

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.

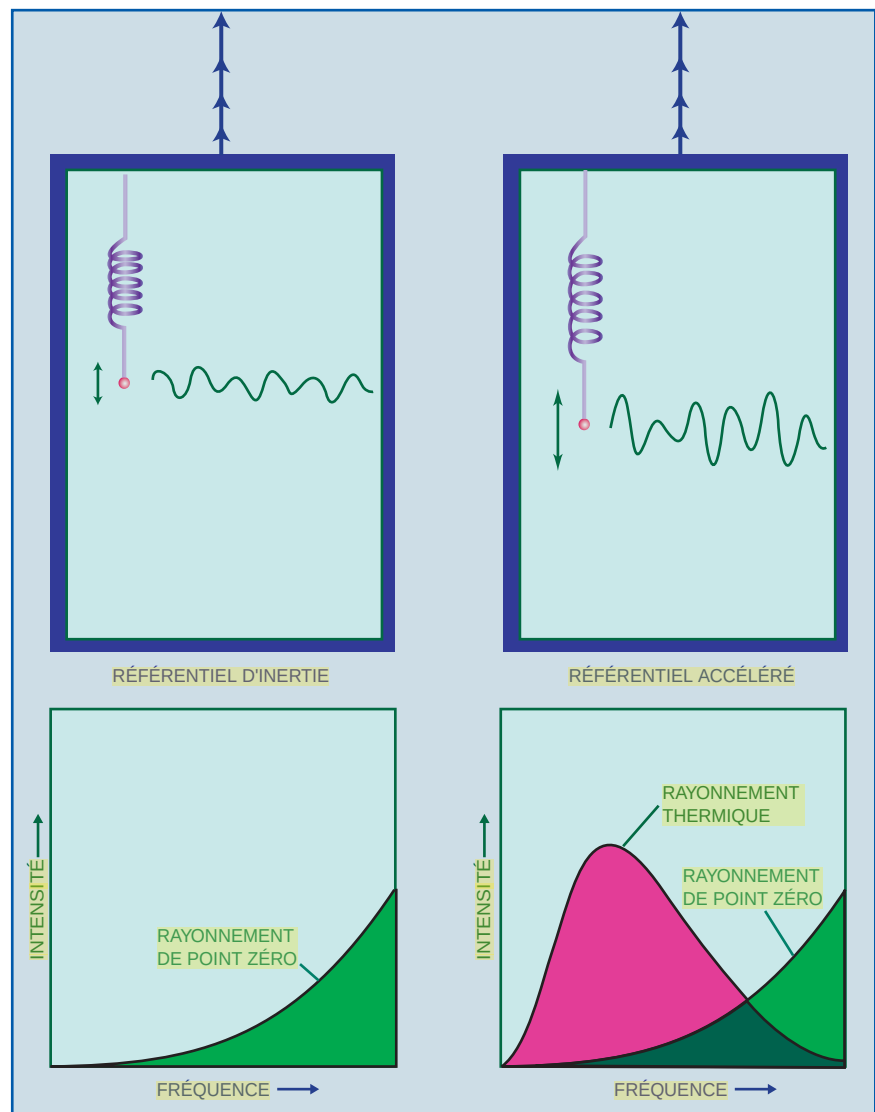
L'invariance par la transformation de Lorentz impose que le spectre de point zéro ait une structure bien particulière : l'intensité du rayonnement à une fréquence donnée doit être proportionnelle au cube de cette fréquence, car un spectre défini par une telle courbe apparaît identique à tous les observateurs, 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

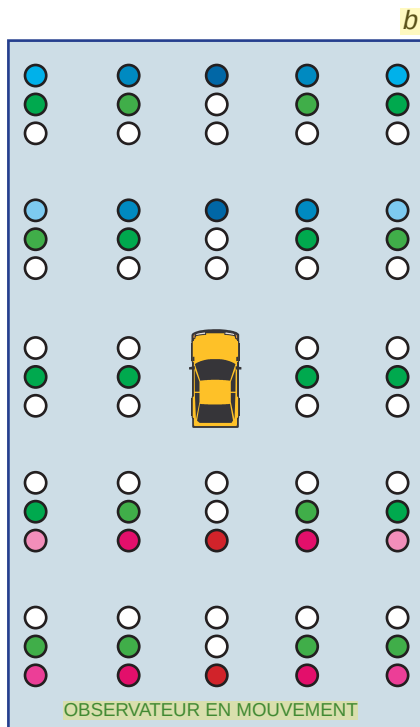
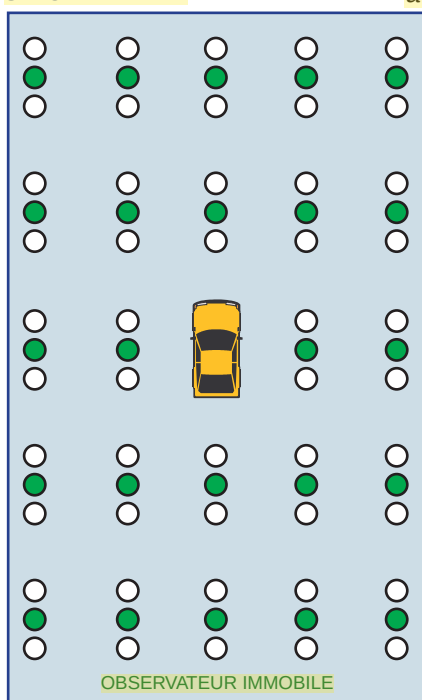
réduite, mais depuis les années 1940, on a rencontré des grandeurs infinies dans de nombreux domaines de la physique et l'on a mis au point des méthodes nouvelles pour en tenir compte. En général, on n'est confronté directement à des énergies infinies que pour les forces gravitationnelles ; tous les 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-

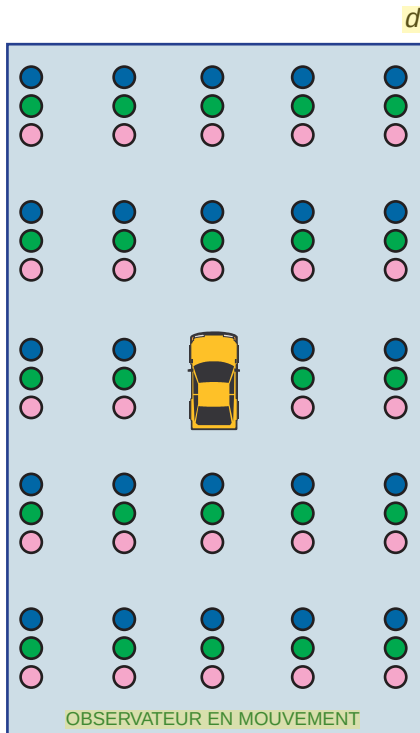
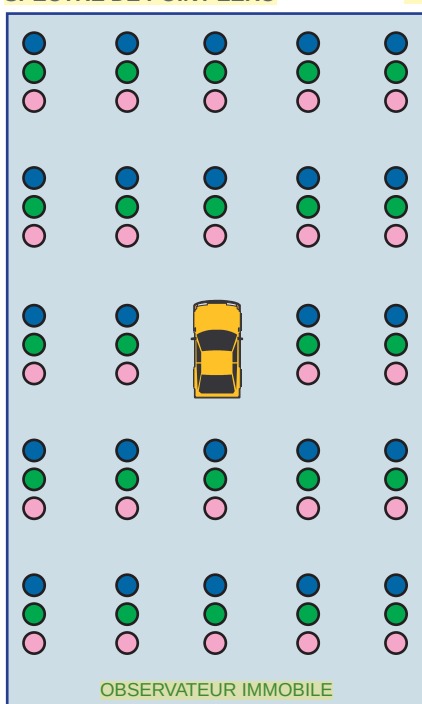


6. L'ACCÉLÉRATION d'un observateur, dans le vide, modifie le spectre du rayonnement qu'il observe. À la température du zéro absolu, un oscillateur harmonique placé dans un référentiel fixe ou se déplaçant à vitesse constante, n'est soumis qu'aux oscillations de point zéro. Dans un référentiel accéléré,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

SPECTRE "VERT"



SPECTRE DE POINT ZÉRO



7. LE RAYONNEMENT DE POINT ZÉRO est invariant par la transformation de Lorentz, de sorte que deux observateurs en mouvement uniforme l'un par rapport à l'autre mesurent les mêmes propriétés du vide. La transformation de Lorentz relie les référentiels en mouvement uniforme relatifs. Pour qu'un rayonnement soit invariant par cette transformation, il faut que son spectre le soit. L'exemple considéré sur cette figure illustre la conséquence du mouvement sur le spectre. Un observateur dans une voiture est entouré de feux de signalisation d'un genre particulier : ces derniers indiquent l'intensité du rayonnement de point zéro à trois fréquences, correspondant au rouge, au vert et au bleu. Supposons par exemple qu'un observateur au repos par rapport aux signaux les voit tous verts (a), c'est-à-dire que le rayonnement soit concentré dans la partie verte du spectre électromagnétique. Si l'observateur se déplace (b), il voit les signaux bleus devant lui et rouges derrière lui, en raison de l'effet Doppler. La transformation de Lorentz indique en outre que les signaux qui se rapprochent sont plus brillants que ceux qui s'éloignent. Un seul spectre possède la propriété d'être invariant par cette transformation : celui tel que l'intensité d'un rayonnement est proportionnelle au cube de la fréquence. Lorsque les couleurs des feux de signalisation suivent cette règle, deux observateurs, dont l'un est au repos (c) et l'autre se déplace (d) observent les mêmes spectres.

qu'on a supprimé tout rayonnement thermique.

Les calculs indiquent que cette intuition est fautive : à l'équilibre, quand on n'applique aucune force extérieure au piston, le rayonnement baigne également l'intérieur et l'extérieur du cylindre, et les pressions qu'il exerce sur le piston s'équilibrent. Cet équilibre est ainsi assuré pour le rayonnement thermique comme pour le rayonnement de point zéro. Quand on repousse le piston à l'intérieur du cylindre, le rayonnement est comprimé. Wien avait, nous l'avons vu, étudié la modification du spectre en fonction d'une variation de volume ; il avait calculé que le rayonnement thermique s'oppose à une compression, sa température augmentant et exerçant une pression supérieure sur le piston. Le résultat est complètement différent pour le rayonnement de point zéro : son spectre n'est pas modifié lors d'une compression : seul un spectre décrit par une courbe cubique possède cette propriété remarquable.

Le spectre décrit par une courbe cubique permet-il d'interpréter l'effet Casimir lui-même ? Par chance, oui : quand on calcule les effets de ce spectre, on retrouve les résultats de Sparnaay : la force d'interaction entre les plaques doit être directement proportionnelle à leur surface et inversement proportionnelle à la puissance quatrième de leur écartement. Une fois encore, le spectre décrit par une courbe cubique est le seul qui permette d'obtenir une telle variation en fonction de la distance.

La nouvelle théorie classique de l'électron

Le spectre décrit par une courbe cubique n'est « unique » que par sa structure : il existe, bien sûr, une infinité de courbes de même forme, mais d'amplitudes différentes. Pour toutes ces courbes, l'intensité du rayonnement est proportionnelle au cube de la fréquence, le coefficient de proportionnalité étant différent pour chaque courbe. Il est impossible de calculer théoriquement la valeur de ce coefficient, mais grâce à la mesure de Sparnaay, on déduit cette valeur de celle de la force qui apparaît dans l'effet Casimir. Un calcul simple donne une valeur de $3,3 \times 10^{-34}$ joule-seconde, c'est-à-dire la moitié de la constante de Planck : la constante de Planck, présente en physique quantique, surgit dans un phénomène classique.

Pour décrire l'existence du rayonnement de point zéro à l'aide de la théorie classique de l'électron, il faut modifier beaucoup cette dernière : si l'on utilise encore les lois du mouvement de Newton, pour les électrons, et les équations de Maxwell, pour le champ électromagnétique, on impose de nouvelles conditions aux limites : le vide contient initialement des champs électromagnétiques aléatoires, dont le spectre est un spectre de point zéro. Cette théorie corrigée constitue la théorie classique de l'électron avec rayonnement électromagnétique classique de point zéro, que l'on appelle plus simplement l'électrodynamique stochastique.

Les nouvelles conditions aux limites modifient les prévisions théoriques. Considérons, par exemple, l'un des modèles favoris de la physique moderne : un oscillateur harmonique constitué d'un électron lié à un ressort parfaitement élastique et sans frottement. Plaçons ce système mécanique idéal dans le vide classique : quand on lâche l'électron après avoir tendu le ressort, l'électron oscille autour de sa position d'équilibre et il émet un rayonnement électromagnétique à une fréquence caractéristique.

L'oscillateur harmonique est un modèle pratique, car on peut facilement calculer le mouvement de l'électron.

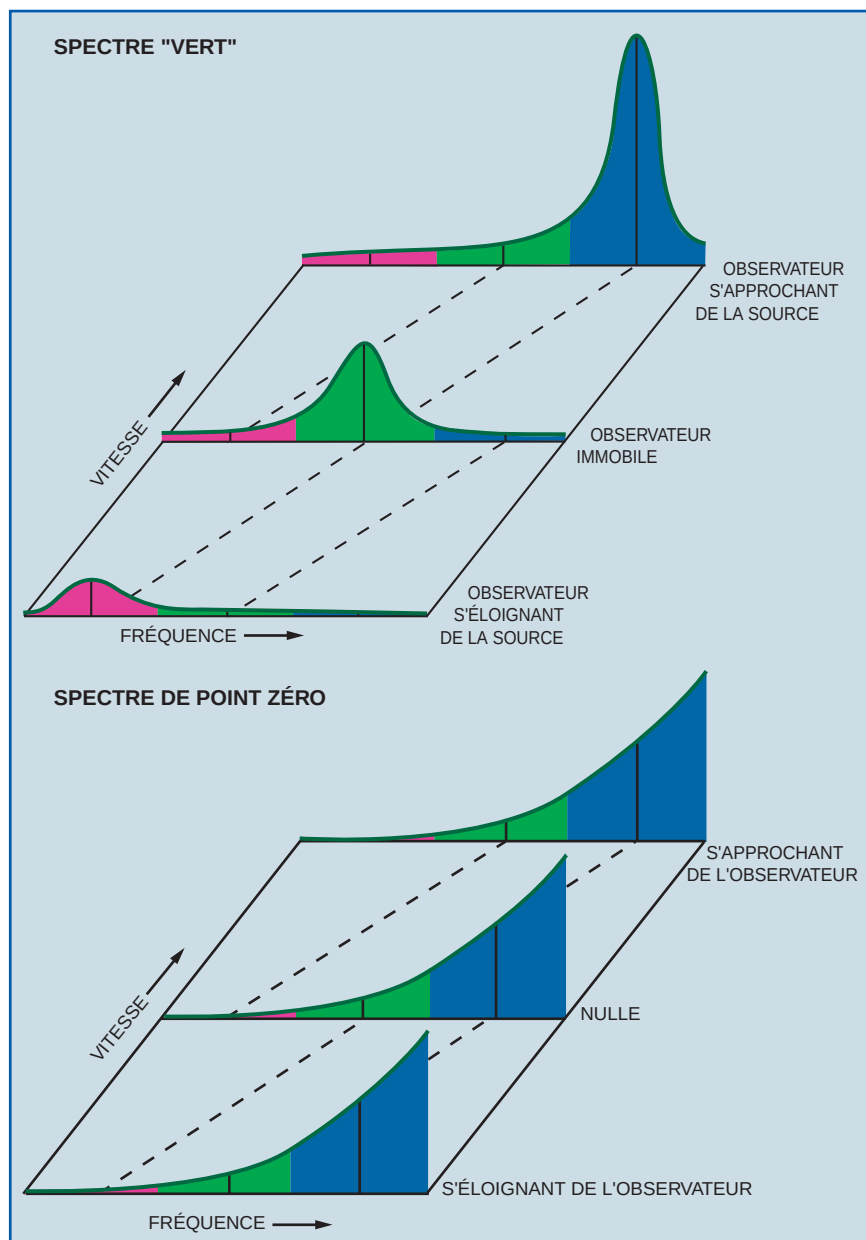
Selon la théorie classique de l'électron non modifiée, deux forces seulement agissent sur l'électron : la force de rappel du ressort et une force de réaction due à une émission de rayonnement ; comme la réaction s'oppose au mouvement de l'électron, les oscillations s'amortissent et l'électron finit par s'immobiliser. En revanche, selon l'électrodynamique stochastique, une force supplémentaire, due au rayonnement de point zéro, agit sur l'électron : l'électron interagit sans cesse avec les champs aléatoires de point zéro, de sorte qu'il ne s'immobilise jamais. L'oscillateur harmonique conserve une énergie moyenne, liée au spectre de point zéro et égale au produit de la moitié de la constante de Planck par la fréquence d'oscillation.

Jusqu'à ce point, nous avons décrit le vide classique tel que l'observe un observateur au repos ou en mouvement à vitesse constante. Les effets du rayonnement de point zéro sont cependant encore plus étonnants quand l'observateur est accéléré, c'est-à-dire lorsque sa vitesse change soit en intensité, soit en direction.

Les effets de l'accélération

Considérons un observateur dans une fusée qui accélérerait de façon constante par rapport à un référentiel supposé fixe, par exemple celui défini par des étoiles très éloignées. Comment cet observateur voit-il le vide classique ? Pour le savoir, il faut passer, par une transformation mathématique, du réfé-

rentiel fixe au référentiel accéléré. La transformation de Lorentz s'applique à des référentiels en mouvement uniforme les uns par rapport aux autres, mais ici, le problème est plus complexe, car la vitesse de l'observateur varie constamment. On peut cependant le résoudre en effectuant plusieurs transformations de Lorentz successives sur de petits intervalles de temps.



8. LE SPECTRE DE POINT ZÉRO est indépendant de la vitesse de l'observateur en raison des variations inverses de la fréquence et de l'intensité des rayonnements. Lorsqu'un observateur s'approche d'une source du rayonnement, toutes les fréquences sont décalées vers les hautes fréquences et toutes les intensités augmentent ; quand il s'en éloigne, c'est l'inverse qui se produit. Ainsi un spectre qui présente un pic dans le vert, pour un observateur immobile, présente un pic plus important dans le bleu pour un observateur qui s'approche de la source et un pic plus faible, dans le rouge, pour un observateur qui s'en éloigne. La courbe cubique qui décrit le spectre de point zéro est la seule où les décalages en fréquence et en intensité se compensent : la lumière qui apparaît verte dans le référentiel immobile devient bleue pour un observateur qui s'approche, mais son intensité devient égale à celle de la lumière bleue que voit l'observateur au repos ; de même, la lumière verte devient rouge pour un observateur qui s'éloigne, mais son intensité diminue en proportion.