

Physique quantique

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

Le cours de l'année 2007-2008

Le cours donné au Collège de France, de janvier à mars 2008, était intitulé « **Mesures quantiques non destructives** ». Il a analysé les propriétés fondamentales de la mesure en physique quantique et ses relations avec les concepts de complémentarité, d'intrication et de décohérence. Il s'est ensuite focalisé sur l'analyse des mesures non destructives (Quantum Non-Demolition ou QND en anglais). Celles-ci projettent le système mesuré dans un des états propres de l'observable mesurée et peuvent être répétées un grand nombre de fois, en redonnant le même résultat tant que le système n'est pas perturbé. Cette propriété les rend potentiellement utiles à la détection ultra-sensible de faibles perturbations. L'histoire des mesures QND de la lumière a été rappelée et les expériences récentes d'électrodynamique quantique en cavité qui ont permis la détection non destructive de photons uniques ont été décrites. Ces expériences sont réalisées sur des champs de quelques photons piégés pendant une fraction de seconde dans une cavité de très grand facteur de qualité. Elles constituent une nouvelle façon de « voir » la lumière en suivant en temps réel les trajectoires stochastiques du nombre de photons et en enregistrant les sauts quantiques associés à la perte ou à la création d'un seul quantum. Ces mesures QND permettent la reconstruction complète de l'état quantique du champ dans la cavité, ouvrant la voie à l'étude détaillée des états de type « chat de Schrödinger », superpositions cohérentes d'états photoniques de phase ou d'amplitudes différentes. 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'Ecole 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 Chicago, à l'invitation de l'université de cette ville. Un des cours a été présenté dans le cadre des *Colloquiums* du département de physique de l'université et les autres donnés

aux étudiants et post-docs dans le domaine de la physique atomique et de l'optique quantique. Dans ces présentations, j'ai décrit les mesures non-destructives de lumière réalisées dans mon groupe de recherche à l'ENS (voir plus loin).

Le cours donné à Paris, réparti sur sept leçons, a traité les questions suivantes :

1. Mesures projectives en physique quantique.
2. Mesures généralisées et POVM (Positive Operator Valued Measures).
3. Généralités sur les mesures quantiques non-destructives (QND).
4. Expériences QND en électrodynamique quantique avec des atomes de Rydberg.
5. Comptage QND de 0 ou 1 photon.
6. Comptage QND de N photons : projection progressive du champ.
7. Perspectives ouvertes par les mesures QND en électrodynamique quantique en cavité.

La première leçon a commencé par rappeler de façon générale les propriétés essentielles de la mesure d'un système microscopique en physique quantique. Par « mesure » on comprend au sens large toute expérience qui extrait de l'information d'un système quantique. Alors qu'en physique classique, le système étudié peut se trouver dans un état indépendant de tout observateur et être mesuré sans perturbation, en physique quantique une mesure est un processus plus complexe, dans lequel l'état de l'objet mesuré est en général modifié. Le résultat de la mesure et son effet sur le système sont décrits de façon statistique, la théorie ne pouvant que déterminer la loi de probabilité du processus (« Dieu joue aux dés »). Les propriétés de la mesure quantique entraînent des limitations (certaines mesures sont incompatibles entre elles — cf. relations d'incertitude de Heisenberg) et des impossibilités (par exemple théorème de « non-clonage » d'un état inconnu). Ces caractéristiques, souvent décrites négativement, peuvent être exploitées de façon positive pour réaliser des opérations impossibles en physique classique (cryptographie et calcul quantiques).

Après ces rappels généraux, la leçon a abordé le problème plus spécifique de la mesure quantique de la lumière. Le champ électromagnétique est un système central en physique. L'essentiel de l'information qui nous provient du monde est véhiculé par lui. Comprendre la mesure de la lumière dans la théorie quantique a toujours préoccupé les physiciens, depuis Planck (1900), Einstein (1905) et les débuts de la mécanique quantique moderne (expériences de pensée de Bohr, Einstein et Schrödinger). La dualité de la lumière (onde et ensemble de photons à la fois) joue un rôle fondamental dans cette théorie. L'optique quantique, née avec le laser en 1960, a reposé dans un contexte moderne les questions posées dans les années 1920. La théorie de la mesure de la lumière, le comptage de photons, établie par R. Glauber (1963), constitue le cadre d'analyse de toutes les expériences d'optique.

La mesure de la lumière implique son interaction avec un milieu matériel auquel l'information véhiculée par le champ est transférée. Ce transfert s'effectue en général

par absorption d'énergie (effet photo-électrique étudié par Einstein en 1905), si bien que le champ est détruit par la mesure. Cette destruction est une limitation des expériences d'optique *non imposée par la physique quantique*. Les physiciens se sont demandés, depuis les années 1970, comment détecter les photons de façon non absorptive, les laissant présents après la mesure. Un tel procédé dit QND (pour Quantum Non-Demolition) ouvrirait la voie à de nombreuses applications.

Nous avons ensuite décrit différents modèles d'appareils réalisant une mesure projective idéale. Nous avons en particulier analysé un modèle simple dans lequel l'appareil de mesure est un moment angulaire, superposition symétrique de spins $\frac{1}{2}$. L'importance de la décohérence dans le processus de mesure a été soulignée. Les incertitudes sur les mesures de variables conjuguées ont été rappelées, et la limite que ces incertitudes imposent sur la précision des mesures a été discutée. Certains aspects « paradoxaux » de la mesure ont été soulignés (effet Zenon). Enfin, les propriétés des corrélations entre mesures effectuées sur des parties spatialement séparées d'un système nous ont conduit à rappeler l'aspect non-local de la physique quantique.

Dans la deuxième leçon, nous avons décrit des mesures « généralisées » n'obéissant pas aux critères restrictifs de la mesure projective idéale de von Neumann. Ces mesures qui donnent une information plus ou moins partielle sur l'état d'un système quantique correspondent souvent à des situations plus proches des expériences réelles que les mesures projectives. Un cas particulier important de mesure généralisée est défini par un ensemble d'opérateurs hermitiques positifs formant un « POVM » (Positive Operator Valued Measure). Le lien entre mesures généralisées, POVM et mesure projective a été rappelé et un certain nombre d'exemples intéressants pour la suite ont été présentés.

Comme nous l'avions vu dans la première leçon, un modèle simple de processus de mesure est réalisé par le couplage d'un système quantique S à un ensemble de N spins ou « qubits » de mesure indépendants (constituant un moment angulaire $J=N/2$). Nous avons montré que l'acquisition partielle d'information résultant du couplage de S avec un seul qubit est un POVM et avons décrit comment l'accumulation de mesures POVM résultant du couplage avec un ensemble de qubits se transforme en mesure projective. Nous avons aussi montré que l'acquisition d'information sur S résultant de la mesure POVM s'apparente à un processus d'inférence bayésienne en théorie des probabilités. Nous avons conclu la leçon en considérant un exemple curieux de mesure, dans lequel il semble que l'information soit obtenue « sans que le système mesuré ait interagi avec l'appareil ». Le paradoxe provient, comme dans d'autres cas du même genre, de l'utilisation indue de concepts classiques pour décrire une situation quantique.

La troisième leçon a introduit les mesures QND du champ électromagnétique. Le but en est de mesurer une observable du champ sans perturber de façon à pouvoir répéter la mesure et retrouver le même résultat dans une mesure ultérieure. Il s'agit de la mesure projective d'une observable qui ne change pas entre deux détections successives sous l'effet de l'évolution Hamiltonienne. L'énergie du

champ et son nombre de photons sont des observables pouvant être mesurées de façon QND, à condition d'éviter l'absorption de photons dans le détecteur. Nous avons présenté quelques modèles simples de mesures QND, basées soit sur la détection de la pression de radiation exercée sur un miroir (mesures optomécaniques), soit sur l'effet Kerr croisé dans un milieu optique non linéaire. Nous avons analysé l'effet en retour de la mesure sur la phase du champ, ce qui nous a conduit à définir de façon rigoureuse un opérateur de phase. L'analyse s'appuie soit sur une description des champs en terme de vecteurs d'états (ce qui est bien adapté au cas où la mesure projette le champ sur un état de Fock), soit sur une discussion en terme de bruit de photon, commode lorsque la mesure ne discrimine pas les photons individuels et que le champ apparaît comme une variable continue fluctuante. Les deux approches sont bien sûr équivalentes à la limite continue.

A partir de la quatrième leçon, nous avons abordé la description du comptage non destructif de photons micro-ondes dans une cavité de très grand facteur de qualité. Cette méthode QND, qui atteint la résolution des quanta de rayonnement, exploite les concepts de l'Electrodynamique Quantique en Cavité (CQED), dont nous avons commencé par rappeler les principes. Nous avons évoqué brièvement des expériences de CQED faites dans le domaine optique pour les distinguer des études micro-onde qui nous intéresseront plus particulièrement ici. La méthode QND de comptage utilise pour détecter les photons les propriétés remarquables des atomes de Rydberg dans des états circulaires couplés à une cavité micro-onde supraconductrice. Nous avons consacré l'essentiel de la leçon aux atomes, et laissé la description de la cavité pour la leçon suivante. Un aspect remarquable du principe de correspondance est que les propriétés des états circulaires (dont tous les nombres quantiques sont grands) peuvent se comprendre à partir d'une description quasi-classique, en n'introduisant les concepts quantiques (quantification des orbites atomiques et du champ rayonné) que de façon minimale, à l'image de la description de l'ancienne théorie des quanta de Bohr. Nous avons décrit ainsi classiquement le rayonnement de ces états circulaires, leur susceptibilité aux champs électriques et leur couplage à la cavité. Nous avons enfin analysé les méthodes de préparation et de détection des atomes de Rydberg circulaires et leur sélection en vitesse.

La cinquième leçon a été consacrée aux expériences d'électrodynamique en cavité micro-onde détectant, sans les détruire, des photons uniques piégés. Les sondes du champ sont des atomes de Rydberg traversant un à un la cavité C. Le champ laisse une empreinte sur la phase d'une superposition d'états atomiques, préparée avant l'entrée des atomes dans C par une première impulsion micro-onde R_1 et analysée, après C, par une seconde impulsion R_2 . L'ensemble R_1 - R_2 est un interféromètre de Ramsey. Le détecteur D mesure l'état final de l'atome. L'information fournie par chaque atome est binaire, ce qui suffit pour discriminer entre 0 et 1 photon. Le photon n'étant pas détruit, la mesure peut en principe être indéfiniment répétée. Deux expériences ont été analysées. La première (1999) exploite une interaction atome-cavité résonnante, la condition QND étant réalisée en ajustant le temps d'interaction pour que l'atome revienne dans son état initial, sans absorber le

photon (impulsion Rabi 2π). Elle a été faite dans une cavité amortie en un temps $T_C = 1$ ms, trop court pour de multiples répétitions de la mesure. La seconde expérience (2006) utilise une interaction dispersive non-résonnante et une cavité stockant les photons pendant un temps très long ($T_C = 0,13$ s). Des centaines de mesures indépendantes du même photon ont permis d'observer pour la première fois les sauts quantiques associés à l'annihilation et la création de photons dans les miroirs de la cavité. Avant de décrire ces expériences, nous avons commencé par des rappels théoriques sur les états du système atome-champ dans la cavité.

La sixième leçon a montré comment la méthode de mesure QND dispersive de 0 ou 1 photon peut être généralisée au comptage d'un nombre de photons supérieur à 1. Nous avons rappelé que la mesure d'un quantum de lumière unique nécessitait que le déphasage Φ_0 induit par un photon sur le dipôle atomique vaille π . Chaque atome, décrit comme un spin, sort alors de l'appareil en pointant le long de l'une de deux directions opposées, indiquant que C contient 0 ou 1 photon. Le réglage $\Phi_0 = \pi$ est adapté à la mesure de la parité du nombre n de quanta, assimilable à n si le champ, très faible, a une probabilité négligeable de contenir plus d'un photon. Pour des champs plus grands, le comptage QND reste possible en modifiant Φ_0 . La valeur de n ne peut plus être obtenue à l'aide d'un seul 'spin' mais doit être extraite d'un ensemble d'atomes. En détectant les 'spins' de cet ensemble un à un, on observe l'évolution progressive du champ vers un état de Fock, ce qu'on appelle l'effondrement ou 'collapse' de sa fonction d'onde. La répétition de la mesure correspondant au passage dans C d'ensembles d'atomes successifs, révèle la cascade en marches d'escalier du nombre de photons vers le vide, due à la relaxation du champ. Après quelques rappels et remarques générales, nous avons analysé cette procédure de mesure idéale de la lumière en l'appliquant à un petit champ cohérent.

La septième et dernière leçon nous a permis d'apporter quelques précisions sur les mesures QND de champs piégé micro-onde et de conclure le cours sur quelques perspectives. Nous avons vu (leçon 6) que la mesure d'une séquence de m atomes traversant un à un une cavité C en étant tous soumis au même déphasage par photon Φ_0 réduit progressivement le champ à un état de Fock $|n\rangle$. Le nombre m augmente comme n_m^2 , où n_m est la borne supérieure de n . Nous avons décrit le principe d'une variante de cette expérience, utilisant successivement des atomes soumis à des déphasages $\Phi_0 = \pi, \pi/2, \pi/4, \dots$, qui peut déterminer n avec seulement $m \sim \log_2 n_m$ atomes.

Nous nous sommes intéressé ensuite au premier état intermédiaire du champ, entre l'état initial cohérent et l'état de Fock final. L'action en retour de la mesure QND produit après détection du premier atome une superposition d'états du champ avec 2 phases classiques différentes. Quand $\Phi_0 = \pi$, les composantes de ce « **chat de Schrödinger** » ont des amplitudes opposées et ne contiennent, suivant l'état final de l'atome, qu'un nombre pair ou impair de photons. En injectant dans C un champ cohérent d'homodynage et en continuant à mesurer de façon QND avec les atomes suivants la parité de n , on reconstruit la fonction de Wigner de ces

‘chats’ et on étudie en temps réel leur décohérence. Nous avons présenté le principe de ces expériences qui ont été décrites plus en détail dans le séminaire de I. Dotsenko qui faisait suite au cours. Nous avons enfin conclu la leçon par la description d’une expérience d’effet Zénon sur un champ mesuré de façon répétée et par une brève présentation des études sur la non-localité que nous comptons effectuer, dans le prolongement de ces expériences, avec deux cavités.

Enseignement du Collège de France « hors les murs »

L’enseignement donné à Chicago en octobre 2008 était destiné aux étudiants et chercheurs du département de physique de l’Université de Chicago. Deux leçons étaient réservées aux étudiants en thèse (*graduate students*) et aux post-docs en physique atomique et en optique quantique. Elles ont porté sur la description des expériences QND en électrodynamique quantique en cavité traitées dans le cours donné à Paris (contenu des leçons 5 à 7 décrites ci-dessus). Deux autres leçons étaient destinées aux étudiants en maîtrise (*undergraduates*) et ont constitué une introduction générale à l’optique quantique et au refroidissement des atomes par laser. Enfin, un *colloquium* plus général intitulé « **Counting photons without destroying them: an ideal measurement of light** » a été donné à l’ensemble du département de physique de l’université.

Les séminaires de l’année 2007-2008

Une série de sept 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 :

21 janvier 2008 : Interférence à un photon, complémentarité et expérience à choix retardé de Wheeler.

Jean-François ROCH, ENS-Cachan.

28 janvier 2008 : Circuit QED : Quantum Optics of Electrical Circuits.

Steven GIRVIN, Yale University.

4 février 2008 : Optical manipulation of quantum dot spins.

Atac IMAMOGLU, ETH Zurich.

11 février 2008 : Chatons de Schrödinger et états non gaussiens de la lumière : de nouveaux outils pour les communications quantiques.

Philippe GRANGIER, Institut d’Optique, Palaiseau.

25 février 2008 : Cavity-free efficient coupling of single photons and single emitters.

Vahid SANDOGHDAR, ETH, Zurich.

3 mars 2008 : Precision quantum metrology with lattice-confined ultracold atoms.

Jun YE, JILA et Université de Boulder, Colorado.

10 mars 2008 : Tomography of photonic Schrödinger cats in a cavity.

Igor DOTSENKO, LKB- ENS et Collège de France.

Autres conférences et séminaires de Serge Haroche

En dehors de ses cours au Collège de France et à Chicago, S. Haroche a donné les séminaires, cours et conférences suivants entre juillet 2007 et juin 2008 :

— *Août 2007* : Communication invitée à la Gordon Research Conference on Quantum Control of Light and Matter : « *From Quantum Non-demolition measurements of photons to the control of quantum states of light in a cavity* », Newport, États-Unis.

— *Août 2007* : Quatre cours à l'École Latino Américaine de Physique, ELAF 2007 : « *Quantum information with atoms and photons in cavities* », Mexico.

— *Septembre 2007* : Communication invitée à la Conférence « Photons, Atoms and Qubits » de la Royal Society : « *Quantum non-demolition counting of photons in a cavity: an ideal measurement of light* », Londres.

— *Septembre 2007* : Communication invitée à la Conférence QuAMP 2007 : « *Quantum non-demolition counting of photons applied to the investigation of non-classical states of light* », University College, Londres.

— *Octobre 2007* : Colloquium à Argonne National Laboratories : « *Quantum non-demolition measurement of light : The birth, life and death of trapped photons* », Argonne, Illinois.

— *Octobre 2007* : Communication invitée à la Conférence QIPC 2007 : « *Quantum Non-Demolition Counting of Photons in a Cavity: an ideal measurement of light* », Barcelone.

— *Novembre 2007* : Colloquium à l'Université d'Oxford : « *Counting photons without destroying them: an ideal measurement of light* ».

— *Décembre 2007* : Colloquium à MIT : « *Trapping and counting photons without destroying them: a new way to look at light* », Cambridge, États-Unis.

— *Décembre 2007* : Séminaire à Harvard University : « *Quantum Non-Demolition measurement of light and tomography of photonic Schrödinger cats in Cavity QED* », Cambridge, États-Unis.

— *Janvier 2008* : Communication invitée à la Conférence « *Quantum Noise in Strongly Correlated Systems : "Non-destructive photon counting and reconstruction of photonic 'Schrödinger cat' states" in cavity QED* », Institut Weizman, Israël.

— *Janvier 2008* : Conférence à l'École polytechnique : « *Voir sans détruire la lumière : vie et mort de photons dans une cavité* ».

— *Janvier 2008* : Présentation au Colloque ANR Lumière : « *Champs mésoscopiques non-locaux en électrodynamique quantique en cavité* », Orsay.

— *Février 2008* : Colloquium à Los Alamos : « *Quantum Non Demolition counting of photons and Schrödinger cat tomography in Cavity QED experiments* », Los Alamos, Nouveau-Mexique, États-Unis.

— *Février 2008* : Communication invitée au Workshop SQUINT (Southwest Quantum information and technology) : « *Quantum Non-Demolition counting of photons in Cavity QED* », Santa Fe, Nouveau-Mexique, États-Unis.

— *Mars 2008* : Présentation invitée à la Young Atom Optician Conference : « *Trapping and counting photons without destroying them : a new way to look at light* », Florence, Italie.

— *Mars 2008* : Conférence invitée au Meeting de la Société Finlandaise de Physique : « *Trapping and counting photons without destroying them: a new way to look at light* », Turku, Finlande.

- *Avril 2008* : Rydberg lecture à l'Université de Lund : « *Trapping and counting photons without destroying them: a new way to look at light* », Lund, Suède.
- *Avril 2008* : Communication invitée à la Conference on precision measurements with quantum gases : « *QND photon counting applied to the preparation and reconstruction of Schrödinger cat states of light trapped in a cavity* », Trente, Italie.
- *Avril 2008* : Colloquium à l'Université du Wisconsin : « *Trapping and counting photons without destroying them: a new way to look at light* », Madison, Wisconsin, États-Unis.
- *Avril 2008* : Séminaire à l'Université du Wisconsin : « *Reconstructing the Wigner function of a photonic Schrödinger cat in a cavity: a movie of decoherence* », Madison, Wisconsin, États-Unis.
- *Avril 2008* : Colloquium à l'université de Bielefeld : « *Trapping and counting photons without destroying them: a new way to look at light* », Bielefeld, Allemagne.
- *Avril 2008* : Colloquium à l'Université d'Innsbruck : « *Quantum non-demolition photon counting & Schrödinger cat states reconstruction in a cavity* », Innsbruck, Autriche.
- *Mai 2008* : Présentation invitée au Solvay Workshop on Bits, Quanta, and Complex System: « *Generating and reconstructing non-classical photonic states in Cavity QED: present stage and perspectives* », Bruxelles.
- *Mai 2008* : Conférence invitée au Workshop on Quantum Phenomena and Information « *Reconstructing the Wigner function of photonic Schrödinger cats in a cavity: a movie of decoherence* », Trieste, Italie.
- *Mai 2008* : Colloquium à l'Université technologique de Vienne : « *Time-resolved reconstruction of photonic Schrödinger cats in a cavity: a movie of decoherence* », Vienne, Autriche.
- *Juin 2008* : Conférence invitée au Symposium en l'Honneur du 75^e anniversaire de Peter Toschek : « *From atom to light quantum jumps: applying to photons the wizard tricks learned from Peter Toschek and his ion trapper colleagues* », Hambourg.

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 étudions des états non-classiques de champs mésoscopiques piégés dans des cavités de très grand facteur de qualité, d'autre part nous réalisons 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.

1) Gel de l'évolution cohérente d'un champ quantique dans une cavité : une démonstration de l'effet Zénon quantique

La mesure QND du champ décrite dans le résumé des travaux de l'année dernière permet une observation répétée d'un système quantique. On sait que dans ces conditions, toute évolution cohérente du système peut se trouver inhibée, en raison de sa projection répétée sur l'état initial. Il s'agit du fameux effet Zénon, analysé théoriquement depuis longtemps en physique quantique et observé sur un certain nombre de systèmes simples au cours des dernières années. Avec notre montage nous avons pu en faire une démonstration spectaculaire en gelant le champ dans une cavité excitée par une succession d'impulsions micro-onde en phase. Si le champ est laissé libre entre ces impulsions, il se bâtit dans la cavité sous l'effet constructif des excitations successives. Si on le mesure entre deux impulsions, cette construction du champ est empêchée et il reste très proche de son état initial, le vide. L'expérience confirme en tous points les prévisions théoriques et permet d'interpréter cet effet Zénon comme résultant de l'action en retour de la mesure du nombre de photons sur la phase du champ.

2) Reconstruction d'états non classiques du champ piégé dans une cavité

La mesure quantique non destructive (QND) du nombre de photons a également ouvert la voie à des expériences nouvelles de reconstruction complète de l'état d'un champ piégé. Bien que la mesure QND ne fournisse en principe qu'une information sur le nombre de photons, on peut l'utiliser pour réaliser une « tomographie » complète d'un état quantique arbitraire préparé dans la cavité. En effet notre mesure du nombre de photons permet, en la répétant un grand nombre de fois, de mesurer la probabilité d'occurrence d'un nombre de photon donné dans un état quelconque du champ. On peut ainsi directement mesurer les éléments diagonaux de la matrice densité du champ dans la base des états nombre. En couplant une source classique au mode de la cavité contenant le champ à mesurer, on réalise une simple opération de translation de l'état du champ dans l'espace des phases (plan de Fresnel). Cette opération redistribue les éléments de matrice non diagonaux de l'opérateur densité du champ de sorte que la mesure de la probabilité du nombre de photons de l'état translaté devient sensible à ces éléments non diagonaux. Si on réalise cette mesure pour un nombre suffisant de translations différentes de l'état à mesurer, on obtient un ensemble de contraintes qui déterminent complètement l'opérateur densité du champ, ou, de façon équivalente, sa distribution de Wigner.

Nous venons d'appliquer cette méthode à la mesure de la fonction de Wigner des états nombre de photons (états de Fock) préparés par notre méthode de mesure non destructive, et d'états « chats de Schrödinger » du champ. Ces états, superpositions quantiques de deux champs quasi-classiques de phases différentes, sont préparés par la détection du premier atome utilisé pour la mesure QND du champ. Leur préparation peut être vue comme l'action en retour d'une mesure QND du nombre de photons sur son observable conjuguée, la phase du champ. En appliquant notre protocole de reconstruction complète de l'état quantique du champ après un délai variable, nous pouvons enregistrer le film de la décohérence d'un chat de Schrödinger, c'est à dire observer toutes les étapes de son passage à travers la frontière floue entre les mondes quantique et classique.

3) Expérience de puce à atome cryogénique

Après la réalisation de pièges à atome sur puce à courants supraconducteurs et l'observation de la première condensation de Bose Einstein dans ce système (voir résumé des travaux précédent), nous avons passé la dernière année à analyser la durée de vie des atomes dans ce type de piège, très différent des systèmes à température ambiante réalisés jusqu'alors. Un des principaux défis posé par les puces à atomes est de parvenir à amener l'échantillon atomique à proximité de la surface. C'est en effet dans ce régime que l'on obtient les plus grands confinements, importants pour de nombreuses expériences. Il a malheureusement été observé que le temps de vie des atomes dans le piège décroît de manière importante à très courte distance de surfaces métalliques. On comprend bien les raisons physiques de ce phénomène : les atomes s'approchent en effet de matériaux dans lesquels existent des fluctuations thermiques de courant. Ces dernières rayonnent un champ magnétique aléatoire au niveau des atomes dont certaines composantes spectrales induisent des transitions vers des niveaux Zeeman non piégés. Le bruit magnétique devient très important à courte distance du fait du rayonnement en champ proche des sources de courant. On attend une situation radicalement différente dans le cas des supraconducteurs.

Le théorème fluctuation-dissipation permet de relier le taux de pertes du piège à la dissipation du métal par effet Joule à la fréquence de transition atomique. Or ce type de perte est diminué drastiquement dans le cas des matériaux supraconducteurs. Les modèles les plus simples de supraconductivité prédisent une augmentation de la durée de vie des atomes dans le piège de plus de 6 ordres de grandeurs par rapport à un métal normal. Toute la difficulté est cependant de disposer d'un modèle théorique qui rende bien compte de la réponse du supraconducteur. Il y a un certain débat sur cette question au sein de la communauté des théoriciens de la supraconductivité, en particulier dans le cas des supraconducteurs de type II (comme le niobium) dans lesquels existent des vortex de champ magnétique. Nous avons engagé une collaboration avec des chercheurs du Laboratoire Pierre Aigrain spécialistes de la question. Nous devrions bientôt apporter des réponses théoriques sur l'effet des vortex sur le temps de vie des atomes. Il semble, au vu des résultats préliminaires,

que la présence des vortex raccourcisse la durée de vie des atomes, mais qu'elle la laisse cependant très supérieure à ce qu'elle est en présence de métaux normaux. Pour vérifier ces prévisions, il est essentiel du point de vue expérimental de pouvoir mesurer de très longs temps de vie dans le piège sans être limité par des causes de bruit technique. Atteindre ou approcher les très longs temps de piégeage prédits par la théorie est un but difficile, mais indispensable si l'on veut tirer avantage des puces cryogéniques. Nous avons à cette fin réduit significativement les sources de bruit technique dans notre expérience. Ceci nous a permis d'augmenter d'un facteur 5 le temps de vie rapporté précédemment et ouvre la voie à une mesure réaliste de la dissipation dans les puces supraconductrices.

PUBLICATIONS DU GROUPE D'ÉLECTRODYNAMIQUE QUANTIQUE EN CAVITÉ
(JUILLET 2007 - JUIN 2008)

1. 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*, 448, 889 (2007).
2. 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*, 54, 2101 (2007).
3. S. Haroche, « A short history of Cavity Quantum Electrodynamics » dans *Coherence and Quantum Optics IX*, N.P. Bigelow, J.H. Eberly et C.R. Stroud, éditeurs, AIP (2008).
4. M. Brune, S. Gleyzes, S. Kuhr, C. Guerlin, J. Bernu, S. Deléglise, U. Busk Hoff, J.-M. Raimond et S. Haroche, « Observing quantum jumps of light by Quantum Non-Demolition measurements » dans *Coherence and Quantum Optics IX*, N.P. Bigelow, J.H. Eberly et C.R. Stroud, éditeurs, AIP (2008).
5. S. Haroche, C. Guerlin, J. Bernu, S. Deléglise, C. Sayrin, S. Gleyzes, S. Kuhr, M. Brune et J.-M. Raimond, « Quantum Non-Demolition counting of photons in a cavity » dans *Laser Spectroscopy XVIII*, L. Holberg, J. Bergquist et M. Kasevich éditeurs, World Scientific (2008).
6. 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 », European Physical Journal-Special Topics*, Volume : 159 pages : 19 (2008).
7. C. Roux, A. Emmert, A. Lupascu, T. Nierregarten, G. Nogues, M. Brune, J.-M. Raimond et S. Haroche : Bose-Einstein condensation on a superconducting atom chip, *Euro. Phys. Lett.* 81, 56004 (2008).
8. S. Deléglise, I. Dotsenko, C. Sayrin, J. Bernu, M. Brune, J.-M. Raimond et S. Haroche, Reconstruction of non-classical cavity field states and movie of their decoherence, soumis à publication (juin 2008).
9. J. Bernu, S. Deléglise, C. Sayrin, S. Kuhr, I. Dotsenko, M. Brune, J.-M. Raimond et S. Haroche, Freezing coherent field growth in a cavity by quantum Zeno effect, soumis à publication (juillet 2008).