

## Physique quantique

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

Le cours donné au Collège de France, d'avril à juin 2004 était intitulé « **Superpositions mésoscopiques d'états** ». De façon plus spécifique, il a porté sur l'étude des systèmes ouverts et de leur décohérence en optique et informatique quantiques. Chaque leçon était accompagnée d'une présentation par ordinateur (powerpoint) consultable dès le jour du cours sur le site internet du Collège de France et de l'École Normale Supérieure, à l'adresse : [www.lkb.ens.fr/recherche/qedcav/college/college.html](http://www.lkb.ens.fr/recherche/qedcav/college/college.html).

Un tiers de l'enseignement de la chaire a par ailleurs été donné en Suisse, dans le cadre d'un accord entre l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, l'Université de Genève et le Collège de France. Cet enseignement à l'étranger a consisté en un ensemble de trois cours intitulé « **Atomes et photons en cavité : tests fondamentaux et application à l'information quantique** », donnés le 17 juin 2004 à l'Ancienne École de Médecine de l'Université de Genève.

L'enseignement principal donné au Collège faisait partie d'une série de cours consacrée à l'information quantique au sens large, commencée en 2001-2002 et poursuivie en 2002-2003. Le but de ces cours est d'analyser la physique de l'information quantique. Nous décrivons les méthodes générales qui permettent de manipuler de l'information codée dans des systèmes d'atomes ou de photons en exploitant les propriétés des interférences quantiques et de l'intrication. Les systèmes étudiés en information quantique sont mésoscopiques, c'est-à-dire à la frontière des mondes macroscopique (classique) et microscopique (quantique). La décohérence joue un rôle important dans la destruction des cohérences quantiques indispensables à la mise en œuvre de l'information quantique. Comprendre la décohérence des systèmes mésoscopiques, la combattre et en limiter les effets négatifs sont donc des aspects essentiels de cette physique.

Le cours de cette année s'est plus spécifiquement attaché à introduire un formalisme général et puissant pour décrire l'évolution d'un système quantique

couplé à un milieu extérieur responsable de sa décohérence. Les systèmes de l'information quantique sont en effet toujours ouverts, en interaction avec un environnement qui joue un rôle essentiel dans leur manipulation et leur mesure. Cette ouverture vers l'extérieur est générale en physique quantique. Tous les systèmes physiques, à l'exception peut-être de l'Univers dans son ensemble, sont ouverts et l'on ne les considère comme isolés que dans le cadre d'approximations plus ou moins réalistes. La description des systèmes ouverts se fait à l'aide du formalisme de l'opérateur densité, qui remplace celui des vecteurs d'états (ou fonctions d'onde) de la mécanique quantique élémentaire. Nous avons décrit ce formalisme en analysant les propriétés de l'opérateur densité d'un système ouvert, établi à partir d'hypothèses générales. Nous en avons déduit des propriétés universelles des transformations de l'opérateur densité du système. Nous avons pu ainsi analyser aussi bien le comportement d'un ensemble statistique de systèmes que celui d'un système ouvert unique. Nous avons décrit différents types de mesures possibles (mesures projectives et généralisées) et différentes méthodes d'observation continue d'un système quantique unique. Certains des résultats obtenus étaient des rappels de mécanique quantique standard, mais le point de vue choisi, celui de l'information quantique, était original pour une grande partie de l'audience. Il nous a fourni un éclairage nouveau sur la décohérence des superpositions mésoscopiques et nous a livré des outils théoriques utiles à la suite de cette série de cours.

*La première leçon* a introduit le cours en rappelant un certain nombre de situations en résonance magnétique nucléaire et en optique quantique, où le couplage d'un système quantique avec son environnement joue un rôle essentiel. Nous avons insisté sur la différence entre l'étude d'un ensemble de systèmes, pour laquelle une approche statistique est suffisante, et celle d'un système quantique unique évoluant suivant une trajectoire stochastique. Le besoin d'un formalisme spécifique pour décrire cette dernière situation a été souligné. Le problème de la décohérence, déjà abordé au cours des années précédentes, a été rappelé, à travers une brève présentation du problème du chat de Schrödinger et une analyse du problème fondamental de la mesure en physique quantique. Nous avons introduit le formalisme des transformations quantiques qui permet de décrire de façon très générale l'évolution des systèmes ouverts sans avoir à spécifier l'état de l'environnement. Nous avons insisté sur les avantages du point de vue des transformations quantiques de l'opérateur densité qui permet (entre autres) :

- d'introduire le concept de mesure généralisée comme l'effet sur un système ouvert d'une mesure standard effectuée dans un espace des états étendu à un environnement plus vaste ;

- de décrire l'évolution irréversible de l'opérateur densité d'un système ouvert comme résultant d'un processus de mesure généralisée correspondant à une fuite d'information non lue sur le système dans un environnement ;

- de comprendre une expérience sur une réalisation unique d'un système ouvert comme une mesure généralisée continue de ce système ;

— de décrire les états stables vis à vis de la décohérence (« pointer states ») comme les états propres des opérateurs (généralement non hermitiques) associés aux mesures généralisées responsables de l'évolution du système ;

— de nous familiariser avec un formalisme utile pour l'étude de la manipulation et du contrôle de la décohérence (introduction au cours 2004-2005).

La première leçon s'est poursuivie par un rappel sur la notion d'opérateur densité et sur la mesure de Von Neumann en physique quantique. On y a souligné en particulier l'ambiguïté de forme de l'opérateur densité en prenant l'exemple d'un système à deux niveaux (qubit) représenté par un vecteur dans la sphère de Bloch. Ce vecteur peut se décomposer d'une infinité de manière comme une somme de vecteurs dont les extrémités sont sur la sphère et qui représentent des cas purs. La leçon s'est achevée par un rappel sur la notion d'intrication, en l'illustrant par l'étude d'un système intriqué de deux qubits. On y a rappelé ce que sont les états de Bell et les corrélations quantiques EPR, la décomposition de Schmidt et l'entropie d'intrication. Nous avons enfin généralisé les états de Bell et la situation EPR à des systèmes de dimension finie quelconque et conclu la leçon sur la discussion de l'impossibilité de toute communication super-luminale utilisant les corrélations quantiques « instantanées ».

*La deuxième leçon* a abordé la question de la purification d'un mélange statistique et son lien avec les notions de complémentarité et de gomme quantique. On y a décrit l'opérateur densité d'un système A comme résultant d'une trace partielle prise sur un état pur dans un espace étendu  $A + B$ . Cet état pur est appelé purification de l'opérateur densité de A. On y a établi les relations entre les différentes formes d'un même opérateur densité, associées à des mesures fictives non lues dans l'environnement B de A. Nous avons établi le théorème GHJW (Gisin, Horne, Josza et Wothers) montrant que toutes les formes de l'opérateur densité d'un mélange statistique peuvent se déduire d'une purification unique. Ce résultat a été appliqué à la description de la matrice densité dépolari-sée d'un qubit. Ce formalisme nous a permis de rappeler les notions de décohérence, de complémentarité et de gomme quantique qui avaient été abordées dans les cours des années antérieures.

Nous avons ensuite étendu la notion de mesure en physique quantique en définissant les mesures généralisées et les mesures POVM (acronyme pour Positive Operator Valued Measure). L'effet de telles mesures sur un système ouvert A apparaît comme résultant d'une mesure standard effectuée sur un espace étendu, obtenu en adjoignant à A un système auxiliaire B. Les réalisations effectives de ces mesures ont été décrites. Des exemples de mesures POVM sur un qubit ont été présentés, en particulier des mesures à trois résultats possibles, en nombre supérieur à la dimension de l'espace de Hilbert associé. La réalisation pratique de telles mesures à l'aide de portes quantiques a été décrite et leur application à la reconnaissance partielle de deux états non orthogonaux d'un qubit a été évoquée.

*La troisième leçon* a abordé l'étude des transformations de l'opérateur densité d'un système physique ouvert interagissant avec un environnement. Nous avons présenté un formalisme universel qui s'applique à des situations très générales en physique et en information quantique. Nous avons introduit la notion de super-opérateur, application de l'espace des opérateurs densité dans lui-même et donné les propriétés générales de ces super-opérateurs, en présentant des exemples simples. Nous avons montré que ces super-opérateurs peuvent se mettre sous une forme standard correspondant à une décomposition en une somme de termes, chacun d'entre eux étant généré par un opérateur du système (forme de Kraus). L'ambiguïté de cette décomposition, qui peut être réalisée par une infinité d'ensembles de générateurs équivalents a été soulignée. La leçon s'est poursuivie par la description de quelques exemples simples de décomposition de Kraus, correspondant à l'évolution la plus générale possible d'un qubit. Nous avons décrit les mécanismes de basculement de bit, de basculement de phase et de décohérence ainsi que l'émission spontanée d'un qubit.

*La quatrième leçon* s'est attachée à décrire l'évolution d'un système ouvert à partir d'une équation différentielle (équation pilote). Nous avons commencé par discuter des conditions d'existence de l'équation pilote en introduisant l'approximation de Markov et en analysant son interprétation physique. Nous avons ensuite montré que s'il existait une équation pilote, celle-ci pouvait toujours se mettre sous la forme dite de Lindblad, qui se déduit naturellement de la forme de Kraus des super-opérateurs de transformations quantiques, introduite à la leçon précédente. Cette forme de l'équation pilote s'exprime à l'aide d'un petit nombre d'opérateurs dits de Lindblad. L'évolution infinitésimale décrite par l'équation pilote peut alors être vue comme une mesure généralisée non lue du système et les opérateurs de Lindblad s'interprètent comme les opérateurs décrivant les sauts quantiques du système interagissant avec son environnement au cours de telles « mesures ».

La forme de Lindblad de l'équation pilote nous a directement conduit à aborder le problème de la simulation Monte Carlo des trajectoires quantiques. Il est toujours possible de décrire l'évolution du système comme une mesure généralisée dont les résultats, obtenus par un tirage au sort, déterminent les sauts quantiques du système et définissent des trajectoires stochastiques pour son état. La théorie permet de calculer l'évolution du système entre deux sauts quantiques et son évolution au cours d'un saut, alors que l'occurrence d'un saut ne peut être que statistiquement prévue. L'opérateur densité se retrouve comme une moyenne sur les trajectoires quantiques. Des exemples simples de calcul de trajectoires stochastiques ont été présentés, concernant l'émission spontanée d'un atome à deux niveaux et la décohérence d'un qubit.

*La cinquième leçon* a appliqué les résultats précédents à l'étude de l'évolution d'un mode du champ électromagnétique couplé à un environnement, ce qui constitue un problème essentiel de l'optique quantique. Nous avons établi la forme de Lindblad de l'équation pilote pour un mode du champ couplé à un

environnement en équilibre thermodynamique. Nous avons étudié l'évolution d'un état de Fock de nombre de photons bien défini à  $T=0K$  et  $T>0K$  en décrivant les trajectoires stochastiques correspondantes et leur moyenne. Nous nous sommes ensuite intéressés à l'évolution d'un état cohérent couplé à un environnement à  $T=0K$  : Nous avons montré qu'il y avait alors une trajectoire unique et non-intrication avec l'environnement. Nous avons cherché à expliquer ces propriétés classiques de l'état cohérent et montré qu'elles étaient liées à des propriétés paradoxales de l'évolution de cet état, qui ne change qu'entre deux sauts quantiques et reste invariant lorsqu'il perd un photon. Nous avons enfin montré que l'on pouvait associer des « mesures homodynes » fictives dans l'environnement du champ à des formes de Lindblad différentes mais équivalentes de l'équation pilote, ce qui permet de comprendre de diverses manières complémentaires la relaxation d'un champ dans une cavité.

Nous avons ensuite généralisé les états cohérents à une classe générale d'états qui évoluent sans s'intriquer à leur environnement, ce que l'on appelle les états « pointeurs » (ou pointer states). Ces états jouent un rôle essentiel dans tout processus de décohérence décrit par une équation pilote. Ils sont en fait des états propres des opérateurs de sauts quantiques, lorsque ces opérateurs satisfont certaines propriétés de commutation entre eux et avec le hamiltonien du système. Nous avons aussi défini des pointer states approchés s'intriquant « lentement » avec l'environnement. Nous en avons donné divers exemples et conclu la leçon en montrant l'importance de la notion de pointer state dans la théorie de la mesure.

*La sixième leçon* s'est intéressée à l'évolution des superpositions d'états de position d'une particule matérielle ou d'états cohérents d'un mode du champ, ce qui constitue le fameux problème du chat de Schrödinger. Nous avons commencé par rappeler quelques notions sur la décohérence dans le cas du mouvement Brownien et montré la similitude entre l'équation pilote du mouvement Brownien et celle d'un champ en optique quantique. Nous avons décrit la décohérence des superpositions d'états du champ par différents types de trajectoires aux interprétations physiques complémentaires : sauts de parité du nombre de photons, localisation et diffusion de phase quantique.

Nous avons achevé le cours en le reliant à l'enseignement prévu pour l'année prochaine. Dans le cours 2003-2004, l'observation continue d'un système quantique unique couplé à un environnement a été décrit comme *une expérience de pensée* servant à déterminer les trajectoires stochastiques du système. Celles-ci sont en général des intermédiaires utiles pour le calcul de l'opérateur densité, qui contient toute l'information que l'on peut avoir sur le système. Il existe cependant des expériences dans lesquelles ces trajectoires peuvent être *effectivement* observées, par mesure explicite continue effectuée sur un système quantique unique. Le système reste alors décrit par une fonction d'onde. Sa cohérence peut être préservée, mais avec une phase quantique qui varie aléatoirement d'une réalisation de la mesure à une autre. Nous avons annoncé la description dans le

cours de l'année prochaine de quelques unes de ces expériences, déjà réalisées, ou en projet.

Nous chercherons également à répondre à une question essentielle : *la décohérence peut-elle être en pratique contrôlée, voire efficacement combattue afin de maintenir un système ouvert dans une superposition cohérente pour un temps très long, voire indéfini ?* Cette question est importante pour améliorer la précision des mesures spectroscopiques ou métrologiques ou pour rendre possibles des opérations logiques complexes d'information quantique. Plusieurs stratégies sont proposées pour essayer de contrôler ou de limiter la décohérence. Citons deux types de méthodes particulièrement importantes : (i) La mise en œuvre de codes correcteurs d'erreurs qui consistent à mesurer sur le système un symptôme de décohérence, puis d'agir en conséquence pour corriger l'effet de décohérence et rétablir l'état antérieur du système. Ces méthodes exploitent de façon systématique les propriétés de l'intrication multi-particule. Certaines sont directement inspirées par les codes correcteurs des ordinateurs classiques (codage redondant de l'information). D'autres s'apparentent plutôt à des méthodes d'asservissement (feed-back) classiques. (ii) Le développement de méthodes de préparation et de contrôle de l'environnement (environnement engineering) qui consistent à fabriquer des réservoirs artificiels admettant pour pointer states les états que l'on cherche à préserver de la décohérence. Nous avons brièvement introduit ces méthodes et annoncé que nous en donnerons l'année prochaine des exemples, en essayant d'analyser leurs limites.

### **Enseignement du Collège de France à l'étranger**

*L'enseignement donné à Genève* faisait également partie du cours de troisième cycle de la physique en Suisse romande, un enseignement collaboratif créé il y a une trentaine d'années par les universités romandes à l'intention des doctorants. Ce cours a porté sur la description d'expériences réalisées sur des atomes et des photons interagissant entre eux dans une cavité électromagnétique (Électrodynamique quantique en cavité). Ce sont de véritables expériences de pensée devenues réelles, testant des aspects fondamentaux de la physique quantique. Ce sont également des expériences de démonstration d'opérations élémentaires de logique quantique. *Dans une première leçon*, nous avons rappelé les concepts essentiels de la physique quantique (intrication, décohérence) et donné un aperçu des méthodes expérimentales mises en œuvre en électrodynamique quantique en cavité pour intriquer des atomes et des photons et réaliser des portes quantiques. *La deuxième leçon* a porté sur la description de tests de complémentarité et sur l'exploration de la limite classique quantique avec des états cohérents du rayonnement dans une cavité. Enfin, *la troisième leçon* a décrit les expériences de chats de Schrödinger du champ effectuées en électrodynamique quantique en cavité et a montré comment on pouvait avoir accès expérimentalement à la décohérence de ces états.

### Les séminaires de l'année 2003-2004

Une série de six séminaires sous le titre général de « *Information quantique, aspects théoriques et expérimentaux* » accompagnait le cours du Collège de France à Paris en le complétant et en illustrant différents aspects. En voici la liste dans l'ordre où ils ont été donnés :

— « *Communications et cryptographie avec des variables quantiques continues* »

Philippe Grangier, Institut d'Optique, Orsay

— « *Traitement intégré des ondes de matière* »

Jacob Reichel, Université de Munich, Allemagne

— « *Le photon dans tous ses états : préparation et contrôle d'information quantique dans les états de la lumière* »

Aephraim Steinberg Université de Toronto, Canada

— « *Exploring Quantum Matter in Artificial Crystals of Light* »

Immanuel Bloch, Université de Mayence, Allemagne

— « *Controlling individual atoms in a dipole trap : Towards quantum information processing with neutral atoms* »

Stefan Kuhr, Université de Bonn, Allemagne et ENS, Paris

— « *Gaz de Fermi ultra-froids : Condensat de molécules ou paires de Cooper ?* »

Christophe Salomon, ENS, Paris

### Symposium « Manipulations d'atomes et de photons » dédié à la mémoire de Jean Brossel

Un symposium dédié à la mémoire du Professeur Jean Brossel, disparu au début de l'année 2003, a été organisé conjointement par la chaire de physique quantique et la chaire de physique atomique et moléculaire. Ce symposium a eu lieu le 16 Janvier 2004 dans l'amphithéâtre Marguerite de Navarre du Collège de France. Les titulaires des deux chaires, Claude Cohen-Tannoudji et moi même, avons été les étudiants puis les collègues de Jean Brossel au Département de Physique de l'ENS. Nous y travaillons encore aujourd'hui, au sein du laboratoire Kastler Brossel. Nous avons souhaité par cette journée commémorative rendre hommage à notre maître, collègue et ami qui fût, avec Alfred Kastler, disparu il y a vingt ans, l'inventeur du pompage optique. Cette méthode générale de manipulation des atomes par la lumière a joué un rôle important dans le développement de l'optique et de la physique atomique moderne, contribuant en particulier au développement des lasers. Le pompage optique tient toujours une place essentielle dans les expériences de refroidissement des atomes par la lumière et dans les études sur l'information quantique réalisées avec des atomes, des ions

ou des photons, thèmes qui font l'objet de nos cours respectifs au Collège de France.

Ce symposium, intitulé « Manipulations d'Atomes et de Photons » a été organisé avec le soutien financier de la Fondation Hugot du Collège de France. Il a réuni environ 250 personnes, dont de nombreux anciens élèves, collaborateurs et collègues de Jean Brossel. Parmi ces derniers, on remarquait la présence d'Anatole Abragam, professeur honoraire au Collège de France et Hubert Curien, ancien ministre et ancien président de l'Académie des Sciences. La personnalité de Jean Brossel a été évoquée dans plusieurs présentations chargées d'émotion par quelques un de ses premiers étudiants. Jacques Winter, Bernard Cagnac et Jean-Claude Lehmann ont rappelé l'époque héroïque des débuts du pompage optique, dans les années cinquante du siècle dernier. Puis Daniel Kleppner, professeur à MIT, faisant un véritable travail d'historien, a évoqué les années qui avaient précédé, celles du travail de thèse de Brossel dans le grand institut de la région de Boston. Ces années, de 1949 à 1951, furent essentielles pour la genèse des idées qui ont conduit au pompage optique.

D'autres professeurs étrangers qui entretenaient des relations étroites avec Brossel étaient également présents : Luigi Moi de l'université de Sienne, Ernst Otten de l'université de Mayence ainsi que Theodor Hansch de l'université de Munich ont présenté des conférences scientifiques décrivant des recherches qui doivent beaucoup aux travaux de Brossel, montrant de façon éclatante que les méthodes optiques qu'il a inventées et développées il y a plus de cinquante ans étaient encore très fécondes et riches d'applications imprévues. Jean-Michel Raimond, Jean Dalibard et Bertrand Girard, trois professeurs français formés dans l'école de physique créée par Brossel à l'ENS, ont également présenté des exposés décrivant leurs travaux récents, dans la filiation directe ou indirecte des idées de leur maître. Tous les participants ont semblé très satisfaits de ce Symposium qui a permis d'évoquer les contributions d'un grand physicien français ayant joué un rôle essentiel dans le renouveau de la physique française après la seconde guerre mondiale. Deux pauses café, le matin et l'après-midi, et un cocktail en fin de journée ont permis aux participants de se retrouver dans une ambiance chaleureuse et conviviale et d'échanger leurs souvenirs et impressions.

Voici le programme de cette journée (auquel s'est ajoutée une allocution impromptue de Jacques Winter, ancien étudiant de Jean Brossel) :

— Bernard Cagnac, ENS : « Les débuts du laboratoire de Spectroscopie Hertziennne »

— Jean-Claude Lehmann, Saint Gobain : « Quelques souvenirs sur Jean Brossel »

— Daniel Kleppner, MIT, Boston : « Jean Brossel at MIT »

— Luigi Moi, Université de Sienne : « From optical pumping to dark resonances »



— Ernst Otten, Université de Mayence : « Some recent applications of optical pumping in nuclear physics and medicine »

— Theodor Hänsch, University of Munich and Max Planck Institut, Garching : « Ultraprecise optical spectroscopy »

— Jean-Michel Raimond, ENS : « Quantum Rabi oscillations in a mesoscopic field : entanglement, complementarity and Schrödinger cats »

— Jean Dalibard, ENS : « Manipulation de condensats atomiques : la cohérence quantique à l'œuvre »

— Bertrand Girard, Université de Toulouse : « Contrôle cohérent avec des impulsions laser ultracourtes mises en forme »

### **Autres conférences et séminaires de Serge Haroche**

En dehors de mes cours au Collège de France et à l'étranger, j'ai donné les séminaires, cours et conférences suivants entre juillet 2003 et juin 2004 :

— *Juillet 2003* : École de physique théorique des Houches sur l'intrication quantique et le traitement quantique de l'information : six cours intitulés « Introduction to quantum optics and decoherence »

— *Juillet 2003* : Conférence grand public aux Houches intitulée « Puissance et étrangeté du quantique »

— *Juillet 2003* : Conférence invitée à la conférence internationale de spectroscopie laser (ICOLS) : « Manipulating mesoscopic fields with a single atom in a cavity », Palm Cove, Australie.

— *Juillet 2003* : Séminaire à l'Université de Brisbane (Australie) : « Quantum information with atoms and photons in cavities »

— *Juillet 2003* : Séminaire à l'Université de Canberra (Australie) : « Quantum information with atoms and photons in cavities »

— *Septembre 2003* : Conférence invitée à l'Alpine NMR conference intitulée : « Quantum information with atoms and photons in a cavity », Chamonix, France

— *Septembre 2003* : Conférence invitée au Japan US seminar on Quantum Correlation and Coherence : « Coherent control of a mesoscopic field with a single atom : fundamental tests and applications », Kobuchizawa, Japon.

— *Octobre 2003* : Communication invitée au Symposium en l'honneur de Pierre Jacquinot : « Intrication de champs mésoscopiques dans une cavité : exploration de la frontière classique-quantique », Siège du CNRS, Paris

— *Octobre 2003* : Conférence invitée au 304<sup>e</sup> Hereaus seminar sur elementary quantum processors : « Mesoscopic entanglement in Cavity QED experiments », Bad Honnef, Allemagne

— *Novembre 2003* : Papier invité au symposium « Frontiers in Physics » de l'Académie Lombarde des Sciences : « Quantum Information with Atoms and Photons in Cavities », Milan, Italie

— *Décembre 2003* : École d'été : Pan-American Advanced Studies Institute on the Physics of Quantum Information, quatre cours intitulés : « Mesoscopic state superpositions in cavity QED and BEC : experiments on entanglement, complementarity and decoherence at the quantum-classical boundary », Buzios, Brésil

— *Décembre 2003* : « Quantum Information Symposium » organisé pour présenter les résultats de la coopération entre le Japan Science and Technology Corporation (JST) et le CNRS sur le thème de l'intrication quantique (collaboration entre mon groupe de recherche et celui du Professeur Y. Yamamoto de Stanford) : « Présentation des résultats de l'ENS-Collège de France obtenus dans le cadre de cette collaboration », Stanford, États-Unis.

— *Janvier 2004* : Conférence invitée au symposium organisé au Technion à l'occasion du jubilé du Professeur Asher Peres : « Cavity QED physics at the quantum-classical boundary », Haifa, Israël

— *Février 2004* : Conférence de Shalit à l'Institut Weizmann : « Entangling atoms and photons in a cavity : an experiment at the quantum-classical boundary », Tel-Aviv, Israël

— *Mars 2004* : Conférence invitée au « LATSIS Symposium on Quantum Communication and Computing » : « Atom-photon entanglement in a cavity », Lausanne, Suisse

— *Avril 2004* : Papier invité au workshop « Decoherence, Entanglement and Information Protection in Complex Quantum Systems » intitulé : « Atom-mesoscopic field entanglement », Les Houches, France

— *Mai 2004* : Conférence invitée au Symposium en l'honneur du Jubilé du Professeur De Martini : « Manipulating atom-photon entanglement in a cavity », Rome, Italie

— *Mai 2004* : Communication invitée à la conférence IQEC (International Quantum Electronics) : « Single- and multi-photon states in microwave cavity QED », San Francisco, États-Unis

### Activités de recherche

Mon travail de recherche se déroule au sein du Laboratoire Kastler Brossel (LKB) de l'École Normale Supérieure. J'y co-dirige, avec mes 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). Le thème général des recherches de ce 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 dans une cavité.

L'année écoulée a été une période de transition au cours de laquelle deux nouveaux montages ont été conçus et développés :

(i) Une expérience dans laquelle des atomes de Rydberg circulaires traverseront successivement deux cavités est en cours de construction. L'interaction des atomes avec les cavités permettra d'intriquer leurs champs et d'utiliser ces champs intriqués pour réaliser la téléportation d'une fonction d'onde atomique sur une distance macroscopique de plusieurs centimètres. Une étude des superpositions mésoscopiques non locales d'états est également prévue, ainsi qu'une étude détaillée de la décohérence de ces superpositions, basée sur une mesure de leur fonction de Wigner. Ces expériences reposent sur un montage qui va bénéficier de nombreuses améliorations par rapport au dispositif précédent. La préparation des niveaux de Rydberg a été modifiée, en changeant le schéma d'excitation optique grâce à la mise en œuvre de nouveaux lasers plus intenses. La sélection de vitesse des atomes est également rendue plus simple et plus précise en remplaçant le pompage optique résonnant sélectionné en vitesse par un processus Raman non résonnant. L'interféromètre de Ramsey, qui constitue un élément essentiel du montage, est également perfectionné, de façon à améliorer son contraste. Enfin et surtout, un nouveau type de cavité est mis au point. Il est constitué de miroirs en cuivre usinés avec une précision optique, puis recouverts d'une fine couche de niobium supraconducteur. Les trous de couplage présents dans les anciens miroirs et qui limitaient leur finesse, ont été supprimés et de nouvelles procédures de remplissage de la cavité par couplage latéral sont étudiées. Nous espérons grâce à ces modifications une augmentation du temps de piégeage des photons par au moins un ordre de grandeur. Cette amélioration devrait permettre de réaliser des superpositions mésoscopiques d'états du champ contenant en moyenne une centaine de photons.

(ii) Une expérience de puce à atome cryogénique est également en construction, sous la responsabilité de Gilles Nogues, chargé de recherche CNRS. Il s'agit de construire un micro-piège magnétique à atomes refroidis par laser, puis d'exciter un atome de ce piège dans un niveau de Rydberg circulaire. Le piège magnétique sera réalisé par des fils de niobium parcourus par des courants de l'ordre de l'ampère. Une fois excité dans l'état de Rydberg, l'atome sera transféré dans un autre piège, réalisé par une configuration de champs électriques statiques et oscillants. Son émission spontanée sera inhibée par la présence de surfaces conductrices parallèles autour de l'atome, à une distance inférieure à la moitié de la longueur d'onde de la transition entre niveaux de Rydberg (6 mm). L'atome de Rydberg ainsi piégé verra sa cohérence protégée par l'application d'un champ microonde « habillant » dont le rôle sera d'annuler la dépendance en champ électrique de la transition de Rydberg. L'application de séquence de pulses réalisant des échos de spin devrait permettre d'atteindre des temps de cohérence de l'ordre de plusieurs dizaines de seconde et de réaliser ainsi des atomes excités

quasi stables. Le couplage de ces atomes à des micro-circuits supraconducteurs devrait ouvrir la voie à des applications intéressantes. Il devrait être possible d'intriquer des atomes entre eux en les couplant à des cavités supraconductrices linéaires de surtension modérée, ou encore d'étudier des effets d'interaction atome surface de type van der Waals ou Casimir. Les atomes préparés dans des micro-pièges pourront également être relâchés de façon déterministe dans une cavité de grande surtension pour de nouvelles expériences d'électrodynamique en cavité.

### **Publications du groupe d'électrodynamique quantique en cavité (juillet 2003-juin 2004)**

A. Auffeves, P. Maioli, T. Meunier, S. Gleyzes, G. Nogues, M. Brune ; J.M. Raimond et S. Haroche, « Entanglement of a mesoscopic field with an atom induced by photon graininess in a cavity », *Phys. Rev. Lett.* 91, 230405 (2003).

S. Haroche, « Mesoscopic state superpositions and decoherence in quantum optics » in *Les Houches session LXXIX, 2003, Intrication quantique et traitement de l'information*, D. Estève, J.M. Raimond et J. Dalibard éditeurs, 2004, Elsevier Science.

M. Brune, « Cavity QED » in *Les Houches session LXXIX, 2003, Intrication quantique et traitement de l'information*, D. Estève, J.M. Raimond et J. Dalibard éditeurs, 2004, Elsevier Science.

S. Haroche, A. Auffeves, P. Maioli, T. Meunier, S. Gleyzes, G. Nogues, M. Brune et J.M. Raimond, « Manipulating mesoscopic fields with a single atom in a cavity », actes de la conférence ICOLS (International Laser Spectroscopy), P. Hannaford, A. Sidorov, H. Bachor et K. Baldwin, éditeurs. World Scientific, 2004.

S. Zippilli, D. Vitali, P. Tombesi, J.M. Raimond, *Phys. Rev. A* 67, 052101 (2003) : « Scheme for decoherence control in microwave cavities ».

J.M. Raimond, *Superlattices and Microstructures*, 32, 187 (2003) : « Quantum information processing with atoms and cavities ».

D. Vitali, S. Zippilli, P. Tombesi, J.M. Raimond, *J. Mod. Opt.* 51, 7099 (2004), « Decoherence control with fully quantum feedback schemes ».

J.M. Raimond, *The Physics of communication, proceedings of the XXII Solvay conference*, I. Antoniou, V.A. Dadovichny and H. Walther eds, World Scientific, New Jersey, p. 30 (2003) : « Entanglement, complementarity and decoherence ».

J.M. Raimond in « *New directions in Mesoscopic physics (towards nanosciences)* », R. Fazio, V.F. Gantmakher, Y. Imry eds., *Nato Science Series*, Kluwer, Dordrecht vol. 125, p. 225 (2003) : « Entanglement and decoherence studies in cavity QED ».

P. Hayfil, J. Mosley, A. Perrin, I. Tailleur, G. Nogues, M. Brune, J.M. Raimond et S. Haroche, « Coherence preserving trap architecture for long term control of giant Rydberg atoms », soumis à Phys. Rev. Lett., mai 2004.

P. Milman, A. Auffeves, F. Yamagushi, M. Brune, J.M. Raimond et S. Haroche, « A proposal to test Bell's inequalities with mesoscopic non-local fields in cavity QED », soumis à EPJD, juin 2004.