

Prix Nobel de Physique 2012

Claude Cohen-Tannoudji (cct@lkb.ens.fr)

Laboratoire Kastler Brossel, École normale supérieure, 24 rue Lhomond, 75231 Paris Cedex 05 et Collège de France.

Prix Nobel de Physique 1997

Le Prix Nobel de Physique 2012 a été décerné conjointement à Serge Haroche (Collège de France et École normale supérieure) et David Wineland (National Institute for Standards and Technology) pour des réalisations expérimentales spectaculaires, permettant de mesurer et manipuler des systèmes quantiques individuels (*"ground-breaking experimental methods that enable measuring and manipulation of individual quantum systems"*).

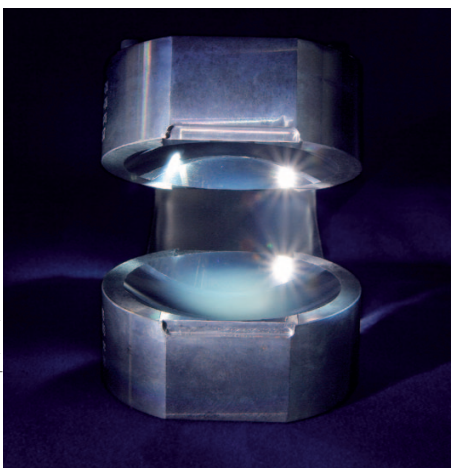
Au cours des dernières décennies, des progrès décisifs ont été réalisés dans nos capacités de contrôle et de manipulation des divers degrés de liberté des systèmes quantiques (électrons, ions, atomes, molécules). Il est possible maintenant de faire des observations sur un seul atome, un seul photon. Des expériences de pensée (*"gedankenexperiments"*) imaginées par les pères fondateurs de la physique quantique deviennent réalisables et permettent d'observer et d'étudier les comportements étranges prédits par la mécanique quantique, comme le fait qu'un système physique peut être dans certains cas à la fois dans un état et un autre et non pas dans un état ou dans un autre. Les expériences de David Wineland sur les ions piégés et celles de Serge Haroche sur l'électrodynamique quantique en cavité illustrent bien cette évolution spectaculaire de la physique atomique.

Wineland et son équipe au NIST (Boulder) étudient des chaînes d'ions dans un piège de Paul⁽¹⁾. Des faisceaux laser permettent de refroidir ces ions et de les porter à leur niveau fondamental de vibration dans le piège. Leur état interne peut être également contrôlé et détecté avec une très grande efficacité. Cette maîtrise des ions a permis de réaliser de nombreuses expériences spectaculaires : la mesure de la fréquence de l'une des transitions optiques d'un ion unique piégé, avec une précision relative de l'ordre de 10^{-17} , correspondant à des horloges atomiques gardant la seconde sur trois milliards d'années ; la préparation d'un ion unique dans une superposition de deux paquets d'ondes cohérents oscillant en opposition de phase dans le piège ; la réalisation de portes quantiques⁽²⁾ utilisant l'intrication entre les états internes des ions piégés *via* leur couplage aux modes collectifs de vibration.

Haroche et ses collaborateurs, en particulier Jean-Michel Raimond et Michel Brune, étudient un système radicalement différent au Laboratoire Kastler Brossel (ENS, CNRS, UMPC, Collège de France). Ils piègent, non pas des atomes, mais des photons micro-ondes dans une cavité supraconductrice. Ils piègent ces photons pendant des durées de l'ordre de quelques dixièmes de seconde, ce qui est une prouesse car, pendant ce temps, ces photons en liberté pourraient faire le tour de la terre. Cette expérience est en quelque sorte une réalisation de la boîte à photons imaginée par Einstein. Pour obtenir des informations sur les photons ainsi piégés, Haroche envoie dans la cavité des atomes préparés dans des états excités de nombre quantique principal très élevé, appelés atomes de Rydberg. L'extension spatiale de la fonction d'onde de ces atomes est très grande, ce qui leur confère un moment dipolaire électrique géant et, par suite, une très grande sensibilité au champ quantique à l'intérieur de la cavité. La perturbation qu'ils subissent, mesurée lorsqu'ils sortent de la cavité, renseigne sur les photons à l'origine de cette perturbation.

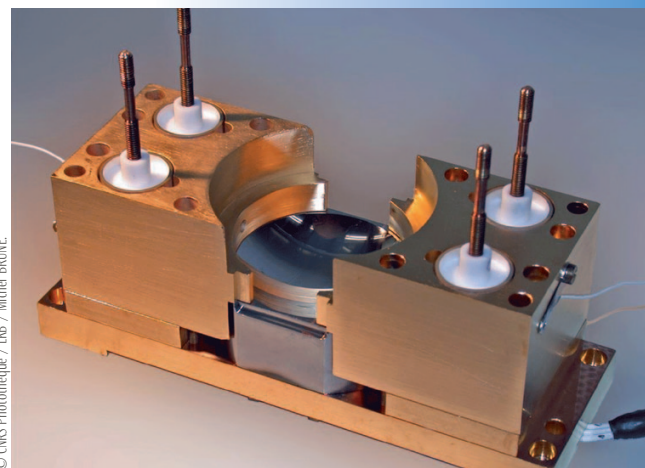
L'équipe d'Haroche a pu ainsi récemment détecter plusieurs fois de suite un photon unique piégé dans la cavité sans le détruire, comme c'est le cas habituellement pour des détecteurs photo-électriques qui détectent un photon en l'absorbant. Elle a pu aussi préparer des états quantiques surprenants, comme des superpositions d'états du champ oscillant avec des phases différentes. Comme l'ion du groupe de Wineland préparé dans une superposition de deux paquets d'ondes différents, l'étude du champ quantique préparé dans une superposition de deux états de phases différentes permet d'analyser le phénomène de décohérence transformant une superposition linéaire d'états en mélange statistique par couplage avec l'environnement.

© CNRS Photothèque / IBB / Michel BRUNE



Cavité résonante micro-onde (« boîte à photons »), dans laquelle l'équipe de Serge Haroche a enregistré la vie et la mort d'un photon unique. Les photons se réfléchissent entre deux miroirs supraconducteurs se faisant face. À droite : la boîte à moitié montée (seul le miroir inférieur est visible à l'image).

© CNRS Photothèque / IBB / Michel BRUNE




Tous ces résultats remarquables résultent d'un effort de recherche qui s'est poursuivi pendant de nombreuses années. Wineland a pu bénéficier au NIST d'un environnement exceptionnel qui lui a permis de constituer une équipe de chercheurs de haut niveau qui, depuis près de 40 ans, étudie les horloges atomiques de très grande précision et les dispositifs d'information quantique basés sur des ions piégés. Haroche a effectué sous ma direction une thèse de troisième cycle, puis une thèse d'État sur l'atome habillé par des photons, avant de faire un stage postdoctoral à Stanford dans le laboratoire d'Arthur Schawlow. Il est revenu ensuite au laboratoire Kastler Brossel pour démarrer en 1973 ses recherches sur les états de Rydberg et constituer avec Jean-Michel Raimond, puis Michel Brune, l'équipe dont les travaux sur l'électrodynamique quantique en cavité viennent de recevoir une reconnaissance internationale.

Le prix Nobel de cette année montre ainsi clairement que toute recherche fondamentale de qualité s'inscrit dans une perspective de long terme. Pour le laboratoire Kastler Brossel, le fait que ce prix soit le troisième décerné à l'un de ses membres depuis sa création en 1951 souligne l'importance de l'atmosphère que les deux fondateurs de ce laboratoire ont su créer autour d'eux. Par leur charisme, leur souci de rigueur, l'accent qu'ils ont toujours mis sur l'importance d'associer un enseignement de haut niveau à une recherche désintéressée, toujours motivée par le désir de comprendre et d'élargir ses connaissances, Alfred Kastler et Jean Brossel ont été des modèles pour des générations de jeunes chercheurs capables aujourd'hui de prendre le relais. ■

► Serge Haroche

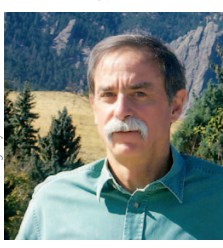
Serge Haroche est un physicien français, né en 1944 à Casablanca (Maroc). Il est actuellement directeur du groupe d'électrodynamique des systèmes simples au Laboratoire Kastler Brossel (ENS/UPMC/CNRS) à Paris.

 <small>© CNRS Photothèque / Christophe LEBLANCQ</small>	1963 – 1967	École normale supérieure (Paris).
	1971	Thèse d'État en physique (Paris).
	1975 – 2001	Professeur de physique à l'Université Pierre et Marie Curie.
	1983 – 1993	Professeur à temps partiel à l'Université de Yale (New Haven, USA).
	1982 – 2001	Professeur à l'ENS (Paris).
	1994 – 2000	Directeur du département de physique de l'ENS.
	Depuis 2001	Professeur au Collège de France

Serge Haroche, membre de l'Académie des sciences, a reçu de nombreux prix et distinctions, en particulier le Grand Prix de Physique Jean Ricard de la SFP en 1983.

► David Wineland

David Wineland est un physicien américain, né en 1944 à Milwaukee dans le Wisconsin (USA). Depuis 1979, il dirige le Ion Storage Group au National Institute of Standards and Technology (NIST) à Boulder (Colorado).

 <small>© NIST ou Bengt Wynman</small>	1961 – 1965	Université de Californie (Berkeley).
	1970	PhD en physique à l'Université Harvard (Cambridge, Massachusetts, USA).
	1970 – 1975	Chercheur associé à l'Université de Washington (Seattle).
	Depuis 1975	Physicien au NIST (Boulder, Colorado).
	1985 – 1993	Professeur à l'Université du Colorado.

Depuis 1992 Membre de la National Academy of Sciences (USA).

David Wineland est lauréat de plusieurs prix, dont la National Medal of Science (USA) pour les sciences de l'ingénieur en 2007.

(1) Pièges de Paul

Une particule chargée ne peut être piégée par un potentiel électrostatique à trois dimensions obéissant nécessairement à l'équation de Laplace $\Delta V = 0$. Par exemple, un potentiel quadripolaire $V(x,y,z) = A(x^2 + y^2 - 2z^2)$, où A est une constante positive, ne peut être piégeant le long des trois directions (s'il est piégeant le long des axes x et y , il est nécessairement expulsant le long de l'axe z). Un tel potentiel a une forme semblable à celle d'une selle de cheval. Cependant, comme l'a montré Wolfgang Paul, qui a reçu le Prix Nobel en 1989 pour ce travail, le fait de moduler le potentiel à une fréquence Ω , ce qui revient à remplacer A par $A \cos \Omega t$, permet d'obtenir pour certaines valeurs de A et Ω , un potentiel effectif piégeant le long des trois axes. La selle tourne suffisamment vite pour que la particule demeure au voisinage du centre du potentiel.

(2) Portes quantiques

L'unité d'information en informatique quantique est appelée *q-bit*. Elle correspond à deux états possibles d'un système quantique qui peuvent être linéairement superposés, ce qui est à l'origine des potentialités de l'informatique quantique. Les portes quantiques sont des dispositifs permettant d'agir sur ces q-bits, de les intriquer, de contrôler un q-bit « cible » au moyen d'un q-bit de « contrôle ». Les états électroniques et vibrationnels des ions piégés peuvent être utilisés comme des q-bits, et leur manipulation au moyen de faisceaux laser permet de réaliser des portes quantiques.