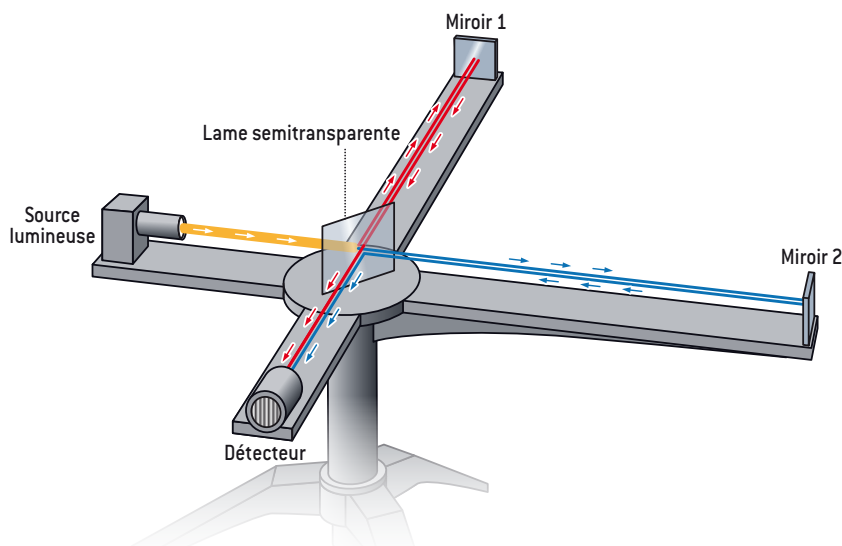




3. DANS L'INTERFÉROMÈTRE DE MICHELSON-MORLEY, une onde lumineuse est dédoublée par une lame séparatrice en deux sous-faisceaux, qui convergent après avoir parcouru deux chemins différents. La position des franges d'interférence observées sur un écran dépend de la différence entre les temps de parcours 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