

Physique quantique

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

COURS : LE CONTRÔLE DES PARTICULES QUANTIQUES ISOLÉES

Les activités de la chaire pendant l'année 2012-2013 ont été marquées par l'annonce en octobre 2012 du prix Nobel de physique attribué à son titulaire, conjointement avec David Wineland, pour leurs recherches indépendantes sur la manipulation et le contrôle de particules quantiques isolées. Le cours initialement prévu devait porter sur la physique quantique et la mesure du temps. Son sujet a dû être modifié en raison des circonstances particulières créées par l'attribution de ce prix. D'une part, la préparation d'un cours portant sur un sujet de recherche non directement lié aux travaux du titulaire de la chaire est devenue impossible en raison d'un emploi du temps chargé par les nombreuses interventions qu'il a été amené à préparer et à faire dans le cadre des manifestations célébrant le prix Nobel. D'autre part, il était naturel de répondre à la curiosité du public du Collège de France désireux d'en savoir plus sur les recherches reconnues par cette distinction.

Le nouveau sujet du cours a donc porté sur le contrôle des particules quantiques isolées, un thème plus en accord avec l'actualité, et le cours sur la physique quantique et la mesure du temps a été reporté à une année ultérieure. Les expériences décrites dans le cours de cette année avaient été déjà, pour une large part, analysées dans les cours des années antérieures. Les six leçons de l'année 2012-2013 les ont cependant présentées dans un contexte nouveau où l'on a insisté sur la genèse de ces recherches et l'historique de leur évolution au cours du temps. Le lien avec les travaux parallèles de David Wineland a également été particulièrement souligné. Le cours a été préparé en même temps que la rédaction de la conférence Nobel (*Nobel lecture*) qui doit traditionnellement reprendre l'historique des travaux reconnus par le prix. En ce sens, le cours 2012-2013 du Collège de France a constitué une « version longue » de cette conférence, dans laquelle un grand nombre de détails omis dans le texte de la conférence Nobel ont pu être ajoutés et commentés en détail. Comme les années précédentes, le cours était immédiatement disponible sous forme de présentation par diapositives sur le site du Collège de France et,

après quelques jours, sous forme de document vidéo téléchargeable ou disponible en « streaming^a ».

Le contrôle des particules quantiques : photons et ions piégés

La première leçon d'introduction a commencé par rappeler la citation de l'Académie des sciences de Suède qui a établi un parallèle entre les recherches menées à Paris sur la manipulation non destructive et le contrôle de photons piégés dans une cavité et celles, menées à Boulder, sur l'étude des ions piégés. Cette citation a également précisé que ces expériences ont longtemps été considérées comme impossibles à réaliser pratiquement. En commentant cette citation, il a semblé opportun de relier ces travaux aux expériences de pensée imaginées par les fondateurs de la théorie au début du XX^e siècle et d'expliquer comment ces expériences ont pu devenir réalisables grâce aux progrès de technologies toutes issues de la physique quantique.

La leçon a commencé par rappeler comment est né le concept de photon en 1905 dans l'article fondamental d'Einstein sur l'effet photoélectrique. L'hypothèse que la lumière, classiquement considérée comme une onde, devait être également décrite comme un ensemble de particules discrètes, les photons, allait révolutionner la physique en introduisant la notion de dualisme entre ondes et particules, que de Broglie devait une vingtaine d'années plus tard étendre à la matière. Cette dualité devait ensuite être formalisée dans la théorie quantique élaborée par Heisenberg, Schrödinger et Dirac, sous la forme du principe de superposition des états qui énonce qu'un système quantique existe potentiellement à la fois dans plusieurs états, en étant pour ainsi dire suspendu entre différentes réalités classiques. Pour comprendre la signification de ce principe et celle du dualisme onde-particule, Bohr et Einstein ont, au cours des congrès Solvay de 1927 et de 1930, décrit des expériences de pensée qui sont devenues fameuses. Il s'agit en particulier de l'expérience des fentes de Young avec une fente mobile destinée à « espionner » le chemin suivi par une particule traversant l'appareil, et celle de la « boîte à photon » destinée à compter sans les détruire les photons contenus dans une boîte et à déterminer avec précision le moment où ces photons s'échappent. La leçon a repris la description de ces expériences, en expliquant comment elles illustraient le principe de complémentarité cher à Bohr. Ce principe analyse les ondes et les particules non pas comme des entités contradictoires, mais comme des notions complémentaires, l'une ou l'autre se manifestant suivant la nature des expériences réalisées. Une attention spéciale a été accordée au fameux chat de Schrödinger, suspendu entre la vie et la mort, une autre expérience de pensée imaginée par le physicien autrichien pour souligner le problème d'interprétation qui se pose à la physique quantique lorsque l'on cherche à comprendre la transition entre le monde microscopique, où le principe de superposition s'applique, et le monde macroscopique où on n'en voit pratiquement jamais les effets directement.

Les doutes des fondateurs de la théorie sur la possibilité de réaliser ces expériences au laboratoire ont ensuite été rappelés, en particulier la fameuse phrase de Schrödinger disant que l'on ne peut observer des particules quantiques que par les

a. Cf. <http://www.college-de-france.fr/site/serge-haroche/course-2012-2013.htm> [Ndlr].

traces qu'elles laissent après avoir été détruites, dans des expériences de type « *post-mortem* ». La situation a changé depuis le temps de Schrödinger grâce au développement de technologies, toutes rendues possibles par la connaissance du monde microscopique apportée par la physique quantique : les lasers accordables en fréquence permettent de manipuler les atomes avec une précision extraordinaire, les ordinateurs modernes peuvent traiter en temps réel les informations recueillies par les systèmes quantiques étudiés et enregistrer des signaux de corrélations complexes, le développement des matériaux supraconducteurs a rendu possible la réalisation de miroirs ultra-réfléchissants nécessaires au piégeage des photons...

Grâce à ces avancées technologiques, on peut maintenant manipuler pour ainsi dire « *in vivo* », sans les détruire par la mesure, des particules quantiques isolées et étudier leur évolution, leurs sauts quantiques et leur réponse à toutes sortes de perturbations. Les expériences menées à Boulder et à Paris sont, comme il a été rappelé plus haut, les deux faces d'une même médaille : le groupe de recherche américain piège des atomes (en fait des ions, atomes ionisés portant une charge positive) et les manipule et détecte à l'aide de faisceaux de photons. Le groupe ENS (École nationale supérieure)-Collège de France piège des photons et les contrôle et détecte à l'aide d'atomes traversant le piège un à un. Dans les deux cas, les expériences sont théoriquement décrites par un modèle très simple analysant le couplage matière-rayonnement au niveau le plus fondamental, en termes d'interaction entre un atome à deux niveaux et un mode quantifié du champ. La leçon a rappelé ce modèle, introduit en optique quantique il y a cinquante ans par Jaynes et Cummings.

Après cette introduction rapide à la physique du contrôle des systèmes quantiques isolés, la deuxième partie de cette première leçon a adopté un point de vue historique en décrivant l'évolution des recherches du titulaire de la chaire depuis son travail de thèse au laboratoire Kastler Brossel (qui s'appelait alors le Laboratoire de spectroscopie hertzienne de l'ENS) sous la direction de Claude Cohen-Tannoudji, jusqu'aux recherches qu'il a menées comme visiteur postdoctoral à Stanford, dans le laboratoire d'Arthur Schawlow. Le travail de thèse effectué à l'ENS entre 1967 et 1971 a introduit en physique atomique le concept d'atome habillé par des photons, qui consiste à traiter un atome interagissant avec un champ électromagnétique comme une entité, l'atome habillé, dont l'étude des niveaux d'énergie permet d'analyser de façon simple et synthétique l'ensemble des propriétés physiques. La leçon a décrit un certain nombre d'effets prédits par ce modèle et observés dans des expériences réalisées avec des atomes pompés optiquement et interagissant avec des champs de radiofréquences d'intensité et de polarisation variées. Ces effets incluent l'existence de nouvelles résonances observées en champ magnétique transversal au faisceau de pompage optique (résonances de croisement de niveaux de l'atome habillé) et un phénomène de modification et d'annulation du moment magnétique des atomes sous l'effet de l'habillage par les photons de radiofréquence.

Ces expériences sur l'atome habillé ont été pour leur auteur une initiation aux méthodes de manipulation des atomes par la lumière. Traitant des nombres de photons très élevés, elles étaient parfaitement interprétables en termes classiques pour le champ. Elles ont néanmoins permis d'introduire en physique atomique une approche de type « électrodynamique quantique » qui devait se révéler ensuite indispensable pour interpréter des expériences concernant de petits nombres de photons. Son stage postdoctoral (1972-1973) a permis au titulaire de la chaire d'apprendre à se servir des lasers accordables qui devaient se révéler des outils

indispensables à toutes les expériences qu'il devait effectuer par la suite. Utilisant un laser émettant des impulsions très brèves, il a réalisé à Stanford des expériences de battement quantique qui ont illustré l'importance des concepts de superposition d'états et d'interférence quantique, concepts qui devaient aussi jouer un rôle essentiel dans la physique de manipulation de photons individuels. En permettant de préparer des niveaux atomiques de plus en plus excités, il est apparu clairement que ces lasers ouvraient la voie à l'étude des atomes de Rydberg, thème de recherche auquel le titulaire de la chaire devait se consacrer pendant toute la suite de sa carrière. Ces atomes sont en effet devenus des outils indispensables à l'étude des champs microonde de très faible intensité dans le domaine de l'optique quantique que l'on appelle l'électrodynamique quantique en cavité. La première leçon a ainsi présenté tous les éléments contenant pour ainsi dire en germe la physique qui devait suivre et permettre la manipulation contrôlée de photons piégés.

Les premières années de l'électrodynamique quantique des atomes de Rydberg

La deuxième leçon a décrit les premières années de l'électrodynamique quantique en cavité avec des atomes de Rydberg, depuis les expériences de spectroscopie microonde des états de Rydberg des atomes alcalins dans les années 1970, jusqu'à la réalisation des premières études en couplage fort entre atomes et photons au début des années 1990. Dans cette période, l'accent était principalement mis sur la modification des propriétés radiatives d'atomes dans un espace confiné par des parois réfléchissantes. Les méthodes permettant la manipulation et l'étude des atomes interagissant avec des photons isolés dans des cavités, qui ont conduit par la suite aux expériences d'information quantique et de tests de la théorie de la mesure et de la décohérence, ont été mises au point au cours de cette période.

Les premières expériences effectuées à l'ENS après le retour de Stanford du titulaire de la chaire ont porté sur l'étude spectroscopique des atomes de Rydberg des atomes alcalins. La leçon a rappelé les principales propriétés de ces atomes très excités, de très grande dimension spatiale, leur préparation par excitation laser en échelon et leur détection par ionisation sélective à l'aide d'un champ électrique. L'originalité des expériences de l'ENS par rapport aux nombreuses autres études réalisées à la même époque dans d'autres laboratoires était de coupler ces atomes à des champs microonde pour étudier en détail les transitions entre niveaux de Rydberg voisins. Ces études ont permis d'établir une carte détaillée de ces niveaux et de mesurer avec précision leurs défauts quantiques, paramètres décrivant l'effet perturbateur du cœur de l'atome sur son électron de valence porté dans une orbite de Rydberg.

La leçon a décrit le montage simple permettant d'effectuer ces études de spectroscopie microonde. Les atomes excités traversaient une cavité formée de deux miroirs se faisant face, dans laquelle la microonde était appliquée, avant de sortir de la cavité et d'être détectés par ionisation. Au cours de ces expériences, il est apparu que les atomes, s'ils étaient initialement portés dans le niveau excité d'une transition résonante avec un mode de la cavité, effectuaient spontanément, sans application de microonde extérieure, une transition vers le niveau de Rydberg inférieur de la transition. Le système constituait alors un maser très particulier, dont le seuil était très bas. Alors que des masers ordinaires ne peuvent osciller qu'avec un milieu amplificateur contenant des milliards d'atomes, quelques centaines d'atomes de

Rydberg suffisaient à assurer l'émission d'une impulsion de microonde dans la cavité. Ce seuil très bas était dû à la très grande valeur du dipôle électrique de ces atomes et il est apparu, dès ce moment, que l'on pourrait réaliser un système dans lequel le maser aurait un seuil correspondant à un seul atome présent dans la cavité. L'effet pouvait également être vu comme une exaltation de l'émission spontanée d'un atome induite par la présence de la cavité, un effet qui avait été prédit théoriquement en 1946 par Edward Purcell, l'un des pères de la résonance magnétique.

Pour observer cet effet, il fallait cependant augmenter le facteur de qualité de la cavité. Une première étape dans cette direction a été de remplacer les miroirs, originellement en cuivre, par du niobium supraconducteur. Le seuil du maser à atomes de Rydberg a été rapidement abaissé jusqu'au moment où l'effet d'exaltation de l'émission spontanée a été observé pour la première fois en 1982. À la même époque, le groupe de D. Kleppner observait au MIT l'effet inverse, celui de l'inhibition de l'émission spontanée d'un atome dans une cavité ne supportant pas de mode à la fréquence de la transition atomique. Ces expériences ont été les actes de naissance effective de *l'électrodynamique en cavité*. En parallèle de ces expériences, le groupe de l'ENS a également réalisé des expériences de superradiance, dans lesquelles l'émission dans une cavité résonnante d'un grand nombre d'atomes initialement excités était étudiée. L'évolution collective de l'échantillon atomique a été analysée en détail dans une série d'expériences constituant la première étude expérimentale de l'effet du couplage symétrique d'un ensemble d'atomes à un mode du champ, un effet qui avait été décrit théoriquement par R. Dicke en 1954.

À partir de l'observation de l'effet d'exaltation de l'émission spontanée en cavité, le but du groupe de l'ENS a été d'observer le régime de couplage fort atome-cavité où le photon émis par l'atome survit assez longtemps pour pouvoir être ensuite absorbé, ramenant l'atome dans son état excité. Le système atome-cavité doit alors évoluer de façon réversible, en oscillant entre deux états. L'atome et le champ échangent alors périodiquement un quantum d'énergie et se trouvent la plupart du temps dans un état intriqué. Pour observer ce régime appelé « oscillation de Rabi dans le vide » (*vacuum Rabi oscillation*), il fallait encore augmenter le facteur de qualité des cavités de un à deux ordres de grandeur. Cela fut obtenu pour la première fois dans le groupe concurrent de Herbert Walther à Munich, qui utilisait des cavités supraconductrices cylindriques fermées. Les expériences de ce groupe ayant conduit à la réalisation et à l'étude du micromaser à atomes de Rydberg ont été décrites dans la leçon. Le groupe de l'ENS a lui aussi adopté, pour certaines expériences, ces cavités supraconductrices cylindriques qui lui ont permis en particulier de faire fonctionner pour la première fois un maser à deux photons.

La leçon a analysé cependant les raisons qui rendent ces cavités ouvertes impropres aux expériences projetées par le groupe de l'ENS : les atomes devant passer dans des trous de petites dimensions étaient soumis à des champs électriques parasites détruisant les superpositions d'états. D'autre part, la structure des cavités fermées rendait impossible d'y appliquer aux atomes de Rydberg des champs électriques statiques nécessaires à la manipulation de ces atomes dans certaines expériences. La leçon se concluait donc sur la description des améliorations que le groupe de l'ENS a apporté aux cavités supraconductrices ouvertes pour augmenter leur facteur de qualité. Ces améliorations devaient conduire à la réalisation en 2006 d'une cavité dans laquelle les photons peuvent rebondir entre les miroirs pendant plus d'un dixième de seconde, permettant à des milliers d'atomes traversant un à

un d'interagir avec le champ avant que celui-ci ne s'amortisse. Anticipant sur l'historique des expériences du groupe de l'ENS, la leçon se concluait sur la description de cette cavité de qualité exceptionnelle.

Expériences de logique quantique en électrodynamique quantique en cavité

La troisième leçon a décrit les expériences de l'ENS sur l'intrication contrôlée entre atomes et photons, la démonstration de portes quantiques et l'illustration de la complémentarité dans un interféromètre atomique. Ces expériences, effectuées au cours des années 1990 et au début des années 2000, ont été réalisées avec des atomes de Rydberg circulaires de nombre quantique principal de l'ordre de 50, dont les propriétés physiques et les méthodes de préparation et de manipulation ont d'abord été rappelées. Ces atomes ont, comme leur nom l'indique, une orbite électronique circulaire, correspondant à un moment angulaire maximal dans la direction perpendiculaire au plan de l'orbite. Leurs atouts pour les expériences d'électrodynamique en cavité sont multiples : ils ont une très longue durée de vie, un très grand dipôle électrique associé à la transition entre niveaux de Rydberg voisins ce qui les couple très fortement au rayonnement millimétrique. Ils sont faciles à ioniser dans un champ électrique de l'ordre d'une centaine de volts par cm. Enfin, leur polarisabilité électrique est énorme, ce qui rend les transitions entre niveaux accordables sur une gamme de l'ordre du MHz par effet Stark dans un champ de l'ordre du volt par cm. Toutes ces propriétés se démontrent par des calculs classiques très simples que la leçon a rappelés.

La méthode de préparation de ces états exploite des transitions optiques excitées en échelons successifs par trois lasers, suivies de transitions radiofréquences réalisées dans un champ électrique qui lève par effet Stark la dégénérescence des niveaux de moment angulaire croissant dans la multiplicité des états de Rydberg. La transition vers les niveaux circulaires se fait par passage adiabatique le long de l'échelle des niveaux Stark ainsi créée, avec une très grande efficacité. Une impulsion microonde classique permet ensuite de mélanger de façon cohérente deux niveaux circulaires voisins, réalisant une superposition d'états dont la fonction d'onde est un paquet tournant autour du cœur de l'atome à la fréquence de la transition entre ces niveaux. Ce paquet d'onde rappelle une planète tournant autour du soleil, ou encore l'aiguille d'une horloge tournant sur son cadran. C'est cette dernière image qui sera exploitée dans la leçon suivante pour décrire la méthode de détection non destructive de photons à l'aide de ces atomes.

La deuxième partie de la leçon a été consacrée à la description des expériences exploitant l'oscillation de Rabi résonnante du système atome-champ entre les deux états $|e,0\rangle$ et $|g,1\rangle$ représentant respectivement l'atome dans l'état de Rydberg supérieur $|e\rangle$ (ou inférieur $|g\rangle$) de la transition de Rydberg, en présence de 0 (ou de 1) photon dans la cavité. La fréquence Ω_0 de cette oscillation (appelée fréquence de Rabi du vide) est de l'ordre de 50 kHz. Dans ces expériences, l'atome et le champ sont des bits quantiques (ou qubit) évoluant chacun entre deux états. Le couplage entre ces qubits est réalisé à l'aide d'oscillations de Rabi de durée variable, l'interaction étant branchée et débranchée de façon déterministe en commutant dans la cavité de petits champs électriques déplaçant les niveaux et mettant à résonance ou hors de résonance les atomes traversant successivement la cavité avec une vitesse

fixée. Deux cavités auxiliaires appelées R_1 et R_2 , situées de part et d'autre de la cavité piégeant le champ (appelée cavité C) permettent d'appliquer des impulsions microonde résonnantes classiques aux atomes avant et après leur interaction avec les photons contenus dans C. L'impulsion « amont » dans R_1 prépare les atomes-qubits dans une superposition d'états et l'impulsion « aval » dans R_2 , combinée à la détection par ionisation, permet de mesurer une superposition arbitraire d'états du qubit. La combinaison des deux impulsions microonde appliquées séparément dans le temps aux atomes réalise un interféromètre atomique de Ramsey, un dispositif extrêmement flexible, que le groupe de l'ENS a utilisé de façon répétée dans toutes les expériences (voir aussi leçons suivantes).

Lorsque l'interaction atome-champ est réglée pour durer un temps t tel que $\Omega_0 t = \pi/2$, l'oscillation de Rabi intrique de façon maximale l'atome et le champ, réalisant la transformation $|e,0\rangle \rightarrow (|e,0\rangle + |g,1\rangle)/\sqrt{2}$. Lorsque $\Omega_0 t = \pi$, l'atome et le champ échangent un quantum d'excitation, réalisant les transformations $|e,0\rangle \rightarrow |g,1\rangle$ et $|g,1\rangle \rightarrow -|e,0\rangle$. Une autre impulsion de Rabi très utile correspond à $\Omega_0 t = 2\pi$. Son effet est de réaliser les transformations $|e,0\rangle \rightarrow |e,0\rangle$ et $|g,1\rangle \rightarrow -|g,1\rangle$, alors que l'atome dans l'état $|g\rangle$ traversant dans les mêmes conditions la cavité n'est pas affecté : $|g,0\rangle \rightarrow |g,0\rangle$.

Pour intriquer de façon maximale deux atomes, le premier étant envoyé dans C (initialement vide de photons) dans l'état e et le second dans l'état g , on réalise dans C une impulsion de Rabi $\pi/2$ sur le premier atome et une impulsion de Rabi π sur le second. La première impulsion intrique le premier atome avec le champ de C et la seconde impulsion échange les excitations du champ et du second atome, ce qui produit finalement l'état à deux atomes intriqué $(|e,g\rangle - |g,e\rangle)/\sqrt{2}$. Le champ de C, intriqué de façon transitoire avec le premier atome se retrouve finalement dans l'état vide initial. Il joue ainsi un rôle de catalyseur pour intriquer de façon déterministe les deux atomes.

Le groupe de l'ENS a aussi réalisé une mémoire quantique, en stockant dans la cavité une information initialement portée par un premier atome, avant de copier cette information sur un second atome. Le premier atome, préparé dans l'état superposition $a|e\rangle + b|g\rangle$ dans R_1 subit une impulsion de Rabi π dans C, initialement vide, préparant son champ dans l'état $a|1\rangle + b|0\rangle$. Un second atome, initialement dans g subit alors une impulsion π de Rabi dans ce champ et sort de C dans l'état $-a|e\rangle + b|g\rangle$ qui, à un déphasage trivial près, est identique à l'état initial du premier atome. En appliquant au second atome une impulsion microonde classique dans R_2 avant de le détecter, on analyse son état final et on vérifie que la superposition d'états initialement portée par le premier atome a bien été transférée au second.

La leçon a également décrit l'opération d'une porte logique quantique couplant un qubit « contrôle » et un qubit cible de telle manière que la cible subisse une transformation unitaire si le contrôle est dans l'état de base 1 et reste inchangée si le contrôle est dans l'état 0 (dans tous les cas, le contrôle reste invariant). Pour réaliser cette expérience, il faut manipuler trois états atomiques circulaires : les états e et g de nombres quantiques principaux 51 et 50 (la transition entre ces deux états étant résonnante avec le champ de C) et un troisième état circulaire i de nombre quantique principal 49. La transition de g vers i est très désaccordée avec le champ de C, ce qui fait qu'un atome dans i est totalement insensible à la présence de photons dans la cavité-piège. Le qubit contrôle est alors le champ de C dans l'état à 0 ou 1 photon, alors que le qubit cible est un atome de Rydberg évoluant entre les états g et i .

Le temps de couplage t entre les atomes et le champ de C est réglé pour réaliser une impulsion de Rabi 2π dans la cavité vide pour un atome évoluant entre les états e et g . L'interaction entre le photon et le qubit atomique réalise alors les transformations $|i,0\rangle \rightarrow |i,0\rangle$, $|g,0\rangle \rightarrow |g,0\rangle$, $|i,1\rangle \rightarrow |i,1\rangle$, $|g,1\rangle \rightarrow -|g,1\rangle$ qui définissent une « porte de phase » induisant un déphasage conditionnel de π sur le qubit cible si et seulement si le qubit contrôle est dans l'état 1. En appliquant au qubit cible deux impulsions mélangeant ses états dans R_1 et R_2 , on transforme cette porte de phase en porte « CNOT » qui laisse la cible inchangée si le contrôle est dans l'état 0 et la fait basculer d'un état à l'autre si le contrôle est dans l'état 1. Une telle porte réalise aussi un comptage non-destructif (QND) d'un seul photon puisque l'état final de l'atome traversant la cavité (i ou g) est déterminé par le nombre de photons (0 ou 1), sans que ce nombre change pendant la mesure. Cette expérience, qui ne permet pas de compter le nombre de photons au-delà de la valeur 1, a été le prélude aux expériences de comptage non destructif d'un nombre arbitraire de photons, décrit dans la leçon suivante.

L'utilisation de pulses de Rabi de durée contrôlée sur des atomes traversant la cavité un à un peut être décrite comme une sorte de « tricotage quantique ». En étendant la procédure à trois atomes, le groupe de l'ENS a pu préparer un triplet de particules intriquées, ce que l'on appelle un état GHZ. La préparation implique une impulsion de Rabi $\pi/2$ appliquée à un premier atome, réalisant ainsi un état intriqué entre cet atome et le champ de la cavité. L'état du champ laissé dans C par le premier atome est alors lu de façon QND par un second atome effectuant une impulsion de Rabi 2π . L'état des deux atomes et du champ devient alors $(|e,0,i\rangle + |g,1,g\rangle)/\sqrt{2}$. Un troisième atome, initialement dans g , traverse alors C et subit une impulsion de Rabi π , copiant ainsi l'état du champ et ramenant la cavité dans le vide. L'état final des trois atomes devient alors $(|e,i,g\rangle + |g,g,e\rangle)/\sqrt{2}$, ce qui est bien un état de type GHZ.

Une autre expérience décrite dans cette leçon a testé le principe de complémentarité en étudiant comment les franges d'un interféromètre de Ramsey disparaissent lorsqu'une information sur le chemin suivi par l'atome se transmet à l'état du champ réalisant la seconde impulsion de l'interféromètre. Il faut pour cela que ce champ soit très petit et qu'il soit produit dans une cavité de grande surtension pour que l'addition d'un photon change son état de façon appréciable. Ce champ est en fait produit dans la cavité C juste avant que l'atome n'en sorte. L'expérience montre que les franges de Ramsey sont visibles si la seconde impulsion de l'interféromètre est produite avec un champ contenant un nombre de photons grand devant l'unité (de l'ordre de 10) alors que leur contraste s'effondre lorsque le nombre de photon devient de l'ordre de l'unité. Cette expérience illustre de façon très claire les idées de Bohr sur la complémentarité et peut être considérée comme une variante bien réelle de l'une des expériences de pensée que Bohr et Einstein ont discutées au congrès Solvay de 1927 (le champ de la seconde impulsion de Ramsey jouant le rôle de la fente mobile de cette expérience).

Le comptage non destructif de photons dans une cavité

La quatrième leçon a décrit des expériences de comptage non-destructif de photons (QND). Elles sont basées sur la mesure des déplacements d'énergie lumineux (*light-shifts*) induits sur des atomes de Rydberg traversant un à un la

cavité. Ces expériences, qui nécessitent une cavité de très grand facteur Q , illustrent de façon idéale les principes de la mesure en physique quantique. Elles ont permis d'observer pour la première fois les sauts quantiques de la lumière. L'acquisition d'information QND partielle sur le nombre de photons, combinée à une injection contrôlée de champ dans la cavité, a également permis de mettre en œuvre des procédures de rétroaction quantique (*quantum feedback*) stabilisant dans la cavité des états de Fock à nombres de photon prédéterminés. Les expériences de mesure QND de la lumière ont été citées dans la présentation faite par le comité Nobel pour justifier l'attribution du prix. Comme elles avaient fait l'objet de cours détaillés dans les années récentes (voir annuaire des années 2007-2008 et 2010-2011), elles ne seront que brièvement rappelées ici.

L'observation non-destructive de particules de lumière n'est pas un processus aisé à mettre en œuvre. La leçon a rappelé que la détection usuelle de photons par effet photo-électrique détruit les particules lumineuses. Pour les mesurer « *in vivo* », il faut utiliser des atomes non résonnants et exploiter l'effet dispersif des déplacements induits par la lumière sur les atomes. Le dispositif expérimental combinant une cavité de très grande qualité (durée de vie d'un photon de l'ordre d'un dixième de seconde) avec un jet d'atomes de Rydberg circulaires extrêmement sensibles aux microondes est idéal pour effectuer cette détection QND d'un champ quantique. L'expérience utilise l'interféromètre de Ramsey décrit à la troisième leçon. Les atomes, préparés par une impulsion microonde R_1 dans une superposition d'états e et g à l'entrée de la cavité piégeant les photons acquièrent un dipôle électrique tournant à la fréquence de la transition atomique. Lorsqu'ils traversent la cavité C , ces dipôles sont déphasés d'un angle proportionnel au nombre de photons. Ce déphasage est mesuré par l'interféromètre complété par une seconde impulsion R_2 appliquée aux atomes à la sortie de C avant qu'ils ne soient finalement détectés par ionisation. L'appareil peut être vu comme un piège à photons combiné à une horloge à atomes de Rydberg retardée (ou avancée) d'une quantité proportionnelle au nombre de quanta lumineux contenus dans le piège.

Sous sa forme la plus simple, l'expérience permet de distinguer les états du champ à 0 ou 1 photon. Il suffit pour cela de régler le dispositif pour qu'un seul photon déphase le dipôle atomique d'un angle π (ce réglage s'effectuant en choisissant convenablement le temps d'interaction t entre les atomes et le champ de C et le désaccord de fréquence atome-cavité). Le dipôle des atomes sortant de C pointe alors dans deux directions opposées suivant que la cavité contient 0 ou 1 photon. Les franges de Ramsey correspondant à la probabilité de détecter finalement les atomes dans e ou dans g sont alors décalées d'une demi-frange lorsque le nombre de photons varie d'une unité. Il suffit de régler l'interféromètre pour qu'il soit au maximum d'une frange si C contient 1 photon. Il est alors au minimum d'une frange lorsque C est vide. Les atomes sont alors détectés majoritairement dans e s'il y a un photon dans C , dans g si C est vide. (le contraste des franges n'étant pas parfait, il y a un peu de bruit correspondant aux erreurs de comptage). La mesure a été effectuée sur le champ thermique de C à la température de 0,8 K. La cavité contient alors un photon avec une probabilité de 5 %. On observe clairement sur une suite d'atomes traversant la cavité comment le nombre de photons saute aléatoirement entre 0 et 1 : à une suite d'atomes détectés majoritairement dans l'état g (signalant que C est vide) succède une séquence d'atomes détectés dans e (signalant l'apparition spontanée d'un photon thermique), les atomes suivants revenant ensuite majoritairement dans g lorsque ce photon disparaît.

Lorsque la cavité contient un champ plus grand, un seul atome n'est plus suffisant pour mesurer le nombre de photons. Il faut alors extraire l'information du champ progressivement, en détectant une succession d'atomes traversant C, chaque atome fournissant un bit d'information (atome trouvé dans e ou g). L'expérience a été effectuée sur un petit champ cohérent, contenant entre 0 et 7 photons injectés dans la cavité par une source classique de microonde. Les photons émis par cette source en impulsion sont diffractés sur les bords des miroirs de C et quelques-uns finissent piégés dans la cavité. La distribution du nombre de photons dans C, initialement plate (absence totale d'information) évolue au fur et à mesure que les atomes sont détectés jusqu'à ce qu'un seul nombre de photons soit fixé. La distribution de probabilité est inférée après chaque atome par un argument exploitant la loi de Bayes. Une fois ce nombre obtenu, les atomes suivants confirment le résultat, jusqu'à ce que la relaxation (perte de photons due au facteur de qualité fini de C) le fasse varier par saut quantique. Les atomes détectent ces sauts qui ont ainsi été observés pour la première fois sur la lumière. Une analyse statistique d'un grand nombre de réalisations de cette expérience est en accord parfait avec les prédictions de l'électrodynamique quantique. Elle montre en particulier qu'un état de Fock à n photons a une durée de vie T_c/n où T_c est le temps d'amortissement classique du champ dans C.

Cette expérience de comptage QND de photons peut aussi être vue comme une méthode de préparation d'états de Fock à nombre de photons bien déterminé à partir d'un champ cohérent classique initialement injecté dans C. Cette méthode de préparation est non-déterministe, rien ne permettant de prévoir à l'avance quel nombre de photon va être finalement choisi par la mesure. On peut cependant rendre le procédé déterministe en exerçant sur le champ de la cavité une rétroaction quantique (*quantum feedback*). Au fur et à mesure que les atomes détectés fournissent une information sur le champ, l'ordinateur couplé au dispositif estime la distribution de photons en temps réel, détermine une « distance » séparant dans l'espace des états cette distribution de celle de l'état de Fock que l'on cherche à produire et commande l'injection d'un champ correcteur dans C pour rapprocher le champ de l'état cherché.

Ce champ correcteur peut être soit un petit champ cohérent classique injecté dans C par diffraction, soit le champ d'un photon émis ou absorbé dans C par des atomes résonnants envoyés dans C entre des séquences d'atomes non résonnants détecteurs. Pour effectuer la commutation entre atomes résonnants et non-résonnants, l'ordinateur pilotant l'expérience commande l'application d'un petit voltage entre les miroirs de C. L'expérience est réalisée en boucle, les séquences de mesure et de correction étant alternées jusqu'à ce que l'ordinateur estime que l'état cherché a été obtenu. Une mesure QND indépendante réalisée ensuite confirme ce résultat. Si la rétroaction est poursuivie après la convergence du nombre de photons, elle détecte les sauts quantiques quand ils finissent inévitablement par se produire et en corrige les effets, maintenant effectivement en moyenne le champ dans l'état de Fock voulu. Les états à nombre de photons fixé de $n = 0$ à $n = 7$ ont ainsi pu être préparés et stabilisés. La leçon a décrit rapidement cette expérience de *quantum feedback* qui avait déjà été analysée en détail dans un cours antérieur (voir annuaire de l'année 2010-2011).

Chats de Schrödinger de lumière et études de la décohérence

La cinquième leçon a décrit les expériences du groupe ENS-Collège de France sur les états « chats de Schrödinger » de lumière et les études sur la décohérence associées. Ces expériences ont été mentionnées par le comité Nobel, avec celles sur le comptage

non-destructif de photons, dans la présentation qu'il a faite du prix. Dans ces expériences, on manipule la phase du champ et, à partir d'états cohérents, on prépare des superpositions d'états de phases différentes appelés « chats de Schrödinger ». Ces états sont générés à l'aide d'un seul atome, lui-même porté dans une superposition de deux états de Rydberg associés à des indices de réfraction différents pour le champ. À l'aide d'un second atome-sonde traversant la cavité après l'atome préparateur du chat de Schrödinger, le groupe du LKB a étudié la décohérence de ces états, due à leur couplage par perte de photon à un environnement de modes du champ initialement vides. Cette décohérence est d'autant plus rapide que le champ contient plus de photons, ce qui illustre un des aspects du passage entre les mondes quantique et classique. La leçon a également décrit des expériences plus récentes (2008) de reconstruction complète par tomographie d'états non-classiques du champ qui ont permis d'étudier de façon plus précise la décohérence. Ces expériences exploitent l'information fournie par un grand nombre d'atomes traversant un à un la cavité pendant son temps d'amortissement. Elles ont été décrites en détail dans des cours antérieurs et leur présentation a été simplement résumée dans la leçon.

L'effet d'indice de réfraction induit par un atome non-résonnant sur le champ de la cavité a d'abord été analysé. Il s'agit de l'action en retour de l'atome sur le champ, complémentaire de l'effet dispersif produit par le champ sur le dipôle atomique. On montre simplement qu'un seul atome induit sur la phase d'un champ cohérent un déphasage égal à celui qu'un seul photon produit sur le dipôle de l'atome. Ce déphasage peut ainsi atteindre la valeur de 180° sur un champ contenant en moyenne plusieurs photons. De plus, le signe du déphasage change suivant que l'atome traverse la cavité dans l'état e ou g . Si l'atome est préparé avant d'entrer dans C par une impulsion microonde R_1 dans une superposition de ces deux états, un champ cohérent initialement injecté dans C acquiert lorsque l'atome traverse la cavité deux phases à la fois, et les états de l'atome et du champ sont intriqués. Il s'agit bien ainsi d'une situation analogue à celle que Schrödinger avait décrite d'un chat suspendu entre vie et mort sous l'effet de son couplage à un atome radioactif subissant une désintégration le faisant évoluer entre un état excité et un état désexcité final. Le champ peut également être vu comme un appareil mesurant l'énergie de l'atome, sa phase prenant deux valeurs associées aux deux valeurs possibles de cette énergie. Après que l'atome est sorti de la cavité, ses états sont à nouveau mélangés par une seconde impulsion microonde dans R_2 . Il en résulte que la détection finale de l'atome dans e ou dans g ne fournit pas d'information sur l'état de l'atome quand il a traversé la cavité. L'ambiguïté quantique est ainsi préservée et le champ est alors projeté par la mesure de l'atome dans un état superposé ayant deux composantes de phase différentes. C'est cet état que l'on appelle un chat de Schrödinger.

La cohérence de cette superposition d'état peut être testée à l'aide d'un deuxième atome sonde traversant C après le premier et subissant les mêmes impulsions microonde à l'entrée et à la sortie de la cavité. En analysant les corrélations entre les états finalement détectés des deux atomes, le premier préparant le chat de Schrödinger et le second le sondant, on obtient un signal décroissant exponentiellement qui mesure la perte de cohérence du système en fonction du temps. Cette étude quantitative de la décohérence a confirmé les prédictions théoriques de ce phénomène et montré que la décohérence est d'autant plus rapide que le champ contient plus de photons.

Dans la dernière partie de la leçon, on a brièvement rappelé comment on pouvait reconstruire complètement l'état du champ dans la cavité par tomographie quantique. On combine alors des mesures QND du champ avec des translations dans son espace

des phases obtenues en le mélangeant (homodynage) avec des champs cohérents de phases et d'amplitudes variées. Les résultats de nombreuses mesures effectuées sur un grand nombre de copies permettent de reconstruire la fonction de Wigner du champ, qu'il s'agisse de champs cohérents, de champs à nombres de photons définis ou d'états de type chat de Schrödinger. En reconstruisant les fonctions de Wigner de chats à des temps différents après leur préparation, le groupe de l'ENS-Collège de France a pu réaliser des films de la décohérence montrant comment la fonction de Wigner, qui présente initialement des franges d'interférence signalant l'existence de cohérence entre les deux composantes du « chat », évolue finalement vers un mélange statistique dans lequel ces franges ont disparu.

Comparaison de l'électrodynamique en cavité avec la physique des ions piégés et l'électrodynamique des circuits

La sixième et dernière leçon a passé en revue des expériences de contrôle de systèmes quantiques isolés qui rappellent par plusieurs aspects les expériences d'électrodynamique quantique en cavité de l'ENS. La leçon a commencé par décrire des expériences d'ions piégés, en insistant surtout sur celles menées par David Wineland et son groupe. Puis elle a rappelé rapidement les expériences d'électrodynamique des circuits (circuit QED) qui couplent des atomes artificiels (qubits Josephson) à des résonateurs radiofréquence. Ces dernières expériences avaient été décrites en détail dans le cours de l'année 2010-2011 ainsi que dans le séminaire du 9 avril 2013 d'Andreas Wallraff.

La description des expériences d'ions piégés a tout d'abord analysé comment la détection des sauts quantiques d'ions uniques est devenue la méthode de choix pour mesurer de façon non destructive l'état interne des ions. L'analogie entre le couplage des photons avec les atomes en cavité QED et celui, réalisé par excitation laser, des états internes des ions et de leurs états de vibration externe a ensuite été rappelée. Ces rappels ont été suivis par une rapide description des expériences de refroidissement laser des ions dans leur état fondamental de vibration. Ont ensuite été décrites les expériences d'oscillations de Rabi d'un ion dont le mouvement externe est un état cohérent de vibration, les réalisations de porte logique quantique avec des ions et celles réalisant l'intrication quantique de deux ions. La reconstruction de l'état de vibration d'un ion piégé par tomographie a conclu cette première partie de la leçon.

La seconde partie a rapidement rappelé comment les expériences réalisées avec des qubits supraconducteurs Josephson ont ouvert un champ de recherche nouveau, celui de l'Electrodynamique quantique des circuits, qui présente de grandes analogies avec l'Electrodynamique quantique des atomes de Rydberg en cavité. Les méthodes de détection dispersives des qubits Josephson ont été comparées à celles mise en œuvre en cavité QED. La préparation d'états nombres de photons et d'états de superpositions arbitraires de ces nombres a été décrite, ainsi que la reconstruction de ces états par tomographie. Les ordres de grandeur des paramètres essentiels de ces expériences (temps de couplage des qubits entre eux et avec des photons de radiofréquence, temps de relaxation et de décohérence) ont été analysés et comparés avec ceux de l'électrodynamique en cavité avec des atomes de Rydberg. La leçon s'est conclue par une brève évocation des perspectives ouvertes par les recherches d'électrodynamique en cavité et celles sur les circuits supraconducteurs.

SÉMINAIRES ACCOMPAGNANT LES LEÇONS

Les six leçons ont été suivies chacune d'un séminaire^b. Plusieurs ont porté sur la mesure précise du temps, qui devait être initialement le thème du cours de l'année. L'un des séminaires a été donné par David Wineland, co-récipiendaire du prix Nobel de physique 2012 :

12 mars 2013 : « La mesure du temps au XXI^e siècle », Christophe Salomon, Laboratoire Kastler Brossel de l'ENS.

19 mars 2013 : « Precision laser spectroscopy of Hydrogen », Theodor Hänsch, Max Planck Institute of Quantum Optics, Garching et Université LMU, Munich.

26 mars 2013 : « Single atom clocks », David Wineland, National Institute of Standards and Technology, Boulder, États-Unis.

2 avril 2013 : « Probing and controlling quantum matter using ultra-cold quantum gases », Immanuel Bloch, Max Planck Institute of Quantum Optics, Garching et Université LMU, Munich.

9 avril 2013 : « Cavity quantum electrodynamics with superconducting circuits », Andreas Wallraff, ETH, Zurich

16 avril 2013 : « Horloges à atomes neutres dans les domaines microonde et optique : recherche de la performance ultime et applications », Sébastien Bize, SYRTE, Observatoire de Paris.

PRIX NOBEL

Les cérémonies du prix Nobel à Stockholm et dans les pays nordiques (5-15 décembre 2012)

Le prix Nobel de physique a été remis à Serge Haroche et David Wineland par le roi de Suède, au cours de la cérémonie traditionnelle qui s'est tenue à Stockholm le 10 décembre 2012. Au cours du banquet qui a suivi à l'hôtel de ville de Stockholm, Serge Haroche a prononcé en anglais une brève allocution au nom des deux lauréats de la physique, dont voici la traduction :

Vos Majestés, vos Altesses royales, Chers amis et collègues, Mesdames et Messieurs, Permettez-moi, à l'issue de ce merveilleux banquet, d'évoquer la mémoire d'Erwin Schrödinger. Son travail a eu un impact sur tous les champs scientifiques et culturels qui ont été célébrés ce soir. Il a reçu le prix Nobel de physique en 1933 pour avoir trouvé l'équation qui explique le comportement de la matière à l'échelle quantique. L'équation de Schrödinger rend compte également, du moins en principe, de la structure de toutes les molécules étudiées en chimie et en biologie. Elle influence également fortement le monde de l'économie. La plupart des appareils qui ont changé notre vie sont basés sur la physique quantique, du laser au transistor, du GPS au téléphone portable, de l'imagerie par résonance magnétique au réseau de télécommunications mondial. L'équation de Schrödinger est fondamentale pour expliquer le fonctionnement de ces merveilles technologiques dont les ventes se chiffrent en milliards de dollars.

b. Les séminaires donnés par Theodor Hänsch et David Wineland sont disponibles en vidéo sur le site Internet du Collège de France : <http://www.college-de-france.fr/site/serge-haroche/seminar-2012-2013.htm> [Ndlr].

Mais que dire des mérites de Schrödinger en littérature ? Il n'a peut-être jamais écrit de roman mais il a inventé un personnage qui a fait couler beaucoup d'encre, un personnage qui est même apparu dans des films, engendrant des discussions métaphysiques sans fin. Je fais évidemment allusion au légendaire « chat de Schrödinger », suspendu entre la vie et la mort par les lois de la physique quantique et son principe de superposition. Dans sa fameuse expérience de pensée, Schrödinger pourrait avoir choisi un objet inanimé ou une créature moins attachante, un cafard par exemple. Imaginez : Le cafard de Schrödinger. L'histoire aurait été tout aussi probante pour expliquer l'étrange logique du monde quantique, mais beaucoup moins frappante. Par cette étincelle de génie qui lui a fait choisir le bon animal dans la bonne situation dramatique, et donner vie à un personnage immortel aussi connu que le chat de Cheshire d'*Alice au pays des merveilles*, Schrödinger a apporté sa pierre à la culture mondiale.

Ma prédilection pour ce félin quantique est évidemment chargée de préjugés. David Wineland et moi-même recevons le prix Nobel pour avoir créé des versions miniatures de ce fameux chat, constituées de quelques atomes et de quelques photons. Nous avons été tous deux accompagnés, dans cette longue aventure de recherche, par des collègues merveilleux, sans lesquels nous n'aurions jamais réussi. Nous sommes très heureux que beaucoup parmi eux soient présents ce soir. D'autres groupes, de par le monde, travaillent également dans ce domaine, élèvent diverses variantes de chats de laboratoires et essaient de préserver aussi longtemps que possible leurs propriétés quantiques. Quel avenir pour ces chats ? Une réponse simple, trop simple peut-être, est qu'ils vont se transformer en ordinateur quantique. Peut-être. Je pense plutôt qu'ils conduiront à quelque application imprévue, plus surprenante encore que cette machine mythique. Lorsque le ministre Gladstone demanda à Faraday à quoi pourrait servir sa recherche sur l'électricité, ce physicien du XIX^e siècle répondit : « un jour, Monsieur, vous pourriez la taxer ». On est tenté de donner à nos politiciens la même réponse : « un jour on taxera peut-être le chat de Schrödinger ».

Je dois ajouter cependant que si quelqu'un doutait du fait qu'on puisse taxer son chat, c'était bien Schrödinger. Ne croyant pas à la possibilité que soient jamais réalisées de telles expériences, il a écrit « Nous n'expérimentons jamais sur un seul électron ou un seul atome, ou une seule petite molécule. Dans les expériences de pensée, nous imaginons simplement le faire. Les conséquences qui en découlent sont invariablement ridicules ». En dépit de notre admiration pour Schrödinger, mon ami David Wineland et moi-même ne pouvons sur ce point qu'être en désaccord avec lui : pour nous, les conséquences, qui trouvent leur consécration dans cette magnifique soirée, sont loin d'avoir été ridicules.

Les conférences Nobel de Serge Haroche et David Wineland ont été données à l'Académie des sciences de Stockholm le 8 décembre 2012. Celle de S. Haroche était intitulée : « Controlling photons in a box and exploring the quantum to classical boundary » (voir la vidéo de cette conférence sur le site nobelprize.org). Une émission de télévision de la BBC, *Nobel Minds*, a réuni l'ensemble des lauréats des prix Nobel 2012 le 6 décembre, au palais royal de Stockholm et a été l'occasion d'un échange entre eux sur les enjeux de la science et de la recherche. Le 11 décembre, les lauréats ont été reçus par le roi et la famille royale à un dîner d'État donné au palais royal. Entre le 11 et le 14 décembre, Serge Haroche et David Wineland ont donné des conférences dans des lycées de Stockholm (lycées français et suédois) et dans des universités de Suède (Uppsala, Göteborg et Lund), du Danemark (Copenhague) et de Finlande (Helsinki). Les conférences de S. Haroche avaient pour titre celui de sa conférence Nobel.

Interventions dans les médias liées au prix Nobel

Le prix Nobel de physique 2012 a été annoncé et amplement commenté dans la presse et les médias français et internationaux. Serge Haroche a répondu à de nombreuses demandes d'interview de la télévision française (France 2, France 3, LCI, Arte, Chaîne parlementaire) et de plusieurs chaînes de télévision étrangères (Maroc, Israël). Il a également participé à de multiples émissions de radio (à France Inter, RFI, Radio J, France Culture, Europe 1) et à des rencontres avec le public organisées par la presse (*Libération*, *Le Point*).

AUTRES DISTINCTIONS

Serge Haroche a été élevé au rang de commandeur dans l'ordre de la Légion d'honneur. Il a été nommé membre associé étranger de l'Académie des sciences Hassan II du Maroc et membre étranger de l'American Academy of Arts and Sciences des États-Unis.

Notons enfin que le Président de la République a tenu à reconnaître les travaux de l'équipe récompensée par le prix Nobel en rendant une visite conjointe au Laboratoire Kastler Brossel de l'ENS et au Collège de France. Il a à cette occasion prononcé dans l'amphithéâtre Marguerite de Navarre un discours sur la recherche et a participé à une réception au cours de laquelle il a eu de nombreux échanges avec des chercheurs et des membres des communautés de l'ENS et du Collège de France.

CONFÉRENCES ET SÉMINAIRES

S. Haroche a donné les séminaires, cours et conférences suivants entre juillet 2012 et juin 2013 :

Juillet 2012 :

- Colloquium à l'université de Siegen, Allemagne : « Juggling with photons in a box to explore the quantum world ».
- Cours à l'école d'été associée à la Conférence internationale de physique atomique de Paris (ICAP) : « Cavity QED with Rydberg atoms »
- Communication invitée à l'International Conference on Atomic Physics (ICAP) à Paris : « Cavity QED with real and artificial atoms ».

Août 2012 :

- Communication invitée à la First Gordon Conference on Quantum Science (Boston, États-Unis) : « Quantum feedback experiments in Cavity QED ».

Septembre 2012 :

- Communication invitée au Kavli Prize Symposium on Nanoscience 2012 à Bergen, Norvège : « Juggling with photons and real or artificial atoms in a cavity ».
- Cours à l'International School of Physics and Technology of Matter, Otrante, Italie : « Advances in Cavity QED and in Circuit QED ».

Octobre 2012 :

- Conférence grand public à l'Institut Weizmann, Israël : « Juggling with photons in a box ».

Novembre 2012 :

- Conférence invitée au symposium en l'honneur de Pierre Glorieux, Lille : « Jongler avec des photons dans une boîte ».
- Communication invitée à la Conférence Quantum Optics VI de l'Amérique latine à Piriapolis (Uruguay) : « Juggling with photons in a box ».

Janvier 2013 :

- Conférence à l'Académie des sciences dans le cadre des séances grand public « Défis du XXI^e siècle », Paris : « Jongler avec des photons dans une boîte et réaliser des 'chats de Schrödinger' de lumière ».
- Conférence dans le cadre des rencontres du Collège de France, Paris : « Le chat de Schrödinger et autres histoires quantiques ».
- Conférence invitée au World Economic Forum (WEF) de Davos, Suisse : « Power and strangeness of the quantum » et présentation « Beta Zone » sur la physique quantique au WEF.

Février 2013 :

- Conférence grand public au Forum Science Action de Rouen : « Puissance et étrangeté du quantique ».
- Intervention dans un débat des Rencontres capitales « Comment la recherche et la science peuvent-elles changer la société » à l'université de Lyon.
- Conférence à l'Académie Hassan II des sciences du Maroc, Rabat : « Jongler avec des photons dans une boîte et réaliser des 'chats de Schrödinger' de lumière ».
- Conférence grand public à l'université de Rabat, Maroc : « Puissance et étrangeté du quantique ».
- Débat avec les élèves et les parents d'élèves du lycée Lyautey de Casablanca, Maroc.

Mars 2013 :

- Conférence invitée au symposium en l'honneur de Daniel Kleppner, Sao Carlos, Brésil : « Reminiscing about the early days of Cavity Quantum Electrodynamics ».
- Présentation sur la physique quantique au Joint Research Center de la Commission européenne, Bruxelles : « Power and Stangeness of the quantum ».
- Conférence au March meeting de l'American Physical Society, Baltimore, États-Unis : « Controlling photons in a box and exploring the quantum to classical boundary ».

Avril 2013 :

- Conférence invitée au congrès annuel de la Société néerlandaise de physique, Delft, Pays Bas : « Particle control in a quantum world ».
- Conférence Schrödinger à Vienne, Autriche : « Controlling photons in a box and exploring the quantum to classical boundary ».
- Conférence invitée à l'inauguration du « Central Analytics Center » de l'université technique de Dresde, Allemagne : « Particle control in a quantum world ».
- Débat sur la science et la recherche dans le cadre des journées Futurapolis à Toulouse.
- Colloquium du département de physique de l'ENS, Paris : « Einstein's photon and Bohr's atom revisited in Cavity Quantum Electrodynamics ».
- Introduction au symposium Gamma-Knife à l'hôpital Pitié-Salpêtrière, Paris : « Light and Medicine ».

Mai 2013 :

- Conférence à la réunion annuelle de l'Académie brésilienne de physique, Rio de Janeiro, Brésil : « Particle control in a quantum world ».
- Conférence invitée au congrès annuel de la Société belge de physique, Louvain (Belgique) : « Particle control in a quantum world ».
- Communication invitée à la conférence 'Decoherence and Friends' à l'université de Waterloo (Canada) : « Schrödinger cats and decoherence in cavity QED », suivie d'une conférence grand public sur la physique quantique.

- Conférence publique Hertzberg à l'université de Montreal (Canada) : « Jongler avec des photons dans une boîte pour explorer le monde quantique ».
- Communication invitée au congrès annuel de l'association des physiciens canadiens, Montréal (Canada) : « Controlling photons in a cavity by quantum feedback ».

Juin 2013 :

- Conférence invitée au congrès annuel de la section de physique atomique et d'optique de l'American Physical Society (DAMOP) à Quebec (Canada) : « Controlling photons in a box and exploring the quantum-classical boundary ».
- Communication invitée à la Conférence internationale de spectroscopie laser (ICOLS) à Berkeley (États-Unis) : « Manipulating quantum fields in cavities ».
- Communication invitée à la Conférence on Coherence and Quantum Optics (session en l'honneur de Fred Cummings), Rochester (États-Unis) : « My life in physics, from the Jaynes Cummings model to the dressed atom and Cavity QED ».
- Débat avec Gabriele Veneziano sur les questions ouvertes au sujet de l'univers au Collège des Bernardins (Paris).
- Conférence publique de la fondation Siemens à Munich (Allemagne) : « Juggling with photons in a box to explore the quantum world ».
- Conférence invitée au Congrès ECAMP (European Conference on atoms, molecules and photons), Aarhus, Danemark : « Manipulation of individual quantum systems ».

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 codirige, 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). Depuis le début 2010, ce projet est soutenu par un contrat européen de l'ERC (projet DECLIC, acronyme pour « Decoherence of Light in Cavities ») et par un contrat de l'ANR.

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.

Les travaux de l'année 2012-2013 ont prolongé les activités des années antérieures du groupe, avec comme but le développement de nouvelles méthodes de contrôle et de mesure d'états sur un système quantique isolé. Plusieurs axes de recherche peuvent être distingués.

1. Mesure adaptative non destructive du nombre de photons dans une cavité

La méthode de mesure QND démontrée par le groupe ENS-Collège de France en 2006-2007 était passive. L'information sur le champ était acquise progressivement par la détection d'atomes traversant successivement la cavité piégeant le champ. Chaque atome était soumis à une mesure interférométrique dont les paramètres étaient réglés suivant une procédure automatique, indépendante des informations obtenues par les atomes précédents. Cette méthode passive convergeait vers un

résultat (état de Fock à nombre de photons défini) après la mesure d'une cinquantaine d'atomes, en un temps de l'ordre d'une dizaine de millisecondes, non négligeable devant la durée de vie du champ dans la cavité. Il est donc avantageux de diminuer le nombre d'atomes nécessaires à la mesure, et le temps correspondant en remplaçant cette méthode de mesure passive par une procédure plus intelligente dans laquelle les résultats accumulés jusqu'à un instant donné sont exploités pour ajuster les paramètres de l'appareil de mesure en temps réel.

Cette adaptation « intelligente » est rendue possible par l'utilisation d'un ordinateur rapide, capable de faire l'estimation de l'état du champ après la détection de chaque atome et de calculer la modification optimale à effectuer sur l'interféromètre mesurant l'atome suivant. Cet ordinateur a déjà été utilisé pour les expériences de rétroaction quantique décrites dans les précédentes éditions de l'annuaire du Collège de France (annuaire de l'année 2010-2011). Il s'agissait alors de réagir en temps réel sur le champ mesuré de façon à le conduire vers un état-cible et à l'y maintenir, alors que dans la mesure adaptative, on réagit sur l'appareil de mesure constitué par la succession d'atomes traversant la cavité. Le paramètre ajustable est la phase de l'interféromètre que l'ordinateur doit choisir entre quatre valeurs possibles. Le critère de ce choix est obtenu par le calcul, après chaque atome, de l'entropie de von Neumann du champ dans la cavité qui mesure la quantité d'information donnée par les mesures jusqu'à cet instant.

L'ordinateur estime alors la réduction moyenne d'entropie attendue après la détection de l'atome suivant, pour les différentes phases possibles de l'interféromètre. Il choisit d'appliquer à l'atome suivant la phase qui réduit le plus cette entropie. L'expérience montre qu'on réduit alors effectivement de façon appréciable le nombre d'atomes nécessaires à la mesure et celui requis pour projeter l'atome dans un état de Fock (cette réduction étant, suivant les conditions expérimentales comprise entre 25 et 50 %). Il ne s'agit là que d'une première étape montrant que le principe de la mesure quantique adaptative fonctionne. On s'attend par des simulations à une réduction beaucoup plus importante du nombre d'atomes nécessaires à une mesure si on adapte non pas la phase de l'interféromètre mais le déphasage par photon du dipôle atomique. Cette procédure, plus délicate à mettre en œuvre (ce qui explique pourquoi elle n'a pas été tentée d'emblée), doit permettre de conduire à un temps de mesure croissant de façon logarithmique avec le nombre de photons, et non plus de façon polynomiale. Les premières expériences de mesure adaptative du champ dans une cavité sont décrites dans un article qui vient d'être soumis et dans le mémoire de la thèse de Bruno Peaudecerf, qui vient d'être soutenue (septembre 2013).

2. Estimation des trajectoires quantiques à partir du passé et du futur

Lorsque l'on estime l'état à un instant t d'un système quantique soumis à une mesure (passive ou adaptative) dans laquelle l'information est acquise progressivement, on utilise généralement un argument basé sur la loi classique de Bayes qui exploite les informations acquises jusqu'au temps t . On détermine ainsi finalement, à partir d'estimations effectuées à des instants t croissants sur une seule réalisation du système, une trajectoire quantique qui décrit comment l'information acquise sous l'effet des mesures successives évolue dans le temps, exhibant une convergence vers un état final (projection d'état quantique) et des sauts quantiques

lorsque le système passe d'un état propre de la mesure à un autre sous l'effet du couplage à l'environnement (décohérence). Cette procédure n'est pas optimale car elle n'exploite pas au mieux toute l'information contenue dans une trajectoire. L'état d'un système à un instant donné est influencé par ce qu'il était avant, mais il influence à son tour les états futurs dans lesquels il va évoluer. Lorsqu'on connaît, à la fin de la mesure, cet état futur, on peut utiliser cette connaissance pour affiner ce que l'on sait sur les états du système aux instants antérieurs.

En d'autres termes, la loi de Bayes peut s'appliquer dans les deux sens. Une fois toutes les mesures faites jusqu'à un instant T , on peut pour estimer l'état du système au temps $t < T$ exploiter les informations acquises à $t' < t$, mais aussi celles dont on dispose à la fin de la mesure et qui ont été acquises aux temps t'' tels que $t < t'' < T$. Cette idée simple et de bon sens a été exploitée dans des expériences de simulation par Klaus Molmer et son équipe, travaillant à Aarhus. Igor Dotsenko, dans le groupe de l'ENS-Collège de France l'a appliquée pour exploiter les données de l'expérience réelle de comptage QND de photons réalisée en 2006-2007, qui ont été conservées. Il a constaté que les trajectoires quantiques ainsi reconstituées sont beaucoup plus précises que celles qui exploitaient seulement les informations acquises antérieurement à un instant donné. Les sauts quantiques sont plus nets, et on peut compter jusqu'à des nombres de photons plus élevés (12 au lieu de 7). Cette réinterprétation de données déjà acquises ouvre des perspectives nouvelles pour certaines expériences nécessitant la détection ou l'utilisation de nombres de photons élevés.

3. Expériences d'effet Zénon dynamique

L'effet Zénon dynamique consiste à modifier et contrôler l'évolution d'un système quantique sous l'effet de mesures répétées perturbant le système et l'empêchant d'évoluer librement dans tout l'espace des états qui lui est normalement accessible. Au cours des années antérieures, le groupe ENS-Collège de France a fait plusieurs propositions d'expériences visant à observer et exploiter cet effet Zénon pour manipuler un champ quantique dans une cavité. En effectuant une mesure qui répond par oui ou non à la question « l'oscillateur constitué par le champ contient-il n quanta ? », on fait de l'état à n photons une barrière infranchissable pour le champ et on le force à évoluer dans un espace des états restreint. On doit ainsi parvenir à créer sous l'effet de cette évolution particulière des états non classiques de l'oscillateur quantique de type états de Schrödinger. La réalisation de ces expériences est prévue. Elle nécessite une modification du montage expérimental d'électrodynamique en cavité faisant interagir des atomes de Rydberg lents avec le champ dans un dispositif de type fontaine atomique, de façon à allonger le temps d'interaction atome-cavité. Ce montage dans un cryostat nouveau, arrivé au laboratoire il y a un an, est en voie de mise au point (voir plus loin).

En préparant ces expériences, Sébastien Gleyzes a été amené à modifier la procédure de génération des atomes de Rydberg circulaires, en les préparant directement dans la cavité piégeant les photons à l'aide de champs de radiofréquence polarisés circulairement, produits par des électrodes entourant la cavité. Cette procédure permet d'observer l'évolution des atomes vers l'état circulaire, ce qui n'était pas possible dans le montage précédent. Cette évolution se produit selon une progression dans une échelle de niveaux atomiques de moment angulaire croissants,

dont la dégénérescence est levée par un champ électrique. Cette échelle a des propriétés très voisines de celle des niveaux d'un oscillateur harmonique quantique. De plus, la non-linéarité du système fait qu'un niveau de cette échelle peut être atteint sélectivement en excitant une transition radiofréquence vers un autre niveau de l'atome, n'appartenant pas à cette échelle de niveaux quasi harmonique.

On peut ainsi sonder sélectivement l'atome dans un niveau choisi de ce quasi-oscillateur quantique et réaliser de cette manière une expérience d'effet Zénon dynamique sur un atome, et non plus sur un champ. L'expérience, technologiquement plus simple que celle initialement prévue sur le champ quantique, conduit à des résultats remarquables. Elle montre que l'évolution sous l'effet d'un champ radiofréquence de l'atome de Rydberg le long de son échelle d'états quasi harmonique peut être stoppée par des mesures répétées et que des états de type « chat de Schrödinger », superpositions d'états de moments angulaires différents sont générés. Leur état quantique est reconstruit par des méthodes tomographiques. Ces expériences, actuellement en cours, sont complémentaires de celles qui pourront être réalisées lorsque le nouveau montage d'électrodynamique quantique en cavité sera prêt.

4. Mise au point des nouvelles expériences d'électrodynamique en cavité

Les éléments du nouveau montage sont maintenant rassemblés. Ils incluent le nouveau cryostat à cavité acceptant un jet-fontaine vertical et une préparation et détection efficace des atomes de Rydberg circulaires dans la cavité. Le début des expériences sur ce montage est légèrement retardé par la réalisation des expériences d'effet Zénon dynamique intéressantes dont la possibilité s'est révélée de façon inattendue (voir plus haut). Un dernier élément du nouveau montage demande encore une mise au point. Il s'agit de la préparation à la demande d'un et d'un seul atome de Rydberg circulaire par échantillon. La procédure exploite l'effet de blocage Rydberg (Rydberg blockade) qui interdit d'exciter plus d'un atome à la fois dans un petit volume. Ce blocage s'effectue dans une puce cryogénique à atomes, décrite dans le résumé précédent. Il s'agit de préparer un échantillon de quelques centaines d'atomes ultra-froids dans un piège magnétique, puis d'en exciter un seul dans un état de Rydberg, en exploitant cet effet de blocage. Tous les éléments du montage fonctionnent séparément (réalisation du piège, création d'un mini-condensat de Bose-Einstein et détection de ce condensat par imagerie à l'aide d'une caméra CCD, excitation et détection d'atomes de Rydberg à partir de ces atomes ultra-froids dans leur état fondamental). Il reste à régler le problème du contrôle des champs électriques dans ce piège. Les atomes de Rydberg y sont très sensibles et la présence de surfaces aisément contaminables par des dépôts de Rubidium au voisinage des atomes du piège rend le contrôle des champs sur une longue durée délicat. Une fois ce problème résolu et la préparation d'atomes de Rydberg uniques réalisée, il restera à associer cette source d'atomes de Rydberg lents au montage d'électrodynamique en cavité.

Toutes les expériences du groupe devront s'interrompre pour quelques semaines au début 2014 pour effectuer le déménagement des équipements du Laboratoire Kastler Brossel vers les nouveaux laboratoires du site Marcelin Berthelot du Collège de France. Au moment de la rédaction de ce résumé de travaux (octobre 2013), la construction de ces laboratoires est en voie d'achèvement.

PUBLICATIONS DU GROUPE D'ÉLECTRODYNAMIQUE QUANTIQUE EN CAVITÉ

J.-M. Raimond, P. Facchi, B. Peaudecerf, S. Pascazio, C. Sayrin, I. Dotsenko, S. Gleyzes, M. Brune et S. Haroche, « Quantum Zeno dynamics of a field in a cavity », *Phys. Rev. A*, **86**, 032120 (2012).

S. Haroche, « The secrets of my prize winning research », *Nature*, **490**, 311 (2012).

C. Sayrin, I. Dotsenko, S. Gleyzes, M. Brune, J.-M. Raimond and S. Haroche, « Optimal time-resolved photon number distribution reconstruction of a cavity field by maximum likelihood », *New Journal of Physics*, **14**, 115007 (2012).

B. Peaudecerf, C. Sayrin, X. Zhou, T. Rybarczyk, S. Gleyzes, I. Dotsenko, J.-M. Raimond, M. Brune and S. Haroche, « Quantum feedback experiments stabilizing Fock states of light in a cavity », *Phys. Rev. A*, **87**, 042320 (2013).

S. Haroche, M. Brune and J.-M. Raimond, « Atomic clocks for controlling light fields », *Physics Today*, **66**, 1 ,27 (2013).

S. Haroche, « Nobel Lecture : Controlling photons in a box and exploring the quantum to classical boundary », *Reviews of Modern Physics*, **85**, 1083 (2013).

S. Haroche, « Controlling photons in a box and exploring the quantum to classical boundary (Nobel lecture) », *Angewandte Chemie*, **52**, 10158 (2013).