

Physique atomique et moléculaire

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

Le cours de l'année 1990-1991 est le premier d'une série de deux cours consacrés à l'étude de nouveaux mécanismes de refroidissement laser. Au cours des trois dernières années, les températures obtenues dans les expériences de refroidissement laser d'atomes neutres ont été abaissées par plusieurs ordres de grandeur. Un certain nombre d'explications ont été proposées pour rendre compte de ces percées. L'objet du cours a été de passer en revue les développements récents dans ce domaine, d'analyser les mécanismes physiques nouveaux qui ont été mis en évidence et de préciser les nouvelles limites qui sont associées à ces mécanismes.

Les divers temps caractéristiques

Le cours commence par un bref rappel des divers temps caractéristiques qui apparaissent dans l'évolution de l'atome couplé, d'une part au champ laser, d'autre part au champ quantique du vide. Une distinction est faite entre les temps internes, qui concernent l'évolution des degrés de liberté internes de l'atome dans le système du centre de masse (par exemple, les populations des divers sous-niveaux atomiques dans l'état excité et l'état fondamental, ou les cohérences entre ces sous-niveaux), et les temps externes qui caractérisent la vitesse de variation des degrés de liberté de translation.

Le temps interne le plus évident est la durée de vie radiative $\tau_R = 1/\Gamma$ de l'état excité e , Γ étant la largeur naturelle de e . Les premières théories du refroidissement laser n'ont considéré que ce temps interne τ_R , qui se trouve être beaucoup plus court que le temps externe typique $T_{\text{ext}} = \hbar/E_R$ où $E_R = \hbar^2 k^2/2M$ est l'énergie de recul de l'atome de masse M , émettant ou absorbant un photon d'impulsion $\hbar k$.

On montre alors que, lorsque l'atome a plusieurs sous-niveaux Zeeman g_m , $g_{m'}$, ... dans l'état fondamental, de nouveaux temps internes apparaissent, qui

sont les temps de pompage optique τ_p d'un sous-niveau g_m à l'autre $g_{m'}$, par des cycles comportant l'absorption d'un photon laser suivie de l'émission d'un photon de fluorescence. Le point important est que ces temps internes dépendent de l'intensité laser I_L . A faible intensité, τ_p est d'autant plus long que I_L est faible. Le fait que des temps internes puissent devenir comparables ou même plus longs que les temps externes joue un rôle crucial dans les nouveaux mécanismes de refroidissement laser. Il permet en effet de comprendre pourquoi l'état interne d'un atome en mouvement peut ne plus suivre adiabatiquement les variations du champ laser « vu » par l'atome en mouvement, ce qui donne naissance à des forces de friction importantes.

Description de la dynamique atomique

Pour préciser l'idée précédente, la première étape consiste à reprendre les équations de base décrivant la dynamique de l'atome dans l'onde laser en les généralisant au cas où l'atome possède plusieurs sous-niveaux dans l'état fondamental.

Plusieurs types d'équations peuvent être envisagées suivant que l'on s'intéresse à un traitement semi-classique, où seuls les degrés de liberté internes sont quantifiés, le mouvement du centre de masse étant traité classiquement, ou à un traitement entièrement quantique, où tous les degrés de liberté sont quantifiés. Les équations d'évolution correspondantes pour la matrice densité atomique, « équations de Bloch optiques » dans le premier cas, « équations de Bloch optiques généralisées » dans le second, sont rappelées. Les termes nouveaux, liés à la dégénérescence Zeeman dans l'état fondamental, sont précisés et analysés.

Les équations ainsi obtenues sont plus complexes que celles correspondant au cas simple où l'atome n'a qu'un seul sous-niveau dans l'état fondamental. Il est possible néanmoins d'introduire de nouvelles approximations adaptées aux nouveaux mécanismes de refroidissement laser et de retrouver ainsi des équations simples et des images physiques claires.

Ainsi, pour obtenir des temps d'évolution interne longs, comme les temps de pompage optique, il convient d'utiliser des intensités lumineuses faibles. On peut alors, dans les équations du mouvement, éliminer adiabatiquement tous les éléments de matrice densité faisant intervenir l'état excité et obtenir ainsi des équations réduites qui ne concernent plus que la matrice densité dans l'état fondamental. Par ailleurs, aux très faibles vitesses v auxquelles conduisent les nouveaux mécanismes de refroidissement, le déplacement Doppler kv des raies atomiques devient négligeable devant la largeur naturelle Γ de l'état excité, de sorte qu'il devient légitime de restreindre les calculs à l'ordre 0 en kv/Γ .

Déplacements lumineux et pompage optique

Les équations simplifiées ainsi obtenues à la limite des faibles intensités et des faibles vitesses sont analysées et interprétées en détail. Elles montrent que l'évolution de la matrice densité atomique dans l'état fondamental est régie par deux types de termes : des termes « réactifs » décrivant une évolution hamiltonienne et des termes « dissipatifs » analogues à ceux associés à un processus de relaxation.

L'effet des termes réactifs peut être analysé en termes de « déplacements lumineux » des sous-niveaux de l'état fondamental g . Ces déplacements lumineux dépendent de la polarisation et de l'intensité de l'onde laser. Ils varient en général d'un sous-niveau de g à l'autre. Si la polarisation ou l'intensité de l'onde laser varient dans l'espace, on obtient ainsi une série de surfaces de potentiel auxquelles sont associées des forces agissant sur l'atome et dépendant de l'état interne dans g .

Les termes dissipatifs des équations d'évolution de la matrice densité atomique décrivent les transferts entre sous-niveaux de l'état fondamental induits par l'excitation lumineuse (pompage optique). Ils comportent des termes de départ, décrivant comment l'atome quitte l'état fondamental par absorption de photons, et des termes de retour décrivant comment l'atome retourne dans l'état fondamental par émission spontanée de photons de fluorescence.

Les paramètres δ' et Γ' qui décrivent respectivement l'importance des processus réactifs et dissipatifs n'ont pas la même dépendance vis-à-vis du désaccord $\delta = \omega_L - \omega_A$ entre la fréquence laser ω_L et la fréquence atomique ω_A . A grand désaccord ($|\delta| \gg \Gamma$), ce sont les processus réactifs qui prédominent : les déplacements lumineux δ' sont plus grands que les taux de pompage optique Γ' , la situation inverse ($|\delta'| \ll \Gamma'$) étant réalisée à faible désaccord.

Force réactive et force dissipative

La force radiative moyenne \mathcal{F} exercée sur l'atome par l'onde laser dépend des cohérences optiques, c'est-à-dire des éléments non diagonaux de la matrice densité entre l'état fondamental et l'état excité de l'atome. A la limite des faibles intensités et des faibles vitesses, il est possible, à partir des équations de Bloch optiques, d'éliminer adiabatiquement les cohérences optiques et de réexprimer \mathcal{F} en fonction de la seule matrice densité dans l'état fondamental. On montre que l'expression ainsi obtenue pour \mathcal{F} comporte deux types de termes, respectivement proportionnels aux paramètres δ' et Γ' introduits précédemment.

La partie de \mathcal{F} proportionnelle à δ' est la force réactive $\mathcal{F}_{\text{react}}$. Elle est égale, au signe près, à la valeur moyenne du gradient spatial de l'hamiltonien

effectif H_{eff} décrivant les déplacements lumineux des sous-niveaux de l'état fondamental g . Deux contributions apparaissent donc dans $\mathcal{F}_{\text{react}}$: celle associée aux gradients des valeurs propres de H_{eff} (déplacements lumineux) ; celle associée aux gradients des fonctions propres de H_{eff} . En développant l'onde laser en ondes planes, on montre que les processus physiques à l'origine de $\mathcal{F}_{\text{react}}$ sont des processus de redistribution de photons entre les différentes ondes planes μ, ν, \dots formant l'onde laser. Ainsi, l'onde μ peut être absorbée par la partie réactive du moment dipolaire induit par l'onde ν , alors que l'onde ν est amplifiée par la partie réactive du moment dipolaire induit par l'onde μ . De tels processus correspondent à un transfert de photon de l'onde μ à l'onde ν . Comme l'impulsion associée n'est pas la même dans les deux ondes, il s'ensuit que l'impulsion du champ varie de $\hbar(\mathbf{k}_\nu - \mathbf{k}_\mu)$, et par suite celle de l'atome de la quantité opposée, ce qui permet de comprendre l'origine de la force subie par l'atome.

La partie de \mathcal{F} proportionnelle à Γ' est la force dissipative $\mathcal{F}_{\text{dissip}}$. L'expression de $\mathcal{F}_{\text{dissip}}$ comporte des termes « carrés », ne faisant intervenir qu'une seule onde μ , et décrivant la pression de radiation due à l'impulsion des photons qui sont absorbés par unité de temps dans l'onde μ . Apparaissent aussi des termes « rectangles », faisant intervenir deux ondes μ et ν et associés à l'absorption d'une onde par la partie dissipative du moment dipolaire induit par l'onde ν . Contrairement à ce qui se passe pour $\mathcal{F}_{\text{react}}$, ces effets d'interférence entre une paire d'ondes μ et ν ne correspondent pas à une redistribution de photons : si l'onde μ est davantage absorbée à cause de la présence de l'onde ν , l'onde ν est également davantage absorbée (et non amplifiée) à cause de la présence de l'onde μ . On montre enfin que, pour une configuration laser formée de deux ondes planes se propageant dans des directions opposées (« mélasse optique » à une dimension), les termes d'interférence entre les deux ondes planes se compensent exactement, de sorte que $\mathcal{F}_{\text{dissip}}$ se réduit la somme des deux pressions de radiation exercées séparément par les deux ondes.

Le refroidissement « Sisyphe »

Le cours de cette année se termine par la présentation, sur un modèle très simple, de l'un des nouveaux mécanismes les plus importants de refroidissement laser, appelé refroidissement « Sisyphe » parce que l'atome en mouvement monte plus de côtes de potentiel qu'il n'en descend.

On commence par présenter le modèle utilisé qui est un modèle très simple de « mélasse optique » à une dimension. Les deux ondes laser se propagent en sens inverse le long de l'axe Oz ont des polarisations linéaires orthogonales, de sorte que la polarisation de l'onde résultante varie spatialement le long de Oz sur des distances de l'ordre de la longueur d'onde λ des ondes

laser, variant tous les $\lambda/8$ d'une polarisation linéaire à une polarisation circulaire (droite ou gauche) ou vice versa. Par ailleurs, la transition atomique étudiée relie un niveau fondamental g de moment cinétique $J_g = 1/2$ à un niveau excité e de moment cinétique $J_e = 3/2$, de sorte que l'état fondamental ne comporte que deux sous-niveaux Zeeman $g_{+1/2}$ et $g_{-1/2}$.

L'hamiltonien effectif décrivant les déplacements lumineux apparaissant dans l'état fondamental $J_g = 1/2$ est particulièrement simple. Ses états propres sont indépendants de z et coïncident avec les états propres $g_{+1/2}$ et $g_{-1/2}$ de la composante suivant Oz du moment cinétique atomique. Quant à ses valeurs propres, elles oscillent en opposition de phase pour les deux états $g_{+1/2}$ et $g_{-1/2}$ avec une amplitude U_0 qui apparaît comme étant la profondeur des puits de potentiel associés aux déplacements lumineux. On montre également que la symétrie de l'excitation est telle que les deux pressions de radiation exercées séparément par les deux ondes laser s'équilibrent exactement, de sorte que la force dissipative s'annule exactement. La seule force qui subsiste est donc la force réactive et elle est due uniquement aux gradients spatiaux des déplacements lumineux.

Les taux de pompage optique entre les deux sous-niveaux $g_{+1/2}$ et $g_{-1/2}$ sont également calculés. Le résultat important qui ressort d'une telle étude est la corrélation très forte qui existe entre les variations spatiales des déplacements lumineux de chaque sous-niveau et le taux de pompage optique à partir de ce sous-niveau. On trouve que, pour un désaccord δ négatif ($\omega_L < \omega_A$), le pompage optique s'effectue préférentiellement du sous-niveau le plus élevé vers le sous-niveau le moins élevé. Au sommet des collines de chaque courbe de potentiel, le taux de pompage optique vers l'autre sous-niveau, qui se trouve alors au fond d'une vallée de potentiel, est maximum, alors que le taux de pompage optique du fond d'une vallée vers le sommet d'une colline est nul.

La propriété précédente permet alors de comprendre très simplement le mécanisme de refroidissement « Sisyphé ». Par suite du temps fini τ_p requis par le pompage optique, l'atome en mouvement a le temps de gravir la colline de potentiel correspondant à un sous-niveau Zeeman donné et d'atteindre le sommet de cette colline où il a alors une probabilité maximum d'être transféré par pompage optique au fond de la vallée de potentiel correspondant à l'autre sous-niveau Zeeman. A partir de ce point, il doit de nouveau gravir une colline de potentiel avant de pouvoir subir un nouveau cycle de pompage optique. A chaque montée, l'énergie cinétique de l'atome est diminuée au profit de son énergie potentielle, l'accroissement d'énergie potentielle étant ensuite dissipé lors du cycle de pompage optique par le photon de fluorescence émis spontanément qui emporte une énergie supérieure à celle du photon laser absorbé (processus Raman anti-Stokes).

L'image simple précédente est confirmée par une étude quantitative du processus de refroidissement. Plusieurs paramètres importants sont calculés :

valeur minimale de U_0 pour laquelle le refroidissement Sisyphé l'emporte sur l'échauffement associé au recul suivant l'émission spontanée des photons de fluorescence, coefficient de friction à faible vitesse qui se trouve être indépendant de l'intensité lumineuse, coefficient de diffusion de l'impulsion, température T à l'état d'équilibre qui se trouve être telle que $k_B T \sim U_0$. Tous ces résultats sont établis dans la limite où les temps internes (temps de pompage optique τ_p) restent courts devant les temps externes (période d'oscillation Ω_{osc}^{-1} de l'atome au fond des puits de potentiel associés aux déplacements lumineux). Quelques indications sont données sur la manière de traiter l'autre cas extrême ($\Omega_{osc}\tau_p \gg 1$) où l'atome a le temps d'effectuer plusieurs oscillations dans un puits de potentiel correspondant à un sous-niveau avant d'être pompé optiquement vers l'autre sous-niveau.

C. C.-T.

COURS A LA SCUOLA NORMALE SUPERIORE DE PISE

Dans le cadre de la Chaire de Physique Atomique et Moléculaire du Collège de France, quatre cours de 1 h 30 ont été donnés à la Scuola Normale Superiore de Pise sur le sujet suivant : « Correlations, fluctuations and dissipation in photon-atom interactions ».

Le premier cours a passé en revue un certain nombre de propriétés statistiques de la lumière de fluorescence émise par un atome interagissant avec une onde laser intense et résonnante : répartition spectrale de la lumière de fluorescence, corrélations entre les instants de détection des photons émis, fluorescence intermittente et détection des « sauts quantiques » effectués par l'atome émetteur. Plusieurs approches possibles des problèmes ont été présentées (approche perturbative, équations de Bloch, atome habillé).

Le second cours a été consacré à l'étude du mouvement d'un atome dans une onde laser, en commençant par le cas simple où l'état fondamental de l'atome est non dégénéré. Plusieurs expériences récentes ont été décrites, qui mettent en évidence les forces qui s'exercent sur l'atome (pression de radiation, force dipolaire), et les applications de ces forces (ralentissement et arrêt d'un jet atomique, refroidissement laser, canalisation d'atomes neutres au voisinage des nœuds d'une onde stationnaire).

Le cas où l'atome possède plusieurs sous-niveaux Zeeman dans l'état fondamental a été ensuite abordé dans le troisième cours. Les nouveaux mécanismes de refroidissement laser qui apparaissent alors ont été analysés en termes de déplacements lumineux et de pompage optique. On a présenté également des expériences très récentes ayant permis de tester la validité des modèles théoriques qui ont été proposés pour rendre compte des températures

très basses observées (de l'ordre du microkelvin). Quelques applications possibles de ces atomes ultra-froids ont été également passées en revue, notamment celles qui concernent l'amélioration de la précision et de la stabilité des horloges atomiques.

Le dernier cours a été enfin consacré à l'analyse des phénomènes d'interférence quantique qui peuvent être observés sur la lumière de fluorescence. Le premier exemple étudié concerne les résonances de croisement de niveaux dans l'état fondamental qui permettent de détecter des champs magnétiques très faibles, de l'ordre du nanogauss. Une expérience très récente montrant la possibilité de détecter ces résonances par une modification des trajectoires atomiques a été également présentée (effet Hanle mécanique). Un autre exemple important est celui du phénomène appelé « piégeage cohérent de populations atomiques » découvert et observé pour la première fois à Pise en 1976. On a présenté une généralisation de ce phénomène, proposée et démontrée par notre groupe à Paris, qui permet de contrôler la vitesse d'un atome et d'abaisser sa température au-dessous de la limite correspondant à l'absorption ou à l'émission d'un seul photon.

SÉMINAIRES 1990-1991

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.

Huit séminaires ont été organisés :

C. WIEMAN (Université du Colorado et J.I.L.A., Boulder), *Atomic Physics at less than one Millikelvin.*

Ph. GRANGIER (Institut d'Optique, Orsay), *Mesure quantique non-destructive d'une intensité lumineuse à l'aide d'un système à trois niveaux.*

D. BLOCH (Laboratoire de Physique des Lasers, Université Paris Nord), *Spectroscopie sub-Doppler aux interfaces vapeur/dielectrique ; une nouvelle approche à l'analyse des interactions atome/surface.*

M. ORRIT (Centre de Physique Moléculaire Optique et Hertzienne, Université Bordeaux 1), *Détection optique de molécules individuelles en phase condensée.*

H. WOERDMAN (Huyghens Laboratory, Université de Leiden), *Optical Atoms.*

M. DEVORET (Service de Physique du Solide et Résonance Magnétique, Orme des Merisiers, C.E.N. SACLAY), *Transfert contrôlé d'électrons un par un dans un nanocircuit.*

G. MAINFRAY (Service de Physique des Atomes et des Surfaces, C.E.N. SACLAY), *Nouveaux effets physiques avec un laser Terawatt.*

G. GRYNBERG (Laboratoire de Spectroscopie Hertzienne de l'E.N.S.), *Redistribution de photons, conjugaison de phase, et instabilité optique : effets de polarisation.*

ACTIVITÉ SCIENTIFIQUE

M. Claude COHEN-TANNOUDJI effectue ses recherches au sein du Laboratoire de Spectroscopie Hertzienne 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, maître de conférences, agrégés-préparateurs), 30 chercheurs au C.N.R.S. (directeurs, et chargés de recherche), 14 chercheurs étrangers, 11 élèves de grandes écoles, 20 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 1990, ainsi que celle des thèses soutenues au cours de cette même année.

PUBLICATIONS

ARON-ROSA D.S., ARON B., GROSS M., MADEN A., *Fiabilité des excisions linéaires cornéennes au laser à excimère Argon Fluor (Bull. Soc. Ophthalmol. Fr., 90, p. 503, 1990).*

ASPECT A., VANSTEENKISTE N., KAISER R., HABERLAND H., KARRAIS M., *Preparation of a pure intense beam of metastable helium by laser cooling* (*Chemical Physics*, 145, p. 307, 1990).

SALOMON C., DALIBARD J., PHILLIPS W., CLAIRON A., GUELLATI S., *Laser cooling of cesium atoms below 3 microkelvin* (*Europhys. Lett.*, 12, p. 683, 1990).

EGGERT J.H., GOETTEL K.A., SILVERA I.F., *High-pressure dielectric catastrophe and the possibility that the hydrogen-A phase is metallic*. (*Europhys. Lett.*, 11, p. 775, 1990).

EGGERT J.H., GOETTEL K.A., SILVERA I.F., *High-pressure dielectric catastrophe and the possibility that the Hydrogen-A phase is metallic* (*Europhys. Lett.*, 12, p. 381, 1990) (addendum to EPL, 11, p. 775).

ASPECT A., KAISER R., *Linear momentum conservation in coherent population trapping: a case study for a quantum filtering process* (*Foundations of Physics*, 20, p. 1413, 1990).

ARON-ROSA D.S., MADEN A., GANEM S., ARON B., GROSS M., *Preliminary study of argon fluoride (193 nm) excimer laser trabeculectomy. Scanning electron microscopy of five months* (*J. Cataract Refract. Surg.*, 16, p. 617, 1990).

MULLIN W.J., LALOE F., RICHARDS M.G., *longitudinal relaxation times for dilute quantum gases* (*J. of Low Temp. Phys.*, 80, p. 1, 1990).

LARAT C., LEDUC M., NACHER P.J., TASTEVIN G., VERMEULEN G., *Heat conduction in spin polarized gaseous He-3 at low temperature* (*J. of Low Temp. Phys.*, 80, p. 299, 1990).

DUPONT-ROC J., HIMBERT M., PAVLOFF N., TREINER J., *Inhomogeneous liquid He-4: a density functional approach with a finite-range interaction* (*J. of Low Temp. Phys.*, 81, p. 31, 1990).

CASTIN Y., MOLMER K., *Atomic momentum diffusion in a σ_+ - σ_- laser configuration: influence of an internal sublevel structure* (*J. Phys. B*, 23, p. 4101, 1990).

ELBEL M., LARAT C., NACHER P.J., LEDUC M., *Optical pumping of helium-3 with a frequency electromodulated laser* (*J. Physique*, 51, p. 39, 1990).

LALOE F., MULLIN W.J., *on the Snider equation* (*J. Stat. Phys.*, 59, p. 725, 1990).

BILLY N., GIRARD B., GOUEDARD G., VIGUE J., *Doppler measurement of differential cross sections in crossed beam experiments: dependence of the detection sensitivity with the product velocity* (*Laser Chemistry*, 10, p. 319-332, 1990).

GUENA J., JACQUIER P., POTTIER L., *Measuring the frequency jitter and spectral width of nanosecond, single-mode laser pulses* (*Meas. Sci. Technol.*, 1, p. 1254, 1990). Design note.

BOUCHIAT M.A., GUENA J., JACQUIER P., LINTZ M., POTTIER L., *Experimental progress using nonlinear optics for precision measurements of the nuclear weak charge in the 6S-7S Cs transition (Opt. Commun., 77, p. 374-380, 1990).*

MAIA NETO P.A., DAVIDOVICH L., RAIMOND J.M., *Theory of the Non-Degenerate Two-Photon Micromaser (Phys. Rev. A, 1990).*

CANDELA D., MACALLASTAR D.R., WEI L.J., VERMEULEN G., *Quantum spin transport in very dilute He-3-He-4 mixtures (Phys. Rev. Lett., 1990).*

ROUSSEL F., CHERET M., CHEN L., BALZINGER T., SPIESS G., HARE J., GROSS M., *Observation of circular metastable doubly excited states of baryium (Phys. Rev. Lett., 65, 1990).*

BRUNE M., HAROCHE S., LEFEVRE-SEGUIN V., RAIMOND J.M., ZAGURY N., *Quantum nondemolition measurement of small photon numbers by Rydberg-atom phase-sensitive detection (Phys. Rev. Lett., 65, p. 976, 1990).*

COHEN-TANNOUJJI C., PHILLIPS W., *New mechanisms for laser cooling (Physics Today, 43, p. 33, 1990).*

REYNAUD S., *Introduction à la réduction du bruit quantique (Ann. Phys. Fr., 15, p. 63-162, 1990).*

GRYNBURG G., COURTOIS J.Y., *sur la possibilité d'observer la non-linéarité du vide par conjugaison de phase optique (C.R. Ac. Sc. Paris, 311, p. 1149, 1990).*

VALLET M., PINARD M., GRYNBURG G., *Generation of twin photon beams in a ring four-wave mixing oscillator (Europhys. Lett., 11, p. 739, 1990).*

JAEKEL M.T., REYNAUD S., *Quantum limits in interferometric measurements (Europhys. Lett., 13, p. 301-306, 1990).*

SNYDER J.J., GIACOBINO E., FABRE C., HEIDMANN A., DUCLOY M., *Sub-shot noise measurements using the beat note between quantum correlated photon beams (J. Opt. Soc. Am. B, 7, p. 2132, 1990).*

PINARD M., VALLET M., GRYNBURG G., *Etude théorique et expérimentale des propriétés gyrométriques d'un oscillateur à mélange à quatre ondes en anneau (J. Phys. France, 51, p. 2051, 1990).*

GARREAU J.C., ALLEGRINI M., JULIEN L., BIRABEN F., *High resolution spectroscopy of the hydrogen atom. I. Method and experiment (J. Physique, 51, p. 2263-2273, 1990).*

GARREAU J.C., ALLEGRINI M., JULIEN L., BIRABEN F., *High resolution spectroscopy of the hydrogen atom. II. Study of line profiles (J. Physique, 51, p. 2275-2292, 1990).*

GARREAU J.C., ALLEGRINI M., JULIEN L., BIRABEN F., *High resolution spectroscopy of the hydrogen atom. III Wavelength comparison and Rydberg constant determination (J. Physique, 51, p. 2293-2306, 1990).*

FABRE C., *Le bruit quantique dans les gyromètres optiques (La Revue Scientifique et Technique de la Défense, 7, p. 109, 1990).*

VALLET M., VERKERK P., GRYNBERG G., *Instabilities in a ring cavity filled with a Kerr medium and submitted to a bimode field (Optics Commun., 75, p. 47, 1990).*

DE ARAUJO M.T., VIANNA S. S., GRYNBERG G., *Phase-conjugation by nondegenerate four-wave mixing in sodium vapor (Optics Commun., 80, p. 79, 1990).*

GRYNBERG G., BERMAN P.R., *Pressure-induced extra resonances in nonlinear spectroscopy (Phys. Rev. A, 41, p. 2677, 1990).*

FROHLICH H., GLASS-MAUJEAN M., *Photoabsorption, photodissociation and photoionization cross sections of HCL (Phys. Rev. A, 42, p. 1396-1404, 1990).*

MERTZ J., HEIDMANN A., FABRE C., GIACOBINO E., REYNAUD S., *Observation of high intensity sub Poissonian light using an optical parametric oscillator (Phys. Rev. Lett., 64, p. 2897-2900, 1990).*

GRYNBERG G., VALLET M., PINARD M., *Redistribution of photons and frequency-mixing with cross-polarized beams in sodium (Phys. Rev. Lett., 65, p. 701, 1990).*

FABRE C., GIACOBINO E., HEIDMANN A., LUGIATO L.A., REYNAUD S., VADACCHINO M., WANG KAIGE, *Squeezing in detuned degenerate optical parametric oscillators (Quantum Optics, 2, p. 159-187, 1990).*

BIRABEN F., GARREAU J.C., JULIEN L., ALLEGRINI M., *A metastable hydrogen atomic beam : Construction and characteristics (Rev. Sci. Instrum., 61, p. 1468, 1990).*

PINARD M., VALLET M., GRYNBERG G., *Propriétés gyrométriques d'un oscillateur à mélange à quatre ondes (Rev. Sci. Tec. Def., 7, p. 77, 1990).*

ASPECT A., SALOMON C., *Atomes refroidis par laser : vers le microkelvin (Images de la Physique, 1990, courrier du CNRS).*

BILLY N., GIRARD B., GOUEDARD G., VIGUE J., *Enquête au laser sur une réaction chimique (La Recherche, 21, p. 795, 1990).*

BILLY N., GIRARD B., GOUEDARD G., VIGUE J., *Traduction en espagnol de l'article de La Recherche Enquête au laser sur une réaction chimique (Mundo Científico, 10, p. 907, 1990).*

DALIBARD J., *Cooled atoms in concert (Physics World, 3, p. 16, 1990).*

ASPECT A., GRANGIER P., *Wave-Particle Duality : a case study (Sixty years of uncertainty, 1990 : ed. by A. Miller, Plenum, 1990).*

GRYNBERG G., DUPONT-ROC J., COHEN-TANNOUDJI C., *Photon (Encyclopedia Universalis, p. 201, 1990).*

GIACOBINO E., *L'atome, Spectroscopie (Articles dans l'Encyclopédie Quillet, 1990).*

GAY J.C., DELANDE D., *Le magnétisme de l'atome d'hydrogène ? Il est chaotique !* (Bull. de la Soc. Fr. de Physique, 75, p. 3, 1990).

GIACOBINO E., FABRE C., HEIDMANN A., REYNAUD S., *La lumière comprimée* (La Recherche, 218, p. 36, 1990).

THÈSES

KAISER R., Thèse d'Université, Paris VI, 1990, *Manipulation par laser d'hélium métastable : effet Hanle mécanique, refroidissement sous le recul d'un photon*, soutenue le 11/10/90.

COURTY J.M., Thèse d'Université, Paris VI, 1990, *Les fluctuations quantiques dans l'interaction d'un système non linéaire avec un réservoir harmonique*, soutenue le 05/04/90.

DEBUISSCHERT T., Thèse de Doctorat d'Etat, Université Paris VI, 1990, *Réduction des fluctuations quantiques de la lumière à l'aide d'un oscillateur paramétrique optique*.

ACTIVITÉS DIVERSES - MISSIONS - CONFÉRENCES

Claude COHEN-TANNOUJJI

Conférences invitées à des conférences internationales

- Matter-wave interferometry workshop. Santa-Fé, U.S.A., janvier 1990.
- Research workshop on non-classical light. Rehovot, Israël, avril 1990.
- French-Israeli symposium on non-linear optics. Tiberias, Israël, avril 1990.
- Light induced kinetic effects international workshop. Isola d'Elba, Italie, mai 1990.
- Conference on precision electromagnetic measurements. Ottawa, Canada, juin 1990 (keynote speaker).
- United States-Japan seminar on quantum electronic manipulation of atoms and field. Kyoto, Japon, août 1990.
- International congress on lasers and electrooptics (Optolec). Madrid, Espagne, septembre 1990.
- Deuxième colloque sur les lasers et l'optique quantique (COLOQ 2). Lille, France, septembre 1990.

— European research conference Davos, Suisse, septembre 1990.

— Colloque international sur les aspects quantiques des communications optiques et leurs applications. Paris, France, novembre 1990.

Cours à une école d'été

Ecole internationale d'été de physique théorique Les Houches, France, juillet 1990.

7 cours de 1 h 30 sur « Atomic motion in laser light ».

Séminaires

— Kaiserslautern, Allemagne, janvier 1990.

— Bonn, Allemagne, février 1990.

— Heidelberg, Allemagne, mai 1990.

— Institut Laüe-Langevin, Grenoble, décembre 1990.

— Ecole supérieure de physique et chimie industrielles, Paris, décembre 1990.

Organisation de Colloque

Coorganisation avec Alain ASPECT du Colloque International « Les atomes ultra-froids, de nouveaux problèmes pour la physique fondamentale ».

Fondation Hugot du Collège de France, Paris, mars 1990.

Autres activités

Présidence de la Commission de Physique Atomique et Moléculaire du C.N.R.S.

Distinctions

Commandeur dans l'Ordre National du Mérite.

Alain ASPECT

Conférences invitées

— Matter-wave Interferometry Workshop, Santa-Fé, janvier 1990.

— Conférence de la Commission Internationale d'Optique, Garmish, août 1990.

— International Conference on Low Temperature Physics, Brighton, août 1990.

— European Science Foundation Research Conference, Davos, octobre 1990.

— Conférence de la Société Danoise de Physique, Copenhague, octobre 1990.

— Rencontre entre Mathématiciens et Physiciens, Strasbourg, décembre 1990.

Séminaires généraux à l'étranger

- Université de Leyde, mars 1990.
- Aarhus (Danemark), octobre 1990.
- Ecole Normale Supérieure de Pise, novembre 1990.
- Constance, décembre 1990

divers

- Coorganisateur du Colloque de la Fondation Hugot du Collège de France : « Les atomes ultra-froids : de nouveaux problèmes pour la physique fondamentale ».
- Membre du Comité National des Universités (27^e section).
- Réception du prix de la Commission Internationale d'Optique, Garmish, août 1990.
- Editeur des Annales de Physique.