

## Physique atomique et moléculaire

M. Claude COHEN-TANNOUJJI, professeur

Au cours des années antérieures, l'évolution au cours du temps d'un « petit système »  $S$  couplé à un grand « réservoir »  $R$  avait été étudiée en détail au moyen du formalisme de l'équation pilote. Une telle équation donne la vitesse de variation de l'opérateur densité réduit du petit système et permet d'étudier l'évolution des diverses observables de ce système (valeurs moyennes « à un temps »  $t$ ). Un tel formalisme avait été appliqué à l'étude d'un certain nombre de problèmes d'optique quantique : émission spontanée, spectroscopie (R.F. ou laser) de systèmes à 2 ou 3 niveaux...

Une autre approche du problème, qui consiste à partir des fonctions de corrélation des diverses observables du système, est particulièrement intéressante. Les fonctions de corrélation sont des moyennes « à deux temps »  $t$  et  $t'$  décrivant dans quelle mesure la fluctuation d'une observable  $A$  par rapport à sa valeur moyenne à l'instant  $t$  est corrélée avec la fluctuation d'une autre observable  $B$  à un autre instant  $t'$ . Les fonctions de corrélation décrivent ainsi la dynamique des fluctuations du système. De plus, il se trouve qu'elles sont directement reliées à la plupart des signaux expérimentaux susceptibles d'être mesurés sur le système. C'est pourquoi il a paru intéressant d'axer le cours de cette année sur l'étude des fonctions de corrélation d'un système quantique de manière à pouvoir aborder ultérieurement divers problèmes tels que : corrélation de photons, bruit quantique, fluctuations du vide et réaction de rayonnement...

1) Le cours commence par un rappel du modèle de Langevin pour le mouvement brownien, destiné à servir de guide pour l'analyse et l'interprétation des équations de Mori abordées dans un chapitre ultérieur. Le mouvement d'une particule lourde immergée dans un fluide est analysé en décrivant l'effet des chocs des molécules du fluide par une force de friction et une force aléatoire (force de Langevin). Après une analyse critique de l'équation de Langevin, plusieurs résultats simples sont déduits de cette équation : réponse de la particule à une excitation extérieure, étude des fluctuations dans l'état d'équilibre, dynamique de ces fluctuations illustrée

par le calcul d'un certain nombre de fonctions de corrélation (force de Langevin-vitesse, vitesse-vitesse, force totale-force totale), relation entre fluctuation et dissipation... On souligne également tout l'intérêt présenté par l'analyse harmonique d'un processus aléatoire : la transformée de Fourier d'une fonction d'autocorrélation stationnaire a la signification physique d'une puissance spectrale, mesurable expérimentalement (théorème de Wiener-Khintchine), et se transforme très simplement dans de très nombreuses opérations physiques (filtrages linéaires). Enfin, en abordant un point de vue plus général, qui n'est plus limité à l'étude des moyennes à 1 ou 2 temps, on procède à un rapide survol des notions les plus importantes relatives aux processus aléatoires classiques. On étudie plus particulièrement les processus de Markoff (de mémoire infiniment courte) dont la simplicité permet une analyse mathématique beaucoup plus poussée (équation de Fokker-Planck). On souligne également les simplifications qui apparaissent lorsque le processus est gaussien, ou lorsqu'il est à la fois markoffien et gaussien (théorème de Doob). Tous ces résultats généraux sont appliqués au mouvement brownien.

2) La deuxième partie du cours est consacrée à une présentation de la théorie de la réponse linéaire, qui sert de transition entre le modèle de Langevin du mouvement brownien (modèle phénoménologique) et la théorie de Mori qui, partant des équations exactes de Heisenberg d'un système quantique, les « réduit » sous une forme très analogue à celle de l'équation de Langevin généralisée.

La réponse d'un système quantique, initialement en équilibre thermodynamique à la température  $T$ , à une excitation faible est calculée par la théorie des perturbations dépendant du temps, au premier ordre. On introduit ainsi très naturellement toute une série de grandeurs importantes ( $A$ ,  $B$ ) relatives à des paires d'observables  $A$  et  $B$  du système (le système est « perturbé » sur  $A$  et sa « réponse » est observée sur  $B$ ) : susceptibilité généralisée, fonction spectrale, fonctions de corrélation canonique ou symétrique... Les relations qui existent entre ces diverses fonctions sont établies, ce qui permet de démontrer le premier théorème fluctuation-dissipation, leurs propriétés de symétrie sont analysées, notamment lors du renversement du sens du temps (relations d'Onsager) : le comportement de ces fonctions de réponse aux fréquences faibles et élevées, et par suite le comportement du système aux temps longs et courts, sont étudiés grâce notamment à l'établissement de règles de somme.

L'étude précédente permet alors de dégager clairement les insuffisances du modèle de Langevin. Le fait que la force de friction soit instantanée conduit à une violation des règles de somme. Ceci suggère tout naturellement de la remplacer par une force de friction retardée. Mais l'application des résultats généraux de la réponse linéaire montre alors que la force de Langevin

ne peut pas être quelconque : la fonction de corrélation de cette force doit coïncider avec la fonction de mémoire intervenant dans la friction retardée (deuxième théorème fluctuation-dissipation). La théorie de la réponse linéaire constitue ainsi un guide précieux pour améliorer l'équation de Langevin et la mettre sous une forme (équation de Langevin généralisée) qui sera celle pour laquelle une généralisation quantique existe.

3) La troisième partie du cours aborde précisément une telle généralisation quantique. L'idée générale est de partir des équations de Heisenberg du système quantique et de « réduire » ces équations au moyen d'opérateurs de projection introduits initialement par Zwanzig pour l'établissement d'équations pilotes. Après avoir introduit un produit scalaire dans l'espace de Liouville des opérateurs, ce qui permet d'isoler clairement le sous-espace des observables auxquelles on s'intéresse (généralement celles qui varient lentement par rapport aux autres), on projette les équations de Heisenberg dans ce sous-espace. On établit ainsi des équations d'évolution exactes pour les observables intéressantes (équations de Mori) qui ont une structure d'équations de Langevin généralisées. Les différents termes apparaissant dans cette équation sont analysés en détail et interprétés physiquement. La force de Langevin apparaît comme la composante « rapide » de la force agissant sur les observables intéressantes, alors que la force de friction retardée apparaît comme une « self-réaction » (réaction sur les observables lentes des observables rapides perturbées par l'évolution des observables lentes). Le lien précis entre les 2 forces est explicité (2<sup>e</sup> théorème fluctuation-dissipation).

4) Les résultats précédents sont très généraux et reposent seulement sur l'existence d'un produit scalaire dans l'espace des opérateurs. Le choix d'un tel produit scalaire dépend du problème physique étudié. La quatrième partie du cours présente une application des équations de Mori à l'étude d'un système en équilibre thermodynamique.

On montre d'abord comment le choix judicieux d'un produit scalaire, suggéré par l'étude de la réponse linéaire, permet de déduire des équations de Mori des équations exactes auxquelles satisfont les fonctions de corrélation canonique ou symétrique des observables intéressantes. De telles équations sont des équations intégrodifférentielles dont le noyau, n'est autre que la fonction de mémoire de la force de friction retardée, ou encore la fonction de corrélation de la force de Langevin. L'analogie entre fonctions de corrélation et fonctions de mémoire d'une part, propagateurs et self-énergies d'autre part, est soulignée.

On établit ensuite un certain nombre de résultats exacts concernant les fonctions de corrélation et fonctions de mémoire : relations entre les moments des transformées de Fourier-Laplace de ces deux fonctions, propriétés de symétrie, développement en fractions continues, positivité de la transformée

de Fourier de la fonction de corrélation, lien entre positivité et caractère dissipatif du système...

Les résultats précédents sont alors utilisés pour introduire un certain nombre d'approximations intéressantes. L'approximation markoffienne consiste à négliger le temps de mémoire (ou temps de corrélation) devant le temps de relaxation (temps d'évolution des variables lentes). On montre que pour une seule variable lente, une telle approximation conduit à une exponentielle décroissante pour la fonction de corrélation et, par suite, à une lorentzienne pour la densité spectrale. Le cas de plusieurs variables lentes couplées les unes aux autres est également analysé dans le cadre de cette approximation. On présente ensuite un certain nombre d'améliorations possibles à l'approximation markoffienne : choix pour la fonction de mémoire de fonctions simples dont on ajuste les paramètres grâce aux règles de somme exactes établies plus haut, utilisation du développement en fractions continues que l'on tronque après un certain nombre d'itérations.

Enfin, on souligne un certain nombre de prolongements possibles dont certains seront abordés aux cours des années ultérieures : fluctuations dans les systèmes hors d'équilibre, importance des non linéarités, couplage entre modes, critères pour trouver les variables lentes, lois de conservation et modèle hydrodynamique...

C. C.-T.

#### 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.

Douze séminaires ont été organisés :

H. HAKEN (Institut de Physique Théorique de l'Université de Stuttgart), *Synergetics, nonequilibrium phase transitions and selforganization*.

J.-C. KELLER (Laboratoire Aimé Cotton, Orsay), *Spectroscopie laser dans les systèmes à 3 niveaux : Effet Stark dynamique et Effet Kerr optiques*.

R. BALIAN (Service de Physique Théorique, C.E.N., Saclay), *Les rayons et les ondes*.

P. CAHUZAC (Laboratoire Aimé Cotton, Orsay et Université de Heidelberg), *Collisions assistées par laser*.

C. BOULET (Laboratoire d'Infrarouge, Orsay), *Elargissement et déplacement collisionnels des raies de vibration-rotation moléculaires.*

G. GOUEDARD (Laboratoire de Spectroscopie Hertzienne de l'Ecole Normale Supérieure, Paris), *Quelques études par excitation laser sur la molécule Se<sup>2</sup>.*

P.-G.-H. SANDARS (Clarendon Laboratory, Oxford), *The search for parity non-conserving optical rotation in atomic bismuth.*

W. DALBY (University of British Columbia, Vancouver et Laboratoire de Spectroscopie Hertzienne de l'Ecole Normale Supérieure, Paris), *Dissociation multiphonique de la molécule d'Iode.*

D.-G. DASH (University of Washington, Seattle et U.E.R. Scientifique, Luminy), *Surfaces and Adsorbed Atoms : New Physics.*

H.-Z. CUMMINS (City College Cuny et Laboratoire de Spectroscopie Hertzienne de l'Ecole Normale Supérieure, Paris), *Applications of laser light scattering to Brownian motion, critical phenomena and structural phase transitions.*

M. GROSS (Laboratoire de Spectroscopie Hertzienne de l'Ecole Normale Supérieure, Paris), *Effets cohérents et battements lumineux en superradiance.*

M. PINARD (Laboratoire de Spectroscopie Hertzienne de l'Ecole Normale Supérieure, Paris), *Pompage optique sélectif en vitesses.*

#### ACTIVITÉ SCIENTIFIQUE

M. Claude COHEN-TANNOUDJI 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 Paris VI (quai Saint-Bernard). Il est dirigé par M. Jean BROSSEL, Professeur à l'Université Paris VI.

Le personnel du Laboratoire comporte 12 enseignants-chercheurs (professeurs, maîtres de conférences, maîtres-assistants, agrégés-préparateurs), 23 chercheurs au C.N.R.S. (directeurs, maîtres, chargés et attachés de recherche), 4 chercheurs étrangers et 7 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 dizaine d'équipes de recherches, 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 1977 sont rapidement passés en revue dans le paragraphe suivant.

#### RÉSUMÉ DES TRAVAUX EN COURS

##### *a) Etude d'atomes ou de molécules excités produits par bombardement électronique ou par décharge*

Le but poursuivi est d'obtenir des informations sur la structure de niveaux excités atomiques ou moléculaires ainsi que sur la dynamique de certains processus (dissociation, recombinaison...) affectant ces états.

L'étude de niveaux très excités de la molécule d'Hydrogène s'est poursuivie dans les deux directions suivantes : excitation par échelons utilisant un bombardement électronique qui peuple des niveaux métastables puis une excitation optique résonnante par un laser à colorant ; absorption du rayonnement UV lointain fourni par le rayonnement synchrotron de l'anneau de collision d'Orsay (laboratoire LURE). De nouvelles informations ont été obtenues sur les durées de vie, facteurs de Landé, rendements de pré-dissociation... de plusieurs niveaux de Rydberg de  $H_2$ .

Une autre expérience en cours concerne l'étude de l'état métastable  $3s^5S$  de l'atome d'Oxygène. Une décharge faible entretenue dans une cellule renfermant un mélange d'Hélium et d'Oxygène produit en effet des atomes d'Oxygène dans un tel état. Une excitation optique de la transition  $3s^5S \rightarrow 3p^5P$  à 7773 Å permet d'orienter par pompage optique l'état  $3s^5S$  et d'observer la résonance magnétique dans cet état. Plusieurs améliorations ont été apportées au montage expérimental : utilisation d'un blindage magnétique permettant d'éliminer les fluctuations de champ magnétique, réalisation d'un banc de pompage permettant de faire varier les compositions de mélange He -  $O_2$ , remplacement de la source lumineuse (lampe à décharge) par un laser à colorant...

(J.-P. DESCOUBES, M<sup>me</sup> M. GLASS, M<sup>me</sup> L. JULIEN, F. LALOE)

b) *Bombardement par des atomes neutres*

L'excitation d'atomes ou de molécules par un jet d'atomes neutres permet d'opérer dans des champs magnétiques élevés car le jet neutre n'est pas dévié par le champ magnétique (à la différence d'un jet d'électrons). On peut ainsi observer sur la lumière émise par les atomes excités des résonances de croisements de niveaux apparaissant en champ magnétique élevé et dont la position fournit des informations nombreuses sur les structures fines et facteurs de Landé orbitaux.

L'ensemble des résultats très précis obtenus sur la structure du multiplet  $n = 4$  de l'ion  $\text{He}^+$  a été rédigé et publié.

Une anomalie de couplage (déviation par rapport au couplage de Racah) détectée auparavant sur la configuration  $4d$  du Neon, et confirmée depuis par d'autres expériences de spectroscopie à 2 photons, a incité à entreprendre l'étude d'autres configurations voisines,  $3d$  et  $5d$ , du Neon, ce qui nécessite des champs magnétiques plus élevés, de l'ordre de 21 000 gauss. Les premiers résultats obtenus sur les niveaux  $3d_4$  et  $3d'_4$  ne semblent, au stade actuel, présenter aucune anomalie (couplage de Racah quasi-pur). Une panne de la source d'ions de l'appareillage a interrompu momentanément la série de mesures et nécessité d'importantes modifications du dispositif expérimental.

(J.-P. FAROUX, M<sup>me</sup> C. LHULLIER, N. BILLY)

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

La méthode d'orientation par pompage optique est appliquée à divers atomes de gaz rares (He, Ne, Xe, Kr) portés dans des niveaux métastables par une décharge faible. L'orientation ainsi introduite dans les niveaux métastables est transférée par collision à d'autres niveaux (fondamental ou excités) que l'on peut ainsi étudier.

Le niveau métastable  $1s_5$  ( $^3P_2$ ) de l'isotope  $^{21}\text{Ne}$  a été orienté optiquement au moyen d'un laser à colorant dont le dispositif de sélection de mode (double Michelson) a été mis au point au Laboratoire et s'est révélé très performant. Le caractère très monochromatique de l'irradiation laser permet d'orienter une classe de vitesses bien définie et de réaliser ainsi un pompage optique sélectif en vitesses. Un faisceau « sonde » prélevé sur le faisceau laser de pompage est utilisé pour la détection du pompage. En balayant la fréquence du laser, on a observé des résonances étroites, correspondant à une situation où les deux faisceaux sont en résonance avec la même classe de vitesses, superposées à des fonds plus larges donnant des informations sur la manière dont les collisions atomiques font passer l'orientation d'une classe

de vitesses à une autre. Des informations intéressantes ont été également obtenues en induisant des résonances magnétiques sur le niveau  $^3P_2$ .

Une autre direction de recherche concerne l'étude de l'isotope  $^3\text{He}$  et des propriétés nouvelles que l'on pourrait attendre du fluide constitué par des atomes  $^3\text{He}$  dont les spins nucléaires seraient tous orientés dans la même direction. Certaines de ces modifications (par rapport au fluide non polarisé) ont été évaluées théoriquement : modification des coefficients de transport, des coefficients du viriel, des diagrammes de changement de phase... Sur le plan expérimental, l'effort a porté d'une part sur diverses améliorations de l'appareillage destiné à étudier la relaxation nucléaire de  $^3\text{He}$  sur des enduits cryogéniques, d'autre part sur l'extension vers l'infrarouge, du domaine de longueurs d'onde dans lequel fonctionnent les lasers à colorant. L'obtention d'une polarisation nucléaire appréciable de  $^3\text{He}$  nécessite en effet d'une part une relaxation aussi faible que possible lors des collisions sur la paroi, d'autre part une source lumineuse aussi brillante que possible à la longueur d'onde de  $1,08 \mu$  qui permet de réaliser le pompage optique de l'Hélium.

(J. BROSEL, F. LALOE, M<sup>me</sup> M. LEDUC, M. PINARD, M<sup>me</sup> V. LEFEVRE-SEGUIN, C. AMINOFF, P.-J. NACHER)

d) *Violation de la parité induite par les courants neutres en Physique Atomique*

Le but de cette expérience est d'essayer d'observer les effets des courants neutres à composante électronique et hadronique en Physique Atomique afin de pouvoir tester si les interactions correspondantes violent la parité tout en conservant la symétrie de renversement du temps, comme le prévoient certains modèles théoriques unifiant les interactions faibles et électromagnétiques (modèle de Weinberg-Salam par exemple).

Une telle expérience, suggérée initialement par C. Bouchiat et M.-A. Bouchiat, consiste à exciter, au moyen d'un laser à colorant, une transition fortement interdite d'un atome lourd et à essayer d'observer un dichroïsme circulaire ou un pouvoir rotatoire éventuels, caractéristiques d'une violation de la parité. L'élément étudié au Laboratoire est le Cesium (transition  $6S_{1/2} - 7S_{1/2}$  doublement interdite à  $5393,5 \text{ \AA}$ ) qui présente l'intérêt de conduire à des calculs de Physique Atomique plus simples que le Bismuth étudié par d'autres laboratoires dans le monde.

Au cours de l'année écoulée l'effort a porté essentiellement sur diverses améliorations du montage expérimental, en vue d'accroître la sensibilité des mesures : mise au point d'une cellule multipassage à miroirs internes qui permet de faire effectuer au laser une série d'allers et retours dans la



cellule et d'augmenter par suite le signal de fluorescence, stabilisation en fréquence et en intensité du faisceau laser, amélioration du détecteur infra-rouge mesurant la fluorescence à  $1,36 \mu$  sur la transition  $7S_{1/2} - 6P_{1/2}$ , allongement du temps de mesure... La limite supérieure assignée à l'amplitude de violation de la parité a été abaissée de  $2 \cdot 10^{-9} e a_0$  ( $e$  : charge de l'électron,  $a_0$  : orbite de Bohr) à  $2,8 \cdot 10^{-10} e a_0$  à 90 % de confiance. D'autres améliorations sont en cours pour se rapprocher de la valeur  $1.7$  à  $1.3 \cdot 10^{-11} e a_0$  prévue par le modèle théorique de Weinberg-Salam.

Par ailleurs, un nouveau montage est en construction pour l'étude de transitions fortement interdites à l'aide d'un laser non plus continu, mais en impulsions.

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

e) *Etude d'effets liés aux interactions entre un électron ou un atome et une onde électromagnétique*

La première ligne de recherches consiste à essayer de dégager une interprétation physique simple des corrections radiatives pour l'électron. Une méthode d'hamiltonien effectif a été développée qui permet de séparer clairement l'effet des fluctuations du vide du champ électromagnétique, qui font vibrer la charge et le spin de l'électron, et celui de la réaction de rayonnement. On a pu montrer que l'anomalie  $g-2$  du moment magnétique de l'électron était essentiellement due au couplage avec les modes de fréquence basse ( $\hbar\omega < mc^2$ ) et que la réaction de rayonnement jouait un rôle prépondérant. Par contre, le déplacement de Lamb est essentiellement dû aux fluctuations du vide. Un article détaillé a été rédigé sur ces problèmes. On essaie actuellement d'appliquer la méthode de l'hamiltonien effectif à l'interprétation des effets de polarisation du vide et de renormalisation de la charge.

Par ailleurs, une nouvelle méthode de compensation de l'effet Doppler a été analysée en détail sur le plan théorique. L'idée consiste à irradier une vapeur atomique par un faisceau laser quasi-résonnant intense. Les niveaux d'énergie des atomes sont perturbés et déplacés d'une quantité qui dépend non seulement de l'intensité lumineuse, mais également du désaccord entre les fréquences atomiques et la fréquence apparente du laser dans le référentiel au repos de l'atome, donc de la vitesse de l'atome. Sous certaines conditions, cette dépendance en vitesse des modifications des fréquences de Bohr atomiques peut compenser l'effet Doppler apparaissant lors de l'émission de lumière par l'atome. Une caractéristique intéressante de cet effet est sa grande anisotropie : si l'effet Doppler pouvait être compensé pour une direction d'émission, il serait doublé pour la direction opposée. Un

nouveau montage expérimental est en cours de construction pour essayer d'observer cet effet sur diverses transitions de l'atome de Neon.

(C. COHEN-TANNOUJJI, J. DUPONT-ROC, S. REYNAUD, F. HOFFBECK, C. FABRE)

f) *Etude des états de Rydberg des atomes alcalins*

Des états de Rydberg très excités ( $n > 20$ ) d'atomes alcalins sont peuplés par excitation par échelons d'un jet atomique irradié par 2 impulsions lumineuses délivrés par 2 lasers à colorant pompés par le même laser à Azote.

Des expériences de double résonance ont été réalisées dans les niveaux  $nS$  et  $nD$  ( $23 < n < 41$ ) du Sodium en collaboration avec le groupe de Physique des Solides de l'Ecole Normale Supérieure. Les atomes portés dans le niveau  $nS$  ou  $nD$  par l'excitation laser sont irradiés par le rayonnement microonde d'un carnotron. Les transitions  $n \rightarrow n \pm 1$  induites par ce rayonnement sont détectées par ionisation de l'atome dans un champ électrostatique. Plusieurs informations intéressantes ont été obtenues sur les états de Rydberg : défauts quantiques des niveaux S, P, D, F pour  $20 < n < 40$ , structure fine des niveaux P, effet Stark quadratique et linéaire... Des améliorations sont actuellement portées au montage expérimental en vue d'allonger le temps d'interaction avec la microonde et de réduire l'effet des champs électrostatiques parasites et du rayonnement thermique.

Par ailleurs, des battements de superradiance ont été observés dans l'émission superradiante d'atomes de Cesium excités percussivement dans l'état  $7P_{1/2}$ . L'émission est observée sur la transition  $7P_{1/2} - 7S$  à  $3,1 \mu$ . Lorsque l'impulsion laser est filtrée par un interféromètre Fabry-Perot externe, qui lui donne une largeur spectrale de l'ordre de 100 Mhz, on observe des fréquences de battement différentes suivant que l'émission superradiante est observée dans le sens de l'onde laser excitatrice ou dans le sens opposé. Ceci permet de prouver que les battements observés proviennent de l'interférence entre les ondes superradiantes émises par des atomes de vitesses différentes, préparés dans des niveaux hyperfins différents.

(S. HAROCHE, C. FABRE, M. GROSS, J.-M. RAIMOND, P. GOY)

g) *Spectroscopie à plusieurs photons sans effet Doppler*

Lors de l'absorption par un atome de 2 photons de même fréquence se propageant en sens inverse, il y a compensation exacte des 2 déplacements Doppler (du 1<sup>er</sup> ordre) associés aux 2 photons et la condition de résonance devient indépendante de la vitesse de l'atome. On obtient alors des raies d'absorption très fines ne présentant plus aucun élargissement Doppler.

Au cours de l'année écoulée une telle méthode a permis d'étudier en détail la relaxation collisionnelle du niveau 4d du Sodium. Les atomes sont excités par absorption de 2 photons dans un sous-niveau bien défini du niveau 4d et on étudie ensuite comment les collisions qu'ils subissent le transfèrent vers d'autres sous-niveaux. Des informations intéressantes ont été obtenues sur les potentiels d'interaction alcalins-gaz rares.

Un nouveau projet portant sur l'étude des niveaux de Rydberg en champ magnétique très élevé est entrepris. L'expérience est prévue sur le Rubidium, les états de Rydberg étant préparés par excitation à 2 photons à partir du fondamental. On espère pouvoir étudier des niveaux suffisamment excités dans des champs magnétiques suffisamment intenses pour que l'énergie magnétique soit supérieure ou comparable à l'énergie de Coulomb. L'expérience acquise au Laboratoire sur les collisions en champ magnétique élevé devrait permettre d'étudier avec profit les perturbations collisionnelles de ces états.

Enfin, on a poursuivi la mise au point d'un laser en impulsions de grande puissance et de faible largeur spectrale qui devrait permettre d'accroître le domaine d'application de la spectroscopie à 2 photons sans effet Doppler. (B. CAGNAC, G. GRYNBERG, F. BIRABEN, M<sup>m\*</sup> E. GIACOBINO, J.-C. GAY, M<sup>lle</sup> K. BEROFF, M. BASSINI)

#### h) *Pompage optique des molécules*

Une excitation laser sélective de niveaux excités moléculaires est utilisée pour obtenir divers types d'informations sur ces niveaux.

Sur la molécule d'Iode, les problèmes théoriques posés par les prédisso-ciations gyroscopique et hyperfine de l'état B ont été repris en grand détail. Un article est en cours de publication sur le traitement de l'hamiltonien hyperfin moléculaire dans le formalisme des opérateurs tensoriels irréductibles. On procède également à l'analyse des conditions dans lesquelles on pourrait éventuellement observer des profils de Fano en absorption moléculaire vers un état faiblement prédisso-cié.

Sur la molécule de Sélénium, plusieurs perturbations locales des niveaux  $v = 1$  et  $2$  de l'état B ont été étudiés à travers leurs influences sur la durée de vie et les facteurs de Landé des niveaux d'énergie concernés.

Enfin, on a pu observer avec un excellent rapport signal sur bruit les transitions d'absorption  $v = 0 \rightarrow v = 5$  de la molécule HD en plaçant la cellule dans la cavité d'un laser à colorant et en détectant l'excitation par l'augmentation de pression qui en résulte par relaxation vibration-translation dans la cellule, au moyen d'un microphone. Les forces d'oscillateur des

transitions observées sont de l'ordre de  $10^{-12}$ , ce qui prouve l'intérêt considérable de cette technique par rapport aux techniques d'absorption qui nécessiteraient des longueurs d'interaction considérables.

(J.-C. LEHMANN, G. GOUEDARD, M. BROYER, J. VIGUE, W. DALBY)

i) *Diffusion de la lumière par les interfaces liquides*

L'étude des films monomoléculaires est actuellement abordée par une méthode d'analyse de la répartition en fréquence de la lumière diffusée par les ondes de surface excitées thermiquement.

On étudie d'une part des films modèles d'acide gras (myristique et stéarique) sur l'eau, ce qui permet de déterminer les propriétés viscoélastiques de ces films avec une précision que l'on cherche actuellement à améliorer, d'autre part des films mixtes savon-alcool à des interfaces eau-huile. Ces derniers systèmes présentent des tensions interfaciales très basses et sont intéressants d'un point de vue pratique dans plusieurs domaines (stabilité des émulsions, récupération assistée du pétrole...). On envisage de coupler les mesures de tension interfaciale, par la technique mentionnée plus haut, à des mesures d'intensité réfléchie donnant l'épaisseur de l'interface et à des mesures de diffusion en volume donnant la taille des micelles éventuellement présentes dans les 2 phases en contact.

Dans le but de tester la dernière technique, on a effectué des mesures de diffusion en volume sur des microémulsions obtenues par mélange (en proportions différentes) des mêmes constituants. Les résultats obtenus sont en bon accord avec ceux relatifs à la taille des micelles mesurées par ailleurs en diffusion de neutrons et sédimentation par le groupe de C. Taupin au Collège de France.

(J. MEUNIER, M<sup>me</sup> A.-M. CAZABAT, M<sup>me</sup> D. LANGEVIN, M<sup>lle</sup> C. GRIESMAR)

j) *Applications de techniques de diffusion de la lumière*

Les recherches correspondantes se sont développées dans les directions suivantes :

1- Etude par diffusion Raman des collisions dans les gaz moléculaires, par l'intermédiaire de mesures de largeurs de raie Raman ou de spectres induits par collisions

Un montage de haute résolution et de grande luminosité a été mis au point en vue d'étudier la structure de la branche Raman vibrationnelle Q de l'oxygène et son évolution avec la pression. Parallèlement à ce travail

expérimental, des calculs numériques précis ont été faits sur diverses fonctions d'autocorrélation relatives à des particules en interaction dans un gaz, dans le but de déterminer l'influence de la précision de la détermination des trajectoires de ces particules.

## 2 - Etude des fluides visqueux

On s'intéresse depuis plusieurs années aux propriétés thermiques d'un fluide qui présente le phénomène de relaxation structurale. Après avoir fait un grand nombre d'expériences dans un large domaine de températures et de vecteurs d'onde (faisant ainsi varier le temps de diffusion de la chaleur et le temps de relaxation structurale), on a élaboré un modèle phénoménologique qui rend compte de toutes les observations. Ce modèle, dit de viscoélasticité généralisée, introduit dans les équations de l'hydrodynamique une viscosité longitudinale et une diffusivité thermique qui dépendent de la fréquence.

## 3 - Mise au point d'une nouvelle technique de détermination du coefficient de diffusion thermique

Des expériences de diffusion Rayleigh forcée dans un mélange ont montré que le gradient thermique créé à l'instant initial entraîne un gradient de concentration proportionnel au coefficient de diffusion thermique que l'on peut détecter en observant la relaxation du système. Des mesures ont été réalisées sur le mélange  $\text{CS}_2$ -acétone.

## 4 - Diffusion de la lumière dans les gaz polyatomiques

Lorsque le libre parcours moyen dans un gaz n'est pas très court devant l'inverse du vecteur d'onde de diffusion (régime cinétique), et que ce gaz est un gaz polyatomique où la relaxation rotationnelle est rapide, les modèles de l'hydrodynamique disponibles sont simplistes et doivent être testés à l'aide d'expériences précises. Dans ce but, on a construit un système à analyse spectrale utilisant un Fabry-Pérot plan avec mise en œuvre d'un processus de réalignement automatique de l'interféromètre, dispositif qui permet d'effectuer des enregistrements de plusieurs heures. On a pu ainsi mettre en évidence des écarts systématiques entre théorie et expérience dans le cas de  $\text{CO}_2$  ou  $\text{SF}_6$  au début du régime cinétique.

## 5 - Etude de la transition solide liquide

Une expérience est entreprise sur le salol (salicylate de phényl qui fond à  $43^\circ\text{C}$ ), en vue d'étudier la transition solide-liquide au moyen des techniques de diffusion de la lumière. On mesure les coefficients élastiques par diffusion Brillouin dans le solide et le liquide (au-dessus de la tempé-

rature de fusion et à l'état surfondu). On étudie aussi les spectres Raman basse fréquence dans le solide et dans le liquide.

(P. LALLEMAND, M<sup>me</sup> A.-M. CAZABAT, M<sup>me</sup> ALLAIN-DEMOULIN, C. BERARD, H.-Z. CUMMINS, K. THYAGARAJAN)

PUBLICATIONS DU LABORATOIRE EN 1977

M. GLASS-MAUJEAN, *Two step excitation of molecular hydrogen (J. de Phys. Lettres, 38, L. 427, 1977).*

M. GLASS-MAUJEAN, *Dissociative excitation of H<sub>2</sub> by electron impact (Comments on atomic and molecular Physics, 7, 83, 1977).*

J.-C. GAY and W. SCHNEIDER, *Probing Na-Na resonant collisions mechanisms with strong magnetic fields (Physics Letters, 62 A, 403, 1977).*

M. BROYER, J. VIGUE and J.-C. LEHMANN, *Hyperfine predissociation of molecular iodine (J. Chem. Phys., 64, 4793, 1977).*

J. VIGUE, M. BROYER and J.-C. LEHMANN, *Fluorescence yield of individual hyperfine components in the B state of I<sub>2</sub> : a test of the hyperfine predissociation (J. Phys., B 10, 379 L, 1977).*

F. BIRABEN, B. CAGNAC, E. GIACOBINO and G. GRYNBERG, *Broadening and shift of the sodium 3S-4D and 3S-5S lines perturbed by noble gases (J. de Phys., B 10, 2369, 1977).*

M. BASSINI, F. BIRABEN, B. CAGNAC and G. GRYNBERG, *Raman transients observed in Doppler free two-photon spectroscopy (Opt. Comm., 21, 263, 1977).*

E. GIACOBINO, F. BIRABEN, G. GRYNBERG and B. CAGNAC, *Doppler free two photon spectroscopy of neon. I - Fine structure and hyperfine constants for the 4d' subconfiguration (J. de Phys., 38, 623, 1977).*

G. GRYNBERG, F. BIRABEN, E. GIACOBINO and B. CAGNAC, *Doppler free two photon spectroscopy of neon. II - Line intensities (J. de Phys., 38, 629, 1977).*

C. GRYNBERG and B. CAGNAC, *Doppler free multiphotonic spectroscopy (Reports on Progress in Physics, 40, 791, 1977).*

C. COHEN-TANNOUDJI, *Effect of a non resonant irradiation on atomic energy levels (Metrologia, 13, 161, 1977).*

C. COHEN-TANNOUJJI and S. REYNAUD, *Simultaneous saturation of 2 atomic transition sharing a common level* (*J. de Phys.*, B 10, 2311, 1977).

C. COHEN-TANNOUJJI and S. REYNAUD, *Effets des dégénérescences Zeeman sur la fluorescence de résonance induite par un laser intense* (*J. de Physique Lettres*, 38, L-173, 1977).

C. COHEN-TANNOUJJI and M. SALOUR, *Observation of Ramsey's interference fringes in the profile of Doppler free 2 photon resonances* (*Phys. Rev. Letters*, 38, 757, 1977).

C. FABRE, P. GOY and S. HAROCHE, *Millimetre resonance in Na Rydberg levels detected by field ionization : quantum defects and stark effect studies* (*J. Phys. B Letters*, 10, L 183, 1977).

N. BILLY, Cl. LHUILLIER et J.-P. FAROUX, *Etude de la structure du multiplet  $n = 4$  de l'ion  ${}^4\text{He}^+$  excité par jet d'atomes neutres* (*J. Phys. Lett.*, 38, L 429, 1977).

Cl. LHUILLIER and J.-P. FAROUX, *Hamiltonian of a many-electron atom in an external magnetic field and classical electrodynamics* (*J. de Phys.*, 38, 753, 1977).

A. OMONT, *Resolution of the density matrix into irreducible tensor components and applications in Quantum Optics* (*Progress in Quantum Electronics*, 5, 69, 1977).

J.-C. GAY, *Excitation transfer, broadening and shift of the lines in nearly resonant collisions between two isotopes* (*J. Phys.*, B 10, n° 7, 1269, 1977).

M. PINARD et M. LEDUC, *Etude par pompage optique de l'échange de métastabilité dans le néon* (*J. de Phys.*, 38, 609, 1977).

V. LEFEVRE-SEGUIN and M. LEDUC, *Metastability-exchange and depolarising collisions in xenon and krypton* (*J. de Phys.*, B 10, 11, 2157, 1977).

R.-A. HEGSTROM and Cl. LHUILLIER, *Reinterpretation of the « relativistic mass » correction to the spin magnetic moment of a moving particule* (*Phys. Rev.*, A 15, 1787, 1977).

M. BERARD and P. LALLEMAND, *Collision-induced light scattering in low density neon gas* (*Molecular Physics*, 34, 251, 1977).

C. ALLAIN and P. LALLEMAND, *Principe de la détermination du coefficient de diffusion thermique par diffusion Rayleigh forcée* (*C.R.A.S.*, 285 B, 187, 1977).

C. CAGNAC, S. HAROCHE and S. LIBERMAN, *Doppler free laser spectroscopy in laser spectroscopy* (*R. Balian, S. Haroche and S. Liberman Editors, North Holland, 1977*).

THÈSES

• *Thèses d'Etat*

F. BIRABEN, *Spectroscopie d'absorption multiphotonique sans élargissement Doppler : Applications aux collisions ; Cas de trois photons.*

M. BROYER, *Etude de l'état B de la molécule d'iode par excitation laser : propriétés magnétiques. Prédissociations gyroscopique et hyperfine.*

R. BARBE, *Pompage optique de  $^3\text{He}$  à basse température.*

• *Thèse 3<sup>e</sup> cycle*

M. BASSINI, *Phénomènes transitoires en spectroscopie d'absorption à 2 photons sans élargissement Doppler. Cas intermédiaires entre la fluorescence de résonance et la diffusion Raman.*

ACTIVITÉS DIVERSES, CONGRÈS, CONFÉRENCES

Conférence invitée à la Conférence Internationale sur l'optique quantique, la cohérence et les processus multiphotoniques (Rochester, juin 1977), *Dressed atom approach to resonance fluorescence.*

Conférence invitée au Colloque International C.N.R.S. sur les états atomiques couplés à un continuum (Aussois, juin 1977), *Discrete state coupled to a continuum. Weisskopf-Wigner exponential decay and Rabi oscillation.*

Conférence invitée à la Réunion de la Société Française de Physique (Poitiers, juillet 1977), *Atomes dans des champs intenses.*

Conférence invitée à la 3<sup>e</sup> Conférence Internationale de Spectroscopie Laser (Jackson Lake, juillet 1977), *Spontaneous Raman effect in intense laser fields.*

Mission en Italie. Série de Conférences à l'Institut de Physique de l'Université de Palerme et à l'Ecole Normale Supérieure de Pise (mai 1977).

Conférences à l'Ecole Polytechnique de Zurich (avril 1977) et à l'Ecole Polytechnique de Lausanne (novembre 1977).

Série de cinq cours sur l'interaction matière-rayonnement donnés à l'« Advanced Study Institute on Quantum Electronics » (Bangalore, Inde, décembre 1977).