

Physique quantique

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

COURS : CINQUANTE ANS DE RÉVOLUTIONS EN PHYSIQUE ATOMIQUE
ET EN OPTIQUE ATOMIQUE^a

Le dernier cours de la chaire de Physique quantique (2001-2015), clôturant quinze années d'enseignement portant sur l'optique et l'information quantiques, a passé en revue les grandes avancées de la physique atomique et de l'optique quantique au cours du dernier demi-siècle. Cette période a connu de profondes révolutions dans ces domaines de la physique, largement dues à l'invention en 1960 du laser et aux développements que cette source extraordinaire de lumière a connus au cours des décennies qui ont suivi. Alors que la physique atomique était considérée par certains, à la fin des années 1950, comme une science « achevée », largement assimilée à la spectroscopie classique dans laquelle peu de surprises étaient attendues, l'arrivée des lasers a considérablement renouvelé le domaine en faisant de la lumière non seulement une sonde d'exploration de plus en plus précise des niveaux d'énergie des atomes et des molécules, mais aussi un instrument puissant de manipulation de ces systèmes, permettant de les préparer et de les étudier dans des situations « exotiques », ouvrant la voie, dans différents domaines, à une physique nouvelle. Les cours des années passées avaient décrit certaines des recherches récentes les plus importantes. Ce cours de conclusion des enseignements de la chaire s'est proposé de revenir en amont sur les évolutions qui ont conduit aux derniers développements, de parler des progrès dans des domaines que les cours précédents n'avaient pas abordés et de s'interroger sur l'avenir possible de cette physique.

Comme les années précédentes, le cours, composé de sept leçons et accompagné de cinq séminaires, était immédiatement disponible sous forme de supports visuels sur le site internet du Collège de France et, après quelques jours, sous forme de document vidéo téléchargeable ou disponible en *streaming*, en version française ou anglaise.

a. Les cours sont disponibles en vidéo sur le site internet du Collège de France : <http://www.college-de-france.fr/site/serge-haroche/course-2014-2015.htm> [NdÉ].

Grandes évolutions de la physique atomique et de l'optique au cours des cinquante dernières années

La première leçon a constitué une introduction à cette revue des révolutions de la physique atomique et de l'optique quantique. Elle a commencé par une brève description des grandes étapes de la physique atomique en rappelant d'abord l'état de l'art dans les années de l'immédiat après-guerre : spectroscopie des jets atomiques et moléculaires, résonance magnétique nucléaire, premières expériences tests de l'électrodynamique quantique incluant la mesure du moment magnétique anormal de l'électron et du *Lamb shift*. Cette revue a ensuite insisté sur l'importance des méthodes de la double résonance et du pompage optique, développées par Jean Brossel et Alfred Kastler dans les années 1950, qui ont constitué les premiers exemples de manipulation des atomes par la lumière, avant même l'avènement du laser. Les débuts de cette source nouvelle de lumière ont ensuite été décrits, ainsi que ses premières applications en physique dès les années 1960, conduisant à la naissance de l'optique non linéaire et de la méthode dite de l'absorption saturée. Les années 1970 ont vu le développement des lasers accordables en fréquence qui ont permis l'explosion des méthodes de spectroscopie de haute résolution, s'affranchissant de diverses manières de l'élargissement des raies atomiques et moléculaires dû à l'effet Doppler. La leçon a ensuite brossé rapidement les grandes avancées des années 1980, incluant le développement des méthodes de refroidissement et de piégeage des atomes induites par laser. Dans la même décennie, les avancées parallèles des expériences d'ions piégés et de l'électrodynamique quantique en cavité, réalisées avec des atomes de Rydberg, ont permis les premières observations de systèmes quantiques isolés. Puis, les années 1990 ont vu les premières applications de la manipulation de ces systèmes à l'information quantique, avec des démonstrations simples de portes quantiques et d'intrication, ainsi que l'étude de la décohérence. Dans la même décennie, la physique des atomes froids a conduit à la réalisation des condensats de Bose Einstein, ouvrant la voie à un domaine de recherche extrêmement fécond qui devait exploser dans les années 2000. Cette décennie et les années qui ont suivi ont connu un développement très important des recherches sur les gaz quantiques (bosons et fermions dégénérés), mais aussi de l'information quantique avec des atomes réels et artificiels (circuits quantiques incluant des jonctions Josephson). Elle a également vu des progrès considérables dans la précision des mesures spectroscopiques et des horloges atomiques (développement des peignes de fréquence optiques) et dans l'étude des phénomènes ultrarapides en physique atomique, moléculaire et de la matière condensée (exploitation des impulsions lumineuses « attoseconde »).

Après avoir rappelé cette histoire, dont les divers points seront repris plus en détail dans les cours suivants, la première leçon a illustré les progrès apportés par les lasers à la physique fondamentale en montrant que dans différents domaines, dix ordres de grandeur au moins avaient été gagnés depuis les années 1950 – qu'il s'agisse de la précision spectroscopique et de celle des horloges, de la brièveté des impulsions lumineuses réalisables, de la quête des basses températures ou de la sensibilité de détection des objets microscopiques. Puis, la leçon a rappelé sur différents exemples que toute cette physique demandait pour être analysée d'invoquer le principe de superposition quantique des états, un concept unificateur expliquant des phénomènes apparemment aussi disparates que les battements quantiques, l'oscillation de Rabi, ou la transparence électromagnétiquement induite. Les

interférences quantiques, signatures du principe de superposition, sont également essentielles dans les outils standards de la physique atomique et de l'optique quantique que sont les interféromètres de Ramsey et de Mach-Zehnder. La leçon a ensuite montré comment ces divers développements ont conduit à l'établissement de ponts fructueux entre la physique atomique et d'autres domaines de la science : l'informatique, la physique de la matière condensée, la chimie et la biologie, la cosmologie et l'astrophysique ou encore la physique des particules. Enfin, les propriétés des lasers, comparées à celles des sources classiques, ont été évoquées. Les gains considérables en flux lumineux, en cohérence et stabilité spectrale qui ont été les raisons essentielles des révolutions mentionnées dans cette leçon ont été rappelés par la donnée de quelques ordres de grandeur.

Manipulation des atomes par la lumière : les atomes froids

Le refroidissement et le piégeage des atomes par la lumière laser ont connu un développement considérable au cours des trente dernières années. D'abord conçues dans le but d'augmenter la précision des mesures spectroscopiques en diminuant – voire supprimant – l'effet Doppler, les méthodes de manipulation des atomes par la lumière ont conduit à bien d'autres applications, incluant en particulier la préparation et l'étude des nouvelles phases quantiques de gaz ultrafroids (condensats de Bose Einstein et gaz de Fermions dégénérés). La *deuxième leçon* du cours rappelle le principe des méthodes de refroidissement et de piégeage des atomes par laser et certaines des applications qui en sont faites, à l'exclusion des études sur les gaz quantiques ultrafroids, qui sont décrites dans la leçon suivante. Dans une première partie, la nature des forces radiatives est rappelée, en distinguant la contribution dissipative (liée à la pression de radiation) et la contribution réactive (liée aux déplacements lumineux des énergies atomiques ou *light shifts*). Les mécanismes qui utilisent ces forces pour ralentir les atomes sont ensuite rappelés. Le refroidissement à la limite dite Doppler (permettant d'atteindre des températures de quelques centaines de microdegrés Kelvin) et le principe des mélasses optiques sont analysés ainsi que le refroidissement sub-Doppler par effet Sisyphus, qui combine de façon corrélée les effets de la force réactive et du pompage optique sur les atomes, et qui permet de diminuer la température des atomes jusqu'au niveau du microdegré Kelvin. La leçon se poursuit par la description des pièges pour atomes neutres, qu'il s'agisse de pièges lumineux exploitant la pression de radiation (pièges magnéto-optiques MOT) ou la force dipolaire dispersive (puits simples ou réseaux périodiques de puits, pinces optiques permettant de déplacer les atomes, pièges dans l'onde évanescente au voisinage de microstructures ou de nanostructures transparentes). Les pièges magnétiques des atomes paramagnétiques froids en absence de lumière sont également décrits. Des expériences d'optique atomique sont ensuite décrites, dans lesquelles les atomes froids sont réfléchis ou diffractés par des ondes lumineuses : miroirs à atomes réalisés par des ondes évanescentes sur lesquels les atomes rebondissent, lames semi-réfléchissantes de lumière formées par des faisceaux laser contra-propageant, etc. La dernière partie de la leçon montre comment ces éléments d'optique atomique sont combinés pour réaliser des interféromètres atomiques permettant de construire des gravimètres et gyromètres extrêmement sensibles.

Les gaz quantiques ultrafroids : condensats de Bose Einstein et gaz de fermions dégénérés

La troisième leçon s'est intéressée à la physique des gaz quantiques, condensats de Bose Einstein (CBE) et gaz de fermions dégénérés (GFD). Les propriétés d'un CBE rappellent celles d'un faisceau laser dans lequel les photons seraient remplacés par des atomes indiscernables, avec la richesse d'effets physiques induits par les interactions entre particules (alors qu'elles sont nulles entre photons). Un GFD se comporte comme une mer de Fermi électronique, les interactions entre fermions pouvant conduire à leur appariement sous forme de bosons composites. Ces bosons peuvent être des dimères moléculaires formant des condensats, ou bien des « paires de Cooper » de grande extension spatiale donnant aux GFD des propriétés analogues à celles de la supraconductivité électronique.

Les CBE et GFD possèdent des propriétés superfluides se manifestant par l'apparition de tourbillons ou vortex lorsqu'ils sont mis en rotation. La leçon a passé en revue quelques propriétés essentielles des CBE et GDF observées au cours des quinze dernières années. Elle a commencé par un rappel des mécanismes généraux ayant permis la condensation des gaz de bosons très froids. Après une première phase de refroidissement laser, les atomes dont le moment magnétique (spin) est orienté sont généralement confinés dans un piège magnétique. On leur fait subir un processus de refroidissement « évaporatif » complémentaire en leur appliquant un champ de radiofréquence dont la fréquence est adiabatiquement variée de façon à retourner le spin des atomes d'énergie de plus en plus petite et à expulser ces atomes du piège. Sous l'effet des collisions interatomiques, les atomes confinés restants se « thermalisent » à une température de plus en plus basse, descendant jusqu'à quelques centaines de nanoKelvins. La longueur d'onde de de Broglie des atomes devient alors de l'ordre de leurs distances mutuelles et le gaz de bosons se condense dans l'état fondamental du piège. La détection du CBE se fait généralement en coupant le piège et en observant l'ombre du gaz en expansion libre dans un faisceau laser résonnant.

Le refroidissement des fermions conduit quant à lui à une situation où les particules occupent chacune un état quantique jusqu'à l'énergie de Fermi. La comparaison du comportement des bosons et fermions froids peut se faire en observant des isotopes du même élément (par exemple Li^6 et Li^7). Un gaz de fermions dégénérés a une taille plus grande que celle occupée par le même nombre de bosons condensés (manifestation de la pression de Fermi). Le refroidissement des fermions se fait en général dans des mélanges de bosons et de fermions, les premiers étant refroidis par évaporation et les seconds par collision avec les premiers.

Dans une deuxième partie, la leçon a décrit les interactions entre atomes froids, en rappelant la définition de la longueur de diffusion. Ce paramètre, qui peut être positif (interactions effectives répulsives) ou négatif (interactions attractives) caractérise complètement les processus de collisions binaires entre atomes froids. La longueur de diffusion peut être variée en appliquant aux atomes un champ magnétique qui met en résonance, pour certaines valeurs de ce champ, le canal d'entrée de la collision avec un état moléculaire du système des deux atomes (résonances de Feshbach). Loin de résonance, un gaz de bosons condensés est décrit par un modèle de champ moyen par l'équation de Gross-Pitaevskii qui prend la forme d'une équation de Schrödinger incluant un terme non linéaire, proportionnel à la longueur de diffusion. À résonance, cette longueur de diffusion diverge et le modèle de champ moyen n'est plus valable.

La troisième partie de la leçon a décrit des expériences sur des CBE présentant de grandes analogies avec des expériences d'optique : génération d'ondes de matières cohérentes, interférences entre ces ondes, mélanges à quatre ondes de matière mettant en évidence des effets similaires à ceux observés en optique lorsque trois faisceaux lasers interagissent entre eux dans un milieu transparent dont l'indice de réfraction présente un terme non linéaire. Dans le cas des ondes de matière, l'interaction entre les ondes est produite par l'effet des collisions entre atomes et est décrite par le terme non-linéaire de l'équation de Gross-Pitaevskii.

Dans la quatrième partie de la leçon, les phénomènes de superfluidité des CBE et des GFD ont été qualitativement décrits. Ces phénomènes collectifs sont analogues à ceux observés antérieurement dans des systèmes beaucoup plus denses, en physique des solides ou des liquides (superfluidité de l'Hélium, supraconductivité des métaux). Étudier ces effets dans des gaz quantiques présente l'avantage de réaliser des situations dans lesquelles on peut faire varier des paramètres (en particulier l'interaction entre les particules) qui ont une valeur fixe en physique de la matière condensée. On peut ainsi passer continûment d'une situation où les interactions entre particules sont faibles et la théorie du champ moyen valable à une physique à N corps en interactions fortes dont la théorie reste encore largement ouverte. On peut même atteindre un régime universel où le comportement des systèmes ne dépend plus de l'espèce de particules considérée et ainsi utiliser la physique des atomes ultra-froids comme un banc d'essai pour comprendre des phénomènes se produisant dans d'autres systèmes, avec des ordres de grandeur très différents (étoiles à neutrons par exemple). La manifestation la plus spectaculaire de la superfluidité des CBE et GFD est l'apparition de tourbillons ou vortex dans ces systèmes en rotation. La physique est alors très voisine de celle observée dans des métaux supraconducteurs de type II soumis à un champ magnétique.

Contrôle de particules quantiques isolées et information quantique

Le développement des méthodes de contrôle d'atomes et d'ions piégés, sujet de *la quatrième leçon*, a été rendu possible par la manipulation précise grâce aux lasers des degrés de liberté internes et externes des atomes. Les observations de trajectoires quantiques et de sauts quantiques atomiques sont devenues des opérations courantes. Ces expériences prolongent et généralisent aux atomes celles effectuées dans les années 1960-1970 sur des électrons uniques piégés, qui ont conduit à des tests extrêmement précis de l'électrodynamique quantique. Parallèlement aux études d'atomes uniques, des expériences portant sur la manipulation et la détection de photons uniques se sont également développées, avec l'observation de sauts quantiques de la lumière et la préparation d'états non classiques du champ (optique quantique et électrodynamique quantique en cavité). Dans ces expériences, le comportement des atomes et des photons illustre les principes fondamentaux de la théorie quantique (superposition d'états, intrication et décohérence). La possibilité d'exploiter la logique quantique pour communiquer et calculer a largement motivé le développement de ce que l'on appelle l'information quantique. Cette physique rejoint celle de la matière condensée dans des expériences où les atomes sont remplacés par des systèmes quantiques artificiels (circuits contenant des jonctions Josephson notamment).

Une première partie de la leçon a été consacrée aux particules chargées piégées. Après un rappel historique des expériences de Dehmelt portant sur un électron unique et ayant conduit à la mesure ultra précise du « moment magnétique anormal » de l'électron, le principe du piège de Paul a été décrit ainsi que les méthodes de manipulation et de détection par laser des ions (imagerie par fluorescence, refroidissement par « bande latérale », observation des sauts quantiques de l'ion comme méthode de détection sélective de leurs états internes). La deuxième partie de la leçon a été consacrée au piégeage des atomes neutres individuels. Ce piégeage est réalisé dans des puits microscopiques utilisant la force optique dispersive résultant de l'action sur le dipôle atomique du gradient d'un champ lumineux non résonnant. Ce gradient est produit en focalisant fortement un faisceau laser (pince optique) ou en réalisant une onde stationnaire ayant une périodicité de l'ordre de la longueur d'onde optique (réseaux de puits de potentiels). La détection des atomes se fait, comme dans le cas des ions piégés, par l'imagerie de leur fluorescence sous irradiation laser résonnante. En présence du laser de détection les atomes sont éjectés du piège sous l'effet de collisions binaires assistées par la lumière dont le résultat est de ne laisser dans chaque piège que 0 ou 1 atome. Le piège finit vide si le nombre initial d'atomes avant l'irradiation résonnante était pair et finit avec un seul atome si ce nombre était impair. L'imagerie optique revient ainsi à mesurer la parité du nombre d'atomes dans le piège. L'expulsion d'un atome par collision ou la tombée d'un atome dans le piège se détecte par un saut brusque du niveau de la lumière qu'il diffuse par fluorescence. La méthode permet d'observer des atomes uniques dans des pièges isolés ou dans deux pièges placés à une distance contrôlée. Elle permet également de réaliser des « convoyeurs » à atomes piégés dans une structure périodique à une dimension réalisée par des faisceaux contra-propageants ou encore des « cristaux atomiques » à deux ou trois dimensions, dans lesquels les atomes peuvent être imagés et manipulés individuellement.

La troisième partie de la leçon a décrit les méthodes d'étude de photons uniques en optique quantique, en rappelant d'abord leur génération par excitation d'atomes isolés dans un jet atomique dilué, puis celle produite par l'excitation laser de centres colorés uniques (centres NV du diamant par exemple). Une autre méthode consiste à générer des paires de photons dans deux modes du champ par processus non linéaire dans un cristal et à se servir de la détection de l'un des photons dans un mode pour « annoncer » la présence d'un seul photon dans l'autre mode. La détection des photons uniques par « anti-coïncidence » des clics enregistrés par deux détecteurs après séparation du faisceau lumineux sur une lame semi-réfléchissante a été rappelée.

La leçon s'est ensuite attachée à rappeler les diverses méthodes d'électrodynamique en cavité qui ont été sujets de nombreux cours antérieurs de l'enseignement de la chaire. On a distingué les expériences réalisées en cavité optique de celles effectuées dans des cavités microonde avec des atomes de Rydberg traversant un à un la cavité. Les principaux résultats de l'équipe du titulaire de la chaire dans ce dernier domaine ont été rappelés (préparation et étude d'états de Schrödinger du champ, étude de la décohérence, détection de sauts quantiques du champ microonde, comptage non-destructif QND de photons, reconstruction par tomographie quantique de champs non classiques, démonstration de la rétroaction quantique). L'analogie de l'électrodynamique quantique microonde avec les expériences de « circuit QED » dans lesquelles les atomes de Rydberg sont remplacés par des structures artificielles

contenant des jonctions Josephson a aussi été rappelée et illustrée par la description de beaux résultats récents de l'électrodynamique des circuits.

La leçon s'est terminée par l'évocation de l'information quantique, domaine en pleine expansion qui vise à exploiter la manipulation de systèmes individuels (atomes, ions, photons, structures quantiques artificielles) pour réaliser des opérations de logique quantique qui conduiront un jour à des innovations pour la communication ou le calcul. On a d'abord rappelé l'expérience pionnière d'Aspect sur la violation des inégalités de Bell qui a démontré de façon spectaculaire les propriétés de l'intrication quantique et de la non-localité. On a décrit ensuite le principe des portes logiques quantique démontrées sur plusieurs systèmes (ions piégés, atomes neutres froids, circuit QED), avant de conclure la leçon par l'évocation de la simulation quantique qui consiste à mettre en interaction un ensemble de systèmes quantiques bien contrôlés dans un piège ou dans une structure périodique dont les paramètres sont ajustables et à étudier l'évolution de ce système. On émule ainsi des phénomènes se produisant à d'autres échelles dans la matière condensée et que l'on ne peut calculer à l'aide d'ordinateurs classiques tant l'espace des états dans lequel le système évolue est grand. Ces méthodes de simulation quantique sont très prometteuses pour la découverte et l'étude de phases encore inconnues de la matière.

La passion de la précision et la mesure du temps

Les progrès de la spectroscopie de haute résolution, microonde et optique, ont été corrélés au cours des cinquante dernières années à ceux de la métrologie du temps. Les horloges ont gagné 9 à 10 ordres de grandeur en précision, en particulier grâce au développement de la mesure directe des fréquences optiques rendue possible par l'invention il y a une quinzaine d'années des peignes de fréquence. Nous analysons dans cette *cinquième leçon* ces avancées spectaculaires et essayons d'esquisser quelques pistes pour le futur de cette physique de la précision extrême.

La spectroscopie de l'hydrogène, dont les progrès sont rappelés dans la première partie de la leçon, a servi de banc d'essai aux développements des mesures de fréquences optiques, tout en améliorant continuellement la précision de notre connaissance de la constante de Rydberg et du *Lamb shift*. La méthode d'absorption saturée puis celle de la spectroscopie à deux photons, qui ont permis de s'affranchir de l'effet Doppler, ont été décrites. Dans la deuxième partie, une brève histoire de la mesure du temps a été esquissée pour souligner le fait que les progrès réalisés au cours des six siècles de physique classique ayant précédé l'avènement des quanta – bien qu'ils aient été considérables – ont été largement dépassés par ceux qu'a permis le développement des horloges atomiques depuis les années 1950. Le principe général des horloges est resté le même : elles comptent les périodes d'un oscillateur à l'aide d'un mécanisme d'échappement. Une source d'énergie compense l'amortissement de l'oscillateur en affectant de façon minimale sa fréquence. Dans les horloges classiques, l'oscillateur a été un foliot subissant une oscillation de torsion (horloges des cathédrales), puis un pendule mécanique ou un ressort, et enfin un cristal de quartz vibrant. Dans les horloges quantiques, l'oscillateur a été d'abord un champ microonde verrouillé sur une transition atomique hyperfine (étalon de temps défini par l'horloge à césium depuis les années 1960). Le principe des premières horloges à Césium mesurant la transition atomique grâce à la méthode

d'interférométrie de Ramsey a été rappelé. Les améliorations apportées à ces horloges dans les années 1990 par l'utilisation d'atomes refroidis par laser ont été ensuite décrites, ainsi que le projet PHARAO d'horloge à atomes froids qui doit être embarqué en 2016 sur la station spatiale internationale.

Les troisième et quatrième parties de la leçon ont décrit la révolution apportée à la mesure du temps par les peignes de fréquence qui ont permis d'étendre le comptage des périodes du champ électromagnétique au domaine optique. Ces peignes sont réalisés en verrouillant en phase les modes d'un laser et en étendant le spectre sur une octave grâce aux effets non linéaires produits par la propagation de la lumière dans une fibre optique structurée. On obtient ainsi un train de pulses ultracourts séparés par un intervalle de temps très bien défini, dont le spectre est constitué de centaines de milliers de raies équidistantes ultrafines servant de graduation à une « règle optique » à laquelle un laser stabilisé sur n'importe quelle transition atomique peut être comparé. Ces peignes de fréquence servent ainsi de mécanisme d'échappement pour des horloges atomiques stabilisées sur la transition atomique d'un ion ou d'un atome neutre dont la largeur naturelle est très petite (de l'ordre du Hertz). Les horloges verrouillées sur un ion piégé unique ont été d'abord décrites, puis celles qui sont stabilisées sur une transition atomique mesurée sur un ensemble d'atomes froids piégés dans un réseau optique. Les stabilités de ces deux types d'horloges ont été comparées. Leur précision ultime actuelle correspond à une stabilité de l'ordre de la seconde sur l'âge de l'Univers (de l'ordre de 10^{-18}). Ces horloges permettent des études précises d'effets de relativité restreinte et générale et la mesure de variation éventuelle des constantes fondamentales au cours du temps (constante de structure fine et rapport des masses de l'électron et du proton). Elles sont susceptibles d'avoir des applications pratiques importantes en géodésie. Outre leur rôle dans les horloges, les peignes de fréquence jouent un rôle important dans bien d'autres applications brièvement évoquées à la fin de la leçon (spectroscopie moléculaire avec acquisition très rapide de données sur des spectres de vibration-rotation complexes, vélocimètres extrêmement précis associés à des télescopes pour la mesure de petits décalages Doppler de la lumière d'étoiles révélant la présence d'exo-planètes gravitant autour d'elles, etc.) Une application importante des peignes de fréquence pour la réalisation d'impulsions lumineuses « attosecondes » sera discutée dans la leçon suivante.

Observation des phénomènes ultra-rapides et lumière extrême

La génération d'impulsions intenses femtosecondes de lumière proche infrarouge ou visible ouvre un champ d'investigation très vaste en physique atomique, moléculaire ou des solides. En excitant à l'aide de ces impulsions des jets de gaz rares, on génère des impulsions lumineuses ultraviolettes ou X (XUV) de quelques dizaines d'attosecondes ($1 \text{ attoseconde} = 10^{-18} \text{ s}$) et des faisceaux de photoélectrons énergiques. On utilise ces impulsions XUV et ces électrons, en conjonction avec les impulsions IR ou visibles qui les ont générés, pour sonder la matière aux temps ultracourts et sur des distances de l'ordre de quelques angströms. Ces expériences sont réalisables avec des lasers de laboratoire grâce à une méthode d'amplification de la lumière mise au point dans les années 1980. Des installations puissantes de grandes dimensions permettent d'atteindre des intensités ouvrant la voie à une physique de la lumière extrême (effets relativistes, physique nucléaire, électrodynamique quantique non

linéaire, etc.) La *sixième leçon* a commencé par dresser un panorama des progrès réalisés dans la génération des impulsions lumineuses de grande intensité et de durée ultracourtes au cours des cinquante dernières années. On y montre que la course aux grands champs lumineux et celle aux impulsions très brèves ont été fortement corrélées, les processus générant des éclairs ultracourts étant liés à des phénomènes fortement non linéaires requérant des amplitudes de champs électriques très grandes. Dans un premier temps, les impulsions ont augmenté en amplitude et en brièveté de façon rapide, jusqu'à atteindre un palier dans les années 1980, dû à la saturation des verres amplificateurs utilisés qui ont atteint alors leur seuil de dommage irréversible. La méthode CPA (*chirped pulse amplification*) a alors été inventée. Elle consiste à disperser en fréquence et à étaler en temps l'impulsion lumineuse grâce à une ligne à retard optique réalisée à l'aide de réseaux dispersifs. L'impulsion transporte alors la même énergie, mais sur un temps beaucoup plus long. Elle passe dans le milieu amplificateur qui ne risque plus d'être détruit. Après la traversée de ce milieu, un système de réseaux opérant en sens inverse du précédent comprime ensuite l'impulsion, permettant d'atteindre de très grandes intensités crête. Les pulses femtoseconde intenses ainsi obtenus se prêtent à la mise en œuvre de processus non linéaires d'ordre très élevés, conduisant à la génération d'impulsions lumineuses beaucoup plus énergétiques et beaucoup plus courtes.

La deuxième partie de la leçon a ensuite décrit ces processus non-linéaires, qui se produisent au cours de l'interaction entre impulsions IR femtoseconde et un jet atomique de gaz rare. Les phénomènes d'ionisation multiphotonique et d'ionisation au-dessus du seuil ont été analysés de façon qualitative. Le régime « perturbatif » à relativement basse intensité et le régime « non perturbatif » à haute intensité dans lequel le champ électrique incident peut être décrit comme quasi-statique ont été distingués. C'est ce second régime qui est intéressant pour la génération des impulsions XUV ultrabrèves. Le processus est alors décrit par un modèle semi-classique, un électron s'échappant de l'atome par effet tunnel dans le potentiel superposition du potentiel coulombien de l'atome et du potentiel linéaire associé au champ laser quasi statique. Il s'éloigne de l'atome, puis est arrêté par le champ laser lorsque celui-ci se retourne et revient entrer en collision avec le cœur ionique, produisant l'ionisation au-dessus du seuil et la génération d'harmoniques élevés ultracourts. Le contrôle du processus nécessite l'emploi d'impulsions IR dont la différence de phase entre la porteuse et l'enveloppe est bien stable. Les impulsions IR constituent en fait les trains d'impulsions d'un peigne de fréquence. Des méthodes de contrôle de ce peigne analogues à celles utilisées pour les horloges atomiques sont mises en œuvre afin d'ajuster les phases relatives de la porteuse et de l'enveloppe des impulsions. En jouant sur la polarisation de la lumière, on peut enfin isoler une seule impulsion du peigne pour générer la lumière attoseconde XUV.

Une troisième partie aborde de façon qualitative la physique qui se développe actuellement avec cette lumière attoseconde. Une classe d'expériences consiste à diriger les impulsions XUV et les impulsions IR qui leur ont donné naissance dans une seconde chambre à vide où ils interagissent ensemble avec une sonde atomique (qui peut être un autre gaz rare, un jet moléculaire ou encore une surface solide). Le délai entre l'impulsion IR et XUV est contrôlé et variable, ce qui permet de faire interagir l'impulsion attoseconde à un moment bien précis de l'oscillation plus lente de l'impulsion femtoseconde. L'analyse des produits de cette interaction (par exemple l'énergie de l'électron finalement éjecté), permet par une sorte de stroboscopie ultrarapide de reconstruire l'impulsion femtoseconde initiale, réalisant

ainsi pour la première fois la résolution temporelle d'un champ optique. Elle permet également d'étudier en détail la distribution électronique et la dynamique de l'atome ou de la molécule sonde. Le paquet électronique arraché à l'atome et qui revient plus tard sur lui interfère avec la fonction d'onde de l'ion associé et l'analyse expérimentale de cette interférence permet de reconstruire cette fonction, par des méthodes s'apparentant à l'holographie ou à la tomographie. La dynamique des électrons atomiques ou moléculaires, ou des électrons dans le solide servant de sonde, peut également être étudiée avec une résolution temporelle qui est pour l'instant de quelques dizaines d'attosecondes, mais qui est appelée à devenir encore plus rapide avec l'extension de la génération d'harmoniques d'ordre élevé au domaine extrême UV. La leçon s'est conclue par un bref aperçu de la physique associée à la lumière extrême produite par des lasers de puissance en opération ou en projet dans des installations gigantesques (laser mégajoule, lasers ELI). L'utilisation de ces lasers pour la physique des plasmas, la physique des électrons relativiste, la physique nucléaire ou encore celle de l'électrodynamique non-linéaire a été évoquée, ainsi que celle des accélérateurs exploitant le champ de sillage d'un plasma excité par laser (*wake field accelerators*). Ces nouveaux types d'accélérateurs pourraient se révéler utiles pour des applications biologiques ou médicales.

Leçon de clôture : réflexions sur la lumière, la recherche fondamentale et l'innovation

La *dernière leçon* a eu comme sujet la lumière. En fait, la physique quantique, le thème général de l'enseignement de la chaire pendant quinze ans, est née des interrogations sur la nature de la lumière qui se sont posées à la fin du XIX^e et au début du XX^e siècle. Pratiquement tous les cours de la chaire ont parlé du rayonnement, des photons et des lasers, ces sources de lumière qui depuis un demi-siècle ont révolutionné la physique et la technologie. Il était donc naturel de clore cette chaire par un exposé « grand public » sur la lumière, sur la façon dont elle a bouleversé notre vision du monde et sur les innovations que les recherches sur le rayonnement nous ont apportées.

L'exposé a d'abord rappelé que l'année 2015 a été déclarée année internationale de la lumière pour célébrer un certain nombre d'anniversaires de découvertes importantes en optique et en électromagnétisme (traité d'optique du savant arabo-persan Alhazen en 1015, nature d'onde transversale de la lumière établie par Fresnel en 1815, équations de Maxwell en 1865, théorie de la relativité générale d'Einstein en 1915, découverte du rayonnement cosmologique et mise au point des fibres optiques pour les télécommunications en 1965). La théorie de l'électromagnétisme de Maxwell qui a unifié l'optique avec les phénomènes de l'électricité et du magnétisme a ensuite été rapidement évoquée, en rappelant que cette théorie prévoyait l'existence d'ondes de longueur d'onde plus grande que celle de la lumière visible d'une part (ondes infrarouges et ondes radio), de longueur d'onde plus petite d'autre part (lumière ultraviolette et rayons X). Ces rayonnements découverts quelques années après la mort de Maxwell par Hertz (ondes radio) et par Roentgen (rayons X) devaient conduire aux révolutions dans les communications, le diagnostic médical et l'étude de la structure de la matière.

Les questions soulevées par l'interprétation des équations de Maxwell furent aussi les points de départ de la théorie de la relativité (restreinte puis générale) et de la

physique quantique. L'exposé a rappelé comment la relativité est née de questions posées par la vitesse de la lumière et comment les quanta sont issus des mystères que soulevait l'explication du rayonnement des corps chauffés et de l'effet photoélectrique. La physique quantique a remis en question les principes fondamentaux de la science classique en introduisant la notion de dualisme onde corpuscule et de superposition d'états. La leçon a insisté sur la richesse prédictive de cette physique, basée sur l'équation d'onde non-relativiste de Schrödinger (qui sert de point de départ à l'essentiel de la physique atomique et de la matière condensée ainsi que de la chimie) et sur l'équation relativiste de Dirac (qui a prédit l'existence de l'anti-matière et a constitué les prémices de la théorie quantique des champs).

Dans sa seconde partie, la leçon a illustré les liens souvent fortuits entre recherche fondamentale et appliquée en suivant la longue et féconde ligne de recherche née en Allemagne des expériences de jets atomiques d'Otto Stern, qui découvrit le spin de l'électron et le magnétisme atomique dans les années 1920. Ces travaux, repris et approfondis par Isidore Rabi et son école aux États-Unis dans les années 1930 et 1940, conduisirent à l'invention de la résonance magnétique nucléaire (RMN) par Bloch et Purcell. Ces recherches fondamentales, initialement motivées par la simple curiosité des chercheurs, devaient conduire de façon inattendue au développement de l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM), sans parler de l'importance de la RMN comme sonde des propriétés de la matière en chimie, en physique des solides et des liquides et en biologie. Une autre retombée de la méthode des jets atomiques a été la mise au point des horloges atomiques, développées dans la continuité des travaux de l'école de Rabi, qui conduisirent à une redéfinition de la seconde et au GPS (systèmes d'horloges embarquées dans des satellites dont les signaux permettent par triangulation de nous repérer partout sur la Terre). Un autre prolongement des travaux sur les jets atomiques et moléculaires fut l'invention du maser, qui évolua ensuite pour conduire au laser, source extraordinaire de lumière basée encore sur une idée d'Einstein (l'émission stimulée). Les applications des lasers à la physique fondamentale et appliquée sont innombrables. Certaines furent rappelées dans la leçon (applications aux horloges atomiques optiques, voir cinquième leçon de ce cours ; utilisation des lasers pour le contrôle des particules quantiques, voir quatrième leçon).

En conclusion, la leçon de clôture a rappelé l'importance du dialogue permanent entre recherche fondamentale et innovation et a évoqué ce que pourraient être certaines applications des recherches sur les lasers et la lumière dans le domaine de la communication ou du calcul quantique. Il a été cependant rappelé que souvent la recherche nous réservait des surprises et qu'il était difficile, voire impossible, de prédire dans quelle direction elle allait nous conduire, aussi bien dans le domaine fondamental que dans celui des innovations.

SÉMINAIRES ACCOMPAGNANT LES COURS^b

Les cinq premières leçons ont été suivies chacune d'un séminaire.

10 mars 2015 : Rainer Blatt, université d'Innsbruck, Autriche : « Exploring the Quantum with ion Traps ».

b. Les séminaires sont disponibles en vidéo sur le site internet du Collège de France : <http://www.college-de-france.fr/site/serge-haroche/seminar-2014-2015.htm> [NdÉ].

17 mars 2015 : Thomas Udem, Institut Max Planck d'optique quantique, Garching, Allemagne : « Hydrogen, Quantum Electrodynamics and the Proton Size Puzzle ».

24 mars 2015 : Claude Cohen-Tannoudji, Collège de France et laboratoire Kastler Brossel de l'ENS : « Les états noirs : de l'optique quantique au refroidissement d'atomes et de molécules ».

31 mars 2015 : Wojciech Zurek, Los Alamos National Laboratories, Albuquerque, États-Unis : « Quantum Theory of the Classical I: Decoherence and the Randomness of Quantum Jumps ».

7 avril 2015 : Wojciech Zurek, Los Alamos National Laboratories, Albuquerque, États-Unis : « Quantum Theory of the Classical II: Quantum Darwinism and Objective Reality ».

COURS À L'ÉTRANGER

Une partie de l'enseignement de la chaire a été donnée au Portugal et au Canada. À l'université de Lisbonne, deux conférences en anglais ont été présentées :

– « Power and strangeness of the Quantum » : aperçu général sur la physique quantique, ses principes fondamentaux et les révolutions auxquelles elle a conduit dans notre façon de voir le monde et de le maîtriser par des technologies nouvelles.

– « Counting and Controlling Photons Non-Destructively » : description générale des recherches du groupe associé à la chaire de physique quantique dans le domaine de l'électrodynamique quantique en cavité avec des atomes de Rydberg.

Un exposé a par ailleurs été fait à l'Institut français de Lisbonne pour des lycéens et des étudiants parlant français : « Comment des questions fondamentales sur la lumière ont révolutionné la physique et la technologie » (adaptation de la leçon de clôture de la chaire).

À Vancouver (Institut Peter Wall et Université de Vancouver), deux conférences ont été présentées :

– « Photons in a box and Schrödinger cats of Light » : description des expériences de préparation d'états "chats de Schrödinger" et d'étude de la décohérence en électrodynamique quantique en cavité.

– « Reflexions on Blue Sky Research » : adaptation en anglais de la leçon de clôture de la chaire de physique quantique.

CONFÉRENCES ET SÉMINAIRES

Juillet 2014, Conférence invitée à l'EGAS (European Group of Atomic Spectroscopy), Lille, France : « Juggling with photons in a box to explore the quantum world ».

Juillet 2014, Conférence invitée au 10^e anniversaire de IQOQI (Institute for quantum optics and quantum information), Vienne, Autriche : « Controlling photons in a box : a long scientific adventure ».

Août 2014 : Conférence invitée à ICAP-2014 (International Conference in Atomic Physics), Washington, États-Unis : « Quantum control of trapped photons with Rydberg atoms ».

Septembre 2014 : Conférence invitée au Symposium Jacques Vigué, Toulouse, France : « Observer et contrôler la dynamique de champs quantiques piégés dans une cavité ».

Septembre 2014 : Conférence au lycée de Toulouse : « Puissance et étrangeté de la physique quantique ».

Septembre 2014 : Conférence invitée à IRMMW-THz 2014 (International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz waves), Tucson, Arizona : « Juggling with microwave photons in a box to explore the quantum world ».

Septembre 2014 : Conférence invitée à Quantum Africa 3, Advances in Quantum Sciences, Rabat, Maroc : « Quantum Control of Photons Trapped in a Cavity ».

Octobre 2014 : Communication à l'Académie de médecine sur la biologie quantique.

Octobre 2014 : Colloque de rentrée du Collège de France autour de 1914 : « Einstein et la révolution scientifique autour de 1914 ».

Octobre 2014 : Conférence invitée au festival de la science de Gênes, Italie : « Reflections on blue sky research ».

Octobre 2014 : Laudation de Nicolas Gisin, récipiendaire du prix Marcel Benoist, Genève, Suisse.

Novembre 2014 : Schrödinger Lecture à Imperial College, Londres, Grande-Bretagne : « Shedding new light on Schrödinger cat ».

Novembre 2014 : Conférence grand public à Thonon-Les-Bains : « Puissance et étrangeté du quantique ».

Novembre 2014 : Conférence à la BNF sur « Physique et interrogations fondamentales » : « L'expérience impossible : mesurer sans interagir ».

Novembre 2014 : Introduction du Symposium à la mémoire d'Anatole Abragam, Collège de France.

Décembre 2014 : Conférence grand public à l'occasion de la remise de la médaille Dirac de l'université de Nouvelle-Galles du Sud (New South Wales), Sydney, Australie : « The beauty and serendipity of blue sky research ».

Décembre 2014 : Conférence plénière au congrès de l'Australian Institute of Physics, Canberra, Australie : « Juggling with photons in a box to explore the quantum world ».

Décembre 2014 : Conférence invitée au congrès de la Société tunisienne de physique, Sousse, Tunisie : « Contrôle de photons dans une cavité : quand les expériences de pensée deviennent réelles ».

Janvier 2015 : Conférence à la cérémonie inaugurale de l'année internationale de la lumière en France à la Sorbonne : « Détecter la lumière invisible pour comprendre l'univers et la vie ».

Janvier 2015 : Conférence à la cérémonie inaugurale de l'année internationale de la lumière à l'Unesco, Paris : « Light and the Quantum ».

Janvier 2015 : Conférence au colloque d'ouverture du trimestre sur le monde quantique à l'IHES, Orsay : « Photonic Schrödinger cats and decoherence ».

Janvier 2015 : Conférence grand public à Nancy : « Un nouvel éclairage sur le chat de Schrödinger ».

Février 2015 : Conférence au lycée Montaigne de Bordeaux : « Puissance et étrangeté du quantique ».

Mars 2015 : Conférence invitée à OASIS5, Conference and Exhibition on Optics and Electro-optics, Tel-Aviv, Israël : « Manipulation and control of trapped photons with real and artificial atoms ».

Mars 2015 : Conférence d'ouverture aux 7^{èmes} tables rondes de l'Arbois, Aix-en-Provence : « Recherche fondamentale, civilisation et société ».

Mars 2015 : Conférence invitée au Congrès annuel de la Société allemande de physique, Heidelberg, Allemagne : « Fifty years of revolutions in atomic physics and quantum optics ».

Mai 2015 : Welsh Lecture à l'Université de Toronto, Canada, Colloquium : « Controlling photons in a box and raising Schrödinger cats of light ».

Mai 2015 : Welsh Lecture à l'Université de Toronto, Canada, Conférence grand public : « Power and Strangeness of the Quantum ».

Mai 2015 : Conférence invitée à QUPON, the international Conference on Quantum Physics of Nature, Vienne, Autriche : « Dipole-dipole interactions in a cold Rydberg gas explored by microwave spectroscopy ».

Mai 2015 : Conférence plénière au Congrès de la Société Brésilienne de Physique, Foz de Iguacu, Brésil : « Manipulating and controlling photons in a box ».

Juin 2015 : Conférence invitée aux Nordic Physics Days, Trondheim, Norvège : « Controlling photons in a box and raising Schrödinger cats of light ».

Juin 2015 : Conférences invitées à la célébration de l'année internationale de la lumière à l'Académie des Sciences de Colombie à Bogota, Colombie : 1. Experiments in Cavity QED : Controlling photons in a box and raising Schrödinger cats of light ». 2. Celebrating the International Year of Light : a reflection about blue sky research and innovation ».

Juin 2015 : Conférences invitées à la célébration internationale de la lumière à Parque Explora, Medellin, Colombie : mêmes conférences qu'à Bogota.

Juin 2015 : Intervention devant les étudiants à l'Université Pontificale Bolivarienne à Medellin, Colombie.

Juin 2015 : Conférence *key-note* à CLEO-EQEC, Munich, Allemagne : « Real and Artificial Atoms interacting with photons in Cavity QED and in Circuit QED ».

Juin 2015 : Conférence invitée à la réunion des Prix Nobel à Lindau, Allemagne : « Celebrating the International Year of Light : Fifty years of revolutions in atomic physics and quantum optics ».

Juillet 2015 : Colloquium à l'université Strathclyde de Glasgow, Ecosse, à l'occasion de la remise d'un doctorat honoris causa de l'université : « Shedding new light on Schrödinger cat ».

Juillet 2015 : Conférence plénière à ICPEAC, International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions, Tolède, Espagne : « Celebrating the International Year of Light : Fifty years of laser revolutions in physics ».

DISTINCTIONS

Serge Haroche a reçu le diplôme de docteur *honoris causa* de l'université de Strathclyde à Glasgow et de l'institut Weizmann en Israël. Il a été élu associé étranger de l'Académie des sciences de Colombie. Il a été invité à donner la Dirac Lecture à l'université de Nouvelle-Galles du Sud (Sydney, Australie) et la Welsh Lecture à l'université de Toronto (Canada). Il a été nommé dans l'Ordre royal suédois de l'Étoile polaire.

ACTIVITÉS DE RECHERCHE

Le travail de recherche de Serge Haroche se déroule au sein du laboratoire Kastler Brossel (LKB) de l'École normale supérieure. Il y 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 2010, ce projet est soutenu par un contrat européen de l'ERC (projet DECLIC, acronyme pour *Decoherence of Light in Cavities*).

Depuis le 1^{er} janvier 2014 le Collège de France est cotutelle du LKB (avec l'ENS et l'université Paris VI). Le laboratoire de l'équipe de Serge Haroche a déménagé de l'ENS vers le Collège de France où il occupe depuis le mois d'avril 2014 le rez-de-chaussée du bâtiment E du site Marcelin Berthelot.

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.

Deux expériences ont été effectuées au cours de la dernière année. L'une porte sur l'étude des interactions de van der Waals entre atomes de Rydberg préparés au sein d'un gaz d'atomes froids sur une puce à atomes cryogénique et l'autre sur la mesure d'un champ électrique avec une précision dépassant la limite quantique standard à l'aide d'un atome de Rydberg préparé dans un état non classique :

Interactions dipôle-dipôle dans un gaz froid d'atomes de Rydberg froid sondé par spectroscopie microonde

L'interaction dipôle-dipôle entre atomes de Rydberg est devenue un sujet d'étude extrêmement fructueux pour l'information quantique et pour la simulation quantique de systèmes à N corps. Nous avons montré que la spectroscopie microonde d'un gaz dense d'atomes de Rydberg piégé sur une puce à atomes supraconductrice dans le régime de blocage de Coulomb révèle directement le spectre des énergies d'interaction dans ce système à N corps. Nous avons utilisé la méthode pour étudier la dynamique de l'explosion du nuage de Rydberg sous l'effet d'interactions dipôle-dipôle répulsives. Cette étude nous montre que nous disposons d'un outil très prometteur pour la simulation quantique exploitant des atomes de Rydberg en interactions fortes. Elle a fait l'objet de la thèse de doctorat de Raul Celistrino Teixeira.

Chats de Schrödinger d'un atome de Rydberg pour la métrologie quantique

Dans le monde quantique, la précision de toute mesure est limitée par un bruit intrinsèque. Un modèle général d'« aiguille de mesure » quantique est constitué par un moment cinétique J évoluant sur le cadran sphérique d'une sphère dite « sphère de Bloch ». Une telle aiguille peut par exemple être réalisée par $N = 2J$ atome à deux niveaux indépendants. Dans ce cas, l'aiguille évolue dans un « état cohérent » dont les fluctuations conduisent à une incertitude de mesure en $1/\sqrt{J}$ appelée limite quantique standard. La métrologie quantique consiste à préparer l'« aiguille » dans un état non-classique qui permet de dépasser cette limite et d'atteindre la précision ultime fondamentale, dite limite de Heisenberg, qui évolue en $1/J$. Une façon d'approcher cette limite consiste à utiliser des états comprimés (*squeezed states*) du moment cinétique. Une autre méthode est de préparer l'aiguille dans une superposition mésoscopique d'états, de type « chat de Schrödinger ». Nous avons réalisé une expérience dans laquelle la mesure est un atome de Rydberg préparé dans un tel état. Nous exploitons pour cela une méthode expérimentale largement

décrite dans le résumé de cours de l'année 2013-2014. La phase quantique relative des deux composantes de la superposition d'états étant très sensible au champ électrique, nous avons mis en œuvre une méthode d'interférométrie atomique pour la mesurer avec précision. Cette méthode nous a permis de réaliser un électromètre à un seul atome mesurant des faibles champs de l'ordre de la centaine de microvolts par centimètre en quelques dizaines de nanosecondes, avec une sensibilité proche de la limite de Heisenberg. Cette nouvelle méthode de mesure de champ résolue en espace et en temps a fait l'objet de la thèse de doctorat d'Adrien Facon. Elle ouvre la voie à de nombreuses applications.

Publications du groupe d'électrodynamique quantique en cavité

HERMANN-AVIGLIANO C., TEIXEIRA R.C., NGUYEN T.L., CANTAT-MOLTRECHT T., NOGUES G., DOTSENKO I., GLEYZES S., RAIMOND J.M., HAROCHE S. et BRUNE M., « Long coherence times for Rydberg qubits on a superconducting atom chip », *Physical Review A*, 90(4), 23 octobre 2014, 040502, DOI : 10.1103/PhysRevA.90.040502.

HERMANN-AVIGLIANO C., CISTERNAS N., BRUNE M., RAIMOND J.-M. et SAAVEDRA C., « Scheme for efficient generation of mesoscopic field-state superposition in cavity QED », *Physical Review A*, 91(1), 8 janvier 2015, 013815, DOI : 10.1103/PhysRevA.91.013815.

RYBARCZYK T., PEAUDECERF B., PENASA M., GERLICH S., JULSGAARD B., MOLMER K., GLEYZES S., BRUNE M., RAIMOND J.M., HAROCHE S. et DOTSENKO I., « Forward-backward analysis of the photon-number evolution in a cavity », *Physical Review A*, 91(6), 15 juin 2015, 062116, DOI : 10.1103/PhysRevA.91.062116.

BRUNE M. et RAIMOND J.M., « Trapped quantum light », *Europhysics Letters*, 110(2), avril 2015, 20001, DOI : 10.1209/0295-5075/110/20001.

TEIXEIRA R.C., HERMANN-AVIGLIANO C., NGUYEN T.L., CANTAT-MOLTRECHT T., RAIMOND J.M., HAROCHE S., GLEYZES S. et BRUNE M., « Microwaves Probe Dipole Blockade and van der Waals Forces in a Cold Rydberg Gas », *Physical Review Letters*, 115(1), 30 juin 2015, 013001, DOI : 10.1103/PhysRevLett.115.013001.

HAROCHE S. et RAIMOND J.-M., « Bohr's Legacy in Cavity QED », dans DARRIGOL O., DUPLANTIER B., RAIMOND J.-M. et RIVASSEAU V. (éd.), *Niels Bohr, 1913-2013 : Poincaré Seminar 2013*, Basel, Birkhäuser, coll. « Progress in Mathematical Physics », n° 68, 2016.

HAROCHE S., « Einstein et les grandes mutations de la physique autour de 1914 », dans COMPAGNON A. (éd.), *Autour de 1914-1918 : nouvelles figures de la pensée, sciences, arts et lettres*, Paris, Collège de France / Odile Jacob, 2015.