

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

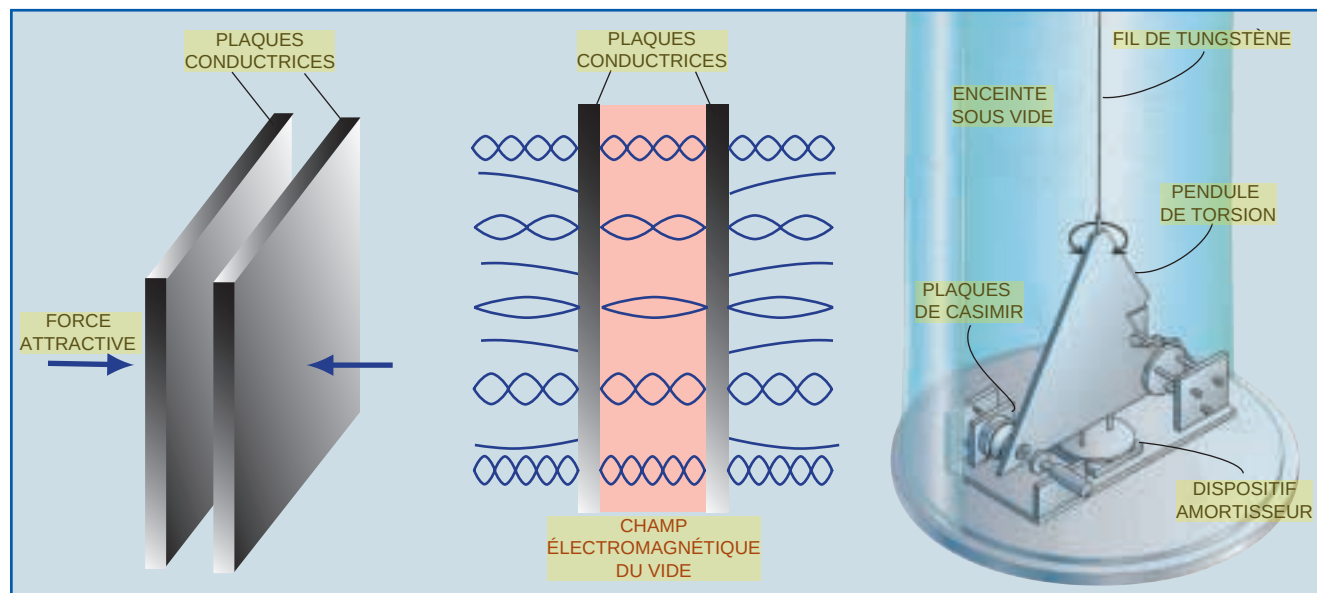
La théorie classique de l'électron reste aujourd'hui un édifice théorique intéressant, mais elle a pris une forme nouvelle au XX^e siècle. En 1948, Hendrick Casimir, des Laboratoires de recherche Philips, en Hollande, imagina une expérience qui mettait en lumière la nécessité de revoir la théorie classique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

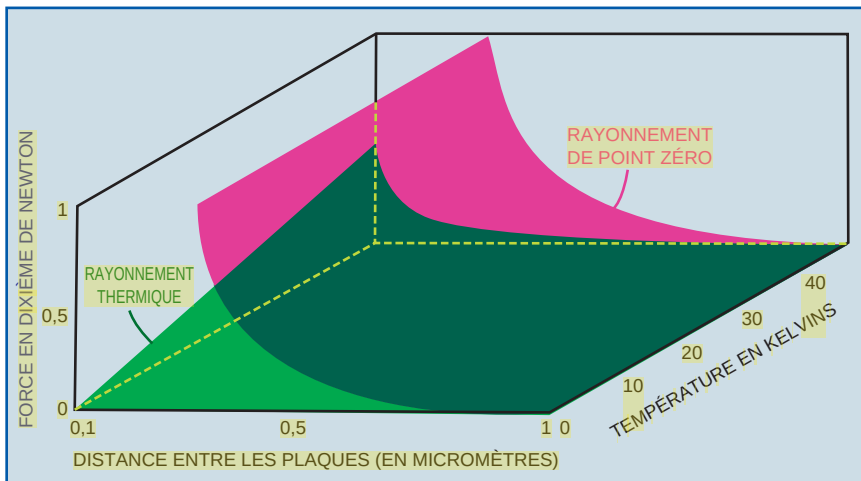


Hendrick Casimir



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

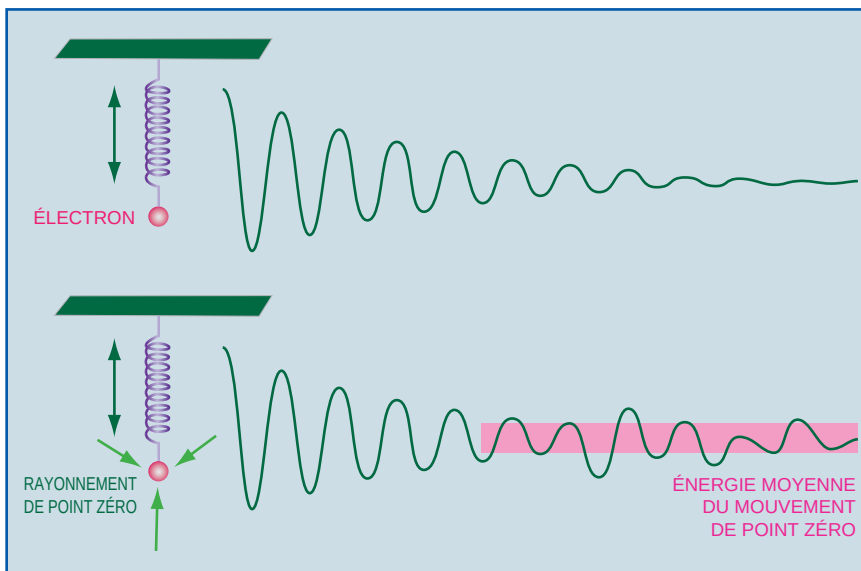
d'onde sont des sous-multiples de la distance entre les deux plaques existent dans l'espace entre les plaques. Les ondes dont les longueurs d'onde sont autres existent en dehors de l'espace entre les plaques et poussent celles-ci l'une contre l'autre, d'où la force attractive. À droite, le schéma de 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.



4. LA FORCE D'ATTRACTION ENTRE LES DEUX PLAQUES, dans l'expérience de Casimir, a deux composantes. À haute température, le rayonnement thermique (en vert) engendre une force directement proportionnelle à la température et inversement proportionnelle au cube de la distance entre les plaques. Cette force s'annule au zéro absolu, comme le rayonnement thermique lui-même. La force due au rayonnement de point zéro (en rose) est indépendante de la température et inversement proportionnelle à la puissance quatrième de la distance entre les plaques. Les forces correspondent ici à des plaques de un centimètre carré de surface.

Dans l'expérience de Casimir, la situation physique est analogue : les plaques métalliques correspondent aux blocs de bois et les champs électromagnétiques à la corde vibrante. Enfin, les trous par lesquels la corde traverse les blocs de bois représentent la conductivité des plaques métalliques. Les blocs réfléchissent les ondes électromagnétiques : comme

un rayonnement lèche les deux faces de chaque plaque les forces ont tendance à s'annuler. Mais, en fait, les forces ne sont pas exactement équilibrées : il reste une petite force résiduelle, proportionnelle à la surface des plaques et qui dépend aussi de leur écartement et du spectre du rayonnement électromagnétique aléatoire.



5. L'OSCILLATEUR HARMONIQUE est un système sur lequel on peut observer les effets du rayonnement de point zéro sur la matière. L'oscillateur est constitué d'un électron lié à un ressort idéal et sans frottement. Quand on écarte l'électron de sa position initiale, puis qu'on le relâche, il oscille autour de sa position d'équilibre et émet un rayonnement électromagnétique à la fréquence de l'oscillation. Ce rayonnement dissipe de l'énergie et, en l'absence du rayonnement de point zéro et à la température du zéro absolu, l'électron finit par s'immobiliser. En fait, le rayonnement de point zéro transmet sans arrêt des impulsions aléatoires à l'électron, de sorte qu'il ne s'arrête jamais totalement. Le rayonnement de point zéro confère à l'oscillateur une énergie moyenne, égale au produit de la fréquence de l'oscillation par la moitié de la constante de Planck.

Jusqu'ici, l'analyse est parfaitement conforme avec l'idée que les physiciens du XIX^e siècle se faisaient du vide. Dans ce cadre, la force agissant sur chaque plaque est due au rayonnement thermique aléatoire : quand on refroidit le système jusqu'à ce que sa température soit celle du zéro absolu, les forces doivent disparaître comme le rayonnement thermique. Or l'expérience contredit cette prédiction : en 1958, le physicien hollandais M. Sparnaay effectua une série d'expériences afin de tester les idées de Casimir et il observa que la force ne semblait pas s'annuler quand on réduisait fortement l'intensité du rayonnement thermique ; au contraire, on observait une force d'attraction résiduelle, qui doit persister même à la température du zéro absolu !

Cette force résiduelle est directement proportionnelle à la surface des plaques et inversement proportionnelle à la puissance quatrième de leur écartement ; la constante de proportionnalité est égale à $1,3 \cdot 10^{-27}$ joule-centimètre. La force résiduelle est faible, mais mesurable si les plaques sont suffisamment proches. Pour des plaques de un centimètre carré distantes de 0,5 micromètre (millième de millimètre), la force de Casimir est équivalente au poids d'une masse de 0,2 milligramme.

Quelle que soit l'importance exacte de l'effet Casimir, sa simple existence dénote une erreur fondamentale dans la théorie du XIX^e siècle sur le vide classique. Quand on compare la théorie et l'expérience, on constate que même à la température du zéro absolu, le vide classique n'est pas totalement vide ; il contient les champs électromagnétiques responsables de la force d'attraction mesurée par Sparnaay. On désigne aujourd'hui ces champs présents dans le vide sous le nom de rayonnement électromagnétique classique de point zéro.

Le spectre de point zéro

Quelles sont les caractéristiques de ce rayonnement de point zéro ? Le simple fait que ce rayonnement existe permet plusieurs constatations, car le rayonnement doit obéir aux postulats sur la nature du vide. Dans le vide, par exemple, aucun point n'est particulier, ni dans le temps, ni dans l'espace ; le vide doit paraître identique en tout lieu et dans toutes les directions. De ce fait, le rayonnement de point zéro, comme le rayonnement thermique, doit