

## Physique atomique et moléculaire

M. Claude COHEN-TANNOUJDI, professeur

Au cours des dernières années, plusieurs physiciens ont essayé de construire des théories « semiclassiques » des interactions entre la matière et le rayonnement. Dans ces théories, l'évolution des corpuscules matériels, comme l'électron ou le proton, est régie par les équations de la mécanique quantique (équation de Schrödinger). Par contre, le rayonnement est traité comme une onde classique obéissant aux équations de Maxwell. Cette approche « mixte », quantique pour la matière, classique pour le rayonnement, s'est révélée très fructueuse : elle permet d'interpréter simplement et quantitativement de nombreux phénomènes comme l'effet photoélectrique, l'absorption et l'émission induite de rayonnement, l'effet laser, les non-linéarités optiques... sans qu'il soit nécessaire de faire intervenir le concept de photon, associé à la quantification du rayonnement. Certains physiciens sont même allés plus loin et ont prétendu pouvoir expliquer ainsi l'émission spontanée et les déplacements radiatifs (« déplacement de Lamb ») considérés habituellement comme étroitement liés à l'interaction de l'électron avec les fluctuations du vide du rayonnement quantique. Il a semblé intéressant de consacrer le cours de cette année à la discussion de ces divers problèmes. Le but fixé était d'essayer de dégager, dans les processus de détection et d'émission de rayonnement par des atomes, les aspects qui nécessitent réellement une quantification du rayonnement.

La première partie du cours a porté sur l'étude des signaux de photo-détection qui peuvent être observés à la sortie d'un photomultiplicateur, lorsque ce dernier est exposé à un rayonnement incident traité, soit classiquement (théorie « sans photons »), soit quantiquement (théorie « avec photons »). Plusieurs types de signaux ont été ainsi calculés : probabilité de détecter un photoélectron entre les instants  $t$  et  $t + dt$ , probabilité de détecter un photoélectron entre  $t_1$  et  $t_1 + dt_1$  et un autre photoélectron entre  $t_2$  et  $t_2 + dt_2$ , probabilité de détecter  $n$  photoélectrons dans un intervalle  $T$ ... Les expressions obtenues pour ces signaux font intervenir des fonctions de corrélation, de complexité croissante, du rayonnement. Les analogies et différences

entre fonctions de corrélation classiques et quantiques ont été analysées en détail, de manière à pouvoir identifier ensuite les effets spécifiquement quantiques apparaissant au niveau de la détection. Ainsi, des inégalités spécifiques des rayonnements classiques ont été établies. Toute expérience conduisant à des signaux qui violent ces inégalités peut donc être considérée comme apportant une preuve du caractère quantique du rayonnement.

Un premier exemple d'effet intéressant à cet égard est l'effet de groupement des photoélectrons, découvert par Hanbury Brown et Twiss il y a une vingtaine d'années. La théorie semiclassical prévoit en effet très simplement que, lorsqu'un rayonnement fluctuant incident donne naissance à un photoélectron à l'instant  $t$ , la probabilité d'observer un deuxième photoélectron un intervalle de temps  $\tau$  après est plus grande pour  $\tau$  court que pour  $\tau$  long. En d'autres termes, la distribution des intervalles de temps  $\tau$  entre deux photoélectrons successifs a un maximum en  $\tau = 0$ . Mathématiquement, une telle propriété résulte du fait que la moyenne du carré de l'intensité du rayonnement classique est supérieure (ou égale) au carré de l'intensité moyenne. Après un rappel des expériences de Hanbury Brown et Twiss et de leurs principales applications, on a alors décrit deux expériences beaucoup plus récentes conduisant à une violation des inégalités semiclassicals et mettant en évidence des « dégroupements » de photoélectrons. L'analyse détaillée de ces expériences montre que les effets quantiques ainsi mis en évidence ne peuvent se manifester clairement qu'avec des sources constituées d'un petit nombre d'atomes émetteurs. Ainsi, l'une des deux expériences, réalisées en 1977 par Kimble, Dagenais et Mandel, étudie la lumière de fluorescence émise par un jet atomique irradié par un faisceau laser résonnant, la zone observée étant suffisamment petite pour ne contenir qu'un ou deux atomes émetteurs à chaque instant. Un calcul quantique détaillé de l'effet de dégroupement a été présenté. L'interprétation physique qui en résulte est très simple. La détection du premier photon constitue une signature d'un « saut quantique » de l'atome du niveau supérieur au niveau inférieur. Immédiatement après la première détection, l'atome est certainement dans le niveau inférieur et ne peut donc émettre un deuxième photon. Il faut attendre un certain temps pour que le faisceau laser le réexcite. On comprend ainsi pourquoi les photoélectrons sont « dégroupés ».

La conclusion qui se dégage des expériences précédentes est qu'il existe donc des rayonnements, en particulier ceux émis par un seul atome, qui ne peuvent être décrits classiquement. Le débat pourrait donc sembler clos, et la nécessité d'un traitement quantique démontrée. En fait, la situation est plus complexe. Les partisans des théories semiclassicals avancent en effet l'argument suivant : les effets quantiques révélés par les expériences mentionnées plus haut ne font que refléter la nature quantique des atomes émetteurs ; le champ rayonné par un dipôle atomique, étant proportionnel à ce

dipôle, est un opérateur atomique. En termes plus mathématiques, les partisans des théories semiclassicals prétendent pouvoir formuler une théorie n'utilisant que l'espace de Hilbert de l'atome, évitant ainsi de quantifier le champ et d'introduire l'espace de Fock correspondant, avec toutes les difficultés conceptuelles liées aux fluctuations du vide. C'est à la discussion de ce problème qu'a été consacrée la dernière partie du cours, le but fixé étant de répondre à la question suivante : peut-on comprendre l'émission de rayonnement par un atome isolé sans faire appel à la quantification du rayonnement et aux fluctuations du vide ?

Partant des équations de Heisenberg couplées de l'atome et du rayonnement, on a commencé par calculer le champ créé par un dipôle atomique en tout point de l'espace, y compris à son propre emplacement. Le résultat obtenu est très simple. Le champ total  $\vec{E}$  est la somme de deux termes. Le premier,  $\vec{E}_0$ , est indépendant du dipôle émetteur : on peut l'appeler le « champ du vide » (c'est la solution des équations de Maxwell sans termes sources). Le second,  $\vec{E}_s$ , est proportionnel au dipôle émetteur (et à ses dérivées successives) : on peut l'appeler le « champ des sources », car c'est le champ rayonné par le dipôle atomique. L'interaction du dipôle émetteur avec son propre champ, c'est-à-dire avec le champ qu'il crée à son propre emplacement, n'est autre que la « réaction de rayonnement ». La théorie semiclassical, dite « champ des sources » (« source field »), traite le champ des sources  $\vec{E}_s$  comme un opérateur purement atomique, le champ du vide  $\vec{E}_0$  comme un champ classique (égal à zéro dans le vide de rayonnement) ; elle essaie également d'interpréter les divers effets physiques associés à l'émission spontanée de rayonnement (largeur naturelle, déplacement de Lamb...) comme étant dus uniquement à la réaction de rayonnement. Les derniers cours ont été consacrés à une réfutation de cette théorie. Tout d'abord, on a montré qu'il n'était pas possible de traiter le champ du vide  $\vec{E}_0$  comme une grandeur classique. En effet, les relations de commutation atomiques ne peuvent se conserver au cours du temps que si le champ du vide obéit de son côté aux relations de commutation du champ quantique. Un tel résultat est satisfaisant physiquement : quand deux systèmes interagissent (ici l'atome et le champ), traiter l'un quantiquement et l'autre classiquement conduit à des incohérences. De plus, on a montré que, si l'on traite  $\vec{E}_0$  quantiquement, il est incorrect d'associer tous les effets physiques observables à la seule réaction de rayonnement. En imposant aux forces agissant sur l'atome et provenant respectivement du champ du vide  $\vec{E}_0$  et du champ des sources  $\vec{E}_s$  d'être séparément hermitiques, c'est-à-dire d'avoir chacune un sens physique, on a obtenu une séparation non ambiguë entre les effets des fluctuations du vide et ceux de la

réaction de rayonnement. Une telle approche semble très commode pour discuter les mécanismes physiques responsables des corrections radiatives. Elle sera développée et approfondie dans un cours ultérieur.

C. C.-T.

#### SÉMINAIRES 1979-1980

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.

Huit séminaires ont été organisés :

C. AUDOUIN (Laboratoire de l'Horloge Atomique, Orsay), *Stockage d'ions. Applications spectroscopiques.*

P. BERMAN (Laboratoire Aimé Cotton, Orsay et New York University), *Processus collisionnels en présence de rayonnement électromagnétique.*

R. BARGER (National Bureau of Standards, Boulder), *Experimental aspects of high resolution spectroscopy of Calcium atoms.*

J.P. HUIGNARD (Laboratoire Central de Recherches, Thomson C.S.F., Corbeville), *Conjugaison de phase dans les cristaux électro-optiques et photo-conducteurs. Applications.*

H. WALTHER (Max-Planck-Gesellschaft, Garching), *Atoms in strong laser fields.*

P. MEYSTRE (Max-Planck-Gesellschaft, Garching), *Le laser à électrons libres.*

M. DUCLOY (Laboratoire de Physique des Lasers, Paris-Nord), *Conjugaison de phase dans les milieux gazeux : applications spectroscopiques.*

C. BORDE (Laboratoire de Physique des Lasers, Paris-Nord), *Structures fine, superfine et hyperfine des toupies sphériques.*

#### ACTIVITÉ SCIENTIFIQUE

M. Claude COHEN-TANNOUJDI effectue ses recherches au sein du Laboratoire de Spectroscopie Hertzienne à l'École Normale Supérieure. Il y dirige les

travaux d'une petite équipe de chercheurs et participe, sur le plan théorique, à quelques-uns des autres projets en cours au Laboratoire.

Ce laboratoire, qui est associé au C.N.R.S., 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 par M. Jean BROSEL, Professeur à l'Université Paris VI, membre de l'Institut.

Le personnel du Laboratoire comporte neuf enseignants-chercheurs (professeurs, maîtres de conférences, maître-assistants, agrégés-préparateurs), vingt-trois chercheurs au C.N.R.S. (directeurs, maîtres, chargés et attachés de recherche), quatre chercheurs étrangers, sept élèves de grandes écoles, sept boursiers D.G.R.S.T. effectuant des stages ou des thèses de 3<sup>e</sup> cycle, vingt-cinq techniciens et administratifs.

Le Laboratoire est constitué d'une dizaine d'équipes de recherches, comprenant trois à sept 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 1979, ainsi que celles des thèses (de 3<sup>e</sup> cycle et d'Etat) soutenues au cours de cette même année.

#### PUBLICATIONS DU LABORATOIRE EN 1979

L. JULIEN, J.P. DESCOUBES, F. LALOË, *Optical Pumping of Metastable S Oxygen (J. Phys. B Letters, 12, L-769, 1979).*

M. GLASS-MAUJEAN, K. KÖLLMANN and K. ITO, *Upper limit of the cross section for photodissociation of H<sub>2</sub> into excited atoms in the range 620-350 Å (J. Phys. B Letters, 12, L-453, 1979).*

M. GLASS-MAUJEAN, J. BRETON and P.M. GUYON, *A Fano-profile study of the predissociation of the  $3p\pi D^1\Pi_u^+$  state of H<sub>2</sub> (Chem. Phys. Letters, 63, 591, 1979).*

P.M. GUYON, J. BRETON and M. GLASS-MAUJEAN, *Predissociation of the  $^1\Pi_u^\pm$  states of  $H_2$  : measurement of the various dissociation yields* (Chem. Phys. Letters, 68, 314, 1979).

M. GLASS-MAUJEAN, *Calculation of the predissociation probabilities of the  $4p\pi^1\Pi_u^+ v' \geq 1$  levels of  $H_2$*  (Chem. Phys. Letters, 68, 320, 1979).

N. BILLY, C. LHUILLIER, J.P. FAROUX, *Study of Fine Structures of  $He^+$  and  $Ne$  by beam-gas spectroscopy* (J. de Phys., C1, 40, C1-20, 1979).

M. GROSS, P. GOY, C. FABRE, S. HAROCHE and J.M. RAIMOND, *Microscopic masers and microwave superradiant systems in Rydberg states* (Phys. Rev. Letters, 43, 343, 1979).

J. VIGUE, M. BROYER and J.C. LEHMANN, « *Ab initio* » *calculation of hyperfine and magnetic parameters in the  $I_2B$  states* (Phys. Rev. Letters, 42, 883, 1979).

G. GOUEDARD et J.C. LEHMANN, *Mesure de facteurs de Landé dans l'état  $B^3\Sigma_u$  de  $^{80}Se_2$  : un test des perturbations moléculaires* (C.R. B288, 13, 1979, et J. de Phys., 40, L-119, 1979).

F.W. DALBY, J. VIGUE, *Observation of the  $v = 0 \rightarrow v = 1$  rotational vibrational band of  $H.D.$*  (Phys. Rev. Letters, 43, 1310, 1979).

M.A. BOUCHIAT, C. BOUCHIAT, M. POIRIER, *New possible manifestations of parity violation in forbidden magnetic transitions : chiral absorption of plane polarized light and circular dichroism in crossed transverse d.c. electric and magnetic fields* (J. de Phys., 40, 1127, 1979).

M. PINARD, C.G. AMINOFF et F. LALOË, *Velocity selective optical pumping and Doppler free spectroscopy* (Phys. Rev. A, 19, 2366, 1979).

M. PINARD, M. LEDUC, G. TRENEC, C.G. AMINOFF et F. LALOË, *Efficient cw single mode dye laser with double or triple Michelson* (Appl. Phys., 19, 399, 1979).

M. LEDUC, *Synchronous pumping of dye lasers up to 1095 nm* (Optics Commun., 31, 66, 1979).

C. LHUILLIER, F. LALOË, *L'hélium 3 polarisé : un « nouveau fluide quantique ? »* (J. de Phys., 40, 239, 1979).

E. GIACOBINO, B. CAGNAC, *Multiphoton spectroscopy* (Progress in Optics, 17, 86, 1979).

F. BIRABEN, *Efficacité des systèmes unidirectionnels utilisables dans les lasers en anneau* (Optics Commun., 29, 353, 1979).

E. GIACOBINO, E. DE CLERCQ, F. BIRABEN, G. GRYNBERG and B. CAGNAC, *High Resolution Spectroscopy in Helium* (Springer Series in Optical Science, 21, 626, 1979).

L.R. PENDRILL, D. DELANGE and J.C. GAY, *Diamagnetic and collisional perturbations in caesium Rydberg states* (Springer Series in Optical Science, 21, 620, 1979).

K. BEROFF, E. GIACOBINO, F. BIRABEN and G. GRYNBERG, *Hyperfine interaction in the 4d subconfiguration of neon* (Physics Letters, 74A, 305, 1979).

L.R. PENDRILL, D. DELANDE and J.C. GAY, *Quantum defect and fine-structure measurements of P, D, F and G Rydberg states of atomic caesium* (J. Phys. B, Letters, 12, L-603, 1979).

J.C. GAY, L.R. PENDRILL and B. CAGNAC, *New resonances in atomic spectra in crossed electric and magnetic fields* (Physics Letters, 72A, 315, 1979).

C. GRYNBERG and E. GIACOBINO, *Choice of gauge and multiphoton transitions* (J. Phys. B, Letters, 12, L-93, 1979).

F. TREHIN, F. BIRABEN, B. CAGNAC and G. GRYNBERG, *Flashlamp pumped tunable dye laser of ultra-narrow bandwidth* (Optics Commun., 31, 76, 1979).

E. GIACOBINO, F. BIRABEN, E. DE CLERCQ, K. WOHRER-BEROFF and G. GRYNBERG, *Doppler-free two-photon spectroscopy of neon. III. Isotopic shift and fine structure for the  $2p^54d$  and  $2p^55s$  configurations* (J. de Phys., 40, 1139, 1979).

F. BIRABEN, M. BASSINI and B. CAGNAC, *Line-shapes in Doppler-free two-photon spectroscopy. The effect of finite transit time* (J. de phys., 40, 445, 1979).

F. BIRABEN, K. BEROFF, G. GRYNBERG and E. GIACOBINO, *Relaxation of the sodium atom in the 4D level by collisions with noble gases. I. Experimental aspects* (J. de Phys., 40, 519, 1979).

G. GRYNBERG, E. GIACOBINO, F. BIRABEN and K. BEROFF, *Relaxation of the sodium atom in the 4D level by collisions with noble gases. II. Theoretical aspects* (J. de Phys., 40, 533, 1979).

S. REYNAUD, M. HIMBERT, J. DUPONT-ROC, H.H. STROKE and C. COHEN-TANNOUDJI, *Experimental evidence for compensation of Doppler broadening by light shifts* (Phys. Rev. Letters, 42, 756, 1979).

M. HIMBERT, S. REYNAUD, J. DUPONT-ROC, C. COHEN-TANNOUDJI, *A new type of resonance in saturated absorption spectroscopy of 3-levels systems* (Optics Commun., 30, 184, 1979).

C. ALLAIN, P. LALLEMAND, *Phenomenological models compatible with acoustical and thermal properties of viscous liquids* (J. de Phys., 40, 679, 1979).

C. ALLAIN, P. LALLEMAND, *Light scattering and calorimetric study of the thermal diffusivity of glycerol, liquid and glass* (J. de Phys., 40, 693, 1979).

M. BERARD, P. LALLEMAND, *Etude expérimentale de la structure fine du spectre Raman de rotation de l'oxygène* (Optics Commun., 30, 175, 1979).

J.P. BOON, C. ALLAIN, P. LALLEMAND, *Propagating Thermal Modes in a Fluid under Thermal Constraint* (Phys. Rev. Letters, 43, 199, 1979).

C. ALLAIN, A.M. CAZABAT, D. LANGEVIN, A. POUCHOLON, *Mesure du coefficient de diffusion thermique de microémulsions eau-huile* (C.R.A.S., 288B, 363, 1979).

A.M. CAZABAT, B. VOLOCHINE, F.C. CHRETIEN et J.M. KUNSTMANN, *Etude par diffusion de la lumière d'un hydrogel biologique* (C.R.A.S., 289B, 317, 1979).

C. COHEN-TANNOUDJI, S. REYNAUD, *Atoms in strong light-fields : photon antibunching in single atom fluorescence* (Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, 393, 223, 1979).

## THÈSES

### 3<sup>e</sup> cycle

P.J. NACHER, *Relaxation nucléaire à basse température de <sup>3</sup>He à faible densité.*

M. POIRIER, *Contribution à la recherche d'une violation de la parité induite par les courants neutres faibles sur la transition 6S - 7S du Césium.*

J.M. RAIMOND, *Spectroscopie laser du césium. 1) Etude théorique et expérimentale des battements de superradiance du niveau 7P. 2) Mesure du rapport anormal des forces d'oscillateurs dans les doublets de Rydberg de la série principale.*

### Etat

M. PINARD, *Etudes, par pompage optique, de processus collisionnels dans les gaz rares.*

*Ingénieur-docteur*

F. TREHIN, *Réalisation d'un laser à colorant pompé par flash de très haute pureté spectrale.*

#### ACTIVITÉS DIVERSES, CONGRÈS, CONFÉRENCES

Membre du Comité de Rédaction du Livre Blanc sur la Recherche Scientifique.

Conférence invitée à la réunion A.N.Z.A.A.S. (Auckland, Nouvelle Zelande, janvier 1979) : *Survey on Laser Physics.*

Séminaires donnés à Auckland et Dunedin (Nouvelle Zélande) et Brisbane (Australie), janvier 1979.

Conférence invitée à la 4<sup>e</sup> conférence internationale de Spectroscopie Laser (Rottach-Egern, juin 1979) : *Compensation of Doppler broadening by velocity dependent light shifts.*

Conférence invitée au colloque international sur les processus multiphotoniques (Benodet, juillet 1979) : *A new type of resonance in saturated absorption spectroscopy of 3-levels systems.*

Conférence invitée à la réunion de l'E.G.A.S. (Orsay, juillet 1979) : *Atoms in intense laser fields : lights shifts, dynamical Stark effect, radiative cooling and trapping.*

Mission en Chine et au Japon (octobre et novembre 1979). Conférences à Pékin, Dalian, Shanghai, Tokyo, Kyoto, Sendai.

#### DISTINCTIONS

Prix Ampère de l'Académie des Sciences.