

Cependant, mettre en évidence le comportement ondulatoire de la matière n'est pas chose aisée. Dans les conditions habituelles, la longueur d'onde associée aux particules – la longueur d'onde de de Broglie, inversement proportionnelle à la vitesse et à la masse de la particule – est très faible (environ 0,1 nanomètre pour un atome d'hélium se déplaçant à une vitesse de 1000 mètres par seconde). À une telle longueur d'onde, les phénomènes ondulatoires – les figures d'interférences – sont tellement faibles qu'ils sont masqués par le comportement corpusculaire.

Depuis près de 25 ans, on refroidit des gaz d'atomes à des températures extrêmement basses, de l'ordre de quelques millièmes de degré au-dessus du zéro absolu. Ces « atomes froids » se déplaçant

lentement, leur longueur d'onde de de Broglie augmente, et les interférences deviennent détectables. Loin d'être une simple curiosité quantique, ces ondes de matière ont de nombreuses applications, à la fois parce qu'elles sont de formidables outils pour sonder la matière à l'échelle atomique, et parce qu'elles permettent de concevoir des instruments de mesure d'une grande précision, telles des horloges atomiques qui mesurent la seconde avec 17 chiffres significatifs.

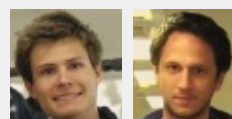
Un des principaux champs d'application des interféromètres à atomes froids, ou interféromètres atomiques, est la réalisation de senseurs inertiels, qui mesurent des accélérations ou des rotations. Depuis quelques années, les applications de ces senseurs se multiplient, dans des champs aussi variés que la mesure des variations de la gravité terrestre en fonction des marées, la navigation ou la vérification, avec une précision inégalée, de questions de physique fondamentale, tel le principe d'équivalence d'Einstein. Avant de nous intéresser à ces diverses applications, examinons le principe de fonctionnement d'un senseur inertiel.

Des interférences avec des atomes

En optique et, plus généralement, en mécanique ondulatoire, on parle d'interférences lorsque deux ondes lumineuses de même type se rencontrent et interagissent après avoir parcouru des chemins différents. Un raisonnement mathématique simple permet de comprendre ce que représente une figure d'interférences détectée sur un écran en sortie d'un interféromètre optique.

Une onde (électromagnétique dans le cas de la lumière) peut être modélisée par une amplitude qui oscille au fil du temps. La superposition de deux ondes est alors la somme des amplitudes de chaque onde. Les détecteurs (y compris notre œil ou l'écran), cependant, ne sont sensibles qu'à l'intensité lumineuse de l'onde, c'est-à-dire au module au carré de son amplitude. L'intensité lumineuse détectée lors de la superposition de deux ondes est ainsi le module au carré de la somme des amplitudes des deux ondes, soit la somme des intensités des deux ondes, à laquelle s'ajoute un terme dit d'interférences : le produit des amplitudes des deux ondes. Si les ondes oscillent en phase, ce terme est maximal, et les interférences sont dites constructives :

LES AUTEURS



Remi GEIGER, docteur de l'Université Paris Sud, vient de terminer sa thèse au Laboratoire Charles Fabry (UMR 8501, CNRS, Université Paris Sud, Institut d'optique), à Palaiseau, où Vincent MÉNORET est doctorant de la même université.

Philippe BOUYER est directeur du Laboratoire photonique, numérique et nanosciences (UMR 5298, CNRS, Université de Bordeaux I, Institut d'optique), à Talence.

L'ESSENTIEL

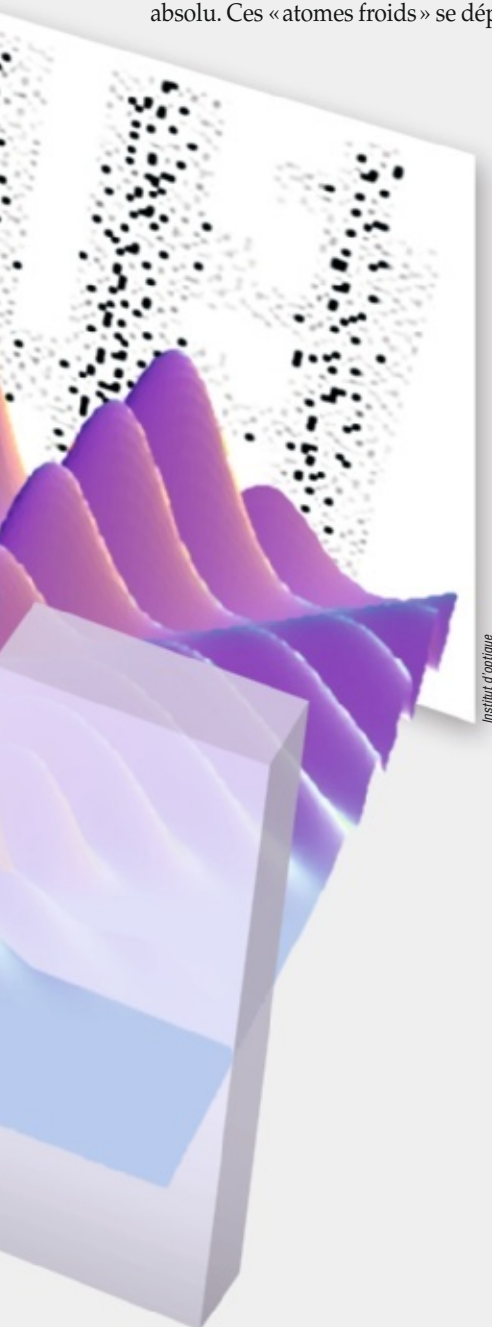
✓ Selon la physique quantique, les particules de matière sont aussi des ondes.

✓ Les physiciens ont mis au point des dispositifs où ces ondes de matière interfèrent.

✓ À géométrie équivalente, ces interféromètres atomiques sont 100 milliards de fois plus sensibles que les dispositifs optiques.

✓ Les applications sont nombreuses : mesurer les variations de gravité, sonder le sous-sol, se diriger par navigation inertielle...

✓ Un des grands enjeux est la vérification du principe d'équivalence d'Einstein à l'échelle quantique.



Institut d'optique

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

l'éclatement de la pesanteur (g) dues aux marées, soit quelques dizaines de milliardièmes 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

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.

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.

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 inertielles. 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 :

