



www.cnrs.fr

Domaine de recherche de Serge Haroche

> Atome et lumière : quand les expériences de pensée deviennent réelles

Décrire l'interaction des atomes avec le rayonnement, c'est s'intéresser, au niveau le plus fondamental, au monde de nos perceptions. Ce monde est fait d'atomes qui émettent, absorbent et diffusent la lumière, véhicule essentiel de l'information que nous recevons de notre environnement proche ou lointain. La compréhension profonde de l'interaction atome-lumière nous est venue de la théorie quantique qui a dévoilé, au début du siècle dernier, les lois étranges auxquelles obéissent à l'échelle microscopique la matière et le rayonnement. Cette théorie nous a révélé un monde contre-intuitif dans lequel les notions d'ondes et de particules se mêlent intimement. La lumière apparaît à la fois comme une onde continue et comme un ensemble de photons discrets. Quant aux atomes, ils se manifestent soit comme des particules localisées, soit comme des ondes de matière. Cette physique « étrange » se fonde sur un principe fondamental de superposition : un système microscopique peut en général exister à la fois dans plusieurs états possibles, pour ainsi dire suspendu entre différentes réalités classiques.

Dans les discussions qui ont conduit à l'élaboration de la théorie, ses fondateurs avaient pris l'habitude d'imaginer des *expériences de pensée* : ils manipulaient virtuellement des atomes et des photons isolés de leur environnement pour créer des situations illustrant directement les concepts quantiques. Au cours des vingt dernières années, ces expériences, longtemps rêvées, se sont enfin réalisées. Jongler avec des atomes et des photons et les faire interagir de manière contrôlée est devenu un champ très actif de recherche expérimentale en optique quantique. Serge Haroche a joué un rôle pionnier dans ce domaine de recherche. En parvenant à isoler un atome du monde extérieur dans une cavité aux parois presque idéalement réfléchissantes, il l'a forcé à interagir avec un champ élémentaire constitué au plus de quelques photons et a ainsi observé l'interaction atome-lumière sous son jour le plus fondamental. Les cavités électromagnétiques que son équipe utilise à l'École normale supérieure (Laboratoire LKB / ENS / UPMC / CNRS) pour piéger la lumière peuvent être considérées comme des réalisations de la fameuse « boîte à photons » jadis rêvée par Bohr et Einstein.

> Le chat de Schrödinger, la décohérence et le problème de la mesure quantique

Dans une expérience cruciale, Serge Haroche et son équipe de l'ENS (qu'il dirige avec ses collègues Jean-Michel Raimond et Michel Brune) ont utilisé un atome pour contrôler l'état d'un champ micro-onde contenant quelques photons. Suivant que l'atome se trouve dans l'un ou l'autre de deux états d'énergies différentes, le champ piégé dans la cavité oscille avec une phase donnée ou la phase opposée. En d'autres termes, les crêtes de l'onde électromagnétique de l'un des états du champ coïncident avec les creux de l'autre et inversement. Dans un raffinement remarquable de cette expérience, l'équipe de l'ENS a pu, en portant l'atome dans une superposition de ses deux états d'énergie, préparer le champ dans un état où il oscille avec ces deux phases opposées *à la fois*, une situation impossible à comprendre d'un point de vue classique, mais parfaitement légitime selon la loi quantique. De tels états étranges s'appellent « chats de Schrödinger » en référence à une fameuse expérience de pensée dans laquelle ce physicien avait imaginé qu'un chat, emprisonné dans une boîte avec un atome radioactif, pouvait être placé dans la situation inconfortable d'être suspendu de façon quantique entre la vie et la mort.



www.cnrs.fr

Dans la vie réelle, les chats sont bien sûr morts ou vivants, une porte est ouverte ou fermée et n'est jamais bizarrement suspendue entre ces deux états. C'est que le phénomène de la *décohérence* a joué son rôle. Sous l'effet du couplage avec leur environnement, les objets macroscopiques constitués d'un très grand nombre de particules voient leurs superpositions d'états disparaître très rapidement. L'ambiguïté quantique s'évanouit pour laisser place au monde classique de notre expérience quotidienne. L'équipe de l'ENS a pu suivre en temps réel ce phénomène de perte de cohérence quantique en observant au cours du temps l'évolution d'un « chat de Schrödinger » de quelques photons. Elle a montré que le temps de décohérence est d'autant plus court que le nombre de photons contenus dans le champ est plus grand. Ceci explique pourquoi les systèmes formés d'un nombre gigantesque de particules apparaissent toujours comme classiques, puisqu'on n'a pas en pratique le temps d'observer leur trop fugace existence quantique. Cette expérience montre de façon spectaculaire comment le comportement classique du monde macroscopique qui nous entoure émerge du monde quantique sous-jacent.

Les expériences de « chats de Schrödinger » intéressent aussi les physiciens parce qu'elles illustrent de façon idéale un aspect essentiel du mécanisme de la *mesure*. Alors qu'en physique classique, cette notion – l'acquisition d'information sur un système physique par son observation – ne pose aucun problème conceptuel, il n'en va pas de même dans le monde quantique. L'appareil de mesure, en se couplant au système observé, le perturbe nécessairement de façon essentielle. Dans l'expérience du chat photonique, la phase du champ micro-onde peut être vue comme l'aiguille d'un appareil qui mesure l'énergie de l'atome en pointant dans une direction ou dans l'autre suivant la valeur de cette énergie. Si l'atome mesuré est dans une superposition d'états, la création du chat de Schrödinger micro-onde fait que l'aiguille de mesure pointe *à la fois* dans deux directions opposées. La décohérence est alors le processus qui force en quelque sorte l'appareil à « choisir » et la mesure à se faire. L'expérience du « chat » de l'équipe de l'ENS met en évidence le mécanisme de décohérence de l'aiguille de mesure qui n'avait jusqu'alors été analysé que théoriquement. Le fait qu'après la décohérence, le choix final de la direction dans laquelle pointe l'aiguille se fasse au hasard (dans le monde microscopique, « Dieu joue au dés » disait Einstein) reste cependant un aspect irréductible de la physique quantique, confirmé mais non expliqué par l'expérience de l'ENS.

> Une nouvelle façon de voir la lumière et un ancien paradoxe revisité

Serge Haroche et son équipe ont réalisé récemment une autre série de travaux qui ont révolutionné la façon de compter les photons. Alors que les compteurs utilisés jusqu'à présent (y compris notre œil) détruisent les photons qu'ils comptent, les chercheurs de l'ENS ont mis au point un procédé de détection « transparent » dans lequel les photons interagissent avec l'appareil de comptage sans être absorbés. Ici encore, l'expérience consiste à faire interagir le champ à mesurer, piégé dans une cavité, avec des atomes « sonde » traversant la cavité un à un et emportant avec eux, sans absorber l'énergie lumineuse, une empreinte de l'état du champ. L'information sur le nombre de photons est acquise progressivement, au fur et à mesure de la détection des atomes successifs, chacun apportant une contribution partielle à la détermination de l'état final du champ. Lorsque ultérieurement un photon disparaît, absorbé par les imperfections des miroirs de la cavité, l'énergie du champ subit une variation soudaine et discontinue, détectée par les atomes « sonde » qui la traversent. Ces sauts quantiques, processus fondamentaux de la dynamique quantique, n'avaient jamais été observés sur la lumière jusqu'à présent.



www.cnrs.fr

L'effet Zénon quantique est une autre manifestation spectaculaire de la théorie quantique que ces expériences ont récemment illustrée. Ce philosophe de l'Antiquité niait dans une argumentation paradoxale l'existence du mouvement d'une flèche puisque, disait-il, elle est « vue » immobile à chaque instant et qu'une succession d'immobilités ne peut résulter en un mouvement. Le raisonnement, basé sur une conception erronée du calcul infinitésimal, est manifestement faux en physique classique où le fait de voir un objet ne peut avoir aucun effet sur son mouvement. Il n'en est pas de même en physique quantique où l'observation influe sur l'objet mesuré. L'équipe de l'ENS a montré que l'évolution d'un champ que l'on cherche à injecter dans une cavité se trouve gelée si l'on compte à l'aide d'atomes « sonde » de façon répétée et non-destructive son nombre de photons. La physique quantique donne ainsi raison à Zénon, même si ce n'est pas pour la raison qu'il avait invoquée.

> Des cavités et des atomes exceptionnels

Simple et épurée dans leur principe, les expériences de l'ENS sont extraordinairement complexes sur le plan technique. Les cavités utilisées pour piéger les photons sont faites de miroirs supraconducteurs ultra-réfléchissants, les meilleurs miroirs réalisés à ce jour, qui font rebondir la lumière plus d'un milliard de fois avant qu'elle ne soit absorbée ou diffusée. Les photons parcourent ainsi environ quarante mille kilomètres -l'équivalent de la circonférence terrestre- entre les miroirs de la cavité, laissant amplement aux expérimentateurs le temps de les manipuler et de les observer de façon répétée.

Les atomes qui interagissent avec ces photons sont également très particuliers. Il s'agit d'atomes dans lesquels un électron a été porté sur une orbite circulaire très excitée et dont le rayon est plus de mille fois plus grand que la dimension d'un atome ordinaire dans son état fondamental. Ces systèmes atomiques géants, appelés atomes de Rydberg, ont été l'objet de nombreux travaux en physique atomique au cours des trente dernières années. Dans les années 1970, Serge Haroche a été un pionnier de ces études, démontrant dès cette époque l'extrême sensibilité de ces atomes aux micro-ondes et développant des méthodes expérimentales sophistiquées pour les préparer, les manipuler et les détecter.

> Électrodynamique en cavité et information quantique

Serge Haroche a également été le premier à avoir l'idée de coupler ces atomes de Rydberg à des cavités micro-ondes. Dans un environnement protégé des perturbations extérieures, il a réalisé, des conditions de couplage intense entre les atomes et le rayonnement dans lesquelles les effets quantiques se manifestent de façon spectaculaire. Dès la fin des années 1970, il a ainsi été l'un des initiateurs du domaine très actif de l'optique quantique que l'on appelle depuis l'Électrodynamique Quantique en Cavité (Cavity QED en anglais). Ce champ de recherche a connu depuis trente ans un développement considérable dans le monde entier. Les années 1980 ont vu la réalisation de micro-masers, lasers opérant dans le domaine micro-onde dans lesquels le milieu amplificateur n'est constitué que d'un seul atome. Aux expériences micro-ondes se sont ajoutées des études effectuées sur de la lumière visible avec des cavités optiques de dimensions sub-millimétriques couplées à des atomes dans leur état fondamental. Puis dans les années 1990, des travaux en physique des solides sur des systèmes tout intégrés ont été effectués. Ils incluaient des microcavités réalisées à l'aide d'empilements de couches semi-conductrices entre lesquelles des électrons piégés dans des boîtes quantiques font office d'atomes artificiels. Enfin, les années 2000 ont vu le développement de l'Électrodynamique quantique des circuits (circuit QED) : les cavités micro-ondes à



www.cnrs.fr

miroirs supraconducteurs ont dès lors été remplacées par des résonateurs faits de conducteurs parallèles et les atomes de Rydberg par des jonctions supraconductrices se comportant comme de véritables systèmes quantiques à deux niveaux.

Au delà de la réalisation d'expériences de pensée testant les fondements de la physique quantique, l'électrodynamique en cavité joue un rôle important dans le développement de l'information quantique, la science cherchant à exploiter la logique étrange du monde quantique pour le traitement de l'information. Alors que dans les ordinateurs et les circuits de communication usuels l'information est codée dans des signaux électriques ou lumineux sous forme de « bits » classiques prenant deux valeurs 0 et 1 exclusives l'une de l'autre, l'information quantique se propose d'utiliser des « bits quantiques » ou « qubits » portés par des systèmes quantiques pouvant exister dans une superposition des états 0 et 1. Le principe de superposition enrichit ainsi considérablement les possibilités du calcul et de la communication. Les théoriciens ont montré que des machines jonglant avec de tels qubits pourraient effectuer certains calculs beaucoup plus rapidement que les ordinateurs actuels, ou encore rendre inviolable le secret de la communication d'information qui repose jusqu'à présent sur des protocoles classiques de cryptographie dont la sûreté absolue n'est pas démontrée.

Ces promesses théoriques stimulent de nombreux travaux expérimentaux à la recherche du meilleur candidat au rôle de qubit : atomes ou ions piégés, boîtes quantiques, jonctions supraconductrices peuvent être préparés et manipulés de façon à réaliser des systèmes quantiques à deux états. L'information peut être transportée entre ces qubits par des photons se propageant dans l'espace ou dans des fibres optiques. La connexion entre qubits matériels et photons est efficacement réalisée en incluant les qubits dans des cavités optiques ou des résonateurs micro-ondes. On construit ainsi des dispositifs où les méthodes de l'électrodynamique en cavité sont exploitées pour la réalisation d'opérations élémentaires nécessaires au traitement de l'information : portes quantiques dans lesquelles un « qubit contrôle » détermine l'état d'un « qubit cible » suivant les règles de la logique quantique autorisant les superpositions d'états, mémoire quantique copiant l'information quantique d'un qubit sur un autre pour la stocker transitoirement avant de l'utiliser ultérieurement, etc. L'équipe de l'ENS a démontré que de telles opérations étaient possibles en utilisant des atomes de Rydberg comme qubits et en les couplant entre eux via leur interaction commune avec le champ d'une cavité micro-onde supraconductrice. Les atomes de Rydberg, difficiles à produire et très fragiles, ne seront sans doute pas les qubits des appareils de demain, mais les opérations dont ils ont démontré la faisabilité sont reprises dans des dispositifs compacts où les qubits sont des atomes artificiels (boîtes quantiques ou jonctions supraconductrices) dont le maniement semble plus prometteur pour des applications pratiques.

Si l'ordinateur quantique reste encore un objectif lointain et incertain, il est déjà des domaines de la technologie « classique » où les méthodes de l'électrodynamique en cavité sont utilisées avec succès. Il s'agit par exemple de la réalisation de nouveaux types de lasers miniature opérant dans des cavités verticales fabriquées par dépôts de couches atomiques à la surface de matériaux semi-conducteurs (lasers VCSEL). Différentes sources lumineuses délivrant à la demande des photons uniques ont également été mises au point récemment en exploitant les effets spécifiques de l'électrodynamique en cavité. Ces sources seront sans doute intégrées un jour dans des dispositifs de cryptographie quantique. Signalons enfin l'utilisation de cavités traversées par un faisceau laser comme détecteurs non-destructifs d'atomes



www.cnrs.fr

individuels. Ce nouveau procédé extrêmement sensible de diagnostic est à présent exploité pour compter des atomes ultra-froids dans plusieurs expériences de physique atomique.

> **Recherche fondamentale et appliquée sont indissociables**

Les recherches de Serge Haroche et de son équipe sont motivées par la curiosité pure, le besoin de comprendre de la façon la plus fondamentale possible les processus quantiques microscopiques de l'interaction matière-lumière. Pour rendre réelles les expériences de pensée illustrant ces processus, le groupe de l'ENS a dû dominer des méthodes expérimentales très complexes, au prix d'un effort continu et progressif rendu possible par un soutien récurrent en moyens matériels, et de la contribution du travail de générations d'étudiants en thèse et de post-docs exceptionnels. Ce type de recherche, qui doit nécessairement se poursuivre sur une longue période, n'est possible que dans de telles conditions. Appartenant au domaine de la recherche pure par excellence, ces travaux ne peuvent cependant se concevoir sans des allers et retours constants entre recherche fondamentale et appliquée. Ils ont été rendus possibles par les progrès immenses de la technologie au cours des vingt dernières années et, inversement, ils inspirent des avancées dans le développement de nombreux dispositifs nouveaux, présents ou à venir.