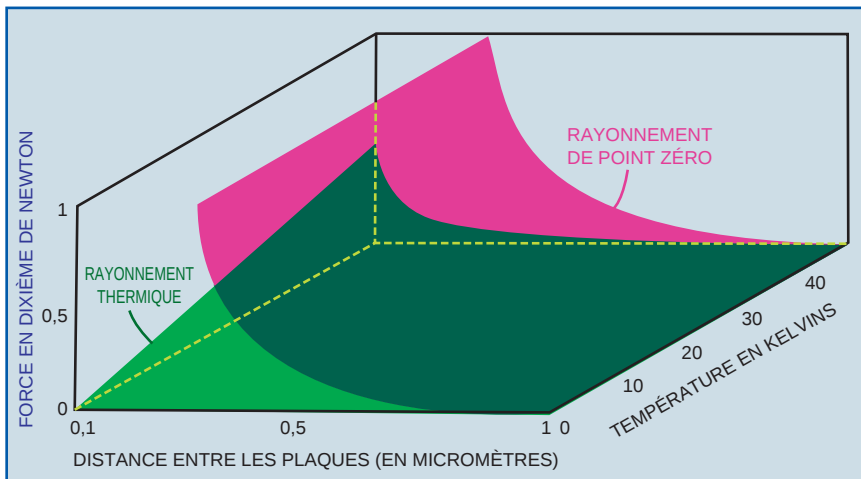
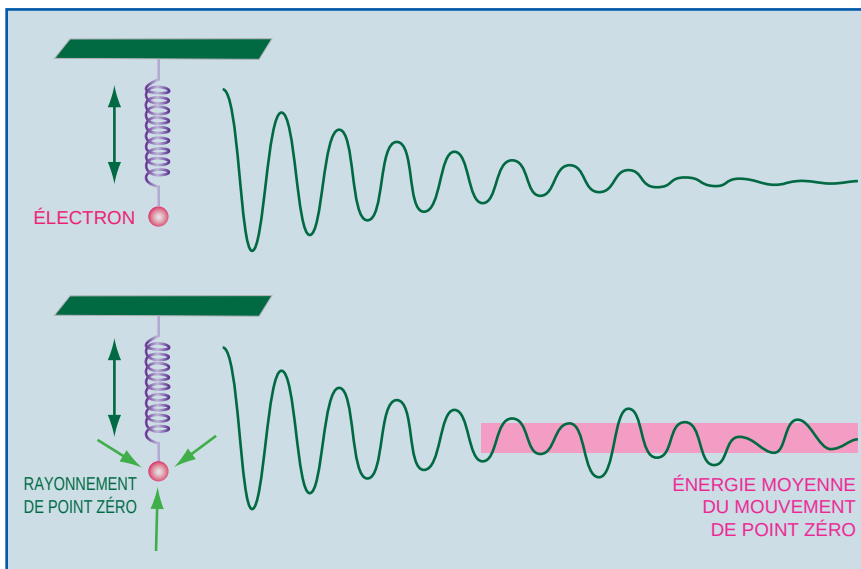




4. LA FORCE D'ATTRACTION ENTRE LES DEUX PLAQUES, dans l'expérience de Casimir, a deux composantes. À haute température, le rayonnement thermique (en vert) engendre une force directement proportionnelle à la température et inversement proportionnelle au cube de la distance entre les plaques. Cette force 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

être isotrope et homogène. D'autre part, aucune vitesse n'est particulière dans le vide : deux observateurs quelconques doivent en mesurer les mêmes propriétés physiques, quelle que soit leur vitesse l'un par rapport à l'autre, quand cette vitesse est constante. Autrement dit, le rayonnement de point zéro doit être invariant par la transformation de Lorentz (cette transformation, due au physicien hollandais H. Lorentz, permet de passer d'un référentiel à un autre, ces référentiels étant en mouvement uniforme les uns par rapport aux autres ; on tient compte du fait que la vitesse de la lumière est identique dans tous les référentiels ; la transformation de Lorentz joue un rôle important dans la théorie de la relativité restreinte, due à Albert Einstein).

L'invariance par la transformation de Lorentz est une condition très importante, comme nous allons le voir. Imaginons un voyageur qui hésite pour savoir si c'est son propre train qui se déplace, ou celui d'à côté : pour lever cette ambiguïté, il lui suffit de prendre pour repère un point qu'il sait fixe par rapport à la Terre. Or la condition d'invariance par la transformation de Lorentz stipule que de tels repères n'existent pas dans le vide et qu'aucune expérience ne permet à un observateur de connaître sa vitesse par rapport au rayonnement de point zéro. Pour vérifier cette condition, le spectre de rayonnement du vide doit, comme nous allons le voir, posséder des propriétés tout à fait particulières.

Supposons momentanément qu'un observateur observe le rayonnement de point zéro et qu'il constate que celui-ci n'est constitué que de lumière verte. Quelles que soient la position de l'observateur et la direction dans laquelle il effectue ses observations, le vide lui apparaît plein d'un rayonnement vert uniforme. Ce rayonnement est homogène et isotrope pour cet observateur particulier, mais l'est-il encore pour un autre observateur se dirigeant vers le premier à vitesse constante ? Non : en raison de l'effet Doppler, le second observateur en mouvement par rapport au premier observerait que le rayonnement est décalé en longueur d'onde, bleu devant lui et rouge derrière. D'autre part, en raison de la transformation de Lorentz, l'intensité du rayonnement est supérieure devant et inférieure derrière. Le rayonnement est donc différent selon l'observateur : il est isotrope pour l'un, mais pas pour l'autre.

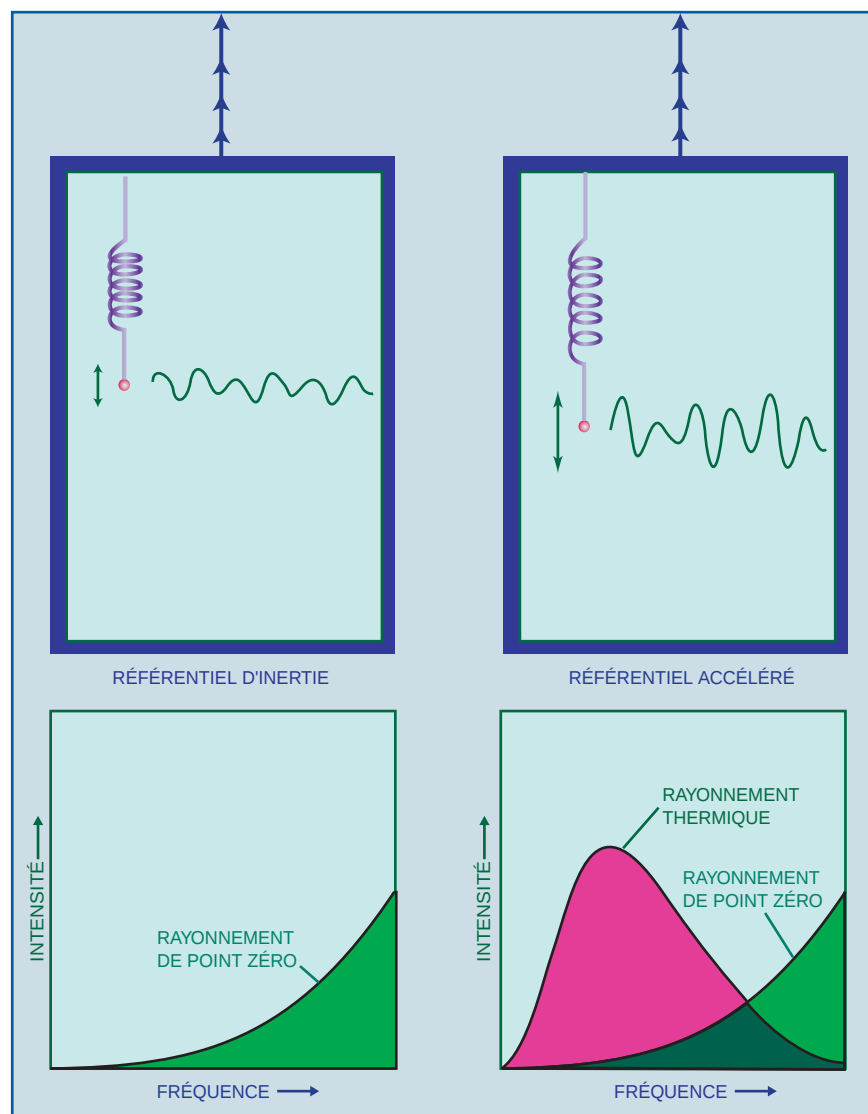
L'invariance par la transformation de Lorentz impose que le spectre de point zéro ait une structure bien particulière : l'intensité du rayonnement à une fréquence donnée doit être proportionnelle au cube de cette fréquence, car un spectre défini par une telle courbe apparaît identique à tous les observateurs, quelle que soit leur vitesse, à condition qu'elle soit constante. C'est en outre le seul spectre qui possède cette propriété.

L'énergie du vide

Le spectre de point zéro soulève une difficulté importante : comme l'intensité du rayonnement croît en fonction de la fréquence, la densité d'énergie du vide doit être infinie. Au XIX^e siècle, on aurait sans doute pensé que cette difficulté était

réduite, mais depuis les années 1940, on a rencontré des grandeurs infinies dans de nombreux domaines de la physique et l'on a mis au point des méthodes nouvelles pour en tenir compte. En général, on n'est confronté directement à des énergies infinies que pour les forces gravitationnelles ; tous les autres calculs font intervenir des variations ou des différences d'énergie qui, elles, sont toujours finies.

Si l'Univers baigne dans un rayonnement électromagnétique de point zéro, ce dernier devrait manifester sa présence par des phénomènes moins subtils que l'effet Casimir. On pourrait penser, par exemple, qu'il modifie le résultat de l'expérience du piston et du cylindre en s'opposant au retour du piston, même lors-



6. L'ACCÉLÉRATION d'un observateur, dans le vide, modifie le spectre du rayonnement qu'il observe. À la température du zéro absolu, un oscillateur harmonique placé dans un référentiel fixe ou se déplaçant à vitesse constante, n'est soumis qu'aux oscillations de point zéro. Dans un référentiel accéléré, la réponse de l'oscillateur est celle qu'il aurait si la température était supérieure à zéro.