



Après des premiers tests réalisés dans un camion (à Stanford aux États-Unis), un capteur inertielle atomique vient d'être utilisé pour la première fois pour enregistrer en continu l'accélération d'un avion en vol. Pour s'affranchir en partie de l'incertitude de mesure liée aux vibrations, nous avons combiné un accéléromètre atomique et des accéléromètres mécaniques. Si la mesure de l'interféromètre est très précise au sein d'une frange d'interférences, permettant de lire très finement la valeur de l'accélération des atomes sur cette frange, il est impossible de savoir sur quelle frange est faite la mesure si les vibrations sont trop importantes. L'accéléromètre mécanique joue le rôle de la graduation grossière d'un vernier ou d'un pied à coulisse : il permet de retrouver la frange d'interférences sur laquelle opère l'interféromètre.

Un tel capteur hybride, développé au prix d'un grand nombre d'innovations technologiques, a permis de mesurer l'accélération d'un avion avec une précision relative d'un trois centième (ce qui est excellent), et montré qu'il est possible d'améliorer les performances des accéléromètres embarqués usuels en les faisant fonctionner conjointement avec l'interféromètre atomique. Ce nouveau type de capteur devrait permettre de réaliser d'ici quelques années des systèmes de navigation inertielle mesurant toutes les composantes d'accélération et de rotation sans erreur.

Comprendre l'infiniment grand grâce à l'infiniment petit, tel est aujourd'hui un des autres défis de l'interférométrie à ondes de matière. En particulier, le principe d'équivalence d'Einstein – ou d'uni-



2. L'EXPÉRIENCE EMBARQUÉE dans l'Airbus ZERO-G pour tester le principe d'équivalence occupe une bonne partie de l'avion [a]. Les physiciens travaillent à la rendre plus compacte [b], leur objectif étant de la contenir dans un boîtier transportable de la taille d'une malle [c], afin de l'envoyer dans l'espace à bord d'un satellite.

versalité de la chute libre – est-il toujours valide à l'échelle quantique ? Ce principe est la pierre angulaire de la théorie de la relativité générale d'Einstein : il stipule que la masse d'un objet quelconque n'a pas de rôle dans son mouvement autour d'un astre ou, ce qui revient au même, que tous les objets tombent avec la même vitesse dans le vide (en l'absence de frottements de l'air) lorsqu'ils sont soumis à la pesanteur, quelles que soient leur masse ou leur composition interne.

Tester le principe d'équivalence

Ce postulat emblématique a toujours fasciné les scientifiques, de Galilée faisant chuter deux objets du haut de la tour de Pise à l'astronaute américain David Scott qui, lors de la mission *Apollo 15*, lâcha simultanément une plume et un marteau pour constater que les deux objets arrivaient au même moment sur le sol lunaire. Cette loi fondamentale a conduit Einstein à reformuler les lois de la gravitation de Newton : la théorie de la relativité générale, fruit de cette reformulation, jouit d'un succès incontestable depuis près d'un siècle, tant par les vérifications expérimentales de ses prédictions que par son élégance mathématique. Elle constitue un élément essentiel, par exemple, dans l'analyse des signaux de géolocalisation par GPS.

Cependant, cette théorie est aujourd'hui remise en question lorsque l'on essaye de combiner les propriétés de l'infiniment grand, à l'échelle de l'Univers où la gravitation joue un rôle majeur, et celles de l'infiniment petit, à l'échelle de l'atome où la description quantique prédomine. L'enjeu majeur de cette recherche est la compréhension des premiers instants de l'Univers, où des forces de gravitation intenses agissaient sur des échelles infiniment petites.

La théorie des cordes et de la gravitation quantique, construite pour unifier la théorie d'Einstein et la physique quantique, prévoit d'infimes déviations à l'universalité de la chute libre et, pour éprouver ce principe, des mesures ultraprécises sont nécessaires. Le test le plus précis compare aujourd'hui l'accélération de la Terre et de la Lune (de masse et de composition très différentes) soumises au champ de gravité du Soleil, en mesurant la distance Terre-Lune à l'aide d'un laser avec une précision de un centimètre. Sur Terre, des balances de torsion comparent l'effet de

l'accélération de la pesanteur sur différents objets (telles des masses de béryllium ou de titane) avec des précisions qui reviendraient à départager deux coureurs de 100 mètres par un écart inférieur à la taille d'un atome sur la ligne d'arrivée. Dans l'espace, une mission satellite, MICROSCOPE, devrait même augmenter la précision de toutes ces mesures d'un facteur 100 en 2015.

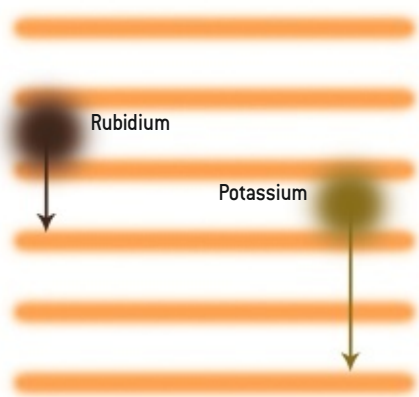
Les interféromètres à ondes de matières pourraient aller encore plus loin ; en augmentant la précision des mesures, mais aussi en permettant de tester le principe d'équivalence avec des objets quantiques – des atomes –, au lieu des corps astronomiques ou macroscopiques utilisés aujourd'hui. L'idée est de reproduire l'expérience de chute libre de la plume et du marteau avec deux atomes différents, dont on comparerait les accélérations grâce à un interféromètre atomique. Mais il faut pour cela « gagner du temps », c'est-à-dire allonger suffisamment le temps de chute libre des atomes pour augmenter les chances de déceler une différence. Sur Terre, cette durée est limitée, car les atomes sortent de l'enceinte à vide de l'interféromètre à cause de la pesanteur. Une solution consiste à placer tout le dispositif expérimental en chute libre ou en impesanteur à bord d'un satellite.

D'impressionnants « ascenseurs », telle la tour de chute libre de Brême, en Allemagne, devraient bientôt permettre les premières mesures en chute libre sur Terre. STE-QUEST, un projet du programme *Cosmic Vision* de l'Agence spatiale européenne, a aussi été lancé pour effectuer un test complet du principe d'équivalence d'Einstein en embarquant accéléromètre et horloges atomiques dans l'espace. Associée à des chercheurs de l'Observatoire de Paris et de l'ONERA, notre équipe de l'Institut d'optique constitue la partie française de cette mission. Elle réalise une première version de l'expérience en microgravité à bord de l'*Airbus ZERO-G* de la Société *Novespace* – un avion de ligne effectuant des vols paraboliques.

Le principe de l'expérience est simple. Un satellite en orbite n'est soumis qu'à la seule force de gravitation de la Terre. À l'intérieur, on mesurera à l'aide d'un double interféromètre atomique l'accélération relative de deux atomes différents (potassium et rubidium) par rapport au référentiel de l'expérience. Ce référentiel est donné par la position des nœuds de l'onde laser

stationnaire qui sonde les atomes, fixée par le dispositif expérimental (voir la figure 3). L'expérience permettrait de détecter si un des deux atomes est soumis à une accélération plus importante : le principe d'équivalence serait alors violé.

L'expérience en microgravité à bord de l'*Airbus ZERO-G* constitue une première étape. Cet avion effectue des vols paraboliques reproduisant pendant une vingtaine de secondes la trajectoire d'un satellite. La première phase de la manœuvre, qui dure environ 20 secondes, consiste à cabrer l'avion jusqu'à une assiette de 45 degrés avant de « l'injecter » en parabole. Lors de



3. POUR TESTER LE PRINCIPE d'équivalence d'Einstein à l'échelle quantique, les physiciens envisagent de mesurer la différence d'accélération d'un atome de rubidium et d'un atome de potassium en chute libre à l'aide de deux interféromètres atomiques embarqués dans un satellite. Chaque interféromètre mesurera l'accélération d'un type d'atome. La position des nœuds et des ventres (en orange) des ondes laser stationnaires étant fixée et identique pour les deux interféromètres, ces ondes constituent une sorte de règle graduée qui permet de repérer les éventuelles différences d'accélération entre les deux types d'atomes.

cette phase, la trajectoire de l'avion est fortement courbée, de sorte que les expérimentateurs à bord ressentent une force centrifuge égale à deux fois leur poids (accélération centripète égale à $2g$). Vient ensuite la parabole : pendant 22 secondes, tous les objets et expérimentateurs à l'intérieur de la cabine sont dans des conditions d'impesanteur. Lorsque l'appareil atteint 45 degrés de piqué, les pilotes redressent l'appareil, ce qui se traduit par une nouvelle phase d'hypergravité ($2g$). L'ensemble de la manœuvre est répété 31 fois pendant le vol.

L'objectif de notre expérience est de comparer l'accélération ressentie par des atomes de rubidium et de potassium avec une précision égale à un cent milliardième de g . Nous avons récemment réussi, pour la première fois, à faire fonctionner un interféromètre atomique en impesanteur, ce qui constitue une étape importante pour la réussite du futur projet spatial. Nos collaborateurs de l'Université de Hanovre, quant à eux, ont effectué une expérience dans une tour de chute de 110 mètres de haut, dans laquelle ils ont suivi l'évolution d'une onde de matière géante ultrafroide pendant une seconde. Un argument supplémentaire en faveur de la réussite d'un test du principe d'équivalence dans l'espace avec des atomes froids !

Sonder la matière

Nombre d'autres projets de perfectionnement ou d'utilisation des interféromètres atomiques voient le jour actuellement, notamment grâce à la recherche fondamentale. Par exemple, de nouveaux états quantiques dits « comprimés » obtenus en laboratoire pourraient permettre d'augmenter la précision des interféromètres atomiques : lors de l'étape de préparation des atomes, il est possible de les placer dans un état quantique où plusieurs particules sont corrélées, ce qui réduit l'incertitude sur la mesure du nombre de particules à la sortie de l'interféromètre. Ces états quantiques « comprimés » permettraient de distinguer des effets inertiels jusque 1 000 fois plus petits que ceux détectés à partir d'un état quantique simple.

Une autre piste vise à utiliser les connaissances sur le comportement des ondes atomiques pour sonder la matière à l'échelle microscopique. Pour étudier le transport de l'électricité dans un solide, par exemple, et repérer la présence de défauts susceptibles de le bloquer, on décrit les électrons comme des ondes qui interfèrent quand ils ont heurté les défauts : les interférences destructives confinent les électrons, ce qui peut rendre le matériau isolant. Ce système est difficile à étudier expérimentalement. Aussi cherchons-nous à le simuler avec un gaz d'atomes froids (qui jouent le rôle des électrons) dans un potentiel lumineux désordonné (les défauts) et à comprendre l'apparition d'interférences destructives.

L'interférométrie atomique n'en est qu'à ses débuts ! ■