

## Physique quantique

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

### Le cours de l'année 2005-2006

Le cours donné au Collège de France, de janvier à mars 2006 était intitulé « **Intrication et information quantique : où en sont les expériences ?** » 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 d'ions piégés. 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 ou, plus directement, à l'adresse internet [www.cqed.org](http://www.cqed.org).

Un tiers de l'enseignement de la chaire a par ailleurs été donné en Italie, au Laboratoire européen de spectroscopie laser (LENS) de Florence. Cet enseignement à l'étranger était intitulé : « **Quantum information : a review of experiments** ». Il a présenté une synthèse des expériences récentes d'information quantique réalisées avec des atomes dans des cavités, des ions piégés et des atomes froids dans des réseaux optiques. Il a été conclu à l'Université de Florence par une conférence plus générale portant sur les principes de la physique quantique, dont le titre était « **Reality in the quantum world** ».

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](http://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 généralement 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-ondes (électrodynamique quantique en cavité). Nous abordons à partir de l'année 2005-2006 l'étude d'autres systèmes utilisant comme bits quantiques des atomes, ionisés ou neutres, confinés dans des pièges à très basse température. Le cours de cette année, consacré aux ions piégés présentait, avec les principes généraux de cette physique, des expériences récentes réalisées dans deux groupes de recherche, celui de Rainer Blatt à l'Université d'Innsbruck (Autriche) et celui de David Wineland au laboratoire du NIST à Boulder (Colorado). Les thèmes du cours, réparti sur sept leçons, étaient les suivants :

1. Principe des opérations d'information quantique réalisées avec des ions piégés.
2. Outils de la physique des ions (I) : méthodes générales et refroidissement radiatif.
3. Outils de la physique des ions (II) : interaction ion-laser, opérations à un et deux qubits.
4. Outils de la physique des ions (III). Environnements sur mesure et décohérence.
5. Logique quantique avec des ions piégés (I).
6. Logique quantique avec des ions piégés (II).
7. Logique quantique avec des ions piégés (III). Conclusion et introduction du cours 2006-2007.

*La première leçon* a présenté le principe de réalisation des portes quantiques à un ou deux qubits sur un système d'ions à deux niveaux électroniques piégé(s) dans un potentiel harmonique. Nous avons noté l'analogie de ce système avec celui de l'électrodynamique en cavité traité dans les cours antérieurs. Cette introduction est également l'occasion de rappeler un certain nombre de résultats établis précédemment (équation pilote et méthode de Monte Carlo pour décrire la relaxation, description de qubits sur la sphère de Bloch, entropie d'intrication, etc.).

*Dans la deuxième leçon*, nous avons commencé à décrire les méthodes employées pour manipuler des ions piégés en information quantique. Nous avons analysé les propriétés du piège quadripolaire de Paul et montré comment on pouvait y séparer dans le mouvement des ions un micro- et un macro-mouvement. Après avoir donné quelques ordres de grandeur, nous avons décrit le piège de Paul linéaire permettant de confiner une chaîne d'ions couplés entre eux par l'interaction de Coulomb. Nous avons décrit le processus de cristallisation dans un tel piège et analysé les modes de vibration de deux ou trois ions, puis généralisé à un nombre d'ions plus grand. Nous avons ensuite abordé le problème important du refroidissement radiatif des ions, en commençant par le pré-refroidissement Doppler utilisant une transition de grande largeur naturelle. Nous avons évalué la température limite atteinte par ce processus, puis décrit un mécanisme de refroidissement additionnel « par bande latérale rouge » utilisant une transition

de faible largeur naturelle. Nous avons introduit à cette occasion le paramètre de Lamb-Dicke, essentiel dans la description du couplage des ions piégés avec le rayonnement laser. Nous avons enfin analysé qualitativement le refroidissement d'un mode de vibration collectif par action sur un seul ion, ce qu'on appelle le refroidissement par « sympathie ».

*La troisième leçon* a commencé par la description d'autres méthodes de refroidissement laser, adaptées à quelques cas particuliers (refroidissement par bande latérale Raman du *Béryllium* et refroidissement par acquisition d'information (méthode stochastique). Puis nous nous sommes attachés à décrire en détail le hamiltonien d'interaction d'un ion avec un laser, en traitant quantiquement le mouvement de l'ion. Le Hamiltonien a été développé en puissance du paramètre de Lamb-Dicke, ce qui a permis de séparer les termes responsables des résonances de bande centrale (porteuse) et latérales. Les premiers correspondent à l'absorption ou émission d'un photon laser par l'ion, sans changement du nombre de phonons de vibration alors que les seconds sont associés à des changements simultanés des nombres de quanta lumineux et de vibration. L'interaction avec la porteuse permet les opérations à un qubit, équivalentes à une rotation du qubit. L'interaction résonnante sur les premières bandes latérales est décrite par des termes analogues à ceux que l'on rencontre en électrodynamique en cavité, d'où la grande similitude de la physique des ions avec celle des atomes de Rydberg en cavité étudiée dans les années précédentes. Nous avons décrit le phénomène d'oscillation de Rabi d'un ion et analysé qualitativement les opérations d'intrication entre états qubit de l'ion et le mode de vibration. La leçon s'est achevée avec la description d'une expérience d'intrication de deux ions, comportant une mesure d'inégalité de Bell.

*Dans la quatrième leçon*, nous avons montré comment on pouvait exciter et détecter des états cohérents du mouvement d'un ion dans un piège harmonique. Nous avons analysé les oscillations de Rabi d'un ion dans un état cohérent et retrouvé dans ce contexte le phénomène d'effondrement et de résurgence du signal, déjà décrit dans le cadre de l'électrodynamique en cavité. Nous avons analysé une expérience de préparation et de détection de superpositions d'états cohérents, dite de chats de Schrödinger. Nous avons ensuite rappelé comment on pouvait réaliser des environnements artificiels pour l'état de vibration d'un ion piégé, en présence d'une émission spontanée contrôlée du qubit. Nous avons appliqué cette méthode en décrivant des schémas d'excitation laser « protégeant » des états spécifiques (voir aussi cours 2004-2005).

*La cinquième leçon* a abordé la description précise des opérations de logique quantique avec des ions piégés. Nous avons rappelé la définition des portes de phase et control-not et le lien qui existe entre elles. Nous avons exposé le principe de la porte de Cirac et Zoller et sa réalisation partielle par le groupe de Boulder, puis complète par le groupe d'Innsbruck. Nous avons montré comment l'opération de la porte pouvait être analysée en détail par des opérations dites

de tomographie des ions. Nous avons enfin décrit une expérience de téléportation à trois ions réalisée par le groupe d'Innsbruck.

*La sixième leçon* a poursuivi la description des expériences d'intrication d'ions piégés. La définition des états GHZ et W a été donnée ainsi qu'une analyse de la décohérence de ces états par *mesure non lue* de l'un des ions. Nous avons décrit deux études du groupe d'Innsbruck dans lesquelles des états intriqués GHZ et W ont été générés par adressage individuel des ions et étudiés par tomographie. La première, limitée à  $N=3$ , montre comment la mesure non lue d'un des ions affecte l'opérateur densité de l'ensemble (décohérence). Elle démontre également des procédures simples de gomme quantique. La seconde étude a généré et réalisé la tomographie complète d'états W comprenant jusqu'à 8 ions. Nous avons ensuite donné le principe de la porte topologique, basée sur le déplacement en boucle dans son espace de phase d'un mode de vibration collectif accumulant une phase dépendant de l'état interne des ions. Nous avons décrit une expérience du groupe de Boulder illustrant ce principe sur deux ions  $Be^+$ .

*La septième leçon* a porté principalement sur la manipulation collective des ions dans un piège linéaire (expériences du groupe de Boulder). On y a rappelé la description de  $N$  ions manipulés symétriquement comme un moment angulaire  $J=N/2$ . Les états de ce moment angulaire (États de Dicke) ont été analysés. La préparation d'états GHZ par action d'un hamiltonien effectif en  $J_y^2$  a été décrite. Deux manières de réaliser cet hamiltonien par adressage collectif des ions ont été proposées. Une expérience de préparation d'état GHZ à 4,5 et 6 ions a été disséquée (expérience de Boulder). Le cours s'est conclu par une discussion des succès et limites des expériences d'information quantique avec des ions, et par une brève introduction à l'information quantique avec des atomes neutres ultrafroids et piégés. À côté de l'approche « bottom-up » des ions piégés, il existe en effet une approche dite « top-down » qui consiste à fabriquer des réseaux de qubits en partant d'un échantillon formé d'un grand nombre d'atomes très froids (condensat de Bose-Einstein) et en ordonnant ces atomes dans un réseau optique. Ces systèmes seront décrits dans le cours 2006-2007.

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

*L'enseignement donné à Florence* était destiné aux étudiants et aux chercheurs du Laboratoire Européen de Spectroscopie Laser (sauf la dernière leçon destinée à un public plus large). Ce cours a porté sur la description d'expériences d'optique et d'information quantique. Il s'est agi de comparer les méthodes de l'électrodynamique quantique en cavité avec celles des ions piégés et des atomes froids dans des réseaux optiques. Les trois leçons spécialisées étaient intitulées :

1. Quantum logic in Cavity Quantum Electrodynamics (CQED).
2. Quantum logic in ion trap physics.
3. Mesoscopic state superpositions in CQED, ion traps and BEC physics.

### Les séminaires de l'année 2005-2006

Une série de six séminaires accompagnait le cours du Collège de France à Paris en le complétant et en illustrant différents aspects (le septième séminaire, prévu le 13 mars, a été annulé en raison d'une indisposition du conférencier). En voici la liste dans l'ordre où ils ont été donnés :

30 janvier 2005 : *Les condensats au plat pays : gaz de Bose en dimension réduite*, Jean Dalibard, ENS, Paris.

6 février 2005 : *Optical cavity quantum electrodynamics*, Gerhard Rempe, Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Munich, Allemagne.

13 février 2005 : *De l'observation d'atomes neutres individuels au traitement de l'information quantique*, Arno Rauschenbeutel, Université de Bonn, Allemagne.

20 février 2005 : *Decoherence and quantum information processing*, Juan Pablo Paz, Université de Buenos Aires, Argentine.

27 février 2005 : *Correlations and Counting Statistics of an Atom Laser*, Tilman Esslinger, École Polytechnique de Zurich (ETH), Suisse.

6 mars 2005 : *A passion for precision*, Theodor Hänsch, Université de Munich et Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Allemagne.

### Autres conférences et séminaires de Serge Haroche

En dehors de ses cours au Collège de France et à l'étranger, S. Haroche a donné les séminaires, cours et conférences suivants entre juillet 2005 et juin 2006 :

— *Juillet 2005* : Conférencier invité à la conférence « Recent challenges in novel quantum systems », Camerino, Italie : « *Schrödinger cats in cavities* ».

— *Août 2005* : Communication invitée à la conférence « The Photon : its First Hundred Years and the Future », Varsovie (Pologne) : « *A modern version of the Einstein-Bohr Photon Box : exploring the quantum with atoms and photons in a cavity* ».

— *Septembre 2005* : Trois cours sur l'information quantique donnés à l'École d'été de Kochi (Japon).

— *Octobre 2005* : Présentation d'un film sur Einstein à la bibliothèque municipale de Toulouse.

— *Novembre 2005* : Conférence sur l'information quantique à l'École Centrale.

— *Décembre 2005* : Conférencier invité à la réunion annuelle de la Société Portugaise de Physique, Porto, Portugal : « *Exploring quantum physics with atoms and photons in cavities* ».

— *Décembre 2005* : Papier invité à la conférence de clôture de l'année Einstein à Recife, Brésil : « *From Einstein's photon box to quantum information : the physics of atoms and photons in cavities* ».

— *Janvier 2006* : Conférence invitée à QIP'06 (Quantum Information Physics Conference, Paris) intitulée « *Quantum information with Rydberg atoms and photons in cavities : results and perspectives* ».

— *Janvier 2006* : Colloquium à l'Université de Ulm (Allemagne) : « *Quantum information with atoms and photons in cavities : results and perspectives* ».

— *Mars 2006* : Conférencier invité au General March meeting of the American Physical Society : « *Exploring the states of light : from photon counting to quantum information* », Baltimore, États-Unis.

— *Mars 2006* : Invité à CATCOM (Cold Atoms Meets Condensed Matter meeting) « *Cavity QED in perspective : atom and photon in a box as a model for various effects in atomic and condensed matter physics* », Dresde (Allemagne).

— *Mars 2006* : Conférence invitée sur l'Information quantique à la réunion annuelle de l'Institut Universitaire de France (Strasbourg).

— *Mai 2006* : Président de session à la Gordon Conference on Quantum Information, Il Ciocco, Italie.

— *Mai 2006* : Séminaire à l'Université de Vienne, Autriche : « *New advances in Cavity QED* ».

### 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 post-doctoral recruté sur un poste de Maître de conférences au Collège de France, Mademoiselle Angie Qarry (de nationalité israélienne).

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 2004-2005

et nous nous contenterons d'un bref rappel ici, avec un résumé des résultats obtenus au cours de la dernière année.

### a) Champs mésoscopiques délocalisés dans deux cavités

Les champs mésoscopiques formés de quelques dizaines de photons sont des systèmes de taille intermédiaire entre le microscopique et le macroscopique, existant à la limite classique-quantique. La notion de taille d'un système, lorsqu'on évoque cette limite, peut prendre deux sens différents. On peut mesurer cette taille soit par le nombre de particules (c'est l'aspect que nos expériences ont jusqu'à présent étudié), soit par la distance entre les différentes parties du système. On s'intéresse alors au phénomène de la non-localité quantique. L'intrication à distance de deux systèmes physiques conduit à des corrélations entre eux qui ne peuvent être expliquées classiquement. Il s'agit là de la problématique EPR, discutée pour la première fois par Einstein en 1935, et approfondie par les travaux de Bell en 1960. L'impossibilité de décrire classiquement les effets de corrélation instantanée à distance entre deux objets quantiques a été vérifiée par de multiples expériences réalisées sur des photons jumeaux ou des ions piégés. Cette non-localité est macroscopique au sens où elle s'observe pour des objets séparés par des distances qui se mesurent maintenant en kilomètres. Il reste à vérifier ce qu'il en advient lorsque les objets séparés sont constitués chacun d'un grand nombre de particules. Il s'agit donc de marier deux étrangetés en une, d'associer l'étude de la non-localité spatiale à celle des chats de Schrödinger. Pour reprendre la métaphore féline, peut-on préparer un chat à la fois mort en un point de l'espace et vivant dans un autre ? Et si cette préparation est possible, combien de temps mettra-t-elle à s'évanouir ?

Le montage que nous avons préparé pour étudier ces effets sera prêt à fonctionner dès que les ultimes réglages auront été accomplis. Ses constituants essentiels sont les deux cavités supraconductrices ouvertes, formées de miroirs toroïdaux se faisant face, qui stockent des photons micro-onde pendant un temps de l'ordre de 100 millisecondes. Ces cavités sont de loin les résonateurs électromagnétiques ouverts les plus performants qui aient jamais été réalisées. Les photons rebondissent sur les miroirs, séparés de 2,7 centimètres, plus d'un milliard de fois avant de se perdre, ce qui correspond à un parcours de la lumière de plus de trente mille kilomètres. Le progrès par rapport aux cavités utilisées dans nos expériences précédentes, réalisé au cours de la dernière année, est un facteur cent sur la surtension des cavités. Nous avons obtenu ce résultat en améliorant considérablement la technique d'usinage numérique des miroirs, réalisés en cuivre, sur lesquels un dépôt de niobium est fait (il s'agit d'un travail effectué en collaboration avec Éric Jacques, Pierre Bosland et Bernard Visentin du laboratoire du DAPNIA du CEA à Saclay). Les miroirs ne sont pas percés, contrairement aux cavités antérieures, ce qui fait que les champs doivent y être introduits par diffraction sur les bords et détectés à l'aide des atomes traversant les cavités. Nous avons

caractérisé plusieurs paires de miroirs et vérifié que nous contrôlons le processus de fabrication, en obtenant de façon répétitive des durées de vie de photons très longues et comparables. Il nous reste à étudier la dégradation de ces miroirs après un cycle de fonctionnement du cryostat et à améliorer la procédure d'accord basée sur un déplacement très fin réalisé à l'aide de butées piezo-électriques. Ces derniers ajustements, demandant des recyclages thermiques complets de l'expérience, sont très longs et expliquent pourquoi nous n'avons pu encore aborder les expériences proprement dites (pour une description des expériences que nous comptons faire, voir résumé des cours et travaux précédent).

### **b) Expérience de puce à atome cryogénique**

Le nouveau montage expérimental destiné à piéger des atomes au voisinage d'un circuit supraconducteur a été achevé au cours de l'année écoulée. La physique que nous comptons étudier avec ce système a été évoquée dans le résumé des travaux de l'année 2003-2004. À ce jour, nous avons réussi à piéger un échantillon d'environ un million d'atomes de rubidium, à une température de quelques dizaines de microkelvins, à une distance de quelques centaines de microns d'un circuit supraconducteur conduisant un courant de 0,4 Ampères. C'est la première fois qu'une puce à atome est réalisée avec une technologie supraconductrice. Une fois les propriétés de ce piège optimisées, nous allons essayer de lui appliquer la méthode de refroidissement évaporatif afin d'obtenir un micro condensat de Bose-Einstein piégé au voisinage du supraconducteur. Un tel dispositif doit se prêter à des expériences de démonstration du traitement de l'information et à des études de décohérence. Il devrait être possible de réaliser avec un tel micro-condensat des états de type chat de Schrödinger, suivant des méthodes décrites dans nos cours du Collège de France.

### **Rédaction d'un livre**

Une part essentielle du travail de Serge Haroche et Jean-Michel Raimond au cours de cette année a été consacrée à l'achèvement de la rédaction d'un livre intitulé « **Exploring the Quantum : Atoms, Cavities, and Photons** », qui doit paraître en août 2006 à Oxford University Press. Cet ouvrage de 612 pages, destiné aux étudiants et aux chercheurs, est largement inspiré par les cours donnés par S. Haroche au Collège de France depuis 2001 et par les recherches menées par S. Haroche, J.-M. Raimond et leurs collègues au département de Physique de l'ENS. Les buts de ce livre sont multiples. Il se présente comme une introduction à l'optique quantique destinée à ceux que l'information quantique intéresse. Il décrit la physique des systèmes quantiques ouverts en prenant un point de vue inspiré de l'information quantique. Il analyse des expériences qui illustrent directement les concepts quantiques, en proposant des exemples qui peuvent être utilisés dans un enseignement général de la physique quantique et servir de

points de départ pour des problèmes de physique variés. Il présente enfin de façon unifiée différents domaines de l'optique quantique appliqués à l'information quantique : l'électrodynamique en cavité, la physique des ions piégés et celle des atomes froids dans des réseaux optiques. Les titres des neuf chapitres donnent une idée plus précise de son contenu :

1. *Unveiling the quantum* : une présentation générale des succès de la physique quantique au XX<sup>e</sup> siècle et de la problématique des expériences de pensée.
2. *Strangeness and power of the quantum* : les concepts quantiques (superposition, complémentarité, intrication et décohérence) et leur rôle dans le traitement quantique de l'information.
3. *Of spins and springs* : une introduction à l'optique quantique vue comme une physique de systèmes à deux niveaux (spins) en interaction avec des modes du champ décrits comme des oscillateurs (springs).
4. *The environment is watching* : l'évolution des systèmes ouverts (équation pilote et approche de Monte Carlo) décrite comme une intrication avec l'environnement.
5. *Photons in a box* : une revue de l'électrodynamique en cavité, incluant une description détaillée du principe des expériences réalisées avec atomes de Rydberg et des cavités micro-onde supraconductrices.
6. *Seeing light in subtle ways* : description d'expériences sensibles au champ d'un seul photon (mesure non destructive de photons, mesure de fonction de Wigner du champ).
7. *Taming Schrödinger's cat* : analyse d'expériences de préparation et détection de superpositions mésoscopiques (chats de Schrödinger) d'états du champ.
8. *Atoms in a box* : description d'expériences d'information quantique avec des ions piégés.
9. *Entangling matter waves* : analyse d'expériences d'intrication d'atomes froids dans des réseaux optiques.
10. *Appendice* : représentation du champ dans l'espace des phases : fonctions Q et W de Wigner.

#### **Publications du groupe d'électrodynamique quantique en cavité (juillet 2005-juin 2006)**

1. S. Gleyzes, S. Kuhr, C. Guerlin, S. Osnaghi, M. Brune, J.-M. Raimond, S. Haroche, E. Jacques, P. Bosland et B. Visentin, « Ultra-high finesse Fabry-Perot microwave resonator for fundamental studies in Cavity QED », soumis à Phys. Rev. Lett. (2006).
2. J.-M. Raimond, T. Meunier, S. Gleyzes, P. Maioli, A. Auffeves, G. Nogues, M. Brune, S. Haroche, in « Proceedings of the XVII international conference on laser spectroscopy », E. Hinds, A. Ferguson et E. Riis eds., world scientific 2005 p. 371 : « Giant atoms for explorations of the mesoscopic world ».

3. J.-M. Raimond and S. Haroche, Proceedings of the Poincaré Seminar, Progress in mathematical physics, Birkhauser, in press, B. Duplantier *et al.* eds : « Monitoring the decoherence of mesoscopic quantum superpositions in a cavity ».
4. D. Vitali, S. Kuhr, M. Brune et J.-M. Raimond, « A cavity QED scheme for Heisenberg limited interferometry », Journal of Modern Optics, à paraître (2006).
5. S. Haroche et J.M. Raimond, « Exploring the quantum : Atoms, Cavities and Photons », 612 pages, Oxford University Press (à paraître août 2006).