

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.