

Vers le quantique macroscopique

Nos sens nous donneront-ils un jour directement accès à l'étrange monde quantique ? *A priori* non, car un simple échange d'information le fait disparaître, mais ce n'est plus un problème d'échelle. On crée en effet des phénomènes quantiques de plus en plus macroscopiques...

Alexei OURJOUNTSEV travaille au Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'optique, à Orsay.

Au fil des siècles, les scientifiques ont creusé l'écart entre ce que l'on sait et ce que l'on perçoit par nos sens, entre notre compréhension du monde s'étendant de l'infiniment petit à l'infiniment grand, et ce que nous révèlent nos yeux, nos oreilles, ... La Terre qui nous semble plate et immobile apparaît courbée sur des distances comparables à son rayon et ses déplacements deviennent perceptibles à l'échelle du Système solaire. Des effets relativistes se manifestent lorsqu'on s'approche de la vitesse de la lumière. La plupart des grands modèles physiques ont ainsi une échelle caractéristique qui sépare deux univers, l'un qui nous est familier, l'autre qui obéit à des lois parfois contraires à nos intuitions.

L'ESSENTIEL

➤ Traditionnellement, la physique quantique est considérée comme une description du monde microscopique.

➤ Cependant, on crée des objets quantiques de plus en plus gros : ondes électromagnétiques ayant deux phases à la fois, molécules susceptibles d'interférer, pastilles à la fois vibrantes et non vibrantes...

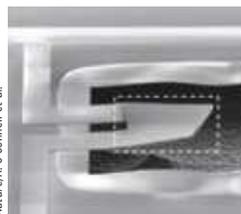
➤ Il n'y aurait donc pas d'échelle caractéristique du monde quantique : tant qu'aucune perte d'information vers l'extérieur ne se produit, ses propriétés perdurent.

L'étrange monde quantique

Dans le monde macroscopique qui nous entoure, les objets ont des états mutuellement exclusifs : à un instant donné, un objet est là ou il n'est pas là, il a un état et un seul. Au début du XX^e siècle, il a pourtant fallu admettre qu'il en va autrement à l'échelle microscopique, celle des atomes et des photons, régis par les lois de la physique quantique. Les expériences sur le rayonnement du corps noir, l'effet photoélectrique ou la déviation d'un faisceau d'atomes par un aimant ont montré que ces objets se comportent à la fois comme des particules et des ondes, qu'ils peuvent avoir plusieurs états en même temps et que les mesures, aussi parfaites soient-elles, perturbent leur comportement (voir *La découverte du monde quantique*, par M. Tegmark et J.A. Wheeler, page 12).

En 1935, Erwin Schrödinger a illustré cette dichotomie entre mondes microscopique et macroscopique à travers une expérience de pensée devenue emblématique. Il a imaginé un chat placé dans une

ET SI ROGER FEDERER pouvait se trouver à plusieurs endroits du terrain en même temps ? Ce type de superposition, courant dans le monde quantique, n'est malheureusement pas encore à la portée des joueurs de tennis, mais on l'a déjà recréé avec une pastille de dimension micro-métrique (ci-dessous, dans le rectangle blanc) : celle-ci a été placée dans plusieurs états à la fois.



Nature/A. O'Connell et al.

Schutterstock/Marco.Sc



boîte fermée contenant un flacon de poison, dont l'ouverture est activée par la désintégration d'un atome radioactif. Or, tant qu'il n'est pas observé, l'atome se trouve dans une superposition quantique d'états : il est à la fois désintégré et intact. En toute logique, le chat devrait donc être à la fois mort et vivant, ce qui n'a bien sûr jamais été observé, amenant certains physiciens à dessiner un avis de recherche humoristique : « Wanted : chat de Schrödinger. Mort et vif. » L'expression « chat de Schrödinger » est ensuite devenue la désignation usuelle de tous les objets considérés comme classiques (micro-onde produite par une antenne, faisceau lumineux d'un laser, molécule organique complexe, oscillateur d'une montre à quartz...) et préparés dans un état de superposition quantique.

Quel est l'objet le plus complexe qui puisse exister dans plusieurs états à la fois, et quels sont

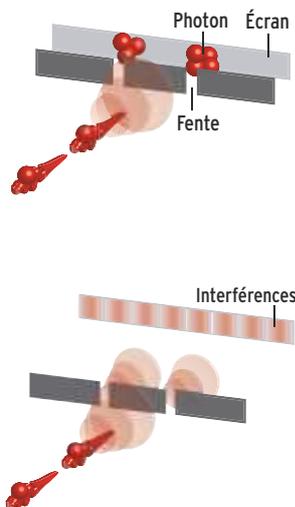
les différents mécanismes détruisant ces superpositions ? Comment peut-on les préparer et les observer ? Nous présenterons les multiples progrès récents effectués en la matière et ce que nous pouvons en déduire sur l'échelle à laquelle se produit la transition vers la physique classique, question qui agite les physiciens depuis les années 1930.

Les chats de Schrödinger, restés pendant des décennies des symboles abstraits de l'étrangeté quantique, suscitent depuis 20 ans un intérêt nouveau. Avec l'avènement du traitement quantique de l'information, on cherche en effet à exploiter les « bizarreries » quantiques à l'échelle des atomes et des photons pour résoudre rapidement certains problèmes mathématiques ou transmettre des clés de chiffrement de façon parfaitement sécurisée. Or, pour effectuer des tâches de plus en plus complexes, nous devons



UN PHOTON QUI INTERFÈRE AVEC LUI-MÊME

Des photons envoyés un par un sur un écran percé de deux fentes se comportent tantôt comme des particules, tantôt comme des ondes, selon la façon dont on les observe. Lorsqu'on place un détecteur immédiatement derrière les fentes, on voit le photon passer à droite ou à gauche, mais jamais par les deux chemins à la fois (*en haut*). Il se comporte alors comme un objet indivisible. En revanche, lorsque l'écran est loin des fentes, les photons forment progressivement une figure d'interférences, révélatrice de leur nature ondulatoire (*en bas*). L'onde associée à chaque photon est en effet diffractée par les fentes, qui créent deux nouvelles ondes susceptibles d'interférer; en ce sens, chaque photon passe par les deux fentes à la fois et interfère avec lui-même. Ces interférences créent des zones où la probabilité de présence du photon est nulle (*en blanc*) et d'autres où elle est maximale (*en rouge*).



manipuler des systèmes quantiques de plus en plus grands. La création de chats de Schrödinger d'une taille croissante est donc non seulement intéressante d'un point de vue fondamental, mais aussi nécessaire pour réaliser des ordinateurs quantiques performants.

La difficulté est que la superposition disparaît dès que le système échange avec son environnement suffisamment d'information pour déterminer son état. Ce phénomène est généralement nommé décohérence. Pour un chat de Schrödinger ayant deux états possibles, cette quantité d'information est égale à un bit : 0 = « chat vivant », 1 = « chat mort ». Plus le système est grand, plus ce bit d'information a de chances d'être accidentellement échangé, de sorte que la probabilité de garder le chat de Schrödinger intact chute exponentiellement avec sa taille.

L'optique constitue une voie privilégiée pour étudier la transition vers le monde macroscopique. La lumière « classique » est une onde électromagnétique caractérisée, comme toutes les ondes, par son amplitude et sa phase. Un « chat optique » est alors une superposition quantique de deux ondes : c'est par exemple un faisceau lumineux ayant une seule amplitude, mais deux phases à la fois, la même et son opposée, comme une vague dont les creux seraient en même temps des crêtes.

Une première façon de préparer de tels chats est explorée à l'École normale supérieure à Paris (voir *La frontière classique-quantique*, par M. Brune, page 38). Les physiciens créent tout d'abord une micro-onde dans une cavité formée de deux miroirs ultraréfléchissants se faisant face. Ils envoient ensuite à travers la cavité un atome fortement excité, où un électron oscille entre deux orbites, correspondant

à deux états notés $|a\rangle$ et $|b\rangle$, très éloignées du noyau. Un tel atome est très sensible aux champs électromagnétiques et interagit fortement avec l'onde. Celle-ci subit alors un déphasage, qui dépend de l'état de l'atome perturbateur : dans l'état $|a\rangle$, l'atome fait tourner le champ dans le sens des aiguilles d'une montre ; quand il est dans l'état $|b\rangle$, le champ tourne dans le sens opposé. En préparant les atomes dans une superposition de ces deux états, on déphase donc le champ dans les deux sens à la fois. On se retrouve ainsi exactement dans la situation envisagée par Schrödinger : l'état de l'atome est couplé, intriqué avec celui du champ – qui correspond à notre chat –, et une mesure effectuée sur l'un modifie instantanément l'état de l'autre.

Chats optiques en cage

Après plus de dix années de perfectionnement, cette méthode a récemment permis de construire des chats optiques (des ondes ayant deux phases à la fois) contenant jusqu'à une douzaine de photons, et de « filmer » leur décohérence vers un mélange statistique classique. Les expérimentateurs ont réussi à maintenir la superposition d'états pendant environ un soixantième de seconde. Ils ont aussi montré que la vitesse de décohérence est proportionnelle au nombre de photons qui forment le chat, c'est-à-dire à sa « taille » ; c'était attendu, car la décohérence étant principalement due à la perte de photons, il y a plus de risques d'en perdre quand ils sont plus nombreux.

Les « chats de Schrödinger » optiques peuvent être utilisés non seulement comme systèmes modèles pour étudier la décohérence, mais aussi comme ressources pour transporter et traiter de l'information quantique. Celle-ci est sous forme de bits quantiques ou qubits, portés par des objets susceptibles d'exister dans une superposition de deux états, $|0\rangle$ et $|1\rangle$. Bien que l'on utilise généralement des objets quantiques individuels, par exemple des photons polarisés, il est aussi intéressant de créer des qubits « collectifs », fondés sur deux états d'un objet plus complexe, par exemple les états $|\text{vivant}\rangle$ et $|\text{mort}\rangle$ d'un chat optique. Grâce à cette approche, on effectue certaines tâches plus efficacement et on élabore des tests de physique fondamentale. Plus généralement, elle combine les avantages des deux « boîtes à outils » de l'optique quantique : on peut en effet se focaliser tantôt sur le côté corpusculaire de la lumière – autorisant la création de dispositifs moins sensibles au bruit en raison de l'effet de seuil induit – et tantôt sur son côté ondulatoire – permettant l'utilisation de détecteurs techniquement plus simples.

Cependant, si les micro-ondes piégées en cavité peuvent servir de mémoire (voir *Mémoires quantiques : stocker l'insaisissable*, par J. Laurat, page 102), la transmission de l'information quantique requiert

des faisceaux de lumière en propagation libre. En outre, ces faisceaux doivent être dans les domaines visible ou proche infrarouge, ceci pour deux raisons. D'une part, les photons micro-ondes, de plus faible fréquence que les photons visibles, sont plus difficiles à détecter un par un (ils sont moins énergétiques, et nécessitent donc des détecteurs refroidis à quelques degrés au-dessus du zéro absolu pour ne pas se perdre dans le brouillage thermique). D'autre part, transmettre des micro-ondes sur de grandes distances sans fuite d'information vers l'environnement est délicat, car on doit utiliser des guides d'ondes métalliques encombrants, équivalents des fibres optiques, mais occasionnant beaucoup plus de pertes.

Deux problèmes techniques se posent alors. D'une part, la création d'une interaction efficace conduisant à un déphasage important nécessite que le photon soit échangé un grand nombre de fois entre l'atome et la cavité sans se perdre; or dans le cas micro-onde, cet échange peut se faire 10 000 fois, contre une petite dizaine au mieux dans le domaine visible. D'autre part, extraire le faisceau de la cavité entraîne de fortes pertes. En parallèle avec les efforts pour résoudre ces problèmes, des méthodes alternatives ont donc été développées, fondées non plus sur la physique atomique, mais sur l'optique non linéaire «classique».

Un pointeur laser vert contient un cristal non linéaire, qui double la fréquence d'un faisceau initialement infrarouge, le transformant ainsi en

lumière visible. Le même processus fonctionne en sens inverse et on l'utilise pour produire une paire de faisceaux infrarouges à partir d'un faisceau visible. Ces faisceaux sont intriqués, corrélés quantiquement comme l'atome et le chat de Schrödinger. Lorsqu'on effectue une mesure sur l'un d'eux, on impose l'état de l'autre, exactement comme détecter la désintégration de l'atome radioactif décide de la vie ou de la mort du chat. En manipulant ces faisceaux et en effectuant des mesures appropriées, on obtient alors des chats optiques en propagation libre (des impulsions infrarouges dans un état de superposition de phases).

Des chats en propagation libre

Un protocole de ce type a été développé à l'Institut d'optique, à Palaiseau, en collaboration avec l'Université nationale australienne de Canberra (voir l'encadré page 85). Il a pour l'instant permis de créer des chats contenant jusqu'à 2,6 photons en moyenne (un faisceau contient une superposition de différents nombres de photons, dont la valeur moyenne n'a aucune raison d'être entière), et on devrait atteindre quatre ou cinq photons dans les années qui viennent grâce au développement de nouvelles sources et détecteurs.

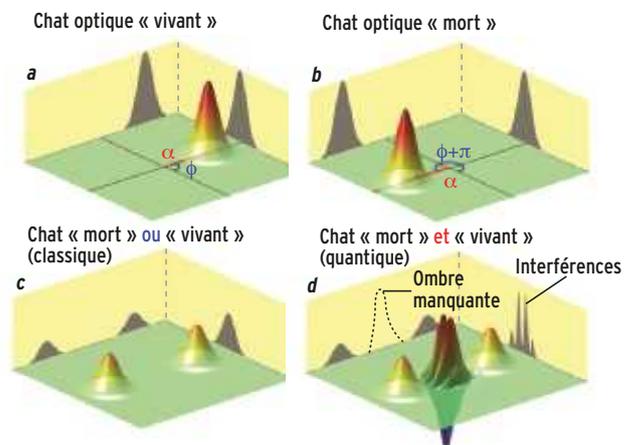
Le prix à payer dans cette approche est une probabilité de succès plutôt faible, qui de surcroît diminue lorsque la taille du chat augmente. La préparation du chat de 2,6 photons nécessite ainsi environ 130 000 essais: on en crée alors six par

À QUOI RESSEMBLE UN CHAT OPTIQUE ?

En optique, une onde est caractérisée par son amplitude et sa phase. L'état « vivant » d'un chat optique sera donc une onde avec une amplitude moyenne α , une phase moyenne ϕ , et des fluctuations quantiques autour de ces valeurs. On la caractérise par une fonction dite de Wigner: pour une onde « classique » (émise par une source comme une lampe ou un laser), cette fonction est représentée par une courbe en cloche dans l'espace des amplitudes et des phases et correspond à la probabilité de mesurer telle ou telle valeur (a). Le chat « mort », c'est-à-dire l'onde opposée, est décrit par la même courbe, mais déphasée (b). Et pour un mélange statistique classique, la fonction de Wigner présente les deux pics en même temps, chacun étant réduit de moitié (c): en faisant des mesures, on trouvera en moyenne une fois sur deux un chat vivant, et une fois sur deux un chat mort.

La situation se complique dans le cas de nos chats quantiques. Le principe d'incertitude de Heisenberg interdit de mesurer simultanément l'amplitude et la phase, de sorte qu'on ne peut établir directement la fonction de Wigner. En revanche, on peut mesurer les projections de cette fonction dans différentes directions et la reconstruire à partir de celles-ci (c'est le principe de la tomographie). En pratique, on mélange le signal à analyser à un signal de référence qui balaie l'espace des phases. Tout se passe comme si au lieu d'ouvrir la boîte contenant le chat, on utilisait des rayons X pour projeter son « ombre chinoise » sur un écran.

Et les ombres du chat quantique (constitué des deux ondes superposées) sont étonnantes: elles oscillent en raison d'interférences, quand elles ne disparaissent pas (d)! On doit alors admettre que la fonction de Wigner présente des zones négatives; en conséquence, elle devient difficile à interpréter physiquement, car de telles zones sont impossibles dans une distribution de probabilités classique. Ce sont ces oscillations et ces zones négatives qui révèlent le caractère quantique du chat, et qui disparaissent en premier lors de sa décohérence.



seconde avec un laser envoyant 800 000 impulsions par seconde. De nouvelles techniques, visant à fabriquer des chats optiques de façon déterministe, sont toujours en cours de développement.

Les interférences moléculaires

Les chats optiques restent des objets simples, constitués de photons identiques qui n'interagissent pas entre eux. Or le chat imaginé par Schrödinger est un système complexe, visible et palpable, formé de nombreuses particules en interaction. Peut-on créer des superpositions d'états d'objets massifs, et si c'est le cas, jusqu'à quel degré de complexité ?

Les objets matériels ont de nombreux degrés de liberté, certains assez faciles à manipuler au niveau quantique, d'autres moins. Ainsi, pour traiter de l'information *via* une superposition quantique des atomes, on utilise le plus souvent comme états leur spin ou leur polarisation. Mais on peut aussi créer des superpositions d'états en jouant sur une grandeur beaucoup plus intuitive, la position. Au lieu d'un chat mort et vivant, on crée alors un objet matériel qui se trouve à plusieurs endroits en même temps : un chat ici et là-bas !

Les particules massives constituant la matière ont, comme les photons, un caractère ondulatoire : à tout objet ayant une quantité de mouvement p est associée une longueur d'onde $\lambda = h/p$, où h est la constante de Planck. La diffraction d'électrons par un cristal, signe d'un comportement ondulatoire, a été observée dès 1927. Dans les années 1970, on a montré que des électrons uniques pouvaient interférer avec eux-mêmes et donc exister simultanément en plusieurs endroits, à l'instar des photons. Dès 1945, on avait observé des figures de diffraction avec des neutrons, 1 000 fois plus massifs.

Ce caractère ondulatoire a conduit au développement de la microscopie électronique et de l'analyse des matériaux par diffraction neutronique, fondées respectivement sur les interactions entre ces matériaux et les ondes électroniques et neutroniques : celles-ci sondent la matière à des échelles bien plus fines que la lumière, car elles ont des longueurs d'onde plus courtes. Quant aux interféromètres atomiques, développés depuis les années 1990, ils pourraient un jour se substituer aux gyromètres laser (des capteurs de mouvement exploitant les interférences entre des faisceaux laser) utilisés en navigation maritime ou aérienne.

Des travaux menés à Vienne depuis une douzaine d'années visent à repousser les limites des interféromètres à ondes de matière, en se servant non plus d'atomes, mais de molécules de plus en plus

complexes. Les interactions entre les atomes constituant ces molécules ne détruisent pas l'état quantique caractérisant le mouvement, car les vibrations internes par lesquelles elles se manifestent sont indépendantes du chemin emprunté par la molécule. Si ce n'était pas le cas, un tel degré de liberté « caché » (c'est-à-dire qu'on n'observe pas explicitement dans l'expérience) porterait une information sur le chemin du centre de masse et favoriserait donc la décohérence. D'une façon générale, lorsqu'on manipule un objet au niveau quantique, on s'intéresse à un degré de liberté (par exemple la position et la quantité de mouvement du centre de masse) décrit par une fonction d'onde, et lorsque ce degré n'est pas couplé aux autres, on peut l'étudier séparément et fabriquer des objets quantiques de plus en plus complexes.

En 1999, les physiciens ont observé des interférences de fullerènes C_{60} , formés de 60 atomes de carbone. Des expériences similaires ont été effectuées avec des porphyrines, des molécules organiques qui, associées à différents métaux, donnent la couleur rouge au sang et verte à la chlorophylle. Le record actuel est détenu par le $C_{60}F_{48}$, molécule de fullerène garnie de 48 atomes de fluor et pesant 1 632 fois plus qu'un atome d'hydrogène.

Interférences en cuisine ?

Puisque les molécules sont des ondes, pourquoi n'observe-t-on pas d'interférences quantiques en regardant, par exemple, la vapeur d'eau traverser les trous d'une passoire ? Après tout, une passoire ressemble aux plaques à fentes des interféromètres ! Tout d'abord, dans la vapeur, les molécules ont des positions et des vitesses différentes. Même si elles

créaient des franges d'interférences, ces franges bougeraient sans cesse et se brouilleraient. Ensuite, s'il existait de minces faisceaux de molécules aux caractéristiques identiques assimilables à des ondes moléculaires « monochromatiques », celles-ci ne seraient pas assez larges pour « éclairer » plusieurs trous de la passoire. Enfin, la longueur d'onde associée à des molécules d'eau en ébullition est d'à peine 50 picomètres (un picomètre mesure 10^{-12} mètre). Pour créer des franges observables à l'œil nu, par exemple espacées d'un millimètre, avec une passoire dont les trous sont espacés d'autant, il faudrait placer l'écran d'observation à 20 kilomètres. Or, à la pression atmosphérique, une molécule a une chance sur $10^{100\,000\,000\,000}$ de parcourir cette distance sans être déviée par une autre – et donc sans que son état quantique ne soit détruit...

Ce bref aperçu donne la mesure des difficultés rencontrées par l'équipe viennoise. À l'heure



UN CHAT DE SCHRÖDINGER est à la fois mort et vivant. On cherche ainsi à placer des objets du « monde classique » dans une superposition d'états.

actuelle, on ne dispose pas de « laser à molécules » créant un faisceau de molécules complexes parfaitement identiques. On produit alors celles-ci en chauffant un matériau à quelques centaines de degrés, puis on crée des ondes cohérentes de matière grâce à une série de fentes et de réseaux de diffraction (voir l'encadré page 86). En outre, on se place dans des conditions de quasi-vide, à une pression de 10^{-11} atmosphère, pour s'affranchir au maximum des chocs indésirables contre des molécules de gaz résiduel qui « liraient » le chemin emprunté et conduiraient à la décohérence.

Volatiles interférences

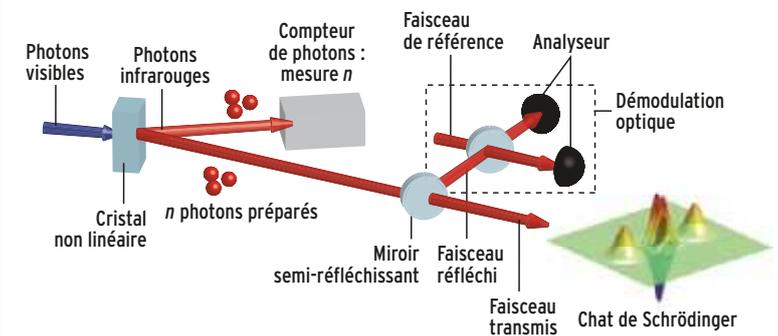
Par rapport aux photons des interféromètres optiques, les particules massives posent des problèmes supplémentaires. Tout d'abord, elles sont sensibles à la pesanteur. Les fentes des réseaux de diffraction doivent alors être parfaitement verticales, afin que même lorsque certaines molécules tombent plus bas que d'autres (parce qu'elles sont plus lentes), elles restent dans la même frange d'interférence ; une légère erreur brouille les franges. La force de Coriolis due à la rotation de la Terre, dépendante des vitesses des molécules, pose la même difficulté. En outre, les molécules sont polarisables et interagissent avec les bords des fentes qu'elles traversent, ce qui influe sur les franges d'interférence. Enfin, les faibles vitesses des molécules comparées à celles des photons (de l'ordre de 100 mètres par seconde contre 300 000 kilomètres par seconde) rendent l'expérience sensible aux vibrations mécaniques.

Outre leur environnement, les « chats » moléculaires sont affectés par leur propre température. Les molécules utilisées sont chaudes : elles vibrent, tournent et se tordent. Peu à peu, cette chaleur est évacuée sous forme de rayonnement thermique. Or les interférences disparaissent dès qu'un des photons de ce rayonnement atteint une certaine énergie : en effet, plus l'énergie du photon est grande, plus sa longueur d'onde est petite et, selon le principe d'incertitude d'Heisenberg, plus la précision sur sa position est grande ; on pourrait alors localiser sa molécule source avec une précision suffisante pour dire par quel chemin elle est passée. Ainsi, lorsqu'un faisceau laser chauffait les molécules, le contraste des franges d'interférence diminuait.

Ce phénomène dépend non seulement de la taille de la molécule (plus elle est grande, plus elle contient d'énergie vibratoire et risque d'émettre un photon), mais aussi de la séparation spatiale entre les chemins possibles (plus elle est importante, moins on a besoin de précision sur la trajectoire du photon émis pour trouver le chemin emprunté). À l'échelle macroscopique, ce brouillage thermique impose de placer les objets à des températures glaciales pour que leur état quantique ne soit pas

IL COURT, IL COURT, LE CHAT DE SCHRÖDINGER !

Un « chat optique » en propagation libre est créé par le protocole suivant. Dans un cristal non linéaire, un certain nombre de photons visibles « se cassent » en paires de photons infrarouges. En comptant les photons dans un des deux faisceaux produits, on détermine le nombre exact de photons n disponibles dans l'autre faisceau. Celui-ci est envoyé sur un miroir semi-réfléchissant, et le faisceau réfléchi (qui est intriqué avec le faisceau transmis) subit un traitement particulier : il est mélangé avec un faisceau de référence de même fréquence moyenne dans un second miroir semi-réfléchissant, dont les faisceaux transmis et réfléchis sont analysés. On effectue ainsi une « démodulation optique », destinée à mesurer les fluctuations quantiques de l'onde. On montre que lorsque la fréquence et l'amplitude de celle-ci sont égales aux valeurs moyennes (la fluctuation quantique est nulle), le faisceau transmis par le premier miroir est dans un état « chat de Schrödinger » : l'onde a deux phases à la fois. La taille du chat est déterminée par le nombre initial de photons n ; en pratique, elle est encore un peu trop faible pour que l'onde correspondante soit visible à l'œil nu.



détruit : pour être mort et vivant, un chat doit donc avant tout être congelé.

Premier chat macroscopique

Pour passer à l'échelle supérieure, on manipule non plus les trajectoires de molécules libres, mais les oscillations mécaniques d'objets solides, comme les cristaux de quartz utilisés dans les montres. Ces systèmes oscillent de différentes façons (haut-bas, droite-gauche, compression-dilatation...) ; on parle de modes propres, chaque mode ayant une fréquence particulière. Un mode de fréquence ν possède une énergie quantifiée et peut être décrit comme une somme de particules virtuelles nommées phonons, d'énergie $h\nu$ (où h est la constante de Planck), de la même façon qu'une onde lumineuse peut être décrite comme une somme de photons.

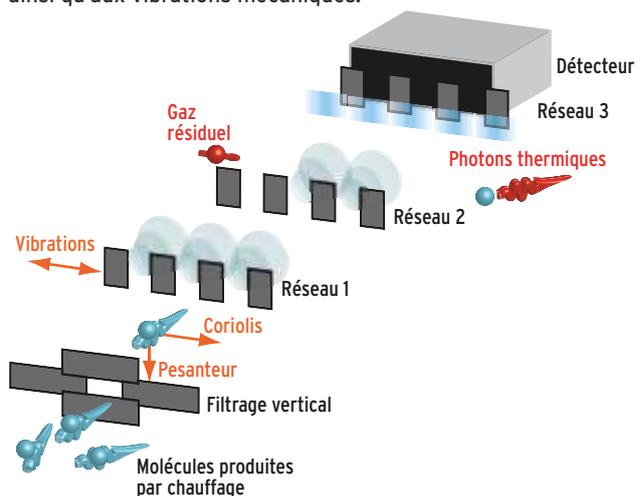
Dans les oscillateurs, tant mécaniques qu'optiques, le rôle perturbateur de la température est aussi particulièrement sensible. Un système « chaud » contient un nombre aléatoire de phonons, qui rendent son état incertain et risquent d'être transmis à l'environnement sous forme de photons de même fréquence ; à l'inverse, un environnement chaud fait apparaître des excitations thermiques dans le système de façon incontrôlée. Manipuler un objet au niveau quantique requiert donc de l'isoler de l'environnement et d'évacuer toute l'énergie thermique susceptible de perturber son état. Plus précisément, l'énergie

DES MOLÉCULES MASSIVES QUI INTERFÈRENT

Les expériences d'interférence, effectuées à l'origine avec des photons et des électrons, atteignent aujourd'hui l'échelle moléculaire. Les molécules, produites par chauffage, ont au départ une faible cohérence spatiale et spectrale : leurs positions et leurs vitesses sont aléatoires. Un filtrage vertical sélectionne une classe de vitesses donnée sous l'effet de la pesanteur (les molécules sont plus ou moins déviées vers le bas selon leur vitesse). Ensuite, un premier réseau de diffraction prépare un faisceau spatialement cohérent, c'est-à-dire dans lequel l'onde associée à une molécule « éclaire » plusieurs fentes du deuxième réseau à la fois. Ce deuxième réseau, identique au premier, en est éloigné d'une distance dépendant de l'écartement des fentes et de la longueur d'onde moléculaire, elle-même fonction de la masse et de la vitesse des molécules ; dans nos expériences, l'écartement des fentes est d'environ un micromètre et celui des deux réseaux varie entre 20 et 40 centimètres selon les molécules utilisées. Le deuxième réseau crée des franges d'interférences, signature du fait que chaque molécule se comporte comme une onde et passe par plusieurs fentes à la fois. On observe ces franges grâce à un détecteur ionisant (qui mesure le flux global de molécules) placé derrière un réseau mobile (dont la position des fentes permet de déduire celle des molécules incidentes sur le détecteur).

Les plus grosses molécules qui ont interféré pèsent 1632 fois plus qu'un atome d'hydrogène. La difficulté est de lutter contre la perte de cohérence quantique. Celle-ci est due aux collisions

avec des molécules de gaz résiduel et à la température des molécules utilisées, qui se traduit par l'émission de photons thermiques. Dans un cas comme dans l'autre, la cohérence quantique disparaît lorsque la molécule a échangé avec l'environnement suffisamment d'information pour déterminer le chemin qu'elle a emprunté. Par ailleurs, le caractère massif des ondes moléculaires rend ces expériences très sensibles aux forces inertielles (pesanteur, force de Coriolis liée à la rotation terrestre) ainsi qu'aux vibrations mécaniques.



thermique $k_B T$, proportionnelle à la température T par l'intermédiaire de la constante de Boltzmann k_B , doit être très inférieure à l'énergie d'un phonon (ou d'un photon) $h\nu$.

Les vibrations du chat

La course à la taille devient alors une course au froid. Dans le domaine visible, la fréquence est de l'ordre de 10^{14} hertz et l'énergie $h\nu$ des photons est suffisante pour préparer des « chats » à température ambiante. Pour les photons micro-onde (de fréquence inférieure), elle est beaucoup plus faible et nécessite d'abaisser la température en travaillant dans un cryostat. Des techniques de refroidissement encore plus sophistiquées utilisant des lasers permettent de manipuler les vibrations d'ions piégés entre des électrodes. Et le premier chat « macroscopique » a finalement été obtenu fin 2009 : des physiciens de l'Université de Santa Barbara, en Californie, ont placé une petite pastille piézo-électrique (qui transforme une déformation mécanique en électricité) dans un état où elle vibrait et ne vibrait pas à la fois ! Cette pastille, de dimension micrométrique, se comprimait et se dilatait à une fréquence ν environ égale à six gigahertz, très élevée pour un système mécanique. Il « suffisait » donc de la refroidir à $-273,05$ degrés pour atteindre le régime quantique. L'équipe californienne a fait mieux, descendant jusqu'à $-273,125$ degrés et ne laissant que 0,07 phonon thermique dans le mode vibrationnel étudié.

Grâce à un circuit électrique, ils ont ensuite introduit dans le système, de façon contrôlée, des phonons dans un état de superposition : pour transmettre un phonon à la pastille, on soumet le circuit à un courant pendant un temps t ; lorsqu'on divise ce temps par deux, on transmet une superposition de zéro et de un phonon. La pastille est alors à la fois immobile et en vibration. Le temps de décohérence est toutefois encore très court, d'environ dix nanosecondes. En se comprimant et se dilatant, le matériau piézo-électrique crée un courant détectable qui joue le rôle de l'atome dans l'expérience de Schrödinger : il permet de déterminer l'état comprimé ou dilaté de l'oscillateur.

Même si ce chat contient beaucoup d'atomes (de l'ordre de 10^{13}), le déplacement entre les deux états de l'oscillateur n'est que d'environ 10^{-16} mètre, à comparer avec les molécules d'une centaine d'atomes délocalisées de 10^{-6} mètre dans les expériences de Vienne : les deux états superposés de la pastille ne sont donc pas « plus distincts » que ceux de ces expériences.

Nous avons parlé en introduction de l'échelle caractéristique de la physique quantique : en fait, il n'y aurait pas vraiment de taille maximale, la seule condition pour observer des états quantiques étant l'absence de perte d'information vers l'extérieur. Dès lors, la course aux objets de plus en plus gros préparés dans des états de plus en plus distincts est loin d'être terminée. ■

articles

- A. O'CONNELL, *Quantum ground state and single-phonon control of a mechanical resonator*, in *Nature*, vol. 464, pp. 697-703, 2010.
- P. BALL, *Physics: Quantum all the way*, in *Nature*, vol. 453, pp. 22-25, 2008.

internet

- http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_decoherence.