

Les théories d'ondes pilotes en mécanique quantique

Les expériences avec les « marcheurs » réalisent à échelle macroscopique le guidage d'une particule par une onde. Cette situation est proche de celle qui a été imaginée dans les modèles dits d'onde pilote de la mécanique quantique. Il convient donc de rappeler brièvement l'histoire de ces modèles dits de « de Broglie-Bohm ». Bien que toujours étudiés, ces derniers sont aujourd'hui souvent considérés comme superflus par les spécialistes de la mécanique quantique. L'évolution historique de ces modèles est complexe, mais son examen montre qu'il convient de distinguer les modèles respectivement proposés par Louis de Broglie et par l'Américain David Bohm.

Le modèle de Bohm, proposé en 1952, est actuellement le plus connu. L'onde qui est solution de

l'équation de Schrödinger y joue le rôle de l'onde pilote. On peut, par une transformation mathématique, séparer cette équation en deux parties : une équation qui énonce la continuité des densités de probabilité, et une équation de mouvement qui détermine des trajectoires dans l'espace physique. Toutefois, le point de départ de cette approche étant l'équation de Schrödinger, on obtient seulement un autre aspect des ondes de probabilité. Cette approche associe des trajectoires de particules fictives à des flux de densités de probabilité. Ces particules sont ainsi soumises à un nouveau potentiel, dit potentiel quantique, qui a pour origine la fonction d'onde solution de l'équation de Schrödinger.

Le modèle de Bohm diffère profondément de ce qu'avait envisagé

de Broglie, qui souhaitait à la fois décrire le mouvement de particules individuelles dans l'espace physique et pouvoir en déduire les propriétés statistiques.

Dans des travaux de 1927 repris en 1953, de Broglie propose un modèle de double solution où coexistent deux champs d'onde. Le premier décrit le mouvement de l'objet individuel dans l'espace physique ; c'est un paquet d'ondes ayant en son centre une zone singulière caractérisée par une très grande amplitude et qui équivaut à une particule ponctuelle. Cette singularité est guidée par son paquet d'ondes, qui constitue une onde dite pilote. Cela confère à la dynamique de la singularité des propriétés ondulatoires qui induisent une non-localité spatiale. Ainsi,

dans ce modèle, les singularités (ou particules) peuvent être par exemple déviées et donner (statistiquement) une figure de diffraction ou d'interférence. La deuxième onde considérée par de Broglie est la fonction d'onde décrite par l'équation de Schrödinger. Cette onde, qui n'est pas physique au sens classique, traduit le comportement statistique des objets individuels conformément à l'interprétation usuelle de la mécanique quantique. Elle est associée à un comportement moyen et permet de prédire les propriétés statistiques observées.

Ces idées de de Broglie, comme celles de Bohm, sont toutefois restées marginales, l'approche usuelle paraissant suffire à l'interprétation des données expérimentales.

BIBLIOGRAPHIE

A. Eddi et al., Information stored in Faraday waves : the origin of a path memory, *J. Fluid Mech.*, vol. 674, pp. 433-463, 2011.

E. Fort et al., Path memory induced quantization of classical orbits, *PNAS*, vol. 107, pp. 17515-17520, 2010.

Y. Couder et E. Fort, Single-particle diffraction and interference at a macroscopic scale, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 97, 154101, 2006.

S. Protière et al., Particle wave association on a fluid interface, *J. Fluid Mech.*, vol. 554, pp. 85-108, 2006.

Y. Couder et al., Walking and orbiting droplets, *Nature*, vol. 437, p. 208, 2005.

L. de Broglie, L'interprétation de la mécanique ondulatoire, *J. de Phys. et le radium*, tome 20, pp. 963-979, 1959.

L. de Broglie, La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement, *J. de Phys. et le radium*, série 6, tome 8, pp. 225-241, 1927.

Nos résultats expérimentaux suggèrent qu'un modèle de « double solution » du type proposé initialement par de Broglie (*voir l'encadré ci-dessus*) peut constituer la face cachée des comportements statistiques quantiques. Dans nos expériences, chaque marcheur individuel est guidé par une onde pilote. Les distributions statistiques obtenues lors de mesures intrusives font émerger des densités de présence possédant un caractère ondulatoire. Néanmoins, à l'échelle de l'expérience avec un marcheur unique, cette onde de densité, qui est l'analogue de l'onde solution de l'équation de Schrödinger, n'est jamais visible directement.

Un débat ancien qui n'est pas clos

Les observations suggèrent l'origine des propriétés statistiques des marcheurs. La dynamique due à l'existence de la mémoire de chemin tend à devenir chaotique dans tout environnement confiné, car cela induit une prolifération des sources secondaires. Le champ d'onde résultant est corrélé à la géométrie locale, dont il tend à exciter les modes propres de vibration. Des résultats préliminaires concernant les densités de probabilité de présence des marcheurs dans des cavités vont d'ailleurs dans ce sens. Ainsi, l'onde pilote peut être à l'origine d'un champ moyen réflé-

tant la géométrie de l'environnement et commun à toutes les réalisations.

La théorie standard de la mécanique quantique, développée par l'école de Copenhague, fournit un formalisme qui permet de prédire avec précision les résultats des mesures dans une très grande variété de situations. La dualité onde-particule y joue un rôle central.

En dépit de son efficacité, cette approche probabiliste de la mécanique quantique garde un caractère singulier. À l'opposé de tous les autres phénomènes de physique statistique et de façon surprenante, elle suppose qu'aucun mécanisme sous-jacent, même complexe, ne peut intervenir au niveau d'une particule individuelle et être responsable de ces comportements probabilistes. C'est précisément ce point d'achoppement qui faisait penser à de Broglie ou Einstein que la théorie quantique était fondamentalement incomplète.

Or il semble qu'aucune approche de la mécanique quantique n'ait envisagé un effet de mémoire. Comme nous l'avons vu, celui-ci induit dans le cas de nos marcheurs une non-localité spatio-temporelle qui est à l'origine d'un principe d'incertitude et d'une quantification. C'est pourquoi nous pensons que le débat ancien sur le caractère incomplet de la mécanique quantique dans son interprétation actuelle n'est pas clos. ■

Entrée libre
→ www.cnrs.fr/entree-matiere

ENTRÉE EN MATIÈRE

Jardins du Trocadéro, du 19 au 30 octobre 2011

Exposition, conférences, animations
Une invitation à explorer la matière



Année internationale de la
CHIMIE
2011



www.cnrs.fr



énergie nucléaire + énergies alternatives



THALES



MAIRIE DE PARIS



Le Point

SCIENCE

Direct Matin



Des ondes de matière pour tester les lois de l'Univers

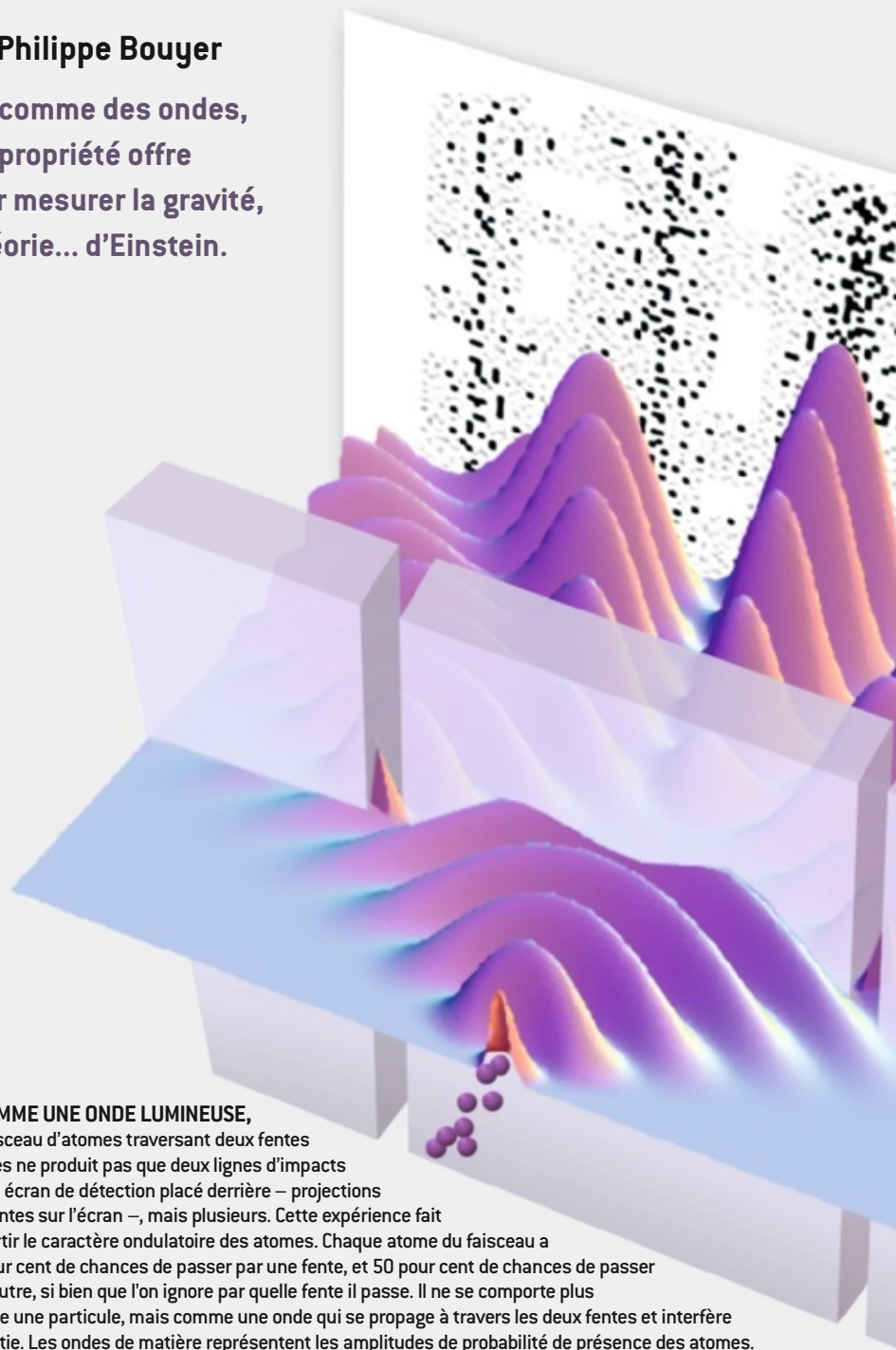
Remi Geiger, Vincent Ménoret et Philippe Bouyer

Les atomes se comportent parfois comme des ondes, que l'on peut faire interférer. Cette propriété offre de nouveaux outils plus précis pour mesurer la gravité, se repérer en vol ou éprouver la théorie... d'Einstein.

La matière est une onde et les ondes sont composées de particules (photons pour la lumière, phonons pour le son) : c'est un des principes clefs de la mécanique quantique. Il prédit qu'à toute particule on peut associer une onde, et réciproquement. Ainsi, de même qu'on peut faire interférer des photons, mettant ainsi en évidence leur caractère ondulatoire, il est possible de réaliser des interféromètres avec des particules de matière.

Les physiciens américains Clinton Davisson et Lester Germer en ont fait la première démonstration en 1927 en reproduisant avec des électrons l'expérience des fentes de Young : un faisceau d'électrons est dirigé vers deux fentes très fines et très rapprochées. Derrière les fentes, un détecteur enregistre les points d'impact des électrons. Dans le cas de corpuscules, on s'attendrait à observer l'image des deux fentes sur l'écran, c'est-à-dire deux lignes. Or on obtient un tout autre résultat. Les impacts se répartissent selon un motif périodique – un interférogramme –, qui ne peut s'expliquer que par un phénomène d'interférences, et donc un comportement ondulatoire des électrons (voir la figure 1). Depuis cette preuve de principe, des interférences ont été observées avec des neutrons, des atomes et, récemment, des molécules organiques comportant plusieurs centaines d'atomes, confirmant que la mécanique quantique est encore valable à l'échelle macroscopique.

1. COMME UNE ONDE LUMINEUSE, un faisceau d'atomes traversant deux fentes étroites ne produit pas que deux lignes d'impacts sur un écran de détection placé derrière – projections des fentes sur l'écran –, mais plusieurs. Cette expérience fait ressortir le caractère ondulatoire des atomes. Chaque atome du faisceau a 50 pour cent de chances de passer par une fente, et 50 pour cent de chances de passer par l'autre, si bien que l'on ignore par quelle fente il passe. Il ne se comporte plus comme une particule, mais comme une onde qui se propage à travers les deux fentes et interfère en sortie. Les ondes de matière représentent les amplitudes de probabilité de présence des atomes.



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.

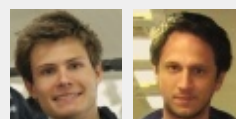
Un des principaux champs d'application des interféromètres à atomes froids, ou interféromètres atomiques, est la réalisation de senseurs inertiels, qui mesurent des accélérations ou des rotations. Depuis quelques années, les applications de ces senseurs se multiplient, dans des champs aussi variés que 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

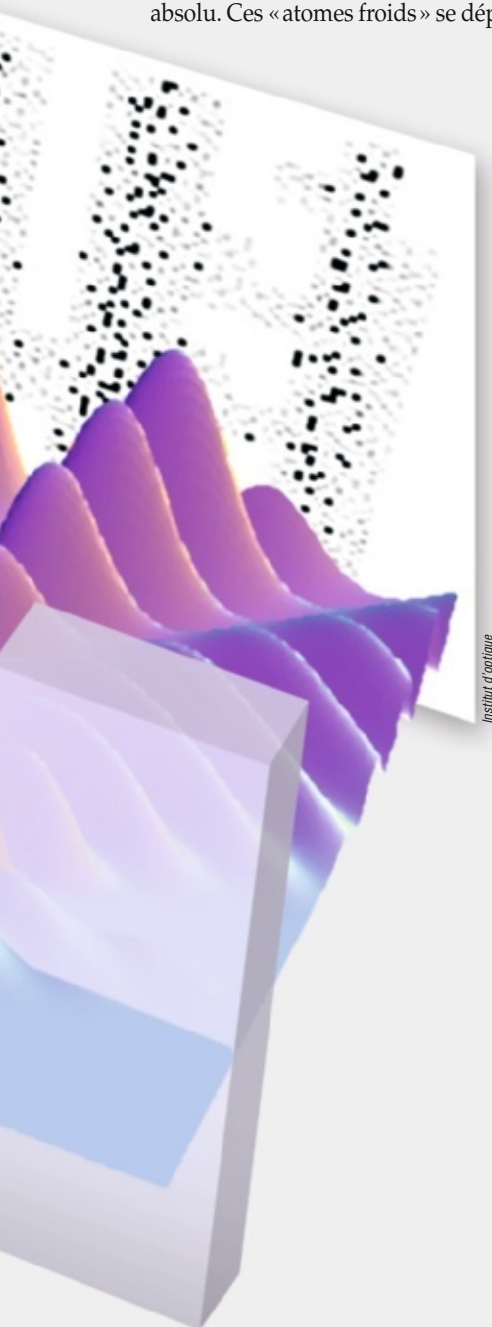
✓ Selon la physique quantique, les particules de matière sont aussi des ondes.

✓ 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

lération 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

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.

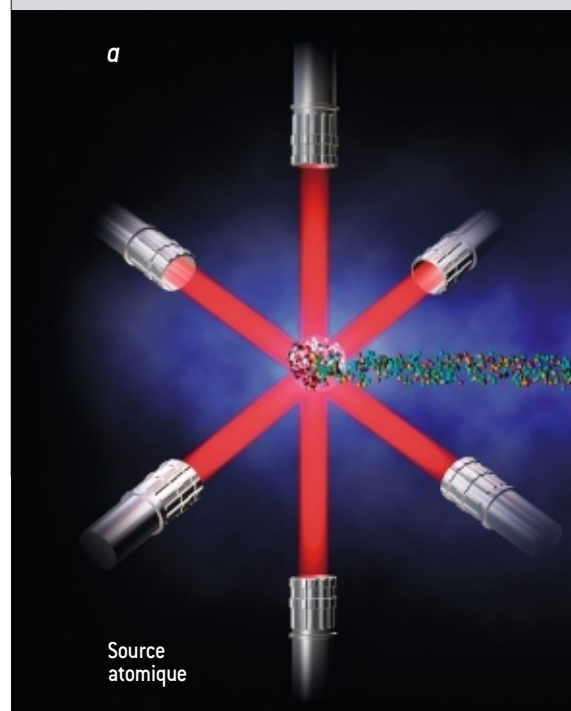
De même, en plaçant un gravimètre sur le flanc d'un volcan, on peut surveiller son activité : si des poches de magma se forment ou disparaissent près de la surface, g sera modifié. Enfin, les gravimètres atomiques peuvent enregistrer l'activité sismique du lieu où ils sont positionnés (déplacement des 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

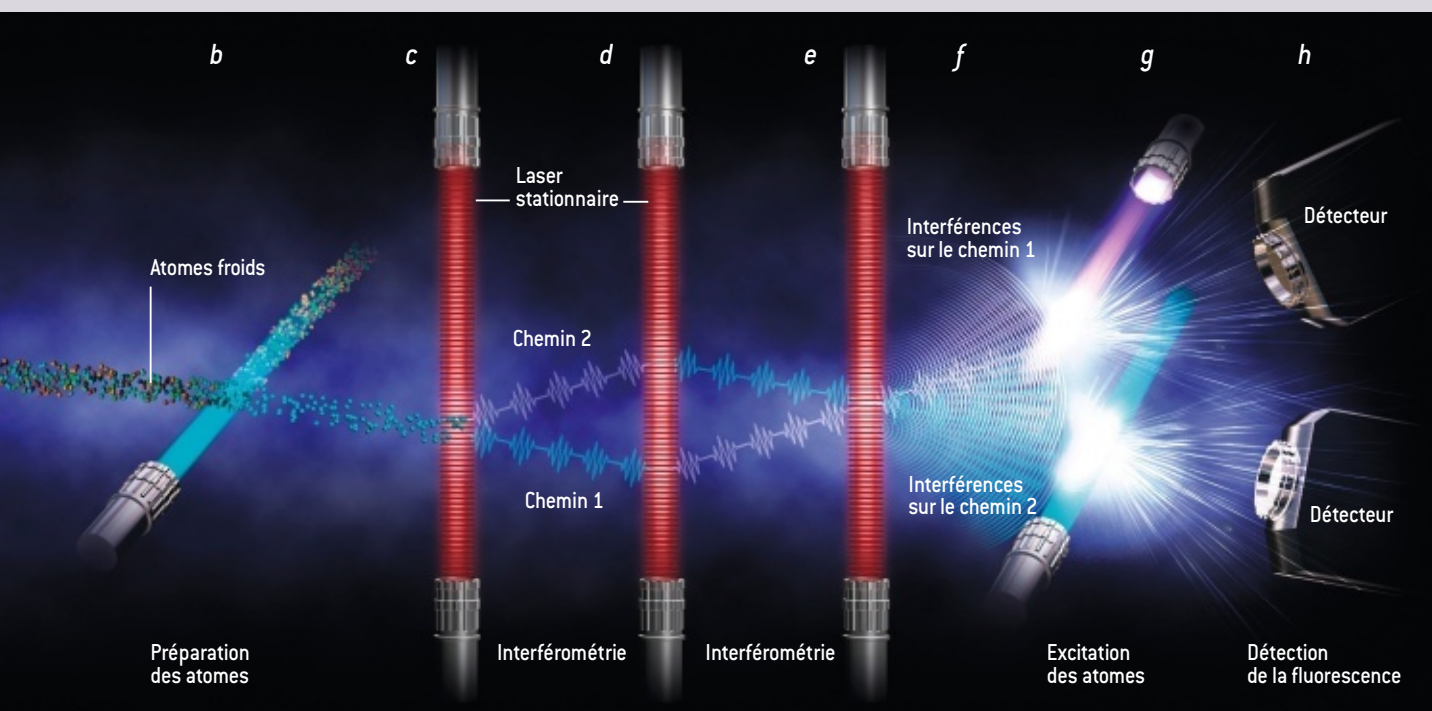
PRINCIPE D'UN SENSEUR INERTIEL ATOMIQUE

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 croisent. 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.





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



7^E SALON DU LIVRE D'HISTOIRE
DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

L'HOMME ET L'ENVIRON- NEMENT



TABLES RONDES, RENCONTRES AVEC DES AUTEURS, LIBRAIRIE, EXPOSITIONS, ANIMATIONS, SPECTACLES
18/19/20 NOVEMBRE 2011 - ESPACE ROBESPIERRE



IVRY
S/SEINE



www.ivry94.fr et www.ast.sso.fr

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.

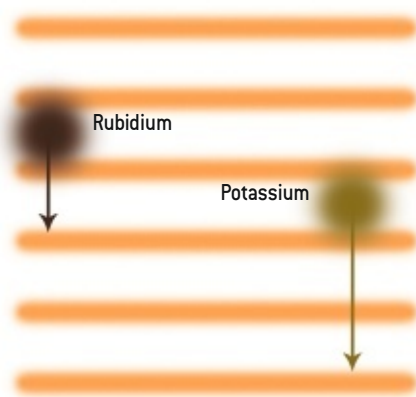
Les interféromètres à ondes de matières pourraient aller encore plus loin ; en augmentant la précision des mesures, mais aussi en permettant de tester le principe d'équivalence avec des objets quantiques – des atomes –, au lieu des corps astronomiques ou macroscopiques utilisés aujourd'hui. L'idée est 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 ! ■

POUR LA



1 an ■ 76 €
au lieu de ~~102,50 €~~

- ✓ 26% d'économie
- ✓ la garantie de ne manquer aucune parution
- ✓ l'accès gratuit à vos numéros en version numérique sur www.pourlascience.fr

■ POUR LA
SCIENCE

À retourner accompagné de votre règlement dans une enveloppe non affranchie à : Service Abonnements Pour la Science • Libre réponse 90382 • 75281 Paris cedex 06

→ Offre disponible aussi en ligne sur www.pourlascience.fr/pls/abonnements-couples-papier

* Tarif valable en France métropolitaine et d'Outre mer. Participation aux frais de port à ajouter au prix de l'abonnement : Europe 16 € - autres pays 35 €.

☐ Je préfère régler mon abonnement par prélèvement **19€ par trimestre****. En cadeau, je reçois le *Dossier Pour la Science* n° 64 « Exoplanètes ».

**** Abonnement valable uniquement en France métropolitaine, renouvelable à échéance par tacite reconduction et dénonçable à tout moment par simple courrier.**

Nom : _____ Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : Ville : Pays : Tél. (facultatif) :

☐ Je souhaite recevoir la newsletter *Pour la Science* à l'adresse e-mail suivante : _____@_____

☐ Je règle en une seule fois 76 € (+ frais de port en sus pour l'étranger)

Signature obligatoire :

☐ par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ par carte bancaire

Nº: _____

Expire fin :

☐ Je règle en douceur **19€ par trimestre** et reçois en cadeau le *Dossier Pour la Science* n° 64. Je remplis la grille d'autorisation de prélèvement ci-dessous en joignant impérativement 1 RIB.

Autorisation de prélèvement automatique (France métropolitaine uniquement). J'autorise l'établissement teneur de mon compte à prélever le montant des avis de prélèvement trimestriel présentés par *Pour la Science*. Je vous demande de faire apparaître mes prélèvements sur mes relevés de compte habituels. Je m'adresserai directement à *Pour la Science* pour tout ce qui concerne le fonctionnement de mon abonnement.

Titulaire du compte à débiter

Nom, Prénom :

N°: _____ Rue: _____

CP: | | | | | Ville: |

Compte à débiter

Établissement	Code guichet	N° de compte	Clé RIB
---------------	--------------	--------------	---------

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

Établissement teneur du compte à débiter

Établissement :

N° : _____ Rue : _____

CP: | | | | | Ville: |

Date et signature (obligatoire)

Numéro offert
avec mon abonnement
19 € par trimestre



PLS409 – Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31.12.2011

En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-contre sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès du groupe *Pour la Science*. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'organismes partenaires. En cas de refus de votre part, merci de cocher la case ci-contre ☐

Des ondes de spin pour l'électronique

M. Cazayous, Y. Gallais et A. Sacuto

En changeant d'orientation de proche en proche, les spins des électrons peuvent former des ondes. La magnonique, nouvelle électronique fondée sur ces ondes, pourrait conduire à une miniaturisation plus poussée.

L'écriture, la conservation et la transmission des informations ont toujours bénéficié des derniers progrès techniques, de la presse de Gutenberg aux microprocesseurs électroniques. De nos jours, la plupart des composants électroniques sont constitués de matériaux semi-conducteurs et tirent leurs fonctionnalités du contrôle des courants électriques, c'est-à-dire du déplacement des charges électriques portées par les électrons.

Toutefois, les mémoires les plus performantes – les mémoires MRAM (*Magnetic Random Access Memory*) – déjà présentes dans les ordinateurs, les téléphones mobiles ou les tablettes tactiles, utilisent une autre caractéristique de l'électron : son spin, assimilable à un petit aimant élémentaire. Ces mémoires MRAM relèvent d'un type d'électronique nommé spintronique. Aujourd'hui, les physiciens annoncent la « magnonique », une électronique fondée non plus sur les spins des électrons considérés isolément, mais sur les ondes formées par des ensembles de spins (voir la figure 1).

Qu'est-ce que le spin ? Que sont les ondes de spin ? Pourquoi sont-elles intéressantes ? Comment les créer et les manipu-

ler ? Nous allons répondre successivement à ces questions, et nous mentionnerons quelques découvertes récentes en magnonique et les perspectives qu'elles ouvrent.

Outre une charge électrique et une masse, l'électron a un moment cinétique intrinsèque nommé spin, auquel est associé un moment magnétique. C'est une grandeur qui ne peut se comprendre que dans le cadre de la physique quantique. Cependant, une image classique répandue consiste à assimiler le spin d'un électron à la rotation de ce dernier sur lui-même : l'électron ressemble ainsi à une minuscule toupie. L'axe et le sens de rotation déterminent l'orientation du spin. Toutefois, les lois de la physique quantique montrent que la mesure d'un spin ne peut donner que certaines valeurs, selon des règles bien définies. En particulier, en projection sur

1. LES ONDES DE SPIN apparaissent dans des matériaux magnétiques ordonnés, où les atomes ont un spin, similaire à un petit aimant, qui tourne en décrivant un cône dit de précession. Chaque spin est en interaction quantique avec les spins voisins. Quand l'un est modifié, ses voisins le sont aussi. Les mouvements des spins se propagent ainsi de proche en proche.

