

Physique quantique

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

La Leçon inaugurale de la chaire

Présentée le 13 décembre 2001, elle a dressé un panorama général de la physique quantique en insistant sur ses succès remarquables au cours du XX^e siècle ainsi que sur les problèmes d'interprétation qu'elle continue à poser. Les idées essentielles de superposition des états et d'intrication quantique ont été analysées. Un aperçu général du traitement quantique de l'information, qui devait faire l'objet du cours de l'année, a été présenté à cette occasion.

Le cours de l'année 2001-2002

Il était intitulé « *Intrication, complémentarité et décohérence : des expériences de pensée à l'information quantique* ». Chaque leçon était accompagnée d'une présentation par ordinateur (powerpoint) consultable dès le jour du cours sur le site internet de l'École Normale Supérieure.

La manipulation d'objets microscopiques simples (atomes, molécules, photons...) et la généralisation de ces expériences à des systèmes mésoscopiques de plus en plus complexes constituent un des domaines les plus dynamiques de la physique quantique actuelle. Ces « expériences de pensée » devenues réelles éclairent d'un jour nouveau les concepts fondamentaux de la théorie. Ces études sont également stimulées par le développement théorique du traitement quantique de l'information, lui-même largement influencé par les concepts de l'information classique : les systèmes quantiques simples (à deux niveaux) peuvent être considérés comme des porteurs de « bits » quantiques d'information (qubits) et leur manipulation permet en principe d'accomplir des tâches impossibles avec des bits classiques.

L'objet général du cours, présenté dans la *première leçon*, était d'introduire de façon générale ce thème de recherche nouveau, en posant un certain nombre

de questions auxquelles le cours de l'année et ceux des années suivantes chercheront à donner des réponses plus précises :

— Comment interpréter le formalisme de la théorie et en particulier qu'est-ce qu'une mesure idéale en physique quantique ?

— Qu'est-ce que l'intrication quantique et son lien avec la non-localité ?

— Comment quantifier précisément le degré d'intrication d'un système dans différents cas (systèmes bi-ou multi-parties, cas purs ou mélanges statistiques) ?

— Comment décrire la perte d'intrication dans les systèmes quantiques de grande taille (phénomène de décohérence) ?

— Comment protéger la « bonne » intrication (celle que l'on veut contrôler et utiliser) de la « mauvaise » (celle qui implique le système et son environnement et qui cause la décohérence) ?

— Comment utiliser l'intrication pour communiquer, partager de l'information et calculer de façon plus efficace ou plus rapide que par des voies classiques ?

— Comment réaliser ces opérations expérimentalement (choix des systèmes de qubits, réalisation des opérations élémentaires, possibilité d'intégrer un grand nombre de bits...) ?

Dans toutes ces questions, la notion d'intrication quantique, que Schrödinger considérait être l'essence même de la théorie quantique, joue un rôle fondamental. Cette notion a été définie au cours de cette première leçon, en l'illustrant par des exemples simples venant de la physique atomique.

La *deuxième leçon* a conduit à préciser de façon plus quantitative la notion d'intrication en introduisant le formalisme de la décomposition de Schmidt et en discutant du lien entre intrication et non-localité, qui a mené naturellement à une analyse rapide des inégalités de Bell et de leur signification (impossibilité d'interpréter les corrélations quantiques observées dans les systèmes intriqués par des arguments classiques de type « variables cachées »). La leçon s'est achevée par une analyse du rôle important de l'intrication dans une mesure quantique.

Les *troisième et quatrième leçons* ont discuté du lien entre intrication, décohérence et complémentarité en décrivant et analysant des situations simples d'interférence et de mesure quantiques. Le concept de complémentarité exprime le fait que les aspects corpusculaire ou ondulatoire des systèmes physiques se manifestent selon que l'appareillage expérimental permet ou non de déterminer le « chemin » suivi par le système. Si une information sur ce chemin peut se retrouver dans l'environnement, alors l'aspect corpusculaire domine et on ne peut observer d'interférences quantiques. Il y a dans ce cas nécessairement intrication du système étudié avec cet environnement. Ce phénomène se produit de façon tout à fait générale lorsque les systèmes étudiés sont assez « grands » et il porte alors le nom de décohérence. Un modèle simple de décohérence, entièrement calculable a été présenté (couplage d'un oscillateur harmonique à un réservoir d'oscillateurs élémentaires).

La *cinquième leçon* a abordé la question de la mesure de l'intrication en introduisant les concepts d'entropie de Shannon et de von Neumann. Dans un système à deux parties, l'entropie associée à chaque partie (calculée à partir de leur matrice densité réduite) constitue une mesure du degré d'intrication. L'existence d'une intrication entre les deux parties apparaît ainsi comme une perte d'information « locale », l'information se retrouvant dans les corrélations non locales entre les parties. Le lien essentiel entre intrication, second principe de la thermodynamique et théorie de l'information a été présenté.

La *sixième leçon* a montré de façon générale comment le partage de paires de particules intriquées entre deux parties (« Alice et Bob ») permet d'effectuer des opérations impossibles en information classique (partage sûr de clé cryptographique, téléportation quantique, codage dense). Le problème de la distillation de paires de qubits y a également été abordé.

Les *septième et huitième leçons* ont constitué une introduction au calcul quantique. On y a décrit des portes logiques élémentaires, montré que les portes à deux qubits étaient universelles, dans le sens que toutes les opérations unitaires sur un système de qubits peuvent être réalisées à l'aide de combinaisons de telles portes, associées à des transformations unitaires à un seul bit. On a enfin analysé un certain nombre de problèmes simples, posés sous forme d'« oracles », que la logique quantique, basée sur l'exploitation des interférences quantiques et de l'intrication, permet de résoudre plus rapidement que ne le fait un ordinateur classique (problèmes de Deutsch-Josza, de Simon et de Grover).

Les *neuvième et dixième leçons* ont abordé l'aspect expérimental de ce champ de recherche en décrivant de façon rapide un ensemble d'expériences récemment réalisées à l'ENS, dans lesquelles les qubits sont portés par des atomes de Rydberg traversant un à un une cavité supraconductrice contenant un petit nombre bien contrôlé de photons micro-onde. L'intrication entre les atomes et le champ de la cavité peut être manipulée avec précision et des portes quantiques simples réalisées. Ces expériences montrent à la fois les possibilités et les limites actuelles du traitement quantique de l'information en soulignant la distance considérable qui sépare encore les expériences possibles des rêves d'applications futures.

Les séminaires de l'année 2001-2002 :

Une série de huit séminaires, sous le titre général de « *Traitement quantique de l'information : théorie et expériences* », accompagnait le cours en le complétant et en illustrant différents aspects. En voici la liste, dans l'ordre où ils ont été donnés :

- Peter Zoller, Université d'Innsbruck
Quantum information with atomic ensembles.

- Luiz Davidovich, Université fédérale de Rio de Janeiro
Décohérence et mesure de l'état du champ en optique quantique.
- Daniel Estève, SPEC-CEA, Saclay
Implémentation de bits quantiques dans des circuits électroniques supraconducteurs.
- Nicolas Gisin, Université de Genève
Communication quantique : jongler avec des paires de photons dans des fibres optiques.
- Philippe Grangier, Institut d'Optique, Orsay
Blocage collisionnel et statistiques sub-poissoniennes dans un piège dipolaire microscopique.
- Peter Knight, Imperial College, Londres
Quantum entanglement in a dissipative environment.
- Rainer Blatt, Université d'Innsbruck
Quantum information processing with trapped ions.
- Dieter Meschede, Université de Bonn
Single atom wants to meet single photon : controlled processes with neutral atoms.

Colloque sur l'avenir de l'information quantique à la fondation Hugot

Suite à la leçon inaugurale, un colloque a réuni à la fondation Hugot, le 14 décembre 2001, une trentaine de spécialistes français et étrangers pour discuter de l'état actuel du traitement de l'information quantique et de ses perspectives d'avenir. Une vingtaine de participants sont venus de laboratoires de la région parisienne (ENS, Orsay, Saclay) et une dizaine de l'étranger (Allemagne, Autriche, Hollande, Italie, Suisse, États-Unis, Brésil, Japon).

Six exposés ont été présentés au cours de la journée par des spécialistes du domaine. Ignacio Cirac (Max Planck, Munich) a introduit les concepts généraux de l'information quantique. David Wineland (Boulder, États-Unis) a décrit les expériences qu'il réalise avec des atomes piégés jouant le rôle de qubit. Nicolas Gisin (Genève) a montré que la cryptographie est devenue une application bien réelle de l'information quantique. Anton Zeilinger (Vienne) a parlé de ses expériences d'interférence de grosses molécules et d'intrication de photons qui illustrent certains des aspects fondamentaux de la physique quantique. Kees Harmans (Delft) a décrit l'état actuel des recherches sur les qubits réalisés à l'aide de circuits supraconducteurs mésoscopiques, analysant les recherches effectuées à Delft, mais aussi à Saclay et à Tokyo. Enfin, Gilles Noguès (ENS) a fait le point sur les recherches faites sur des atomes couplés à des photons dans des cavités électromagnétiques.

Symposium ENS — Collège de France — Stanford sur l'intrication quantique

Un symposium a réuni les 19, 20 et 21 juin 2002 au collège de France les membres de l'équipe de recherche de Serge Haroche à l'ENS et ceux du groupe de recherche du Professeur Yamamoto de l'Université Stanford (États-Unis), sur le thème de l'intrication quantique. Cette réunion a permis aux deux équipes de faire le point sur leurs recherches complémentaires orientées vers la compréhension et l'exploitation pratique de l'intrication quantique. Ces recherches se font dans un programme international de coopération scientifique, financé par le Japan Science and Technology Corporation (JST), dans le cadre d'un accord signé en 1999 avec le CNRS. Le symposium, auquel étaient également conviés une dizaine de participants venant d'autres laboratoires français et étrangers, a permis de présenter les résultats récents des deux groupes de recherche par une série d'exposés faits par des étudiants ou de jeunes chercheurs. Y ont été également présentées un certain nombre d'avancées importantes réalisées dans d'autres équipes.

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 2001 et juin 2002 :

Juillet 2001 : trois cours donnés à l'École de physique Enrico Fermi de Varenna, Italie. « *Experimental Quantum Computation and Information* ».

Août 2001 : Conférence à l'« *International Symposium on Quantum Mechanics* », Tokyo, Japon.

Septembre 2001 : Conférence au Symposium « *Quantum Challenge* », Essen, Allemagne.

Septembre 2001 : Conférence à l'« *Institute for Quantum Information* », Santa Barbara, Californie.

Octobre 2001 : Conférence au Colloque sur « *la Vérité dans les Sciences* », Collège de France, Paris.

Décembre 2001 : Conférence au Nobel Symposium « *Coherence and Phase Transitions in Condensed systems* », Göteborg, Suède.

Février 2002 : Conférence sur l'information quantique à la Société française de Physique, Paris.

Mars 2002 : Conférence à l'*Euresco 2002 conference on quantum information*, Sant Feliu, Espagne.

Mars 2002 : Conférence au *6^e Quantum Interferometry meeting*, Trieste, Italie.

Avril 2002 : Conférence plénière à la réunion conjointe de la Société Européenne de physique (division de la matière condensée) et de l'Institute of Physics (Condensed matter and material physics), Brighton, Royaume-Uni.

Avril 2002 : Colloquium à l'Université Fédérale de Rio de Janeiro, Brésil.

Mai 2002 : Colloquium au CERN, Genève, Suisse.

Juin 2002 : Conférence à la réunion « *Field Theory and Statistical Mechanics* », Rome, Italie.

Juin 2002 : Conférence plénière à la réunion de la Société Italienne de Physique, Bari, Italie.

Activités de recherche

Serge Haroche effectue ses recherches au sein du laboratoire Kastler Brossel de l'École Normale Supérieure (LKB). Il y travaille avec une équipe de chercheurs dans le groupe d'Électrodynamique Quantique en Cavité. Le thème général de ses recherches est l'étude des effets quantiques (intrication, décohérence) et de leurs applications possibles dans des systèmes constitués d'atomes en interaction avec des photons dans une cavité. Nous ne donnerons pas ici une description détaillée de l'activité de cette équipe, qui se trouve dans le rapport général du LKB, rédigé tous les deux ans pour le CNRS, mais en indiquerons simplement les résultats marquants depuis le début de l'année 2001.

Les expériences effectuées sur des atomes de Rydberg et des photons piégés dans une cavité de grande surtension permettent de manipuler des systèmes quantiques simples dans des conditions de contrôle complet de toutes leurs variables internes et externes et de réaliser ainsi de véritables « expériences de pensée » illustrant les principes fondamentaux de la théorie quantique. C'est ainsi que nous avons pu effectuer une expérience de complémentarité dans laquelle l'interféromètre utilisé voyait ses propriétés évoluer de façon continue du « microscopique » au « macroscopique », fournissant ainsi une illustration idéale de certaines idées de Niels Bohr concernant la mesure. Il s'agit d'une expérience de « franges de Ramsey » dans laquelle un atome est soumis à deux impulsions successives mélangeant à deux instants différents deux de ses niveaux d'énergie. L'atome évolue alors, entre ces deux impulsions, dans une superposition d'états donnant lieu au phénomène d'interférence responsable de l'apparition des « franges » en question. Les impulsions mélangeant les états jouent le rôle de « lames séparatrices » de l'interféromètre. Lorsque le champ de l'impulsion séparatrice est constitué d'un grand nombre de photons, la « lame » est classique et ne subit aucune perturbation décelable. Les franges sont alors visibles avec un contraste optimal. Lorsque ce champ est faible (très petit nombre de photons), la « lame » est quantique et son action sur l'atome la perturbe de façon importante. Cette perturbation nous renseigne alors sur le chemin suivi par l'atome dans l'interféromètre et provoque l'effacement des franges d'interférence. C'est là une manifestation du principe de complémentarité qui a pu être analysée en détail.

Les expériences atome-photon en cavité permettent de façon générale d'étudier le phénomène d'intrication quantique entre systèmes interagissant entre eux de

façon contrôlée. Cette intrication joue un rôle important dans le traitement quantique de l'information. C'est en effet l'intrication de « bits quantiques » (qubits) entre eux qui permet — en principe — d'effectuer des opérations de logique quantique intéressantes pour la communication ou le calcul quantiques. Nous avons réalisé une série d'expériences de démonstration montrant comment on peut construire de façon déterministe de l'intrication dans des systèmes de deux ou trois qubits. La dernière en date de ces expériences, faite en 2001, consiste à réaliser une collision entre deux atomes de Rydberg dans une cavité de grande surtension. La collision, dont l'effet est exalté par la présence de la cavité, revient à un échange virtuel contrôlé d'un photon entre les deux atomes. Elle permet de réaliser une intrication maximale des deux systèmes. Nous avons proposé dans un article théorique d'exploiter cette collision pour réaliser l'algorithme quantique de Grover dans le cas simple où il n'implique que deux qubits.

La manipulation contrôlée des atomes et du champ dans nos cavités nous permet également de générer à la demande des états « non classiques » du champ de natures variées. C'est ainsi que nous avons pu produire des états de Fock à nombre de photons bien définis (un ou deux photons) et caractériser ces états. L'une de leurs propriétés fondamentales est d'avoir une fonction de Wigner (distribution de quasi probabilité dans l'espace des phases) présentant une partie négative. Nous avons pu observer la fonction de Wigner d'un champ à un photon et mettre en évidence l'existence de régions négatives de cette fonction.

Nous avons également commencé au cours de la dernière année à orienter ces recherches dans une direction nouvelle, visant à miniaturiser notre système d'étude, en couplant les qubits atomiques avec des éléments « mésoscopiques ». Une expérience de couplage d'atomes refroidis par laser avec un mode de galerie d'une microsphère de silice est actuellement en cours, en collaboration avec le groupe du professeur T. Hansch à l'Université de Munich. Dans une autre expérience, notre équipe a pu récemment coupler un mode de galerie de microsphère avec des « boîtes quantiques » semi-conductrices et observer l'émission laser de ces boîtes dans le mode. Un nouveau montage expérimental visant à coupler des atomes de Rydberg avec un « chip » supraconducteur est également en construction dans notre équipe et devrait nous permettre de développer ces expériences nouvelles à la frontière entre physique atomique et physique mésoscopique.

S. H.

Publications du groupe d'électrodynamique quantique en Cavité (janvier 2001 à juin 2002)

— W. von Klitzing, R. Long, V.S. Ilchenko, J. Hare et V. Lefèvre-Seguin : « Frequency Tuning of the whispering gallery modes of silica microspheres for cavity quantum electrodynamics and spectroscopy », *Optics Letters*, 26, 166 (2001).

- A. Rauschenbeutel, G. Noguès, A. Auffeves, M. Brune, J.M. Raimond et S. Haroche, « A complementarity experiment with an interferometer at the quantum-classical boundary », *Nature*, 411, 166 (2001).
- S. Haroche, M. Brune et J.M. Raimond, « Counting and entangling Planck's quanta with atoms in a box », *Proceedings of the Symposium Quantum Theory Centenary*, *Ann. Physik* 10, 1-2, 55 (2001).
- S. Haroche, « Entanglement and decoherence in Cavity Quantum Electrodynamics Experiments », *Proceedings of NATO ARW on « Decoherence and its Implications »* (2001).
- J.M. Raimond, M. Brune et S. Haroche, « Colloquium : Manipulating quantum entanglement with atoms and photons in a cavity », *Rev. Mod. Phys.* 73, 565 (2001).
- S. Osnaghi, P. Bertet, A. Auffeves, P. Maioli, M. Brune, J.M. Raimond et S. Haroche, « Coherent Control of an atomic collision in a cavity », *Phys. Rev. Lett.* 87, 037902-1 (2001).
- A. Rauschenbeutel, P. Bertet, S. Osnaghi, G. Noguès, M. Brune, J.M. Raimond et S. Haroche, « Controlled entanglement of two field modes in a cavity quantum electrodynamics experiment », *Phys. Rev A*, 64, 050301(R), (2001).
- J.M. Raimond, P. Bertet, S. Osnaghi, A. Rauschenbeutel, G. Noguès, A. Auffeves, M. Brune et S. Haroche, *Laser Spectroscopy* 15, proceedings of the ICOIS XV conference, sous presse : « An interferometer with a mesoscopic beam splitter : an experiment on complementarity and entanglement » (2001).
- S. Haroche, J.M. Raimond, M. Brune, *Proceedings of the Varenna summer school, 2001*, sous presse : « Entanglement, complementarity and decoherence in cavity QED experiments » (2001).
- S. Haroche, M. Brune, J.M. Raimond, *Proceedings of the Rochester conference, on Coherence and Quantum optics 2001*, sous presse : « Manipulating entanglement with atoms and photons in a box » (2001).
- P. Bertet, S. Osnaghi, P. Milman, A. Auffeves, P. Maioli, M. Brune, J.M. Raimond et S. Haroche, « Generating and probing a Two-Photon Fock state with a single atom in a cavity », *Phys. Rev. Lett.* 143601, 88 (2002).
- F. Yamagushi, P. Milman, M. Brune, J.M. Raimond et S. Haroche, « Quantum switch with two-atom collisions in cavity QED », *Phys. Rev A*, sous presse (2002).