

Physique quantique

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

Le cours de l'année 2002-2003

Il était intitulé « *Décohérence et limite classique quantique* ». Chaque leçon était accompagnée d'une présentation par ordinateur (powerpoint) consultable dès le jour du cours sur les sites internet du Collège de France et de l'École Normale Supérieure.

Le cours de l'année 2002-2003 s'inscrit dans un enseignement pluri-annuel portant sur l'information quantique en général. La possibilité de manipuler de façon quantiquement cohérente des objets microscopiques simples (atomes, photons) et la généralisation possible de ces expériences à des systèmes mésoscopiques de plus en plus complexes ouvrent la voie au traitement quantique de l'information, un domaine de la science à la frontière entre physique et informatique qui suscite depuis quelques années un grand intérêt théorique et expérimental.

Le cours de l'année 2001-2002 avait présenté de façon générale ce domaine de recherche en définissant les concepts importants d'intrication quantique, de complémentarité et de décohérence et en décrivant des opérations simples de communication et de calcul quantiques. Il est alors apparu clairement que la décohérence induite sur les systèmes quantiques par leur couplage inévitable avec l'environnement était un phénomène posant un défi redoutable à la réalisation de machines d'information quantique efficaces.

Par ailleurs, et sur un plan plus fondamental, la décohérence est un processus essentiel dans la compréhension de la limite classique-quantique. Elle joue en effet un rôle important dans la suppression, au niveau macroscopique, de tous les effets « étranges » de la physique quantique et permet, au moins partiellement, d'expliquer pourquoi la nature quantique du monde se trouve généralement voilée à nos yeux.

L'étude de la décohérence, qui est restée longtemps purement théorique, devient maintenant accessible aux expériences. On peut en effet préparer des

superpositions d'états impliquant des nombres de particules de plus en plus élevés, et observer, pour ainsi dire en temps réel, la disparition de leur cohérence induite par le couplage de ces systèmes avec un environnement bien défini. Le but du cours de l'année 2002-2003, et sans doute de son prolongement en 2003-2004, est de décrire ces systèmes mésoscopiques cohérents, de montrer comment on peut les préparer et étudier leur évolution et de faire comprendre leur extrême fragilité.

La première leçon a présenté un panorama général des superpositions mésoscopiques d'état en optique quantique. On y a montré comment ces superpositions pouvaient être générées, soit avec des photons, soit avec des atomes. Le lien avec l'informatique quantique a également été précisé, en montrant que ces superpositions peuvent être préparées à l'aide de portes logiques dans lesquelles un « bit quantique » contrôle l'état final d'un grand nombre de bits cibles. La fragilité de ces superpositions a également été évoquée et expliquée qualitativement à l'aide d'images physiques simples. Il a été montré que les superpositions mésoscopiques s'intriquent de façon beaucoup plus forte avec l'environnement que les états classiques et ce résultat a été introduit comme un critère général pour définir le caractère classique ou non d'un état quantique donné a priori.

La deuxième leçon a rappelé les principes de l'optique quantique. C'est en effet dans ce domaine que les superpositions mésoscopiques cohérentes ont été étudiées et préparées de la façon la plus convaincante et il est donc très utile de comprendre les concepts généraux de l'optique quantique pour étudier ces superpositions. La leçon a commencé par un rappel de la description d'un champ en terme de photons, en s'appuyant sur l'analogie entre un mode du rayonnement et un oscillateur harmonique. Les principales observables du champ (nombre de photon, quadratures) ont été décrites ainsi que certains états importants, dont les états de Fock et les états cohérents. Ces derniers jouent un rôle essentiel dans l'étude de la limite classique-quantique. Ce sont en effet les états quantiques qui correspondent à l'image la plus classique possible d'un oscillateur. Ce sont également les états que l'on prépare naturellement lorsque l'on couple un mode quantique à un courant classique. Nous avons rappelé en détail les propriétés essentielles de ces états. Nous avons également décrit leurs superpositions, que l'on appelle généralement en optique quantique des états « chats de Schrödinger », par référence à la fameuse métaphore par laquelle ce physicien avait pour la première fois introduit dans une discussion physique le problème des superpositions macroscopiques. La leçon s'est achevée sur un rappel rapide de la description du couplage atome-matière qui joue un rôle essentiel dans les processus de génération des champs et de leur détection.

La troisième leçon a abordé l'analyse des expériences d'interférence en optique quantique. Elle a commencé par la description des lames séparatrices linéaires, qui sont des ingrédients essentiels de ces expériences. Ce sont en effet ces lames qui séparent et recombinent les faisceaux, en distribuant les photons dans leurs deux voies de sortie. Nous avons rappelé comment cette distribution de photons

s'effectuait et montré comment la combinaison de deux lames permettait de construire l'interféromètre de Mach-Zehnder, prototype simple d'appareil qui a permis de réaliser nombre d'expériences fondamentales en optique quantique. Nous avons rappelé certaines de ces expériences, démontrant des effets d'interférence à un ou à deux photons. Dans le premier cas, l'interférence correspond au passage d'un photon unique par deux chemins différents à la fois. Dans le second, c'est le système combiné des deux particules qui suit deux chemins différents dans l'espace des états avant que les amplitudes de probabilité correspondantes ne se recombinent dans le signal de coïncidence détecté. Nous avons insisté sur le fait que l'interférence impliquait non pas la ou les particules elles mêmes, mais plutôt des amplitudes de probabilité associées au système. Nous avons aussi montré comment une lame séparatrice permettait d'effectuer une mesure homodyne d'une quadrature du champ et illustré cette méthode sur la mesure des quadratures d'un état « chat de Schrödinger ».

La quatrième leçon a abordé le problème des séparatrices non-linéaires en optique quantique. Après avoir remarqué que la distribution des photons réalisée dans les voies finales d'une séparatrice linéaire ne permettait en aucun cas de réaliser une superposition mésoscopique de type « chat » de Schrödinger, nous avons montré qu'une modification simple de la lame, la transformant en dispositif non linéaire « décomposant » un photon en plusieurs photons finals dont la somme des fréquences est égale à celle de la particule initiale, permettait de réaliser des superpositions cohérentes de plusieurs photons dans des modes différents. En combinant deux lames non-linéaires dans un interféromètre de Mach-Zehnder non linéaire, nous avons montré que ces superpositions avaient des signatures interférométriques différentes de celle donnée par une particule unique. Nous avons enfin décrit une réalisation pratique de telles lames non-linéaires dans une expérience impliquant un ion piégé. Dans ce cas, les photons sont remplacés par des phonons, excitations de modes de vibration de l'ion. On peut réaliser sur ces phonons l'analogie d'une expérience de Mach-Zehnder non linéaire et observer les signaux caractéristiques de superpositions impliquant deux ou trois phonons.

La cinquième leçon a décrit les états du champ dans l'espace des phases, en introduisant deux fonctions importantes définies dans cet espace, la fonction Q et la fonction W de Wigner. Ces fonctions permettent de décrire de façon imagée et intuitive des états de Fock, des états cohérents et leurs superpositions. Les propriétés essentielles de la fonction W ont été rappelées. Une méthode générale, dite « tomographique » de mesure de cette fonction a été décrite. Le lien avec la fonction de Wigner introduite en physique statistique comme une quasi distribution de probabilité dans l'espace des phases a été rappelé.

La sixième leçon a abordé l'étude des ondes de matière (optique atomique). Depuis quelques années on sait réaliser des échantillons ultra froids d'atomes formant des condensats de Bose Einstein, dans lesquels un grand nombre d'atomes se trouvent tous dans la même fonction d'onde, ayant une étendue

quasi macroscopique. Ces ondes de matière géantes présentent de nombreuses analogies avec les ondes laser. Elles ont des propriétés de cohérence très semblables. L'optique atomique qui se développe de façon très active permet de faire des expériences dans lesquelles les atomes remplacent les photons des ondes lumineuses, avec des applications potentielles fascinantes. La leçon a rappelé comment ces condensats étaient fabriqués et étudiés et a montré certaines analogies entre optique photonique et « optique atomique ». Pour cela, il est commode de se placer dans le formalisme de la seconde quantification, qui introduit les opérateurs de création et d'annihilation d'atomes jouant en optique atomique le rôle que jouent en optique quantique les opérateurs habituels de création et d'annihilation de photons. Nous avons décrit l'équivalent atomique des lames séparatrices de l'optique quantique, réalisables en exploitant un effet Josephson entre deux modes de bosons condensés. Nous avons décrit la cohérence de systèmes de bosons à deux modes et analysé des expériences d'interférence entre condensats récemment réalisées.

La septième leçon a été consacrée à l'étude des non-linéarités dans les condensats de Bose Einstein, dues aux interactions entre atomes. Ces interactions, liées aux collisions élastiques dans l'échantillon, ont pour effet d'introduire un terme non linéaire dans l'équation décrivant l'évolution des ondes de matière tout à fait analogue à la non-linéarité produite dans la propagation de photons par un indice de réfraction dépendant de l'intensité (effet Kerr). Mais, alors que l'effet Kerr nécessite l'introduction sur le parcours des photons d'un milieu matériel extérieur au système, les non-linéarités du condensat sont quant à elles intrinsèques. L'optique atomique, contrairement à l'optique photonique est donc spontanément non-linéaire. La phase des ondes de matière en est affectée. Elle présente des phénomènes d'étalement et de résurgence que nous avons décrits. Des expériences récentes ayant mis en évidence ces effets non-linéaires intrinsèques aux condensats ont été décrites. La possibilité d'utiliser ces effets pour préparer et étudier des états « chats de Schrödinger » atomiques a été mentionnée.

Les huitième et neuvième leçons ont été consacrées aux chats de Schrödinger produits dans des expériences d'électrodynamique quantique en cavité. Un atome interagit avec le champ stocké dans une cavité de grande surtension et son couplage fortement non-linéaire avec le champ produit des états photoniques intriqués avec l'atome et présentant des composantes différentes, séparées par une grande distance dans l'espace des phases. La décohérence de ces superpositions peut être étudiée en envoyant dans la cavité un deuxième atome, dit atome « sonde », sensible aux cohérences laissées dans le champ par le premier atome. Nous avons plus spécifiquement décrit le cas où l'atome et le champ sont résonnants dans la huitième leçon et le cas où leur interaction est non-résonnante (dispersive) dans la neuvième. En fait, la matière de ces deux dernières leçons est directement liée aux travaux de recherche effectués cette année dans l'équipe d'électrodynamique quantique en cavité de l'ENS. Le sujet du cours de cette année a d'ailleurs été une inspiration pour la conception de nouvelles expériences,

réalisées dans les derniers mois, après que ce cours ait été donné (voir partie « activités de recherche » de ce rapport).

Les séminaires de l'année 2002-2003

Une série de neuf séminaires, sous le titre général de « Manipulation de systèmes quantiques simples : aspects théoriques et expérimentaux », accompagnait les cours en le complétant et en illustrant différents aspects. En voici la liste dans l'ordre où ils ont été donnés :

- Gérald Bastard, Département de Physique de l'ENS (LPMC)
Mécanismes de décohérence dans les boîtes quantiques de semi-conducteurs.
- Asher Peres, Technion, Haifa, Israël
L'Information quantique et la relativité.
- William Phillips, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, États-Unis
Bose-Einstein condensates in optical lattices : toward neutral atom qubits.
- David Wineland, National Institute of Standards and Technology, Boulder, États-Unis
Quantum information processing in ion traps.
- Fritz Haake, Université d'Essen, Allemagne
Décohérence ou pourquoi le monde macroscopique se comporte classiquement.
- Eugene Polzik, Université d'Aarhus, Danemark
Entanglement and quantum memory with atomic ensembles.
- Edward Hinds, Imperial College (Londres)
Manipulating cold atoms in microscopic traps.
- Michel Brune, ENS, Paris
Mesure de fonctions de Wigner de champs non-classiques en électrodynamique en cavité.
- Anton Zeilinger, Université de Vienne, Autriche
Quantum Superposition and Decoherence with Hot Buckyballs and Other Macromolecules.

Symposium « Les atomes froids et l'information quantique »

Ce symposium, qui a eu lieu le 7 février 2003, a été organisé en commun avec la Chaire de Physique Atomique et Moléculaire (Claude Cohen-Tannoudji, Professeur). Il s'agissait de faire le point sur le développement récent des expériences réalisées avec des atomes froids, dans le but de mettre en œuvre différents aspects du traitement quantique de l'information. Le thème du Symposium recouvrait ainsi les sujets abordés au cours des dernières années dans les enseignements des deux chaires. Huit conférenciers, venus de France et de l'étranger, ont couvert

ce vaste sujet et présenté des exposés qui ont suscité un grand intérêt dans l'auditoire, ainsi que des discussions animées. Voici le programme de cette journée :

François Bardou (Strasbourg) :

Le refroidissement laser en raie étroite.

Immanuel Bloch (Munich) :

Controlled coherent collisions with neutral atoms in optical lattices.

Ignacio Cirac (Munich) :

Quantum information processing in optical lattices.

Rudolph Grimm (Innsbruck) :

Bose-Einstein condensation of optically trapped cesium.

William Phillips (NIST-Gaithersberg) :

Experiments with laser-like atoms.

Christophe Salomon (ENS-Paris) :

Gaz de Fermi ultra-froids.

Ferdinand Schmidt-Kaler (Innsbruck) :

Quantum information with trapped ions : basics, quantum gates and quantum algorithms.

Jacques Vigué (Toulouse) :

Interférométrie atomique sur un jet thermique de Lithium.

Autres conférences et séminaires de Serge Haroche

En dehors des cours au Collège de France, Serge Haroche a donné les séminaires, cours et conférences suivants, entre juillet 2002 et juin 2003 :

Juillet 2002 : Conférence invitée à la réunion de la Société Française de Physique, Bourges, France.

Juillet 2002 : Conférence invitée à la conférence de Physique théorique TH2002, UNESCO, Paris.

Juillet 2002 : Conférence invitée à QCMC'02 (quantum communication, measurement and computing), Boston, USA.

Septembre 2002 : Conférence invitée au workshop « Quantum Decoherence and Entropy in Complex Systems », Piombino, Italie.

Octobre 2002 : Conférence invitée au Symposium « Lorentz, Zeeman and the electron », Leiden, Pays-Bas.

Novembre 2002 : Conférence invitée au Meeting « Quantum Information » de la Royal Society, Londres, Grande Bretagne.

Février 2003 : Conférence invitée à FRISNO, Colloque Franco-Israélien d'Optique non linéaire, Les Houches, France.

Mars 2003 : Conférence invitée dans la série des Focus seminar du Lawrence Livermore National Laboratory sur l'Information Quantique, Livermore, Californie (USA).

Avril 2003 : Séminaire au National Institute for Standards and Technology, Boulder, Colorado (USA).

Mai 2003 : Colloquium à l'Université de Hanovre (Allemagne).

Mai 2003 : Conférence de la Société Française de Physique, Nice, France.

Mai 2003 : Séminaire au Laboratoire de Physique de la Matière Condensée, Université de Sophia-Antipolis, Nice, France.

Activités de recherche

Le travail de recherche de Serge Haroche se déroule au sein du Laboratoire Kastler Brossel (LKB) de l'École Normale Supérieure. Il y co-dirige, avec ses collègues Jean-Michel Raimond (Professeur à Paris VI) et Michel Brune (Directeur de recherche au CNRS) une équipe de chercheurs et d'étudiants (groupe d'électrodynamique quantique en cavité). Un des chercheurs du groupe, Perola Milman, a bénéficié au cours des deux dernières années d'un poste d'ATER du Collège de France. Le thème général des recherches de ce groupe porte sur l'étude des effets quantiques (intrication, complémentarité, décohérence) et de leurs applications dans des systèmes constitués d'atomes en interaction avec des photons dans une cavité. Nous ne donnerons pas ici une description détaillée de ces expériences qui fait l'objet d'un rapport rédigé pour le CNRS dans le cadre du LKB. Nous indiquerons simplement ici quels ont été les résultats les plus marquants depuis juillet 2002.

Deux séries d'expériences ont été poursuivies au cours de cette année. La première, réalisée avec des atomes de Rydberg circulaires traversant un à un une cavité supraconductrice contenant un champ cohérent de quelques dizaines de photons, a permis de préparer des superpositions mésoscopiques d'états de taille beaucoup plus grande que celles réalisées jusqu'à présent. Elle a également montré le rôle joué dans la préparation de ces états par deux phénomènes très importants d'optique quantique : l'« effondrement » et la « résurgence » des oscillations de Rabi. Un bref rappel est essentiel pour comprendre de quoi il s'agit. Lorsque un atome à deux niveaux est couplé à un champ résonnant, les populations de ses deux niveaux se mettent à osciller à une fréquence proportionnelle à l'amplitude du champ. Cette oscillation disparaît au bout d'un certain temps (effondrement ou « collapse » en anglais), en raison de la fluctuation d'origine quantique de l'amplitude du champ. Après un temps beaucoup plus long, proportionnel à la racine du nombre de photons, l'oscillation renaît ensuite (résurgence ou « revival » en anglais). Cette renaissance est due au caractère discret du champ, à sa granularité qui conduit à une remise en phase des oscillations de Rabi associées aux divers nombres de photons.

Ce qui arrive au champ au cours de ce processus est également remarquable. Ayant initialement une certaine phase, il se scinde en deux composantes de phases différentes, se séparant dans l'espace des phases. Chacune de ces composantes est corrélée à un état atomique bien défini, associé à une valeur moyenne non nulle du dipôle de l'atome. La séparation du champ en deux composantes conduit à l'apparition d'un état de type « chat de Schrödinger ». C'est également cette séparation qui est responsable de l'effondrement de l'oscillation de Rabi. Celle-ci peut en effet être vue comme un effet d'interférence quantique impliquant les deux états atomiques associés aux dipôles différents. Les deux composantes du champ, corrélées à ces deux états, portent une information sur l'état de l'atome qui est incompatible avec l'existence de ces interférences (principe de complémentarité). La résurgence de l'oscillation est, quant à elle, due à la remise en phase périodique des deux composantes du champ qui tournent en sens inverse dans le plan de phase. Lorsqu'elles reviennent en phase après avoir chacune fait un demi-tour, l'information sur l'état de l'atome est effacée et l'oscillation de Rabi peut à nouveau être observée (effet de « gomme » quantique).

Nous avons observé ces phénomènes dans des expériences illustrant de façon remarquable l'idée de complémentarité et démontrant la possibilité d'utiliser ces effets pour préparer des chats de Schrödinger de grande taille et étudier leur décohérence. Précisons que c'est la préparation des chats décrits au début de ce rapport qui a donné l'idée de ces expériences. On voit ainsi l'intérêt d'un enseignement directement orienté vers la recherche pour la stimulation de la réflexion scientifique.

La seconde série d'expériences du groupe d'électrodynamique en cavité vise à préparer des atomes de Rydberg ultra-froids, piégés dans des trappes microscopiques, pour étudier leur interaction avec des surfaces métalliques, les coupler entre eux afin de démontrer des opérations de logique quantique, ou encore les envoyer un à un dans des cavités pour réaliser de nouvelles expériences d'électrodynamique en cavité. L'année a été consacrée à la poursuite de la mise en œuvre du montage, avec la construction d'un cryostat à Helium, la réalisation de piège magnéto-optiques pour atomes froids, l'étude théorique des pièges électriques à atomes de Rydberg, la mise au point de détecteurs atomiques nouveaux utilisant des fils supraconducteurs comme surface sensible.

Signalons également le travail théorique de Perola Milman (ATER collègue de France) au cours de cette année. Elle a poursuivi ses études sur la possibilité de réaliser des algorithmes quantiques dans des expériences d'Électrodynamique quantique en cavité, sur l'optimisation du clonage quantique dans ces expériences et sur l'analyse topologique de la phase dans des systèmes de bits quantiques intriqués.

Mentionnons enfin le travail de thèse effectué par Romain Long, un étudiant du LKB, à l'Université de Munich, dans le cadre d'une collaboration entre les

groupes de recherche de Serge Haroche et de Valérie Lefèvre (Paris) et celui des Professeurs T.W. Hänsch et J. Reichel (Munich). Il s'agit de coupler un atome très froid au champ optique d'une microsphère de silice de grande surtension. Le but de l'expérience est de réaliser des tests d'électrodynamique quantique en cavité dans le domaine optique et de développer de nouveaux outils pour la communication et l'information quantiques. Les deux groupes ont décidé de joindre leurs compétences respectives dans la manipulation des microsphères (Paris) et dans celle des atomes froids piégés (Munich). Le travail de Romain Long a déjà montré qu'il était possible de faire coexister dans un même montage à ultra-vide une microsphère accordable en fréquence et un « convoyeur » à atomes ultra-froids. La propagation des atomes froids jusqu'au voisinage de la microsphère doit être testée dans les mois qui viennent.

Distinctions

Serge Haroche a reçu le quatrième Prix International de Communication Quantique décerné au cours de la 6^e Conférence Internationale sur la communication, la mesure et le calcul quantiques (Boston-juillet 2002). Il a également reçu le Prix d'Électronique quantique et d'Optique 2002 de la Société Européenne de Physique.

Publications des membres du groupe d'électrodynamique quantique en Cavité (juillet 2002-juin 2003)

P. Bertet, A. Auffeves, P. Maioli, S. Osnaghi, T. Meunier, M. Brune, J.M. Raimond et S. Haroche, « Direct measurement of the Wigner function of a one photon Fock state in a cavity », *Phys. Rev. Lett.*, 89, 200402-1 (2002).

S. Haroche, « Quantum Information with atoms and photons in a cavity : entanglement, complementarity and decoherence studies », *Physica Scripta T102*, 128 (2002).

P. Milman et R. Mosseri, « Topological phase for entangled qubits », *Phys. Rev. Lett.*, 90, 230403 (2003).

P. Milman, H. Ollivier et J.M. Raimond, « Universal quantum cloning in Cavity QED », *Phys. Rev. A.*, 67, 012314 (2003).

P. Milman, H. Ollivier, F. Yamagushi, M. Brune, J.M. Raimond et S. Haroche, « Simple quantum algorithms in Cavity QED », *J. Mod. Optics*, 50, 901 (2003).

S. Haroche, « Manipulating quantum entanglement and generating nonclassical states with atoms and photons in a cavity », dans « Proceedings of the 6th International Conference on quantum communication, Measurement and computing », J.H. Shapiro et O. Hirota éditeurs, Rinton Press, Princeton (2003).

S. Haroche, « Entanglement experiments in Cavity QED » dans Proceedings of « Quantum Interferometry IV », in *Fortschritte der Physik* (à paraître, 2003).

S. Haroche, « Breeding non-local Schrödinger cats : a thought experiment to explore the quantum-classical boundary » dans « *Science and ultimate reality* », J.D. Barrow, P.W.C. Davies et C.L. Harper editeurs, Cambridge University Press (à paraître).

S. Haroche, « Quantum Information in cavity quantum electrodynamics : logical gates, entanglement engineering and “ Schrödinger cat ” states », Phil. Trans. R. Soc., London (à paraître, 2003).

S. Haroche, Vérité et réalité du monde quantique microscopique, dans « *La vérité dans les sciences* », J.P. Changeux éditeur, Odile Jacob, 2003.

A. Auffeves, P. Maioli, T. Meunier, S. Gleyses, 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. (soumis, juillet 2003).