau de tambour.

Suivant les lois de la thermodynamique et de l'électromagnétisme, Rayleigh aboutit à une conclusion

catastrophique : l'énergie totale rayonnée serait infinie ! En effet, le théorème classique de l'équipartition de l'énergie implique que chaque oscillateur, indépendamment de sa fréquence d'oscillation, a une énergie moyenne U proportionnelle à la température, $U = k_B T$, où le facteur de proportionnalité k_B est la constante de Boltzmann, grandeur reliée à la constante R des gaz parfaits par le nombre d'Avogadro, $R = N_A k_B$. Prenant en compte la distribution des modes électromagnétiques dans la cavité, Rayleigh conclut que si l'on en croit les théories de l'électrodynamique et de la thermodynamique, la densité d'énergie à une fréquence donnée doit se comporter comme $u(\nu,T) \propto \nu^2 k_B T$. Si à basses fréquences la loi de Rayleigh, après correction par James Jeans, correspond bien aux données expérimentales, elle s'en éloigne totalement à haute fréquence. D'ailleurs, en sommant $u(\nu,T)$ sur toutes les fréquences on obtient le résultat absurde que l'énergie totale rayonnée par unité de volume est infinie, ce qu'on appelle la *catastrophe ultraviolette*.

Max Planck, à la fin de l'année 1900, lors d'une communication aux sessions d'automne de la Société allemande de physique, résout le problème en faisant une hypothèse audacieuse : l'énergie emmagasinée par un oscillateur n'est pas une quantité continue pouvant prendre n'importe quelle valeur. Au contraire, d'après lui, elle est donnée par un multiple entier d'une quantité élémentaire d'énergie ε. Ce quantum d'énergie ε a en outre une valeur proportionnelle à la fréquence d'oscillation ν des oscillateurs. Planck pose $\varepsilon = h\nu$, où il introduit une nouvelle constante, notée h, ayant les dimensions d'une action, c'est-à-dire d'une énergie multipliée par un temps. Cette hypothèse de quantification de l'échange d'énergie entre les oscillateurs matériels et le rayonnement électromagnétique lui permet à partir de considérations thermodynamiques de déduire

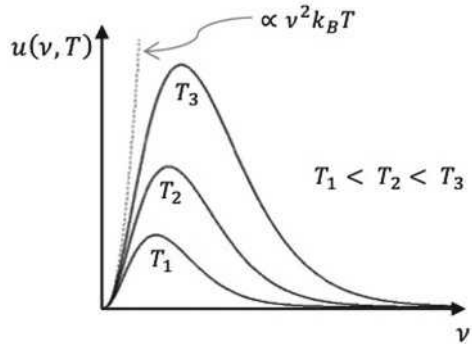
l'expression exacte de l'énergie rayonnée en fonction de la fréquence et de la température du corps noir :

$$u(\nu,T)=\frac{8\pi h}{c^3}\frac{\nu^3}{e^{\frac{h\nu}{k_BT}}-1},$$

résultat qu'il est convenu désormais d'appeler la loi de Planck. Cette fois-ci, contrairement à la formule de Rayleigh-Jeans, la loi de Planck donne bien une valeur finie à l'énergie totale rayonnée par unité de volume et permet de retrouver la loi en T^4 établie, sur une base empirique, par Josef Stefan en 1879.

En confrontant cette loi aux données empiriques, Planck déduit pour les constantes k_B et h les valeurs $k_B = 1{,}346 \times 10^{-23} J/K$ et $h = 6{,}55 \times 10^{-34} J.s$, très proches des valeurs de référence actuelles $k_B = 1{,}380649 \times 10^{-23} J/K$ et $h = 6{,}62607015 \times 10^{-34} J.s$.

Fig. 1. - **Densité d'énergie rayonnée en fonction de la fréquence et de la température du corps noir, illustrée pour trois températures différentes.** La ligne en pointillés représente la prédiction de Rayleigh-Jeans.



L'une des premières conséquences de la loi de Planck est de fixer des valeurs précises à des constantes atomiques. En effet, à partir de sa formule et connaissant la valeur de la constante des gaz parfaits, Planck peut extraire une valeur du nombre d'Avogadro dont l'inverse donne à peu près la masse en grammes de l'atome d'hydrogène. Il obtient ainsi $N_A = 6{,}17 \times 10^{23}\ mol^{-1}$, soit une masse pour l'atome d'hydrogène de $m \approx 1{,}62 \times 10^{-24}\ g$.

Puisqu'on a une idée de la masse des atomes, il devient possible d'en estimer la taille à partir de la donnée des masses volumiques des solides, moyennant l'hypothèse que dans un solide les atomes sont en contact étroit les uns avec les autres, comme des oranges sur un étal de marché. En prenant une densité typique ρ de l'ordre d'une tonne au mètre cube et une masse atomique typique m de l'ordre de 10^{-27} à $10^{-26}\ kg$, on obtient un rayon typique de l'ordre de $10^{-10}\ m$, soit environ 1 ångström.

Dans le même élan, il devient possible, à partir de la constante de Faraday, $F = N_A e$, connue à partir d'expériences d'électrolyses, de déterminer e, la charge électrique élémentaire de l'électron, particule dont l'existence a été prouvée expérimentalement par Joseph Thomson en 1897. En observant la déviation des rayons cathodiques sous l'action de champs électrique et magnétique, Thomson a également pu déduire le rapport entre la charge électrique et la masse de ces corpuscules. Connaissant la charge électrique élémentaire $e = F/N_A$, on peut, à partir des mesures de Thomson, déterminer la masse de l'électron, près de 1 800 fois plus léger que l'atome d'hydrogène.

En 1909, en suivant au microscope optique la trajectoire de gouttelettes d'huiles pulvérisées dans une chambre où règne un champ électrique, Robert Millikan et son assistant Harvey Fletcher obtiennent