



« Ceux qui ne sont pas choqués lors de leur première
rencontre avec la théorie quantique ne peuvent pas
l'avoir comprise »,
Niels Bohr, prix Nobel 1922

Chapitre 2

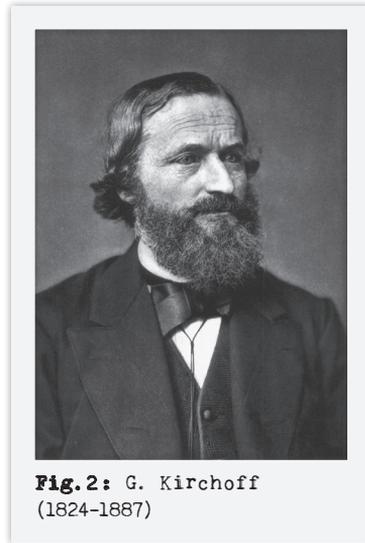
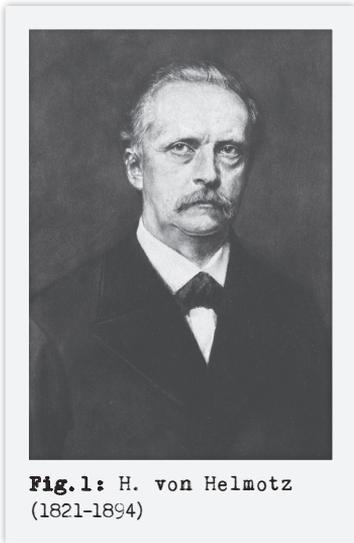
La révolution atomique

1. Planck et la révolution quantique

1.1. Le contexte historique

Max Planck naît à Kiel en 1858. Après des études à l'Université de Munich, il continue son cursus à Berlin en 1877 avec comme professeurs Hermann von Helmholtz et Gustav Kirchhoff, tous les deux transfuges de la prestigieuse université de Heidelberg. En effet, suite à la victoire face à la France, la Prusse devenait une puissance dominante d'Europe et Berlin une capitale se dotant des moyens universitaires au moins équivalents à ceux des deux capitales dominantes du moment : Londres et Paris. Planck s'est régulièrement plaint de ses cours suivis à Berlin, décrivant Helmholtz comme « *ne préparant pas ses cours, étourdi et faisant constamment des fautes au tableau. Il donnait l'impression qu'il était lui-même ennuyé de ses propres cours.* ». Quant à Kirchhoff, ses cours étaient « *particulièrement bien travaillés, sans un mot de trop ou de moins, mais secs et monotones. On était charmé par le professeur, mais pas par ce qu'il nous disait.* ».

Planck soutient sa thèse en 1879 sur le thème d'une formulation fondamentale du second principe de la thermodynamique. Sa thèse n'a eu aucun impact sur le moment. Planck se rendait compte qu'en fait nombre de ses encadrants n'avaient que des notions approximatives des principes statistiques de la



thermodynamique. Comprendre l'influence qu'a eue la découverte du second principe sur Planck permet de comprendre à la fois le raisonnement qui le conduisit à poser l'hypothèse de la quantification, puis le doute qui le rongea par la suite sur l'interprétation physique du quanta qu'il avait lui-même introduit.

Planck est par contre tout de suite séduit par le style et la clarté de raisonnement de Clausius. En particulier suite à la lecture de ses papiers. Planck comprit que Clausius n'exposait pas que l'évidence des faits mais essayait de plonger en profondeur dans les fondements de la thermodynamique. C'est Clausius qui introduit le concept d'entropie qui interdit à une tasse de café de devenir plus chaude en refroidissant de l'air (alors que l'inverse est naturel). La conservation de l'énergie n'était donc pas suffisante pour expliquer tous les principes physiques, notamment ceux mettant en jeu la chaleur. L'entropie représente un peu le « prix à payer » pour tout phénomène physique, comme une monnaie. Et un processus physique ne peut exister que si le compte en banque de la nature augmente : tout processus qui réduirait l'entropie d'un système est donc interdit. Clausius avait défini l'entropie, S , comme la quantité de chaleur, Q , entrant ou sortant d'un corps physique, divisée par la température du système, T , où l'échange a lieu : $S = Q/T$. Si un corps chaud A de température $T_A = 500$ degrés perd $Q = 1000$ unités de chaleur ($S_A = Q/T_A = 2$), reçues par un corps B de $T_B = 250$ degrés ($S_B = Q/T_B = 4$), l'entropie totale du système $A + B$ aura augmenté de $-2 + 4 = +2$ unités. Le corps de 500 degrés peut donc transmettre de la chaleur au corps de 250 degrés et non l'inverse.

Planck réalise à ce moment que l'entropie est un des concepts aussi fondamentaux que l'énergie en physique. Il repart donc à Munich pour se consacrer à sa thèse de doctorat sur l'irréversibilité des phénomènes physiques. Il envoie un exemplaire de sa thèse à Helmholtz, qui ne la lit pas, et à Kirchhoff qui est en désaccord avec lui. Quant à Clausius, son « mentor », il ne répond même pas à sa lettre. Planck reconnaîtra lui-même que l'effet de sa thèse était juste « nul ». En 1885, grâce semble-t-il à des connaissances de son père, Planck obtient un poste à l'université de Kiel à 27 ans. En 1887 Kirchhoff meurt et Helmholtz propose à Planck la position de professeur à Berlin. En 1894 alors que Planck n'a que 36 ans, Helmholtz disparaît à son tour laissant

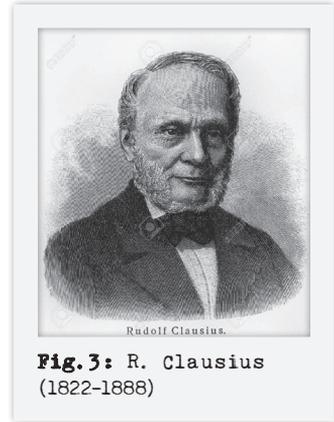


Fig. 3: R. Clausius
(1822-1888)

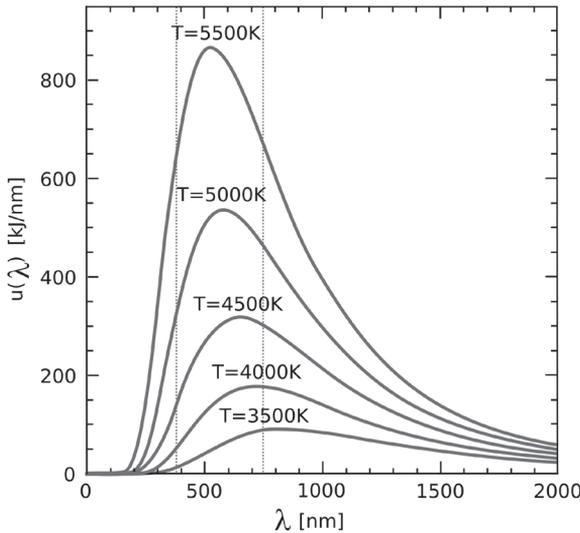
Planck comme le scientifique leader de l'université de Berlin. Il décide dès lors de se consacrer au phénomène physique qui interroge les physiciens et l'industrie de l'époque (principalement dirigée par le baron von Siemens): le rayonnement du corps noir.

1.2. Le combat du corps noir

En 1893, le jeune physicien Wilhelm Wien, 29 ans, découvre une loi surprenante: lorsque l'on chauffe un corps isolé du milieu extérieur (comme une boîte noire par exemple) et qu'on mesure les longueurs d'onde des radiations émises par ce corps, on observe que le maximum d'intensité émise, U , correspond à une longueur d'onde suivant une loi dite loi de déplacement de Wien:

$$T_{\max} \times \lambda_{\max} = \text{constante}$$

[Loi de déplacement de Wien]



Wien continue à travailler assidûment sur le spectre du corps noir. Il publie alors en 1896 sa loi de distribution, juste avant de rejoindre l'université d'Aachen, loi de distribution aussi appelée *approximation de Wien*, valide pour les faibles longueurs d'onde λ :

$$U(\lambda, T) = \frac{a}{\lambda^5} e^{-\frac{b}{\lambda T}}$$

$$U(\nu, T) = A \nu^5 e^{-\frac{B\nu}{T}} \quad (1.1)$$

où a (A) et b (B) sont des constantes déterminées par l'expérience et ν la fréquence de l'onde. Wien sera lauréat du prix Nobel en 1911 pour cette découverte.

Pendant ce temps, Lummer et Pringsheim à Berlin continuaient le travail entamé par Wien et obtinrent des spectres encore plus précis, allant jusqu'à 1 500 degrés, température gigantesque pour l'époque, et présentèrent leurs travaux à la réunion de la société de physique à Berlin en février 1899. Durant toute cette année 1899, une bataille de mesures et de chiffres sera le terrain d'affrontement des plus grands expérimentateurs allemands de l'époque : Friedrich Paschen confirmera la validité de la loi de Wien en mai, et Planck y trouvant une justification théorique, cette loi devint la loi « Wien-Planck ». Puis, début novembre 1899, Otto Lummer et Ernst Pringsheim refont des analyses plus précises montrant que la loi ne semble plus valide pour les larges longueurs d'onde (dans l'infrarouge). Quelques semaines plus tard, Paschen publie à nouveau une communication contredisant Lummer et Pringsheim, affirmant même que « *la loi de Wien apparaît comme une loi rigoureusement valide de la Nature* ». Le congrès de la société physique allemande le 2 février 1900 fit grand bruit, Lummer et Pringsheim, après avoir affiné leurs mesures, restent sur leur position : la loi de Wien n'est pas valable pour de grandes longueurs d'onde, et cette observation ne peut être due à des erreurs expérimentales.

C'est alors que (comme ce fut et ce sera souvent le cas dans le domaine de la physique théorique) une somme incroyable de modèles théoriques vit le jour afin de correspondre au mieux aux données expérimentales sur le rayonnement du corps noir. Nous avons inclus en appendice l'article de Heinrich Rubens et Ferdinand Kurlbaum, mesurant le spectre du corps noir, où ils résument l'ensemble des formulations qui ont été données au cours de l'année 1900 afin de satisfaire les données expérimentales. Notez que les auteurs citent l'article de Planck de 1899 qui justifiait une telle loi sur le plan théorique « *upon an electromagnetic basis* » écrivent-ils. Ils ajoutent également, toujours dans leur introduction

« For instance, while Paschen always obtains exact agreement between his observation and Wien's formula, Lummer and Pringsheim find that for sufficiently high values of the product λT the deviations from this formula are very considerable ».

C'est justement Rubens, un ami proche de Planck qui à 35 ans donnera le coup de grâce à la loi de Wien aux grandes longueurs d'onde. Il vient tout juste d'être promu professeur et il a mis au point avec Kurlbaum un corps noir expérimental (une boîte noire d'une pureté et d'un isolement presque parfaits). Durant tout l'été ils ont testé la loi de Wien allant de $\lambda = 0,03$ mm à $\lambda = 0,06$ mm, et $T = 200$ degrés à 1500 degrés. Ils découvrent qu'effectivement la loi de Wien n'est pas valide pour de grandes longueurs d'onde. Le congrès doit se réunir le 5 octobre, mais Rubens préfère attendre deux semaines avant de présenter les résultats. C'est le 7 octobre qu'il se rend pour dîner chez Planck et qu'il lui expose pour la première fois ses résultats : l'intensité du corps noir est proportionnelle à la température pour de grandes longueurs d'onde, contredisant de ce fait la loi de Wien.

À partir de cette nuit, Planck se mit à la construction d'un modèle qui devait satisfaire les trois conditions observées :

1. La loi de Wien est valide à faibles longueurs d'onde.
2. La loi de Wien n'est plus valide à grande longueur d'onde : l'intensité est proportionnelle à la température.
3. La loi de déplacement de Wien ($\lambda \times T = \text{constante}$) est toujours valable.

Après plusieurs tentatives infructueuses, et grâce à ses années d'expérience, il trouve enfin une combinaison phénoménologique qui semble respecter tous ces critères. Il poste durant la nuit son résultat à Rubens, attendant frénétiquement sa réponse. Elle ne tarda pas. Deux jours plus tard, Rubens rend à nouveau visite à Planck avec ses résultats : les données expérimentales sont en total accord avec la formulation trouvée par Planck cette nuit-là.

1.3. Première estocade de Planck

Le 19 octobre, Kurlbaum présente leurs résultats au meeting de la société de physique allemande. Rubens et Planck sont dans l'auditoire. Kurlbaum s'assied après son discours. Planck lève alors la main pour ajouter « *un petit commentaire* » à l'exposé de Kurlbaum qui sera publié dans le compte rendu du meeting sous le titre modeste « *une amélioration à la loi de Wien pour le spectre* ». La note originale (en allemand) et sa traduction se trouvent dans l'appendice. Il écrit même dans l'introduction « *puisque moi-même et cette Société avons exprimé l'opinion que la loi de Wien doit être juste, je me permettrai*

peut-être d'expliquer brièvement la relation entre la théorie électromagnétique développée par moi-même et les données expérimentales ». Au travers de ce véritable numéro de théâtre, ayant comme complice Rubens, Planck ne va pas « *expliquer brièvement* » comment la loi de Wien peut s'expliquer par la « *théorie électromagnétique* » mais bien au contraire, développer sa propre loi qui sera la base de départ pour la révolution quantique qu'il déclenchera deux mois plus tard.

Sa communication d'octobre est très claire (j'encourage d'ailleurs le lecteur à suivre l'article original pour l'explication). Obsédé par le second principe de la thermodynamique, il voulut connaître le lien entre l'entropie, S , et l'énergie interne, u , du corps noir.

$$dS = \frac{dU}{T} \text{ (second principe); } \frac{B\nu}{T} = -\ln\left(\frac{U}{A\nu^5}\right) \text{ (loi de Wien (1.1))}$$

$$\Rightarrow \frac{d^2S}{dU^2} = -\frac{1}{B\nu} \frac{1}{U} \quad (1.2)$$

où S représente l'entropie et U l'énergie interne du corps noir : $U = Q + W$, Q étant la chaleur reçue et W le travail reçu également (algébrique). Cependant, comme le fait remarquer Planck dans cette même note, la loi de Wien ne semble peut-être pas être si générale, et il ajoute dans le paragraphe sous la première équation

« J'ai finalement fini par construire des expressions complètement arbitraires pour l'entropie qui, quoique plus compliquées que l'expression de Wien, respectent les principes de la thermodynamique ».

Planck le reconnaît donc lui-même, il a tenté plusieurs expressions durant cette fameuse nuit du 7 octobre. La deuxième équation qu'il donne vient justement de l'observation faite par Rubens (ce qu'il n'avoue pas dans sa communication). Il donne l'expression générale directement, alors qu'il sait que, pour des grandes longueurs d'onde (et donc pour des petites fréquences) l'énergie du corps noir ne suit plus la loi de Wien (1.1) mais est proportionnelle à la température T . Ce qui donne

$$U = C T \Rightarrow \frac{dS}{dU} = \frac{1}{T} = \frac{C}{U} \Rightarrow \frac{d^2S}{dU^2} = -\frac{C}{U^2} \quad (1.3)$$

pour des petites fréquences. C'est en combinant les équations à forte fréquence (1.2) et à faible fréquence (1.3) que Planck propose une solution alternative qui respecte les deux équations précédentes :

$$\frac{d^2 S}{dU^2} = \frac{-\alpha}{U(\beta\nu + U)} \tag{1.4}$$

On peut en effet vérifier que l'équation (1.4) redonne (1.2) à hautes fréquences (loi classique de Wien) et (1.3) à basses fréquences (observations de Rubens et Kurlbaum). Intégrant l'équation (1.4) il obtient

$$\frac{d^2 S}{dU^2} = -\frac{\alpha}{\beta\nu} \left[\frac{1}{U} - \frac{1}{\beta\nu + U} \right] \Rightarrow \frac{dS}{dU} = -\frac{\alpha}{\beta\nu} \ln \left(\frac{U}{\beta\nu + U} \right)$$

ce qui donne en utilisant le second principe

$$\frac{1}{T} = -\frac{\alpha}{\beta\nu} \ln \left(\frac{U}{\beta\nu + U} \right) \Rightarrow U = \frac{\beta\nu}{e^{\frac{\beta\nu}{\alpha T}} - 1}$$

Exigeant de retrouver l'expression (1.2) à hautes fréquences, Planck en déduit

$$\beta = A\nu^4; \quad \alpha = \frac{A}{B}\nu^4; \quad \Rightarrow U = \frac{A\nu^5}{e^{\frac{B\nu}{T}} - 1} \tag{1.5}$$

ce qui est l'expression obtenue par Planck (dernière équation de sa communication) et également celle formulée par Rubens et Kurlbaum (leur expression (1.5)). On ne peut pas vraiment se rendre compte si Planck lui-même imaginait la révolution qu'il était en train de déclencher. Après seulement dix minutes d'exposé Planck écrit l'équation (1.5) au tableau et il termine sa prise de parole aussi modestement qu'il l'avait prise :

« je me sens donc obligé d'attirer votre attention sur cette nouvelle formule que je considère être la plus simple possible, mis à part l'expression de Wien, du point de vue de la théorie électromagnétique des radiations ».

Il s'assied et reçoit une approbation tout juste polie de la part de l'audience. Après tout, il n'a fait que proposer une nouvelle loi parmi les nombreuses lois sur le marché tentant d'expliquer la modification de la loi de Wien à basses fréquences. Quelques semaines plus tard Paschen lui-même confirme que la formulation de Planck est la plus précise de toutes.