

Physique quantique

M. Serge HAROCHE, membre de l'Institut
(Académie des sciences), professeur

COURS DE L'ANNÉE 2011-2012

Le cours a été entièrement donné à l'étranger, à l'université nationale de Singapour, en février 2012, d'une part, et à l'université de Buenos Aires, en avril 2012, d'autre part.

Quantum information with real or artificial atoms and photons in cavities

Le cours donné en anglais à l'université nationale de Singapour (NUS) était intitulé « *Quantum information with real or artificial atoms and photons in cavities* ». Il a consisté en six leçons de deux heures chacune et faisait partie d'un enseignement « *Special topic on quantum information* » suivi par les étudiants de l'école doctorale associée au Center for quantum technologies (CQT) de la NUS. L'enseignement, suivi par une cinquantaine d'auditeurs, s'est largement inspiré des cours donnés dans le cadre de la chaire au Collège de France au cours des années 2009-2010 et 2010-2011. Le but du cours était de faire le point sur les méthodes récentes de manipulation et de contrôle des états non-classiques du champ électromagnétique en électrodynamique en cavité d'une part, et en électrodynamique des circuits d'autre part. Les systèmes à deux niveaux (qubits) et les oscillateurs harmoniques jouent un rôle essentiel en physique de l'information. Les qubits sont les porteurs de l'information et les oscillateurs sont des mémoires ou des transmetteurs (quantum bus) d'information entre les qubits. Le couplage des qubits avec les oscillateurs constitue le thème central de l'électrodynamique en cavité (CQED) et de l'électrodynamique des circuits (circuit QED). Dans la CQED micro-onde, les qubits sont des atomes de Rydberg et l'oscillateur est un mode du champ dans une cavité supraconductrice de très grand facteur de qualité alors qu'en circuit QED, des jonctions Josephson insérées dans des microcircuits jouent le rôle d'atomes artificiels couplés à un mode d'un résonateur radiofréquence. Les six leçons ont décrit différentes façons (i) de synthétiser des états non-classiques d'oscillateurs harmoniques en se servant de leur couplage avec des qubits, (ii) de reconstruire ces

états et (iii) de les protéger contre la décohérence. Des expériences démontrant ces procédures ont été décrites, avec des exemples tirés de CQED et de circuit QED. Ces leçons ont donné l'occasion de réviser les concepts de base de la mesure quantique et de présenter leurs liens avec la théorie classique de l'estimation des observables physiques. Les titres des six leçons ont été :

Première leçon (6 février 2012) : *Introduction to Cavity QED with Rydberg atoms interacting with microwave fields stored in a high Q superconducting resonator.*

Deuxième leçon (8 février 2012) : *Review of measurement theory illustrated by the description of quantum non-demolition (QND) photon counting in Cavity QED.*

Troisième leçon (10 février 2012) : *Estimation and reconstruction of quantum states in Cavity QED experiments; the cases of Fock and Schrödinger cat states.*

Quatrième leçon (13 février 2012) : *Quantum feedback experiments in Cavity QED preparing and protecting against decoherence non-classical states of a radiation field.*

Cinquième leçon (15 février 2012) : *An introduction to Circuit-QED describing Josephson junctions as qubits and radiofrequency resonators as quantum oscillators.*

Sixième leçon (17 février 2012) : *Description of Circuit-QED experiments synthesizing arbitrary states of a field oscillator.*

Chaque leçon était accompagnée d'une présentation par ordinateur consultable dès le jour du cours sur le site internet du CQT.

Le même cours a été redonné à l'université de Buenos Aires, toujours en anglais, les 9, 11, 13, 16, 18 et 20 avril 2012 devant un auditoire d'une trentaine de participants (professeurs, postdocs et étudiants en thèse).

CONFÉRENCES ET SÉMINAIRES

En dehors de ses cours à l'étranger donnés dans le cadre de son enseignement de chaire, S. Haroche a donné les séminaires, cours et conférences suivants entre juillet 2011 et juin 2012 :

Juillet 2011 : Conférence de clôture du congrès annuel de la Société française de physique, Bordeaux : « L'Électrodynamique quantique en cavité ».

Octobre 2011 : Conférence « Engineering and control of quantum systems (ECOQAS 11) », Dresde, Allemagne : « Real time quantum feedback in Cavity QED experiments ».

Octobre 2011 : Inauguration du centre « Integrated Quantum Science and Technology (IQST) », Ulm, Allemagne : « Real time quantum feedback experiments in cavity QED ».

Octobre 2011 : Cycle de conférences en Suède à l'invitation de l'AFSR (Association franco-suédoise pour la recherche) : Université de Stockholm et université Chalmers de Göteborg : « Quantum feedback control of non-classical microwave fields in Cavity Quantum Electrodynamics experiments » ; Université de Lund : « Juggling with atoms and photons in a cavity ».

Octobre 2011 : Workshop on the foundations of quantum theory, Stellenbosch, Afrique du Sud : « Non-destructive photon counting with atomic qubits : from progressive field state collapse to real time quantum feedback control of light ».

Octobre 2011 : Séance solennelle de rentrée de l'Institut de France, Paris : Lecture contribution de l'Académie des sciences : « Le virtuel en physique ».

Novembre 2011 : Exploratory Round Table Conference 2011 on Quantum Information Science, Shanghai, Chine : « Manipulation and control by quantum feedback of non-classical fields in Cavity Quantum Electrodynamics Experiments ».

Novembre 2011 : Colloquium à l'Université Heriot Watt d'Édimbourg, Grande-Bretagne : « Juggling with atoms and photons in a box ».

Novembre 2011 : *Plücker Lecture* à l'Université de Bonn, Allemagne : « Juggling with atoms and photons in a box to explore the quantum world ».

Novembre 2011 : Séminaire à l'université de Bonn, Allemagne : « Real time quantum feedback control of non-classical field states in a cavity ».

Février 2012 : Meeting of the Institute of Physics of Singapore : « Juggling with photons in a box to explore the quantum world ».

Février 2012 : Colloquium à Harvard, États-Unis : « Juggling with photons in a box to explore the quantum world ».

Mars 2012 : Symposium en l'honneur de Norman Ramsey, Harvard, États-Unis : « An atomic clock to tame light ».

Mars 2012 : Workshop on quantum mechanics, Bielefeld, Allemagne : « Quantum measurement theory illustrated by experiments performed with atoms and photons in cavities ».

Mai 2012 : 500th Heraeus Semina Highlights of quantum optics, Bad-Honnef, Allemagne : « Quantum feedback in Cavity QED experiment ».

Mai 2012 : Séminaire à la Traunkirchen Academy, Institut für Quantenoptik und Quanten Information, Autriche.

Mai 2012 : School of physics on Strong light-matter coupling, Singapore : 10 heures de cours sur l'électrodynamique quantique en cavité.

Mai 2012 : General lecture à l'université de Singapore (NUS) : « Timing and Taming light with an atomic clock ».

Juin 2012 : Exposé à la journée « Tout est quantique » du CNAM, Paris : « Le chat de Schrödinger et autres histoires quantiques ».

Juin 2012 : Symposium à la mémoire de Wolfgang Lange, Université du Sussex, Brighton, Grande Bretagne : « Advances in Microwave Cavity QED ».

INVITATION D'UN PROFESSEUR ÉTRANGER

Dans le cadre de la chaire de Physique quantique, Serge Haroche a invité le professeur Dieter Meschede, de l'Université de Bonn (Allemagne), qui a donné en juin 2012 une série de quatre conférences portant sur ses recherches en physique atomique et en optique quantique (voir résumé *infra*, p. 854-861).

Dans la première, il a décrit les méthodes qui lui permettent de manipuler des atomes isolés, de les déplacer à volonté le long de « tapis roulants » lumineux constitués par des faisceaux lasers et de les observer en temps réel. La deuxième leçon a décrit ces expériences dans une approche « traitement de l'information ». Les atomes et les photons sont en effet des « porteurs » d'information couplés entre eux par l'interaction matière-rayonnement. La détection de photons permet d'observer les sauts quantiques d'atomes uniques entre différents niveaux ou encore de contrôler l'état de l'atome en utilisant une procédure de rétroaction (*feedback*) à l'aide de lasers « repompeurs ». Ces expériences, dont l'analyse repose sur une procédure d'estimation bayésienne, présentent de grandes analogies avec celles

décrites en 2010-2011 dans le cours de la chaire de Physique quantique (« Rétroaction quantique ou *quantum feedback* en électrodynamique quantique en cavité).

La troisième leçon a porté sur la description de très belles expériences de « marche aléatoire quantique » récemment réalisées dans l'équipe de Dieter Meschede. Les atomes, avec leurs deux états internes, se comportent comme des pièces de monnaie présentant deux faces. Suivant que l'état est « pile » ou « face », l'atome peut être translaté par son interaction avec la lumière dans deux directions opposées, sautant soit vers la droite soit vers la gauche dans des puits de potentiel lumineux réalisés à l'aide de faisceaux lasers créant un réseau spatial de puits. Si l'atome est préparé dans une superposition quantique des états pile et face, il évolue à la fois dans les deux directions. En répétant de façon périodique ce « jeu quantique » de pile ou face et de translations commandées par le résultat du tirage, on force l'atome à suivre une trajectoire à multiples branches, suivant une dynamique quantique particulière très différente du mouvement brownien diffusif d'une particule classique. L'étude de ce phénomène et de l'influence de la dissipation sur la dynamique du système apporte des informations intéressantes sur la transition du quantique au classique.

La dernière leçon de Dieter Meschede a été l'occasion d'une vaste réflexion sur l'histoire du laser et de l'influence de sa découverte au cours des cinquante dernières années dans différents domaines de la technologie. L'ensemble de ces leçons a été suivi par un auditoire nombreux et très intéressé et a donné lieu à des discussions fructueuses et à des séminaires informels dans l'équipe de la chaire de physique quantique.

ACTIVITÉS DE RECHERCHE

Le travail de recherche de S. Haroche se déroule au sein du Laboratoire Kastler Brossel (LKB) de l'École normale supérieure. Il y co-dirige, avec ses collègues Jean-Michel Raimond (professeur à Paris VI) et Michel Brune (directeur de recherche au CNRS) une équipe de chercheurs et d'étudiants (groupe d'électrodynamique quantique en cavité). Depuis le début 2010, ce projet est soutenu par un contrat européen de l'ERC (projet DECLIC, acronyme pour « Decoherence of Light in Cavities ») et par un contrat de l'ANR.

Le thème général des recherches du groupe porte sur l'étude des effets quantiques (intrication, complémentarité et décohérence) et de leurs applications dans des systèmes constitués d'atomes en interaction avec des photons. Un rapport d'activité complet est rédigé tous les deux ans pour le comité national du CNRS et contient une analyse détaillée des problèmes scientifiques abordés par le groupe et un bilan des résultats nouveaux.

Expériences de rétroaction quantique

Les expériences de rétroaction quantique déjà évoquées dans les résumés de cours et d'activité des années précédentes ont été poursuivies. Il s'agit de combiner des mesures non-destructives du nombre de photons piégés dans une cavité avec une rétroaction sur le champ afin de préparer celui-ci dans un état à nombre de photons bien défini (état de Fock du rayonnement) et de le maintenir dans cet état en

corrigeant les effets des sauts quantiques qui tendent à ramener le champ dans le vide. Les mesures du champ sont réalisées à l'aide d'atomes de Rydberg non-résonnants, traversant la cavité un à un (mesures dispersives non destructives décrites dans les précédents résumés des cours et travaux de la chaire). Les signaux binaires que ces atomes produisent sont traités par un ordinateur pilotant l'expérience qui s'en sert pour estimer en temps réel l'état du champ dans la cavité, compare cet état à l'état Fock cible et calcule la réaction optimale à appliquer pour s'approcher au plus près de cet état cible. Les opérations sont poursuivies en boucle jusqu'à ce que la cible soit atteinte. Le maintien de la procédure permet ensuite de détecter les sauts quantiques du champ et d'en corriger les effets.

Deux variantes de l'expérience ont été mises en œuvre. Dans la première, décrite dans le résumé des cours et travaux de l'année 2010-2011, la rétroaction était assurée par des petites impulsions micro-ondes, générées par une source classique, dont l'amplitude et la phase étaient réglées par l'ordinateur. Cette version de l'expérience a permis de préparer et stabiliser avec une bonne fidélité des états de Fock contenant de un à quatre photons. Au cours de l'année 2011-2012, nous avons remplacé cette rétroaction « classique » par une procédure quantique consistant à corriger le champ dans la cavité à l'aide d'atomes résonnants émettant ou absorbant un photon dans la cavité. Dans cette version, les atomes jouent ainsi un double rôle. Lorsqu'ils sont non-résonnants, ils sondent de façon non-destructive l'état du champ. Lorsqu'ils sont résonnants, ils sont des sources quantiques émettant ou absorbant des photons. Un champ électrique, piloté par l'ordinateur de contrôle de l'expérience, est appliqué aux atomes pour les mettre ou non à résonance par effet Stark et décider ainsi en temps réel s'ils sont « sondes » ou « sources ». La procédure est réalisée en boucles répétées, consistant en l'envoi d'une douzaine de paquets d'atomes « sonde » suivis de quatre paquets que l'ordinateur décide d'utiliser au mieux, soit comme émetteurs, soit comme absorbeurs, soit comme sondes non-résonnantes.

La méthode a permis de préparer et de stabiliser les états de Fock contenant de un à sept photons. Elle s'est ainsi révélée plus efficace que la version utilisant des impulsions correctrices classiques. Les sauts quantiques du champ font en effet disparaître les photons un à un et une correction à l'aide d'une source quantique rétablissant en un seul coup le nombre de photons est mieux adaptée que celle qui essaye de ramener le nombre de photons à la valeur voulue par de multiples petites corrections classiques finement ajustées. Nous envisageons de poursuivre cette ligne de recherche en explorant des méthodes de rétroaction préparant et protégeant d'autres types d'états (états chats de Schrödinger). Ces expériences de contrôle et de correction d'états non-classiques du champ jouent un rôle important pour le traitement quantique de l'information.

Préparation des autres expériences du projet DECLIC

Les expériences du projet DECLIC nécessitent la mise au point d'un nouveau montage expérimental de type « fontaine atomique » dans lequel des atomes de Rydberg lents seront injectés verticalement dans une cavité de très grand facteur de qualité. Ces atomes interagiront ainsi beaucoup plus longtemps avec le champ, ce qui permettra d'explorer, avec une beaucoup plus grande résolution que ce n'est actuellement possible, le spectre de l'atome en interaction avec les photons. Cela conduira à de nouvelles expériences de manipulation beaucoup plus fines du champ

dans la cavité, en particulier à l'étude de l'effet Zénon-dynamique et de ses applications, dont la théorie a été décrite dans des résumés de cours et travaux antérieurs de la chaire. L'année 2011-2012 a été consacrée à la mise au point de ce montage « fontaine » dans un cryostat qui vient d'être livré (septembre 2012). Le montage optique nécessaire au refroidissement des atomes qui serviront de source à la fontaine a été réalisé et la mise au point de la procédure de préparation directe dans la cavité des atomes de Rydberg circulaires lents est en cours. Parallèlement, nous avons perfectionné la méthode de fabrication des miroirs supraconducteurs de nos cavités en utilisant un appareil qui nous a été donné par le CEA, permettant de déposer des couches fines de niobium sur des miroirs en cuivre machinés avec une très grande précision. Nous avons également construit un montage de jet d'atomes de Rydberg auxiliaire nous permettant de tester ces miroirs.

Une autre amélioration importante de notre montage cherche à rendre déterministe la préparation des atomes de Rydberg traversant la cavité. Jusqu'à présent, nous utilisons des échantillons d'atomes préparés par de faibles impulsions lasers, dans lesquels le nombre d'atomes de Rydberg fluctue autour d'une valeur moyenne comprise entre 0 et 1 suivant une statistique de loi de Poisson. Pour préparer exactement un atome dans chaque échantillon, nous avons proposé d'exploiter l'effet de « *Rydberg blockade* ». Dans un ensemble dense d'atomes, la préparation dans un état de Rydberg d'un atome empêche en effet l'excitation simultanée d'un autre atome dans un petit « rayon de blocage », en raison de la forte perturbation que deux atomes excités exercent l'un sur l'autre, qui conduit à un déplacement important de la fréquence de leurs raies optiques. Au cours de l'année 2011-2012, nous avons poursuivi la mise au point d'un montage de type « puce à atomes » cryogénique pour réaliser cet effet de blocage Rydberg. Un circuit microscopique supraconducteur réalise un piège magnétique pour atomes froids dans lequel nous chercherons à exciter un seul atome dans un état de Rydberg, avant d'envoyer cet atome lent dans notre cavité (le montage devant ultimement être combiné avec notre fontaine atomique). Les premières expériences d'excitation d'atomes de Rydberg ont été réalisées et les conditions optimales de blocage de l'excitation sont en cours d'étude.

L'année 2011-2012 a par ailleurs été consacrée à la rédaction d'articles sur l'effet Zénon quantique, la réalisation à l'aide d'atomes de Rydberg convenablement manipulés de réservoirs artificiels pour le champ dans une cavité et la mise en œuvre de méthodes performantes de reconstruction d'états non-classiques du champ.

PUBLICATIONS DU GROUPE D'ÉLECTRODYNAMIQUE QUANTIQUE EN CAVITÉ

Sayrin C., Dotsenko I., Zhou X.X., Peaudecerf B., Rybarczyk T., Gleyzes S., Rouchon P., Mirrahimi M., Amini H., Brune M., Raimond J.-M. et Haroche S. : « Real-time quantum feedback prepares and stabilizes photon number states », *Nature*, 477, 2011, 73 ; doi:10.1038/nature10376.

Zhou X.X., Dotsenko I., Peaudecerf B., Rybarczyk T., Sayrin C., Gleyzes S., Raimond J.-M., Brune M. et Haroche S. : « Field locked to a Fock state by quantum feedback with single photon corrections », *Phys. Rev. Lett.*, 108, 2012, 243602.

Sarlette A., Leghtas Z., Brune M., Raimond J.-M. et Rouchon P., « Stabilization of non-classical states of one- and two-mode radiation fields by reservoir engineering », *Phys. Rev. A.*, 86, 2012, 012114.

Raimond J.-M., Sayrin C., Gleyzes S., Dotsenko I., Brune M., Haroche S., Facchi P. et Pascazio S., « Quantum Zeno effect and quantum Zeno dynamics in Cavity Quantum Electrodynamics », *International Conference on Quantum Information*, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2011), 2011, paper QWC32011.

Raimond J.-M., Facchi P., Peaudecerf B., Pascazio S., Sayrin C., Dotsenko I., Gleyzes S., Brune M. et Haroche S., « Quantum Zeno dynamics of a field in a cavity », *Phys. Rev. A.*, accepté pour publication, 2012.

