

Le second nuage de Lord Kelvin

Gilles Montambaux (gilles.montambaux@universite-paris-saclay.fr)

Laboratoire de Physique des Solides (UMR 8502 CNRS et Université Paris-Saclay)

1 rue Nicolas Appert, Bât. 510, 91405 Orsay Cedex

Le 27 avril 1900, William Thomson, plus connu sous le nom de Lord Kelvin, prononce un discours visionnaire devant la Royal Institution of Great Britain. Il présente deux problèmes non résolus qui lui semblent fondamentaux et incontournables au tournant du XX^e siècle et qu'il compare à deux nuages obscurcissant notre compréhension de la physique.

La dissipation de ces deux nuages nécessitera la relativité restreinte et la mécanique quantique.

Cet article revient ici sur le second nuage qui, contrairement à ce qu'on lit souvent, ne concerne pas le rayonnement du corps noir, mais la chaleur spécifique des molécules polyatomiques. Pour cela, cet article propose de replacer le discours de Kelvin dans son contexte de l'époque, de le situer dans la succession des étapes qui, de Kirchhoff au premier Congrès Solvay en 1911, ont jalonné le cheminement de cette extraordinaire aventure intellectuelle que fut la naissance de la mécanique quantique.

On verra aussi que la motivation du travail de Max Planck n'était pas de résoudre le problème de la « catastrophe ultraviolette ».

« La physique est définitivement constituée avec ses concepts fondamentaux ; tout ce qu'elle peut désormais apporter, c'est la détermination précise de quelques décimales supplémentaires. Il y a bien deux petits problèmes : celui du résultat négatif de l'expérience de Michelson et celui du corps noir, mais ils seront rapidement résolus et n'altèrent en rien notre confiance. »

Cette phrase, souvent citée mais jamais référencée, est faussement attribuée à Lord Kelvin (fig. 1). On la trouve dans la littérature, dans l'introduction de manuels d'enseignement et sur internet. Lorsqu'elle est référencée, c'est à la conférence prononcée à la Royal Institution of Great Britain, "Nineteenth century clouds over the dynamical theory of heat and light", le 27 avril 1900 et publiée en juillet 1901, où Kelvin expose effectivement deux problèmes non résolus, mais sur un tout autre ton : "The beauty and

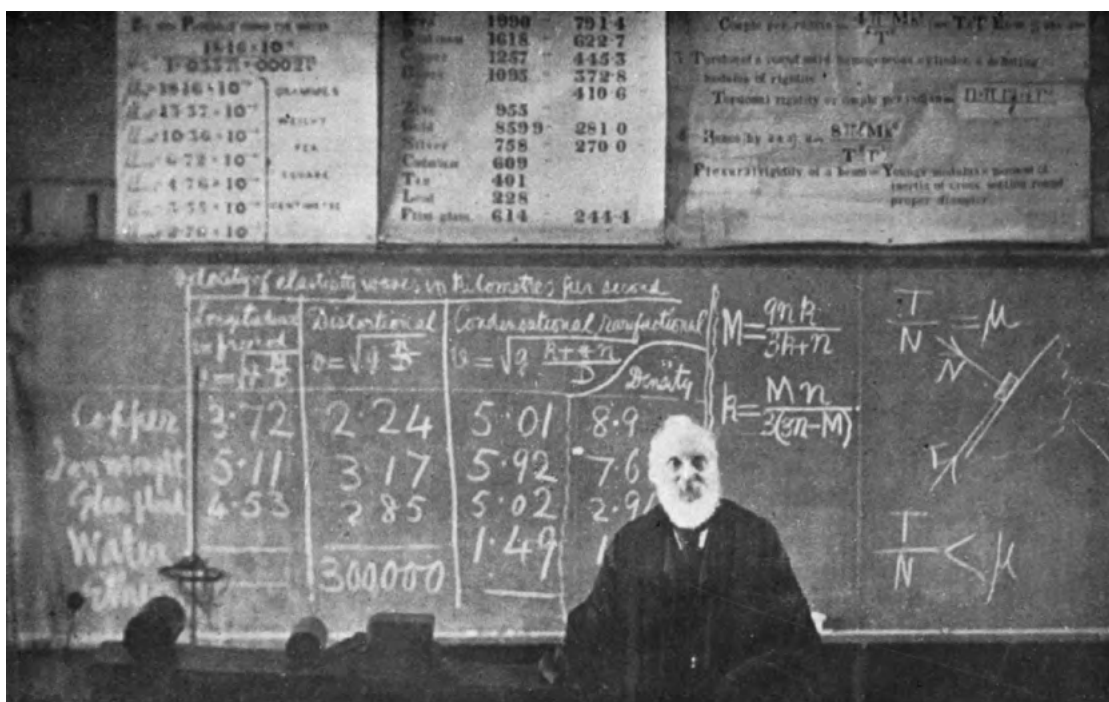
clearness of the dynamical theory, which asserts heat and light to be modes of motion, is at present obscured by two clouds. The first came into existence with the undulatory theory of light, and was dealt by Fresnel and Dr. Thomas Young; it involved the question, How could the earth move through an elastic solid, such as essentially in the luminiferous ether? The second is the Maxwell-Boltzmann doctrine regarding the partition of energy." [1]

Les deux textes cités sont radicalement différents dans leur esprit. Le premier serait celui d'un Kelvin pétri de certitudes, persuadé que la physique est finie et qu'il ne reste que quelques détails à comprendre. Au contraire, le second texte, effectivement écrit par Kelvin, est visionnaire puisqu'il pointe les deux difficultés conceptuelles de son époque.

La première difficulté fait référence à l'expérience négative de Michelson-

Morley. La Terre semble immobile dans l'éther, ce milieu matériel imaginé pour la propagation des ondes électromagnétiques. Kelvin évoque rapidement la suggestion de Fitzgerald et Lorentz de contraction des longueurs dans la direction du mouvement, mais finalement il considère ce premier nuage comme très dense... Cette première difficulté sera résolue par la relativité restreinte et nous ne nous étendrons pas ici sur ce premier nuage.

La seconde difficulté, dont il est question ici, concerne le théorème d'équipartition de l'énergie — un sous-produit de la nouvelle physique statistique conçue par Maxwell et Boltzmann — qui se révélait incapable d'expliquer la chaleur spécifique^(a) des gaz moléculaires. Il n'y a aucune mention du corps noir dans ce fameux papier ! On trouve pourtant des articles qui citent explicitement cet



1. Le dernier cours de Lord Kelvin, Glasgow 1899.

article pour des propos sur le corps noir... qui ne s'y trouvent pas... !

Cette fausse citation n'est pas simplement anecdotique et elle mérite qu'on s'y attarde. Tout d'abord, il convient de souligner la clairvoyance de Kelvin et non pas sa naïveté. Par ailleurs, le discours pionnier pointe une des contradictions les plus importantes à laquelle menait la physique statistique classique et de laquelle allaient émerger la même année les prémices de la révolution quantique. Et ce n'est pas du corps noir qu'il s'agit... Enfin, la citation est parfois datée de 1892, résultant peut-être d'une confusion avec l'année de l'anoblissement de William Thomson, Lord Kelvin. Nous allons voir qu'en 1892, la question du corps noir était à peine esquissée... même si les événements se sont ensuite enchaînés très vite... Et c'est par la résolution du problème du corps noir que sera résolu celui des gaz moléculaires, les deux problèmes étant intimement liés comme nous allons le voir dans cette petite excursion historique.

Le corps noir, de Kirchhoff à Wien

L'histoire commence en 1849, lorsque G. Kirchhoff formalise pour la première fois le rayonnement émis par un corps en équilibre thermique à une température fixée T . Il conceptualise un corps (qu'il nomme corps noir) qui absorbe parfaitement le rayonnement qu'il reçoit et le réémet intégralement. Ce rayonnement est caractérisé par une densité d'énergie $u(\nu, T)$ qui dépend de la fréquence ν et de la température T . Le problème est donc très bien posé par Kirchhoff et c'est cette fonction qu'il reste à déterminer. En 1879, J. Stefan montre expérimentalement que le rayonnement total, c'est-à-dire obtenu si on ajoute les contributions de toutes les fréquences (encadré p. 50), varie comme la puissance quatrième de la température. Le préfacteur étant déterminé par des expériences en laboratoire, cela lui permet indirectement d'en déduire une estimation de la température de surface du Soleil. En 1884, L. Boltzmann

démontre théoriquement cette loi en T^4 . Pour cela, il utilise le second principe de la thermodynamique qui lui fournit une relation entre énergie, pression et température, ainsi qu'un résultat obtenu quelques années plus tôt par Maxwell, qui relie la pression du rayonnement électromagnétique à sa densité d'énergie : des résultats de la physique classique bien maîtrisée à l'époque. La difficulté restait de comprendre la distribution spectrale $u(\nu, T)$, c'est-à-dire la dépendance en fréquence de ce rayonnement, ce qui va se révéler impossible par les méthodes de la physique classique.

Les deux étapes suivantes sont franchies par W. Wien. En 1893, en étudiant théoriquement le rayonnement dans une cavité de volume variable, il montre que l'effet Doppler conduit à une loi de la forme $\nu^3 f(\nu/T)$, où f est une fonction universelle. C'est la célèbre loi du déplacement : la fréquence caractéristique du rayonnement augmente linéairement avec la température. Le préfacteur en ν^3

>>>

>>>

conduit naturellement à la loi en T^4 pour le rayonnement total, intégré sur toutes les fréquences (encadré p. 50). Il ne restait plus qu'à déterminer la fonction f . En 1896, utilisant des arguments incorrects issus de la théorie de Maxwell sur la distribution des vitesses dans un gaz, il estime que cette fonction est une simple exponentielle décroissante à haute fréquence. Cette loi empirique décrivait parfaitement bien les expériences à haute fréquence/basse température, et personne ne se souciait à l'époque de faire mieux. Le corps noir ne semblait donc pas être un véritable problème en 1892. Il apparaîtra un peu plus tard que c'est bien la queue exponentielle de la loi de Wien qui est la véritable nouveauté et dont l'explication nécessitera l'hypothèse quantique.

De 1897 à 1899, Planck franchit une étape importante en considérant le corps noir comme tapissé d'oscillateurs matériels (qu'il appelle « résonateurs ») en équilibre avec le rayonnement, et dont il calcule, à partir de la loi de Wien, la relation entre entropie et énergie. Ces premiers travaux sur l'entropie d'un résonateur le préparent sans aucun doute à la question qu'il va devoir affronter quelques mois plus tard. De plus, il remarque que la loi de Wien implique la détermination de deux nouvelles constantes fondamentales : une première constante qui relie les unités d'énergie et de température et qui sera appelée plus tard constante de Boltzmann, et une seconde, alors notée b , qui a les dimensions d'une action ! Il ne s'agit pas encore de quantification, mais Planck remarque que s'il existe une constante fondamentale d'action, alors on peut fabriquer des unités naturelles avec cette dernière et deux autres constantes universelles que sont la vitesse de la lumière et la constante de gravitation. Ce sont les fameuses unités de Planck. Tout cela avant la quantification...

1900, l'année de la révolution

Nous en venons maintenant aux trois épisodes de l'année 1900 : le discours de Kelvin en avril, la loi de Rayleigh en juin et la découverte de la loi de Planck entre octobre et décembre.

Le second nuage ne concerne pas le rayonnement noir, mais la chaleur spécifique des molécules diatomiques.

Une conséquence très importante, simple et spectaculaire de la théorie statistique de Maxwell-Boltzmann est le théorème d'équipartition de l'énergie. Ce théorème attribue à chaque degré de liberté quadratique (par exemple l'énergie cinétique $\frac{1}{2}mv^2$ ou l'énergie potentielle élastique $\frac{1}{2}kx^2$ dans une direction) une énergie moyenne $RT/2$ par mole, R étant la constante des gaz parfaits. Cela expliquait très bien la loi de Dulong et Petit (1819) qui avaient montré expérimentalement que tous les solides ont une chaleur spécifique (la dérivée de l'énergie par rapport à la température^(a)) égale à $3R$, en supposant que les atomes peuvent être assimilés à des petits oscillateurs harmoniques dans trois directions. Cela expliquait aussi pourquoi les gaz monoatomiques ont une chaleur spécifique molaire égale à $3R/2$, liée à leur mouvement de translation dans les trois directions de l'espace. Mais pour les gaz diatomiques, la chaleur spécifique mesurée était de l'ordre de $5R/2$ alors que la « doctrine de Maxwell-Boltzmann » prédisait $7R/2$, puisque pour une molécule diatomique, on compte sept degrés de liberté (trois pour la translation, deux pour la rotation, deux pour la vibration). C'est ce paradoxe, largement étudié par Maxwell (1859), Boltzmann (1871) et Poincaré (1894), qui constitue le deuxième nuage de Kelvin et qu'il décrit en grands détails dans sa communication. Plus les molécules sont grosses, donc plus elles ont de degrés de liberté internes (les vibrations), plus le mystère s'épaissit car leur chaleur spécifique reste du même ordre de grandeur, au lieu d'augmenter avec la taille comme on s'y attend avec le théorème d'équipartition de l'énergie.

En résumé, lorsque Lord Kelvin prononce son fameux discours en 1900, la contradiction avec la physique classique concerne la chaleur spécifique des molécules diatomiques et elle n'est pas encore pointée en ce qui concerne le corps noir.

La limite de Rayleigh

La contradiction apparaît un peu plus tard, en juin 1900, lorsque Lord Rayleigh propose une théorie du rayonnement noir, basée sur le théorème d'équipartition [2]. Le rayonnement est constitué de modes de vibrations électromagnétiques et des deux variables que sont les champs électrique et magnétique. Dans une enceinte, la longueur d'onde du rayonnement doit être un sous-multiple de la taille de la boîte, comme c'est le cas pour toute onde, le son ou la vibration d'une corde de guitare. Rayleigh avait déjà montré pour le son que le nombre de modes est proportionnel au carré de la fréquence. L'application du théorème d'équipartition attribuant à chaque mode du rayonnement électromagnétique une énergie moyenne proportionnelle à T , conduisait à une densité variant comme $\nu^2 T$. La contradiction avec la loi de Wien à basse fréquence ($\sim \nu^3$) n'est pas relevée (encadré, p. 50). Mais Rayleigh note que sa théorie pose des problèmes à haute fréquence puisqu'une intégration de cette loi sur toutes les fréquences conduit à une énergie infinie. La loi en $\nu^2 T$ doit donc être considérée comme une limite à basse fréquence et le problème reste entier à haute fréquence, pour laquelle il remet à la main l'exponentielle de Wien. Cet article se termine par la phrase : « On peut espérer que cette question recevra bientôt une réponse de la part des expérimentateurs distingués occupés par ce sujet... » La réponse va venir effectivement rapidement, mais sans doute de manière indépendante.

Planck

Après des résultats préliminaires en 1899, ce n'est que vers l'été 1900 que les mesures spectroscopiques les plus fines par O. Lummer, E. Pringsheim, puis par H. Rubens et F. Kurlbaum à Berlin confirment des déviations à la loi de Wien à basse fréquence. Au lieu d'une loi en ν^3 , limite basse fréquence



2. Premier congrès Solvay, Bruxelles, octobre 1911. Parmi les participants, Max Planck est debout, 2^e à gauche. Marie Curie est entourée de Henri Poincaré à droite, et de Jean Perrin et Wilhelm Wien à gauche. Albert Einstein et Paul Langevin sont debout à droite.

de la loi de Wien, ils trouvent un comportement proche de $\nu^2 T$, prévu par Rayleigh. M. Planck, apprenant la confirmation de ces déviations le 7 octobre 1900 lors d'un repas dominical avec le couple Rubens, s'isole quelques jours et propose le 19 octobre à la Société de Physique de Berlin la loi qui porte son nom, tout d'abord par des arguments phénoménologiques sur la dépendance entre l'entropie et l'énergie d'un résonateur [3]. Il ne mentionne pas le papier de Rayleigh d'avril 1900 : en a-t-il connaissance ? Et il ne se soucie pas de divergence à haute fréquence, puisque la loi de Wien marche bien. Ce qu'il veut décrire, ce sont les basses fréquences. Il complète son travail de 1899 sur la relation entre entropie et énergie pour tenir compte des nouveaux résultats expérimentaux à basse fréquence, et il en déduit une loi énergie-température $u(\nu, T)$ qui raccorde parfaitement bien les deux comportements à haute et basse fréquence observés expérimentalement.

Le 14 décembre, devant la Société Allemande de Physique, Planck propose un mécanisme qui suppose la quantification des échanges d'énergie entre les résonateurs et le rayonnement. Il revient sur le calcul de la relation entre l'entropie et l'énergie pour un ensemble de résonateurs, en s'inspirant de la méthode de Boltzmann pour la théorie cinétique des gaz. Mais pour calculer l'entropie, il doit compter le nombre de configurations microscopiques d'un ensemble d'oscillateurs, l'énergie totale étant fixée. Pour ce dénombrement, il a besoin d'introduire arbitrairement une coupure à basse énergie. Il s'aperçoit qu'en maintenant cette coupure finie, à une valeur $\epsilon = h\nu$, il retrouve exactement la loi obtenue empiriquement deux mois plus tôt [3].

Finalement, notons le cheminement subtil par lequel ce sont les résultats expérimentaux tout récents obtenus à basse fréquence, parfaitement décrits par la physique classique, qui ont conduit indirectement Planck à intro-

duire la quantification des échanges d'énergie qui permet de décrire correctement le comportement à haute fréquence. Si la loi proposée par Planck décrit parfaitement bien les expériences de plus en plus précises, sa découverte ne semble pas avoir d'impact immédiat, en tout cas tel qu'on peut le suivre dans la littérature.

Einstein 1905, 1907

C'est Einstein, dans un de ses fameux papiers de 1905, « sur un point de vue heuristique sur la création et la conversion de la lumière », qui prend conscience que la vraie nouveauté se trouve dans la queue exponentielle de la loi de Planck, c'est-à-dire la loi de Wien [4]. En analysant cette loi et en considérant la relation entre entropie et volume qu'elle implique, une analogie avec le gaz parfait le conduit à supposer que le rayonnement est constitué de « quanta de lumière » portant une énergie ϵ proportionnelle à leur fréquence : $\epsilon = h\nu$. C'est donc une

>>>



3. Lord Rayleigh (1842-1919). Il est probablement le premier à avoir relié les deux problèmes, celui de la chaleur spécifique des molécules diatomiques et celui du corps noir.

>>>

interprétation complètement différente de l'hypothèse de Planck, pour lequel ce sont les échanges d'énergie entre les résonateurs et le rayonnement qui sont quantifiés. Dans ce même article, Einstein montre que son hypothèse permet d'expliquer l'effet photoélectrique par l'échange d'énergie entre un quantum de lumière d'énergie $h\nu$ et un électron émis. L'énergie des électrons émis dépend donc de la fréquence du rayonnement incident et pas de son intensité. La théorie fait intervenir pour la deuxième fois la constante de Planck. Les « quanta de lumière » seront baptisés « photons » vingt ans plus tard.

Cette constante apparaît pour la troisième fois en 1907 dans un autre papier d'Einstein intitulé « *La théorie du rayonnement de Planck et la théorie de la chaleur spécifique* ». Il utilise la théorie de Planck pour quantifier le mouvement des atomes qu'il assimile à des oscillateurs harmoniques. Se trouve ainsi résolu le paradoxe soulevé dans le discours de Kelvin concernant la chaleur spécifique des gaz polyatomiques : si la température

est trop faible par rapport à l'énergie caractéristique de vibration des molécules, celles-ci ne peuvent être excitées et ne vibrent pas. Les degrés de liberté de vibration dont l'énergie caractéristique est la plus élevée ne peuvent donc pas contribuer à la chaleur spécifique.

Le premier congrès Solvay et la catastrophe ultraviolette

Le premier congrès Solvay, organisé en 1911 à l'initiative du chimiste et industriel Ernest Solvay et du physico-chimiste Walther Nernst, réunit à Bruxelles les plus grands physiciens (et Marie Curie, seule femme présente) de l'époque (fig. 2, p. 49). Comme l'indique son titre, il est dédié à « *la théorie du rayonnement et les quanta* ». Einstein y présente un « *rapport sur l'état actuel des chaleurs spécifiques* » [5]. La lecture des actes de ce congrès montre à quel point l'hypothèse des quanta était encore difficilement acceptée, en particulier dans les deux extraits qui suivent.

“ En présentant ce « second nuage », Kelvin avait parfaitement bien cerné la difficulté fondamentale à expliquer la chaleur spécifique des gaz polyatomiques. ”

FORMULES DE WIEN, RAYLEIGH ET PLANCK

Avec les notations actuelles, les lois de Wien et Rayleigh s'écrivent respectivement :

$$u(\nu, T) = (8\pi h\nu^3/c^3) \exp(-h\nu/k_B T), \text{ et } u(\nu, T) = (8\pi\nu^2/c^3) k_B T,$$

où h est la constante de Planck, c la vitesse de la lumière, k_B la constante de Boltzmann.

La loi de Planck interpole entre ces deux comportements à haute et basse fréquence (respectivement $h\nu \gg k_B T$ et $h\nu \ll k_B T$) :

$$u(\nu, T) = (8\pi h\nu^3/c^3) [\exp(h\nu/k_B T) - 1]^{-1}.$$

La loi de Stefan concerne le rayonnement total intégré sur toutes les fréquences :

$$u(T) = \int_0^\infty u(\nu, T) d\nu \propto T^4.$$



- L. Rosenfeld, « La première phase de l'évolution de la théorie des quanta », *Osiris*, 2 (1936) 149-196.
- M.J. Klein, "Max Planck and the beginnings of the quantum theory", *Arch. Hist. Exact. Sci.* 1 (1961) 459-479. <https://cutt.ly/doi-10-1007>.
- M. Jammer, *The conceptual development of quantum mechanics*, McGraw-Hill (1966).
- C. Bracco et J.-P. Provost, « Quanta de Planck, d'Einstein et "d'aujourd'hui" », *BUP* 877-878 (2005) 909-928.
- O. Darrigol, « Continuités et discontinuités dans l'"acte désespéré" de Max Planck », dans *Un siècle de quanta*, pp. 23-37, M. Crozon et Y. Sacquin eds., EDP Sciences (2003).

Rayleigh (fig. 3), qui n'a pas pu assister au congrès, envoie une lettre dans laquelle il écrit : « *Je ne vois naturellement aucun inconvénient à ce qu'on cherche à suivre les conséquences de la théorie des éléments d'énergie : cette méthode a déjà conduit à des conséquences intéressantes, grâce à l'habileté de ceux qui l'ont appliquée. Mais il m'est difficile de la considérer comme donnant une image de la réalité.* » Puis il propose une piste de réflexion qui fait écho à la présentation de Kelvin, onze ans plus tôt... : « *Nous ferions bien, je pense, de porter notre attention sur la molécule gazeuse diatomique. Sous l'action des collisions, cette molécule acquiert facilement et rapidement un mouvement de rotation. Pourquoi n'entre-t-elle pas aussi en vibration le long de la ligne qui joint les deux atomes ? Si je la comprends bien, la réponse de Planck est qu'en raison de la rigidité du lien qui unit les atomes, la quantité d'énergie qui devrait être acquise à chaque collision tombe au-dessous du minimum possible et que, par conséquent, rien n'est absorbé, raisonnement qui semble réellement paradoxal.* » Il ne cite pas le modèle d'Einstein de l'oscillateur harmonique qui pourtant a offert une solution au problème, quatre ans plus tôt...

Si Planck a été conduit, « dans un acte de désespoir » comme il l'écrira plus tard, à accepter la quantification des échanges d'énergie, il ne peut pas

se résoudre à accepter l'hypothèse des quanta de lumière : « *Quand on songe à la confirmation expérimentale complète qu'a reçue l'électrodynamique de Maxwell par les phénomènes d'interférences les plus délicats, quand on songe aux difficultés extraordinaires que son abandon entraînerait pour toutes les théories des phénomènes électriques et magnétiques, on éprouve quelque répugnance à en ruiner de prime abord les fondements. Pour cette raison nous laisserons de côté, dans ce qui va suivre, l'hypothèse des quanta de lumière, d'autant plus que son développement reste encore assez primitif.* »

Équipartition, chaleur spécifique et rayonnement sont les trois mots clés qui résument l'essentiel des contributions à ce colloque. Il apparaît maintenant que c'est bien aux hautes fréquences que se situe la physique nouvelle. Si l'argument de Rayleigh parfaitement classique s'est avéré correct pour le rayonnement de basse fréquence, il ne pouvait manifestement pas être extrapolable à haute fréquence puisqu'il conduit à une divergence de l'énergie totale, qu'Ehrenfest désignera en 1911 sous le nom de « catastrophe ultraviolette ». Il est donc inexact de dire que le travail de Planck en 1900 était motivé par le problème de la catastrophe ultraviolette, comme on le voit souvent dans la littérature, alors qu'il était motivé par les expériences

nouvelles à basse fréquence qui s'écartaient de la loi de Wien. Mais c'est bien sa théorie des éléments d'énergie qui a permis de résoudre ce problème.

Il faudra attendre peu de temps pour que les hésitations du congrès de 1911 se trouvent dépassées par la théorie de l'atome de Bohr, où la quantification de l'énergie et de l'action verra sa validité étendue au domaine particulièrement fécond de la spectroscopie atomique.

Conclusion

En présentant ce « second nuage », Kelvin avait parfaitement bien cerné la difficulté fondamentale à expliquer la chaleur spécifique des gaz polyatomiques. Son discours ne faisait pas référence à la question du corps noir. Ce n'est que progressivement que ces deux difficultés ont été regroupées dans une même problématique, en particulier par Rayleigh dès 1905 à propos du corps noir : « *A full comprehension would probably carry with it a solution of the specific heat difficulty* » ou dans sa lettre au congrès Solvay.

Dans l'introduction de sa thèse en 1924, L. de Broglie associe le second nuage au « rayonnement noir », et non à l'équipartition de l'énergie dans les molécules diatomiques. On voit ainsi que, progressivement, les deux problèmes se sont mélangés dans une référence à Kelvin qui est devenue fautive. Finalement, on ne peut que s'émerveiller à la lecture de son article qui avait parfaitement identifié les deux problèmes qui seraient à l'origine des révolutions scientifiques du XX^e siècle^(b). ■

- 1• W. Thomson, Lord Kelvin, "Nineteenth century clouds over the dynamical theory of heat and light", Lecture delivered at the Royal Institution of Great Britain, April 27, 1900. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 2(7) (1901) 1-40. DOI: 10.1080/14786440109462664
- 2• J.W.S. Rayleigh, "Remarks upon the law of complete radiation", *Phil. Mag.* 49 (1900) 539-540 ; "The dynamical theory of gases", *Nature* 71 (1905) 559.
- 3• M. Planck, *Verh. Dtsch. Phys. Ges. Berlin* 2 (1900) 202 et 2 (1900) 237 ; traductions en anglais par D. ter Haar : "On an improvement of Wien's equation for the spectrum", pp. 79-81 ; "On the theory of the energy distribution law of the normal spectrum", pp. 82-90, dans *The Old Quantum Theory*, Pergamon Press (1967).
- 4• A. Einstein, *Ann. Physik* 17 (1905) 132-147 ; traduction en anglais par D. ter Haar : "On a heuristic point of view about the creation and conversion of light", dans *The Old Quantum Theory*, pp. 91-107, Pergamon Press (1967).
- 5• Congrès Solvay, *La théorie du rayonnement et les quanta. Rapports et discussions de la réunion tenue à Bruxelles du 30 octobre au 3 novembre 1911*, Gauthier-Villars (1912).

(a) On garde ici la dénomination « chaleur spécifique », qui est celle de l'époque et qui est encore souvent utilisée. La dénomination moderne est « capacité thermique » (molaire ou massique).

(b) Plusieurs citations sur l'état et l'évolution de la physique à la fin du XIX^e siècle sont souvent présentées sous une forme déformée dans la littérature ou sur Internet, avec des phrases fausses ou coupées de leur contexte, comme celle-ci : « *There is nothing new to be discovered in physics now. All that remains is more and more precise measurements* », faussement attribuée à Kelvin ou Michelson. On peut trouver les phrases originales et entières, avec leur citation précise et un court commentaire pour certaines, dans <https://gilles.montambaux.com/citations-physique-autour-1900.pdf>