

une fonction croît jusqu'à l'infini. Considérons par exemple la fonction $f(x) = 1/x$, qui présente une singularité en $x = 0$. À mesure que la variable x se rapproche de 0, la valeur de $f(x)$ devient infiniment grande. Les formes modulaires ont un nombre infini de singularités. Ramanujan a eu l'intuition que pour chacune de ces fonctions, il existe une fausse fonction θ associée qui non seulement a les mêmes singularités, mais aussi tend vers l'infini presque de la même façon en ces points.

C'est seulement en 2002 qu'un mathématicien hollandais, Sander Zwegers, a formellement défini les fausses fonctions θ , en utilisant des idées formulées des décennies après la mort de Ramanujan. Mais les mathématiciens ne parvenaient toujours pas à expliquer l'affirmation de Ramanujan selon laquelle ces fonctions imitent les formes modulaires au niveau de leurs singularités.

La machinerie sous-jacente à l'Oracle de K. Ono et J. Bruinier allait finalement résoudre l'énigme. Avec A. Folsom et Robert Rhoades, de l'Université Stanford, K. Ono

l'a utilisée afin de dériver des formules permettant de calculer les valeurs des fausses fonctions θ au voisinage des singularités. Et effectivement, ils ont trouvé que la conjecture de Ramanujan est correcte : à proximité des singularités, les fausses fonctions θ ressemblent étonnamment aux formes modulaires. Dans un cas, par exemple, les mathématiciens trouvent que la différence entre les valeurs des deux

KEN ONO ET SES COLLÈGUES

ont trouvé que la conjecture de Ramanujan est correcte : à proximité des singularités, les fausses fonctions θ ressemblent étonnamment aux formes modulaires.

fonctions se rapproche fortement de 4 quand on tend vers la singularité, ce qui est presque négligeable dans cet univers de nombres infinis.

Les physiciens ont récemment commencé à utiliser les fausses fonctions θ pour étudier l'entropie des trous noirs, l'entropie étant une grandeur de nature thermodynamique qui mesure le désordre d'un système ou la quantité d'information

qu'il représente. Certains scientifiques pensent que des formules apparentées à celles de K. Ono leur permettront peut-être de sonder ces phénomènes avec une meilleure précision.

K. Ono se rappelle encore le plaisir enivrant qu'il ressentit en voyant pour la première fois les congruences de Ramanujan, tandis que son père en traçait de son écriture régulière les symboles étranges sur son bloc-notes jaune. « Pour quoi seulement trois ? », avait-il demandé. « Personne ne le sait », lui avait répondu son père.

En racontant cette histoire, K. Ono est assis dans la salle à manger de son domicile, en Géorgie.

Le mur derrière lui porte une photographie du buste en bronze de Ramanujan qui a été commissionné pour sa veuve grâce à des dons de 25 dollars, de son père et de centaines d'autres mathématiciens et scientifiques du monde entier. « Jamais dans mes rêves les plus fous je n'aurais imaginé être en situation de dire un jour : "Tu sais quoi, Papa ? Ces congruences ne sont pas les seules – loin de là." » ■

Pour contribuer à la transmission
de la culture mathématique,
LE MAGAZINE TANGENTE ORGANISE

LES TROPHÉES
tangente

**DÉPÔT DES CANDIDATURES
AVANT LE 31 AOÛT 2014 MINUIT**

Prix Bernard-Novelli

Soutenir les jeunes créateurs

Vous êtes collégiens, lycéens ?
Vous aimez concevoir des jeux logiques
faisant intervenir les mathématiques ?

Participez à ce concours
et transformez votre projet
en un produit mobile disponible
sur l'App Store et Google Play



Prix Tangente du livre

Donner envie d'en savoir plus

A partir du 15 juin, participez
à la sélection des ouvrages
en votant sur :
www.tropheestangente.com

Prix Tangente du meilleur article

Raconter les mathématiques

Envoyez-nous un article inédit vulgarisant un concept mathématique.
Le meilleur sera publié au sein du magazine Tangente

POUR LA
SCIENCE

Inscription, informations et modalités de participation sur le site

www.tropheestangente.com

Le principe d'équivalence à l'épreuve quantique

Domenico Giulini

L'égalité entre la masse qui mesure l'inertie et la masse qui détermine la gravitation est au fondement de la relativité générale d'Einstein. Une expérience récente censée la tester sur des objets quantiques divise les spécialistes.

Dans le vide, une plume et une boule de pétanque tombent de la même façon et aussi vite... du moins en apparence, c'est-à-dire dans la limite des incertitudes de mesure. Pour valider expérimentalement le principe de la chute identique de corps différents, encore faut-il disposer d'une théorie dont les hypothèses fondamentales sont formulées de façon claire et complète, et reliées par des chaînes logiques à des prédictions testables.

Il n'est pas sûr que ce soit le cas. Les deux grands pans de la physique fondamentale que sont la théorie de la relativité générale d'Einstein et la théorie quantique soulèvent des problèmes d'interprétation quand on tente de tester la première à l'aide d'une expérience faisant intervenir la seconde. Une telle difficulté est apparue lorsque des physiciens ont testé le « principe d'équivalence », un fondement de la relativité générale, au moyen d'une expérience mettant en jeu la théorie quantique. Nous verrons qu'elle oppose l'équipe de Claude Cohen-Tannoudji, en France, et celle de Steven Chu, aux États-Unis, deux colauréats du prix Nobel de physique de 1997.

Plusieurs théories physiques actuelles passent pour fondamentales. Cela signifie que chacune décrit une grande gamme de phénomènes dans les limites de la précision de mesure ; qu'elle est applicable de façon universelle ; qu'elle ne se contredit pas dans ses conséquences. La relativité générale et la théorie quantique sont de telles théories, et elles ont résisté jusqu'ici à tous les tests expérimentaux.

Les grandes constantes fondamentales

Des constantes dites fondamentales leur sont attachées. Il s'agit de la vitesse de la lumière c et de la constante gravitationnelle G dans le cas de la relativité générale, et de la constante de Planck h dans le cas de la théorie quantique. La dimension (au sens physique de la longueur, de la masse, du temps) de la vitesse de la lumière est une longueur divisée par un temps. Celle de la constante gravitationnelle est plus compliquée et découle de la loi d'attraction universelle de Newton ($F = Gmm'/r^2$). Quant à la constante de Planck h , elle a la dimension d'une action – c'est-à-dire du

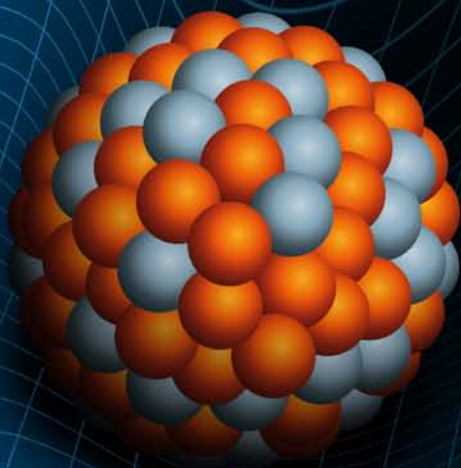
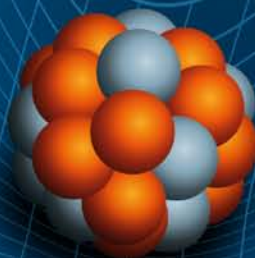
produit d'une énergie par un temps – et pour cette raison, on la nomme aussi le quantum d'action.

Du point de vue de leur dimension, ces trois constantes fondamentales combinent des unités de longueur, de temps ou de masse. Inversement, on peut les combiner pour former un système d'unités – les « unités de Planck » : la longueur de Planck, la masse de Planck, le temps de Planck (voir l'encadré page 59). Ces unités indiquent, grossièrement, à quelles échelles d'espace-temps et de masse (ou d'énergie) la théorie quantique et celle de la relativité générale devraient se rejoindre. Dans ces situations, les phénomènes physiques sont censés ne plus pouvoir être décrits que dans le cadre d'une théorie quantique de la gravitation, dont la mise au point se fait attendre.

D'ordinaire, les effets gravitationnels et les effets quantiques se manifestent à des échelles très différentes, de sorte que les mesurer simultanément exige des précisions énormes. Les échelles indiquées par les unités de Planck sont si petites qu'il semble exclu de pouvoir s'en approcher expérimentalement. Ainsi, il y a autant d'ordres de grandeur (des puissances de 10) entre

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*) ?



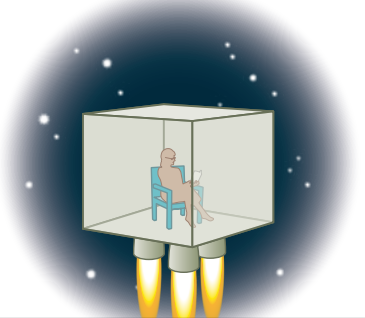
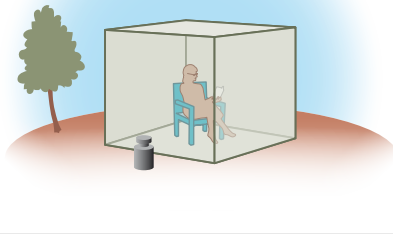
L'ESSENTIEL

- 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-Gratik

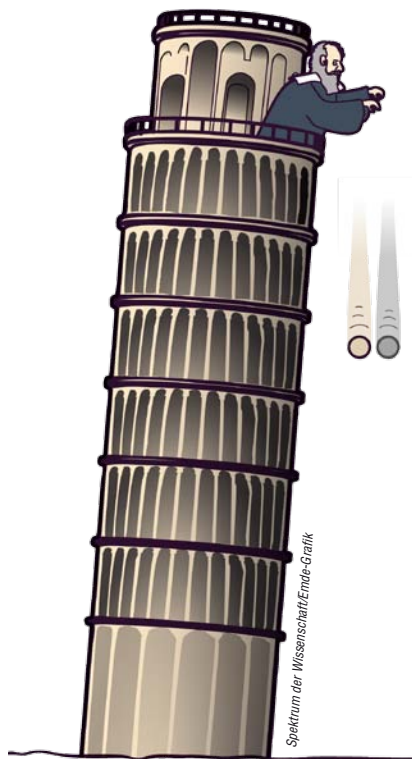
la longueur de Planck et la taille d'un grain de sable qu'il y en a entre cette dernière et celle de l'Univers visible...

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-Gratik

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

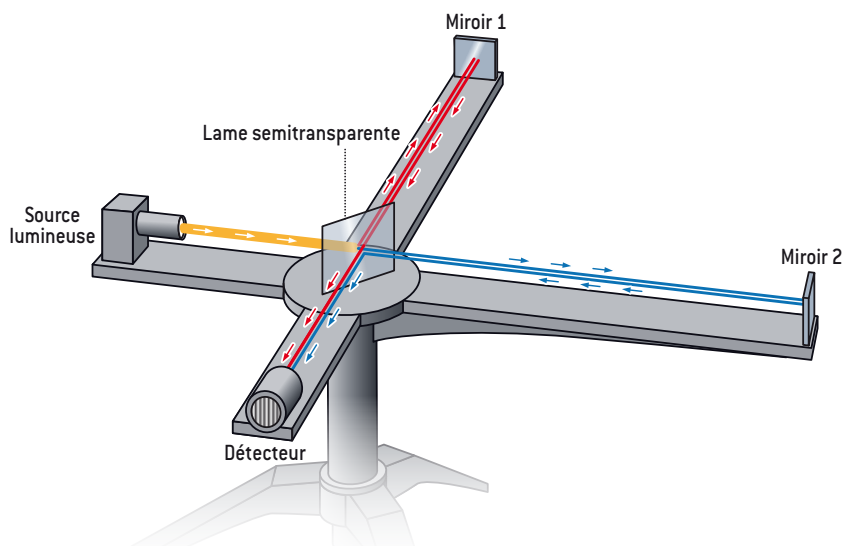
Trois constantes ont, en physique moderne, une signification fondamentale. Dans la théorie quantique, la constante de Planck h relie l'énergie d'une particule à sa fréquence intrinsèque,

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.



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

chercheurs ont donc réussi à tester la validité de l'universalité de la chute libre en comparant le comportement dans le champ gravitationnel terrestre d'un élément de matière « quantique » (l'atome) avec un élément de matière « classique » (l'objet macroscopique en verre).

Curieusement, cette même expérience pourrait aussi servir à tester l'universalité du décalage gravitationnel vers le rouge, du moins d'après une interprétation proposée en 2010. Dans ce cas, le paramètre mesurant la violation de l'universalité du décalage gravitationnel vers le rouge pourrait passer au-dessous de 10^{-9} , ce qui améliorerait le test de la validité du principe d'équivalence.

La nouvelle interprétation proposée de l'expérience de S. Chu a déclenché une controverse quant au sens à donner à ce qui se produit physiquement. Ironiquement, deux des principaux protagonistes de l'affaire – d'un côté S. Chu, de l'autre Claude Cohen-Tannoudji, de l'École normale supérieure à Paris – partagent le prix Nobel de 1997. Ainsi, même les spé-

cialistes les plus éminents d'aujourd'hui ne s'accordent pas sur l'interprétation à donner aux mesures interférométriques portant sur la chute libre d'atomes.

Une interprétation débattue

S. Chu a réalisé l'expérience initiale et a contribué à l'élaboration de sa nouvelle interprétation, avancée par Holger Müller, de l'Université de Californie à Berkeley. En janvier 2013, H. Müller a proposé une nouvelle expérience sur le même principe. C'est la fiabilité des conclusions tirées à partir de son interprétation que contestent C. Cohen-Tannoudji et ses collègues (*voir l'encadré ci-dessous*).

Les problématiques fondamentales en jeu concernent aussi bien notre compréhension de la théorie quantique que la question : qu'est-ce qu'une horloge ? Afin de mieux comprendre l'objet du débat, précisons en quoi consiste l'expérience d'interférométrie atomique effectuée en 1999 par l'équipe de S. Chu. Ces chercheurs ont réalisé un

interféromètre atomique, c'est-à-dire un dispositif conçu pour faire interférer plusieurs ondes de matière, issues en fait du même atome.

L'appareil est construit de façon à produire un choc élastique (où l'énergie cinétique est conservée) entre un photon laser bien choisi et l'atome. Sous l'effet de cette interaction, l'atome a la même probabilité d'être mesuré dans l'un de deux états de quantité de mouvement, sans que l'on puisse savoir dans lequel des deux il se trouve avant la mesure.

En d'autres termes, une première impulsion laser – l'impulsion séparatrice – place l'atome dans une superposition quantique de deux états de la quantité de mouvement, ce qui revient à dire que l'atome emprunte simultanément deux trajectoires... Et si l'impulsion laser est émise verticalement, les deux trajectoires atomiques atteignent des altitudes différentes. Une autre impulsion laser agissant sur chaque onde atomique comme un miroir – l'impulsion unificatrice – réunit ensuite les deux trajectoires, ce qui fait interférer les deux ondes de matière.

Mesure-t-on le décalage gravitationnel vers le rouge de la fréquence de Compton ?

Une des prédictions centrales de la relativité générale est que la gravitation modifie les fréquences d'horloge. Cet effet est connu sous le nom de décalage vers le rouge dû à la gravitation. Ce décalage gravitationnel joue un rôle important

dans la mesure du temps, et il a été testé avec une grande précision. L'amélioration de cette précision constitue l'objectif principal du projet ACES. Des horloges atomiques fourniront des signaux électromagnétiques périodiques dans l'environnement de chute libre de la Station spatiale internationale (ISS) afin de vérifier que les fréquences d'horloge dépendent du potentiel gravitationnel, comme le prévoit la relativité générale. Ce sera fait par l'échange de signaux électromagnétiques entre les horloges sur l'ISS et des horloges au sol. Le mouvement de l'ISS et des antennes au sol sera contrôlé pour prendre en compte les décalages par effet Doppler qui apparaissent

nécessairement dans ces comparaisons d'horloge.

La situation est très différente dans les expériences d'interférométrie atomique qui ont démarré dans le groupe de S. Chu il y a plus de dix ans. Ces expériences ont été, depuis, analysées comme une mesure de l'accélération de chute libre d'atomes, pouvant mener à un test de l'universalité de la chute libre par comparaison avec des mesures portant sur un coin de cube en chute libre.

Bien que sa précision soit inférieure à celle des tests sur des masses macroscopiques de compositions différentes, ce test est très important puisque c'est le plus sensible qui compare la chute libre d'objets quantiques

et classiques. Holger Müller, Achim Peters et Steven Chu en ont récemment proposé une réinterprétation, où ils considèrent maintenant que ces expériences mesurent le décalage gravitationnel sur l'horloge quantique fonctionnant à la fréquence de Compton, associée à la masse au repos de l'atome de césium, soit à $3,2 \times 10^{25}$ hertz.

Peter Wolf, Luc Blanchet, Christian Bordé, Christophe Salomon, Claude Cohen-Tannoudji et moi-même ne sommes pas d'accord avec cette réinterprétation. Selon nous, de telles expériences ne peuvent pas être comparées directement avec des tests d'horloge. Le mouvement des atomes n'est pas contrôlé dans l'interféromètre et il est déduit de la théorie en utilisant les mêmes équations d'évolution qui servent à calculer le déphasage. En utilisant la théorie d'une façon cohérente, on démontre

que la contribution au déphasage qui est proportionnelle à la fréquence de Compton et inclut une contribution du décalage gravitationnel est en fait exactement nulle. Le déphasage total provient entièrement des interactions avec les lasers et du fait que les atomes tombent par rapport au laboratoire où l'expérience est faite.

L'interféromètre atomique fonctionne en fait comme un accéléromètre qui mesure l'accélération d'atomes en chute libre par rapport à la plate-forme expérimentale qui est au repos dans le laboratoire. Si l'instrument était mis globalement en chute libre, cette accélération s'annulerait. La situation est complètement différente pour les horloges atomiques utilisées pour tester le décalage gravitationnel.

– Serge Reynaud
Laboratoire Kastler-Brossel,
École normale supérieure, Paris

La figure d'interférence est déterminée par le déphasage des deux ondes atomiques, qui traduit la différence des chemins parcourus. Ce déphasage détermine où l'interférence est constructive (probabilité élevée de trouver l'atome) et où elle est destructive (probabilité faible).

Or le calcul en théorie quantique montre que le déphasage $\Delta\phi$ est proportionnel à l'accélération gravitationnelle locale (la pesanteur g), à la quantité de mouvement transférée par le photon laser et au carré du temps d'interrogation (le temps T écoulé entre l'impulsion séparatrice et l'impulsion unificatrice): $\Delta\phi = k g T^2$, où k est, à un facteur simple près, la quantité de mouvement transférée. Ainsi, la forme des interférences livre, *via* le déphasage, la valeur du champ gravitationnel pendant la chute libre de l'atome placé dans une superposition quantique d'états.

Pourvu que la valeur du champ trouvée soit la même que celle s'appliquant à celle de la masse test en verre, on a ainsi testé l'universalité de la chute libre d'une nouvelle façon, par un procédé quantique. Mais le même interféromètre permet-il aussi de tester l'universalité du décalage gravitationnel vers le rouge ?

D'après les physiciens qui pensent que oui, chaque atome équivaut à une horloge battant à un certain rythme. D'après la théorie de la relativité générale, l'horloge de l'onde atomique allant plus haut que l'autre se trouve soumise à un potentiel gravitationnel supérieur; elle bat donc la mesure plus vite jusqu'à la fin de son parcours, ce qui contribue au déphasage des deux ondes. Or cette contribution gravitationnelle est proportionnelle à la différence des potentiels gravitationnels, qui dépend de la différence des altitudes atteintes, et celle-ci dépend à son tour de la quantité de mouvement transférée k et du temps T . En fait, on trouve exactement la même formule ($\Delta\phi' = k g T^2$), où $\Delta\phi'$ désigne cette fois le déphasage dû au décalage gravitationnel vers le rouge.

Toutefois, ce calcul est fondé sur une hypothèse à l'origine de toute la controverse: que les atomes de césium fournissent bien un signal d'horloge. Pour cela, ils doivent battre le temps assez vite pour qu'un décalage vers le rouge soit mesurable. Nous avons déjà indiqué qu'avec des horloges atomiques, un décalage gravitationnel vers le rouge a pu être mesuré avec une différence d'altitude de 33 centimètres, mais dans l'expérience

de 1999, cette différence n'était que d'un dixième de millimètre... Pour parvenir à une précision relative de 10^{-9} , l'horloge doit battre plus vite en proportion – de l'ordre de 10^{12} fois plus vite que la meilleure horloge atomique actuelle.

C'est le cas si l'on considère que l'atome bat le temps à sa « fréquence de Compton », égale à l'énergie totale de l'atome divisée par la constante de Planck. Cette fréquence



Lawrence Berkeley National Laboratory / Roy Kalischmidt



Anir Bernat

4. LES LAURÉATS DU PRIX NOBEL DE 1997 Claude Cohen-Tannoudji (*en haut*) et Steven Chu (*en bas*) ne sont pas d'accord quant à la possibilité que l'expérience d'interférométrie atomique mise au point par l'équipe de S. Chu en 1999 puisse contrôler l'universalité du décalage gravitationnel vers le rouge, la partie du principe d'équivalence la moins bien testée.

de Compton est extrêmement élevée: de l'ordre de 3×10^{25} hertz, c'est-à-dire supérieure d'un facteur 10^{12} aux fréquences typiques des horloges atomiques... Il faut noter toutefois que l'hypothèse que les atomes de césium peuvent être considérés comme des horloges naturelles n'est pas nécessaire pour déterminer le déphasage des deux ondes atomiques: elle ne sert qu'à interpréter ce déphasage comme un

équivalent au décalage gravitationnel vers le rouge, ce qui nous ramène à la question fondamentale autour de laquelle tourne la controverse des chercheurs: les atomes de césium sont-ils des horloges naturelles ?

Le long des deux chemins parcourus dans l'interféromètre, l'énergie des atomes a une valeur bien définie. Ce n'est que pendant la durée très brève de l'interaction avec le laser que certains des atomes sautent d'un état stationnaire d'énergie à un état voisin. Une véritable horloge, en revanche, pour pouvoir livrer le temps en continu, doit varier au cours du temps: elle ne saurait, comme c'est le cas des atomes de césium pendant leur vol, rester dans un état stationnaire pendant son fonctionnement.

C'est pourquoi les atomes employés dans les horloges atomiques ordinaires ne se trouvent jamais dans un tel état d'énergie indépendant du temps, mais dans une superposition de tels états, qui dépend du temps. La différence de leurs énergies – et non pas l'énergie totale – divisée par la constante de Planck donne la fréquence à laquelle bat une horloge atomique. Jusqu'à présent, dans les meilleurs dispositifs de mesure du temps, les horloges atomiques optiques, cette fréquence est de l'ordre de celle des ondes lumineuses visibles (d'où le qualificatif « optique »).

Une horloge propre à l'atome ?

Les chercheurs autour de H. Müller et S. Chu considèrent que tout corpuscule doté d'une masse peut être vu comme porteur d'une « horloge propre » par l'intermédiaire de sa fréquence de Compton. L'idée remonte au physicien français Louis de Broglie, l'inventeur en 1924 de la notion d'onde de matière. De Broglie a relié l'équivalence masse-énergie découverte par Einstein à la vision de Planck selon laquelle à toute énergie peut être associée une fréquence. Il remarqua toutefois lui-même que son hypothèse conduisait à une contradiction: le processus périodique associé à un corpuscule en mouvement devait, à cause de la dilatation du temps – un effet relativiste –, apparaître ralenti. D'un autre côté, la fréquence devait aussi être plus élevée, car elle est proportionnelle à l'énergie du corpuscule, donc augmente avec son énergie cinétique.

De Broglie distinguait pour cette raison deux fréquences: celle d'un hypothétique



ZARM, Falltum-Betriebsgesellschaft



ZARM, Université de Brême

5. LA TOUR D'IMPESANTEUR DE BRÊME (à gauche) a été construite pour réaliser des expériences de chute libre à l'intérieur d'une capsule (à droite) de 80 centimètres de largeur tombant dans une colonne de 110 mètres de haut, où règne le vide. En bas, l'impact est amorti par un réceptacle rempli de petites billes de polystyrène. Les quelque cinq secondes de chute libre, donc d'apesanteur, ainsi créées servent le plus souvent à tester des dispositifs spatiaux, mais elles peuvent aussi être mises à profit pour tester le principe d'équivalence.

« processus interne », caractérisé par la fréquence de Compton, et celle d'une onde de matière associée au mouvement de l'objet.

L'équation de Schrödinger développée deux ans après ces considérations a fourni la description mathématique générale de la propagation de cette onde de matière. De cette équation on déduit que dans le cas d'un atome isolé, un processus périodique n'est observable que quand cet atome se trouve dans une superposition d'états d'énergie bien déterminés (états propres). Les fréquences possibles d'un tel processus dépendent des différences entre les énergies de ces états propres. Cette propriété est au fondement des horloges atomiques modernes.

Il s'agit ici des fréquences liées à l'onde de matière. Et pour la « fréquence interne » ? N'a-t-elle aucune signification pratique, ou gagne-t-elle au cours de la propagation de la particule dans le champ gravitationnel une signification sur laquelle les théoriciens doivent encore s'accorder ?

À l'intersection entre les théories de la gravitation et la théorie quantique apparaissent donc des questions conceptuelles concernant chacune des deux théories. Remarquons que nous n'avons jusqu'à présent eu affaire qu'à une situation physique relativement simple : un système quantique dans un champ gravitationnel classique. La prochaine étape logique consisterait à décrire ce champ et ses interactions avec un atome dans le cadre de la théorie quantique, au moins en partie. Des différences notables entre la gravitation et les autres

interactions devraient se manifester. Toutes les tentatives faites jusqu'à présent pour formuler une théorie de la gravitation sont parties du principe que les règles quantiques habituelles s'appliquent à la gravitation. Or ces règles n'ont fait la preuve de leur efficacité qu'avec d'autres interactions, succès qui ne signifie pas que nous ayons vraiment compris leur physique profonde. Des expériences comme celle de l'interféromètre atomique pourraient fournir aux théoriciens des indices sur les liens entre la relativité générale et la théorie quantique, les deux piliers de la physique fondamentale d'aujourd'hui.

Améliorer la précision en prolongeant la chute

À présent, les physiciens tentent d'améliorer la précision expérimentale en augmentant le temps de vol des atomes dans l'interféromètre. Le déphasage des ondes atomiques augmente en effet avec le carré du temps d'interrogation, tandis qu'il n'est que proportionnel au champ gravitationnel. Il serait possible d'augmenter ce temps de vol en réalisant par exemple l'expérience au cours d'une chute contrôlée dans une tour d'impesanteur (voir la figure 5), ou en embarquant le dispositif expérimental sur un satellite. Il existe désormais un réel espoir de préciser quelles relations entretiennent la gravitation et la théorie quantique, et notamment d'envisager le principe d'équivalence d'Einstein d'un point de vue quantique. ■

■ L'AUTEUR



Domenico GIULINI est professeur de physique théorique à l'Université Leibniz, à Hanovre en Allemagne.

■ BIBLIOGRAPHIE

D. Schlippert *et al.*, Quantum test of the universality of free fall, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 112, 203002, 2014.

S.-Y. Lan *et al.*, A clock directly linking time to a particle's mass, *Science*, vol. 339, pp. 554-557, 2013.

P. Wolf *et al.*, Does an atom interferometer test the gravitational redshift at the Compton frequency ?, *Classical Quantum Gravity*, vol. 28, 145017, 2011.

H. Müller *et al.*, A precision measurement of the gravitational redshift by the interference of matter waves, *Nature*, vol. 463, pp. 926-930, 2010.

Vaclav Smil

Beaucoup espèrent un passage rapide aux énergies renouvelables. Mais l'histoire des transitions énergétiques montre qu'elles nécessitent deux à trois générations.



Énergies renouvelables :

L'ESSENTIEL

- Les transitions énergétiques majeures – du bois au charbon, puis du charbon au pétrole – ont pris chacune 50 à 60 ans.
- L'abandon des ressources fossiles et le passage aux énergies renouvelables ne devrait pas être plus rapide. Dans les pays industrialisés, les énergies renouvelables classiques, telle l'hydroélectricité, sont déjà utilisées au maximum.
- On pourrait toutefois accélérer la transition, notamment en réalisant des économies d'énergie.

