

l'intensité lumineuse résultante est supérieure à la somme des intensités des deux ondes. Si les ondes oscillent en opposition de phase, le terme d'interférences est minimal, et les interférences sont dites destructives : l'intensité lumineuse résultante est inférieure à la somme des intensités des deux ondes. Ce calcul est effectué en chaque point de l'écran, et l'on obtient des motifs

lération de la pesanteur (g) dues aux marées, soit quelques dizaines de milliards de g . Les applications de tels gravimètres sont nombreuses. Cartographier le champ de pesanteur permet d'obtenir des informations indirectes sur la composition du sol. Une masse de granite ou une nappe de pétrole, par exemple, auront des densités différentes et contribueront

On embarque à bord du véhicule (avion, sous-marin, bateau...) un ensemble de gyroscopes et d'accéléromètres. À partir de l'enregistrement de l'accélération et de la rotation du véhicule au cours du temps, on calcule sa vitesse (en multipliant l'accélération mesurée par le temps entre deux mesures, c'est-à-dire en intégrant le signal d'accélération sur cette durée), puis on remonte à la position en intégrant une seconde fois le signal de vitesse. Cette méthode, très efficace, a un inconvénient majeur : toute erreur de mesure, ou toute dérive des appareils, donne une position fautive du véhicule. Avec les instruments actuels, les erreurs liées à l'inexactitude des instruments se traduisent parfois par des positions erronées de plusieurs dizaines de mètres au bout de quelques minutes.

ISOLÉS DES FROTTEMENTS DE L'AIR dans leur enceinte à vide, les atomes suivent une trajectoire parfaitement balistique déterminée par les lois de Newton.

périodiques clairs et sombres – les franges d'interférences.

Pour réaliser un interféromètre atomique, on utilise, comme avec la lumière, des lames séparatrices afin de diviser une onde de matière en deux ondes identiques qui parcourront des chemins différents. Ces lames séparatrices sont réalisées à l'aide d'un réseau de fentes microscopiques ou grâce à la manipulation des atomes par laser (voir l'encadré ci-contre). Les franges d'interférences à la sortie de l'interféromètre révèlent les différences de parcours des deux ondes : un chemin plus long pour l'une que pour l'autre, une interaction avec un obstacle pour l'une et non pour l'autre, etc.

Pour les ondes de matière, ces différences, même infimes, peuvent avoir un effet considérable. Si, dans un interféromètre lumineux, les ondes voyagent à la vitesse de la lumière, les ondes atomiques, bien plus lentes, passent beaucoup plus de temps dans l'interféromètre. Par conséquent, à géométrie équivalente, les dispositifs à interférences atomiques sont jusqu'à 100 milliards de fois plus sensibles aux éventuelles interactions auxquelles les atomes sont soumis que les dispositifs optiques. On met alors à profit cette sensibilité exceptionnelle pour mesurer avec une grande précision, par exemple, l'effet d'un champ électrique sur un atome, la masse d'un atome, ou encore la rotation ou l'accélération subies par l'interféromètre, qui devient alors un capteur inertielle ultrasensible.

Une des premières applications de ces capteurs inertiels est la mesure de l'accélération verticale subie par les atomes sous l'effet de la pesanteur. L'interféromètre à onde de matière devient alors un gravimètre atomique si précis qu'il détecte les infimes fluctuations de l'accé-

à des valeurs mesurées de g légèrement différentes en surface ; de telles mesures locales de g pourraient ainsi faciliter la prospection minière et pétrolière.

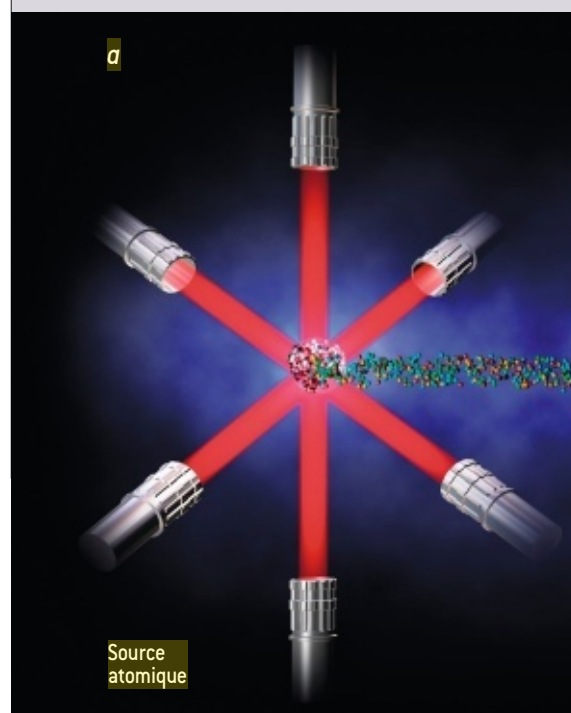
De même, en plaçant un gravimètre sur le flanc d'un volcan, on peut surveiller son activité : si des poches de magma se forment ou disparaissent près de la surface, g sera modifié. Enfin, les gravimètres atomiques peuvent enregistrer l'activité sismique du lieu où ils sont positionnés (déplacement des plaques tectoniques lors d'un séisme, montée de magma liée à une éruption volcanique, mouvements de l'interféromètre liés aux vibrations d'un séisme) et ainsi contribuer à une meilleure compréhension des séismes, voire, peut-être un jour, à leur prévision.

Se diriger grâce aux atomes

Les interféromètres à onde de matière sont aussi de formidables outils pour le guidage et la navigation inertielle. Pour se positionner dans l'espace, et ainsi se diriger d'un point de départ vers une destination précise, les navigateurs se sont toujours référés à des objets dont la position est par ailleurs connue (un référentiel). L'utilisation du sextant, par exemple, s'appuie sur la position des étoiles et des astres naturels, et le GPS sur celle de satellites artificiels. Sans ces références extérieures, la navigation repose sur une estimation de la direction et de la vitesse de déplacement, et toute imprécision conduit à une erreur sur la destination. La navigation inertielle offre une bonne estimation de ces paramètres, à condition que les appareils utilisés – des accéléromètres et des gyroscopes – évitent toute erreur de mesure.

Un capteur inertielle atomique mesure des accélérations et rotations infimes en provoquant et analysant les interférences d'un faisceau d'atomes froids soumis à ces forces inertielle. Des atomes sont refroidis par laser à une température de un microkelvin (a), puis libérés du piège. Un laser prépare les atomes dans un état quantique pur (b).

En utilisant une impulsion lumineuse appropriée, réalisée à l'aide d'une onde laser stationnaire (un faisceau laser rétro-réfléchi, caractérisé par des franges sombres – des nœuds – et claires – des ventres), on fait passer un atome de l'état quantique initial (où l'atome a une vitesse v) à une superposition de deux états quantiques différents :



Les senseurs inertiels à ondes de matière ne sont pas concernés par ces limitations : isolés des frottements de l'air dans leur enceinte à vide, les atomes suivent une trajectoire balistique déterminée par les lois de Newton. Avec l'interféromètre atomique, on évite ainsi les erreurs et dérives des systèmes classiques : la trajectoire des atomes étant connue, on détecte les mouvements du véhicule en mesurant le déplacement de l'interféromètre par rapport aux atomes.

En pratique, ce n'est pas aussi simple. Réaliser une telle centrale inertielle atomique transportable reste un défi : occupant une pièce entière, ces expériences nécessitent des conditions thermiques d'une grande stabilité. De plus, l'interféromètre atomique est si sensible qu'en présence

de vibrations, comme dans un avion de ligne, il est impossible d'extraire une information précise sur l'accélération. Déjà en laboratoire, il est nécessaire d'utiliser des dispositifs d'amortissement perfectionnés. Comment, dans ces conditions, utiliser les ondes de matière pour guider un sous-marin ou un avion ?

Depuis quelques années, les progrès dans la technologie des composants (en particulier des systèmes laser) et dans la compréhension des phénomènes physiques en jeu permettent de sortir les interféromètres de leur cocon. Plusieurs prototypes de gravimètres déplaçables ont vu le jour, permettant de mesurer la gravité à des endroits différents et de participer à des campagnes de comparaison dans des observatoires de géophysique.

✓ BIBLIOGRAPHIE

R. Geiger *et al.*, **Detecting inertial effects with airborne matter-wave interferometry**, *Nature Communications*, vol. 2, article n° 474, doi : 10.1038/ncomms1479, 2011.

Ch. Salomon, **Mesurer le temps avec des atomes**, *Pour la Science*, n° 397, pp. 72-78, 2010.

La lumière dans tous ses états, *Dossier Pour la Science*, n°53, 2006.

Les sites Internet des projets d'interférométrie atomique en microgravité :
www.ice-space.fr
www.miniatom.fr

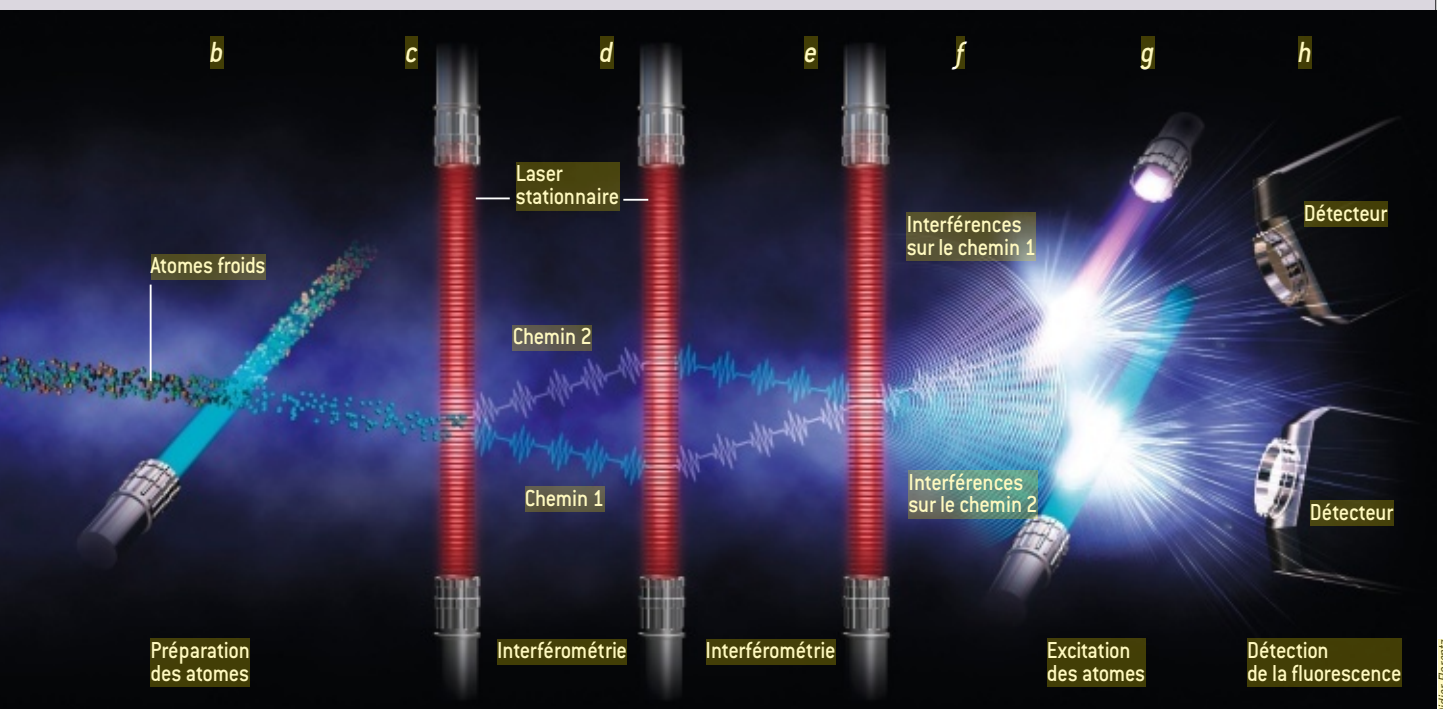
PRINCIPE D'UN SENSEUR INERTIEL ATOMIQUE

le premier correspond à l'état initial de vitesse v , l'autre à l'état où l'atome a absorbé un photon – ce « choc » modifiant la vitesse de l'atome d'une quantité proportionnelle à l'énergie du photon (c). De cette superposition d'états quantiques résulte un dédoublement de l'onde de matière initiale en deux ondes atomiques qui se propagent dans des directions différentes. Une deuxième impulsion lumineuse inverse les états quantiques et les vitesses des deux ondes atomiques sans les dédoubler (d), afin qu'elles se recroisent. Une troisième et dernière impulsion dédouble à nouveau dans les deux états quantiques chacune des deux ondes, et les recombine (e) : les ondes de

même état quantique interfèrent alors (f), et l'on obtient un interféromètre atomique.

Les deux faisceaux d'atomes sortants sont excités chacun par un faisceau laser sonde (g), et deux détecteurs (h) collectent la fluorescence émise. On compte ainsi le nombre d'atomes dans chaque bras de sortie de l'interféromètre. Le rapport de ces deux nombres donne un point sur une courbe – une sinusoïde dont la périodicité correspond à celle des nœuds de l'onde stationnaire. Cette courbe traduit les franges d'interférences de l'expérience, et la position du point sur la courbe est liée à la différence des chemins parcourus par les ondes atomiques, notamment du fait de la gravité.

En d'autres termes, la position de ce point varie en fonction de celle des atomes par rapport aux nœuds de l'onde stationnaire qu'ils ont traversée lors des impulsions : les nœuds constituent en quelque sorte une règle graduée sur laquelle on repère la position des atomes et, à chaque impulsion, le laser stationnaire imprime cette position sur l'onde atomique sous la forme d'un déphasage, qui s'ajoute à ceux donnés par les impulsions précédentes. Ainsi, à l'issue de deux impulsions, on mesurerait la variation de position entre deux instants, soit la vitesse des atomes ; avec trois impulsions, on mesure directement l'accélération subie par les atomes sous l'effet de la pesanteur.



Didier Florentz



Institut d'optique

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-



Institut d'optique



Institut d'optique

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