

Le monde quantique à notre échelle

On révèle le comportement quantique d'objets massifs en contrôlant leurs mouvements à l'aide de lumière laser.



PAR **Samuel Deléglise**, chargé de recherche au CNRS dans le groupe de mesure et bruits fondamentaux du laboratoire Kastler-Brossel, à Paris.

C'est un monde apparemment très éloigné du nôtre. Un monde où les objets se comportent étrangement. Par exemple, ils ne possèdent pas une position et une vitesse parfaitement déterminées, et peuvent se trouver dans deux endroits en même temps.

Ce monde, pourtant, c'est le nôtre. À condition de le regarder à l'échelle microscopique, là où règnent les lois de la mécanique quantique. Ces lois, bien établies, posent néanmoins un problème : lorsqu'on les extrapole à l'échelle macroscopique, elles ne

semblent plus s'appliquer. Est-ce parce que les objets macroscopiques n'y sont pas soumis, ou parce qu'elles deviennent imperceptibles ?

La première difficulté pour répondre à cette question vient de l'ampleur des fluctuations quantiques. Grandes à l'échelle des atomes, elles deviennent très petites pour les objets ordinaires et sont donc difficiles à mesurer. Le second écueil est la température, qui correspond à des mouvements incessants des particules. Cette agitation, importante relativement, masquerait d'éventuelles propriétés quantiques.

Lumière et matière. Pour savoir si les lois de la physique quantique s'exercent réellement aux échelles macroscopiques, des physiciens ont entrepris de relever un défi qui, il y a encore dix ans, passait pour insurmontable : placer des objets massifs dans des conditions où l'on parviendrait à démasquer leurs

propriétés quantiques. Cette démarche commence à porter ses fruits, grâce à l'utilisation d'objets appelés « systèmes optomécaniques ». En utilisant la force qu'exerce la lumière sur la matière, on peut en effet refroidir ces systèmes jusqu'à des températures si basses que l'agitation thermique devient plus faible que leurs éventuelles fluctuations quantiques. À terme, ces expériences pourraient ouvrir la voie à une nouvelle physique, une physique expliquant – enfin ! – pourquoi notre monde classique est si différent de celui décrit par la mécanique quantique.

L'idée de se servir de lumière pour révéler le comportement quantique d'objets massifs est venue d'un problème très concret : le besoin de mesurer des distances avec une très grande précision. Il s'est posé, depuis les années 1970, aux utilisateurs des interféromètres de détection d'ondes gravitationnelles (lire « Les nouveaux détecteurs d'ondes gravitationnelles », p. 56). Dans ces instruments, on envoie un rayon laser dans un tube sous vide de plusieurs kilomètres de long. À l'extrémité, il se réfléchit sur un miroir suspendu (donc mobile). En principe, le temps nécessaire à cet aller et retour est toujours le même. Sauf lorsque passe une onde gravitationnelle : comme celle-ci déforme l'espace-temps, elle modifie très légèrement la distance que le laser doit parcourir. C'est cette modification que les interféromètres doivent détecter.

Mais le système n'est pas parfait. En effet, la force qu'exerce la lumière laser sur le miroir mobile agite légèrement ce dernier. Cette force, que l'on peut comprendre aussi comme résultant des impacts des photons réfléchis par

le miroir, est appelée force de pression de radiation. Elle est minime : il faudrait près de 15 kilowatts de lumière, soit l'énergie nécessaire à l'alimentation d'une motrice TGV, pour soulever cette feuille de papier. Elle n'en constitue pas moins une limitation fondamentale à la précision des mesures, comme l'a montré à la fin des années 1970 Carlton Caves, alors jeune physicien à Caltech.

Force amplifiée. À cette époque, Vladimir Braginsky, à l'université d'État de Moscou, s'est intéressé aux effets de cette force dans de tels dispositifs, et a entrepris de l'étudier expérimentalement. Comment ? En l'amplifiant à l'aide d'un miroir fixe en face du miroir mobile, l'espace entre les deux miroirs formant alors ce qu'on appelle une cavité optique. Pour certaines fréquences du champ lumineux, la cavité présente un comportement dit « résonnant » : la lumière s'accumule entre les deux miroirs, ce qui augmente à la fois la force de pression de radiation et la sensibilité de la mesure de position. Dans un tel système, la dynamique du miroir mobile et celle du faisceau lumineux sont intimement liées, car la lumière modifie le mouvement du miroir tandis qu'en retour le miroir affecte la lumière en changeant la

> LA QUESTION

Lorsqu'on les extrapole à l'échelle macroscopique, les lois de la mécanique quantique ne semblent plus s'appliquer.

> L'EXPÉRIENCE

En utilisant la force qu'exerce la lumière sur la matière, on amène des microrésonateurs dans leur état quantique fondamental.

> L'ÉCHÉANCE

Des expériences visant à tester si les lois de la mécanique quantique restent inchangées à l'échelle macroscopique sont en préparation.

fréquence de résonance optique. Aussi les propriétés mécaniques du miroir mobile – sa fréquence d'oscillation et son amortissement – peuvent-elles être modifiées par la lumière laser.

En adjoignant un deuxième miroir pour former une cavité optique, Braginsky a inventé ce que l'on appelle aujourd'hui l'optomécanique en cavité, suscitant un changement de paradigme : les scientifiques ont alors compris que la lumière pouvait être utilisée non seulement pour mesurer le mouvement mécanique d'objets macroscopiques, mais également pour le contrôler en amortissant les mouvements aléatoires du miroir.

Depuis ces expériences pionnières, les effets de la force de pression de >>>



© LIGO LABORATORY, CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Aussi massifs soient-ils, les miroirs des antennes gravitationnelles (ci-contre, un miroir de l'interféromètre LIGO) sont sensibles à la pression exercée par la lumière.

Fig.1 Cavité optomécanique



CE SYSTÈME, appelé « cavité optomécanique », comprend deux miroirs, l'un fixe et l'autre mobile. Pour certaines fréquences du rayonnement laser, la lumière s'accumule entre ces deux miroirs. Cette amplification permet d'étudier les effets de la force de pression qu'exerce la lumière sur le miroir mobile : on peut mesurer le mouvement de ce miroir avec une grande précision, et le contrôler grâce aux variations d'intensité de la force lumineuse.

© INFOGRAPHIE : PHILIPPE MOUCHE

Le monde quantique à notre échelle

►►► radiation ont été étudiés dans un nombre croissant de montages optomécaniques, mettant en jeu des masses mobiles allant de plusieurs kilogrammes pour les miroirs utilisés dans les interféromètres gravitationnels à quelques microgrammes seulement. En 1999, l'équipe d'Antoine Heidmann, au laboratoire Kastler-Brossel à Paris, a pour la première fois observé l'infinie agitation brownienne d'un miroir de taille centimétrique, due à son bruit thermique [1]. Une telle mesure permet de détecter des mouvements aussi infimes que 10^{-19} mètre, soit un 100 000^e du rayon d'un noyau atomique.

Puis, dans les années 2000, l'utilisation des systèmes optomécaniques a connu un tournant décisif. Les physiciens se sont alors inspirés d'objets issus des microtechnologies, les MEMS (systèmes microélectromécaniques), pour concevoir des micro-oscillateurs très légers capables d'osciller à des fréquences élevées, avec une très faible dissipation d'énergie. Ils se sont alors fixé pour objectif d'utiliser un faisceau laser pour les refroidir à tel point que leur agitation thermique devienne négligeable

devant leurs fluctuations quantiques. L'optomécanique quantique était née.

Ce programme expérimental s'inspirait fortement des expériences de refroidissement d'atomes ou de molécules menées depuis 20 ans, et qui ont fourni les preuves les plus directes, à ce jour, du comportement quantique de ces objets. Mais d'une molécule à un micromiroir, le saut à franchir était énorme !

Course au refroidissement. Dès 2006, un premier succès est venu récompenser ces efforts : trois équipes dans le monde, dont celle du laboratoire Kastler-Brossel, ont démontré qu'on pouvait effectivement contrôler les vibrations de ces micro-oscillateurs par laser en y intégrant un micromiroir [2]. Certes, nous étions encore loin d'avoir atteint le régime quantique. Mais ces résultats étaient suffisamment prometteurs pour déclencher la « course au refroidissement » permettant d'y parvenir.

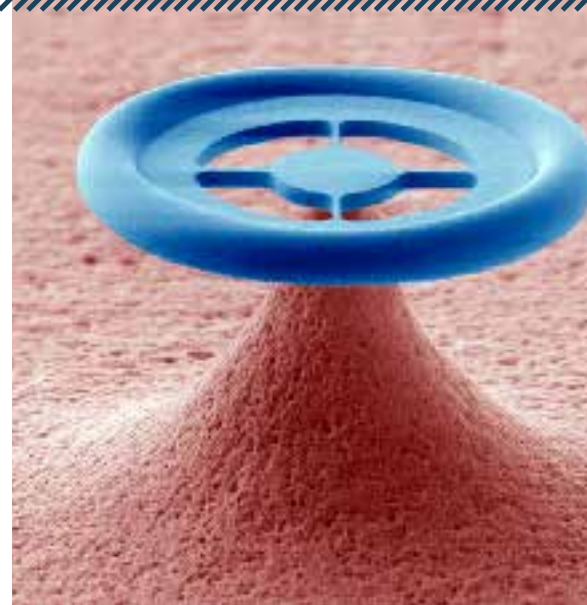
Pour que le comportement quantique d'un tel oscillateur devienne apparent, il faut abaisser l'énergie de ses fluctuations thermiques sous un certain seuil. Ce seuil est quantifiable : il s'agit de la quantité minimale d'énergie, appelée quantum d'oscillation, ou « phonon », que l'oscillateur peut échanger avec le monde extérieur. Il se trouve que ce seuil dépend uniquement de la fréquence de l'oscillateur. Il est d'autant plus élevé que la fréquence augmente.

En pratique, cela signifie que plus la fréquence de l'oscillateur est élevée, moins on a besoin de le refroidir.

C'est en s'appuyant sur cette idée qu'en 2010 une équipe de l'université de Santa Barbara, en Californie, a atteint le régime quantique en amenant un microrésonateur piézoélectrique de fréquence très élevée (6 gigahertz) à une température de 25 millikelvins. Une température certes très froide, mais accessible par des moyens cryogéniques standards – en l'occurrence, le résonateur était placé dans un cryostat [3]. Dans un tel système, qui n'est pas optomécanique, le résonateur est couplé, grâce à l'effet piézoélectrique, à un circuit électrique spécial appelé « qubit supraconducteur ». Or, les chercheurs ont observé l'échange d'un quantum unique d'énergie entre les deux systèmes : la preuve indubitable que le résonateur se comportait de façon quantique.

Ce très beau résultat n'efface toutefois pas les limites du système utilisé. En effet, le type de refroidissement mis en œuvre, entièrement passif, n'est envisageable que pour des résonateurs de fréquence extrêmement élevée. De plus, le couplage entre le résonateur et le qubit supraconducteur n'est possible que si la fréquence de résonance du qubit supraconducteur est parfaitement accordée avec celle de l'oscillateur. Or, il est très délicat d'obtenir deux systèmes dont les fréquences de résonance s'accordent parfaitement. Ces deux contraintes limitent donc considérablement le champ d'investigation expérimental.

Avec les systèmes optomécaniques, en revanche, on peut travailler avec une plus grande diversité de systèmes mécaniques. Pourquoi ? Parce que la lumière n'a pas besoin d'être résonnante avec l'oscillateur auquel on la couple. Au contraire, on tire parti du fait qu'elle a une fréquence prodigieusement plus élevée que celui-ci. Cette fréquence élevée en fait un système naturellement quantique : même à température ambiante, les fluctuations thermiques du champ lumineux sont négligeables devant ses fluctuations quantiques, dont l'énergie caractéristique est donnée par le quantum de lumière, le photon. En couplant le



Cette structure en forme de tore est un système optomécanique en verre de 30 micromètres de diamètre, mis au point à l'École polytechnique fédérale de Lausanne. Le laser circule dans le tore, affectant les vibrations radiales de la paroi du tore. En 2012, les expérimentateurs ont obtenu que la lumière et le résonateur établissent un couplage au niveau quantique. © EPFL 2012

système mécanique à la lumière, on peut alors convertir un à un les phonons thermiques en photons. Et l'on peut même en débarrasser complètement l'oscillateur, si ce processus est plus rapide que l'apport de phonons thermiques depuis le monde extérieur.

Couplage quantique. L'utilisation de la lumière est donc censée permettre deux choses. D'une part, refroidir le système pour le rapprocher de son état quantique fondamental (lire « L'état quantique fondamental », ci-dessous). D'autre part, transférer au résonateur mécanique la nature intrinsèquement quantique de la lumière.

Très récemment, c'est précisément ce à quoi sont parvenues quelques équipes. D'abord, en 2011, deux équipes américaines ont réussi à refroidir leur système optomécanique pour lui faire approcher de très près l'état fondamental en combinant cryogénie conventionnelle et refroidissement optomécanique. Il s'agissait du groupe de Ray Simmonds et Konrad Lehnert, à l'université du Colorado, à l'aide d'un système utilisant

la pression de radiation d'un champ micro-onde [4] ; et du groupe d'Oskar Painter, à Caltech, avec un système utilisant la lumière laser [5].

Puis, début 2012, l'équipe de Tobias Kippenberg, de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, en Suisse, a franchi un pas supplémentaire : dans le système optomécanique utilisé, la lumière et le système mécanique ont pour la première fois échangé entre eux des quanta d'énergie plus rapidement qu'ils ne le font avec leurs environnements respectifs [6]. C'est le signe qu'un couplage au niveau quantique est établi entre les deux systèmes.

Il s'agit là d'un résultat important car, à ce stade, il devient possible de contrôler le mouvement quantique de ces objets. Autrement dit, on peut par exemple envisager de former des états quantiques étranges tels que des superpositions où le résonateur se trouve dans plusieurs positions à la fois. Soit précisément le type d'expérience qui nous permettra de tester si les lois de la mécanique quantique s'appliquent toujours telles quelles à l'échelle macroscopique.

L'état quantique fondamental

Contrairement à l'image que l'on se fait classiquement d'un oscillateur (par exemple le balancier d'une pendule), même à température rigoureusement nulle, un oscillateur mécanique n'est pas parfaitement immobile à sa position d'équilibre. Il possède des fluctuations minimales – ou fluctuations de point zéro. Ces fluctuations sont la conséquence d'un des principes fondamentaux de la mécanique quantique : le principe d'incertitude de Heisenberg. D'après lui, un objet ne possède pas simultanément une position et une vitesse précises. On dit d'un oscillateur dont les fluctuations de position se limitent à ces fluctuations de point zéro qu'il est dans son « état quantique fondamental ».

C'est là notre objectif pour les décennies à venir : traquer d'éventuelles déviations par rapport aux lois de la physique quantique. En particulier, faute d'expériences permettant de tester simultanément gravitation et mécanique quantique, il existe toujours de grandes incertitudes sur le formalisme à adopter pour unifier ces deux théories. Certaines théories prévoient par exemple qu'aux échelles où la gravité commence à jouer un rôle, l'un des principes clés de la physique quantique, l'inégalité de Heisenberg, selon laquelle il est impossible de définir à la fois la position et la vitesse d'un objet de façon parfaitement déterminées, serait modifiée.

Est-ce vrai ou pas ? Pour le savoir, l'équipe de Markus Aspelmeyer, à Vienne, développe d'ores et déjà une méthode recourant à un système optomécanique. D'autres équipes privilégient des approches hybrides. Par exemple, Oriol Romero-Isart, à Garching, en Allemagne, propose d'utiliser la lumière laser pour faire léviter une petite bille de verre. Il s'agira ensuite d'étudier comment, ainsi isolée de son environnement, ses mouvements peuvent présenter un comportement ondulatoire. À l'heure actuelle, il est difficile de prédire laquelle de ces approches a le plus de chances d'être fructueuse, puisqu'on ignore quels sont les paramètres physiques à atteindre pour que les premiers phénomènes de « gravitation quantique » apparaissent. Mais la diversité même de ces expériences est la meilleure façon de mettre au jour les premières preuves de l'existence d'une nouvelle physique, à la croisée de deux théories incontournables, mais toujours inconciliables. ■

[1] P.-F. Cohadon *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 83, 3174, 1999.

[2] O. Arcizet *et al.*, *Nature*, 444, 71, 2006 ; S. Gigan *et al.*, *Nature*, 444, 67, 2006 ; A. Schliesser *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 97, 243905, 2006.

[3] A. D. O'Connell *et al.*, *Nature*, 464, 697, 2010.

[4] J. D. Teufel *et al.*, *Nature*, 475, 359, 2011.

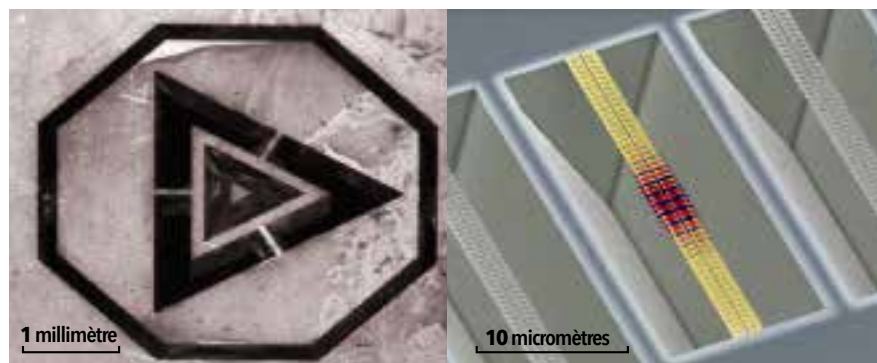
[5] J. Chan *et al.*, *Nature*, 478, 89, 2011.

[6] E. Verhagen *et al.*, *Nature*, 482, 63, 2012.

Pour en savoir plus

► La lumière quantique, *Les Dossiers de La Recherche*, n° 38, février 2010.

► Le monde quantique, *Les Dossiers de La Recherche*, n° 29, novembre 2007.



Les résonateurs optomécaniques utilisés en laboratoire sont de forme et de taille diverses, souvent micrométriques, parfois nanométriques. Leurs déplacements sont dus à des modes de vibration internes. Celui de gauche a été mis au point au laboratoire Kastler-Brossel, celui de droite, à Caltech. © LAB. KASTLER-BROSSEL/UNIV. P.-ET-M.-CURIE – OSKAR PAINTER/CALTECH KAVLI NANOSCIENCE INST.