

Physique atomique et moléculaire

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

Le cours de l'année 1986-1987 est le premier d'une série de deux cours consacrés à l'étude de « diverses formulations équivalentes de l'électrodynamique quantique ». Le but poursuivi est de préciser les motivations qui sont à l'origine de ces formulations, de comparer leurs avantages et inconvénients respectifs et d'analyser les éclairages physiques nouveaux qu'elles donnent sur les processus d'interaction entre matière et rayonnement.

Introduction générale

Le cours commence par des rappels généraux sur l'électrodynamique quantique. Les variables dynamiques décrivant l'état des deux systèmes en interaction, le champ électromagnétique d'une part, les particules chargées de l'autre, sont précisées. Une attention particulière est portée à l'identification des degrés de liberté réellement indépendants du champ. On montre en particulier que le champ électrique longitudinal n'est pas une variable indépendante dans la mesure où il peut être réexprimé en fonction des coordonnées des particules. L'approche lagrangienne et hamiltonienne est également présentée, ce qui permet d'introduire la notion de lagrangiens équivalents.

Le lagrangien standard

Le lagrangien le plus couramment utilisé en électrodynamique classique est le « lagrangien standard » dont l'expression est donnée ainsi que la décomposition en un lagrangien des particules, un lagrangien du rayonnement et un lagrangien d'interaction. Après avoir vérifié que les équations de Lagrange associées à un tel lagrangien coïncident bien avec les équations de Maxwell pour les champs et les équations de Newton-Lorentz pour les particules, on étudie les symétries de ce lagrangien, et notamment son invariance relativiste et son invariance de jauge.

Les difficultés du lagrangien standard tiennent au fait qu'il ne contient pas la dérivée temporelle du potentiel scalaire. Le moment conjugué du potentiel scalaire est donc nul, ce qui rend impossible l'application de la procédure de quantification canonique consistant à associer au couple formé par une variable dynamique et son moment conjugué deux opérateurs dont le commutateur vaut $i\hbar$. On expose alors deux solutions possibles à une telle difficulté.

Electrodynamique quantique en jauge de Coulomb

La première solution consiste à éliminer le potentiel scalaire U du lagrangien au moyen de l'équation de Lagrange relative à U , équation qui permet d'exprimer U en fonction des autres variables dynamiques du champ et des particules. On trouve alors que, dans le nouveau lagrangien ainsi obtenu, le potentiel vecteur longitudinal \vec{A}_{\parallel} n'apparaît que dans une dérivée totale et peut donc être choisi arbitrairement sans que la dynamique du système global ne soit changée. Le choix le plus simple consiste à prendre \vec{A}_{\parallel} nul, c'est-à-dire à choisir la jauge de Coulomb. Un autre avantage de ce choix est de faire apparaître l'interaction de Coulomb entre particules, qui est prépondérante à basse énergie, dans le lagrangien des particules.

A partir du lagrangien en jauge de Coulomb, il est facile d'obtenir les moments conjugués des diverses variables du champ et des particules, puis d'en déduire l'expression de l'hamiltonien du système global ainsi que celle des diverses grandeurs physiques importantes. La forme simple des équations de Hamilton-Jacobi satisfaites par les coordonnées du champ et leurs moments conjugués suggère également d'introduire des combinaisons linéaires de ces grandeurs qui possèdent la propriété importante d'évoluer indépendamment les unes des autres en l'absence de sources. Ce sont les variables normales du champ qui sont associées aux modes normaux de vibration du champ libre et qui deviennent, lors de la quantification canonique de la théorie, les opérateurs de création et d'annihilation de photons.

Formulation covariante

Une autre solution pour résoudre les difficultés liées au lagrangien standard consiste à choisir un nouveau lagrangien, dans lequel apparaissent toutes les dérivées temporelles des variables du champ, de sorte que toutes ces variables possèdent chacune un moment conjugué. Ce nouveau lagrangien n'est cependant pas équivalent au lagrangien standard et il faut donc imposer une condition supplémentaire pour sélectionner parmi toutes les solutions possibles des nouvelles équations du mouvement celles qui satisfont aussi aux équations de Maxwell. Une telle démarche, qui est utilisée dans les formulations covariantes de l'électrodynamique quantique, est exposée tout d'abord dans le cas plus simple du champ libre ou du champ couplé à des sources extérieures.

On introduit pour cela le lagrangien de Fermi, qui conduit bien aux équations de Maxwell lorsque la condition supplémentaire de Lorentz est imposée et à partir duquel il est possible de calculer les moments conjugués des potentiels, l'hamiltonien et les variables normales. La quantification canonique de la théorie ainsi élaborée permet bien d'établir des relations de commutation covariantes pour les opérateurs associés aux potentiels. Des difficultés apparaissent cependant dans la construction de l'espace des états quantiques du champ. Les relations de commutation covariantes conduisent en effet à des états de photons scalaires de norme négative, ce qui est incompatible avec l'interprétation probabiliste de la mécanique quantique.

Une solution possible à la difficulté précédente est alors exposée. Elle consiste à introduire une deuxième métrique (indéfinie) dans l'espace des états quantiques et à renoncer à l'hermité (au sens habituel) du potentiel scalaire, ce qui n'est pas grave dans la mesure où ce sont les champs électrique et magnétique, et non les potentiels, qui sont des grandeurs mesurables. On montre alors que, pour toutes les grandeurs véritablement physiques et pour tous les états physiques, sélectionnés au moyen de la condition supplémentaire de Lorentz, l'interprétation probabiliste habituelle de la mécanique quantique demeure valable.

Toute la démarche précédente est illustrée sur un exemple très simple, celui du champ quantique couplé à des charges fixes. Le déplacement de l'état fondamental du champ est calculé, tout d'abord perturbativement puis de manière exacte, ce qui permet de retrouver l'interaction de Coulomb entre deux particules et de l'interpréter comme étant due à un échange de photons scalaires entre les deux particules.

Transformation unitaire associée à un changement de lagrangien

Tout le reste du cours de cette année est consacré à l'étude de formulations équivalentes de l'électrodynamique quantique construites à partir de lagrangiens qui diffèrent du lagrangien standard en jauge de Coulomb par la dérivée totale d'une fonction des coordonnées généralisées du système champ + particules. Le problème général de la correspondance entre deux descriptions quantiques construites à partir de deux lagrangiens différant par une dérivée totale est donc analysé en premier lieu sur le cas simple d'un système à un seul degré de liberté. On montre que les deux descriptions quantiques se déduisent l'une de l'autre par une transformation unitaire. L'accent est mis sur le fait que la même grandeur physique n'est pas représentée par le même opérateur mathématique dans les deux points de vue. Réciproquement, le même opérateur mathématique n'a pas le même sens physique dans un point de vue et dans l'autre. L'équivalence des prédictions physiques des deux formulations est démontrée de manière générale.

Transformation de Göppert-Mayer pour des particules dans un champ extérieur

Le premier exemple choisi pour illustrer les considérations précédentes concerne des systèmes globalement neutres de particules chargées localisées autour d'un point et interagissant avec des champs électromagnétiques extérieurs de grande longueur d'onde. Une telle situation est fréquemment rencontrée en physique atomique et moléculaire puisque les dimensions des atomes et des molécules sont en général petites devant les longueurs d'onde des rayonnements (optiques ou microondes) utilisés dans les expériences. Dans le lagrangien standard, il est donc légitime de négliger la variation spatiale des champs extérieurs sur l'étendue du système des particules (approximation des grandes longueurs d'onde). L'interaction entre les particules et le rayonnement ne fait plus alors intervenir que le moment dipolaire électrique \vec{d} du système de charges, le lagrangien d'interaction s'écrivant $\vec{d} \cdot \vec{A}_e$ (\vec{O} , t), où \vec{A}_e est le potentiel vecteur du champ extérieur évalué au centre \vec{O} du système de charges.

La transformation de Göppert-Mayer consiste à ajouter au lagrangien standard la dérivée totale de la fonction $-\vec{d} \cdot \vec{A}_e$ (\vec{O} , t), ce qui conduit à un nouveau lagrangien d'interaction $\vec{d} \cdot \vec{E}_e$ (\vec{O} , t) décrivant le couplage du moment dipolaire \vec{d} avec le champ électrique \vec{E}_e du rayonnement. On étudie également comment la transformation de Göppert-Mayer change l'hamiltonien d'interaction et remplace l'hamiltonien habituel en « $\vec{A} \cdot \vec{p}$ » (couplage entre le potentiel vecteur \vec{A} et l'impulsion \vec{p} des particules) par un nouvel hamiltonien en « $\vec{E} \cdot \vec{r}$ » (couplage entre le champ électrique \vec{E} et la position \vec{r} des particules).

Equivalence des points de vue $\vec{A} \cdot \vec{p}$ et $\vec{E} \cdot \vec{r}$. Illustration sur des processus à un ou deux photons

Pour démontrer de manière concrète l'équivalence entre la formulation standard habituelle et celle associée à la transformation de Göppert-Mayer, les amplitudes de transition sont calculées dans un point de vue puis dans l'autre pour des processus d'absorption résonnante à un ou deux photons. L'égalité entre les deux amplitudes est vérifiée par un calcul direct des éléments de matrice de l'opérateur d'évolution.

Les avantages du nouveau point de vue sont illustrés sur l'exemple important de la transition à deux photons $1s \rightarrow 2s$ de l'atome d'hydrogène. L'amplitude de transition apparaît dans les deux points de vue comme une somme de contributions relatives à chaque état intermédiaire. Bien que les sommes des deux séries soient identiques, on montre que la série obtenue dans le point de vue $\vec{E} \cdot \vec{r}$ converge beaucoup plus vite et permet d'obtenir un résultat plus précis si on se limite à un petit nombre d'états intermédiaires.

La discussion précédente est enfin étendue à des processus non résonnants. On montre que les processus non résonnants à un photon se ramènent

souvent à des processus résonnants à deux photons, ce qui permet de résoudre plusieurs paradoxes et de corriger plusieurs erreurs rencontrées dans la littérature au sujet de l'équivalence des deux points de vue pour le calcul des formes de raie. La discussion est illustrée sur l'exemple de la transition $2s - 2p$ de l'atome d'hydrogène (transition de Lamb).

La transformation de Power-Zienau-Woolley

La transformation de Göppert-Mayer est limitée à l'ordre le plus bas en a_0/λ (où a_0 caractérise les dimensions atomiques et λ la longueur d'onde du rayonnement) et est relative à des rayonnements extérieurs dont la dépendance temporelle est donnée. Ces deux restrictions sont levées par la transformation de Power-Zienau-Woolley qui permet d'obtenir un lagrangien d'interaction contenant le développement multipolaire complet de l'interaction entre un atome (ou une molécule) et le rayonnement, considéré comme un système ayant sa dynamique propre.

On montre tout d'abord qu'un système de charges localisées autour d'un point peut être décrit par des densités de polarisation et de magnétisation auxquelles sont associés des courants de polarisation et de magnétisation. On introduit également l'induction électrique qui est un champ transverse, coïncidant (à un facteur multiplicatif près) avec le champ électrique total en dehors du système de charges supposé globalement neutre.

La transformation de Power-Zienau-Woolley consiste à ajouter au lagrangien standard en jauge de Coulomb la dérivée totale de la fonction $-\int d^3r \vec{P}(\vec{r}) \cdot \vec{A}_\perp(\vec{r})$, où $\vec{P}(\vec{r})$ est la densité de polarisation et $\vec{A}_\perp(\vec{r})$ le potentiel vecteur transverse. Elle conduit à un nouveau lagrangien d'interaction faisant intervenir le couplage de la densité de polarisation $\vec{P}(\vec{r})$ au champ électrique $\vec{E}_\perp(\vec{r})$ et celui de la densité de magnétisation $\vec{M}(\vec{r})$ au champ magnétique $\vec{B}(\vec{r})$. Le développement multipolaire de l'interaction en découle immédiatement, de même que le calcul des nouveaux moments conjugués et du nouvel hamiltonien.

Les avantages du nouveau point de vue sont discutés en détail. Ils tiennent au fait que le nouveau moment conjugué du potentiel vecteur transverse est l'induction électrique. Le nouvel hamiltonien d'interaction ne fait donc plus intervenir que des champs transverses purement retardés en dehors des systèmes de charges, comme l'induction électrique ou le champ magnétique. Il en résulte des grandes simplifications pour le calcul des interactions électromagnétiques entre atomes neutres.

SÉMINAIRES 1986-1987

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 :

Neuf séminaires ont été organisés :

H. METCALF (State University of New York, Stony Brook et Laboratoire de Spectroscopie Hertzienne de l'ENS), *Magnetic trapping of neutral atoms*.

G. DORTHE (Laboratoire de Photophysique et Photochimie Moléculaire, Université de Bordeaux I), *Etude des collisions réactives au moyen de faisceaux moléculaires croisés, supersoniques et pulsés*.

S. HAROCHE (Laboratoire de Spectroscopie Hertzienne de l'ENS et Yale University), *Suppression de l'émission spontanée aux fréquences optiques par confinement d'atomes excités dans une cavité microscopique* ».

G. GRYNBERG (Laboratoire de Spectroscopie Hertzienne de l'ENS), *Amplification et oscillation induites par émission de paires de photons dans le sodium*.

R. BONIFACIO (Université de Milan), *Collective Compton Scattering : The Free Electron Laser*.

R. BLATT (Université de Hamburg), *Quantum Jumps — Looking for Dark Periods in the Fluorescence Light*.

S. LIBERMAN (Laboratoire Aimé Cotton - Orsay), *Atomes de Rydberg en champs intenses*.

L. DAVIDOVICH (Université P.U.C. Rio de Janeiro et Laboratoire de Spectroscopie Hertzienne de l'ENS), *Micromaser à 2 photons*.

C. SALOMON (Laboratoire de Spectroscopie Hertzienne de l'ENS), *Refroidissement et canalisation d'atomes dans une onde laser stationnaire*.

ACTIVITÉ SCIENTIFIQUE

M. Claude COHEN-TANNOUJJI effectue ses recherches au sein du Laboratoire de Spectroscopie Hertzienne de l'École Normale Supérieure. Il y dirige les travaux d'une équipe de chercheurs et participe, sur le plan théorique, à quelques-uns des autres projets en cours du laboratoire.

Ce laboratoire, qui est associé au C.N.R.S., est implanté géographiquement, d'une part au Laboratoire de Physique de l'École 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 8 enseignants-chercheurs (professeurs, maître de conférences, maître-assistants, agrégés-préparateurs), 34 chercheurs au C.R.S. (directeurs, maîtres, chargés et attachés de recherche), 5 chercheurs étrangers, 9 élèves de grandes écoles, 23 techniciens et administratifs.

Le laboratoire est constitué d'une dizaine d'équipes de recherches, comprenant 3 à 7 chercheurs, et étudiant divers problèmes de physique atomique et moléculaire centrés autour des deux thèmes généraux suivants :

- développement des méthodes optiques de la physique atomique et moléculaire,
- diffusion de la lumière laser par un fluide.

Un rapport d'activité scientifique est rédigé tous les 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 1986, ainsi que celles des thèses (de 3^e cycle et d'Etat) soutenues au cours de cette même année.

PUBLICATIONS 1986

B. GIRARD, J. VIGUÉ, *A systematic error of Michelson's type lambdameter* (*Rev. Phys. Appl.*, 21, 463, 1986).

N. BILLY, B. GIRARD, G. GOUÉDARD, J. VIGUÉ, *Experimental study of the reactive collision $I_2 + F \rightarrow IF + I$* , p. 107 du livre du Colloque International du CNRS, *Progrès récents en dynamique réactionnelle* (Editions du CNRS, 1986).

J. VIGUÉ, *Possibility of applying laser cooling to the observation of collective quantum effects* (*Phys. Rev.*, A 34, 4476, 1986).

U. BUCK, J. KESPER, R.E. MILLER, A. RUDOLPH, J. VIGUÉ, *Laser bolometric detection of long lived and predissociating electronically excited states* (*Chem. Phys. Lett.* 125, 257, 1986).

M. GLASS-MAUJEAN, *Photodissociation of vibrationally excited H_2 by absorption into the continua of B, C and B' systems* (*Phys. Rev.*, A 3, 342, 1986).

M. GLASS-MAUJEAN, P.M. GUYON, J. BRETON, *Photodissociation into $H(1S) + H(n = 2)$ atoms : total and partial dissociation cross-section and relative importance of dissociation and predissociation* (*Phys. Rev.*, A 33, 346, 1986).

M. GLASS-MAUJEAN, *Photodissociation of doubly excited states of H₂, HD and D₂* (*J. Chem. Phys.*, 85, 4830, 1986).

J. LIANG, M. GROSS, P. GOY, S. HAROCHE, *Circular Rydberg-state spectroscopy* (*Phys. Rev.*, A 33, 4437, 1986).

P. GOY, J. LIANG, M. GROSS, S. HAROCHE, *Quantum defects and specific isotopic shift measurements in ns and np highly excited states of lithium. Exchange effects between Rydberg and core electrons* (*Phys. Rev.*, A 34, 2889, 1986).

M. GROSS, J. LIANG, *Is a circular Rydberg atom stable in a vanishing electric field?* (*Phys. Rev. Lett.*, 57, 3160, 1986).

P. GOY, M. GROSS, J. LIANG, S. HAROCHE, *Proposition d'une métrologie de la constante de Rydberg par spectroscopie submillimétrique d'états de Rydberg circulaires*, (*Bulletin BNM*, n° 63-64, 90, 1986).

P. GOY, M. GROSS, C. MAUC, *Un banc millimétrique de 27 à 110 Ghz complet, simple et économique* (*L'Onde Electrique*, 66, 121, 1986).

J. LIANG, C. FABRE, *Modification of the velocity of atoms submitted to a resonant multimode laser : an experimental study* (*Opt. Commun.*, 59, 31, 1986).

A. ANDERSON, S. HAROCHE, E.A. HINDS, W. JHE, D. MESCHÉDE, L. MOI, *Reflection of thermal Cs atoms grazing a polished glass surface* (*Phys. Rev.*, A 34, 3513, 1986).

S. HAROCHE, *Rydberg atoms and radiation*, *Proceedings of Fritz Haber Symposium on Methods of Laser Spectroscopy* (Y. Prior ed., Plenum Press, 1986).

M. GROSS, *Superradiance theory and X-ray lasers extending the semiclassical model to realistic situations* (*J. Physique, Colloque C6*, 47, 223, 1986).

D.S. ARON-ROSA, J.L. BOULNOY, F. CARRÉ, J. DELACOUR, M. GROSS, M. LACOUR, J.C. OLIVO, J.C. TIMSIT, *Excimer laser surgery of the cornea : Qualitative and quantitative aspects of photoablation according to the energy density* (*J. Cataract Refract. Surg.*, 12, 27, 1986).

M.A. BOUCHIAT, J. GUÉNA, L. POTTIER, *Atomic parity violation measurements in the highly forbidden $6S_{1/2} - 7S_{1/2}$ caesium transition. II. Analysis and control of systematic effects* (*J. Phys.*, 47, 1175, 1986).

M.A. BOUCHIAT, L. POTTIER, *Experiments to test the conservation of parity in the atom rubrique Parity (quantum mechanics) dans le McGraw Hill Yearbook of Science and Technology*, Mc-Graw Hill, 1986.

P. JACQUIER, M. BROYER, L. POTTIER, M.A. BOUCHIAT, *Measurement of the forbidden $6S-8S M_1$ transition in caesium with an electric field* (*J. Phys.*, 47, 1327, 1986).

M.A. BOUCHIAT, J. GUÉNA, L. POTTIER, L. HUNTER, *Atomic parity violation measurements in the highly forbidden $6S_{1/2} - 7S_{1/2}$ cesium transition. III. Data acquisition and processing. Results and implications* (*J. Phys.*, 47, 1709, 1986).

M.A. BOUCHIAT, L. POTTIER, *Optical experiments and weak interactions* (*Science*, 234, 1203, 1986).

L.D. SCHEARER, M. LEDUC, D. VIVIEN, A.M. LEJUS, J. THERY, *LNA : a new cw Nd laser tunable around 1.05 and 1.08 μm* (*IEEE J. of Quant. Electr.*, QE22, 713, 1986).

L.D. SCHEARER, M. LEDUC, *Tuning characteristics and new laser lines in a Nd : YAP cw laser* (*IEEE, J. of Quant. Electr.*, QE22, 756, 1986).

D.S. BETTS, M. LEDUC, *L'hélium polarisé : méthodes et applications* (*Ann. Phys.*, Paris, 11, 267, 1986).

C. MAGANZA, R. CAUSSÉ, F. LALOË, *Bifurcations, Period Doublings and Chaos in Clarinetlike Systems* (*Europhys. Lett.*, 1, 295, 1986).

F. LALOË, *Le maser à hydrogène : une stabilité qui vient du froid* (*La Recherche*, 17, 1128, 1986).

C. DÉPOLLIÉ, J. KERGOMARD, F. LALOË, *Localisation d'Anderson des ondes dans les réseaux acoustiques unidimensionnels aléatoires* (*Ann. Phys.*, Paris, 11, 457, 1986).

F. LALOË, *Les surprenantes prédictions de la mécanique quantique* (*La Recherche*, 17, 1358, 1986).

J.P. BOUCHAUD, A. GEORGES, D. HANSEL, P. LE DOUSSAL, J.M. MAILLARD, *Rigorous bounds and the replica method for products of random matrices* (*J. Phys. A : Math. Gen.*, 19, L1145, 1986).

J.P. BOUCHAUD, P. LE DOUSSAL, *Ultrametricity transition in the graph colouring problem* (*Europhys. Lett.*, 1, 91, 1986).

J.P. BOUCHAUD, P. LE DOUSSAL, *Intermittency in random optical layers at total reflection* (*J. Phys. A : Math. Gen.*, 19, 797, 1986).

J.P. BOUCHAUD, P. LE DOUSSAL, *Critical behaviour and intermittency in Sinai's billiard* (*Physica*, 20 D, 335, 1986).

J.P. BOUCHAUD, C. LHUILLIER, *Convective instabilities in spin-polarized gases* (*Phys. Lett.*, A 115, 16, 1986).

A. GHAZALI, P. LALLEMAND, H.T. DIEP, *Spin glass transition in Heisenberg spin systems with $\pm J$ random bonds* (*Physica*, 134A, 628, 1986).

H.T. DIEP, A. GHAZALI, B. BERGE, P. LALLEMAND, *Phase diagrams in FCC binary alloys : frustration effects* (*Europhys. Lett.*, 2, 603, 1986).

B. BERGE, H.T. DIEP, A. GHAZALI, P. LALLEMAND, *Phase transition in two-dimensional uniformly frustrated XY spin systems* (*Phys. Rev.*, B34, 3177, 1986).

D. d'HUMIÈRES, P. LALLEMAND, U. FRISCH, *Lattice gas models for 3D hydrodynamics* (*Europhys. Lett.*, 2, 291, 1986).

D. d'HUMIÈRES, P. LALLEMAND, *Ecoulement d'un gaz sur réseau dans un canal bidimensionnel : développement du profil de Poiseuille* (*C.R. Acad. Sci.*, Paris, II 302, 983, 1986).

D. d'HUMIÈRES, P. LALLEMAND, Y. POMEAU, *Simulation de l'hydrodynamique bidimensionnelle à l'aide d'un gaz sur réseau* (*Bull. Soc. Franç. de Physique*, 60, 14, 1986).

D. d'HUMIÈRES, Y. POMEAU, P. LALLEMAND, *Two dimensional hydrodynamics calculations with a lattice gas* (in *Innovative Numerical Methods in Engineering*, Springer Verlag, 241, 1986).

D. d'HUMIÈRES, P. LALLEMAND, *Lattice gas automata for hydrodynamics* (*Physica*, 140D, 327, 1986).

D. d'HUMIÈRES, P. LALLEMAND, *2D and 3D hydrodynamics on lattice gases* (*Frühjahrstagung der Schweiz Physikalischen Gesellschaft*, 59, 1231, 1986).

P. CLAVIN, D. d'HUMIÈRES, P. LALLEMAND, Y. POMEAU, *Automates cellulaires pour les problèmes à frontières libres en hydrodynamique à deux et trois dimensions* (*C.R. Acad. Sci.*, Paris, II 303, 1169, 1986).

F. BIRABEN, J.C. GARREAU, L. JULIEN, *Determination of the Rydberg constant by Doppler-free two-photon spectroscopy of hydrogen Rydberg states* (*Europhys. Lett.*, 2, 925, 1986).

F. BIRABEN, L. JULIEN, *Spectroscopie à deux photons de l'atome d'hydrogène* (*Bull. Soc. Fr. de Phys.*, 59, 15, 1986).

L. JULIEN, F. BIRABEN, B. CAGNAC, *L'atome d'hydrogène permettra-t-il le raccordement des fréquences optiques aux fréquences microondes ?* (*Bull. du BNM*, 66, 31, 1986).

D. LANGEVIN, *Microemulsions and liquid crystals* (*Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 138, 259, 1986).

D. GUEST, D. LANGEVIN, *Light scattering study of a multiphase microemulsion system* (*J. Coll. Int. Sci.*, 112, 208, 1986).

D. LANGEVIN, *Recent advances in the physics of microemulsions* (*Physica Scripta*, T13, 252, 1986).

D. LANGEVIN, *Light scattering by liquid surfaces covered with surfactant films* (*Coll. and Surf.*, 21, 313, 1986).

D. LANGEVIN, D. GUEST, J. MEUNIER, *Correlation between interfacial tensions and microemulsion structure in Winsor equilibria. Role of the surfactant film curvature properties* (*Coll. and Surf.*, 19, 159, 1986).

P. GUÉRING, A.M. CAZABAT, M. PAILLETTE, *Droplets clustering in microemulsions : an electrical birefringence study* (*Europhys. Lett.*, 2, 953, 1986).

G. GRYNBERG, M. PINARD, *Radiative relaxation-induced extra resonances in multiwave mixing* (*Europhys. Lett.*, 1, 129, 1986).

G. GRYNBERG, M. PINARD, P. VERKERK, *Saturation in degenerate four-wave mixing : theory for a two-level atom* (*J. Phys.*, 47, 617, 1986).

E. LE BIHAN, M. PINARD, G. GRYNBERG, *Self-oscillation in a cavity bounded by a sodium vapor phase conjugate mirror pumped by two cross-polarized beams* (*Opt. Lett.*, 11, 159, 1986).

G. GRYNBERG, E. LE BIHAN, M. PINARD, *Two-wave mixing in sodium vapor* (*J. Phys.*, 47, 1321, 1986).

P. VERKERK, M. PINARD, G. GRYNBERG, *Backward saturation in four-wave mixing in neon : case of parallel pump polarizations* (*Phys. Rev.*, A 34, 4008, 1986).

E. GIACOBINO, P. BERMAN, M. PINARD, G. GRYNBERG, *Collisionally-induced phenomena in non-linear optics* (*J.O.S.A.*, B 3, 46, 1986).

M. PINARD, E. LE BIHAN, D. GRAND-CLÉMENT, G. GRYNBERG, *Self-oscillation in a cavity using sodium vapor phase conjugate mirror* (*J.O.S.A.*, B 3, 202, 1986).

G. GRYNBERG, *Processus induits par collision en optique non linéaire* (*Ann. Phys.*, Paris, C 3, 125, 1986).

P. VERKERK, D. GRAND-CLÉMENT, F. TRÉHIN, G. GRYNBERG, *Spectral analysis of an injection-locked flash-lamp pumped dye-laser of ultranarrow linewidth* (*Opt. Commun.*, 58, 413, 1986).

M. PINARD, D. GRAND-CLÉMENT, G. GRYNBERG, *Continuous-wave self-oscillation using pair productions of photons in four-wave mixing in sodium* (*Europhys. Lett.*, 2, 755, 1986).

D. DELANDE, J.C. GAY, *The Hydrogen atom in a magnetic field. Spectrum from the Coulomb dynamical group approach* (*J. Phys.*, B 19, L-173, 1986).

D. DELANDE, A. STEIZ, J.C. GAY, *Chaos, order and symmetries in atomic systems. The diamagnetic Kepler problem* (*Proc. OJI Intern. Seminar*, S.S. Kano and M. Matsuzawa eds, Tokyo, 1986).

D. DELANDE, J.C. GAY, *Quantum chaos and statistical properties of energy levels. Numerical study of the Hydrogen atom in a magnetic field* (*Phys. Rev.*, 57, 2006, 1986).

D. DELANDE, J.C. GAY, *The quantum analog of chaos in the diamagnetic Kepler problem* (*Comments At. Molec. Phys.*, 19, 35, 1986).

S. REYNAUD, *Comprimer les fluctuations du vide pour réduire le bruit de photons* (*Bulletin SFP*, septembre 1986).

J. DALIBARD, *Atomic Brownian motion in a light wave* (*Physica Scripta*, T12, 28, 1986).

C. COHEN-TANNOUJJI, *Fluctuations in radiative processes (Physica Scripta, T12, 19, 1986).*

A. ASPECT, J. DALIBARD, A. HEIDMANN, C. SALOMON, C. COHEN-TANNOUJJI, *Cooling atoms with stimulated emission (Phys. Rev. Lett., 57, 1688, 1986).*

C. COHEN-TANNOUJJI, J. DALIBARD, *Single atom laser spectroscopy. Looking for dark periods in the fluorescence light (Europhys. Lett., 1, 441, 1986).*

J.L. HALL, M. ZHU, C. SALOMON, *Measurement of the axial velocity distribution of laser cooled atomic beam (JOSA, A 13, 1986).*

P. GRANGIER, G. ROGER, A. ASPECT, A. HEIDMANN, S. REYNAUD, *Observation of photon antibunching in phase-matched multiatom resonance fluorescence (Phys. Rev. Lett., 57, 687, 1986).*

THÈSES

E. LE BIHAN, Thèse de 3^e cycle, Paris VI, avril 1986, *Mélange à deux ondes et mélange à quatre ondes dans la vapeur de sodium : effets d'auto-oscillation.*

J. LIANG, thèse de doctorat de l'Université Paris VI, juin 1986, *Effet Stark des états de Rydberg des alcalins. Application à la préparation et à l'étude des atomes de Rydberg circulaires.*

J. DALIBARD, thèse de Doctorat d'Etat, Paris VI, novembre 1986, *Le rôle des fluctuations dans la dynamique d'un atome couplé au champ électromagnétique.*

ACTIVITÉS DIVERSES MISSIONS CONFÉRENCES

Conférences invitées

Ecole d'été sur *Laser cooling and trapping*, Helsinki (Finlande), juillet 1986, 3 conférences sur *Theory of radiative forces.*

18^e conférence de l'*European Group for Atomic Spectroscopy*, Marburg (RFA), juillet 1986, 1 conférence plénière sur *Dynamics of an atom in laser beams.*

10^e conférence internationale sur *Atomics Physics*, Tokyo (Japon), août 1986, 1 conférence plénière sur *Laser-atom interactions. Recent theoretical developments.*

International Laser Science Conference, Seattle (USA), octobre 1986, 1 conférence invitée sur *Atoms in resonant laser beams : the dressed atom approach.*

Journées nationales de l'Union des Physiciens, Reims (France), octobre 1986, 1 conférence plénière sur *Développements récents en physique atomique*.

Séminaires

— *Le refroidissement laser*, séminaire général du laboratoire de Physique de l'ENS (Paris), mars 1986.

Conférence présentée au CAES, Collège de France (Paris), décembre 1986 :

— *Atomic motion in laser light*, Kyoto (Japon), août 1986, Pise (Italie), octobre 1986, Milan (Italie), octobre 1986.

Single atom laser spectroscopy and quantum jumps, Pise (Italie), octobre 1986, Milan (Italie), octobre 1986.

Atom in a light feam or im the vacurum of photom, Pise (Italie), octobre 1986.

Présidence de la journée DRET sur « les Horloges du Futur », Paris, mars 1986.

Dinstinction : « Fellow » de l'« American Physical Society ».
Lauréat du Prix des Trois Physiciens.