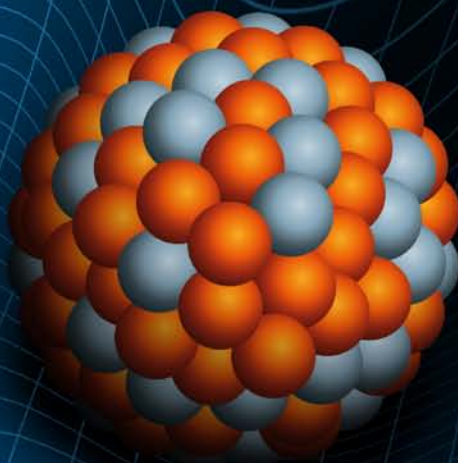
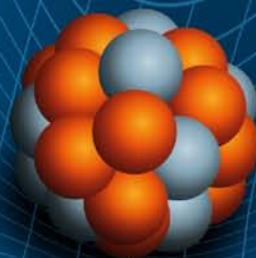


1. L'ESPACE-TEMPS QUADRIDIMENSIONNEL

de la relativité générale d'Einstein est comparable, en trois dimensions [deux d'espace, une de temps], à un tissu élastique que des masses courberaient, façonnant ainsi l'espace où évoluent les masses voisines. Mais les lois de la relativité générale s'appliquent-elles encore à l'échelle des atomes (*ici des noyaux atomiques*) ?



L'ESSENTIEL

■ Le principe d'équivalence, l'un des fondements de la théorie de la relativité générale, stipule que la masse gravitationnelle et la masse inertielle sont identiques.

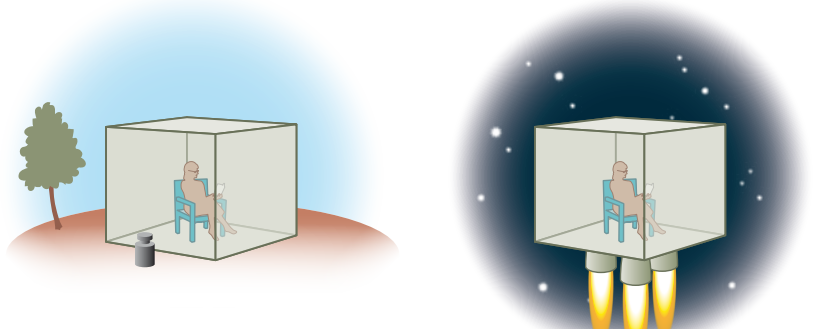
■ Des physiciens ont entrepris de tester la validité de ce principe sur des atomes, donc à l'échelle d'un système quantique.

■ Ces travaux soulèvent de délicates questions d'interprétation, mais pourraient éclairer les liens entre la gravitation et la théorie quantique.

Pour la Science

LE PRINCIPE D'ÉQUIVALENCE

Un observateur est incapable de distinguer entre l'accélération que lui impriment les masses à l'origine d'un champ gravitationnel et une accélération qu'il subirait dans le vide de l'espace en l'absence de champ de gravitation : les effets d'une accélération sont indistinguishables de ceux d'un champ de gravitation. Cette absence de distinction résulte de l'équivalence entre la masse gravitationnelle et la masse inertielle.



Spektrum der Wissenschaft/Ende-Gratlik

la longueur de Planck et la taille d'un grain de sable qu'il y en a entre cette dernière et celle de l'Univers visible...

Dans le cadre de leur quête des ondes gravitationnelles, les physiciens sont devenus capables de mesurer des longueurs 1000 fois plus petites que la taille d'un proton. Mais 20 ordres de grandeur les séparent encore de la longueur de Planck...

Cependant, a-t-on vraiment besoin de construire une théorie quantique de la gravitation pour savoir si un atome tombe comme une pierre ? Et en a-t-on besoin pour s'interroger sur le sens de cette question quand l'atome se trouve dans un état de position ambigu – une superposition d'états comme en prévoit la théorie quantique ?

Pas vraiment, car les rapports réciproques de la matière et de la gravitation sont clairement régis par ce principe fondamental de la relativité générale qu'est le principe d'équivalence. Il stipule que la masse gravitationnelle – la grandeur en jeu dans la chute des corps – et la masse inertielle – la masse liée à l'inertie, c'est-à-dire le facteur de proportionnalité entre la force et l'accélération – sont identiques.

En vertu de ce principe d'équivalence, un corps plongé dans un champ gravitationnel, tel celui de la Terre, se comporte en tout point comme un corps soumis à une accélération en l'absence de champ gravitationnel. Il nous est ainsi impossible de savoir, sans autre indice, si la force qui nous plaque contre le plancher d'un ascenseur est notre propre poids ou si elle résulte de l'accélération uniforme de la cabine en l'absence de toute attraction gravitationnelle.



Spektrum der Wissenschaft/Ende-Gratlik

2. L'UNIVERSALITÉ DE LA CHUTE LIBRE, c'est-à-dire le fait que tous les corps lâchés simultanément de la même hauteur tombent de la même façon et arrivent ensemble au sol, est une conséquence du principe d'équivalence. Le premier physicien qui a testé cette propriété fut Galilée. Selon la légende, il l'aurait fait en faisant tomber des objets depuis le haut de la tour de Pise.

En 1884 déjà, le physicien allemand Heinrich Hertz décrivait dans ses cours magistraux le fait que « deux quantités de matière ont les mêmes effets gravitationnels si elles ont la même inertie, quels que soient les matériaux qui les constituent ». Il s'étonnait du fait que ces deux propriétés puissent être décrites de façons indépendantes, mais qui s'avèrent expérimentalement équivalentes. Il supposait qu'une explication « simple et compréhensible » serait possible, laquelle nous donnerait des aperçus profonds sur la constitution de la matière. »

Trente ans plus tard, Albert Einstein fournissait enfin cette explication avec sa théorie de la relativité générale. Il y unifiât l'inertie et la gravitation par l'intermédiaire d'une structure géométrique commune à l'espace et au temps : l'espace-temps. Au contraire de l'espace rigide et indépendant de la matière donné une fois pour toutes en physique newtonienne, la structure de l'espace-temps est sans cesse influencée par la matière et ses mouvements. Pour un physicien, cette interdépendance de la matière et de l'espace-temps est plus satisfaisante que l'action unilatérale exercée par un espace « absolu » sur la matière dans la conception newtonienne.

La conception géométrique de la gravitation n'a de sens que si toutes les formes de masse et d'énergie « voient » la même structure d'espace-temps et y réagissent de façon universelle. C'est exactement ce qu'exprime le principe d'équivalence. Aujourd'hui, une formulation standard s'en est dégagée, qui combine trois propositions.

Universalité de la chute libre

La première est qu'une masse test (une masse assez petite pour que sa propre attraction gravitationnelle soit négligeable) suit dans un champ gravitationnel une trajectoire qui ne dépend que de sa position, de l'instant et de sa vitesse de départ. En particulier, sa composition chimique ne joue aucun rôle. Sur Terre, il s'ensuit que deux objets qu'on laisse tomber au même endroit et au même instant sont accélérés de façon identique, si le frottement de l'air est négligeable : en d'autres termes, tous les corps lâchés dans les mêmes conditions initiales tombent à la même vitesse. Galilée avait déjà compris l'universalité de la chute libre, même si le fait qu'il l'aurait prouvé

par des expériences effectuées depuis le haut de la tour de Pise n'a rien de certain (voir la figure 2).

Pour mettre en évidence une éventuelle violation de l'universalité de la chute libre, il faudrait que des mesures assez précises montrent que l'égalité entre masse gravitationnelle et masse inertielle n'est pas toujours vraie.

Le paramètre d'Eötvös, noté η (éta) et nommé d'après le physicien hongrois Loránd Eötvös (1848-1919), a été défini pour caractériser l'étendue de la violation: il est égal à la différence entre les masses gravitationnelle et inertielle, divisée par leur valeur moyenne. Au début du XX^e siècle, Eötvös a pu établir à l'aide de balances de torsion que η est inférieur à 10^{-8} , soit un centième de millionième. Cette limite a été divisée par 100 000 depuis que l'équipe du projet *Eöt-Wash*, de l'Université de Washington à Seattle, s'est servie de masses tests en béryllium et en titane pour montrer que η est inférieur à 10^{-13} . Des expériences sont en préparation pour réduire d'un facteur 100 cette limite actuelle de η . L'une d'elles, où une masse test en alliage de platine et de rhodium chutera de concert avec une masse test de titane, sera embarquée à bord du satellite *Microscope* du CNES (Centre national d'études spatiales), mission qui devrait se dérouler vers 2016.

La deuxième proposition du principe d'équivalence dans sa formulation standard est le fait que le résultat d'une expérience physique menée en un lieu ne dépend ni de son orientation dans l'espace, ni de sa vitesse. Ce fondement de la pensée d'Einstein sur l'espace-temps traduit le dépassement du concept d'éther auquel faisaient appel les théories anciennes. En effet, si quelque substance portant ce nom remplissait l'Univers, on s'attendrait à ce qu'un mouvement par rapport à elle exerce une influence sur les phénomènes physiques.

C'est ce qu'avaient tenté de mettre en évidence Albert Michelson et Edward Morley dans une célèbre expérience, réalisée d'abord par Michelson en 1881 en Allemagne, puis en 1887 par les deux physiciens à l'aide d'un appareillage amélioré à l'Université d'État de Cleveland, aux États-Unis. Dans cette expérience, un faisceau lumineux est scindé en deux sous-faisceaux qui parcourent des chemins perpendiculaires, avant de se rejoindre et interférer dans un même détecteur (voir la

figure 3). Comme la figure d'interférence est très sensible aux temps de parcours des deux sous-faisceaux, elle permet de mesurer avec précision une éventuelle différence entre les vitesses de la lumière dans deux directions différentes.

Le résultat de cette expérience fut négatif, et l'est resté depuis, quelle que soit la précision expérimentale atteinte. Ses versions récentes indiquent qu'une éventuelle différence relative de la vitesse de la lumière dans deux directions perpendiculaires est inférieure à 10^{-17} .

Décalage vers le rouge

La troisième proposition du principe d'équivalence dans sa formulation standard est l'idée qu'un champ gravitationnel influe sur la marche des horloges qui y sont soumises. La théorie de la relativité générale indique en effet que la fréquence du rayonnement émis par un atome placé dans un champ gravitationnel est perçue comme plus basse par un observateur situé en un lieu de potentiel gravitationnel supérieur (le potentiel mesure l'énergie emmagasinée; sur Terre, le potentiel gravitationnel augmente avec l'altitude). Il s'agit du « décalage gravitationnel vers le rouge ».

À propos de cet effet, le principe d'équivalence fournit deux règles générales. La première est que des horloges fonctionnant selon des principes différents et qui suivent la même trajectoire dans l'espace-temps doivent rester synchrones. Un exemple de

test de cette règle est fourni par le cas de deux horloges atomiques, l'une au césium et l'autre à hydrogène (un maser à hydrogène) qui seront toutes deux embarquées à bord de la Station spatiale internationale, lors de l'expérience ACES, prévue vers 2016.

La seconde règle est que deux horloges de construction identique et qui suivent des trajectoires différentes dans un champ gravitationnel afficheront une différence de temps qui est universelle, c'est-à-dire qu'elle dépend seulement du champ gravitationnel traversé, et pas du type d'horloge ni des autres champs présents.

On décrit les possibles violations de l'universalité du décalage gravitationnel vers le rouge à l'aide d'un paramètre noté α , qui est nul si le principe d'équivalence est valide. Le meilleur test de l'universalité du décalage gravitationnel vers le rouge a été réalisé en 1976 au cours de l'expérience *Gravity Probe A*, où une fusée américaine emporta jusqu'à 10 000 kilomètres d'altitude un maser à hydrogène. Durant les deux heures du vol, les chercheurs comparèrent le temps donné par cette horloge atomique à celui d'une horloge identique restée sur Terre, ce qui a imposé à α une limite supérieure égale à 7×10^{-5} .

Cette expérience a fonctionné parce que le champ gravitationnel de la Terre varie avec l'altitude, ce qui fait évoluer la fréquence relative des deux horloges d'environ 10^{-16} par mètre. Les horloges les plus précises d'aujourd'hui – les horloges atomiques optiques – sont dix fois plus précises que les

Les unités de Planck

Trois constantes ont, en physique moderne, une signification fondamentale. Dans la théorie quantique, la constante de Planck h relie l'énergie d'une particule à sa fréquence intrinsèque,

c'est-à-dire à la fréquence qui caractérise son comportement ondulatoire. La vitesse de la lumière c est une constante fondamentale de la théorie de la relativité restreinte. Enfin, la constante de la gravitation G relie les masses à l'attraction qu'elles exercent. On peut combiner ces trois

constantes pour construire un système d'unités qui serait naturel dans une théorie quantique de la gravitation: les unités de Planck. On utilise ici la constante de Planck réduite $\hbar = h/(2\pi)$.
– Longueur de Planck: $L_p = \sqrt{\hbar G/c^3} = 1,62 \times 10^{-35}$ mètre.
– Temps de Planck:

$T_p = \sqrt{\hbar G/c^5}$
 $= 5,39 \times 10^{-44}$ seconde.
– Masse de Planck: $M_p = \sqrt{\hbar c/G}$
 $= 2,18 \times 10^{-8}$ kilogramme.

Les unités de Planck indiquent à partir de quels ordres de grandeur le pouvoir descriptif de nos théories actuelles prend fin, en l'absence d'une théorie de la gravitation quantique. Autrement dit, c'est à ces ordres de grandeur que devraient intervenir à la fois les effets quantiques et ceux de la gravitation.