

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.

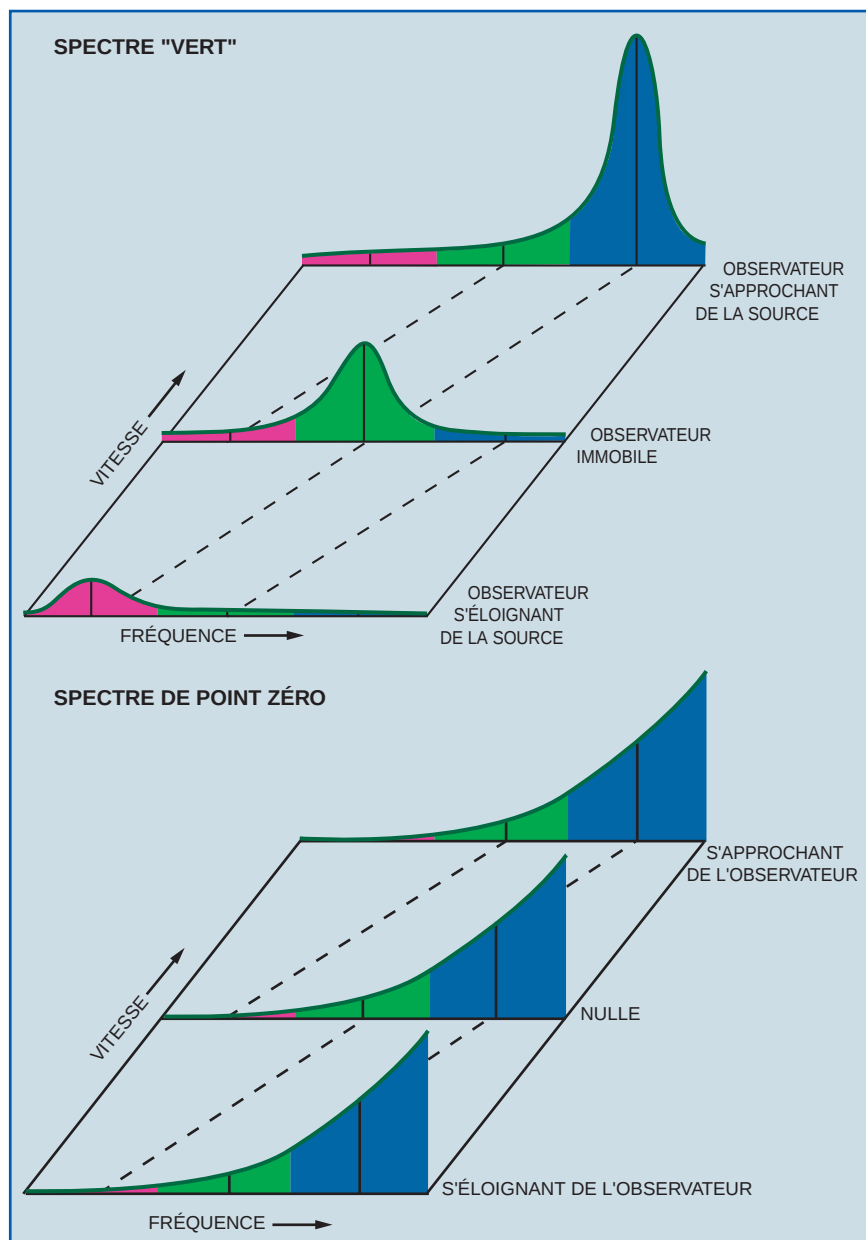
Selon la théorie classique de l'électron non modifiée, deux forces seulement agissent sur l'électron : la force de rappel du ressort et une force de réaction due à une émission de rayonnement ; comme la réaction s'oppose au mouvement de l'électron, les oscillations s'amortissent et l'électron finit par 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.

L'énergie du vide est-elle récupérable ?

Le principe d'incertitude d'Heisenberg limite nos connaissances... et détruit la possibilité que le vide ne soit «rien». Si nous supposons qu'une particule est dans une boîte nous limitons l'incertitude sur la position et notre incertitude sur la vitesse augmente. Le produit de l'incertitude sur la position par l'incertitude sur la vitesse est égale à une quantité faible, mais finie, la constante de Planck. Similairement l'incertitude sur l'énergie de tout objet dépend de l'incertitude sur le temps d'observation, ou plus simplement de la durée d'observation elle-même. Ainsi des particules peuvent apparaître dans le vide à cause de fluctuations d'énergie qui se transforment en masse pendant des durées extrêmement courtes.

Le vide n'est jamais vide ! Les particules entrent et sortent venant de nulle part et cette mystique du vide est inséparable de la physique quantique.

Si l'énergie du vide existe, on devrait voir ses manifestations. Selon certains physiciens, cette énergie est peut-être l'élément stabilisateur de l'électron en orbite autour du noyau de l'atome. Dans la physique classique les électrons accélérés sur une orbite circulaire émettent un rayonnement électromagnétique et leur énergie diminue : les électrons devraient alors tomber, après très peu de temps, sur le noyau. Pour expliquer l'immobilité de leur trajectoire, le physicien américain controversé Harold Puthoff suppose que l'électron absorbe continuellement l'énergie du vide.

Les physiciens ont démontré, prolongeant ainsi l'expérience de Casimir, que la présence d'une cavité suffisamment petite empêche, dans la cavité, l'électron de tomber sur des niveaux d'énergie inférieure en émettant un rayonnement (voir Serge Haroche et Jean-Michel Raimond, *Électrodynamique quantique en cavité*, Pour la Science, juin 1993). Tout comme les grandes longueurs d'onde ne peuvent exister entre les plaques de l'expérience de Casimir, la cavité est si petite que les grandes longueurs d'onde du rayonnement du vide y sont absentes et les transitions correspondantes y sont interdites.

H. Puthoff pense que dans des configurations de confinement adéquat il serait possible de manipuler le spectre du vide de façon que le niveau inférieur de l'électron ait une énergie inférieure (l'atome serait plus petit). En tombant sur ce niveau, l'électron céderait une énergie récupérable. On ne peut encore imaginer de dispositif pratique pour récupérer l'énergie du vide fournie par des atomes de taille réduite. Les physiciens tentent aussi de concevoir un effet Casimir asymétrique permettant de propulser un vaisseau dans le vide intersidéral... sans résultat pour l'instant.

L'espoir de soutirer de l'énergie au vide est fondé sur l'hypothèse qu'une énergie notable est disponible. Certaines théories mathématiques avancent que l'énergie du vide est infinie : l'énergie qui nous baigne, argumentent les récupérateurs optimistes, est invisible car elle est uniforme et pénètre toutes les régions de l'espace, et ainsi la résultante des forces s'exerçant sur un objet est nulle.

Que les mathématiques indiquent une énergie du vide infinie n'est pas à prendre sans précaution, remarquent les pessimistes. Des infinis apparaissent dans certaines équations et les physiciens s'attachent à les faire disparaître, car ils pensent que ce sont des artefacts de calcul. Ainsi le calcul de la masse de l'électron donne un infini que les physiciens éliminent par un processus dit de renormalisation. Bienfait pour les mathématiciens, l'infini est abhorré par le physicien.

Sur la foi des résultats des expériences de type Casimir, beaucoup de physiciens pensent que l'énergie du vide est minime, les expériences élaborées n'ayant permis de n'extraire que 10^{-15} joule.

Pour extraire une quantité notable d'énergie il faudrait des appareils gigantesques.

Un autre argument invalidant l'existence d'une énergie considérable dans le vide est la courbure de l'espace. L'énergie étant équivalente à la masse, l'énergie du vide devrait «courber» l'espace de façon notable, ce qui n'est pas le cas, la somme des angles d'un triangle étant égale à 180 degrés, aussi loin que nos mesures le permettent, sauf au voisinage de certaines étoiles massives. De plus, si cette masse équivalente existait dans tout l'Univers, elle déformerait l'espace dont la nature serait différente et la présence de cette masse serait observée. L'énergie du vide modifierait aussi la constante cosmologique, alors que les mesures astronomiques actuelles semblent montrer qu'elle est quasiment nulle.

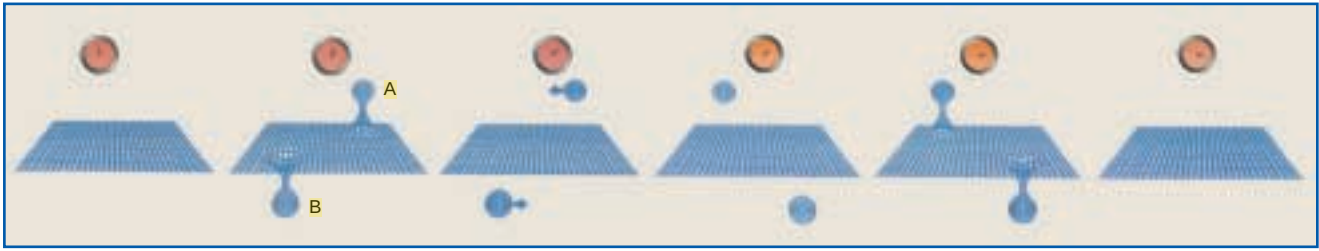
Si l'énergie du vide est importante, il doit exister une «énergie négative» qui l'annihile presque totalement. En résumé, l'énergie du vide ne serait importante que pour les pseudo scientifiques et les fervents mystiques du surnaturel : l'enthousiasme de Harold Puthoff est d'ailleurs critiqué.

Néanmoins certains physiciens invoquent l'énergie du zéro pour expliquer l'inertie, la résistance à l'accélération perçue par tous les corps. En réduisant l'énergie du zéro on pourrait peut-être accélérer plus facilement les masses. Et de rêver à de possibles voyages interstellaires... Il faudrait, pour étayer cette théorie, observer le sillage gravitationnel d'une masse en mouvement dans le vide.

L'exploitation de l'énergie du vide n'est plus un fantasme, mais elle reste irréaliste : trop belle pour être envisageable, voire possible.

DES PHYSICIENS, comme Harold Puthoff (ci-dessous), directeur de l'Institut des Études Avancées de Austin, au Texas, ont tenté d'extraire l'énergie du vide (ici au moyen d'un montage de production de bulles par ultrasons). Jusqu'à présent aucune tentative n'a donné de résultat probant.





9. LE VIDE EST SOUMIS AUX FLUCTUATIONS quantiques : en conséquence des particules virtuelles apparaissent spontanément dans le vide pendant des temps très courts, de l'ordre de la constante

h de Planck. Ces particules sont émises en couple, une particule de matière, A et une particule d'antimatière, B. Ainsi, le vide ne l'est jamais tout à fait...

On pourrait penser que, pour un observateur accéléré, le spectre n'est plus isotrope et que l'«avant» et l'«arrière» paraissent différents ; on pourrait aussi imaginer que l'aspect du spectre varie tant que l'observateur est accéléré. En fait, ces intuitions sont erronées : le spectre est homogène et isotrope et il ne change pas tant que l'accélération est constante. En revanche, le spectre observé par un observateur uniformément accéléré n'est pas celui que voit un observateur non accéléré. Pour chaque fréquence, le rayonnement est plus intense dans le référentiel accéléré que dans le référentiel au repos.

La forme du spectre électromagnétique classique pour un observateur accéléré n'est pas facile à comprendre, mais on peut l'interpréter en analysant le mouvement d'un oscillateur placé dans une fusée.

L'accélération, équivalente à un échauffement

L'équation du mouvement de cet oscillateur ressemble beaucoup à l'équation du mouvement dans un référentiel immobile. Il existe cependant deux différences notables : d'une part, la force de réaction au rayonnement comporte un nouveau terme, proportionnel au carré de l'accélération ; d'autre part, l'oscillateur est exposé à un nouveau rayonnement aléatoire lié à l'accélération. Au total, l'énergie moyenne de l'électron accéléré est supérieure à celle de l'électron oscillant dans un référentiel au repos. En d'autres termes, lorsqu'un oscillateur est accéléré, il vibre erratiquement plus fortement dans le vide que s'il était au repos.

Pour comprendre l'effet de l'accélération sur l'oscillateur harmonique, on peut chercher le spectre électromagnétique qui s'ajoute au rayonnement de point zéro pour engendrer ce mouvement supplémentaire. Il faut pour cela considérer le «principe

d'équivalence» sur lequel Einstein fonda sa théorie de la gravitation ; selon ce principe, un observateur, situé dans un petit laboratoire placé dans un champ gravitationnel, effectue exactement les mêmes mesures qu'un observateur placé dans une petite fusée qui accélère uniformément. La physique dans un référentiel accéléré est identique à celle dans un référentiel placé dans un champ gravitationnel uniforme. Comme les lois de la thermodynamique restent valables dans un champ gravitationnel, elles doivent l'être encore dans une fusée qui accélère uniformément : aussi, pour conserver l'équilibre, le spectre du rayonnement supplémentaire ne peut être qu'un spectre thermique. Dans tout autre cas, l'oscillateur ne serait pas en équilibre thermique avec son environnement et il pourrait servir à réaliser une machine à mouvement perpétuel.

La conclusion est directe et étonnante : un système physique uniformément accéléré dans le vide présente les mêmes propriétés à l'équilibre qu'un système non accéléré soumis à un rayonnement thermique à une température supérieure au zéro absolu.

William Unruh, de l'Université de Colombie britannique, et P. Davies, de l'Université de Newcastle-on-Tyne, ont trouvé vers 1976 la relation mathématique qui relie l'accélération à la température. Le spectre réel que peut enregistrer un observateur uniformément accéléré dans le vide est la somme de deux composantes : l'une est due au rayonnement de point zéro ; l'autre est le spectre du rayonnement thermique proposé par Planck en 1900. Planck ne put expliquer la forme de ce spectre qu'en introduisant, à contre-cœur, certaines idées de mécanique quantique ; on découvre aujourd'hui que l'on peut décrire cette courbe avec une analyse entièrement classique du rayonnement dans le vide !

Avec ce type de raisonnement, on obtient néanmoins un résultat surprenant : si l'on se fonde à nouveau sur le principe d'équivalence évoqué précédemment, il doit exister une température minimale au-dessous de laquelle on ne peut pas refroidir les systèmes placés dans les champs gravitationnels. Cette limite est une limite absolue, indépendante de toutes les difficultés pratiques qui s'opposent au refroidissement. À la surface de la Terre, cette limite est égale à 4×10^{-20} kelvins ; elle est bien inférieure aux températures que l'on sait réaliser, mais elle est supérieure à zéro.

Les relations entre le rayonnement thermique et la structure du vide classique révèlent une unité inattendue dans les lois de la physique, mais elle rend plus complexe notre conception du vide. Avec son ensemble de champs électriques et magnétiques aléatoires, le vide reste l'état le plus simple de la nature... aux étonnantes propriétés.

Timothy BOYER est professeur de physique à l'Université de New York.

H. PUTHOFF, a des sites sur internet, dont : <http://www.newphys.se/elektromagnetism/physics/puthoff/>

T.H. BOYER, *A Brief Survey of Stochastic Electrodynamics*, in *Foundation of Radiations Theory and Quantum Electrodynamics*, sous la direction de A.O. Barut, Plenum Press, 1980.

D.W. SCIAMA, P. CANDELAS et D. DEUTSCH, *Quantum Field Theory, Horizons, and Thermodynamics*, in *Advances in Physics*, vol. 30, n° 3, pp. 327-366, mai-juin 1981.

T.H. BOYER, *Derivation of the Blackbody Radiation Spectrum from the Equivalence Principle ...*, in *Physical Review D*, vol. 29, n° 6, 15 mars 1984.

S. LAMOREAUX, *Demonstration of the Casimir Force in Phys. Rev. Letters*, vol. 78, n° 1, pp. 5-8, janvier 1997.
