

Physique quantique

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

Le cours de l'année 2006-2007

Le cours donné au Collège de France, d'octobre à décembre 2006, était intitulé « **Expériences d'intrication d'atomes froids** ». Il s'agit de la suite d'une série de cours sur l'information quantique. Après avoir présenté au cours des années précédentes les principes de cette physique et décrit des expériences d'électrodynamique en cavité qui les illustrent simplement, nous avons abordé une analyse d'expériences récentes d'intrication et de manipulation de bits quantiques réalisées dans d'autres domaines de l'optique quantique. Le cours de cette année a été essentiellement consacré à la description d'expériences réalisées sur des atomes ultra-froids confinés dans des pièges optiques. Chaque leçon était accompagnée d'une présentation par ordinateur consultable dès le jour du cours sur le site internet du Collège de France et de l'École normale supérieure ou, plus directement, à l'adresse internet www.cqed.org.

Un tiers de l'enseignement de la chaire a par ailleurs été donné à Lyon, à l'invitation de l'Université Claude Bernard (Lyon I) et de l'École normale supérieure de Lyon. Ce cours, organisé dans le cadre de l'école doctorale et de la fédération de physique de Lyon, était intitulé : « **Information quantique avec des atomes et des photons** ».

La série de cours donnés depuis la leçon inaugurale de la chaire de physique quantique en 2001 (tous consultables sur le serveur www.cqed.org) a décrit 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. Nous avons également analysé les processus de décohérence qui tendent à détruire les cohérences indispensables à la mise en œuvre de l'information quantique et nous avons décrit des méthodes permettant de minimiser la décohérence ou d'en corriger les effets. Ces cours ont été initialement illustrés par la description d'expériences réalisées dans notre groupe de

recherche à l'ENS avec des atomes dans des cavités piégeant des photons micro-onde (électrodynamique quantique en cavité). Nous avons abordé à partir de l'année 2005-2006 l'étude d'autres systèmes utilisant comme bits quantiques des atomes piégés, ionisés ou neutres. Le cours de cette année a montré comment la manipulation d'atomes froids permet de réaliser des expériences d'intrication et la préparation de superpositions mésoscopiques d'états. Une partie du cours a été consacrée aux atomes piégés dans des réseaux optiques. Ces cristaux optiques d'atomes constituent de véritables simulateurs quantiques de situations rencontrées en physique des solides, dont l'étude conduit à un rapprochement fécond entre l'optique quantique et la physique de la matière condensée. Les thèmes du cours, répartis sur six leçons, étaient les suivants :

1. Rappels sur l'intrication, l'information quantique et les portes quantiques.
2. La condensation de Bose-Einstein et la physique des collisions d'atomes froids.
3. Les condensats bimodaux en seconde quantification (I).
4. Les condensats bimodaux (II) : le modèle du moment angulaire collectif.
5. Condensats dans un réseau optique (I).
6. Condensats dans un réseau optique (II) : de la simulation d'un solide à l'information quantique.

La première leçon est revenue sur les concepts essentiels de l'information quantique, les qubits et les portes quantiques. Le lien entre porte logique, intrication et mesure non destructive a été rappelé, ainsi que la définition des superpositions mésoscopiques d'états et les propriétés essentielles de la décohérence. Quelques exemples de portes quantiques impliquant des non-linéarités intrinsèques ont été brièvement passés en revue (portes atome-photon en électrodynamique quantique en cavité et portes entre ions piégés). Le cas des portes photoniques réalisées à l'aide de lames séparatrices a été présenté de façon un peu plus détaillée. Dans ce cas, il n'y a pas de non-linéarité intrinsèque, mais un processus de post-sélection permet d'introduire une non-linéarité effective qui permet de réaliser des portes probabilistes conditionnées aux résultats de mesures. C'est le principe, brièvement rappelé, de l'ordinateur quantique « tout optique ». La leçon s'est conclue sur l'idée que la physique des atomes froids, avec ses ondes de matière couplées entre elles par les non-linéarités intrinsèques associées aux collisions inter-atomiques, présentait des avantages sur l'optique ordinaire pour la mise en évidence d'intrication et de processus d'information quantique.

Dans la deuxième leçon, nous avons présenté une introduction à la physique des atomes ultra-froids. Les propriétés des forces radiatives (résonnantes et dispersives) ont été rappelées ainsi que les principes de la manipulation optique des atomes froids. Une description qualitative du refroidissement par évaporation et de la condensation de Bose Einstein a été présentée. La seconde partie de la leçon a été consacrée aux collisions atomiques de basse énergie dans les gaz quantiques dégénérés. Après avoir rappelé les idées essentielles de la théorie des collisions et les propriétés du développement en ondes partielles de diffusion,

nous avons caractérisé les collisions atomiques à basse énergie par la longueur de diffusion dans l'onde S. Nous avons interprété physiquement cette longueur et étudié quantitativement sa dépendance par rapport à la forme du potentiel inter-atomique. La notion de potentiel de contact effectif a été introduite et le concept de champ moyen pour la description des condensats a été présenté. Les cas limites des petits et des grands condensats ont été discutés. Le phénomène de résonance de Feshbach qui permet de faire varier continûment et de façon contrôlée la longueur de diffusion et même de changer son signe, a été rapidement présenté.

La troisième leçon a abordé la description des condensats bimodaux, systèmes de gaz dégénérés dans lesquels les atomes se répartissent dans deux niveaux quantiques. Nous avons commencé par rappeler comment décrire un condensat en seconde quantification. Nous avons ensuite introduit les états cohérents d'un condensat bimodal en absence d'interaction. Nous avons décrit, pour un condensat bimodal cohérent, la fluctuation de la partition du nombre de bosons dans chacun des deux niveaux. Nous avons ensuite discuté l'effet des interactions. Il conduit à un gel des fluctuations quand l'interaction est répulsive et à l'apparition d'un état fondamental de type chat de Schrödinger quand elle est attractive. Nous avons indiqué comment on pourrait, en principe, préparer ces états. Nous avons comparé enfin les propriétés des états cohérents, des états à fluctuations gelées et des états de type « chat ». La deuxième partie de la leçon a été consacrée aux oscillations d'un condensat bimodal dans un double puits de potentiel, ce qu'on peut considérer comme « l'effet Josephson des atomes froids ». Nous avons donné l'expression du courant de probabilité à travers la barrière séparant les deux puits. Nous avons calculé la fréquence d'oscillation à l'aide de deux modèles, l'un microscopique, l'autre macroscopique. Nous avons établi de façon heuristique l'expression du Hamiltonien Josephson associant comme variables conjuguées la différence de phase et la différence de population entre les puits. Nous avons donné la solution décrivant l'évolution dynamique régie par ce Hamiltonien, dans le cas des petites oscillations en définissant la fréquence plasma. Nous avons montré que les populations avaient tendance à se bloquer (self-trapping) dans le cas d'un grand déséquilibre initial. Nous avons décrit une expérience qui a permis d'observer ces oscillations et leur blocage.

Dans la quatrième leçon, nous avons comparé la physique des condensats bimodaux à celle des ensembles symétriques de spins d'une part, et à celle des états cohérents d'un champ en présence d'effet Kerr d'autre part. Nous avons rappelé la définition des états de Dicke d'un ensemble de spins comme états propres de leur moment angulaire collectif. Nous avons également introduit les états cohérents et les états comprimés du moment angulaire. Nous avons établi la relation entre les notions de compression de spin et la compression de quadrature ou du nombre de photons en optique quantique. Nous avons fait le lien entre compression de spin et intrication. Nous avons décrit des méthodes pour préparer des états comprimés en exploitant les collisions entre atomes dans un

condensat bimodal. Nous avons montré comment cela pouvait mener à la création transitoire d'états à fluctuation gelée de la différence du nombre de particules dans les deux états du condensat. La deuxième partie de la leçon s'est intéressée au phénomène d'effondrement et de résurgence de la phase des condensats bimodaux et à l'étude des chats de Schrödinger bosoniques en régime dynamique. Nous avons commencé par décrire les chats de Schrödinger à deux ou plusieurs composantes générés par effet Kerr en optique quantique et montré leur ressemblance avec les chats bosoniques d'un condensat bimodal. Nous avons également analysé l'analogie entre ces chats bosoniques et les états de type GHZ récemment produits dans des chaînes d'ions piégés (voir cours 2005-2006).

La cinquième leçon a abordé la description des condensats dans un réseau optique. Nous avons commencé par décrire les propriétés des condensats piégés dans un réseau avec des atomes dans un seul état interne. Nous avons rappelé la définition des états de Bloch à une particule dans un réseau et brièvement décrit la structure de bande et la notion de zone de Brillouin empruntée à la physique du solide. Nous avons décrit les images du condensat obtenues après sa libération du piège et son expansion. L'analogie entre la structure de ces images et le phénomène de diffraction de Bragg en optique a été rappelée. La compétition entre l'effet tunnel inter-puits et les collisions à l'intérieur de chaque puits joue un rôle essentiel dans la dynamique du système. La transition de Mott entre une phase superfluide et une phase dite isolante traduit l'effet de cette compétition. Nous avons décrit les expériences récentes qui ont permis de mettre cette transition en évidence, par l'étude de la visibilité des pics de diffraction de Bragg dans les images du condensat. Nous avons aussi analysé une expérience ayant permis d'observer l'effondrement et la résurgence périodique de la phase d'un condensat porté soudainement dans sa phase isolante. Dans la deuxième partie de la leçon, nous avons abordé l'étude de la manipulation d'un condensat d'atomes à deux états piégé dans un réseau. Nous avons montré comment on pouvait utiliser la phase isolante pour réaliser un registre d'atomes froids à deux niveaux. Nous avons décrit comment on pouvait déplacer indépendamment les deux sous-réseaux optiques piégeant les deux états de spin différents des atomes. Nous avons finalement indiqué comment on pouvait utiliser ce dispositif pour séparer et recombiner les fonctions d'onde atomiques et réaliser « en parallèle » des expériences d'interférence à une particule.

La sixième leçon a poursuivi la description des condensats dans les réseaux optiques en discutant de leur application à l'information quantique. Nous avons commencé par décrire la réalisation de portes de phase et la préparation d'une intrication collective d'atomes dans le réseau. Ces portes sont basées sur la mise en contact d'atomes venant de sites voisins. On exploite la possibilité de déplacer de façon sélective les états de spin différents des atomes, suivant la méthode décrite à la leçon précédente. On parvient ainsi à séparer les fonctions d'onde atomique, à réaliser une collision entre des paires d'atomes conditionnée à l'état de spin, puis à recombiner les fonctions d'onde. On peut contrôler avec précision

le déphasage conditionnel induit par les collisions. Nous avons commencé par considérer le cas de deux ou trois puits. On réalise alors, avec des pièges double ou triple, des états de Bell et des états GHZ. Le degré d'intrication entre les atomes oscille en fonction du déphasage produit par les collisions. On a ensuite généralisé la méthode au cas de N puits, dans des réseaux à une, deux ou trois dimensions. On crée ainsi des états intriqués dits « cluster states » ayant des propriétés de connectivité remarquables. La deuxième partie de la leçon s'est intéressée à la simulation quantique de spins sur réseaux et au principe de l'ordinateur quantique à états de type cluster. Nous avons montré que l'on pouvait réaliser des réseaux d'atomes froids ayant des Hamiltoniens analogues à ceux qui régissent l'évolution de spins sur réseaux. On peut en particulier réaliser le modèle d'Ising ou encore le Hamiltonien de Heisenberg. De façon plus générale, on peut simuler un Hamiltonien de spins à paramètres ajustables. On voit ainsi apparaître l'intérêt des réseaux optiques de bosons pour la simulation quantique de situations de la physique de la matière condensée incalculables par des ordinateurs classiques. Nous avons conclu le cours en donnant rapidement le principe de l'ordinateur quantique unidirectionnel qui fonctionne en réalisant des mesures séquentielles sur un état cluster préparé à l'avance (« one way quantum computer »).

Enseignement du Collège de France « hors les murs »

L'enseignement donné à Lyon en mars 2007 était destiné aux étudiants de l'école doctorale de Lyon et aux chercheurs de la région Rhone-Alpes. Le cours, composé de trois séances de deux leçons chacune, a porté sur la physique des atomes et des photons en cavité. J'ai essentiellement décrit les expériences effectuées à l'ENS sur des atomes de Rydberg couplés à des cavités micro-onde supraconductrices. J'ai montré comment ce système permettait d'illustrer les fondements de la physique quantique en réalisant, de façon bien réelle, certaines des expériences de pensée imaginées par les fondateurs de la théorie. La dernière séance a porté sur les expériences récentes de l'ENS dans lesquelles nous avons détecté des photons sans les détruire et observé pour la première fois les sauts quantiques de la lumière (voir partie « Activités de recherche »).

Les séminaires de l'année 2006-2007

Une série de six séminaires 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 :

30 octobre 2006 : Production et observation d'atomes corrélés

Christoph WESTBROOK, Institut d'Optique, Orsay.

6 novembre 2006 : Quantum optics and condensed matter physics with cold polar molecules

Peter ZOLLER, Université d'Innsbruck (Autriche).

13 novembre 2006 : Single atoms trapped on a microchip

Vladan VULETIC, MIT, Cambridge (États-Unis).

20 novembre 2006 : Oscillations de spin cohérentes dans les réseaux optiques

Fabrice GERBIER, Université de Mayence (Allemagne) et Laboratoire Kastler Brossel de l'ENS, Paris.

4 décembre 2006 : Circuit quantum electrodynamics : quantum optics on a chip

Robert SCHOELKOPF, Université de Yale (États-Unis).

11 décembre 2006 : Observer la naissance, la vie et la mort d'un photon

Stefan KUHR, Laboratoire Kastler Brossel de l'ENS, Paris et Université de Mayence (Allemagne).

Autres conférences et séminaires de Serge Haroche

En dehors de ses cours au Collège de France et à Lyon, S. Haroche a donné les séminaires, cours et conférences suivants entre juillet 2006 et juin 2007 :

— *Juillet 2006* : Communication invitée à la Conférence « Theoretical and experimental foundations of modern technologies » : « *Schrödinger cats in Cavity QED and decoherence studies* », Durban, Afrique du Sud.

— *Septembre 2006* : Communication invitée à la Conférence « Asia Quantum Information Science » : « *Schrödinger cats in Cavity QED and decoherence studies* », Beijing, Chine.

— *Septembre 2006* : Communication invitée au séminaire WE-Heraeus « Strong Coupling of Light and Matter » : « *Ultra strong coupling in Rydberg atom Cavity-QED experiments* » Bad-Honnef, Allemagne.

— *Octobre 2006* : Communication invitée à l'« US-Japan workshop on Quantum Information Science » : « *Witnessing the birth, life and death of a photon : the quantum jumps of light in a cavity* », Maui, Hawaii, États-Unis.

— *Novembre 2006* : Conférence présentée à l'Académie des Sciences dans la série « Les défis du XXI^e siècle » : « *Puissance et étrangeté du quantique* », Paris.

— *Décembre 2006* : Colloquium à l'Université fédérale de Rio de Janeiro : « *Quantum non-demolition measurements of photons in a cavity : observing the quantum jumps of light* », Rio de Janeiro, Brésil.

— *Février 2007* : Communication invitée à la Conférence FRISNO « Franco-Israelian Seminar in Non-Linear Optics » : « *Quantum non-demolition measurements of photons in a cavity : observing the quantum jumps of light* », Les Houches, France.

— *Avril 2007* : Colloquium à l'École Polytechnique de Zurich : « *Quantum non-demolition measurement of light : the life and death of trapped photons* », Zurich, Suisse.

— *Mai 2007* : Conférence au Symposium : « Physics in our times : how it will evolve and what are the major remaining challenges ? » organisé par

l'European Physics Letters Journal (EPL) : « *Power and Strangeness of the Quantum* », Fondation Del Duca, Paris.

— *Mai 2007* : Colloquium à l'Université de Sao Carlos : « *Quantum non-demolition measurement of light : the life and death of trapped photons* », Sao Carlos, Brésil.

— *Mai 2007* : Une leçon sur l'information quantique aux étudiants de l'Université de Sao Carlos, Brésil.

— *Mai 2007* : Communication invitée au workshop organisé à l'occasion de la leçon inaugurale de Michel Devoret au Collège de France : « *Quantum non-demolition counting of photons in a superconducting cavity : the life and death of trapped photons* », Palaiseau, France.

— *Juin 2007* : Communication invitée au Symposium de Vienne « Foundations of Modern Physics » : « *Witnessing the life and death of trapped photons* », Vienne, Autriche.

— *Juin 2007* : Conférence invitée à la 9^e Conférence sur la Cohérence et l'Optique Quantique : « *A short history of Cavity Quantum Electrodynamics* », Rochester, États-Unis.

— *Juin 2007* : Communication invitée à ICOLS, Conférence Internationale de Spectroscopie Laser : « *Quantum non-demolition measurement of light : the birth, life and death of trapped photons* », Telluride, Colorado, États-Unis.

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 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 postdoctoral recruté sur un poste de Maître de Conférence au Collège de France, Monsieur Igor Dotsenko (de nationalité ukrainienne).

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.

Nos recherches se poursuivent depuis quelques années dans deux directions : d'une part, nous cherchons à étudier des systèmes quantiques mésoscopiques délocalisés dans deux cavités séparées de plusieurs centimètres, d'autre part nous voulons réaliser des « puces » à atomes piégeant de petits échantillons d'atomes

froids au voisinage de circuits supraconducteurs. La problématique de ces deux types d'expériences a été détaillée dans le résumé de cours et travaux antérieurs et nous nous contenterons d'indiquer ici les résultats obtenus au cours de la dernière année.

a) Mesure non-destructive de photons

Nous avons mis au point au cours des dernières années un montage expérimental permettant de manipuler à l'aide d'atomes de Rydberg des champs quantiques oscillant dans deux cavités séparées d'une dizaine de centimètres. Le but ultime de ces expériences est l'étude de l'intrication entre ces champs et la réalisation de tests de non-localité quantique pour des systèmes mésoscopiques. Dans une étape intermédiaire, nous avons effectué cette année des expériences sur un champ piégé dans une seule cavité, de très grand facteur de qualité. Les photons micro-onde survivent dans cette cavité pendant un temps excédant un dixième de seconde, ce qui permet de les faire interagir avec des milliers d'atomes traversant le dispositif un à un. Nous avons pu avec ce montage réaliser une expérience de mesure non-destructive de photons, que nous avons proposée en 1990. Cette expérience, qui a eu un grand retentissement médiatique, a été décrite dans deux papiers publiés dans *Nature* (une lettre, suivie d'un article) et a fait l'objet d'un compte rendu dans la *Lettre du Collège de France* (numéro de juin 2007).

L'expérience consiste à extraire de l'information du champ en le faisant interagir avec une succession d'atomes portés dans des niveaux atomiques très excités (atomes de Rydberg). Ces atomes sont très fortement couplés aux champs micro-onde, ce qui est, avec la longue durée de vie des photons dans la cavité, un élément essentiel au succès de cette expérience. Le nombre de photons, initialement incertain, se précise progressivement jusqu'à être parfaitement défini. On observe ainsi, pour la première fois en direct pour la lumière, la projection de l'état du champ au cours de sa mesure. Lorsque le champ se réduit à zéro ou un photon, la mesure s'effectue en principe à l'aide d'un seul atome. Il en faut en fait quelques-uns, en raison du bruit et des erreurs inévitables dans toute expérience. Lorsque le champ contient plus d'un photon, plusieurs atomes sont nécessaires, même dans le cas idéal d'une mesure parfaite. Dans notre expérience, quelques dizaines d'atomes, traversant la cavité en une vingtaine de millisecondes, suffisent à déterminer le nombre de photons lorsqu'il n'excède pas la valeur sept.

Dans cette expérience, les atomes de Rydberg se comportent comme de petites horloges. Elles sont interrogées par une méthode effectivement utilisée dans les horloges atomiques classiques, l'interférométrie de Ramsey. Cette méthode consiste à préparer à un instant donné, grâce à une courte impulsion micro-onde l'atome dans une superposition d'états que l'on peut décrire comme un spin, un petit vecteur élémentaire qui se met à tourner autour d'un axe, à la manière de

l'aiguille d'une montre. La vitesse de cette précession est analysée en soumettant l'atome à une seconde impulsion après un certain délai, avant d'effectuer la mesure de son énergie finale. Dans notre expérience, la cavité contenant le champ à mesurer est placée entre les deux zones où sont appliquées les deux impulsions de l'interféromètre de Ramsey. Le champ de la cavité a pour effet de retarder la marche de l'horloge, lui faisant subir un délai proportionnel au nombre de photons. C'est la mesure de ce délai qui permet de compter les photons. Le retard des horloges atomiques s'effectue sans échange d'énergie entre les atomes et le champ de la cavité. Seules les interactions avec les champs auxiliaires des impulsions de Ramsey apportent ou prélèvent de l'énergie sur les atomes pour y inscrire l'information utile à la mesure. Ainsi, la méthode est entièrement non-destructive pour les photons que l'on détecte.

Nous avons d'abord appliqué cette mesure au tout petit champ thermique, produit par l'agitation résiduelle des atomes dans les miroirs de la cavité. Ce champ fluctue entre zéro et un photon. Nous réglons alors les horloges atomiques pour que leur « spin-aiguille » subisse un déphasage de 180 degrés lorsque le nombre de photons passe de zéro à un. Une mesure sur un seul atome permet alors de déterminer si le spin pointe dans une direction ou dans la direction opposée, signalant la présence d'un photon, ou le vide dans la cavité. Un signal typique apparaît comme une suite télégraphique d'atomes détectés dans un niveau de Rydberg ou un autre. Une longue suite d'atomes dans un niveau signale le vide. Elle est brusquement interrompue par le passage des atomes à l'autre niveau, ce qui signifie qu'un photon est apparu. Ce photon disparaît ensuite d'un atome au suivant, à un instant aléatoire. Ces variations soudaines du signal sont des sauts quantiques, caractéristiques du comportement des systèmes microscopiques, mais qui n'avaient jamais été observés pour la lumière. L'étude statistique de milliers de signaux nous a permis de retrouver toutes les propriétés attendues du rayonnement thermique, décrit par la loi de Planck.

Nous avons ensuite généralisé la méthode à un champ plus intense, obtenu en injectant dans la cavité un petit champ cohérent produit par une source micro-onde classique. Ce champ a une statistique de Poisson, son nombre de photon étant incertain, compris entre zéro et sept. Le retard des horloges atomiques est alors réglé pour être égal à 45 degrés par photon, ce qui correspond à huit directions différentes pour le « spin-aiguille », que l'on associe aux huit valeurs possibles du nombre de photons compris entre 0 et 7. Au fur et à mesure que les atomes traversent la cavité, l'information qu'ils nous fournissent nous permet de préciser ce nombre qui converge vers une valeur précise. Cette valeur est cependant aléatoire, d'une réalisation à l'autre de l'expérience. La statistique des résultats obtenus nous permet de reconstruire la loi de Poisson du champ initial. Nous vérifions ainsi, pour la première fois dans le cas de la lumière, tous les postulats d'une mesure quantique idéale. Lorsque nous poursuivons la mesure sur des intervalles de temps longs, nous observons une évolution « en marches d'escalier » du champ qui sous l'effet des pertes de la cavité, évolue vers le vide

en perdant des photons à des instants aléatoires. Ici encore, l'analyse de ces résultats obtenus sur des milliers de trajectoires quantiques individuelles est en parfait accord avec les prédictions de la théorie quantique des champs.

L'analyse de ces résultats se poursuit. Nous nous intéressons en particulier aux états intermédiaires du champ, entre l'état cohérent initial à statistique de Poisson, et l'état dit de Fock final, à nombre de photons bien défini. La théorie prévoit qu'entre ces deux limites, le champ doit se trouver dans des états non-classiques, dits de type « chats de Schrödinger ». Nous comptons étudier expérimentalement en détail ces états pour des nombres de photons moyens de l'ordre de quelques dizaines, ce qui nous permettra de mieux comprendre la frontière entre les mondes classique et quantique. Nous passerons ensuite à l'étude des champs délocalisés dans deux cavités, qui était notre objectif initial (voir les rapports d'activité des années antérieures).

b) Expérience de puce à atome cryogénique

Le projet vise à terme à piéger des atomes de Rydberg et à réaliser des expériences d'information quantique sur ces atomes. Nous avons dans ce but proposé un schéma original de piège, fondé sur l'effet Stark, préservant la cohérence atomique. Ce piégeage doit se faire à basse température car les atomes de Rydberg sont très sensibles aux champs thermiques. Ceci explique la nécessité d'un montage cryogénique et l'utilisation d'une puce supraconductrice. Pour obtenir un atome de Rydberg dans le piège, nous comptons exploiter le mécanisme de blocage dipolaire. Il consiste à exciter à l'aide d'un laser un nuage dense d'atomes piégés dans leur état fondamental. L'interaction entre atomes excités voisins conduit alors à la préparation de manière certaine d'un atome de Rydberg et un seul. Un détecteur d'électrons intégré à la puce supraconductrice, en cours de réalisation, nous permettra d'étudier ce phénomène important. Nous pourrons alors piéger cet atome et le coupler, soit à un autre par couplage dipôle-dipôle, soit à une structure résonante, une cavité à ligne de transmission coplanaire elle aussi intégrée à la puce pour constituer un système intégré de traitement quantique de l'information.

Nous avons effectué au cours de l'année 2006-2007 les premiers pas dans cette direction en piégeant des atomes de Rubidium dans leur état fondamental à l'aide d'une puce supraconductrice. Nous avons observé que les conditions cryogéniques conduisent à des durées de vie très importantes pour les atomes dans le piège (de l'ordre de la minute). En effectuant un refroidissement évaporatif des atomes, nous avons également obtenu la première condensation de Bose-Einstein dans un montage cryogénique. Nous étudions actuellement la durée de vie du nuage condensé. Elle est limitée, dans les expériences à température ambiante, par les « spins flips » induits par les fluctuations thermiques de courant. Les conditions sont différentes près d'un supraconducteur et nous espérons obtenir des durées de piégeage supérieures. La durée de vie près d'un supraconducteur est un problème ouvert, que nous devrions pouvoir trancher rapidement.

Distinctions

Serge Haroche a reçu le prix Charles Townes de l'Optical Society of America pour l'année 2007. Il a également obtenu en 2007 la Grande Croix de l'Ordre du Mérite Scientifique Brésilien.

Publications du groupe d'électrodynamique quantique en cavité (juillet 2006-juin 2007)

1. S. Haroche et J.-M. Raimond, « Exploring the quantum : Atoms, cavities and Photons », 612 pages, Oxford University Press (paru en août 2006).
2. T. Nirrengarten, A. Qarry, C. Roux, A. Emmert, G. Nogues, M. Brune, J.-M. Raimond et S. Haroche, « Realisation of a superconducting atom chip », *Phys. Rev. Lett.*, 97, 200405 (2006).
3. T. Meunier, A. Le Diffon, C. Ruef, P. Degiovanni and J.-M. Raimond, « Entanglement and decoherence of N atoms and a mesoscopic field in a cavity », *Phys. Rev. A* 74, 033802 (2006).
4. S. Haroche, « Des chatons de Schrödinger en laboratoire », Spécial Hors série Sciences et Avenir, octobre-novembre 2006.
5. S. Kuhr, S. Gleyzes, C. Guerlin, J. Bernu, U.B. Hoff, S. Deléglise, S. Osnaghi, M. Brune, J.-M. Raimond, S. Haroche, E. Jacques, P. Bosland et B. Visentin, « Ultrahigh finesse Fabry-Pérot superconducting resonator », *Applied Physics Letters* 90, 164101 (2007).
6. S. Gleyzes, S. Kuhr, C. Guerlin, J. Bernu, S. Deléglise, U.B. Hoff, M. Brune, J.-M. Raimond et S. Haroche, « Quantum Jumps of light recording the birth and death of a photon in a cavity », *Nature* 446, 297 (2007).
7. C. Guerlin, J. Bernu, S. Deléglise, C. Sayrin, S. Gleyzes, S. Kuhr, M. Brune, J.-M. Raimond et S. Haroche, « Progressive field state collapse and quantum non-demolition photon counting », *Nature* (sous presse, 2007).
8. S. Haroche, J.-M. Raimond and M. Brune, « Schrödinger cat states and decoherence studies in cavity QED », *Proceedings of the Durban Conference « Theoretical and experimental foundations of modern technologies »*, *Journal de Physique*, à paraître (2007).
9. S. Haroche, M. Brune et J.-M. Raimond, « Measuring the photon number parity in a cavity : from light quantum jumps to the tomography of non-classical field states », *Journal of Modern Optics*, à paraître (2007).
10. S. Haroche : « Histoire de la vie et mort d'un photon : une autre manière de voir », *Lettre du Collège de France*, juin 2007.

