

## Physique atomique et moléculaire

M. Claude COHEN-TANNOUJJI, professeur

Le cours de cette année a été consacré à une étude comparative de divers traitements théoriques du processus d'émission spontanée. Il s'agissait de présenter, à propos de cet exemple simple, diverses descriptions possibles du comportement irréversible d'un petit système (ici l'atome) couplé à un grand réservoir (ici le champ de rayonnement).

1) On a commencé par considérer le modèle le plus simple possible où le problème de l'émission spontanée est ramené à celui de l'évolution d'un état discret unique couplé à un continuum unique. L'intérêt d'un tel modèle est qu'il est suffisamment simple pour qu'on puisse mener les calculs jusqu'au bout. On peut alors avoir une idée précise des déviations par rapport au comportement exponentiel prévu par les méthodes approchées et comprendre le rôle des différents paramètres physiques (largeur du continuum, intensité du couplage...).

Après un bref rappel des méthodes perturbatives et du traitement de Weisskopf-Wigner qui permet d'introduire simplement les notions de durée de vie, « Lamb-shift »..., on montre tout l'intérêt qu'il y a à passer de l'espace des temps à l'espace des fréquences. L'équation integrodifférentielle à laquelle conduit l'équation de Schrödinger se transforme en effet en une équation algébrique, beaucoup plus commode à étudier. Une méthode simple de résolution de cette équation, basée sur une construction graphique, est alors présentée. Elle permet de suivre le comportement du système lorsque, partant d'un continuum très large et d'un couplage très faible, on diminue progressivement la largeur du continuum en augmentant l'intensité du couplage. On retrouve bien sur au début les résultats de la théorie de Weisskopf-Wigner, mais avec des corrections au comportement exponentiel aux temps courts (la probabilité de transition varie en  $t^2$  et non en  $t$ ) et surtout aux temps longs (la décroissance est en  $1/t^n$  et non exponentielle). Puis, lorsque la largeur du continuum décroît et que l'intensité du couplage croît, on voit apparaître des oscillations amorties dont l'amplitude croît progressivement pour devenir prépondérante à la limite d'un couplage très intense avec un continuum très

étroit. On retrouve ainsi, dans cette autre limite, le résultat bien connu de la précession de Rabi entre 2 états discrets couplés par une perturbation.

Le traitement présenté dans cette 1<sup>re</sup> partie permet ainsi de comprendre comment on passe continûment de la précession de Rabi à la décroissance exponentielle de Weisskopf-Wigner.

2) Le problème de la préparation de l'état initial, à savoir l'état propre discret de  $H_0$ , est ensuite abordé dans le cadre de l'étude de la diffusion résonnante. L'une des façons les plus simples de préparer un état atomique excité consiste en effet à envoyer sur un atome dans l'état fondamental une impulsion lumineuse résonnante aussi brève que possible.

L'amplitude de diffusion est calculée (sans approximation) dans le cadre du modèle simple précédent et l'existence d'une résonance étroite dans la section efficace de diffusion est mise en évidence. La connaissance de l'amplitude de diffusion pour chaque valeur de l'énergie permet également d'étudier la diffusion d'un paquet d'ondes au voisinage immédiat de la résonance. Les résultats obtenus sont appliqués à l'interprétation de diverses expériences récentes (diffusion légèrement hors-résonance, battements quantiques apparaissant lorsque l'état excité a une structure...). On montre également que, même avec les impulsions lumineuses les plus brèves que l'on sache réaliser actuellement, l'observation de décroissances non-exponentielles en physique atomique reste un problème très difficile.

3) Afin d'améliorer le modèle simple précédent et de pouvoir tenir compte éventuellement de l'existence de plusieurs niveaux discrets et de plusieurs continus, on introduit alors la méthode des opérateurs de projections qui permet de concentrer le calcul sur les éléments de matrice intéressants de l'opérateur d'évolution.

Diverses expressions algébriques sont établies et appliquées à quelques problèmes physiques : établissement de l'hamiltonien effectif (non nécessairement hermitique) décrivant l'évolution de plusieurs états discrets, proches les uns des autres et couplés à un même continuum, effet des dégénérescences Zeeman sur l'émission spontanée. Le problème des cascades radiatives, qui fait intervenir plusieurs continus couplés les uns aux autres, reçoit une attention particulière. On montre comment l'interférence entre des cascades différant par l'ordre des photons émis peut modifier la répartition spectrale du rayonnement émis. Le cas de l'oscillateur harmonique, où ces interférences jouent un rôle particulièrement important par suite de l'équidistance entre les niveaux d'énergie, est étudié en détail.

4) Lorsqu'on veut étudier l'émission spontanée d'un système de plusieurs atomes, ou, plus généralement, lorsqu'on s'intéresse à l'évolution d'un système S, plus compliqué qu'un seul atome, couplé à un grand réservoir, les méthodes précédentes conduisent à des calculs trop compliqués parce que donnant trop

d'informations (états de  $S$  et de  $R$ , corrélations entre  $S$  et  $R$ ...). Il peut être plus avantageux de concentrer les efforts sur le calcul de l'évolution de la matrice densité réduite décrivant le comportement du système  $S$ . Une telle équation d'évolution porte le nom « d'équation pilote » et c'est à l'étude détaillée d'une telle équation qu'est consacrée la dernière partie du cours.

On commence par introduire les propriétés essentielles de l'espace de Liouville d'un système quantique (espace des opérateurs de ce système). L'équation d'évolution de la matrice densité du système global  $S + R$ , dans cet espace, a une forme très simple, de même que l'opération de trace partielle par rapport à  $R$ , à laquelle est associé un opérateur de projection. On montre que les résultats obtenus plus haut concernant le passage de l'espace des temps à l'espace des fréquences et les opérateurs de projection peuvent être aisément généralisés à l'espace de Liouville et conduisent à des équations exactes compactes décrivant l'évolution au cours du temps de la matrice densité réduite de  $S$ . L'intérêt de ces expressions est qu'elles se prêtent particulièrement bien à des approximations dont les conditions de validité apparaissent clairement : développement en puissances du couplage entre  $S$  et  $R$  qui converge si le temps de corrélation  $\tau_c$  de l'interaction entre  $A$  et  $R$  est suffisamment court ; approximation de mémoire courte ( $\tau_c$  court devant le temps de relaxation  $T$ ) qui permet de remplacer l'équation integrodifférentielle à laquelle se réduit l'équation pilote par une équation différentielle.

Afin d'analyser le contenu physique de l'équation pilote, l'équation d'évolution de chaque élément de la matrice densité de  $S$  est écrite explicitement dans un cas simple (spectre discret non-dégénéré pour  $S$ ). Des méthodes diagrammatiques sont introduites pour calculer rapidement les différents coefficients de l'équation pilote. Les taux de transfert entre les différents niveaux de  $S$  sont déterminés et interprétés physiquement. On montre comment  $S$  atteint l'équilibre thermodynamique en interagissant avec un réservoir  $R$  lui-même en équilibre. Le déplacement et l'élargissement des diverses transitions de  $S$  sous l'effet du couplage avec  $R$  sont également analysés.

Une étude détaillée de l'effet des corrélations apparaissant entre  $S$  et  $R$  est finalement présentée. On montre que ces corrélations jouent un rôle essentiel pour faire évoluer  $S$  mais qu'elles ne durent qu'un temps très court de l'ordre de  $\tau_c$ . Dans le même ordre d'idées, une formule compacte est établie pour les fonctions de corrélation de  $S$  qui permet de comprendre clairement les approximations utilisées dans l'établissement du « théorème de régression quantique ».

5) Le formalisme de l'équation pilote, ainsi développé, est alors appliqué à un premier problème concret : celui de l'oscillateur harmonique amorti.  $S$  est un oscillateur harmonique,  $R$  un grand ensemble d'oscillateurs, de toutes fréquences, en équilibre thermodynamique.

L'équation pilote de S est établie et permet d'étudier en détail l'amortissement de l'énergie et de l'amplitude d'oscillation de S. La projection de l'équation pilote sur la base des états cohérents de l'oscillateur harmonique, introduits et étudiés en détail dans le cours de l'année antérieure, permet de faire le lien avec la mécanique statistique classique. L'opérateur densité est représenté dans cette base par une « densité de quasi-probabilité »  $P(\alpha)$  qui obéit à une équation de Fokker-Planck, décrivant la manière dont  $P(\alpha)$  évolue et diffuse dans le plan complexe sous l'effet du couplage avec R.

6) Une deuxième application du formalisme de l'équation pilote à l'étude de l'émission spontanée d'un grand moment cinétique est alors présentée. La motivation d'une telle étude est que le problème de l'émission spontanée de rayonnement par un ensemble de  $2N$  atomes à 2 niveaux initialement tous excités dans le niveau supérieur (superradiance) peut être ramené, dans certaines conditions, à celui de l'émission spontanée de rayonnement par un moment cinétique  $J = N$ , préparé initialement dans l'état  $|J, J\rangle$ . Après une discussion qualitative du lien entre le problème étudié et celui de la superradiance, l'équation d'évolution de  $\langle J_z \rangle$  (énergie moyenne du moment cinétique) est établie et résolue de manière approchée. On montre que l'énergie

émise par unité de temps (proportionnelle à  $-\frac{d}{dt} \langle J_z \rangle$  par suite de la conservation de l'énergie) a la forme d'une impulsion. La dépendance en  $J$  de la hauteur, de l'abscisse et de la largeur de cette impulsion est établie, ce qui permet de comprendre la dépendance en  $N$  de l'énergie, du délai et de la largeur d'une impulsion superradiante.

#### SÉMINAIRES

Les séminaires ont été consacrés à la présentation et à la discussion d'un certain nombre de développements récents en Physique atomique et moléculaire. Il a semblé intéressant d'axer un certain nombre de séminaires sur les manifestations éventuelles des interactions faibles en Physique atomique.

Treize séminaires ont été organisés :

M. GAILLARD (Laboratoire de Spectrométrie ionique et moléculaire, Villeurbanne), *Beam foil spectroscopy. Avantages et inconvénients d'une recherche interdisciplinaire.*

M. SARGENT (Optical Sciences Center, The University of Arizona), *Laser Saturating Grating Phenomena.*

J.C. PEBAY-PEYROULA (Laboratoire de Spectrométrie physique, Université scientifique et médicale de Grenoble), *Quelques aspects d'études de relaxation de niveaux excités atomiques ou moléculaires entreprises à Grenoble.*

Y. FARGE (Laboratoire Lure, Orsay), *Applications du rayonnement synchrotron en physique atomique et moléculaire.*

P. ENCRENAZ (Observatoire de Meudon et Laboratoire de Physique de l'Ecole normale supérieure), *Niveaux de Rydberg en astrophysique.*

J. ILIOPOULOS (Laboratoire de Physique théorique de l'Ecole normale supérieure), *Aperçu sur les théories de jauge des interactions faibles et électromagnétiques - I : Formalisme général.*

H.M. GIBBS (Bell Telephone Labs, Murray Hill, N.J.), *Optical Transistor and Bistability Operation Using Non-Linear Dispersion of Sodium Vapor.*

J. ILIOPOULOS (Laboratoire de Physique théorique de l'Ecole normale supérieure), *Aperçu sur les théories de jauge des interactions faibles et électromagnétiques - II : Applications.*

H. HUTCHINSON (Imperial College, Londres), *Generation of Vacuum Ultra Violet Radiation.*

C. BOUCHIAT (Laboratoire de Physique théorique de l'Ecole normale supérieure), *Courants neutres en Physique atomique : I - Théorie Générale ; II - Analyse de quelques cas concrets.*

M. DUMONT (Laboratoire de Physique des Lasers, Paris Nord), *Effet Hanle en Pompage Optique Laser et en Absorption Saturée.*

M.A. BOUCHIAT (Laboratoire de Spectroscopie hertzienne de l'Ecole normale supérieure), *Etude expérimentale de la transition interdite 6S-7S du Cesium : mesure du moment dipolaire de transition, recherche d'une violation de la parité.*

#### ACTIVITÉ SCIENTIFIQUE

M. Claude COHEN-TANNOUJDI effectue ses recherches au sein du Laboratoire de Spectroscopie hertzienne de l'Ecole 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 de Paris VI (quai Saint-Bernard). Il est dirigé par M. Jean BROSSEL, Professeur à l'Université de Paris VI.

Le personnel du laboratoire comporte 16 enseignants-chercheurs (professeurs, maîtres de conférences, maître-assistants, agrégés-préparateurs), 24 chercheurs au C.N.R.S. (directeurs, maîtres, chargés et attachés de recherche), 4 chercheurs étrangers et 6 élèves de grandes écoles effectuant des stages ou des thèses de 3<sup>e</sup> cycle, 25 techniciens et administratifs.

Le laboratoire est constitué d'une douzaine d'équipes de recherche, comprenant chacune 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.

Les problèmes abordés par chacune de ces équipes et les principaux résultats obtenus au cours de l'année 1975 sont rapidement passés en revue dans le paragraphe suivant.

## 1) RÉSUMÉ DES TRAVAUX EN COURS

### a) *Bombardement électronique longitudinal et transversal*

L'objet de cette étude est d'obtenir des informations sur divers niveaux atomiques ou moléculaires excités soit directement par impact électronique ou photonique, soit par dissociation d'une molécule.

Des résonances d'anticroisement ont été observées sur la lumière émise par des atomes de Deutérium excités et obtenus par dissociation de molécules  $D_2$  sous l'effet d'un bombardement électronique. Ce travail a montré que les processus de prédissociation étaient beaucoup moins importants pour  $D_2$  que pour  $H_2$ .

Les expériences de photodissociation de  $H_2$  utilisant le rayonnement synchrotron de l'anneau de collision d'Orsay (laboratoire Lure) ont été poursuivies. Une étude très détaillée du spectre d'excitation de la raie Lyman  $\alpha$  de l'Hydrogène a été effectuée et a permis d'analyser les mécanismes de prédissociation à l'origine de cette émission. Plusieurs niveaux moléculaires fluorescents ont été également identifiés, notamment au-dessus du seuil d'ionisation.

L'excitation dissociative de la molécule d'Azote a été également étudiée. Plusieurs bandes moléculaires et plusieurs raies atomiques ont été observées dans le spectre de la lumière émise par la vapeur. Les raies émises ont une polarisation très faible.

(J.P. DESCUBES, M<sup>m</sup> M. GLASS, M<sup>m</sup> L. JULIEN)

b) *Bombardement par des atomes neutres*

Lorsqu'on bombarde des atomes ou des molécules par un jet d'atomes neutres, on peut opérer dans des champs magnétiques très élevés car le jet d'atomes neutres n'est pas dévié par le champ magnétique comme le serait un jet d'électrons. On peut ainsi observer des résonances de croisements de niveaux apparaissant en champ élevé et obtenir des informations sur les structures fines des atomes.

L'étude du niveau  $2^3P$  de l'atome d'Hélium a été poursuivie. Les perfectionnements du montage expérimental ont permis de mesurer la position du croisement en champ fort des niveaux  $J = 0, M = 0 \leftrightarrow J = 2, M = 2$  avec une précision de  $10^{-6}$ . L'intérêt d'une telle mesure est que l'atome d'Hélium est un système fondamental et que la mesure précise de sa structure fine et des facteurs de Landé orbital et de spin permet de tester les diverses corrections relativistes, radiatives, de recul, calculables à partir de l'Electrodynamique quantique. Sur le plan théorique, l'hamiltonien décrivant l'ensemble de ces corrections a été analysé en détail et mis sous forme tensorielle. Une interprétation physique simple des différents termes de cet hamiltonien a pu être dégagée, séparant clairement les effets cinématiques des effets magnétiques.

La méthode de bombardement par des neutres a été également appliquée au Néon. 5 croisements de niveaux ont été observés sur la configuration  $2p^5 4d$  du Néon pour laquelle on possédait peu d'informations concernant les structures fines et les facteurs de Landé. Cette étude a révélé que la mesure de ces paramètres physiques constituait un test sévère pour les fonctions d'ondes des états excités.

Enfin, l'étude d'un autre système atomique fondamental, l'ion  $^4He^+$  a été entreprise.

(J.P. FAROUX, M<sup>m</sup> C. LHUILLIER, N. BILLY)

c) *Pompage optique dans des décharges de gaz rares*

Un gaz rare (He, Ne, Kr, Xe) au sein duquel on entretient une faible décharge est orienté par pompage optique. Le but est d'obtenir des informations sur les niveaux d'énergie des atomes de gaz rares et sur les diverses collisions se produisant dans la décharge.

Les expériences de pompage optique à très basse température de l'état fondamental  $6^1S_0$  de  $He^3$  se sont poursuivies. En plus de l'étude des temps de relaxation nucléaire qui deviennent très longs (de l'ordre de plusieurs jours) lorsque les parois sont recouvertes d'un enduit d'Hydrogène solide à  $4^{\circ}K$ , on étudie les coefficients de diffusion de  $^3He$  dans  $^3He$  et dans  $^4He$ , afin d'analyser les effets du postulat de symétrisation sur les collisions élastiques He-He.

Les collisions d'échange de métastabilité dans le Néon ont été étudiées et une valeur de la section efficace d'échange de métastabilité a été obtenue ( $\sigma = 22 \pm 6 \text{ \AA}^2$ ). Le pompage optique de l'isotope impair  $^{21}\text{Ne}$  au moyen d'un laser à colorant se poursuit. L'effort a porté sur l'amélioration des qualités de la source laser (monochromaticité, stabilité...).

Des nouvelles expériences ont été entreprises sur l'orientation par pompage optique du niveau métastable  $^3\text{P}_2$  du Krypton et du Xénon, l'un des buts essentiels de cette étude étant d'orienter les noyaux des isotopes impairs de ces éléments. Les processus de désorientation par collision du métastable de Kr sont en cours d'étude.

(J. BROSSEL, F. LALOË, M<sup>m</sup> M. LEDUC, R. BARBE, M. PINARD,  
M<sup>ll</sup> V. SEGUIN, C. AMINOFF)

d) *Variation des taux de transfert par collisions dans un champ magnétique élevé*

On étudie les variations en fonction du champ magnétique du taux de transfert par collisions entre sous-niveaux Zeeman d'un état atomique excité. La théorie indique que le taux de transfert doit décroître lorsque l'écart d'énergie entre les sous-niveaux Zeeman est de l'ordre de l'inverse de la durée moyenne  $\tau_c$  de la collision.

L'effet a été tout d'abord observé dans le cas des collisions résonnantes  $\text{Hg}^*(6^3\text{P}_1) - \text{Hg}(6^1\text{S}_0)$ . Une variation importante du taux de transfert  $6^3\text{P}_1$ ,  $M = 0 \rightarrow M = \pm 1$  dans un domaine de champs allant de 0 à 80 kg a été mise en évidence. Les prédictions théoriques basées sur un potentiel d'interaction dipole-dipole en  $1/R^3$  ont pu être vérifiées en détail.

Le cas des collisions non-résonnantes est plus difficile car, le temps de collision étant plus court par suite de la faible valeur de la section efficace, il faut opérer dans les champs magnétiques beaucoup plus élevés. Une série d'expériences a été réalisée au Service National des Champs Intenses à Grenoble où l'on dispose de champs magnétiques pouvant monter jusqu'à 200 kg. Le résultat le plus important obtenu est la mise en évidence d'une différence entre les taux de transfert  $6^3\text{P}_1$ ,  $M = 0 \rightarrow M = +1$  et  $6^3\text{P}_1$ ,  $M = 0 \rightarrow M = -1$ . Un tel résultat est une conséquence de l'anisotropie introduite par le champ magnétique et permet de déterminer le signe de l'anisotropie du potentiel d'interaction entre les 2 atomes. Le comportement différent des divers gaz rares renseigne par ailleurs sur l'importance relative de la partie attractive et de la partie répulsive du potentiel.

Enfin, des expériences sur les collisions Sodium gaz rares ont permis de mettre en évidence le rôle du spin électronique dans les collisions  $\text{Na}^* - \text{Xe}$  et sa faible perturbation dans les collisions  $\text{Na}^* - \text{He}$ .

(A. OMONT, J.C. GAY, W. SCHNEIDER)



e) *Violation de la parité induite par les courants neutres en Physique atomique*

Le but de cette expérience est de tester une violation éventuelle de la Parité en Physique atomique associée à des interactions faibles entre l'électron et le noyau et résultant de l'échange d'un boson vectoriel  $Z_0$  (courants neutres). La méthode utilisée consiste à étudier une transition atomique fortement interdite de manière à inhiber au maximum les interactions électromagnétiques qui sont beaucoup plus intenses que les interactions faibles et à augmenter au maximum la contribution relative de ces dernières. La transition atomique choisie est la transition doublement interdite  $6S_{1/2} - 7S_{1/2}$  du Césium. Ce choix s'explique par le fait que l'effet calculé théoriquement par C. BOUCHIAT et M.A. BOUCHIAT varie comme le cube  $Z^3$  de la charge  $Z$  du noyau, d'où l'intérêt de choisir un élément aussi lourd que possible.

- L'étude, en présence d'un champ électrique extérieur, de la transition interdite a été poursuivie. Les règles de sélection en présence de  $E$  ont été vérifiées. L'existence d'une polarisabilité scalaire et d'une polarisabilité dépendant du spin a été mise en évidence. Le rapport de ces 2 polarisabilités a été mesuré et l'effet d'interférence entre les 2 amplitudes associées observé.

- Grâce à un effet d'interférence entre l'amplitude dipolaire électrique induite par un champ électrique et la très faible amplitude dipolaire magnétique, le moment magnétique de la transition a pu être mesuré en grandeur et en signe (il correspond à une force d'oscillateur de  $10^{-14}$  en champ électrique nul).

D'ores et déjà les limites existantes sur la non conservation de la parité dans les transitions atomiques ont pu être abaissées. Le moment dipolaire électrique induit par les courants neutres est inférieur à  $3 \cdot 10^{-8} e a_0$  ( $e$  : charge de l'électron,  $a_0$  : orbite de Bohr) alors que la valeur théorique résultant du modèle de Weinberg-Salam est  $1.7 \cdot 10^{-11} e a_0$ .

(M<sup>me</sup> M.A. BOUCHIAT, L. POTTIER)

f) *Etude d'effets liés aux interactions entre un atome et une onde électromagnétique intense*

Le comportement d'atomes dans des ondes laser résonnantes très intenses mais non parfaitement monochromatiques a été étudié en détail. La difficulté tient au fait qu'on ne peut appliquer ni la théorie des perturbations (le temps de corrélation de l'onde est trop long devant la période de Rabi), ni les équations de Bloch (qui ne sont valables que pour une onde parfaitement monochromatique). Une nouvelle méthode a été développée qui consiste à utiliser des approximations différentes pour traiter de l'effet des fluctuations lentes et rapides de l'amplitude et de la phase de l'onde laser. Cette méthode a été

appliquée à 2 problèmes : la modification de la répartition spectrale de la lumière de fluorescence émise par l'atome et la modification de la forme des résonances de croisements de niveaux. Dans les 2 cas les résultats obtenus montrent que le comportement de l'atome est très sensible aux différentes fluctuations de l'onde laser et peut par suite fournir des informations intéressantes sur les propriétés statistiques du faisceau laser.

Par ailleurs, la méthode de l'atome habillé a été appliquée avec succès au problème de la répartition spectrale de la lumière de fluorescence émise par un atome à plusieurs niveaux irradié par une onde laser très intense. Les fréquences de Bohr de l'atome habillé donnent immédiatement les fréquences des diverses composantes du spectre. A partir de l'équation pilote décrivant l'émission spontanée de l'atome habillé, des règles simples ont été établies qui donnent immédiatement les largeurs et les intensités de ces composantes. Cette méthode a été appliquée à l'étude des modifications de l'effet Raman aux très fortes intensités ainsi qu'à l'étude des effets de polarisation (excitation avec une polarisation, détection avec une autre polarisation).

(C. COHEN-TANNOUJJI, J. DUPONT-ROC, C. FABRE, P. AVAN, S. REYNAUD)

g) *Etude des états de Rydberg du Sodium*

Deux impulsions provenant de deux lasers à colorant pompés par le même laser à Azote permettent de réaliser une excitation par échelons  $3s_{1/2} \rightarrow 3p_{3/2}$  puis  $3p_{3/2} \rightarrow nd$  ou  $ns$  sur des atomes de Sodium et de préparer ainsi de tels atomes dans des états excités (niveaux de Rydberg). Par observation de la lumière réémise à partir de ces niveaux de Rydberg (dépendance temporelle, modulations...), on obtient des informations intéressantes sur plusieurs paramètres physiques (structures fines, polarisabilité...), et sur leur évolution en fonction du nombre quantique principal  $n$ .

Une excitation percussive du niveau  $5s$  a permis cette année de mettre en évidence expérimentalement, et pour la première fois dans le proche infrarouge, le phénomène d'émission spontanée collective (superradiance). Pour des valeurs suffisamment élevées du nombre d'atomes excités portés dans l'état  $5s$  par les 2 impulsions excitatrices, on a pu observer la réémission, avec un certain retard, de 3 impulsions intenses correspondant aux 3 transitions en cascades  $5s \rightarrow 4p$  (3,41  $\mu$ ),  $4p \rightarrow 4s$  (2,2  $\mu$ ),  $4s \rightarrow 3p$  (1,1  $\mu$ ). L'observation de la lumière de fluorescence émise à partir du niveau  $3d$  a permis également de détecter indirectement une transition superradiante sur la transition  $4p \rightarrow 3d$  (9,1  $\mu$ ). L'intensité de ces diverses impulsions croît comme le carré  $n^2$  du nombre d'atomes  $n$  dans l'état excité  $5s$ , le retard avec lequel elles apparaissent décroît comme  $\log n/n$ , ce qui prouve bien leur caractère super-radiant.

(S. HAROCHE, C. FABRE, M. GROSS, P. PILLET)

### h) *Pompage optique des molécules*

Divers états excités des molécules d'Iode et de Selenium sont étudiés au moyen des techniques habituelles du pompage optique (résonances de croisements de niveaux, en lumière modulée...). Les sources lumineuses utilisées sont des lasers à Argon et Krypton ionisés et des lasers à colorants.

Sur la molécule d'Iode, la mesure du taux de polarisation circulaire de la fluorescence en fonction du champ magnétique s'est avérée extrêmement sensible au coefficient de prédissociation  $k_v$ , intégrale de recouvrement des fonctions d'onde de vibration de même énergie des états  $B^3\pi_{ou}$  et  $1u$ . On a pu en particulier montrer la variation de  $k_v$  avec  $J$  due aux déformations centrifuges du puits de potentiel de l'état  $B$ . Ceci a permis de suivre  $k_v$  au voisinage de son passage par zéro ( $v = 13$  à  $17$ ) avec une très grande précision.

Par ailleurs la dépendance en  $J(J + 1)$  du taux de prédissociation par rotation a été confirmée.

Enfin, au voisinage immédiat de la limite de dissociation (jusqu'à environ  $30 \text{ cm}^{-1}$  de cette limite), on a suivi l'augmentation considérable des facteurs  $g_J$  (rotationnel) et  $g_1$  (de blindage magnétique). On a ainsi mis en évidence un facteur multiplicatif de l'ordre de 20 entre le champ magnétique extérieur appliqué et le champ magnétique au niveau d'un noyau d'iode.

Sur la molécule de Selenium, on a pu, par une analyse détaillée des facteurs de Landé de certains niveaux de l'état  $B^3\Sigma$ , déterminer la valeur de la structure fine  $B^3\Sigma_0 - B^3\Sigma_1$ . Par ailleurs, en observant la fluorescence « croisée »  $X^3\Sigma_1 \rightarrow B^3\Sigma_0 \rightarrow X^3\Sigma_0$ , on a pu mesurer la structure fine de l'état fondamental  $X^3\Sigma_0 - X^3\Sigma_1$ .

(J.-C. LEHMANN, G. GOUEDARD, M. BROYER, J. VIGUÉ)

### i) *Spectroscopie à 2 photons sans effet Doppler*

Lorsqu'un atome absorbe 2 photons se propageant en sens opposé, l'effet Doppler disparaît car, dans le référentiel au repos de l'atome, les 2 déplacements Doppler des 2 ondes se compensent exactement (au 1<sup>er</sup> ordre), et la condition de résonance devient indépendante de la vitesse de l'atome. On obtient alors une largeur de raie uniquement déterminée par la largeur naturelle qui est près de mille fois plus petite que la largeur Doppler.

La méthode appliquée avec succès au Sodium au cours des années antérieures a été généralisée au Néon. Plusieurs modifications du montage expérimental ont permis d'améliorer considérablement la stabilité en fréquence du laser ainsi que son intensité. Le niveau métastable  $3s J = 2$  étant peuplé par une décharge, on étudie le spectre d'absorption à 2 photons de ce niveau  $3s$  vers divers états de la configuration  $4d'$ . 4 états  $d'$  ont pu ainsi être étudiés très en détail.

La précision sur la valeur des écarts de structure fine a été augmentée de manière significative.

La structure hyperfine de l'isotope impair  $^{21}\text{Ne}$  a été étudiée en détail. Un écart d'environ 15 % entre les valeurs expérimentales et les valeurs théoriques a conduit à une modification des constantes de couplage spin-orbite qui étaient adoptées jusqu'ici.

Le déplacement isotopique entre les raies des 2 isotopes pairs  $^{22}\text{Ne}$  et  $^{20}\text{Ne}$  a également été déterminé avec précision. Un déplacement isotopique spécifique différent pour le niveau  $J = 1$  et pour les niveaux  $J = 2, 0$  a été mis en évidence.

Enfin, les effets de pression sur ces 4 niveaux d'ont été étudiés et les constantes de déplacement et d'élargissement déterminées.

(B. CAGNAC, G. GRYNBERG, F. BIRABEN,  
M<sup>me</sup> E. GIACOBINO, M. BASSINI)

j) *Etude des ondes de capillarité*

La surface d'un liquide est parcourue par des ondes de surface excitées thermiquement. La mesure de la répartition angulaire et spectrale de la lumière d'un faisceau laser diffusée par ces ondes de surface fournit des informations sur la tension superficielle du liquide et sur sa viscosité. La technique utilisée est la spectroscopie de battements lumineux. Une telle étude permet de mesurer la largeur spectrale  $\Delta\nu$  des fluctuations de fréquence  $\nu$  et de vecteur d'onde  $q$  et d'en déduire la viscosité de cisaillement du liquide à la fréquence  $\nu$ .

Une telle méthode est appliquée actuellement à des solutions semi-concentrées de polystyrène de masses moléculaires élevées et qui présentent des relaxations de viscosité pour des fréquences de quelques milliers de Hertz.

Par ailleurs une étude des fluctuations thermiques de la surface libre d'un fluide près de l'instabilité de Benard est entreprise. Lorsqu'on chauffe par en-dessous une couche liquide dont la face supérieure est libre, la fréquence des fluctuations thermiques de surface décroît à mesure que croît le gradient de température. Il existe un gradient critique  $\Delta T_c$  pour lequel la fréquence d'une fluctuation de vecteur d'onde  $q_0$  bien déterminée devient nulle. C'est l'instabilité de Benard. On essaie de déterminer, par étude spectrale de la lumière diffusée par les ondes de surface, la manière dont la fréquence des fluctuations décroît.

(M<sup>me</sup> BOUCHIAT, J. MEUNIER, M<sup>me</sup> D. LANGEVIN)

k) *Etude de la diffusion de la lumière laser par des fluides*

Les méthodes de diffusion de la lumière sont appliquées à des études de physique moléculaire et de macromolécules d'intérêt biologique ou non.

Il a été montré que l'on peut très bien rendre compte des spectres de la lumière diffusée dans des gaz moléculaires à l'aide de la théorie de l'hydrodynamique translationnelle, théorie qui tient compte des mouvements de diffusion des molécules vibrationnellement ou rotationnellement excitées.

La relaxation structurale dans les liquides visqueux a fait également l'objet d'une série de mesures spectrales, soit au Fabry-Pérot de très haute résolution, soit par corrélation de photons. Cette étude a montré que la relaxation observée dans la glycérine ne peut s'interpréter qu'à l'aide d'un modèle de relaxation purement structurale, ce qui contredit des mesures de chaleur spécifique faites par d'autres auteurs.

Quelques projets nouveaux sont entrepris :

— Etude de l'équilibre chimique tétramère-dimère dans l'hémoglobine. Les résultats acquis à ce jour sont en contradiction avec ceux d'une publication récente car on n'observe aucune indication de l'influence de la réaction chimique sur le spectre de la lumière diffusée.

— Etude de la viscosité d'une solution concentrée de polymères, mesurée à une échelle de longueur voisine d'une longueur caractéristique de la solution (distance moyenne entre points de contact des chaînes de polymères). Le but est de déduire la viscosité à partir de mesures de mouvement brownien de petites particules métalliques en suspension dans la solution.

— Etude de niveaux dissociatifs de la molécule  $\text{Na}^2$ . On s'intéresse aux courbes de potentiels  $^1\pi_g$  et  $^1\Sigma_g^+$  qui conduisent par dissociation à un atome dans l'état  $3s$  et un atome dans l'état  $3p$  qui fluoresce sur les raies  $D_1$  ou  $D_2$ . Pour atteindre ces niveaux à partir d'un état électronique fondamental  $^1\Sigma_g^+$ , une excitation par échelons est utilisée avec comme niveau intermédiaire électronique  $^1\pi_u$  ou  $^1\Sigma_u^+$ .

— Etude de vésicules obtenues à partir des membranes de cellules des organes électriques de certains poissons. Ces vésicules, fournies par l'Institut Pasteur, ont été caractérisées au point de vue rayon hydrodynamique à partir

du mouvement brownien de diffusion. L'étape ultérieure sera d'étudier la réaction entre ces vésicules et des agonistes fluorescents par la méthode de la fluctuation de la lumière de fluorescence (Webb).

Enfin des études antérieures sur la diffusion due aux collisions dans les gaz ont été reprises sur le Néon qui présente l'intérêt théorique de permettre un calcul significatif de la polarisabilité du système  $\text{Ne}_2$  en fonction de la distance internucléaire.

(P. LALLEMAND, M<sup>me</sup> OSTROWSKY, M<sup>me</sup> A.M. CAZABAT,  
M<sup>me</sup> C. ALLAIN-DEMOULIN, P. LAROUR, C. BERARD.  
Visiteurs étrangers : J. A. COWEN, R. LEIGH)

## 2) PUBLICATIONS DU LABORATOIRE EN 1975

P. LALLEMAND, D.-J. DAVID et B. BIGOT, *Calculs de polarisabilités atomiques et moléculaires. I. Méthodologie et application à l'association Ar-Ar (Molecular Physics, 1974, t. 27, n° 4, p. 1029).*

A.-M. CAZABAT et J. LAROUR, *Diffusion Rayleigh-Brillouin dans les gaz comprimés (J. de Phys., t. 36, p. 1209, 1975).*

A.-M. CAZABAT et P. LALLEMAND, *Etude expérimentale de la diffusion Rayleigh-Brillouin dans le méthane (Lettres du J. de Phys., t. 36, L-29, 1975).*

A.-M. CAZABAT, P. LALLEMAND et J. LAROUR, *Experimental evidence for a diffusionnally broadened Mountain line in a polyatomic gas (Optics Comm., t. 13, p. 179, 1975).*

M.-C. HERPIN et P. LALLEMAND, *Study of the broadening of the rotational Raman lines of  $\text{CO}_2$  perturbed by rare gases (J. of Quantitative Spectr. Radiative Transfer, t. 15, p. 779, 1975).*

M. BALKANSKI et P. LALLEMAND, *Photonics (Gauthier-Villars, Paris, 1975).*

H. F. P. KNAPP et P. LALLEMAND, *Light scattering by gases (Annual Review of Physical Chemistry, t. 26, p. 59, 1975).*

C. ALLAIN and A.-M. CAZABAT, *Determination of the dispersion of the specific heat of glycerol by light scattering (Optics Comm., t. 16, p. 133, 1976).*

C. ALLAIN-DEMOULIN, P. LALLEMAND and N. OSTROWSKY, *Theoretical study of light-scattering spectrum of a pure relaxing fluid. Applications to viscous fluids at low temperature (Molecular Physics, 1976, t. 31, n° 2, p. 581).*

C. ALLAIN-DEMOULIN, A.-M. CAZABAT, P. LALLEMAND, N. OSTROWSKY, *Coupling of the Mountain and Rayleigh lines in a relaxing fluid (Optics Comm., t. 15, p. 126, 1975).*

C. FABRE, M. GROSS, S. HAROCHE, *Determination by quantum beat spectroscopy of fine structure intervals in a series of highly excited sodium D states (Optics Comm., t. 13, p. 393, 1975).*

C. COHEN-TANNOUDJI, *Optical Pumping with Lasers (Atomic Physics 4, Plenum Press, p. 589, 1975).*

C. FABRE and S. HAROCHE, *Observation of Giant Polarizabilities in Atomic Sodium Rydberg States (Optics Comm., t. 15, p. 254, 1975).*

P. AVAN, C. COHEN-TANNOUDJI, *Hanle effect for monochromatic excitation. Non perturbative calculation for a  $J = 0$  to  $J = 1$  transition (Lettres du J. de Phys., t. 36, L-85, 1975).*

M. BROYER, J.-C. LEHMANN and J. VIGUÉ,  *$g$  factors and lifetimes in the B state of molecular iodine (J. de Phys., t. 36, p. 235, 1975).*

F.-W. DALBY, J. VIGUÉ and J.-C. LEHMANN, *On Hanle effect in the  $B^3\Sigma_u^- X^3\Sigma_g^-$  band system of the  $Se_2$  molecule (J. Can. de Phys., t. 53, p. 140, 1975).*

G. GOUEDARD, J.-C. LEHMANN, *Effet Hanle et résonance en lumière modulée sur le niveau  $BluV' = 0J' = 105$  de la molécule  $Se_2$  (C.R. Ac. Sc., B 280, p. 471, 1975).*

J. VIGUÉ, M. BROYER and J.-C. LEHMANN, *Predissociation effects in the  $B^3\pi_0^+ + u$  state of iodine (J. of Chem. Phys., t. 62, p. 4941, 1975).*

M. BROYER, J. VIGUÉ, J.-C. LEHMANN, *Direct evidence of the natural predissociation of the  $I_2B$  state through systematic measurements of lifetimes (J. of Chem. Phys., t. 63, p. 5428, 1975).*

J.-C. GAY and W.-B. SCHNEIDER, *Quasiresonant collisional excitation transfer between Zeeman sublevels in high magnetic fields (J. de Phys. Lettres, t. 36, L-185, 1975).*

F. BIRABEN, B. CAGNAC, G. GRYNBERG, *Déplacement et élargissement de la transition à deux photons  $3S - 4D$  dans l'atome de Sodium par collision contre des atomes de néon (J. de Phys., t. 36, L-41, 1975).*

F. BIRABEN, B. CAGNAC, G. GRYNBERG, *Transfert entre les niveaux  $4D_{5/2}$  et  $4D_{3/2}$  de l'atome de sodium par collision contre les atomes de néon (C.R. Ac. Sc., B 280, p. 235, 1975).*

J.-C. GAY, *Couplage entre alignement et orientation par collisions en champ magnétique intense* (*J. de Phys. Lettres*, t. 36, L-239, 1975).

M.A. BOUCHIAT, L. POTTIER, *Observation of the  $6S_{1/2} - 7S_{1/2}$  single-photon transition of cesium induced by an external d.c electric field* (*J. de Phys. Lettres*, t. 36, L-65, 1975).

D. LANGEVIN, M.-A. BOUCHIAT, *Anisotropy of the turbidity of an oriented nematic liquid crystal* (*J. de Phys.*, t. 36, C1-197, 1975).

M.-A. BOUCHIAT, C. BOUCHIAT, *Parity violation induced by weak neutral currents in atomic physics. Part II* (*J. de Phys.*, t. 36, p. 493, 1975).

M.-A. BOUCHIAT, J. BROSSEL, P. MORA, L. POTTIER, *Properties of rubidium-argon Van der Waals molecules from the relaxation of polarized Rb atoms* (*J. de Phys.*, t. 36, p. 1075, 1975).

D. LANGEVIN, *Diffusion de la lumière par la surface libre d'un cristal liquide au voisinage d'une transition nématique-smectique A du second degré* (*J. de Phys.*, t. 36, p. 745, 1975).

E. GIACOBINO, *Determination of the hfs of the 2p levels of  $^{21}\text{Ne}$  using a cw tunable dye laser* (*J. de Phys. Lettres*, t. 36, L-65, 1975).

F. BIRABEN, E. GIACOBINO and G. GRYNBERG, *Doppler-free two-photon spectroscopy of neon* (*Phys. Rev. A.*, t. 12, 1975, p. 2444).

R. BARBE, F. LALOË et J. BROSSEL, *Very long  $^3\text{He}$  nuclear relaxation times at 4K using cryogenic coatings* (*Phys. Rev. Letters*, t. 34, p. 1488, 1975).

M. DUCLOY, *Application du formalisme des états cohérents de moment angulaire à quelques problèmes* (*J. de Phys.*, t. 36, p. 927, 1975).

M. DUCLOY, *Non-linear effects in optical pumping with lasers I. General theory of the classical limit for levels of large angular momenta* (*J. Phys. B : Atom. Molec. Phys.*, t. 9, p. 357, 1976).

C. COHEN-TANNOUDJI, *Atoms in strong resonant fields* (Frontiers in Laser Spectroscopy, Les Houches 1975, session XXVII, R. Balian, S. Haroche and S. Liberman, editors : North Holland, 1976).

C. COHEN-TANNOUDJI, *Atoms in strong resonant fields : spectral distribution of the fluorescence light* (Proceedings of the 2nd International Laser Spectroscopy Conference, Springer Verlag 1975).



3) THÈSES

P. AVAN, *Etude de régimes intermédiaires entre la précession de Rabi et la décroissance exponentielle. Application à des atomes dans des champs résonnants intenses et quasimonochromatiques* (Thèse de 3<sup>e</sup> cycle, Paris, 1976).

J.-C. GAY, *Etude théorique et expérimentale de quelques processus de transfert quasi-résonnant de l'excitation par collisions en phase vapeur. Collisions en champs magnétiques intenses* (Thèse d'Etat, Paris, 1976).

G. GRYNBERG, *Spectroscopie d'absorption à deux photons sans élargissement Doppler. Application à l'étude du sodium et du néon* (Thèse d'Etat, Paris, 1976).

M<sup>me</sup> C. LHUILLIER, *Effet Zeeman d'atomes à plusieurs électrons. Etude de quelques structures de l'hélium et du néon excités par impact d'atomes neutres* (Thèse d'Etat, Paris, 1976).

ACTIVITÉS DIVERSES, CONGRÈS, CONFÉRENCES

Conférence invitée présentée à la 2<sup>e</sup> Conférence internationale de Spectroscopie Laser (Mégève, juin 1975) : *Atoms in strong resonant fields, Spectral distribution of the fluorescence light.*

Cours donné à l'Ecole d'Eté de Physique théorique (Les Houches, juillet 1975) : *Atoms in strong resonant fields.*

Conférence présentée à la Maison française d'Oxford (Oxford, février 1976) : *Atomic Physics and Lasers.*

Séminaire donné au Service de Physique théorique (Saclay, Orme des Merisiers, 1976) : *Atomes dans des champs résonnants intenses.*