

l'expérience des «sphères de Magdebourg» est due à Otto von Guericke, bourgmestre de Magdebourg : von Guericke avait fabriqué un globe à partir de deux hémisphères de cuivre et il y avait fait le vide ; deux attelages de huit chevaux de trait chacun furent incapables de séparer les deux hémisphères. Il y eut, à la même époque, d'autres expériences moins spectaculaires, mais sans doute plus instructives ; on réussit à montrer, par exemple, que le vide transmettait la lumière et non les sons.

L'expérience du piston

Puis au XIX^e siècle, l'idée que l'on se faisait du vide changea à nouveau : une expérience de pensée illustre la nature de ce changement. Imaginons un piston et un cylindre parfaitement ajustés, de sorte que le piston se déplace librement sans que rien ne s'infiltre entre lui et le cylindre. Au début de l'expérience, le piston se trouve au fond du cylindre, ne laissant aucun espace libre. Lorsqu'on applique une force pour tirer le piston en s'opposant à la pression extérieure de l'air, l'espace

créé au fond du cylindre est vide. Si l'on relâche immédiatement le piston, il reprend sa position initiale, mais si l'on maintient tiré le piston longtemps, il ne revient pas tout à fait au fond du cylindre ; la pression extérieure de l'air le pousse toujours, tendant à rétablir la configuration première, mais le piston reste un peu en deçà de sa position initiale, même quand on continue à pousser dessus. Quelque chose est apparu à l'intérieur du cylindre et ce qui semblait vide ne l'est pas resté.

Dès le XIX^e siècle, les physiciens expliquèrent ce phénomène ; pendant que l'on maintient le piston écarté, les parois du cylindre émettent un rayonnement thermique dans le vide créé ; quand on repousse le piston, le rayonnement est comprimé. Or la compression d'un rayonnement thermique est analogue à

celle d'un gaz : la pression et la température du rayonnement augmentent du fait de sa compression. Ce rayonnement comprimé exerce alors une force qui s'oppose au retour du piston et celui-ci ne revient au fond du cylindre que



1. L'EXPÉRIENCE DES SPHÈRES DE MADGEBOURG, réalisée en 1654 par Otto von Guericke, mit en évidence «le vide». Après avoir appliqué les hémisphères l'une contre l'autre, von Guericke pompa l'air à l'intérieur. Deux attelages de huit chevaux de trait ne purent les séparer.



quand le rayonnement à haute température a été réabsorbé par les parois.

Le rayonnement thermique est constitué de champs électromagnétiques qui fluctuent de la façon la plus aléatoire possible. Paradoxalement, ce «hasard maximal» confère au rayonnement thermique une grande régularité statistique. Dans ces conditions d'équilibre thermique, c'est-à-dire quand la température est partout égale, le rayonnement est à la fois homogène et isotrope : ses propriétés sont identiques en tous les points de l'espace et dans n'importe quelle direction ; un instrument mesurant une propriété quelconque du rayonnement indiquerait le même résultat, quelles que soient sa position et son orientation.

Le spectre du rayonnement thermique

Un rayonnement thermique est caractérisé par sa température. En 1879, le physicien autrichien Josef Stefan étudia la densité d'énergie totale (c'est-à-

dire l'énergie par unité de volume) du rayonnement thermique. Se fondant sur certaines expériences préliminaires, il suggéra que cette densité d'énergie est proportionnelle à la puissance quatrième de la température absolue. Cinq ans plus tard, Ludwig Boltzmann, un élève de Stefan, démontra ce résultat par une analyse théorique subtile.

La température d'un rayonnement thermique caractérise non seulement sa densité d'énergie, mais aussi son spectre, c'est-à-dire la répartition de l'énergie du rayonnement en fonction de sa fréquence. La relation entre la température et le spectre thermique est une évidence quotidienne : quand on chauffe un objet métallique, par exemple, il commence par rougeoier, puis devient blanc ou même bleu, à mesure que le spectre contient une proportion croissante de rayonnements de fréquences supérieures. Le spectre thermique n'est pas monochromatique ; une pointe métallique chauffée au rouge émet surtout dans le rouge, mais aussi, plus, faiblement, à toutes les autres fréquences.

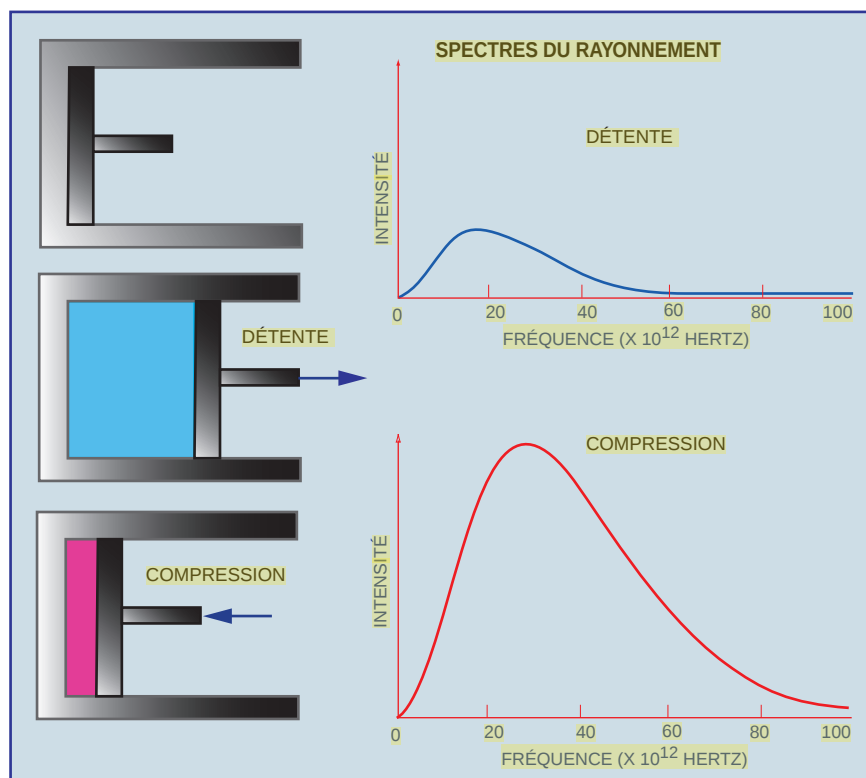
Vers la fin du XIX^e siècle, les physiciens déterminèrent expérimentalement la forme du spectre thermique et sa variation en fonction de la température, mais l'analyse théorique resta embryonnaire ; à l'époque on cherchait seulement une expression mathématique reliant l'intensité du rayonnement à la fréquence et à la température. En d'autres termes, pour une température donnée, on cherchait à prévoir l'intensité des divers rayonnements.

En 1893, le physicien allemand Wilhelm Wien analysa avec plus de pertinence le spectre thermique. Wien se fondait sur une expérience de pensée semblable à celle que nous avons décrite au début de cet article ; il faisait cependant une hypothèse supplémentaire : le cylindre devait être parfaitement isolé, afin que la quantité de chaleur emprisonnée soit constante. Wien calcula alors la modification du spectre due à une variation infinitésimale du volume interne du cylindre. Il en déduisit que l'expression mathématique décrivant le spectre devait comporter deux facteurs, dont le produit était égal à l'intensité du rayonnement, à une fréquence et à une température données. L'un des facteurs était le cube de la fréquence ; l'autre une fonction du rapport entre la température absolue et la fréquence. Wien ne put toutefois déterminer la forme exacte de cette fonction ; il en proposa une... qui était fautive.

La théorie classique de l'électron

C'est Max Planck qui, en 1900, détermina la fonction mathématique nécessaire à la description du spectre. Planck découvrit que, pour décrire le rayonnement thermique, il fallait introduire une nouvelle constante fondamentale, égale à $6,626 \times 10^{-34}$ joule-seconde ; on dénomme aujourd'hui h cette «constante de Planck» ; en cherchant à interpréter sa fonction, Planck élaborait la théorie des quanta.

Selon la formule de Stefan et Boltzmann (la densité d'énergie du rayonnement thermique est proportionnelle à la puissance quatrième de la température), l'énergie doit être nulle au zéro absolu : à cette température, le rayonnement thermique disparaît complètement. Ainsi les résultats du XIX^e siècle, selon lesquels on pouvait éliminer tout le rayonnement thermique, rejoignaient une conception classique du vide, celle du XVII^e siècle : le vide parfait était



2. LE SYSTÈME IDÉAL constitué d'un piston glissant sans frottement dans un cylindre permet de comprendre l'existence d'un rayonnement thermique dans le vide. Initialement, le piston est au fond du cylindre, de sorte qu'aucun espace n'est compris entre le piston et le cylindre. On tire le piston et on le maintient tiré quelques temps dans cette position, à la température de la pièce. L'espace compris entre le piston et le fond du cylindre semble vide, mais, quand on relâche le piston, il ne revient pas à sa position initiale, même si on le pousse contre le fond du cylindre. Pendant que l'on maintient le piston écarté de sa position initiale, les parois du cylindre émettent un rayonnement qui remplit le «vide». Le retour du piston comprime le rayonnement dont la température augmente, ce qui modifie le spectre : le rayonnement, plus chaud, s'oppose à la compression.

toujours une région totalement vide de l'espace, mais pour atteindre cet état, il fallait non seulement retirer toute la matière visible et tous les gaz, mais aussi éliminer tout le rayonnement électromagnétique. On pouvait, théoriquement au moins, satisfaire cette dernière condition en refroidissant l'espace jusqu'à la température du zéro absolu.

Cette conception du vide classique était incluse dans la théorie physique fondamentale de l'époque, appelée aujourd'hui théorie classique de l'électron : on considérait les électrons comme des particules ponctuelles, dont les seules propriétés étaient la masse et la charge électrique ; on pouvait mettre les électrons en mouvement à l'aide de champs électriques et magnétiques et, inversement, leur mouvement produisait de tels champs (par exemple, un électron qui oscille régulièrement émet des ondes électromagnétiques à la fréquence de l'oscillation). En théorie classique de l'électron, on décrit les interactions entre les particules et les champs par les lois du mouvement établies par Newton et par les équations de l'électromagnétisme dues à James Clerk Maxwell. Pour obtenir des prévisions théoriques précises, il faut de plus spécifier certaines « conditions aux limites ». Les équations de Maxwell indiquent les variations d'un champ électroma-

gnétique dans l'espace ou dans le temps, mais pour calculer la valeur réelle du champ, il faut en connaître les valeurs initiales (appelées aussi valeurs limites), qui fournissent une référence par rapport à laquelle on calcule les modifications ultérieures.

C'est le choix des conditions aux limites qui, en théorie classique de l'électron, détermine la nature du vide : au XIX^e siècle, on pensait que le vide ne contenait aucun rayonnement et l'on supposait par conséquent que les champs électrique et magnétique y étaient initialement nuls. Autrement dit, selon la théorie classique de l'électron, au XIX^e siècle, on supposait que, dans un passé lointain, l'Univers contenait de la matière (les électrons), mais aucun rayonnement ; les rayonnements électromagnétiques résulteraient de l'accélération des charges électriques.

L'effet Casimir

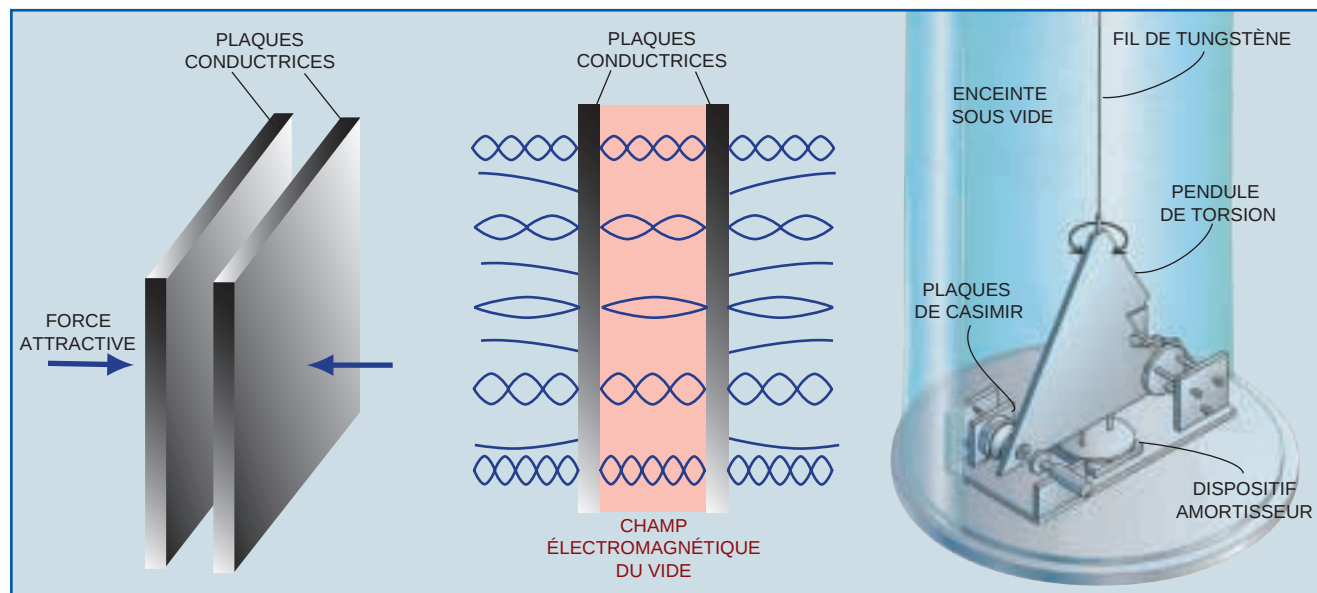
La théorie classique de l'électron reste aujourd'hui un édifice théorique intéressant, mais elle a pris une forme nouvelle au XX^e siècle. En 1948, Hendrick Casimir, des Laboratoires de recherche Philips, en Hollande, imagina une expérience qui mettait en lumière la nécessité de revoir la théorie classique de l'électron : Casimir analysa les forces qui agissent sur deux plaques conduc-

trices parallèles et proches l'une de l'autre, dans le vide. Si les plaques sont chargées électriquement, elles doivent subir une attraction ou une répulsion, selon les signes respectifs des charges qu'elles portent. Casimir considéra le cas où les plaques ne sont pas chargées : même alors, les plaques subissent une force en raison du rayonnement électromagnétique qui les entoure. Une analogie mécanique permet de comprendre l'origine de cette force.

Imaginons une corde lisse et souple que l'on a fait passer par des trous percés au centre de deux blocs de bois. Si la corde n'est pas liée aux blocs, elle ne tend, au repos, ni à les séparer ni à les rapprocher. En revanche, si on fait vibrer transversalement la corde entre les blocs, ceux-ci sont soumis à des forces qui les éloignent l'un de l'autre le long de la corde. Cette force résulte du fait que la corde ne peut pas vibrer à l'endroit où elle traverse les blocs ; les ondes sont réfléchies à cet endroit. Lorsqu'une onde est réfléchie, une partie de sa quantité de mouvement est transmise au réflecteur, c'est-à-dire au bloc.



Hendrick Casimir



3. L'EFFET CASIMIR dénote l'existence de champs électromagnétiques dans le vide. Deux plaques métalliques placées dans le vide sont disposées parallèlement et à faible distance. Les plaques métalliques sont conductrices et elles réfléchissent les ondes électromagnétiques ; or la réflexion d'une onde s'accompagne de la présence d'un nœud – c'est-à-dire un point d'amplitude nulle – de champ électrique à la surface de la plaque. Le système d'ondes qui s'établit entre les plaques produit une force d'attraction car seules les ondes dont les longueurs

d'onde sont des sous-multiples de la distance entre les deux plaques existent dans l'espace entre les plaques. Les ondes dont les longueurs d'onde sont autres existent en dehors de l'espace entre les plaques et poussent celles-ci l'une contre l'autre, d'où la force attractive. À droite, le schéma de l'appareil utilisé par Steve Lamoreaux (Laboratoire de Los Alamos) pour mesurer l'effet Casimir. L'attraction des plaques tend à faire tourner le pendule de torsion, et l'on mesure la force à exercer pour ramener le pendule à sa position initiale.