



La lettre du Collège de France

35 | décembre 2013
La Lettre n° 35

Serge Haroche, prix Nobel de physique 2012

Jean-Michel Raimond et Michel Brune



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/lettre-cdf/2382>

DOI : [10.4000/lettre-cdf.2382](https://doi.org/10.4000/lettre-cdf.2382)

ISSN : 2109-9219

Éditeur

Collège de France

Édition imprimée

Date de publication : 1 décembre 2013

Pagination : 16-17

ISSN : 1628-2329

Référence électronique

Jean-Michel Raimond et Michel Brune, « Serge Haroche, prix Nobel de physique 2012 », *La lettre du Collège de France* [En ligne], 35 | décembre 2013, mis en ligne le 01 octobre 2015, consulté le 17 août 2022. URL : <http://journals.openedition.org/lettre-cdf/2382> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/lettre-cdf.2382>

Ce document a été généré automatiquement le 17 août 2022.

Tous droits réservés

Serge Haroche, prix Nobel de physique 2012

Jean-Michel Raimond et Michel Brune



Quand les expériences de pensée deviennent réelles

- 1 **Le monde est fait d'atomes qui émettent, absorbent et diffusent la lumière, véhicule essentiel de l'information que nous recevons de notre environnement.**
- 2 La théorie quantique a dévoilé, au début du siècle dernier, les lois étranges auxquelles obéissent à l'échelle microscopique la matière et le rayonnement, dans un monde contre-intuitif où les notions d'onde et de particule se mêlent intimement. La lumière est à la fois une onde continue et un ensemble de photons discrets! Cette physique «

étrange » se fonde sur un principe de superposition. Un système microscopique peut en effet exister à la fois dans plusieurs états possibles, pour ainsi dire suspendu entre différentes réalités classiques.

- 3 Les fondateurs de la théorie quantique s'appuyaient, dans leurs célèbres discussions, sur des expériences de pensée, manipulant virtuellement atomes et photons. Ces expériences, longtemps rêvées, se réalisent enfin. Jongler avec des atomes et des photons, les faire interagir de manière contrôlée est désormais un champ florissant de recherche expérimentale. Serge Haroche en est un des pionniers. Il a forcé un atome à interagir avec quelques photons dans une « boîte à photons » jadis rêvée par Bohr et Einstein, aux parois presque idéalement réfléchissantes. Il a ainsi observé l'interaction atome-lumière sous son jour le plus fondamental. Serge Haroche et l'équipe de l'ENS (qu'il dirige actuellement avec les coauteurs de cet article) ont été parmi les initiateurs de l'électrodynamique quantique en cavité, qui a connu depuis trente ans un développement considérable.
- 4 Simples dans leur principe, les expériences de l'ENS sont techniquement complexes. Les cavités, résonantes dans le domaine des micro-ondes, sont faites de miroirs supraconducteurs se faisant face, les meilleurs miroirs réalisés à ce jour, sur lesquels la lumière rebondit plusieurs milliards de fois avant qu'elle ne soit absorbée ou diffusée. Les photons parcourent ainsi quarante mille kilomètres dans l'étroit espace (3 cm) entre les miroirs, laissant aux expérimentateurs 13 centièmes de seconde pour les manipuler et les observer. 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, dont le rayon (0.1 μ m) est 2500 fois plus grand que celui de l'atome dans son état fondamental. Ces « atomes de Rydberg » ont été l'objet de nombreux travaux au cours des trente dernières années. Serge Haroche a été un pionnier de ces études dans les années 1970, démontrant l'extrême sensibilité de ces atomes aux micro-ondes et développant des méthodes pour les préparer, les manipuler et les détecter.
- 5 Avec ces outils sans précédent, Serge Haroche et l'équipe de l'ENS ont, par exemple, récemment révolutionné la façon de compter les photons. Alors que les détecteurs usuels (y compris notre œil) détruisent les photons qu'ils comptent, ils ont mis au point un procédé de détection « transparent » dans lequel les photons interagissent avec l'appareil de comptage sans être absorbés. L'expérience consiste à faire interagir le champ, piégé dans la cavité, avec des atomes « sonde ». Ils traversent la cavité un à un et emportent 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 d'atomes successifs, chacun apportant une contribution partielle à la détermination de l'état du champ. Lorsque ultérieurement un photon disparaît, absorbé par les imperfections des miroirs, l'énergie du champ subit une variation soudaine et discontinue, détectée par les atomes. Ces sauts quantiques, processus quantiques fondamentaux, n'avaient jamais été observés sur la lumière avant cette expérience.
- 6 L'effet Zénon est une autre manifestation quantique spectaculaire illustrée par ces expériences. Ce philosophe grec niait, dans une argumentation paradoxale, l'existence du mouvement d'une flèche puisqu'elle est, disait-il, à chaque instant en un endroit et donc immobile. Une succession d'immobilités ne peut résulter en un mouvement. Ce sophisme est faux dans le monde macroscopique, bien sûr, mais il peut devenir vrai 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 la cavité se trouve gelée si l'on compte de façon répétée et non-destructive son nombre de photons. La physique quantique donne ainsi raison à Zénon, même si c'est pour une raison beaucoup plus subtile que celle qu'il avait invoquée !

- 7 Atomes et cavités se prêtent également à l'exploration de la frontière entre les mondes classique et quantique. Dans une expérience cruciale, Serge Haroche et ses collègues ont contrôlé l'état d'un champ contenant quelques photons avec un atome. Le champ se trouve dans une superposition quantique de deux états radicalement différents. C'est la phase de l'oscillation que l'atome contrôle en pratique, mais il est équivalent et plus simple de considérer qu'il contrôle l'amplitude. Après interaction avec l'atome, le champ est dans une superposition d'un état où il oscille fortement (grande amplitude) et d'un état où il n'oscille pas du tout (amplitude nulle). C'est une situation impossible dans le monde classique, mais légitime selon la loi quantique. De tels états s'appellent « chats de Schrödinger », en référence à une expérience de pensée où on imagine qu'un chat, emprisonné dans une boîte avec un atome radioactif, est placé dans la situation inconfortable d'être suspendu de façon quantique entre vie et mort.
- 8 Dans la vie réelle, les chats sont morts ou vivants ! C'est ici que la décohérence joue son rôle. Sous l'effet du couplage avec leur environnement, les objets macroscopiques voient leurs superpositions d'états disparaître très rapidement. L'ambiguïté quantique s'évanouit pour laisser place au monde classique de l'expérience quotidienne. L'équipe de l'ENS a pu suivre en temps réel ce phénomène en observant l'évolution d'un chat de Schrödinger fait de quelques photons. Elle a montré que le temps de décohérence est d'autant plus court que le nombre de photons est plus grand. Ceci explique que les systèmes macroscopiques, formés d'un nombre gigantesque de particules, apparaissent toujours comme classiques.
- 9 Au-delà de la réalisation d'expériences de pensée, 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. Dans les ordinateurs usuels, l'information est codée sous forme de « bits » classiques prenant deux valeurs 0 et 1 exclusives l'une de l'autre. L'information quantique utilise des « bits quantiques » ou « qubits » pouvant exister dans une superposition des états 0 et 1. Le principe de superposition enrichit considérablement les possibilités. Des machines jonglant avec de tels qubits pourraient effectuer certains calculs beaucoup plus rapidement que les ordinateurs actuels, ou rendre inviolable le secret de la communication d'information. L'équipe de l'ENS a pu réaliser très tôt des briques élémentaires de ces machines. Les atomes de Rydberg ne seront sans doute pas les qubits des appareils de demain, mais ils ont démontré la faisabilité d'opérations, maintenant reprises avec des systèmes plus intégrables comme « l'électrodynamique des circuits », qui utilise des résonateurs micro-onde faits de fils parallèles sur une « puce » et des jonctions supraconductrices à la place des atomes de Rydberg.
- 10 Les recherches de Serge Haroche viennent d'être couronnées par le prix Nobel 2012, partagé avec David J. Wineland du NIST (USA). Il y a une belle dualité entre ces deux aventures. L'équipe de l'ENS piège quelques grains élémentaires de lumière, des photons, et les manipule avec des grains élémentaires de matière, des atomes. Celle du NIST piège quelques grains de matière (des ions) et manipule leur état quantique avec des lasers, des faisceaux de photons. Ces deux équipes ont réalisé des avancées très

similaires, parfois simultanées. Ces travaux sont motivés par la curiosité pure. Rendre réelles les expériences de pensée exige des méthodes complexes et un effort continu qui n'ont été possibles dans les deux cas que parce que ces équipes ont bénéficié d'un soutien matériel stable, et de la contribution de générations d'étudiants et de post-docs exceptionnels. Appartenant au domaine de la recherche pure, ces travaux ne peuvent cependant se concevoir sans des allers et retours constants entre recherche fondamentale et appliquée. Ils reposent sur les progrès de la technologie et, inversement, ils inspireront le développement de dispositifs nouveaux.

Jean-Michel Raimond et Michel Brune travaillent aux côtés de Serge Haroche au laboratoire Kastler Brossel à l'École normale supérieure depuis 35 ans pour le premier, et 27 ans pour le second.

AUTEURS

JEAN-MICHEL RAIMOND

Professeur à l'UPMC, Membre honoraire de l'Institut Universitaire de France

MICHEL BRUNE

Directeur de recherches au CNRS