

de temps et par unité d'intervalle de fréquence voisine d'une fréquence ν donnée ; le second est la fraction de l'énergie incidente absorbée par le corps étudié dans cet intervalle de fréquence. Tous deux dépendent de la fréquence ν et de la température du corps, mais aussi de sa nature, en particulier de sa surface. La loi de Kirchhoff stipule que, dans le cas d'un corps en équilibre thermique avec le rayonnement qui l'entoure, le rapport entre son pouvoir d'émission et son coefficient d'absorption est une fonction universelle (la fonction de distribution), qui reste la même quel que soit le corps : elle ne dépend que de la fréquence ν et de la température du corps. Kirchhoff lance alors un défi intellectuel à la communauté scientifique : trouver l'expression de cette fonction de distribution. De nombreux physiciens s'y intéressent, mais sans résultat, à cause des difficultés techniques que posaient les expériences.

L'HYPOTHÈSE DES QUANTA

En octobre 1900, Planck propose une expression de la fonction de distribution de Kirchhoff, fondée sur les derniers résultats expérimentaux de Rubens. Cette loi de rayonnement de Planck, bien qu'elle n'explique rien, va révolutionner la physique. Le physicien se met alors à chercher une théorie pour justifier l'équation qu'il a conçue. Il reprend les résultats de Kirchhoff. Celui-ci avait introduit la notion de « corps noir idéal », un corps parfaitement absorbant, dont le coefficient d'absorption serait égal à 1, et le pouvoir d'émission à la fonction de distribution. Il avait montré que cette fonction est la même pour un corps noir et pour une telle cavité isolée à la même température : le rayonnement émis par un corps noir est donc identique à celui qui se trouverait en équilibre dans une telle cavité. Planck suppose que ce dernier interagit avec des oscillateurs microscopiques (dont il n'explique pas la nature), qui vibrent sur la surface des parois, absorbant et réémettant de l'énergie indépendamment du matériau : on sait aujourd'hui que les atomes des parois se comportent ainsi, mais, à cette époque, Planck ne croit pas à leur existence.

Malgré de multiples tentatives, il n'arrive pas à ses fins. Son échec le conduit finalement, selon ses propres termes, à « un acte de désespoir » : il utilise la statistique de Boltzmann, son adversaire intellectuel, atomiste convaincu. En 1877, Ludwig Boltzmann avait relié l'entropie d'un système physique (liée à son

désordre) dans un état donné avec la probabilité qu'il soit réellement dans cet état, au moyen de la constante qui porte son nom. Pour calculer cette probabilité, il avait eu recours à une méthode de calcul fondée sur l'hypothèse selon laquelle l'énergie n'est pas continue (on dit qu'elle est discrète). Planck utilise la formulation probabiliste de l'entropie de son rival, ce qui le conduit à l'hypothèse des quanta d'énergie.

À l'époque, Planck ne se rend pas compte des conséquences qu'aura cette hypothèse sur la physique. D'ailleurs, plusieurs années après l'avoir formulée, il continue de la considérer comme une

solution provisoire. L'hypothèse des quanta ne commence à être acceptée qu'à partir de 1905, quand Albert Einstein l'utilise pour expliquer l'effet photoélectrique, ce qui lui vaudra le prix Nobel, en 1922. La communauté scientifique se « convertit » alors à la discontinuité : Einstein se sert à nouveau de l'hypothèse des quanta en 1907 pour élaborer une théorie des chaleurs spécifiques, suivi en 1912 par Peter Debye, Max Born et Theodor von Karman. En 1913, Niels Bohr la reprend pour élaborer son modèle atomique, que lui-même et Arno Sommerfeld améliorent en 1915 et 1916. L'hypothèse des quanta



2. Max Planck était aussi un pianiste émérite.

n'est complètement intégrée à la physique qu'en 1925, avec l'avènement de la mécanique quantique et la statistique de Bose-Einstein.

LE CHEMINEMENT D'UNE THÉORIE

Dans l'expression de sa loi du rayonnement, Planck introduit deux constantes, la constante de Boltzmann k et la constante de Planck h . Leur utilisation dans ce contexte sera aussi lourde de conséquences que l'hypothèse des quanta. Bien que ces constantes aient déjà été découvertes respectivement par Boltzmann et par Wilhelm Wien, en 1893, pour tenter de résoudre le problème du corps noir, elles acquièrent une signification nouvelle et plus profonde avec les travaux de Planck. Celui-ci montre que k est le rapport entre la constante des gaz R et le nombre d'Avogadro N (le nombre de molécules contenues dans une mole). La constante R était déjà connue à l'époque, ainsi que k , donnée par les mesures expérimentales du spectre électromagnétique du corps noir, Planck calcule la valeur du nombre d'Avogadro N et du «quantum élémentaire de matière», la masse de l'atome d'hydrogène.

Avec N et la constante F de la loi de Faraday pour les électrolytes ($F = Ne$, où e est la charge de l'électron), Planck en déduit la valeur du «quantum élémentaire d'électricité», c'est-à-dire de e . Dès 1900, il considère que le calcul de ces quantités est «une conséquence importante de la théorie développée, qui rend possible une vérification expérimentale ultérieure». Il ajoute que ces «relations additionnelles» seront utiles aux autres domaines de la physique et à la chimie, car les grandeurs qu'elle met en jeu peuvent difficilement être déterminées par des méthodes directes.

LA VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE

Planck attribue une importance particulière à la détermination des valeurs précises des constantes h et k , car elles établissent un lien quantitatif entre la théorie électromagnétique et la théorie atomique. Ernest Rutherford et Hans Wilhelm Geiger apportent la première vérification expérimentale de la valeur du quantum d'électricité prévue par Planck. De leurs expériences sur les particules alpha, en 1908, ils déduisent une mesure de leur charge électrique ($2e$), en accord avec la valeur trouvée par Planck pour e . Puis, en 1914, James Franck et Gustav Hertz déduisent h du rapport h/e (comme le feront tous leurs successeurs, à moins qu'ils n'utilisent le rapport h/e^2). Les

physiciens excitent un atome en le bombardant d'électrons d'énergie eV , où V est le potentiel électrique qui accélère les électrons. Lorsque l'atome passe de l'état fondamental au premier état excité, il émet un rayonnement de fréquence ν . D'après le modèle de Bohr, l'énergie de ce rayonnement $h\nu$, est égale à l'énergie du faisceau d'électrons incidents eV , de sorte qu'il suffit de mesurer ν pour pouvoir calculer h/e . On peut appliquer le même raisonnement au passage d'un atome à un état excité d'énergie supérieure ou à un état ionisé.

En 1916, Robert Millikan utilise un autre moyen pour déterminer h . Il vérifie expérimentalement la théorie de l'effet photoélectrique d'Einstein, en mesurant l'énergie cinétique du photo-électron émis en fonction de plusieurs fréquences ν . Comme Einstein l'avait prévu, la relation entre ces deux grandeurs est linéaire, et la pente de la droite donne la valeur de h/e . Célèbre pour ses mesures de la charge de l'électron, en 1909, Millikan doutait de la validité de l'hypothèse des quanta de lumière, comme l'immense majorité des physiciens de l'époque. Une description corpusculaire des ondes électromagnétiques était si novatrice que, même après sa confirmation expérimentale par Millikan, l'idée des quanta de lumière mit plusieurs années à être acceptée.

Depuis, la précision des mesures a progressivement augmenté. Dans les années 1950, on utilisait encore des expériences liées à la dynamique des électrons et des photons, où, pour déduire les valeurs de h/e des quantités mesurées, on utilisait des expressions fondées sur la théorie de l'électrodynamique quantique. La situation change avec la découverte de l'effet Josephson, en 1962 et de l'effet Hall quantique en 1980, dans le cadre de recherches en physique des matériaux à basse température. Les mesures de h que l'on en a déduit alors sont les plus précises à ce jour.

Giulio PERUZZI est professeur d'histoire des sciences à l'Université de Padoue.

Martin KLEIN, *Planck, Entropy and Quanta, 1901-1906*, in *The Natural Philosopher*, n° 1, pp. 83-108, 1963.

Hans KANGRO, *Early History of Planck's Radiation Law*, Taylor & Francis Ltd, Londres, 1976.

Thomas S. KUHN, *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894-1912*, Clarendon Press, Oxford, 1978.

Brian W. PETLEY, *The Fundamental Physical Constants and the Frontier of Measurement*, Adam Hilger Ltd, Bristol et Boston, 1985.
