

## **Physique atomique et moléculaire**

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

Le cours de l'année 1998-1999 a poursuivi l'étude entreprise au cours de l'année antérieure de la condensation de Bose-Einstein des gaz atomiques ultrafroids. Il a porté plus particulièrement sur l'analyse des effets nouveaux introduits par les interactions entre atomes.

La première séance passe rapidement en revue les résultats obtenus au cours de l'année antérieure sur la condensation de Bose-Einstein de gaz parfaits de bosons. Quelques résultats expérimentaux récents sont présentés, montrant l'importance des interactions entre atomes et la nécessité de les prendre en compte. L'organisation générale du cours est esquissée.

### **Collisions à très basse énergie — Longueur de diffusion**

Dans les gaz atomiques ultrafroids où se produit la condensation de Bose-Einstein, les processus élémentaires d'interaction entre atomes sont des collisions à deux ou trois corps, élastiques et inélastiques. A des densités pas trop élevées, les collisions binaires, entre deux atomes, sont prépondérantes. Un premier objectif du cours est de décrire quantiquement de telles collisions et d'introduire les paramètres physiques essentiels qui les caractérisent à la limite des très basses énergies qui sont celles d'atomes ultrafroids. On se limite pour simplifier à des collisions élastiques.

Après de brefs rappels sur la théorie de la diffusion par un potentiel central et sur le développement en ondes partielles de l'amplitude de diffusion, on analyse les simplifications qui apparaissent à très basse énergie. La longueur d'onde de Broglie des particules entrant en collision est alors très grande, et c'est seulement dans l'onde de moment angulaire orbital relatif nul (onde  $s$ ) que les particules peuvent s'approcher suffisamment près l'une de l'autre pour ressentir l'effet de leur potentiel d'interaction. Mathématiquement, il est légitime alors de négliger tous les déphasages des diverses ondes partielles autres que le déphasage

$\delta_0$  de l'onde. A partir de  $\delta_0$  on introduit une autre grandeur physique importante, la longueur de diffusion  $a$ , et on l'interprète géométriquement à partir du prolongement à faible distance de la forme asymptotique de la fonction d'onde radiale correspondant à l'onde  $s$ . Le déphasage  $\delta_0$  de l'onde  $s$  dépend de l'énergie, plus précisément du nombre d'onde  $k$  décrivant les oscillations à grande distance de la fonction d'onde radiale  $s$ . A l'ordre le plus bas en  $k$ ,  $\delta_0(k) = -ak$ . L'étude des termes d'ordre supérieur en  $k$  fait apparaître une autre grandeur physique importante, la portée effective  $r_e$ . On peut ainsi obtenir pour l'amplitude de diffusion une expression analytique où apparaissent  $a$ ,  $k$  et  $r_e$ . On montre enfin que, si le potentiel d'interaction admet un état lié d'énergie très faible, dont la fonction d'onde décroît exponentiellement à grande distance avec une longueur caractéristique  $\xi$ , la longueur de diffusion  $a$  est très voisine de  $\xi$ .

Les notions précédentes sont illustrées en détail sur des potentiels en créneau carré, situation où des expressions analytiques peuvent être obtenues pour les fonctions d'onde radiales  $s$ . Un cas particulièrement intéressant est celui des potentiels carrés attractifs de profondeur  $V_0$ . Lorsqu'on fait croître  $V_0$  à partir de 0, le nombre d'états liés dans le puits croît de zéro à l'infini. Toutes les fois qu'un nouvel état lié apparaît, avec une énergie très proche de celle du bord du puits, la longueur de diffusion  $a$  diverge, en passant de  $-\infty$  à  $+\infty$ . Un tel phénomène est étudié en détail au moyen de constructions graphiques. A partir de l'expression établie plus haut de l'amplitude de diffusion en fonction de  $a$ ,  $k$  et  $r_e$ , on introduit également la notion de résonance à énergie nulle apparaissant sur les variations avec  $k$  de la section efficace de diffusion, au voisinage d'une divergence de la longueur de diffusion  $a$ .

## Pseudopotentiel

Le vrai potentiel d'interaction entre deux atomes conduit en général à des calculs non aisés, ne permettant pas d'obtenir des expressions analytiques simples. C'est la raison pour laquelle on essaie souvent de remplacer le vrai potentiel par un potentiel d'expression mathématique plus simple, appelé pseudopotentiel, et donnant les mêmes déphasages, ou tout au moins la même longueur de diffusion que le vrai potentiel. Le pseudopotentiel donnera donc le bon comportement asymptotique des fonctions d'onde pour des distances grandes entre les atomes. Par contre, il ne décrira pas correctement les corrélations à courte distance. Cependant, si le gaz est dilué, les atomes seront la plupart du temps éloignés les uns des autres et on peut espérer que l'erreur commise sera négligeable.

On commence par étudier un pseudopotentiel en fonction delta,  $V_\delta(\vec{r}) = g\delta(\vec{r})$ , où  $\delta(\vec{r})$  est la fonction delta de Dirac et  $g$  une constante. Si l'on impose à  $V_\delta$  de redonner la même longueur de diffusion  $a$  que le vrai potentiel  $V$  à l'ordre le plus bas en  $g$ , c'est-à-dire à l'approximation de Born, on obtient une équation simple reliant  $g$  à  $a$ , et  $V_\delta$  est entièrement défini. Il est possible alors de comparer les prédictions effectuées à partir de  $V_\delta$  et du vrai potentiel  $V$  sur les énergies et

les fonctions d'onde des états liés obtenus quand on ajoute au potentiel une paroi réfléchissante à très grande distance  $R$  (boite sphérique). Alors que les prédictions sur les énergies et les formes asymptotiques des fonctions d'onde coïncident à l'ordre 1 en  $g$  pour  $V$  et  $V_\delta$ , on trouve des différences spectaculaires à l'ordre 2 en  $g$ . Les déplacements de niveaux à l'ordre 2 en  $V_\delta$  divergent !

On introduit alors un autre pseudopotentiel  $V_{pseudo}(\vec{r})$ , d'expression mathématique légèrement plus compliquée que celle de  $V_\delta(r)$ , ne souffrant pas des mêmes défauts. Il conduit pour l'amplitude de diffusion à la même expression que le vrai potentiel  $V$ , avec toutefois une portée effective  $r_e$  nulle. A très basse énergie, quand on peut se limiter aux termes d'ordre le plus bas en  $k$ ,  $V_{pseudo}$  et  $V$  sont donc équivalents.

On discute enfin un paradoxe lié au fait que  $V_{pseudo}$  et  $V$  ont les mêmes éléments de matrice entre fonctions d'onde non perturbées (ordre 0 en  $g$ ). Comment peut-on alors obtenir pour les déplacements d'énergie d'ordre 2 en  $g$  un résultat fini avec  $V_{pseudo}$  et divergent avec  $V_\delta$  ? L'étude d'un exemple simple permet de montrer que la difficulté précédente est liée à un problème de convergence non uniforme et les précautions qu'il faut prendre quand on utilise  $V_\delta$  sont explicitées.

### Équation de Gross-Pitaevskii

A température nulle ( $T=0^0K$ ), un ensemble de  $N$  bosons sans interactions mutuelles, piégés dans un puits de potentiel  $V_{ext}(\vec{r})$ , forme un condensat où chaque boson est dans le même état quantique, l'état fondamental  $u_0$  du piège. En présence d'interactions, la structure d'un tel condensat est modifiée. Il faudrait en principe déterminer l'état fondamental du Hamiltonien  $H$  du système global qui est la somme de l'énergie cinétique des particules  $E_{cin}$ , de leur énergie de piégeage  $E_{piège}$  dans  $V_{ext}$ , et de leur énergie d'interaction  $E_{int}$ . La détermination exacte de l'état fondamental de est en général impossible et il faut avoir recours à des approximations.

On présente une recherche d'un état fondamental approché de  $H$  basée sur un calcul variationnel où la fonction d'onde  $\psi$  de l'état fondamental est prise sous forme d'un produit de  $N$  fonctions d'ondes identiques  $\varphi_0(\vec{r})$ . Le problème alors est de déterminer quel est le meilleur choix possible pour  $\varphi_0$  conduisant à la valeur moyenne de  $H$  la plus basse possible.

Les équations variationnelles exprimant que la valeur moyenne de  $H$  dans  $\psi$  est minimale conduisent alors pour  $\varphi_0$  à une équation non linéaire appelée équation de Gross-Pitaevskii. Son interprétation physique est très claire. Elle exprime que chaque particule, se trouvant chacune dans l'état  $\varphi_0$ , se déplace dans un potentiel qui est la somme du potentiel de piégeage  $V_{ext}(\vec{r})$  et du potentiel d'interaction moyen créé par les  $N-1$  autres. La théorie ainsi obtenue est donc une théorie de champ moyen. La valeur propre apparaissant dans l'équation n'est

autre que le potentiel chimique. A partir de l'équation de Gross-Pitaevskii, sont déduites un certain nombre de relations générales entre les valeurs moyennes de  $E_{cin}$ ,  $E_{piège}$  et  $E_{int}$ .

Une première application de l'équation de Gross-Pitaevskii est alors présentée. Il s'agit d'étudier la forme du condensat dans une boîte cubique aux parois réfléchissantes. On trouve que la solution de l'équation est une fonction qui reste constante à l'intérieur de la boîte et qui s'annule quand on s'approche des parois sur une distance caractéristique  $\xi_0$ , appelée longueur de relaxation, et dont on donne l'expression en fonction de la densité spatiale moyenne des particules  $n_0$  et de la longueur de diffusion. L'interprétation physique de l'expression de  $\xi_0$  est donnée comme résultant d'un meilleur compromis possible entre énergie d'interaction qui augmente quand  $\xi_0$  croît et énergie cinétique qui décroît quand  $\xi_0$  croît.

### Structure du condensat dans un piège harmonique

A partir de l'équation de Gross-Pitaevskii, il est possible d'aborder simplement un certain nombre de problèmes relatifs à la structure d'un condensat de  $N$  atomes piégés dans un potentiel harmonique  $V_{ext}(r) = m\omega_0^2 r^2/2$ . Comment les interactions entre atomes modifient-elles la forme du condensat ? Quel est le paramètre qui caractérise l'importance des interactions ? Un condensat stable peut-il exister quand la longueur de diffusion est négative, c'est à dire quand les interactions effectives entre atomes sont attractives ?

Dans une première approche très qualitative, on étudie l'ordre de grandeur des diverses énergies moyennes  $E_{cin}$ ,  $E_{piège}$  et  $E_{int}$ , exprimées en fonction du rayon  $R$  du condensat, plus précisément en fonction du paramètre sans dimension  $w = R/\sigma$  où  $\sigma$  est la largeur de la fonction d'onde de l'état fondamental du piège harmonique.  $E_{cin}$  varie comme  $N\hbar\omega_0/w^2$ ,  $E_{piège}$  comme  $N\hbar\omega_0 w^2$  et  $E_{int}$  comme  $N\hbar\omega_0 \chi/w^3$  où  $\chi$  est un paramètre sans dimension égal à  $aN/\sigma$ . Ce paramètre  $\chi$  caractérise donc l'importance des interactions qui sont négligeables si  $\chi \ll 1$ , et importantes si  $\chi \gg 1$ .

Lorsque la longueur de diffusion  $a$  est positive (interactions effectives répulsives), on trouve que l'énergie totale  $E = E_{cin} + E_{piège} + E_{int}$  a toujours un minimum quand on fait varier  $w$ , ce qui montre qu'un condensat stable existe quelle que soit la valeur de  $\chi$ . Pour  $\chi \ll 1$ , on retrouve que  $E$  est minimum pour  $w = 1$ , ce qui montre que  $R = \sigma$  (les atomes sont tous dans l'état fondamental du puits harmonique), alors que pour  $\chi \gg 1$ , la valeur de  $R$  qui minimise  $E$  est de l'ordre de  $\sigma\chi^{1/5}$ , c'est-à-dire beaucoup plus grande que  $\sigma$ : les répulsions entre atomes provoquent un « gonflement » du condensat.

Quand  $a$  est négatif (interactions effectives attractives) on trouve par contre que les variations de  $E$  avec  $w$  ne présentent un minimum que pour des valeurs

suffisamment basses de  $\chi$ , inférieures à une valeur critique  $\chi$  de l'ordre de 1. Des attractions trop fortes entre atomes déstabilisent donc le condensat.

Toutes ces conclusions qualitatives sont confirmées par des résolutions numériques de l'équation de Gross-Pitaevskii.

On montre enfin qu'une telle équation se simplifie considérablement à la limite  $\chi \gg 1$ . Le terme d'énergie cinétique peut être négligé et l'équation aux dérivées partielles non linéaire peut alors être valablement approximée par une équation algébrique d'où l'on déduit une expression analytique pour la fonction d'onde du condensat. Une telle limite est appelée limite de Thomas-Fermi. Elle conduit à des expressions analytiques simples pour le rayon du condensat, le potentiel chimique, l'énergie moyenne par particule, le rapport d'anisotropie du condensat dans un piège harmonique anisotrope, la densité d'atomes au centre du condensat.

### Transformation de Bogolubov

L'approche qui a été suivie pour établir l'équation de Gross-Pitaevskii est une approche de champ moyen où l'on ne s'intéresse qu'à l'état fondamental du système des  $N$  bosons en interaction et où l'on néglige les corrélations entre particules (les fonctions d'onde d'essai sont des produits de  $N$  fonctions d'onde identiques). Les deux séances suivantes du cours sont consacrées à la présentation d'une approche un peu plus élaborée, basée sur la transformation de Bogolubov, qui permet de corriger un certain nombre de ces limitations. Des informations plus précises peuvent ainsi être obtenues sur l'état fondamental, en particulier sur les corrélations qui existent dans cet état. On peut également étudier les premiers états excités du système, qui ne sont autres que les excitations élémentaires du système de bosons auxquelles on peut associer des « quasiparticules ».

Le cas des bosons enfermés dans une boîte (système appelé « homogène » ou « uniforme ») est plus simple à traiter que celui des bosons piégés dans un potentiel extérieur (où la densité varie dans l'espace et est donc inhomogène). Des prédictions analytiques peuvent en particulier être obtenues à partir de l'approche de Bogolubov. C'est la raison pour laquelle on se limite ici à ce cas simple. D'autres méthodes seront introduites dans les deux dernières séances du cours pour étudier les excitations élémentaires d'un gaz de bosons piégés dans un potentiel harmonique.

Le formalisme de la seconde quantification est particulièrement commode pour introduire la transformation de Bogolubov. Le Hamiltonien des  $N$  bosons en interaction est exprimé en fonction des opérateurs  $a_k$  et  $a_k^\dagger$  qui détruisent et créent une particule dans l'état quantique individuel  $k$  de la boîte, et qui obéissent à des relations de commutation caractéristiques de bosons. Le terme d'interaction  $H_{int}$  est en particulier une somme de produits de quatre opérateurs, deux de création et deux d'annihilation décrivant des collisions élémentaires où les deux états

initiaux des deux bosons entrant en collision se transforment en deux états finaux. Après un rappel bref des résultats obtenus en traitant l'effet de  $H_{int}$  par la théorie des perturbations, on introduit l'approximation à la base de la transformation de Bogolubov. A très basse température et si le gaz est suffisamment dilué, on s'attend à ce que dans l'état fondamental et les premiers états excités du système, l'état individuel d'énergie la plus basse de la boîte,  $k = 0$ , ait une population  $n_0$ , de l'ordre du nombre total  $N$  de particules, très grande devant les populations  $n_k$  des autres états individuels  $k \neq 0$ . Comme  $a_0$  et  $a_0^+$  sont de l'ordre de  $\sqrt{n_0}$ , il semble légitime de négliger dans  $H_{int}$  les termes ne contenant pas au moins deux  $a_0$  ou  $a_0^+$ . Par ailleurs, comme le commutateur entre  $a_0$  et  $a_0^+$ , de l'ordre de 1, est négligeable devant  $\sqrt{n_0}$ , on peut également oublier le caractère opératoire de  $a_0$  et  $a_0^+$  et les remplacer par  $\sqrt{n_0}$ . On obtient ainsi un Hamiltonien  $H$  qui n'est plus qu'une fonction quadratique des  $a_k$  et  $a_k^+$  avec  $k \neq 0$  et qui peut donc être diagonalisé par une transformation canonique. Cette transformation n'est autre que la transformation de Bogolubov. Elle revient à introduire des nouveaux opérateurs de destruction  $b_k$  qui sont des combinaisons linéaires de  $a_k$  et  $a_{-k}^+$ , ainsi que leurs adjoints  $b_k^+$ , de telle sorte que  $H$  puisse se réexprimer sous la forme

$$H = E_0 + \sum_{k \neq 0} \hbar\omega(k) b_k^+ b_k$$

$E_0$  est l'énergie du nouvel état fondamental, alors que  $b_k$  (et  $b_k^+$ ) détruisent (et créent) une excitation élémentaire d'énergie  $\hbar\omega(k)$ .

L'expression analytique obtenue pour  $\omega(k)$  décrit la relation de dispersion des excitations élémentaires. Pour  $k \gg 1/\xi_0$ , où  $\xi_0$  est la longueur de relaxation introduite plus haut, on trouve  $\hbar\omega(k) = \hbar^2 k^2 / 2m$ , qui n'est autre que la relation de dispersion d'une particule libre de masse  $m$ . Par contre, pour  $k \ll 1/\xi_0$ , on trouve  $\hbar\omega(k) = ck$ , qui correspond à des excitations élémentaires de type phonon,  $c$  étant la vitesse de propagation du son.

Par rapport à la valeur donnée par la théorie de champ moyen,  $E_0$  contient des termes correctifs en  $(\rho a^3)^{1/2}$ , où  $\rho$  est la densité spatiale de particules et  $a$  la longueur de diffusion. Le paramètre infiniment petit, exprimant le caractère dilué du gaz et justifiant l'approximation de Bogolubov est donc le nombre  $\rho a^3$  de particules dans un volume  $a^3$ .

L'approximation de Bogolubov permet également d'obtenir des informations intéressantes sur la fonction d'onde  $\psi_0$  du nouvel état fondamental, satisfaisant à  $b_k | \psi_0 \rangle = 0$  pour tout  $k \neq 0$ .

On peut calculer analytiquement les valeurs dans  $| \psi_0 \rangle$  des nombres moyens d'occupation  $n = \langle \psi_0 | a_k^+ a_k | \psi_0 \rangle$  des divers états individuels  $k$  et comparer  $N' = \sum_{k \neq 0} n_k$  au nombre total  $N$  de particules. Le rapport  $N'/N$  s'appelle le facteur

de dépletion quantique de l'état fondamental et se trouve lui aussi être de l'ordre de  $(\rho a_0^3)^{1/2}$ . C'est la valeur petite de ce rapport qui permet de considérer que  $n_0 = N - N'$  est prépondérant devant tous les  $n_k$  avec  $k \neq 0$ .

On peut enfin calculer la densité à deux corps dans le nouvel état fondamental, c'est-à-dire la probabilité  $\rho_{II}(\vec{r}, \vec{r}')$  de trouver une particule en  $\vec{r}$  et une autre particule en  $\vec{r}'$ . En l'absence de corrélation entre les particules,  $\rho_{II}(\vec{r}, \vec{r}')$  se factoriserait sous forme d'un produit de densités simples  $\rho_I(\vec{r})\rho_I(\vec{r}')$ ,  $\rho_I(\vec{r})$  étant la probabilité de trouver une particule en  $\vec{r}$ . On trouve bien effectivement que  $\rho_{II}(\vec{r}, \vec{r}')$  n'est pas un produit et ne tend vers un produit que quand  $|\vec{r} - \vec{r}'| \gg \xi_0$ .

### Équation de Gross-Pitaevskii dépendant du temps

Dans de nombreuses expériences, le potentiel extérieur dans lequel est plongé le condensat de Bose-Einstein est modulé dans le temps, de manière à exciter les modes propres de vibration et à mesurer les fréquences propres de ces modes. Dans d'autres expériences, ce potentiel est brusquement coupé et on observe l'expansion balistique du condensat, expansion qui est souvent essentiellement déterminée par les interactions entre les divers atomes du condensat. Les deux dernières séances du cours sont consacrées à l'étude de ces problèmes.

On commence par montrer qu'il est possible de généraliser l'équation de Gross-Pitaevskii étudiée précédemment à de telles situations dépendant du temps. La démarche suivie utilise le fait que l'équation de Schrödinger des  $N$  bosons en interaction, où apparaît le Hamiltonien complet du système incluant le potentiel d'interaction entre particules et le potentiel extérieur dépendant du temps, peut être déduite d'un principe variationnel correspondant à une action dont on rappelle l'expression. Au lieu de faire varier la fonction d'onde des  $N$  bosons dans tout l'espace de Hilbert, on se restreint à un sous espace de fonctions produits de  $N$  fonctions d'ondes individuelles, chaque particule étant décrite par la même fonction d'onde dépendant du temps  $\varphi(\vec{r}, t)$ . La fonction  $\varphi(\vec{r}, t)$  qui minimise l'action se trouve alors obéir à une équation de Schrödinger non linéaire dépendant du temps. Cette équation décrit l'évolution de chaque particule dans le potentiel extérieur dépendant du temps et dans le champ moyen créé par les  $N - 1$  autres, qui lui aussi dépend du temps, à cause de la dépendance temporelle de  $|\varphi(\vec{r}, t)|^2$ . C'est l'équation de Gross-Pitaevskii dépendant du temps.

A la limite des faibles excitations, quand le potentiel extérieur de piégeage est la somme d'une composante statique et d'une petite composante  $\delta V$  dépendant du temps, il est possible de linéariser l'équation de Gross-Pitaevskii dépendant du temps. En prenant une forme de créneau temporel pour  $\delta V$ , on peut ainsi étudier les fréquences des modes propres de vibration de faible amplitude du condensat, fréquences qui sont données par les solutions d'une équation aux valeurs propres. Une telle approche appliquée à un système homogène (bosons enfermés dans une boîte) redonne bien la relation de dispersion des excitations élémentaires obtenue précédemment à partir de la transformation de Bogolubov.

Un autre éclairage intéressant sur l'équation de Gross-Pitaevskii est obtenu en déduisant de cette équation des équations équivalentes couplées régissant l'évolution du module  $\rho(\vec{r}, t)$  et de la phase  $S(\vec{r}, t)$  de la fonction d'onde  $\varphi(\vec{r}, t)$ . A la limite des grandes densités, une approximation analogue à l'approximation de Thomas-Fermi pour un potentiel  $V_{ext}$  dépendant du temps, permet alors de transformer ces équations en des équations hydrodynamiques décrivant l'écoulement d'un fluide. Quand le potentiel extérieur est harmonique et ne dépend du temps que par l'intermédiaire des fréquences propres du piège  $\omega_i(t)$ , ces équations peuvent être simplifiées et remplacées par des équations différentielles non linéaires qui se révèlent très commodes pour étudier quantitativement les modes propres de vibration du condensat ou son expansion balistique quand le potentiel extérieur est coupé brusquement.

Plusieurs expériences récentes sont enfin passées en revue. Les observations expérimentales sont en bon accord avec les prédictions théoriques déduites de l'équation de Gross-Pitaevskii dépendant du temps, ce qui montre l'utilité d'une telle équation pour étudier la structure et la dynamique des condensats de Bose-Einstein.

C. C.T.

#### SÉMINAIRES 1998-1999

Les séminaires donnés au Collège de France ont été consacrés à la présentation et à la discussion d'un certain nombre de développements récents en physique atomique et moléculaire et en optique quantique.

Dix séminaires ont été organisés :

A. DI VIRGILIO (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Pise, Italie), « *Virgo : the gravitational wave antenna designed for low frequency detection* ».

I. BOUCHOULE (Laboratoire Kastler Brossel, ENS, Paris), « *Visualisation de la distribution en vitesses d'états vibrationnels d'un atome piégé* ».

J. SÖDING (Laboratoire Kastler Brossel, ENS, Paris), « *Collisions ultrafroides et condensation de Bose-Einstein : le cas du césium* ».

R. GRIMM (Max Planck Institut für Kernphysik und Physikalisches Institut der Universität, Heidelberg, Allemagne), « *Novel dipole-force atom traps* »

P.J. NACHER (Laboratoire Kastler Brossel, ENS, Paris), « *RMN et IRM avec de l'hélium polarisé : mesures physiques et perspectives d'applications cliniques en imagerie des poumons* ».

M. WEITZ (Max Planck Institut für Quantenoptik, Garching, Allemagne), « *Cold atoms in periodic light fields : new methods in atom optics* ».

P. STAMP (University of British Columbia and Canadian Institute for Advanced Research, Vancouver, Canada), « *Decoherence and the spin bath* ».



S. STRINGARI (Università degli Studi di Trento, Povo, Italie), « *Dynamics of trapped Bose gases : quantum versus interaction effects* ».

J.P. TOENNIES (Max Planck Institut für Strömungsforschung, Göttingen, Allemagne), « *Clusters : how many atoms are needed to make them superfluid ?* ».

F. LALOË (Laboratoire Kastler Brossel, ENS, Paris), « *Au-delà de la théorie du champ moyen : un mécanisme pour la superfluidité dans les gaz* ».

#### ACTIVITÉ SCIENTIFIQUE

M. Claude Cohen-Tannoudji effectue ses recherches au sein du Laboratoire Kastler Brossel de l'École Normale Supérieure. Il y travaille avec une équipe de chercheurs sur le thème général des interactions matière-rayonnement et du refroidissement et piégeage d'atomes par des faisceaux laser.

Ce laboratoire, qui est associé au CNRS, à l'École Normale Supérieure et à l'Université Paris VI, est implanté géographiquement, d'une part au Département de Physique de l'École Normale Supérieure (24, rue Lhomond), d'autre part à l'Université Paris VI (place Jussieu). Il est dirigé depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1994 par Mme Michèle Leduc, Directeur de Recherche au CNRS.

Le personnel du Laboratoire comporte : 16 enseignants-chercheurs (professeurs, maîtres de conférences, agrégés-préparateurs), 29 chercheurs au CNRS (directeurs, et chargés de recherche), 20 chercheurs et post-doctorants étrangers, 27 élèves de grandes écoles et thésitifs, 22 techniciens et administratifs.

Le Laboratoire est constitué d'une dizaine d'équipes de recherches, comprenant 3 à 10 chercheurs, et étudiant divers problèmes de physique atomique et moléculaire et d'optique quantique.

Un rapport d'activité scientifique est rédigé tous les deux ans pour le Comité National du CNRS. 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 1998, ainsi que celles des thèses soutenues au cours de cette même année.

#### PUBLICATIONS

1. ARDAVAN A., SCHRAMA J.M., BLUNDELL F. J., SINGLETON J., HAYES W., GOY P., KURMOO M., *Phys. Rev. Lett.* **81** (1998) p. 713 : « New Kind of magneto-optical resonance observed in the organic metal alpha-(BEDT-TTF)<sub>2</sub> K Hg (SCN)<sub>4</sub> ».

2. BLOSSEY R., KINOSHITA T., DUPONT-ROC J., *Physica A* **248** (1998) p. 247-272 : « Random-field Ising model for the hysteresis of the prewetting transition on a disordered substrate ».

3. BOIRON D., MICHAUD A., FOURNIER J.-M., SIMARD L., SPRENGER M., GRYNBERG G., SALOMON C., *Phys. Rev. A* **57** (1998) p. R4106-4109 : « Cold and dense cesium clouds in far detuned dipole traps ».
4. BORCHERT G., ANAGNOSTOPOULOS D., AUGSBURGER M., BELMILOUD D., CASTELLI C., CHATELLARD D., DAUM M., EGGER J.P., EL-KHOURY P., INDELICATO P., ELBLE, FROSCHE, GORKE, GOTTA, HAUSER, KIRCH, LENZ, NELMS, RASHID, SCHULT, SIEMS, *Hyperfine Interactions* **114** (1998) p. 157-164 : « High precision X-ray spectroscopy in hydrogen-like fermionic and bosonic atomic systems ».
5. CASTIN Y., CIRAC J.I., LEWENSTEIN M., *Phys. Rev. Lett.* **80** (1998) p. 5305-5308 : « Reabsorption of Light by Trapped Atoms ».
6. CASTIN Y., DUM R., *Phys. Rev. A* **57** (1998) p. 3008-3021 : « Low temperature Bose-Einstein condensates in time dependent traps : beyond the U(1)-symmetry breaking approach ».
7. CHAUVAT D., GUENA J., JACQUIER PH., LINTZ M., BOUCHIAT M.A., *Eur. Phys. J. D* **1** (1998) p.169-176 : « Amplification of atomic L-R asymmetries by stimulated emission : experimental demonstration of sensitivity enhancement valuable for Parity Violation measurements ».
8. COHEN-TANNOUJJI C., *Les Prix Nobel 1997, Almqvist & Wiksell International* (1998) : « Manipulating Atoms with photons ».
9. COHEN-TANNOUJJI C., *Physica Scripta* **T76** (1998) p. 33-40 : « Manipulating Atoms with photons ».
10. COHEN-TANNOUJJI C., *Review of Modern Physics* **70** n°3 (1998) p. 707-719 : « Manipulating Atoms with photons » (RPM n° 581).
11. COURTY J.M., SPÄLTER S., KÖNIG F., SIZMANN A., LEUCHS G., *Physical Review A* **58** (1998) p. 1501-1508 : « Noise-free quantum-nondemolition measurement using optical solitons ».
12. DAHL C., GOY P., KOTTHAUS J.P., *Millimeter Waves Spectroscopy of Solids*, ed. Grüner G. (Springer Verlag, 1998) p. 221-282 : « Magneto-optical millimeter wave spectroscopy ».
13. DE BEAUVOIR B., NEZ F., HILICO L., JULIEN L., BIRABEN F., CAGNAC B., ZONDY J.J., TOUAHRI D., ACEF O., CLAIRON A., *The European Physical Journal D* **1** (1998) p. 227-229 : « Transmission of an optical frequency through a 3 km long optical fiber ».
14. DELANDE D., ZAKRZEWSKI J., *Phys. Rev. A* **58** (1998) p. 466 : « Spontaneous emission of non-dispersive Rydberg wave packets ».
15. DESLATTES R.D., KESSLER E.G. JR., INDELICATO P., LINDROTH E., *Atomic and Molecular Data and Their Applications*, ed. P.J. Mohr et W.L. Wiese (American Institute of Physics, **V 414** 1998) p. 89-103 : « X-ray wavelength, new comprehensive evaluation » (Gaithersburg, M.D.).

16. DOMOKOS P., BRUNE M., RAIMOND J.M., HAROCHE S., *Euro. Phys. Journ. D* **1** (1998) p. 1 : « Photon number state generation with a single two-level atom in a cavity : a proposal ».

17. GREMAUD B., DELANDE D., BILLY N., *J. Phys. B* **31** (1998) p. 1458 : « Highly accurate calculation of energy levels of the H<sub>2</sub><sup>+</sup> molecular ion ».

18. GREMAUD B., GASPARD P., *J. Phys. B* **31** (1998) p. 1671 : « Scaled Spectroscopy of 1S0 and 1P0 Highly Excited States of Helium ».

19. GREMAUD B., JAIN S., *J. Phys. A* **31** (1998) p. L637 : « Spacing distributions for rhombus billiards ».

20. GUENA J., CHAUVAT D., JACQUIER P.H., LINTZ M., PLIMMER M., BOUCHIAT M.A., *Quantum Semiclassical Optics* **10** (1998) p. 733-752 : « Sensitive pulsed pump-probe atomic polarimetry for parity-violation measurements in caesium ».

21. GUERY-ODELIN D., SODING J., DESBIOLLES P., DALIBARD J., *Optics Express* **2** (1998) p. 323 : « Strong evaporative cooling of a trapped cesium gas ».

22. GUERY-ODELIN D., SODING J., DESBIOLLES P., DALIBARD J., *Europhys. Lett.* **44** (1) p. 25-30 (1998) « Is Bose-Einstein condensation of atomic cesium possible ? ».

23. HAUSER P., KIRCH K., SIMMONS L.M., BORCHERT G., GOTTA D., SIEMS T., EL-KHOURY P., INDELICATO P., AUGSBURGER M., CHATELLARD D., EGGER J.P., ANAGNOSTPOULOS D.F., *Phys. Rev. C* **58** (1998) p. R1869-R1872 : « New precision measurement of the pionic deuterium s-wave strong interaction parameters ».

24. HILICO L., FELDER R., TOUAHRI D., CLAIRON A., BIRABEN F., *Eur. Phys. J. AP* **4** (1998) p. 219-226 : « Metrological features of the rubidium two-photon standards of the BNM-LPTF and Kastler Brossel laboratories ».

25. HORACK P., COURTOIS J.-Y., GRYNBERG G., *Phys. Rev. A* **58** (1998) p. 3953-3963 : « Atom cooling and trapping disorder ».

26. ILCHENKO V.S., VOLIKOV P. S., TREUSSART F., LEFEVRE-SEGUIN V., RAIMOND J.M., HAROCHE S., *Optics Comm.* **145** (1998) p. 86-90 : « Strain-tunable high-Q microsphere resonator ».

27. INDELICATO P., BOUCARD S., LINDROTH E., *European Physical Journal D* **3** (1998) p. 29-41 : « Relativistic and many-body effects in K, L, and M shell ionization energy for elements with 10<Z<100 and the determination of the 1s Lamb shift for heavy elements ».

28. INDELICATO P., MOHR P.J., *Hyperfine Interactions* **114** (1998) p. 147-153 : « 6s and 8d states self-energy for hydrogenlike ions and new results on the self-energy screening ».

29. INDELICATO P., MOHR P.J., *Phys. Rev. A* **58** (1998) p. 165-189 : « Coordinate-space approach to the bound-electron self energy : Coulomb field calculation ».

30. INGOLD G., LAMBRECHT A., *European Physical Journal D* **1** (1998) p. 29-32 : « Thermodynamics of non-interacting bosons in low-dimensional potentials ».
31. JAEKEL M.T., REYNAUD S., *Foundations of Physics* **28** (1998) p. 439-455 : « Conformal symmetry and quantum relativity ».
32. JONCKHEERE T., GREMAUD B., DELANDE D., *Phys. Rev. Lett.* **81** (1998) p. 2442 : « Spectral properties of non-hydrogenic atoms in weak external fields ».
33. JONCKHEERE T., LUCK J.M., *Journal de Physique* **A31** (1998) p. 3687 : « Dielectric Resonances of Binary Random Networks ».
34. KHOURY A.Z., COUDREAU T., FABRE C., GIACOBINO E., *Phys. Rev. A* **57** (1998) p. 4770 : « A three-level approach to squeezing with cold atoms ».
35. KIM Y.K., DESCLAUX J.P., INDELICATO P., *Journal of the Korean Physical Society* **33[3]** (1998) p. 218-222 : « Calculation of transition probabilities using the Multiconfiguration Dirac-Fock Method ».
36. KIM Y.K., PARENTE F., MARQUES J., INDELICATO P., DESCLAUX J.P., *Phys. Rev. A* **58** (1998) p. 1885-1888 : « Failure of multiconfiguration Dirac-Fock wave function in the nonrelativistic limit ».
37. LAMBRECHT A., JAEKEL M.T., REYNAUD S., *European Physical Journal D* **3** (1998) p. 95-104 : « Frequency up-converted radiation from a cavity moving in vacuum ».
38. LAMBRECHT A., JAEKEL M.T., REYNAUD S., *Europhys. Lett.* **43** (1998) p. 147-152 : « Generating photon pulses with an oscillating cavity ».
39. LAURENT P., LEMONDE P., SIMON E., SANTARELLI G., CLAIRON A., PETIT P., DIMARCQ N., AUDOIN C., SALOMON C., *Eur. Jour. Phys. D* **3** (1998) p. 201 : « A cold atom clock in absence of gravity ».
40. LENZ S., BORCHERT G., GORKE H., GOTTA D., SIEMS T., ANAGNOSTOPOULOS D., AUGSBURGER M., CHATELLARD D., EL-KHOURY P., INDELICATO P., EGGER J.P., BELMILOU D., DAUM M., HAUSER P., KIRCH K., SIMMONS L.M., *Phys. Lett. B* **416** (1998) p. 50-55 : « A new determination of the mass of the charged pion ».
41. LINTZ M., BOUCHIAT M.A., *Phys. Rev. Lett.* **80, 12** (1998) p. 2570-2573 : « Dimer destruction in a Cs vapor by a laser close to atomic resonance ».
42. MARQUES J., PARENTE F., INDELICATO P., DESCLAUX J.P., *J. PHYS. B : Atomic, Molecular and Optical Physics* **31[13]** (1998) p. 2897-2901 : « Estimation of the ratio of double and single Auger transition rates for the L shell of Kr, Nb and Gd ».
43. MARTE M., RITSCH H., PETSAS K., GATTI A., LUGIATO L.A., FABRE C., LEDUC D., *Optics Express* **3** (1998) p. 71 : « Spatial patterns in optical parametric oscillators with spherical mirrors : classical and quantum effects ».
44. MAUL M., SCHAFER A., INDELICATO P., *J. PHYS. B : Atomic, Molecular and Optical Physics* **31** (1998) p. 2725-2734 : « Stark quenching for the  $1s^2 2s^2 p^3 P^0$  level in beryllium-like ions and parity-violating effects ».

45. MENNERAT-ROBILLARD C., LUCAS D., GUIBAL S., TABOSA J., JURCZAK C., COURTOIS J.-Y., GRYNBERG G., *Europhys. Lett.* **44** (1998) p. 442-448 : « Cooling cesium atoms in a Talbot lattice ».

46. MENNERAT-ROBILLARD C., GUIDONI L., PESTAS K.I., VERKERK P., COURTOIS J.-Y., GRYNBERG G., *Euro. Phys. J.D*, **1** (1998) p. 33-45 : « Bright optical lattices in a longitudinal magnetic field. Experimental study of the oscillating and jumping regimes ».

47. PERRIN H., KUHN A., BOUCHOULE I., SALOMON C., *Europhys. Lett.* **42** (1998) p. 395 : « Sideband cooling of neutral atoms in a far detuned optical lattice ».

48. SACHA K., ZAKRZEWSKI J., DELANDE D., *EPJD* **1** (1998) p. 231 : « Controlling Non-spreading Wavepackets ».

49. SANTOS J.P., MARQUES J., PARENTE F., LINDROTH E., BOUCARD S., INDELICATO P., *European Physical Journal D* **1** (1998) p. 149-163 : « Multiconfiguration Dirac-Fock calculation of  $2s\ 1/2 - 2p\ 3/2$  transition energies in highly ionized bismuth, thorium and uranium ».

50. SANTOS J.P., PARENTE F., INDELICATO P., *European Physical Journal D* **3** (1998) p. 43-52 : « Application of B-splines finite basis sets to relativistic two-photon decay rates of  $2s$  level in hydrogenic ions ».

51. SCHWOB C., COHADON P.F., FABRE C., MARTE M., RITSCH H., GATTI A., LUGIATO L.A., *Appl. Phys. B* **66** (1998) p. 685 : « Transverse effects and mode couplings in OPOs » (soumis, special issue on c.w. OPOs).

52. SINATRA A., CASTIN Y., *Euro. Jour. Phys. D* **4** (1998) p. 247-260 : « Phase Dynamics of Bose-Einstein Condensates : Losses versus Revivals ».

53. SINATRA A., FEDICHEV P., CASTIN Y., DALIBARD J., SHLYAPNIKOV G., *Phys. Rev. Lett.* **82** (1998) p. 251-254 : « Dynamics of two interacting Bose-Einstein condensates ».

54. SODING J., GUERY-ODELIN D., DESBIOLLES G., FERRARI G., DALIBARD J., *Phys. Rev. Lett.* **80** (1998) p. 1869-1872 : « Giant Spin Relaxation of an Ultracold Cesium Gas ».

55. TASTEVIN G., *Bulletin of Am. Phys. Soc.* **43** (1998) p. 1289 : « New techniques in optical pumping of Helium-3, application to MRI in low magnetic field ».

56. TREUSSART F., ILCHENKO V.S., ROCH J.-F., HARE J., LEFEVRE-SEGUEIN V., RAIMOND J.M., HAROCHE S., *EPJ-D* **1** (1998) p. 235-238 : « Evidence for intrinsic Kerr bistability of high-Q microsphere resonators in superfluid helium ».

57. TRICHÉ C., CHEVY F., GRYNBERG G., *Phys. Rev. A* **58** (1998) p. R38-41 : « Localization of cesium atoms on a three-dimensional lattice in momentum space ».

## THÈSES

1. BOIRON Denis, Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, « *Refroidissement et piégeage d'atomes de césium dans des structures lumineuses à faible taux de diffusion* », (16 janvier 1998).
2. BOUCARD Stéphane, Thèse de doctorat de l'Université Paris VI, « *Calcul de haute précision d'énergies de transitions dans les atomes exotiques et les lithiunoides : Corrections relativistes, corrections radiatives, structure hyperfine et interaction avec le cortège électronique résiduel* », (3 juillet 1998).
3. BRAMATI Alberto, Thèse de doctorat de l'Université Paris VI, « *Étude du bruit quantique dans les lasers à semiconducteur et à solide* », (16 décembre 1998).
4. DOMOKOS Peter, Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, « *Microlasers et logique quantique : description théorique de nouveaux effets d'électrodynamique en cavité* », (11 décembre 1998).
5. ELEUCH Hichem, Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, « *Étude théorique des fluctuations quantiques dans la lumière sortant d'une microcavité semiconductrice* », (26 juin 1998).
6. EL-KHOURY Pascal, Thèse de Doctorat de l'Université Paris XIII, « *Spectroscopie de précision des atomes pioniques et antiprotoniques* », (3 avril 1998).
7. GRASSIA Francesa, Thèse de doctorat de l'Université Paris VI, « *Fluctuations quantiques et thermiques dans les transducteurs électromécaniques* », (26 juin 1998).
8. GUERY-ODELIN David, Thèse de Doctorat de l'Université de Paris VI, « *Dynamique collisionnelle des gaz d'alcalins lourds : du refroidissement évaporatif à la condensation de Bose-Einstein* », (30 novembre 1998).
9. GUIBAL Samuel, Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, « *Dynamique d'atomes froids piégés dans un réseau lumineux ; étude par spectroscopie pompe-sonde* », (28 février 1998).
10. GUIDONI Luca, Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, « *Quasicristaux optiques : refroidissement et piégeage d'atomes de césium dans un potentiel lumineux quasi-périodique* », (7 janvier 1998).
11. HADJAR Yassine, Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, « *Étude du couplage optomécanique dans une cavité de grande finesse : observation du mouvement Brownien d'un miroir* », (25 novembre 1998).
12. MAITRE Xavier, Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, « *Une paire d'atomes intriqués : expériences d'électrodynamique quantique en cavité* », (11 décembre 1998).
13. PERRIN Hélène, Thèse de Doctorat de l'Université de Paris VI, « *Refroidissement d'atomes de césium confinés dans un piège dipolaire très désaccordé* », (26 juin 1998).

14. SAUBAMEA Bruno, Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, « *Refroidissement laser subrecul au  $nK$  — Mesure directe de la longueur de cohérence spatiale. Nouveaux tests des statistiques de Lévy* », (7 décembre 1998).

ACTIVITÉS DIVERSES — MISSIONS CONFÉRENCES

*Conférences invitées à des Conférences Internationales*

— 5th French-Israeli conference on non linear and Quantum Optics (FRISNO 5° Symposium Franco-Israélien sur l'Optique Nonlinéaire et Quantique), Eilat, février 1998.

— Symposium in honour of Maurice Jacob on the occasion of his 65th birthday, CERN, Genève, mars 1998.

— Congrès annuel de l'Institute of Physics, Brighton, mars 1998.

— Meeting of the American Physical Society (APS), Columbus, Ohio, avril 1998.

— Symposium on Perspectives in Chemistry, Jérusalem, mai 1998.

— Kolloquium « Wissenschaft statt Wissensvermittlung », Albert Ludwigs Universität, Freiburg, mai 1998.

— Symposium « Niels Bohr and the Evolution of Physics in the 20th Century », Paris, mai 1998.

— 20th International conference on statistical physics STATPHYS 20, Paris, juillet 1998.

— 16th International Conference on Atomic Physics, ICAP 16, Windsor, Canada, août 1998.

— Centenaire de la découverte de la radioactivité, Sorbonne, Paris, septembre 1998.

— Symposium « images de la Physique, Atomes, Solides, ADN » — 65° anniversaire du Pr Julien Bok, ESPCI, Paris, octobre 1998.

— Hommage à Maryvonne Le Dourneuf, Gif-sur-Yvette, France, octobre 1998.

— Colloque sur l'utilisation de la station spatiale internationale ESA, ESTEC, Noordwijk, Pays-Bas, novembre 1998.

*Séminaires*

— Conférences de la Section de Physique de l'Académie des Sciences, Institut de France, Paris, janvier 1998.

— Conférence dans le cadre de l'Assemblée Générale de la Société Française de Physique (SFP), Collège de France, Paris, février 1998.

— Conférence de la Société Française de Physique (SFP), Marseille, mars 1998.

— Conférence dans le cadre des rencontres de la Direction des Sciences de la matière — CEA, Saclay, mars 1998.

— Conférence dans le cadre de l'École doctorale de l'Institut Galilée, Ville-taneuse, avril 1998.

— Conférence « journées de la Science », Carcassonne, mai/juin 1998.

— Conférences de rentrée de l'ENS, Paris, septembre 1998.

— Conférences de l'Académie des Sciences, Belles-Lettres et Arts de Lyon, Lyon, décembre 1998.

#### *Cycles de conférences — cours*

— Conférence à l'Institut Royal de Technology (KTH), Stockholm, mai 1998.

— Grandes conférences interuniversitaires de Lyon PUL (pôle universitaire lyonnais), Lyon, Rhône, décembre 1998.

#### *Distinctions*

— Doctor Honoris Causa de l'Université Hébraïque de Jérusalem.

— Honorary Doctor of Technology du Royal Institute of Technology (KTH) de Stockholm.

— Membre associé étranger de la National Academy of Sciences, Allahabad.