

Physique atomique et moléculaire

M. Claude COHEN-TANNOUJJI, membre de l'Institut
(Académie des Sciences), professeur

Le cours de l'année 1988-1989 est le premier d'une série de deux cours portant sur le thème général « Cohérences quantiques et dissipation ». L'objectif d'une telle étude est de comprendre comment une *superposition linéaire* de deux états $|\psi_1\rangle$ et $|\psi_2\rangle$ d'un système quantique est transformée en un *mélange statistique d'états* par couplage dissipatif avec un environnement, et ce d'autant plus rapidement que les deux états $|\psi_1\rangle$ et $|\psi_2\rangle$ sont macroscopiquement différents.

Le cours commence par quelques brefs rappels de mécanique quantique sur le *principe de superposition* et la description de l'état d'un système par un *opérateur densité*. La notion de *cohérence quantique* entre deux états est introduite et reliée à l'élément de matrice non diagonal de l'opérateur densité entre ces deux états. L'importance de cette notion en physique atomique et moléculaire est soulignée et illustrée sur plusieurs exemples (effet Hanle, battements quantiques). On rappelle également que le couplage avec l'environnement détruit les cohérences quantiques avec un *temps de relaxation* T_2 en général beaucoup plus court que le temps T_1 caractérisant l'évolution des populations des niveaux d'énergie.

Une situation particulièrement intéressante apparaît lorsqu'il existe des cohérences quantiques entre deux états différents d'un *ensemble de deux sous-systèmes* A et B. De telles cohérences reflètent alors l'existence de *corrélations quantiques non séparables* entre les deux sous-systèmes. L'impossibilité de comprendre ces corrélations avec des concepts classiques (paradoxe de Einstein-Podolsky-Rosen) souligne bien la différence importante qui existe entre une superposition cohérente de deux états et un mélange statistique de ces deux états. On montre que les mêmes difficultés apparaissent dans l'analyse quantique du processus de mesure. Des corrélations quantiques non séparables apparaissent en effet entre l'appareil de mesure \mathcal{M} et le système \mathcal{S} . De plus, de telles corrélations peuvent se manifester sur plusieurs paires d'observables

corrélées de \mathcal{S} et \mathcal{M} , ne commutant pas entre elles, ce qui introduit une ambiguïté dans l'identification de la grandeur de \mathcal{S} qui est mesurée par \mathcal{M} .

On expose alors les grandes lignes de la théorie de Zurek permettant de résoudre, au moins partiellement, ces difficultés. Le point important est que le système $\mathcal{S} + \mathcal{M}$ n'est pas en général isolé, mais couplé à un environnement \mathcal{E} . C'est l'interaction entre \mathcal{M} et \mathcal{E} qui privilégie une paire particulière (S, M) d'observables corrélées de \mathcal{S} et \mathcal{M} , et qui lève l'ambiguïté mentionnée plus haut. La dissipation introduite par le couplage avec \mathcal{E} n'affecte pas les populations (poids relatifs) des états corrélés de S et M apparaissant à l'issue du processus de mesure, tout en détruisant très rapidement les cohérences quantiques entre états macroscopiquement différents de M. Les corrélations quantiques non séparables sont ainsi transformées par le couplage avec \mathcal{E} en corrélations classiques.

La discussion précédente montre l'importance que revêt la destruction par la dissipation des cohérences quantiques. Le reste du cours de cette année sera consacré à l'étude de quelques modèles simples permettant d'illustrer et de comprendre un tel phénomène. L'analyse du processus quantique de mesure à partir d'un tel point de vue sera reprise l'année suivante de manière plus approfondie.

Etude d'un premier exemple simple : effet de l'émission spontanée d'un photon sur les cohérences quantiques de l'atome émetteur

Le premier exemple étudié est relatif à un atome à 2 niveaux a et b. A l'instant initial $t = 0$, l'atome est dans un niveau excité b, et l'état quantique de son centre de masse est décrit par un opérateur densité quelconque, qui peut contenir des cohérences quantiques en position, en impulsion, et éventuellement être formé de deux paquets d'ondes bien séparés spatialement l'un de l'autre. Après un temps suffisamment long (supérieur à la durée de vie radiative de l'état excité b), l'atome est retombé dans son état fondamental a en émettant spontanément un photon, et l'état de son centre de masse a changé. Que sont devenues les cohérences quantiques initiales de l'état du centre de masse ? Un tel problème est suffisamment simple pour que l'on puisse obtenir une solution exacte. De plus, l'émission spontanée peut être considérée comme le prototype de processus dissipatif en optique quantique et il est important par exemple de déterminer les limites qu'un tel processus introduit sur les longueurs de cohérence spatiale que le refroidissement laser permet d'obtenir.

On commence par résoudre l'équation de Schrödinger décrivant l'évolution du système global atome + rayonnement. En prenant la trace sur les variables du rayonnement et les variables atomiques internes, on détermine alors l'opérateur densité décrivant l'état du centre de masse de l'atome après émission spontanée d'un photon. L'expression obtenue montre que l'émission

spontanée détruit toute cohérence spatiale de l'atome émetteur entre deux points \vec{r}_1 et \vec{r}_2 séparés par une distance supérieure à la longueur d'onde λ_0 du photon émis. Un tel résultat est interprété physiquement et relié au fait que, dans l'état final du système global atome + rayonnement, des corrélations quantiques non séparables apparaissent entre la position de l'atome et l'état du champ émis. On montre également que la destruction des cohérences quantiques de l'atome émetteur est moins sévère si des informations partielles sont conservées sur l'énergie ou la direction du photon émis. Enfin, l'évolution des cohérences en impulsion est étudiée. Elles sont beaucoup moins sensibles à l'émission spontanée et se retrouvent pratiquement inchangées à l'issue du processus d'émission.

Autre exemple de destruction de cohérences spatiales.

Diffusion de photons ou de particules légères

L'étude précédente ne considère qu'un seul processus d'émission. Pour la compléter, on aborde ensuite l'étude de cycles absorption-émission de photons, ou plus généralement de processus de diffusion de photons ou de particules matérielles plus légères que la particule diffusante. De plus, on ne se limite pas à un seul processus de diffusion. Le problème est de comprendre comment les cohérences quantiques de la particule « cible » sont affectées par une suite aléatoire de processus de collision avec des particules « projectiles ».

A partir de la matrice S de collision, il est possible de calculer l'évolution au cours d'une collision donnée de l'état du système global cible + projectile. Il suffit alors de tracer sur les variables du projectile (somme sur tous les états finals possibles du projectile), puis de moyennner sur les états initiaux du projectile ainsi que sur toutes les collisions pouvant se produire par unité de temps, pour obtenir la vitesse de variation moyenne de l'opérateur densité de la particule cible. Il apparaît alors que la cohérence spatiale de la particule cible entre deux points \vec{r}_1 et \vec{r}_2 est détruite avec un taux d'amortissement proportionnel au carré $(\vec{r}_1 - \vec{r}_2)^2$ de la distance séparant les deux points et au coefficient de diffusion D de l'impulsion de la particule cible.

La signification physique d'un tel résultat est analysée en détail. On introduit tout d'abord la notion de cohérence spatiale globale à une distance \vec{u} donnée, représentant l'ensemble de toutes les cohérences spatiales entre couples de points \vec{r}_1 et \vec{r}_2 tels que $\vec{r}_1 - \vec{r}_2 = \vec{u}$. Cette fonction $\mathcal{F}(\vec{u})$ se trouve être en fait la transformée de Fourier de la distribution de probabilité $\mathcal{P}(\vec{p})$ de l'impulsion \vec{p} de la particule. Pour comprendre le comportement de la cohérence spatiale globale, il suffit donc de comprendre celui de la distribution d'impulsion. Pour fixer les idées, supposons que l'état de la particule cible soit une superposition cohérente de deux paquets d'ondes très étroits, séparés par une distance u_0 beaucoup plus grande que leur largeur. On trouve alors immédiatement que $\mathcal{P}(p)$ présente des oscillations très rapides en p , de

période $\pi\hbar/u_0$. L'existence d'une cohérence spatiale globale à la distance u_0 se traduit donc par un comportement oscillant de $\mathcal{P}(p)$ en fonction de p , de période inversement proportionnelle à u_0 . Sous l'effet des collisions, l'impulsion de la particule cible effectue une marche au hasard dans l'espace des impulsions, caractérisée par un coefficient de diffusion D . Un tel processus de diffusion entraîne que les oscillations rapides de $\mathcal{P}(p)$ vont s'atténuer avec un taux proportionnel à D et inversement proportionnel au carré de la période de ces oscillations. Il est possible ainsi de comprendre pourquoi la cohérence entre les deux paquets d'ondes séparés d'une distance u_0 est détruite avec un taux proportionnel à Du_0^2 .

*Etude quantitative de la destruction des cohérences spatiales
d'une particule Brownienne*

Toute l'étude précédente est limitée aux effets d'ordre le plus bas en $1/M$, où M est la masse de la particule cible. Ont donc été ignorés tous les effets liés à la vitesse \bar{p}/M de la particule cible, comme le *vol libre*, ou la *friction* associée aux changements de la vitesse de la particule lors des collisions.

Pour étudier de manière plus quantitative la contribution de tels effets, il faut partir de l'équation cinétique décrivant l'évolution temporelle de l'opérateur densité de la particule cible. Après un bref rappel des diverses représentations possibles de cet opérateur densité, et en particulier de la représentation de Wigner $w(p,x,t)$, on donne l'équation d'évolution de $w(p,x,t)$ qui sera établie plus loin dans le cadre d'un modèle simple (modèle de Caldeira-Leggett). Cette équation est une équation de Fokker-Planck, contenant des termes qui décrivent respectivement, le vol libre de la particule cible, l'amortissement et la diffusion de l'impulsion de cette particule sous l'effet des collisions.

La double transformée de Fourier de $w(p,x,t)$ par rapport à p et x est une autre fonction caractéristique $C(u,v,t)$ qui obéit à une équation aux dérivées partielles du premier ordre en u , v et t . On expose alors la *méthode des caractéristiques* qui permet de résoudre une telle équation et d'obtenir l'évolution des cohérences quantiques de la particule pour n'importe quel état initial. Le cas particulier d'un état initial gaussien est étudié en détail. On montre que l'évolution de la cohérence spatiale globale n'est pas affectée par le vol libre, et on illustre un tel résultat par la description d'expériences récentes d'interférométrie à neutrons. On étudie également l'évolution de la distribution de probabilité $\mathcal{R}(x)$ de la position x de la particule. Le résultat important qui ressort de cette étude est le suivant : lorsque le couplage avec l'environnement croît, c'est-à-dire lorsque le taux de collisions croît, les cohérences spatiales de la particule cible sont détruites de plus en plus rapidement alors que l'évolution de la distribution de probabilité de la position est de plus en plus lente. En d'autres termes, dans la base des états propres de l'opérateur

position, un accroissement du couplage avec l'environnement se traduit par un raccourcissement du temps de relaxation T_2 et un allongement du temps de relaxation T_1 .

Le modèle de Caldeira-Leggett appliqué au mouvement Brownien

Le modèle de Caldeira-Leggett est un modèle simple de couplage dissipatif conduisant à une force de friction proportionnelle à la vitesse. Il permet d'établir très simplement l'équation de Fokker-Planck satisfaite par $w(p,x,t)$ et discutée plus haut.

Pour introduire un tel modèle, on commence par considérer l'hamiltonien décrivant la dynamique d'une particule lourde couplée à un gaz de particules légères par des potentiels harmoniques. Cet hamiltonien est visiblement invariant par translation globale de l'ensemble des particules. On montre que, moyennant un changement d'échelle approprié, un tel hamiltonien est équivalent à l'hamiltonien de Caldeira-Leggett qui décrit la dynamique d'une particule libre couplée à un réservoir d'oscillateurs harmoniques par des termes de couplage linéaires par rapport à la position de la particule et à la position de chaque oscillateur.

A partir des équations de Heisenberg couplées de la particule et des oscillateurs du réservoir, il est possible alors de montrer qu'un choix convenable des paramètres de couplage permet d'écrire l'équation quantique du mouvement de la particule sous la forme d'une *équation de Langevin* quantique, avec une force de friction proportionnelle à la vitesse et une force de Langevin dont la fonction de corrélation dépend de l'état initial choisi pour le réservoir. Si cet état initial est un état d'équilibre thermodynamique à une température T suffisamment élevée (limite classique), et si la largeur du spectre de fréquences du réservoir est grande devant le taux d'amortissement de la vitesse de la particule lourde, il est possible d'utiliser la méthode de l'équation pilote pour établir l'équation du mouvement de l'opérateur densité réduit de la particule lourde. On établit une telle équation sous forme opératorielle et on montre qu'elle conduit bien à une équation de Fokker-Planck pour la représentation de Wigner $w(p,x,t)$ de l'opérateur densité.

Toute l'approche précédente est généralisée au cas où la particule lourde est supposée de plus soumise à un potentiel extérieur harmonique. Les conditions dans lesquelles il est possible d'établir une équation pilote pour un oscillateur harmonique suramorti ou sous-amorti sont discutées en détail. On montre en particulier qu'avec un réservoir à $T = 0^\circ\text{K}$, il est possible d'écrire une équation pilote pour un oscillateur harmonique sous-amorti.

Cohérences quantiques et dissipation pour un oscillateur harmonique sous-amorti

Certaines propositions expérimentales récentes envisagent la possibilité de préparer un oscillateur harmonique (associé à un mode du champ électroma-

gnétique) dans une *superposition cohérence de deux états cohérents*. En l'absence de dissipation, les paquets d'ondes associés à ces deux états cohérents oscilleraient sans se déformer, et on pourrait essayer d'observer les phénomènes d'interférences associés à la cohérence qui existe entre eux.

Le problème qui se pose alors est d'étudier l'influence d'une dissipation éventuelle sur ces phénomènes d'interférence. On utilise pour cela l'équation pilote décrivant l'évolution d'un oscillateur harmonique sous-amorti et introduite plus haut. Lorsque l'opérateur densité de l'oscillateur est représenté par une fonction caractéristique adaptée à l'ordre normal (opérateurs d'annihilation à droite des opérateurs de création), l'équation pilote prend la forme d'une équation aux dérivées partielles du premier ordre qui peut être résolue par la méthode des caractéristiques. On montre alors que, si l'état initial de l'oscillateur est une superposition de deux états cohérents, un tel état évolue vers un mélange statistique de deux états cohérents : l'amplitude complexe associée à chaque état cohérent s'amortit avec un taux γ alors que la cohérence quantique entre les deux états cohérents s'amortit avec un taux beaucoup plus élevé, plus grand que γ par un facteur égal au carré de la distance entre les deux états cohérents (exprimée en unités de la largeur de chaque état cohérent). Lorsque les deux paquets d'ondes associés aux deux états cohérents sont bien séparés, un tel facteur d'amplification est très élevé, ce qui montre la difficulté qu'il y a à observer des cohérences quantiques macroscopiques en présence de dissipation.

C. C.-T.

SÉMINAIRES 1988-1989

Les séminaires donnés au Collège de France ont été consacrés à la présentation et à la discussion d'un certain nombre de développements récents en physique atomique et moléculaire et en optique quantique :

Dix séminaires ont été organisés :

G. GABRIELSE (Harvard et C.E.R.N.), *Trapping and cooling antiprotons for mass measurements*.

A. L'HUILLIER (Service de Physique des Atomes et des Surfaces, C.E.N. Saclay), *Génération d'harmoniques d'ordre élevé en champ laser intense*.

F. MASNOU-SEEUWS (Laboratoire des Collisions Atomiques et Moléculaires, Orsay), *Réactions d'ionisation associative entre atomes excités*.

A. ANTONETTI (Laboratoire d'Optique Appliquée, E.N.S.T.A. et Ecole Polytechnique, Palaiseau), *La physique au ralenti : les lasers femtoseconde et leurs applications*.

A. ASPECT (Collège de France et E.N.S.), *Refroidissement laser sous l'énergie de recul : vers de grandes longueurs de cohérence atomique.*

C. BOUCHIAT (Laboratoire de Physique Théorique de l'E.N.S.), *Théories Electrofaibles et Physique Atomique.*

G. JAMELOT (Laboratoire de Spectroscopie Atomique et Ionique, Orsay), *Lasers à rayons X : progressions et perspectives.*

F. FREEMAN (A.T. & T. Labs, Murray Hill, U.S.A.), *Atoms in extremely intense optical fields.*

Jook WALRAVEN (Van der Waals Lab., University of Amsterdam), *Quantum reflexion from spherical mirror.*

Jean-Luc DESTOMBES (Laboratoire de Spectroscopie Hertziennne, Université de Lille-Flandres-Artois), *De la Spectroscopie Moléculaire à la Physico-Chimie du Milieu Interstellaire.*

ACTIVITÉ SCIENTIFIQUE

M. Claude COHEN-TANNOUJDI effectue ses recherches au sein du Laboratoire de Spectroscopie Hertziennne de l'Ecole Normale Supérieure. Il y dirige avec M. Alain ASPECT, Sous-Directeur de Laboratoire au Collège de France, les travaux d'une équipe de chercheurs sur le thème général des interactions matière-rayonnement et du refroidissement et piégeage d'atomes par des faisceaux laser.

Ce Laboratoire, qui est associé au C.N.R.S., à l'Ecole Normale Supérieure et à l'Université Paris VI, est implanté géographiquement, d'une part au Laboratoire de Physique de l'Ecole Normale Supérieure (24, rue Lhomond), d'autre part à l'Université Paris VI (quai Saint-Bernard). Il est dirigé depuis le 1^{er} octobre 1985 par M. Jacques DUPONT-ROC, Directeur de Recherches au C.N.R.S.

Le personnel du Laboratoire comporte : 10 enseignants-chercheurs (professeurs, maîtres de conférences, maître-assistants, agrégés-préparateurs), 29 chercheurs au C.N.R.S. (directeurs et chargés de recherche), 7 chercheurs étrangers, 10 élèves de grandes écoles, 19 techniciens et administratifs.

Le Laboratoire est constitué d'une dizaine d'équipes de recherches, comprenant 3 à 10 chercheurs, et étudiant divers problèmes de physique atomique et moléculaire et d'optique quantique.

Un rapport d'activité scientifique est rédigé tous les deux ans pour le Comité National du C.N.R.S. Il contient une analyse détaillée des problèmes

scientifiques abordés par chaque équipe et un bilan des résultats nouveaux obtenus. Nous nous contenterons donc ici de donner la liste des publications du Laboratoire en 1988, ainsi que celles des thèses soutenues au cours de cette même année.

PUBLICATIONS

GIRARD B., BILLY N., GOUEDARD G., VIGUE J., *Saturation cohérente des signaux de détection de produits de réaction par fluorescence induite par laser* (*Ann. Phys. Paris*, 13, 119, 1988).

ASPECT A., DALIBARD J., SALOMON C., METCALF H., COHEN-TANNOUDJI C., *Manipulation laser d'atomes neutres* (*Ann. Phys. (France)*, Colloque n° 1, 13, 3, 1988).

GOY P., GROSS M., RAIMOND J.M., BUISSON J.C., *Un analyseur scalaire de réseau millimétrique couvrant de 16 à 250 GHz* (*Ann. Télécomm.*, 1988).

DALIBARD J., SALOMON C., ASPECT A., ARIMONDO E., KAISER R., VANSTEENKISTE N., COHEN-TANNOUDJI C., *New schemes in laser cooling* (*Atomic Physics XI*, Paris, 1988).

GOUEDARD G., BILLY N., GIRARD B., VIGUE J., *Isotope shifts in the C12 B-X system* (*Can. J. Phys.*, 66, 721, 1988).

SALOMON C., DALIBARD J., *La température limite d'un jet atomique de césium ralenti par diode laser* (*C.R. Acad. Sci.*, 306, 1319, 1988).

ASPECT A., BONIFACIO R., CASAGRANDE F., LUGIATO L.A., *Bistability in laser cooling* (*Europhys. Lett.*, 7, 499, 1988).

DALIBARD J., SALOMON C., *Trapping neutral atoms with electromagnetic fields* (*Europhys. News*, 19, 68-72, 1988)

BRUNE M., RAIMOND J.M., GOY P., DAVIDOVICH L., HAROCHE S., IEEE J., *The two-photon Rydberg atom micromaser* (*Quant. Electron.*, 24, 1323, 1988).

REYNAUD S., DALIBARD J., COHEN-TANNOUDJI C., *Photon statistics and quantum jumps : the picture of the dressed atom radiative cascade* (*IEEE J. Quant. Electron.*, 24, 1395, 1988).

BOHLER C.L., SCHEARER L.D., LEDUC M., NACHER P.J., ZACHROWOSKI J., MILNER R.G., MCKEOWN R.D., WOODWARD C.E., *Spin-polarized He-3 nuclear targets and metastable He-4 atoms by optical pumping with a tunable, Nd : YAP laser* (*J. Appl. Phys.*, 63, 2497, 1988).

ARON-ROSA D.S., BOERNER C.F., GROSS M., TIMSIT J.C., DELACOUR M., BATH P.E., *Wound healing following excimer laser radial keratotomy* (*J. Cataract Refract. Surg.*, 14, 173, 1988).

GIRARD B., BILLY N., GOUEDARD G., VIGUE J., *Laser induced fluorescence study of the $F + I_2 - IF + I$ reactive collision* (*J. Chem. Phys.*, 88, 2342, 1988).

BILLY N., GIRARD B., GOUEDARD G., VIGUE J., *Hyperfine predissociation of the B state of Cl_2* (*J. Chem. Phys.*, 89, 1196, 1988).

BOUCHIAT M.A., GUENA J., *The $E2\ 6S - 7S$ amplitude in cesium and its importance in a precise calibration of $E1pv$* (*J. Physique*, 49, 2037, 1988).

TASTEVIN G., NACHER P.J., WIESENFELD L., LEDUC M., LALOE F., *Obtaining polarized liquid helium-3 from optically oriented gas* (*J. Phys. (Paris)*, 49, 1, 1988).

LEFEVRE-SEGUIN V., BROSEL J., *Attempts to increase the nuclear relaxation time of a He-3 gas at low temperatures* (*J. of Low Temp. Phys.*, 72, 165, 1988).

SALOMON C., HILS D., HALL J.L., *Laser stabilization at the millihertz level* (*J.O.S.A. B*, 5, 1576, 1988).

ASPECT A., DALIBARD J., SALOMON C., *Des canaux de lumière pour les atomes* (*La Recherche*, 19, 401, 1988).

LEDUC M., CASTAING B., *L'hélium-3 polarisé : un nouveau fluide quantique* (*La Recherche*, 205, 1466, 1988).

DALIBARD J., *Laser cooling of an optically thick gas : the simplest radiation pressure trap ?* (*Opt. Commun.*, 68, 203, 1988).

ANDERSON A., HINDS E.A., JHE W., MESCHÉDE D., HAROCHE S., *Measuring the Van der Waals force between Rydberg atoms and a metallic surface* (*Phys. Rev. A*, 37, 3594, 1988).

HARE J., GROSS M., GOY P., *Circular atoms prepared by a new method of crossed electric and magnetic fields* (*Phys. Rev. Lett.*, 61, 1938, 1988).

ASPECT A., ARIMONDO E., KAISER R., VANSTEENKISTE N., COHEN-TANNOUDJI C., *Laser cooling below the one-photon recoil energy by velocity-selective coherent population trapping* (*Phys. Rev. Lett.*, 61, 826, 1988).

NACHER P.J., TASTEVIN G., WIESENFELD L., *Nonmagnetic metal and glass helium-3 cryostat immersed in a 4.2-K bath* (*Rev. Sci. Instrum.*, 59, 304, 1988).

LALOE F., FREED J.H., *The effects of spin in gases* (*Scient. Amer.*, 256, 94, 1988).

BOUCHIAT M.A. POTTIER L., *Optical experiments and weak interactions* (*Uspekhi Phys. Nauk*, 155, 1988).

GRYNBERG G., *Collision-induced gratings in four-wave mixing oscillators* (*Advances in Laser Sc. III-Am. Institut. of Physics*, 1988).

PINARD M., GRYNBERG G., *Processus assistés par collisions dans les oscillateurs paramétriques atomiques* (*Ann. Phys.*, 13, 141, 1988).

VERKERK P., GRYNBERG G., *Oscillation de relaxation observée sur la transmission d'un faisceau laser dans une cellule de sodium* (*Ann. Phys.*, 13, 169, 1988).

GAY J.C., DELANDE D., *Quantum chaos in Rydberg atoms in magnetic fields* (*Ann. Phys.*, 13, 37, 1988).

GRYNBERG G., PINARD M., *Principe d'un gyromètre optique utilisant un oscillateur paramétrique atomique fonctionnant en régime quasi-dégénéré* (*C.R. Acad. Sci. Paris*, 306, 203, 1988).

DELANDE D., GAY J.C., *A new method for producing circular Rydberg states* (*Europhys. Lett.*, 5, 303, 1988).

VERKERK P., GRYNBERG G., *Self-pulsing of the transmission of a cw dye laser beam through a high temperature sodium cell* (*Europhys. Lett.*, 6, 31, 1988).

LUGIATO L.A., OLDANO C., FABRE C., GIACOBINO E., HOROWICZ R.J., *Bistability Self-Pulsing and Chaos in Optical Parametric Oscillators* (*Il Nuovo Cimento*, 10, 959-977, 1988).

FABRE C., GIACOBINO E., HEIDMANN A., REYNAUD S., *Réduction du bruit quantique sur des faisceaux lasers jumeaux* (*Images de la Physique*, 35-39, 1988).

GLASS-MAUJEAN M., *Photodissociation of doubly excited states in H₂: emission of Balmer lines* (*J. Chem. Phys.*, 89, 2839-2843, 1988).

PINARD M., GRYNBERG G., *Etude du gain par mélange à deux ondes dans les systèmes à deux et trois niveaux* (*J. Physique*, 49, 2027, 1988).

GRYNBERG G., PINARD M., GRANDCLEMENT D., VERKERK P., *Optical bistability in four-wave mixing oscillators* (*J. Physique*, 49, 471, 1988).

REYNAUD S., GIACOBINO E., *Squeezing in bistable optical systems* (*J. de Physique*, Colloque C2, 49, 477-482, 1988).

JULIEN L., BIRABEN F., GARREAU J.C., CAGNAC B., *A recent experiment on determination of the Rydberg constant with the use of two-photon spectroscopy of atomic hydrogen* (*Kvantovaya Electronika*, 15, 1204, 1988).

FABRE C., GIACOBINO E., GRANGIER P., *Quand l'OPO fait mieux que le laser* (*La Recherche*, 19, 540, 1988).

GRYNBERG G., *Mirrorless four-wave mixing oscillation in atomic vapors* (*Opt. Commun.*, 66, 321-324, 1988).

GRYNBERG G., LE BIHAN E., VERKERK P., SIMONEAU P., LEITE J.R.R., BLOCH D., LE BOITEUX S., DUCLOY M., *Observation of instabilities due to mirrorless four-wave mixing oscillation in sodium* (*Opt. Commun.*, 67, 363-366, 1988).

DE VOE R., FABRE C., JUNGSMANN K., HOFFNAGLE J., BREWER R., *Precision Optical-Frequency-Difference Measurements* (*Phys. Rev. A*, 37, 1802, 1988).

PENENT F., DELANDE D., GAY J.C., *Rydberg states of rubidium in crossed electric and magnetic fields* (*Phys. Rev. A*, 37, 4707, 1988).

GLASS-MAUJEAN M., FROHLICH H., BESWICK J.A., *Experimental evidence of an interference between photodissociation continua* (*Phys. Rev. A*, 61, 157-160, 1988).

FABRE C., GIACOBINO E., REYNAUD S., DEBUISSCHERT T., HEIDMANN A., HILICO L., *Intensity quantum noise reduction* (*Proceedings of the Conference Atomic Physics*, 11, 1988).

GAY J.C., *Hydrogenic systems in electric and magnetic fields* (*Spectrum of atomic hydrogen. advances-World Scient.*, Chap. VII, 1988).

THÈSES 1988

STENVOT C., Thèse Docteur Ingénieur, 1988, *Etude des coefficients visco-élastiques de couches monomoléculaires de tensioactifs adsorbés à la surface de l'eau.*

BRUNE M., Thèse d'Université, Paris VI, 1988, *Réalisation d'un micromaser à deux photons.*

DELANDE D., Thèse d'Université, Paris VI, 1988, *Atomes de Rydberg en champs statiques intenses.*

OUVRAGE

Claude COHEN-TANNOUJJI, Jacques DUPONT-ROC, Gilbert GRYNBERG, *Processus d'interaction entre photons et atomes*, Interéditions et Editions du C.N.R.S., Paris, 1988.

ACTIVITÉS DIVERSES - MISSIONS - CONFÉRENCES

Claude COHEN-TANNOUJJI

Invitation sur la chaire Lorentz de l'Université de Leide (Pays-Bas) du 15 février 1988 au 26 mars 1988 et du 2 avril 1988 au 10 juin 1988. Série de 12 cours sur le sujet « Fluctuations and dissipation in radiative processes ».

Conférences invitées à des conférences internationales

- Conference on spin polarized quantum systems, Turin, juin 1988.
- Symposium on the Hydrogen Atom, Pise, juillet 1988.
- Symposium Jean Brossel, Paris, juillet 1988.
- European Conference on Quantum Electronics, Hanovre, septembre 1988.
- Fourth Symposium on Frequency Standards and Metrology, Ancone, septembre 1988.

Séminaires

- Palais de la découverte, Paris, avril 1988.
- Séminaire Daniel Dautreppe, Grenoble, septembre 1988.
- Société Française de Physique, Marseille, octobre 1988.
- Max-Planck Institut für Quantum Optik, Garching, novembre 1988.
- Association Française pour l'Avancement des Sciences, Paris, novembre 1988.
- Université de Essen, Essen, décembre 1988.

Alain ASPECT

Conférences invitées

- International Laser Science, Atlanta (U.S.A.), octobre 1988.
- Seminar on modern Optics, M.I.T., Boston (U.S.A.), octobre 1988.
- Série de cours et conférences à Rio de Janeiro, Sao Carlos, Recife (Brésil), août 1988.
- Colloquium (séminaire général) de l'Université d'Aix-la-Chapelle (R.F.A.), novembre 1988.
- Colloquium de l'Université de Bonn (R.F.A.), novembre 1988.
- Academic Training Course (série de conférences), C.E.R.N. (Genève), novembre 1988.
- Conférence Fresnel, Ecole Polytechnique, décembre 1988.
- Conférence générale de la Société Belge de Physique, mai 1988.

Séminaires

- Séminaire du Laboratoire de Physique Atomique et des Surfaces du C.E.A., Saclay, mars 1988.
- Séminaire Université de Grenoble, printemps 1988.