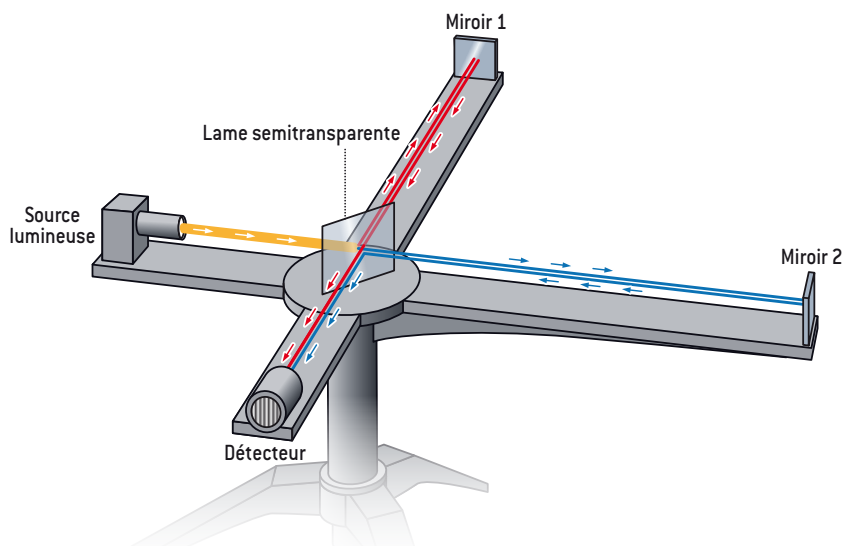




3. DANS L'INTERFÉROMÈTRE DE MICHELSON-MORLEY, une onde lumineuse est dédoublée par une lame séparatrice en deux sous-faisceaux, qui convergent après avoir parcouru deux chemins différents. La position des franges d'interférence observées sur un écran dépend de la différence entre les temps de parcours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