

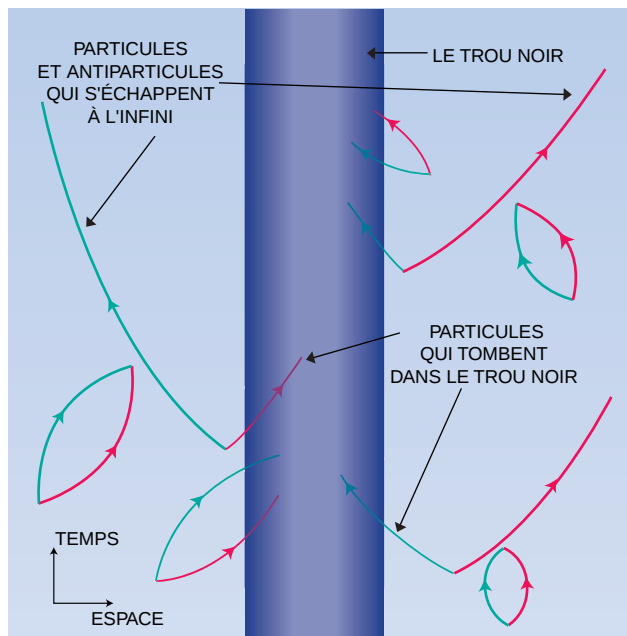
sible aujourd'hui à nos observations serait née d'un germe minuscule, dans lequel les liens entre événements étaient déterminés par les règles de la relativité (causalité).

Quelle taille devrait avoir eu ce domaine originel pour avoir englobé l'ensemble de l'Univers que l'on observe aujourd'hui? Grâce au modèle standard, on déduit de l'état actuel du Cosmos – c'est-à-dire de sa température (2,7 kelvins) et sa taille (égale à la distance des objets les plus éloignés connus) – ses caractéristiques à la fin de l'ère d'inflation : il mesurait alors quelque dix centimètres. Comme l'inflation a multiplié toutes les longueurs par un facteur 10^{29} , le germe de l'Univers actuel était confiné dans un domaine de l'ordre de 10^{-28} centimètre. Le physicien russe Andreï Linde a proposé des généralisations de cette image. Selon lui, le «Grand Univers» se composerait de bulles d'univers individuelles séparées les unes des autres, l'une

se formant ici, l'autre s'évanouissant ailleurs, selon des évolutions simultanées et indépendantes. Nous nous trouverions dans l'une de ces bulles, qui aurait la particularité de nous avoir fourni des conditions de vie acceptables. Curieusement, le principe anthropique suivant lequel l'Univers a été créé pour que l'homme puisse exister trouverait dans la théorie de Linde une sorte d'explication : parmi la multitude des bulles cosmiques, il s'en serait trouvé une par hasard pour réunir les conditions nécessaires à la vie.

Le début de l'Univers

Qui ne se satisfait pas de ce genre d'explication de l'origine des choses doit se pencher plus avant sur la question des conditions initiales de l'Univers et s'interroger : «Qu'y avait-il avant le Big Bang?» Les physiciens ne savent comment répondre à cette question métaphysique. La gravitation quantique le permettra-t-elle? C'est à une théorie définitive de toutes les interactions physiques qu'il faudrait se référer pour analyser la singularité initiale. Y a-t-il eu au début de l'Univers une «corde» à 10 ou 11 dimensions? Dans ses *Confessions* (livre 11) : saint Augus-



7. LE VIDE QUANTIQUE est en permanence le siège de la création de paires composées d'une particule (en vert) et d'une antiparticule (en rouge). Ces paires sont dites virtuelles parce qu'elles ne sont pas observables. À peine sont-elles créées qu'elles s'annihilent déjà. Lorsque c'est le cas à proximité d'un trou noir, il arrive que l'un de ses membres (particule ou antiparticule) y disparaisse. Ainsi libéré de sa compagne virtuelle, l'autre devient une particule réelle et échappe (parfois) à l'attraction du trou noir. Pour l'observateur extérieur, tout se passe alors comme si le trou noir émettait un rayonnement thermique, le rayonnement de Hawking.

tin répondit à la question de la naissance de l'Univers par une pirouette : «À la question : "Que faisait Dieu, avant qu'il ne crée le Monde?", certains seraient tentés de répondre : "Il préparait l'Enfer, pour les personnes qui poseraient cette question."»

Même si nous ne disposons pas encore de la théorie de la gravitation quantique, nous pouvons spéculer sur la nature de l'Univers quantique. S. Hawking s'est beaucoup intéressé à cette question. Il propose de se limiter, à des espaces-temps d'une structure très simple, lisse, de courbure régulière. Le temps n'existe pas encore dans ce cosmos quantique constitué d'une série d'espaces à quatre dimensions, c'est-à-dire des surfaces d'espaces sphériques à cinq dimensions.

Notre Univers, caractérisé par une évolution temporelle, aurait émergé à partir d'une partie finie de cet univers quantique intemporel. La question du passé de ce «petit pois originel» n'a pas de sens dans le cadre normal de l'espace et du temps ; tout comme cela n'aurait pas de sens de demander la latitude et la longitude d'un point qui ne serait pas à la surface de la Terre.

Penrose lui aussi est convaincu que

l'Univers primordial était plat et uniforme. Il s'en est persuadé en quantifiant le désordre de l'Univers, c'est-à-dire son entropie. Il prend en compte non seulement le désordre associé au rayonnement et à la matière, mais aussi les sources d'entropie plus rares, dissimulées au sein du champ de gravitation, dans les rides et dans les courbures de l'espace-temps, ainsi que dans les trous noirs. Les valeurs qu'il obtient sont gigantesques : les conditions initiales nécessaires à la naissance de notre Univers n'avaient qu'une chance parmi quelque 10 milliards à la puissance 120 de se produire. Une probabilité aussi faible a-t-elle un sens ?

Toutes ces réflexions sur les premières fractions de seconde de l'Univers relèvent du domaine de la spéculation. Les physiciens sont encore loin d'expliquer le Big Bang. Spéculer engendre un tel plaisir chez les cosmologistes pen-

chés sur ces questions qu'ils succombent parfois à la tentation de prendre leurs constructions théoriques pour la réalité. Pour reprendre les mots d'Einstein : «Ceux qui élaborent des théories dans ce domaine trouvent les fruits de leur imagination si naturels qu'ils ne les voient plus comme des édifices intellectuels, mais comme des réalités, qu'ils aimeraient voir reconnues.»

Gerhard BÖRNER est théoricien à l'Institut Max Planck d'astrophysique à Garching, près de Munich.

Jonathan HALLINELL, *La cosmologie quantique et la création de l'Univers*, Pour la Science, février 1992.

Stephen HAWKING, *Black Holes and Baby Universes and other Essays*, Bantam Books, 1993.

Wendy FREEDMAN, *L'expansion de l'Univers*, Pour la Science, janvier 1993.

Andreï LINDE, *L'univers inflatoire et autoreproducteur*, Pour la Science, janvier 1995.

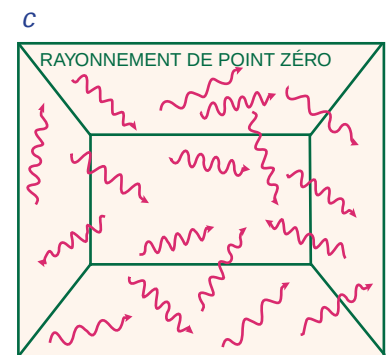
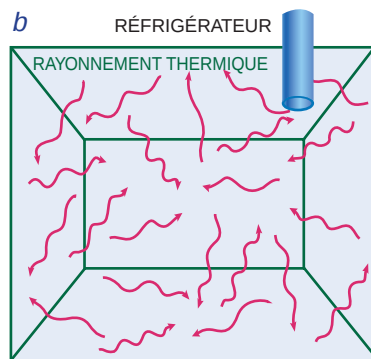
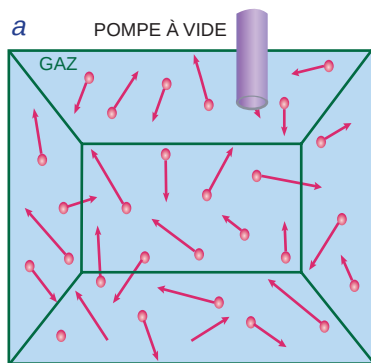
Marc LACHIÈZE-RAY et Jean-Pierre LUMINET, *La topologie de l'Univers*, Pour la Science, décembre 1996.

La révolution cosmologique, Pour la Science, mars 1999.

L'infiniment vide n'existe pas

TIMOTHY BOYER

Le vide classique n'est pas vide. Même quand on a supprimé toute la matière et le rayonnement thermique d'une partie de l'espace, le vide de la physique contient encore des champs électromagnétiques, des particules fugaces, et possède une certaine énergie.



Aristote et ses élèves croyaient qu'aucune région de l'espace ne pouvait être entièrement vide : le vide (le «rien»), leur semblait aussi hors d'atteinte que l'infini (le tout). Les physiciens du XVII^e siècle s'inscrivirent en faux contre l'affirmation aristotélicienne que «la nature a horreur du vide» et Torricelli démontra que le vide existait. Or, selon la physique moderne, l'idée d'Aristote est ressuscitée : si l'on peut, au moins en principe, retirer toute la matière ordinaire d'une partie de l'espace, le vide ainsi obtenu n'est pas synonyme de «rien».

La terminologie est alors ambiguë : si le vide n'est pas vide, mériterait-il son nom ? Les physiciens modernes définissent le vide comme ce qui reste quand on a éliminé tout ce qu'il est expérimentalement possible d'enlever d'une partie de l'espace : ainsi le vide est défini par une limite expérimentale.

Pour faire le vide, on prélève d'une enceinte toute matière visible, solide liquide ou gazeuse (voir la figure ci-dessus). Quand on a prélevé toute la matière, l'espace n'est toujours pas vide : il contient encore un rayonnement électromagnétique. Une partie de ce rayonnement est d'origine thermique, issue du rayonnement des corps matériels, et peut donc être supprimée par refroidissement de l'enceinte contenant le vide, mais l'autre partie du rayonnement est d'origine différente. Quand bien même on réduirait (par la pensée) la température du vide jusqu'au zéro absolu, il subsisterait un ensemble fluctuant d'ondes électromagnétiques. Ce rayonnement résiduel, le rayonnement de point zéro, qu'il est impossible de supprimer, est une caractéristique du vide.

En 1644, l'ancien secrétaire de Galilée, Évangéliste Toricelli, inventa le baromètre. Cette invention allait démontrer

l'erreur de la doctrine d'Aristote, selon laquelle le vide était physiquement impossible. Toricelli avait placé du mercure dans un tube en verre fermé à une extrémité, puis il avait retourné le tube sur une cuve remplie de mercure. Le mercure était alors descendu dans le tube jusqu'à ce que sa surface libre se trouve à une hauteur de 76 centimètres au-dessus du niveau du mercure dans la cuve ; un espace sans mercure s'était constitué dans la partie supérieure du tube et cet espace était manifestement dépourvu de toute matière visible. Pour Toricelli, il ne contenait pas non plus de gaz et était donc vide. Une vive polémique s'engagea entre les partisans d'Aristote et ceux de Toricelli. Quelques années plus tard, Blaise Pascal imagina une série d'expériences qui confirmèrent toutes l'hypothèse de Toricelli.

Durant les décennies suivantes, de nombreux physiciens s'intéressèrent aux expériences sur le vide. La plus connue,

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.



The Granger Collection

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.

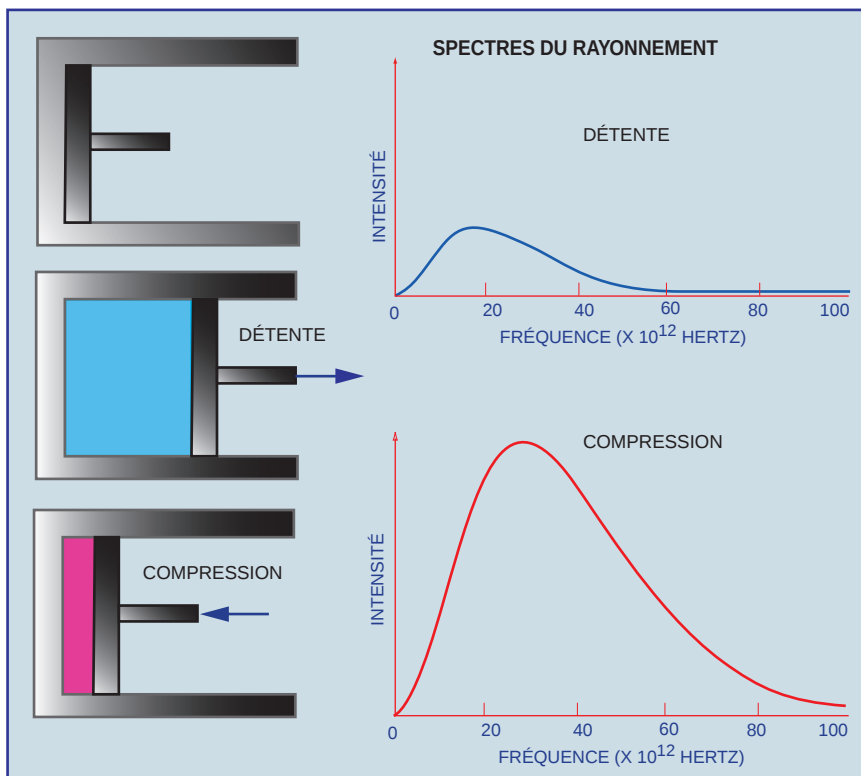
Vers la fin du XIX^e siècle, les physiciens déterminèrent expérimentalement la forme du spectre thermique et sa variation en fonction de la température, mais l'analyse théorique resta embryonnaire ; à l'époque on cherchait seulement une expression mathématique reliant l'intensité du rayonnement à la 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 élabora 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

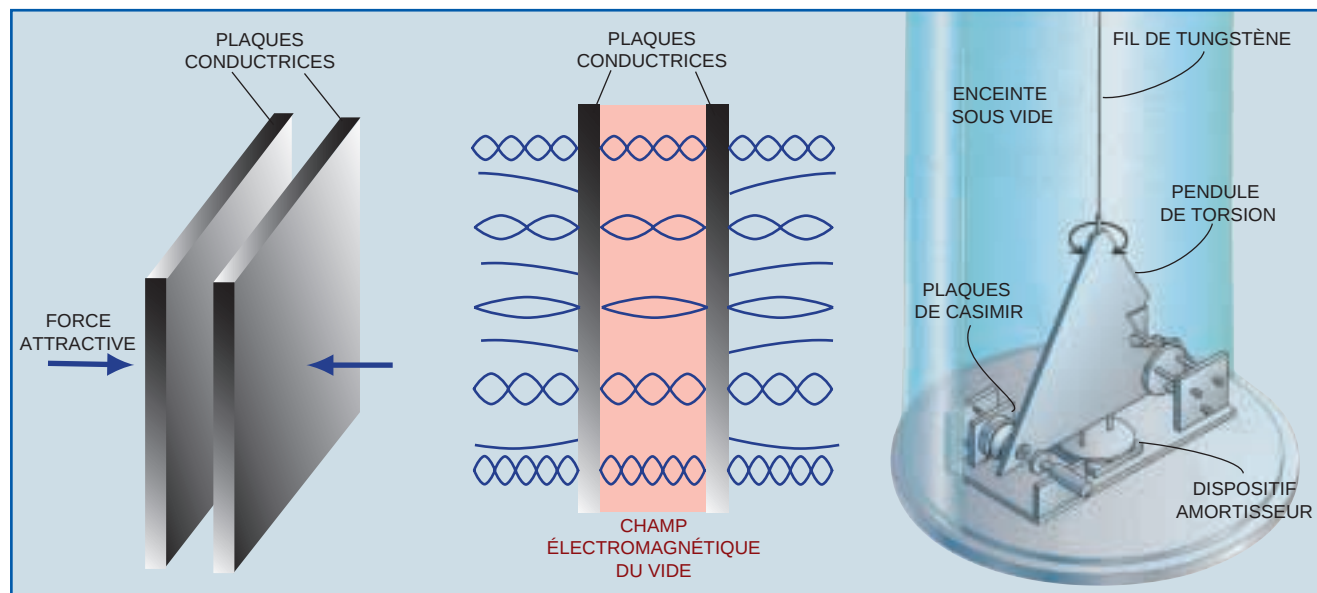
La théorie classique de l'électron reste aujourd'hui un édifice théorique intéressant, mais elle a pris une forme nouvelle au XX^e siècle. En 1948, Hendrick Casimir, des Laboratoires de recherche *Philips*, en Hollande, imagina une expérience qui mettait en lumière la nécessité de revoir la théorie classique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

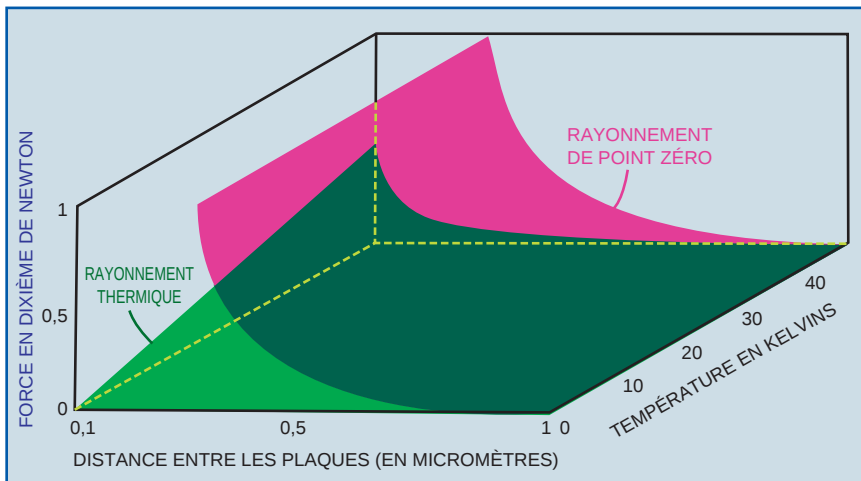


Hendrick Casimir



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

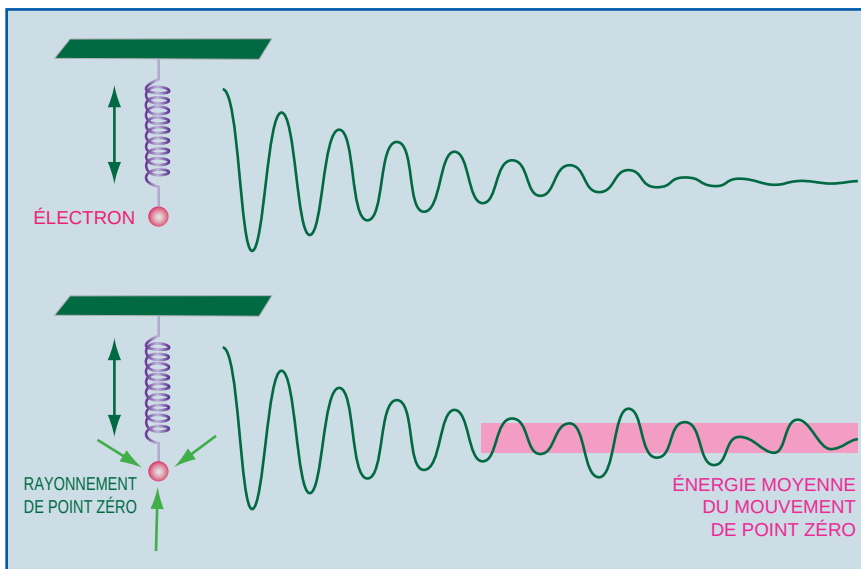
d'onde sont des sous-multiples de la distance entre les deux plaques existent dans l'espace entre les plaques. Les ondes dont les longueurs d'onde sont autres existent en dehors de l'espace entre les plaques et poussent celles-ci l'une contre l'autre, d'où la force attractive. À droite, le schéma de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



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.

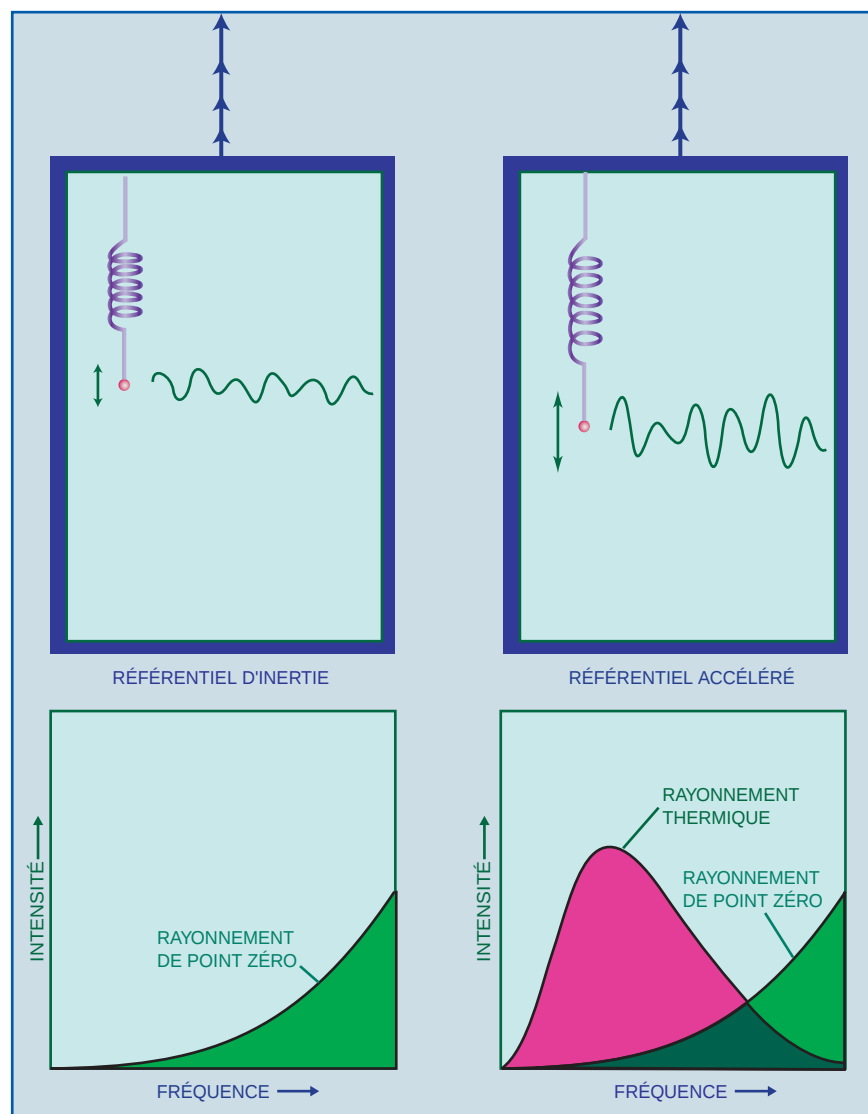
L'invariance par la transformation de Lorentz impose que le spectre de point zéro ait une structure bien particulière : l'intensité du rayonnement à une fréquence donnée doit être proportionnelle au cube de cette fréquence, car un spectre défini par une telle courbe apparaît identique à tous les observateurs,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

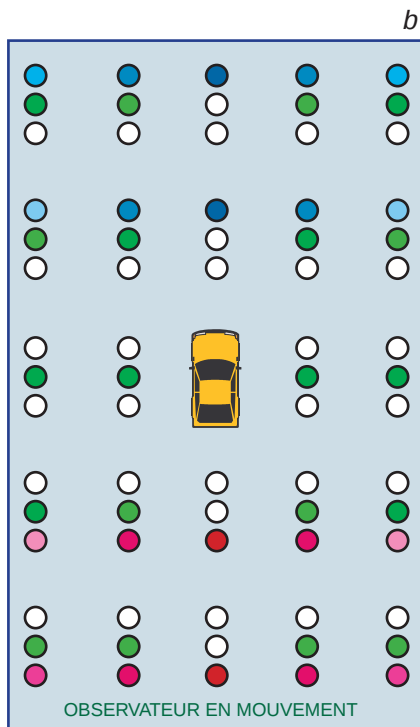
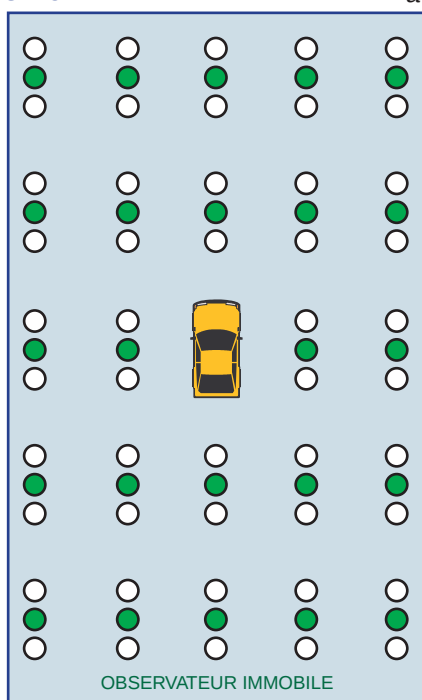
réduite, mais depuis les années 1940, on a rencontré des grandeurs infinies dans de nombreux domaines de la physique et l'on a mis au point des méthodes nouvelles pour en tenir compte. En général, on n'est confronté directement à des énergies infinies que pour les forces gravitationnelles ; tous les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

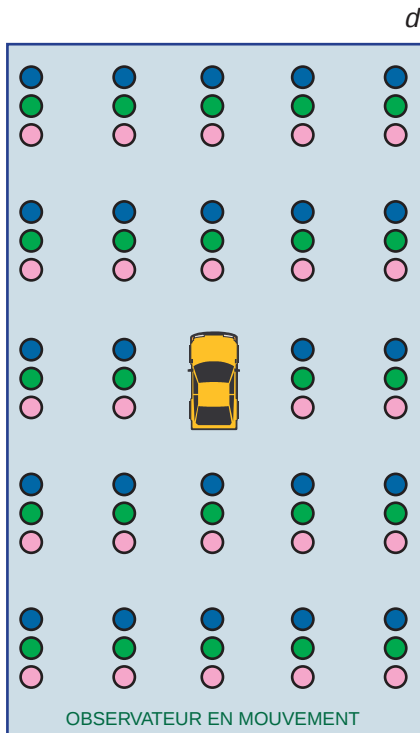
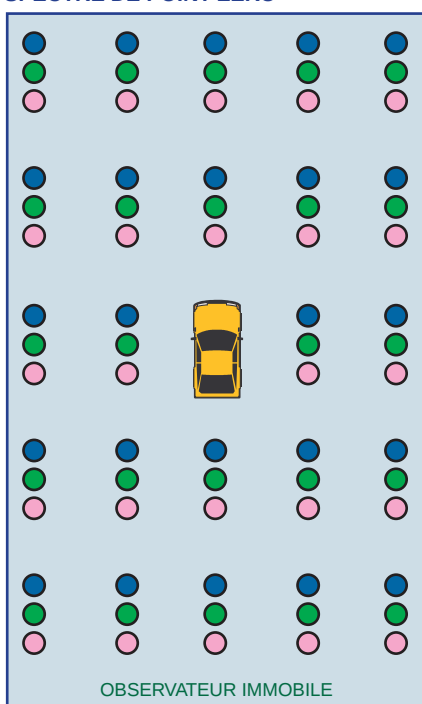


6. L'ACCÉLÉRATION d'un observateur, dans le vide, modifie le spectre du rayonnement qu'il observe. À la température du zéro absolu, un oscillateur harmonique placé dans un référentiel fixe ou se déplaçant à vitesse constante, n'est soumis qu'aux oscillations de point zéro. Dans un référentiel accéléré,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

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.

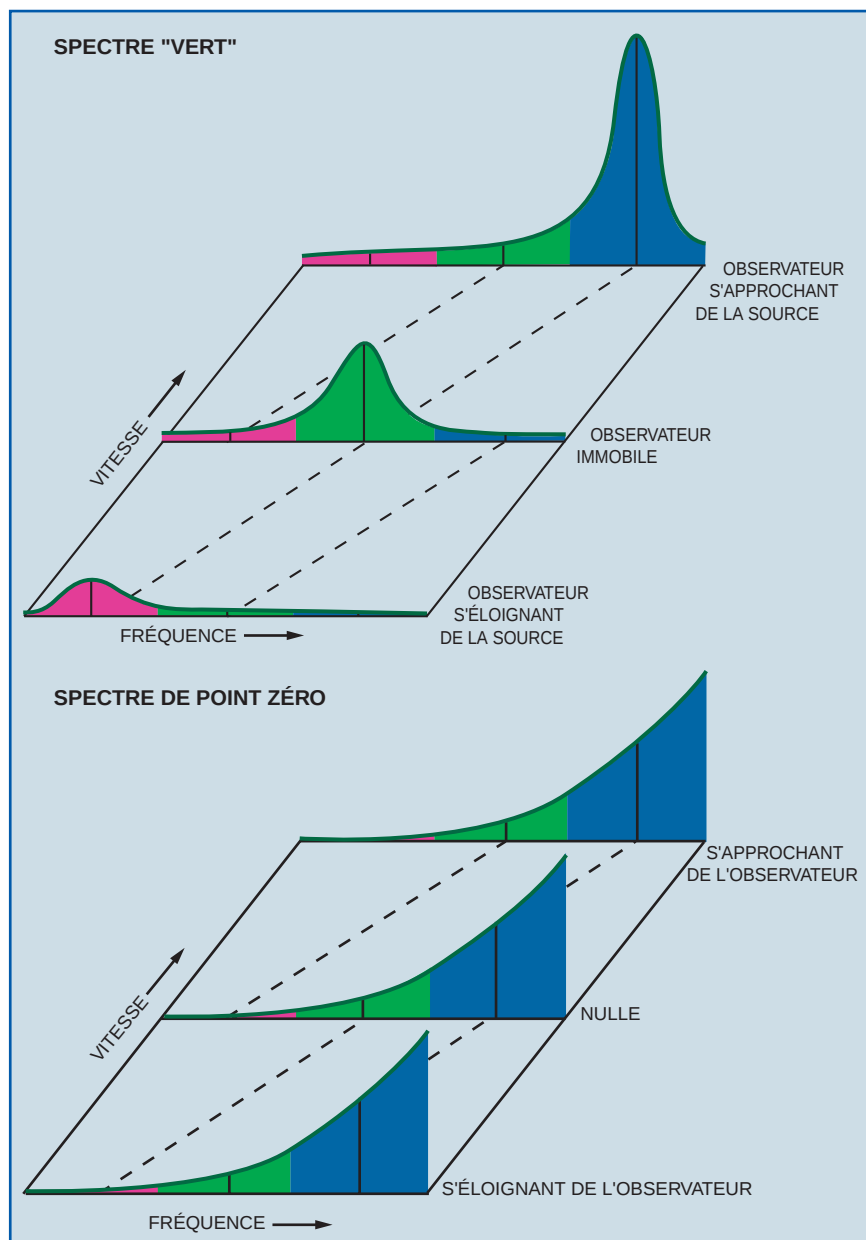
Selon la théorie classique de l'électron non modifiée, deux forces seulement agissent sur l'électron : la force de rappel du ressort et une force de réaction due à une émission de rayonnement ; comme la réaction s'oppose au mouvement de l'électron, les oscillations s'amortissent et l'électron finit par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

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.

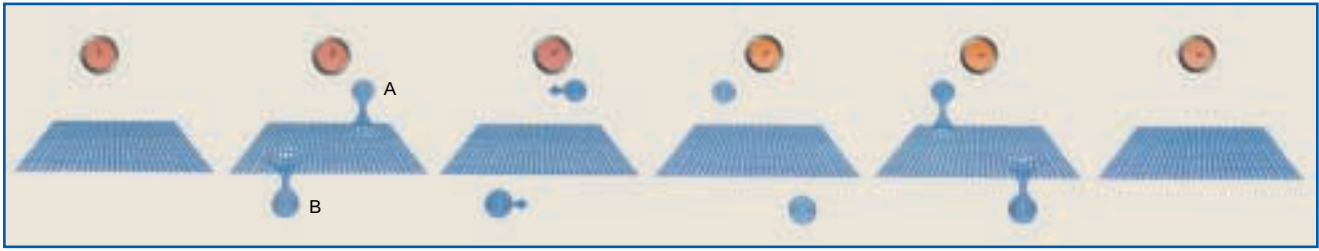
Si l'énergie du vide est importante, il doit exister une «énergie négative» qui l'annihile presque totalement. En résumé, l'énergie du vide ne serait importante que pour les pseudo scientifiques et les fervents mystiques du surnaturel : l'enthousiasme de Harold Puthoff est d'ailleurs critiqué.

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.
