

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

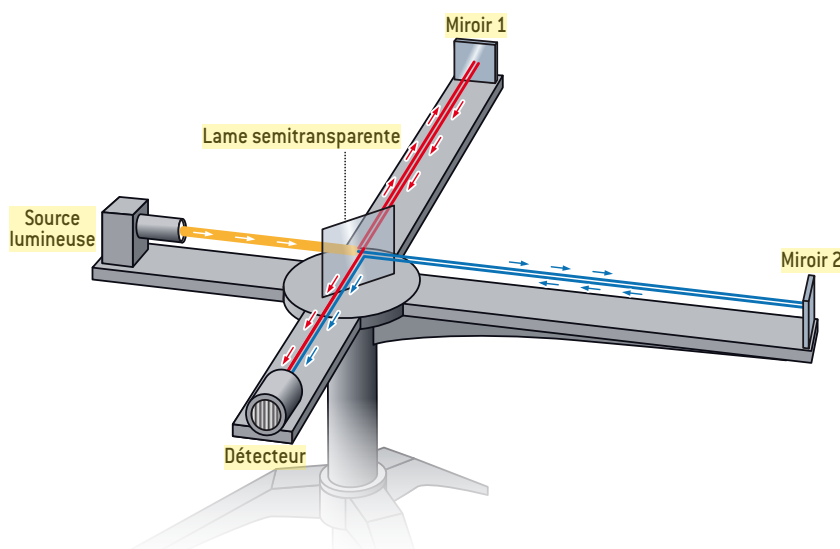
Trois constantes ont, en physique moderne, une signification fondamentale. Dans la théorie quantique, la constante de Planck h relie l'énergie d'une particule à sa fréquence intrinsèque,

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.



3. DANS L'INTERFÉROMÈTRE DE MICHELSON-MORLEY, une onde lumineuse est dédoublée par une lame séparatrice en deux sous-faisceaux, qui convergent après avoir parcouru deux chemins différents. La position des franges d'interférence observées sur un écran dépend de la différence entre les temps de parcours le long des deux bras de l'interféromètre. L'expérience a montré que les temps de parcours sont toujours identiques, ce qui implique que la vitesse de la lumière est indépendante du mouvement de l'observateur : c'est une constante absolue.

masers à hydrogène, c'est-à-dire qu'elles ne varient que d'une seconde en 10^{17} secondes, soit à peu près trois milliards d'années. Des chercheurs de l'Institut américain des étalons et de la technologie (le NIST) ont pu mettre en évidence le décalage gravitationnel vers le rouge à une altitude de seulement 33 centimètres. Toutefois, les horloges atomiques optiques ne pourront améliorer la précision de *Gravity Probe A* que si on les porte à des altitudes de plusieurs kilomètres.

Point remarquable, la troisième partie du principe d'équivalence a été testée avec une précision bien inférieure à celle des deux premières. Or la validité du principe d'équivalence ne saurait être que celle de sa partie la plus faible ! Cette situation pousse les physiciens à concevoir de nouvelles expériences portant sur le décalage gravitationnel vers le rouge.

Ainsi vint l'idée d'un nouveau type d'expériences, fondées sur des processus quantiques et se déroulant non pas à des échelles cosmiques, mais à des échelles atomiques. Certes, confronter le monde quantique avec le monde de la relativité générale exige d'énormes efforts. Mais les physiciens espèrent de nouveaux aperçus fondamentaux de ces tests poussés du principe d'équivalence. Or nous ne sommes pas sûrs de connaître toutes les forces à l'œuvre dans l'Univers, de sorte que tout indice sur cette question serait précieux.

On connaît aujourd'hui quatre interactions fondamentales : deux forces agissant à l'échelle subatomique, les interactions dites forte et faible, et les deux forces plus familières que sont l'électromagnétisme et la gravitation, qui déterminent les structures physiques depuis l'échelle atomique jusqu'à l'échelle cosmique. Si l'on suppose qu'il existe d'autres interactions, si faibles qu'elles ne modifient pas la structure de la matière, pourrait-on les observer ?

Des interactions supplémentaires ?

Le physicien américain Robert Henry Dicke (1917-1997) s'est posé cette question dès la fin des années 1950. Il souligna que des interactions supplémentaires violant le principe d'équivalence pourraient se manifester par leurs effets sur la gravitation. Ce serait en particulier le cas s'il existait un champ de force supplémentaire n'agissant pas sur la totalité de la masse au sens d'Einstein (la grandeur m vérifiant $E = mc^2$), à laquelle contribuent toutes les formes d'énergie. Au lieu de cela, cette force supplémentaire pourrait dépendre de la nature de la matière, ce qui violerait le principe de l'universalité de la chute libre. C'est pourquoi il est important d'effectuer des tests expérimentaux en utilisant des matériaux divers, dont on comparera les effets gravitationnels subis.

Jusqu'ici purement hypothétique, la possibilité de ces forces supplémentaires apparaît déjà dans les théories d'unification des interactions fondées sur des espaces-temps à plus de quatre dimensions, dont la théorie des cordes est un exemple. Les violations de l'universalité de la chute libre pourraient s'y manifester pour des valeurs du paramètre d'Eötvös de l'ordre de 10^{-15} , gamme de valeurs dont se rapprochent les expériences prévues.

La façon la plus simple de mesurer l'accélération due à la gravitation à la surface de la Terre consiste à mesurer l'altitude d'un objet, à le lâcher, puis à chronométrer sa chute. Peut-on reproduire cette expérience familière à l'échelle atomique ? Hormis les difficultés techniques, la dualité onde-corpuscule, c'est-à-dire le fait que tout objet quantique est de nature à la fois corpusculaire et ondulatoire, peut être mise à profit. Elle implique en effet qu'au mouvement du centre de masse d'un objet quantique tel qu'un atome est associée la propagation d'une onde de matière.

Dès lors, il devient possible de réaliser des expériences d'interférence, c'est-à-dire d'exploiter le fait que, comme les autres ondes, les ondes de matière peuvent interférer. On peut ainsi concevoir des dispositifs qui scindent les ondes de matière et les réunissent à nouveau pour les faire interférer et produire une figure d'interférence, laquelle livre des informations sur le champ gravitationnel traversé par les ondes.

En 1999, l'équipe de S. Chu, à l'Université Stanford, a pu mesurer, en faisant appel à des procédures quantiques, le temps de chute d'un atome de césium. Ils ont atteint une précision de trois parties pour un milliard, valeur qu'ils ont comparée avec le temps de chute d'un corps macroscopique en verre (un petit prisme pyramidal), mesuré avec précision à l'aide de lasers. Aucune différence entre les temps de chute n'a été constatée (aux incertitudes de mesure près), ce qui impliquait que le paramètre d'Eötvös, pour un unique atome de césium et l'objet en verre, est inférieur à 10^{-9} .

Quatre ordres de grandeur séparent cette limite de celles déterminées antérieurement. Ce résultat ne semble pas spectaculaire, mais il est tout de même remarquable en raison de la nouveauté de la comparaison effectuée : d'un côté, un atome isolé dans un état quantique, et de l'autre un objet macroscopique ! Les