

Physique quantique

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

Le cours de l'année 2008-2009 n'a pas eu lieu.

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 dirige, avec ses collègues Jean-Michel Raimond (professeur à Paris VI et à l'Institut universitaire de France) et Michel Brune (directeur de recherche au CNRS) une équipe de chercheurs et d'étudiants (groupe d'électrodynamique quantique en cavité). Un des chercheurs du groupe est un visiteur post-doctoral recruté sur un poste de maître de conférences au Collège de France, Monsieur Igor Dotsenko (de nationalité ukrainienne).

Les recherches du groupe en optique quantique portent sur l'étude de l'interaction matière-rayonnement au niveau le plus fondamental, lorsqu'un atome et un champ constitué de quelques photons interagissent isolés du reste du monde dans une cavité électromagnétique aux parois ultra-réfléchissantes. Ce système évolue suivant les lois contre-intuitives de la physique quantique qui sont ainsi révélées de façon directe. Ces expériences constituent des réalisations des expériences de pensée imaginées au début de la physique quantique. Au-delà de la mise en évidence d'effets fondamentaux, elles sont également des démonstrations simples d'opérations de logique quantique qui pourraient servir un jour à la réalisation de dispositifs nouveaux d'information quantique.

L'équipe a continué en 2008-2009 à travailler en parallèle sur deux montages expérimentaux. Le premier a permis de réaliser des expériences de comptage non-destructif de photons et de mesure d'états du champ dans la cavité qui ont conduit, ces deux dernières années, à plusieurs résultats importants : observation des sauts quantiques de la lumière, création et observation d'états à nombre de photons bien

défini, reconstruction complète d'états non-classiques du champ du type « états de Schrödinger » et étude de leur décohérence, mise en évidence de l'effet Zénon quantique. Dans le second montage, l'équipe a mis au point une « puce à atomes cryogénique » qui doit permettre de réaliser une source d'atomes indispensable pour la prochaine génération des expériences d'électrodynamique quantique en cavité (voir plus loin). Ce dispositif dans lequel des atomes ultra-froids sont piégés à très basse température au voisinage de surfaces métalliques supraconductrices, a également conduit à des résultats nouveaux sur l'interaction des atomes avec les fluctuations de courant dans les supraconducteurs et les métaux normaux. Tous ces résultats ont fait l'objet de rapports détaillés dans les documents préparés pour la visite de l'AERES au laboratoire Kastler Brossel et ont été – pour certains – déjà évoqués dans les résumés des cours et travaux des années antérieures. Ils ne seront pas discutés plus avant ici.

Une part importante de l'activité de la chaire de Physique quantique au cours de l'année passée a consisté à réfléchir à l'avenir des expériences d'électrodynamique en cavité. Cette réflexion a conduit à présenter un projet de recherche européen ERC au niveau « avancé » dont Serge Haroche est le porteur. Ce projet, qui vient d'être retenu par la commission de l'ERC, porte sur l'étude de la décohérence de la lumière dans une cavité (nom de code acronyme : DECLIC). Parallèlement, Jean-Michel Raimond est le porteur d'un projet ANR, également retenu, portant sur certains des aspects du projet ERC. Les recherches du groupe sont ainsi assurées d'un soutien financier important pour les cinq prochaines années, ce qui doit permettre de développer considérablement les expériences de la chaire tout en réalisant dans de bonnes conditions le déménagement des montages expérimentaux dans les locaux rénovés de la physique au Collège de France prévu au cours de l'année 2012.

Le projet DECLIC va évoluer suivant trois directions complémentaires. Dans la première, l'équipe va explorer diverses méthodes pour préparer des états quantiques d'un champ électromagnétique contenant un nombre relativement grand de photons. Elle étudiera la décohérence naturelle de ce champ piégé dans une cavité en réalisant des reconstructions d'états quantiques résolues en temps. Différentes méthodes de préparation d'états à nombre de photons bien défini (états de Fock) et d'états « chats de Schrödinger » seront démontrées et comparées. Une classe particulièrement intéressante d'états non-classiques sera obtenue en couplant à des intervalles de temps réguliers la cavité à un seul atome soumis à des impulsions mélangeant ses états de façon cohérente entre ces intervalles. De cette manière, le système atome-cavité deviendra un générateur de « marche quantique » lorsqu'on observera la dynamique de la phase ou de l'amplitude du champ soumis à ces perturbations atomiques périodiques. L'étude de l'évolution de ces marches quantiques sous l'effet de la décohérence et de leur transformation progressive en un processus de diffusion Brownien ouvrira une nouvelle voie pour explorer la transition du quantique au classique.

Le second but de DECLIC sera de préparer des champs intriqués entre deux cavités et d'étudier leur décohérence. L'état intriqué le plus simple de ce type sera constitué d'un seul photon délocalisé entre deux cavités. Ce système sera utilisé comme ressource pour effectuer la téléportation de l'état quantique d'un atome d'une cavité à l'autre. On étendra ensuite cette étude à la préparation de champs mésoscopiques formés de plusieurs photons et intriqués par le passage d'un seul atome à travers les deux cavités. Des tests de non-localité seront réalisés sur ce système. On observera ainsi comment les propriétés non-locales de ces champs mésoscopiques sont altérées par la décohérence. Au delà de leur aspect fondamental, ces expériences exploreront aussi la possibilité d'utiliser l'intrication entre objets mésoscopiques pour réaliser des mesures quantiques avec un bruit inférieur au bruit dit « standard » (*standard quantum limit*).

La troisième direction de DECLIC explorera de nouvelles manières de contrôler la décohérence et d'en contrecarrer les effets. Dans une classe d'expériences, on cherchera à réaliser des procédures de rétroaction quantique (*quantum feedback*) qui demandent des mesures non-destructives du champ rapidement répétées suivies d'une réaction adaptée sur le champ. On commencera par étudier comment un champ préparé dans un état initial donné peut être dirigé vers un état final cible prédéterminé. Une fois le champ final atteint, la rétroaction quantique servira à maintenir le champ dans cet état en contrecarrant les effets des sauts quantiques induits par l'amortissement de la cavité. Des simulations précises de ces expériences ont été effectuées et leurs résultats viennent d'être publiés dans un article à la *Physical Review*. Dans une autre série d'expériences, on projette d'utiliser des atomes uniques pour injecter à des instants convenables un photon dans la cavité. On pourra ainsi protéger de la décohérence des états de type « chats de Schrödinger ». Une méthode complètement différente pour manipuler la décohérence sera basée sur la fabrication de réservoirs artificiels dont l'effet sera de surmonter les processus de décohérence naturelle dans la cavité. Cette stratégie dite de « *reservoir engineering* » reste largement inexplorée en électrodynamique quantique en cavité.

Pour mener à bien ces expériences il faudra mettre au point deux montages expérimentaux nouveaux. L'un permettra à des atomes relativement rapides de traverser deux cavités le long d'un jet atomique horizontal. L'autre réalisera une fontaine à atomes lents verticale, du style de celles utilisées pour les horloges atomiques. Les atomes interagiront avec une cavité placée près du sommet de cette fontaine, en un point où les atomes s'arrêtent avant de retomber. Les atomes devront être préparés dans un état de Rydberg circulaire, soit avant d'entrer dans la cavité, soit directement à l'intérieur de celle-ci. La conception de ces montages, basés sur des améliorations des deux dispositifs actuellement utilisés, a notablement avancé pendant l'année écoulée et doit se poursuivre au cours de la première année d'exécution du contrat ERC.

DISTINCTIONS

Serge Haroche a reçu en juin 2009 la médaille d'or du CNRS. Cette distinction lui a donné l'occasion de parler de ses travaux et de sa conception de la recherche fondamentale dans divers media (conférence de presse au CNRS le 3 juin 2009, articles dans *Le Monde* et les *Dernières Nouvelles d'Alsace*, interviews à France Inter, France Culture, RFI et à la chaîne de télévision parlementaire). La médaille d'or du CNRS sera remise officiellement en décembre 2009.

Igor Dotsenko a reçu en octobre 2008 le prix jeune chercheur de la Fondation Hugot du Collège de France.

CONFÉRENCES ET SÉMINAIRES DONNÉS EN FRANCE ET À L'ÉTRANGER

PAR SERGE HAROCHE

– Juillet 2008 : Conférence plénière à l'EGAS (European group of atomic spectroscopy), Graz, Autriche, « Non-demolition photon counting and field quantum state reconstruction in a cavity: a new way to look at light ».

– Juillet 2008 : 4 cours à l'École Enrico Fermi, Varenna, Italie, « Quantum Coherence in Solid State Physics ».

– Août 2008 : Conférence invitée à l'International Conference on Atomic Physics (ICAP), Storrs, Connecticut, États-Unis, « Observation of light quantum jumps and time-resolved reconstruction of field states in a cavity ».

– Septembre 2008 : Conférence invitée dans l'Atelier sur la Décohérence, Benasque, Espagne, « Reconstructing Fock and Schrödinger cat states of light with movies of their decoherence by quantum non-demolition photon counting in a cavity ».

– Octobre 2008 : Conférence invitée à Quantum Optics IV South American Conference, Florianopolis, Brésil, « Quantum non-demolition photon counting, state reconstruction and decoherence monitoring in Cavity QED experiments ».

– Octobre 2008 : Conférence invitée à International workshop on fundamentals of light-matter interactions, Recife, Brésil, « Counting non-destructively photons in a cavity, reconstructing Schrödinger cat states of light and realizing movies of their decoherence ».

– Novembre 2008 : Conférence invitée à Institute for Theoretical Atomic and Molecular Physics Workshop, Cambridge, États-Unis, « Counting non-destructively photons in a cavity, reconstructing Schrödinger cat states of light and realizing movies of their decoherence ».

– Novembre 2008 : Conférence invitée à International Symposium on Physics of Quantum Technology, Nara, Japon, « Quantum Non-Demolition photon counting and non-classical field state reconstruction in Cavity QED experiments ».

– Novembre 2008 : Séminaire au groupe de physique des particules du CEA, Saclay, France, « Compter des photons sans les détruire : une nouvelle façon de voir ».

– Février 2009 : Papier invité à FRISNO, Conférence Franco-Israélienne d'Optique quantique, En Gedi, Israël, « Exploring the quantumness of light in a cavity ».

– Février 2009 : Conférence d'intérêt général (Dodd Lecture) à l'Université de Dunedin, Nouvelle Zélande, « The Power and Strangeness of the Quantum ».

– Février 2009 : Colloquium de physique à l'Université de Dunedin, Nouvelle Zélande, « Exploring the quantumness of light in a cavity ».

– Mars 2009 : Conférence d'intérêt général à l'Université d'Auckland, Nouvelle Zélande, « The Power and Strangeness of the Quantum ».

- Mars 2009 : Colloquium de physique à l'Université d'Auckland, Nouvelle Zélande, « Exploring the quantumness of light in a cavity ».
- Avril 2009 : Exposé grand public à l'Université nationale de Singapour organisé par l'Ambassade de France à Singapour, « The Power and Strangeness of the quantum ».
- Avril 2009 : Colloquium de Physique à la National University de Singapour, « Exploring the quantumness of light in a cavity ».
- Avril 2009 : Conférence grand public à l'Université Paul Sabatier de Toulouse, « La puissance et l'étrangeté du quantique ».
- Avril 2009 : Colloquium de Physique à l'Université de Heidelberg, Allemagne, « Trapping and counting photons without destroying them: a new way to look at light ».
- Mai 2009 : Conférence aux Lundis d'Aubervilliers, « Atome et Lumière ».
- Mai 2009 : Papier invité au Nobel Symposium on “Qubits for future quantum computers”, Göteborg, Suède, « Quantum non-demolition measurements in Cavity QED ; recent results and perspectives ».
- Juin 2009 : Papier invité à la conférence organisée en l'honneur de Joseph Imry, Weizmann Institut, Rehovot, Israël, « Exploring quantum states of light by non-demolition photon counting in a cavity ».
- Juin 2009 : Conférence plénière invitée à QELS, Quantum Electronics and Laser Science Conference, Munich, Allemagne, « Exploring the quantumness of light ».

PUBLICATIONS DU GROUPE D'ÉLECTRODYNAMIQUE EN CAVITÉ
(07/2008-06/2009)

- DELÉGLISE S., DOTSENKO I., SAYRIN C., BERNU J., BRUNE M., RAIMOND J.-M. et HAROCHE S., « Reconstruction of non-classical cavity field states with snapshots of their decoherence », *Nature*, **455**, 2008, 510.
- HAROCHE S., « Essay: Fifty years of Atomic, Molecular and Optical Physics in Physical Review letters », *Phys. Rev. Lett.*, **101**, 240402, 2008.
- BERNU J., DELÉGLISE S., SAYRIN C., KUHR S., DOTSENKO I., BRUNE M., RAIMOND J.-M. & HAROCHE S., « Freezing coherent field growth in a cavity by the quantum Zeno effect », *Phys. Rev. Lett.*, **101**, 180402, 2008.
- BRUNE M., BERNU J., GUERLIN C., DELÉGLISE S., SAYRIN C., GLEYZES S., KUHR S., DOTSENKO I., RAIMOND J.-M. & HAROCHE S., « Process tomography of field damping and measurement of Fock state lifetimes by quantum nondemolition photon counting in a cavity », *Phys. Rev. Lett.*, **101**, 240402, 2008.
- HAROCHE S., « Exploring the quantum dynamics of atoms and photons in cavities », Proceedings of the Varenna International School of Physics: Quantum Coherence in Solid State Systems, published by the Societa Italiana di Fisica, 2009.
- NOGUES G., ROUX C., NIRRENGARTEN T., LUPASCU A., EMMERT A., BRUNE M., RAIMOND J.-M. & HAROCHE S., « Effect of vortices on the spin-flip lifetime of atoms in superconducting atom chips », *EPL*, **87**, 13002, 2009.
- DOTSENKO I., MIRRAHIMI M., BRUNE M., HAROCHE S., RAIMOND J.-M. & ROUCHON P., « Quantum feedback by discrete quantum nondemolition measurements: towards on-demand generation of photon number states », *Phys. Rev.*, **A 80**, 013805, 2009.
- EMMERT A., LUPASCU A., NOGUES G., BRUNE M., RAIMOND J.-M. & HAROCHE S., « Measurement of the trapping lifetime close to a cold metallic surface on a cryogenic atom-chip », *EPJD*, **51**, 173, 2009.