

Physique atomique et moléculaire

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

Le cours de l'année 1997-1998 est le premier d'une série de cours consacrés à l'étude de la condensation de Bose-Einstein des gaz atomiques ultrafroids. La première séance passe rapidement en revue les divers développements expérimentaux qui ont permis l'observation récente d'un tel phénomène : refroidissement et piégeage d'atomes neutres par des faisceaux laser ; pièges magnétostatiques utilisant des gradients de champ magnétique ; refroidissement évaporatif sous l'effet de collisions élastiques entre atomes piégés permettant à certains atomes de gagner une énergie suffisante pour s'échapper du piège, au détriment des autres qui, après rethermalisation, acquièrent une température plus basse. On souligne également l'intérêt de l'étude de la condensation de Bose-Einstein sur des milieux dilués comme les gaz d'atomes alcalins ultrafroids. Les interactions entre atomes, apparaissant essentiellement lors de collisions binaires, ne sont pas prépondérantes devant les effets de statistique pure, comme c'est le cas dans des milieux plus denses, tels que l'hélium superfluide. Il est possible de calculer simplement l'effet de ces collisions binaires à très basse température au moyen d'un petit nombre de paramètres comme la longueur de diffusion et d'établir ainsi un lien quantitatif entre les propriétés macroscopiques de condensats et ces paramètres microscopiques. Le confinement spatial des atomes dans un piège magnétique permet par ailleurs d'éviter les phénomènes complexes se produisant sur des parois matérielles et d'observer une condensation spatiale des atomes qui viennent s'accumuler dans l'état fondamental du piège. Enfin, la fluorescence des atomes alcalins est aisée à observer, ce qui permet une détection optique sensible de l'apparition et de l'évolution des condensats.

Rappels de mécanique statistique

Un certain nombre de notions essentielles de mécanique statistique sont brièvement rappelées afin de préciser les notations et d'introduire les outils théoriques adaptés à l'étude de la condensation de Bose-Einstein.

L'entropie statistique $S(\hat{D})$ est définie à partir de l'opérateur densité \hat{D} décrivant l'état quantique d'un système, et ses propriétés importantes sont brièvement passées en revue : interprétation en termes d'information manquante, additivité, concavité, invariance dans une transformation unitaire.

L'opérateur densité d'équilibre \hat{D} est déterminé en rendant l'entropie statistique $S(\hat{D})$ maximale, compte tenu des contraintes. On introduit alors la fonction de partition Z associée à \hat{D} ainsi que divers ensembles statistiques (microcanonique, canonique, grand canonique) correspondant à divers types de contraintes.

Le lien avec la thermodynamique est alors étudié, ce qui permet d'établir un certain nombre de relations importantes entre diverses grandeurs physiques, comme le nombre de particules, l'énergie interne ou la pression et les dérivées partielles du logarithme de la fonction de partition par rapport au potentiel chimique, à la température et au volume.

Le cas particulier des particules indépendantes est également analysé et l'on établit les lois de distribution de Bose-Einstein et Fermi-Dirac donnant les nombres d'occupation moyens des divers états quantiques individuels pour un ensemble de bosons ou de fermions identiques sans interactions.

On introduit enfin l'idée des méthodes variationnelles thermodynamiques. Le calcul explicite du logarithme de la fonction de partition n'est en général possible que pour des particules sans interactions. En présence d'interactions, il peut être judicieux de remplacer le véritable Hamiltonien \hat{H} par un Hamiltonien d'essai \hat{H}_e à particules indépendantes, contenant un potentiel de champ moyen \hat{V} qui essaie de reproduire au mieux l'effet des interactions entre particules. Des inégalités sont établies sur les potentiels thermodynamiques associés à \hat{H} et \hat{H}_e permettant de déterminer par des méthodes variationnelles le meilleur choix possible pour \hat{H}_e .

Bosons sans interactions dans une boîte

La condensation de Bose-Einstein est habituellement décrite pour un ensemble de bosons identiques sans interactions, enfermés dans une boîte de volume V en équilibre thermodynamique à la température T . Une séance est consacrée à l'étude de ce problème.

A partir de l'expression des énergies des niveaux quantiques individuels dans la boîte, il est possible de calculer le nombre d'états quantiques $\rho(\varepsilon)d\varepsilon$ d'énergie comprise entre ε et $\varepsilon + d\varepsilon$, $\rho(\varepsilon)$ étant la densité d'états. Il est très courant, en mécanique statistique, de remplacer les sommes discrètes sur les états quantiques individuels qui apparaissent dans l'expression des diverses grandeurs physiques par des intégrales sur ε pondérées par la densité d'états $\rho(\varepsilon)$.

Une telle approximation « continue » conduit à une difficulté sérieuse quand on l'applique au calcul du nombre total de particules N obtenu en attribuant à

chaque niveau quantique individuel une population donnée par la distribution de Bose-Einstein et en sommant sur tous ces états. On trouve qu'avec un potentiel chimique négatif, ce qui est nécessaire pour obtenir une distribution normalisable, il est impossible de répartir les N bosons dans les divers états quantiques en suivant la distribution de Bose-Einstein.

La difficulté précédente est liée en fait à l'approximation continue qui revient à pondérer la population de l'état fondamental $\varepsilon_0 = 0$ de la boîte par la densité d'états $\rho(0)$ qui est nulle. Un calcul plus précis, n'utilisant pas l'approximation continue, montre qu'en dessous d'une certaine température critique T_C la population N_0 du niveau fondamental peut devenir macroscopique, c'est-à-dire représenter une fraction significative du nombre total N de particules. Négliger N_0 comme on le fait en pondérant la population de l'état fondamental par $\rho(0) = 0$, conduit donc à un résultat inexact. Le calcul précis de la population N_1 du premier niveau excité de la boîte, situé à une distance $\delta\varepsilon$ au dessus du niveau fondamental, montre que $k_B T_C \gg \delta\varepsilon$, où k_B est la constante de Boltzmann. Un tel résultat indique que l'accumulation des bosons dans l'état fondamental n'est pas un effet thermique trivial, qui apparaîtrait quand l'énergie thermique $k_B T_C$ devient de l'ordre de $\delta\varepsilon$ ou inférieure à ε . La condensation de Bose-Einstein est un effet de statistique quantique qui apparaît à des températures T_C telles que le facteur de Boltzmann usuel $\exp(-\delta\varepsilon/k_B T_C)$ est de l'ordre de 1. Le calcul de la température critique montre en fait que T_C est donnée par l'équation $n[\Lambda_{dB}(T_C)]^3 = 2.612$ où $n = N/V$ est la densité spatiale de particules et $\Lambda_{dB}(T) = [2\pi\hbar^2/mk_B T]^{1/2}$ la longueur d'onde de de Broglie thermique à la température T . En d'autres termes, la condensation de Bose-Einstein apparaît quand la distance moyenne entre particules devient de l'ordre de la longueur d'onde de de Broglie thermique. Les paquets d'ondes associés aux diverses particules commencent alors à se recouvrir et les effets de statistique quantique deviennent importants.

Après une telle discussion physique qualitative, une étude plus quantitative est présentée. On calcule la fraction de particules condensée N_0/N que l'on trouve être égale à $1 - (T/T_C)^{3/2}$ pour $T \leq T_C$. L'expression du logarithme de la fonction de partition est également établie, ce qui permet d'en déduire la valeur de toute une série de grandeurs physiques comme l'énergie U , la pression P , la chaleur spécifique à volume constant C_V . On montre en particulier que C_V reste continue en $T = T_C$ alors que la dérivée de C_V par rapport à T est discontinue en ce point (à la limite $N \rightarrow \infty$). L'étude des isothermes $P = f(V)$ correspondant à diverses valeurs de T permet enfin de souligner des analogies et différences avec les isothermes de changement d'état d'un corps pur (équilibre liquide-vapeur).

Bosons sans interactions dans un piège harmonique

Le traitement précédent est étendu au cas, correspondant aux expériences réalisées récemment, de N bosons piégés dans un potentiel harmonique. On néglige là encore toute interaction entre les particules.

Comme pour le cas de la boîte, l'approximation continue conduit au résultat absurde qu'il est impossible de répartir les N bosons dans les états quantiques du piège en suivant la loi de distribution de Bose-Einstein. Là encore, la résolution d'une telle difficulté est obtenue quand on réalise qu'au dessous d'une certaine température critique T_c , un nombre macroscopique N_0 de bosons vient se condenser dans l'état fondamental du piège. On démontre que $k_B T_c / \hbar \omega$ est de l'ordre de $N^{1/3}$, de sorte que là encore $k_B T_c$ est très grand devant l'écart $\hbar \omega$ entre l'état fondamental et le premier état excité du piège harmonique supposé isotrope. Quant à la fraction N_0/N d'atomes condensés, elle est maintenant égale à $1 - (T/T_c)^3$ pour $T \leq T_c$. Tous ces résultats sont aisément étendus au cas d'un piège harmonique anisotrope.

On calcule également le logarithme de la fonction de partition d'où l'on déduit l'énergie interne U et la chaleur spécifique $C = \partial U / \partial T$. Il apparaît ici, qu'à la différence de ce qui se passe dans une boîte, la chaleur spécifique présente une discontinuité en $T = T_c$.

Une autre différence importante avec ce qui se passe dans une boîte est le caractère spatial de la condensation de Bose-Einstein de particules piégées. Au dessous de T_c , les N_0 particules condensées dans l'état fondamental φ_0 du piège donnent naissance à un pic étroit dans la distribution spatiale des atomes dont la largeur $\Delta x_0 \approx \sqrt{\hbar/m\omega}$ est la largeur spatiale de la fonction d'onde $\varphi_0(x)$ de l'état fondamental, m étant la masse des particules. Les $N - N_0$ particules non condensées forment un « nuage thermique » dont la largeur Δx_T est, beaucoup plus grande que Δx_0 par un facteur de l'ordre de $\sqrt{k_B T_c / \hbar \omega} \approx N^{1/6}$. La distribution spatiale des atomes piégés est donc bimodale en dessous de T_c , c'est-à-dire formée d'un pic étroit émergeant au-dessus d'un fond beaucoup plus large. Dans une boîte au contraire, la distribution spatiale des atomes est uniforme quelle que soit la température T . Dans les deux cas, boîte et piège, il y a bien sûr une condensation dans l'espace des impulsions.

Corrections dues au nombre fini de particules

Toutes les expériences réalisées sur la condensation de Bose-Einstein d'atomes alcalins ultrafroids l'ont été bien sûr avec un nombre fini N de particules dans un piège harmonique. Il est important d'évaluer les différences entre les prédictions théoriques correspondant, en l'absence d'interactions, à N fini et N infini, de manière à ne pas attribuer, à tort, ces différences à l'existence d'interactions entre particules.

Des expressions plus précises sont établies pour la densité d'états $\rho(\varepsilon)$ et le nombre N_e de particules excitées, c'est-à-dire dans des états autres que l'état fondamental φ_0 . On trouve que le fait que N soit fini abaisse la température critique T_c , l'abaissement relatif $[T_c(\infty) - T_c(N)]/T_c(\infty)$ étant de l'ordre de $0.7N^{-1/3}$.

Un tel résultat est confirmé par des calculs numériques, sans approximations, effectués pour des valeurs pas trop élevées de N (de l'ordre de quelques 10^4). Ce

calcul numérique montre également que le fait d'avoir un nombre fini N de particules « arrondi » les variations de N_0/N avec T/T_C au voisinage de $T/T_C = 1$, et supprime par ailleurs la discontinuité de la chaleur spécifique C au voisinage de T_C , chaleur spécifique qui conserve toutefois une variation d'autant plus rapide en $T = T_C$ que N est plus élevé.

Problèmes de dimensions inférieures à 3

Considérons un piège harmonique anisotrope avec trois fréquences propres différentes $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ le long des trois axes. Si l'une de ces fréquences ω_3 est choisie très grande devant les deux autres et si le domaine de températures T explorées est tel que $\hbar\omega_3 \gg kT$, on peut considérer que le degré de liberté correspondant est « gelé » et que le nombre de dimension du problème passe de 3 à 2. Il faut bien sûr vérifier ensuite que la température critique T_C correspondant à une éventuelle condensation à deux dimensions vérifie bien $\hbar\omega_3 \gg kT_C$. La même procédure peut être suivie pour passer de deux dimensions à une dimension.

La méthode générale développée plus haut pour étudier la condensation de Bose-Einstein se généralise aisément à deux et une dimension. A deux dimensions, on trouve des résultats très analogues aux précédents, la seule différence importante étant que la chaleur spécifique C reste continue au voisinage de $T = T_C$, alors qu'elle est discontinue pour un problème à trois dimensions. La fraction de particules condensées N_0/N varie comme $1 - (T/T_C)^2$ pour $T \leq T_C$.

Pour un piège harmonique de dimension D , il semble naturel de définir la limite thermodynamique en faisant tendre le nombre total de particules N vers l'infini, et la fréquence ω de l'oscillateur vers 0, tout en gardant constante la densité $N/(\Delta x_T)^D$ au centre du nuage thermique de largeur Δx_T . Comme Δx_T est proportionnel à $1/\omega$, une telle condition revient à garder $N\omega^D$ constant dans la limite $N \rightarrow \infty, \omega \rightarrow 0$. On trouve alors que la température critique T_C tend vers 0 à la limite thermodynamique dans un piège harmonique à une dimension, alors qu'elle ne tend pas vers 0 pour $D = 2$ ou 3. On peut donc considérer qu'il n'y a pas de condensation de Bose-Einstein au sens strict dans un piège harmonique à une dimension. Pour un nombre fini N de particules, il subsiste néanmoins une variation rapide de N_0/N avec T au voisinage d'une température T_C non nulle. Les calculs de N_0/N et T_C sont très voisins pour des bosons dans une boîte à deux dimensions et dans un piège harmonique à une dimension, et les conclusions précédentes sont donc généralisables à une boîte 2D.

Premières observation expérimentales

Le cours se poursuit par une description succincte des premières mises en évidence expérimentales de la condensation de Bose-Einstein d'atomes alcalins ultrafroids. Sont passées en revue les expériences réalisées en 1995 à Boulder sur

le Rubidium, à M.I.T. sur le Sodium et à Houston sur le Lithium. La séquence temporelle de chaque expérience est analysée et les résultats obtenus dans chaque cas sont décrits et discutés. La plupart d'entre eux peuvent être interprétés au moins de manière qualitative, au moyen de la théorie de la condensation de Bose-Einstein d'un gaz de bosons sans interactions décrite précédemment. D'autres expériences ont été réalisées depuis, mettant en évidence des effets liés aux interactions entre bosons. Elles seront décrites et analysées dans des cours ultérieurs.

COURS À L'INSTITUT ROYAL DE TECHNOLOGIE DE STOCKHOLM

Ce cours a comporté 6 séances de 1 H 30. Le thème général choisi était l'optique quantique et les interactions atome-photon.

Ces interactions peuvent être considérées de divers points de vue. Elles sont à l'origine de la lumière émise et absorbée par les atomes et l'étude de cette lumière est une source essentielle d'informations sur la structure et la dynamique des atomes. On peut également essayer d'utiliser ces interactions pour agir sur les atomes, pour contrôler au moyen de faisceaux lumineux leurs divers degrés de liberté. C'est ce second point de vue qui a été analysé plus en détail.

Le cours a commencé par un rapide survol de diverses approches théoriques permettant de décrire les processus d'absorption et d'émission de photons par un atome : méthodes perturbatives, équations de Bloch optiques, atome habillé, fonction délai donnant la répartition des intervalles de temps séparant deux émissions spontanées successives de photons par un atome. Quelques effets physiques importants observables sur la lumière de fluorescence émise par un atome ont été également décrits et interprétés : triplet de Mollow, dégroupement de photons, fluorescence intermittente.

L'étude du mouvement du centre de masse de l'atome a été ensuite développée en détail en utilisant le concept de force radiative résultant de l'échange de quantité de mouvement entre photons et atomes. Plusieurs types de forces apparaissent dans les équations du mouvement. Les résultats importants concernant la valeur moyenne, la dépendance en vitesse et les fluctuations de ces forces ont été précisés et interprétés physiquement. Les mécanismes physiques les plus simples de refroidissement et de piégeage d'atomes par des faisceaux laser ont pu ainsi être introduits : refroidissement Doppler, pièges dipolaires, miroirs pour atomes.

Le cours a abordé ensuite l'étude de mécanismes de refroidissement laser plus subtils et plus efficaces que le refroidissement Doppler. Un premier exemple est le refroidissement « Sisyphé », où l'atome en mouvement gravit plus souvent des collines de potentiel qu'il n'en descend, comme le héros de la mythologie grecque. Un deuxième exemple est le refroidissement subrecul permettant d'abaisser l'énergie cinétique désordonnée des atomes au-dessous de la valeur correspondant à l'énergie cinétique de recul d'un atome émettant ou absorbant un seul photon.

Plusieurs approches théoriques ont été introduites pour étudier les limites ultimes de ces méthodes, en particulier une approche récente basée sur l'utilisation des statistiques de Lévy pour analyser les marches au hasard de l'atome dans l'espace des vitesses, marches au hasard qui révèlent un caractère anormal dans le refroidissement subrecoil.

Il est possible maintenant, par ces diverses méthodes de refroidissement laser, d'abaisser la température des atomes à des valeurs de l'ordre du microKelvin, voire du nanoKelvin. La vitesse d'agitation des atomes est alors très faible, de l'ordre du centimètre par seconde, voire du millimètre par seconde (alors qu'aux températures ambiantes, elle est de l'ordre du kilomètre par seconde). Il est possible dans ces conditions d'observer les atomes pendant des temps beaucoup plus longs, ce qui accroît d'autant la précision des mesures que l'on peut effectuer sur eux. Par ailleurs, les longueurs d'ondes de de Broglie, qui sont inversement proportionnelles à la vitesse, deviennent très élevées, ce qui rend beaucoup plus visible le comportement ondulatoire de la matière. Le cours a passé en revue un certain nombre d'applications récentes des atomes ultrafroids qui découlent de ces caractéristiques nouvelles : amélioration de la précision sur la mesure du temps et nouveaux types d'horloges atomiques ; tests plus précis des lois fondamentales de la physique ; interférométrie atomique avec des ondes de de Broglie ; oscillations de Bloch d'atomes ultrafroids soumis à une force constante dans un potentiel périodique ; effets de dégénérescence quantique dans les gaz d'atomes ultrafroids et observation de la condensation de Bose-Einstein.

SÉMINAIRES 1997-1998

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.

Neuf séminaires ont été organisés :

Y. OVCHINNIKOV (Max Planck Institut für Kernphysik, Heidelberg), « *The gravito-optical surface trap for cesium atoms* ».

B. VERHAAR (Université Technologique d'Eindhoven), « *Collisions, condensation, clocks* ».

C. BLONDEL (Laboratoire Aimé Cotton, Orsay), « *Le microscope de photodétachement* ».

N. WESTBROOK (Institut d'Optique, Orsay), « *Réflexion et diffraction sur un miroir atomique : une nouvelle sonde de champ proche* ».

F. PAVONE (LENS, Université de Florence et Collège de France), « *High resolution and high sensitive spectroscopy with diode lasers* ».

C. CHARDONNET (Université Paris 13, Villetaneuse), « *Spectroscopie moléculaire à ultra-haute résolution : sélection des molécules lentes et rôle de la parité* ».

G. V. SHLYAPNIKOV (Kurchatov Institute, Moscou), « *Macroscopic quantum phenomena in trapped Bose-condensed gases* ».

V. S. LETOKHOV (Institute of Spectroscopy, Troitzk et Chaire Condorcet), « *Towards nanometer spatial resolution in laser spectroscopy* »

E. A. CORNELL (JILA, University of Colorado, Boulder), « *Experiments in two-component Bose-Einstein condensation* ».

ACTIVITÉ SCIENTIFIQUE

M. Claude Cohen-Tannoudji effectue ses recherches au sein du Laboratoire Kastler Brossel de l'École Normale Supérieure. Il y dirige les travaux d'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^{er} janvier 1994 par Mme Michèle Leduc, Directeur de Recherche au CNRS.

Le personnel du Laboratoire comporte : 14 enseignants-chercheurs (professeurs, maîtres de conférences, agrégés-préparateurs), 30 chercheurs au CNRS (directeurs, et chargés de recherche), 20 chercheurs étrangers, 29 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 1997, ainsi que celles des thèses soutenues au cours de cette même année.

PUBLICATIONS

1. COHEN-TANNOUDJI C., *Bulletin de l'Union des Physiciens* **91** (1997), p. 1599, « Quelques réflexions sur l'activité de recherche ».

2. DESBIOLLES G., ARNDT M., SZRIFTGISER P., DALIBARD J., *Journal of Modern Optics* **44** (1997), p. 1827, « Dissipative atom optics ».

3. KUHN A., PERRIN H., HÄNSEL D., SALOMON C., *OSA TOPS on Ultracold Atoms and BEC* **7**, ed. Keith Burnett (OSA, 1997), p. 58-65, « Three dimensional Raman cooling using velocity selective rapid adiabatic passage ».

4. COHEN-TANNOUDJI C., *Phil. Trans. Roy. Soc. London A* **355** (1997), p. 2219, « Non-ergodic laser cooling ».
5. DUM R., OLSHANII M., *Phys. Rev. A* **55** (1997), p. 1217, « Dark state cooling in presence of gravity ».
6. PEIK E., BEN DAHAN M., BOUCHOULE I., CASTIN Y., SALOMON C., *Phys. Rev. A* **55** (1997), p. 2989-3001, « Bloch oscillations of atoms, adiabatic rapid passage and monokinetic atomic beams ».
7. CASTIN Y., DALIBARD J., *Phys. Rev. A* **55** (1997), p. 4330, « The relative phase of two Bose-Einstein condensates ».
8. SÖDING J., GRIMM R., OVCHINIKOV Y., BOUYER P., SALOMON C., *Phys. Rev. Lett.* **78** (1997), p. 1420, « Short distance atomic beam deceleration with a stimulated light force ».
9. KULIN S., SAUBAMEA B., PEIK E., LAWALL J., HIJMANS T.W., LEDUC M., COHEN-TANNOUDJI C., *Phys. Rev. Lett.* **78** (1997), p. 4185-4188, « Coherent Manipulation of Atomic Wavepackets by Adiabatic Transfer ».
10. SAUBAMEA B., HIJMANS T.W., KULIN S., RASEL E., PEIK E., LEDUC M., COHEN-TANNOUDJI C., *Phys. Rev. Lett.* **79** (1997), p. 3146-3149, « Direct measurement of the spatial correlation function of ultracold atoms ».
11. CASTIN Y., DUM R., *Phys. Rev. Lett.* **79** (1997), p. 3553, « Instability and depletion of an excited condensate in a trap ».
12. ARNDT M., BEN DAHAN M., GUERY-ODELIN D., REYNOLDS M. W., DALIBARD J., *Phys. Rev. Lett.* **79** (1997), p. 625-628, « Observation of a zero-energy resonance in Cs-Cs collisions ».
13. COHEN-TANNOUDJI C., *Physica Scripta* **T70** (1997), p. 79, « Linear superpositions of states in radiative processes » (Memorial Essays for George Series).
14. RAIZEN M., SALOMON C., NIU QUIAN, *Physics Today*, July 1997, p. 30, « New light on quantum transport ».
15. PEIK E., BEN DAHAN M., BOUCHOULE I., CASTIN Y., SALOMON C., *Appl. Phys. B* **65**, (1997), p. 685-692, « Bloch oscillations and an accelerator for cold atoms ».
16. SPALLICCI A., BRILLET A., BUSCA G., CATASTINI G., PINTO I., ROXBURGH I., SALOMON C., SOFFEL M., VEILLET C., *Class. Quantum Grav.* **14** (1997), p. 2971-2989, « Experiments on fundamental physics on the space station ».
17. COHEN-TANNOUDJI C., *Atomic Physics 15*, ed. H.B. van Linden van den Heuvell, J. T. M. Walraven, M. W. Reynolds (World Scientific, 1997), p. 237, « The Zeeman effect : a tool for atom manipulation ».
18. HAGLEY E., MAITRE X., NOGUES G., WUNDERLICH C., BRUNE M., RAIMOND J.-M., HAROCHE S., *Phys. Rev. Lett.* **79** (1997), p. 1-5, « Generation of Einstein-Podolsky-Rosen Pairs of Atoms ».

19. RAIMOND J.-M., BRUNE M., HAROCHE S., *Phys. Rev. Lett.* **79** (1997), p. 1964-1967, « Reversible Decoherence of a Mesoscopic Superposition of Field States ».

20. MAITRE X., HAGLEY E., NOGUES G., WUNDERLICH C., GOY P., BRUNE M., RAIMOND J.-M., HAROCHE S., *Phys. Rev. Lett.* **79** (1997), p. 769, « Quantum memory with a single photon in a cavity ».

21. TREUSSART F., DUBREUIL N., KNIGHT J.C., SANDOGHDAR V., HARE J., LEFEVRE-SEGUIN V., RAIMOND J.-M., HAROCHE S., *Ann. Télécommun.* **52** (1997), p. 557-568, « Microlasers based on silica microspheres ».

22. MAITRE X., HAGLEY E., DREYER J., MAALI A., WUNDERLICH C., BRUNE M., RAIMOND J.-M., HAROCHE S., *Journ. Mod. Optics.* **44** (1997), p. 2023, « An Experimental study of a Schrödinger's cat decoherence with atoms and cavities ».

23. GUENA J., CHAUVAT D., JACQUIER PH., LINTZ M., PLIMMER M., BOUCHIAT M.-A., *J.O.S.A.* **B14** (1997), p. 271-284, « Differential-mode atomic polarimetry with pulsed lasers : high-precision zero adjustment ».

24. CHAUVAT D., GUENA J., JACQUIER PH., LINTZ M., BOUCHIAT M.-A., PLIMMER M., GOODWIN C.W., *Optics Comm.* **138** (1997), p. 249-252, « Magnification of a tiny polarisation rotation by a dichroic plate in balanced mode polarimetry ».

25. BOUCHIAT M.-A., BOUCHIAT C., *Rep. Prog. Phys.* **60** (1997), p. 1351-1396, « Parity Violation in Atoms ».

26. DARRASSE L., GUILLOT G., NACHER P.-J., TASTEVIN G., *C.R. Ac. Sc. Paris* **324** (1997), p. 691-700, « Low-field ^3He Nuclear Magnetic Resonance in human lungs ».

27. CHERNIKOV S.V., TAYLOR J.R., PLATONOV N.S., GAPONTSEV V.P., NACHER P.-J., TASTEVIN G., LEDUC M., BARLOW M.J., *Electronics Letters* **33** (1997), p. 787-789, « 1083 nm ytterbium doped fibre amplifier for optical pumping of helium ».

28. GRUTER P., LALOE F., MEYEROVICH A.E., MULLIN W.J., *J. Physique I* **7** (1997), p. 485, « Ursell operators in statistical physics III : thermodynamic properties of a dilute gas ».

29. CONSTANTINESCO A., CHOQUET P., WIOLAND M., LEDUC M., NACHER P.-J., TASTEVIN G., *Médecine nucléaire — imagerie fonctionnelle et métabolique* **21** (1997), p. 285-292, « L'IRM des gaz rares hyperpolarisés : une concurrence future pour la médecine nucléaire ? ».

30. SURKAU R., BECKER J., EBERT M., GROSSMANN T., HEIL W., HOFMANN D., HUMBLLOT H., LEDUC M., OTTEN E.W., ROHE D., SIEMENSMEYER K., STEINER M., TASSET F., TRAUTMANN N., *Nucl. Instrum. Methods A* **384** (1997), p. 444, « Realization of a broad band neutron spin filter with compressed, polarized ^3He gas ».

31. GRUTER P., CEPERLEY D., LALOE F., *Phys. Rev. Lett.* **79** (1997), p. 3549, « Critical Temperature of Bose-Einstein condensation of hard spheres gas ».

32. GRAND N., GILBERT J., LALOE F., *Acoustica* **83** (1997), p. 137, « Oscillation threshold of woodwind instruments ».
33. GOY P., GROSS M., *News directions in Terahertz Technology*, (Kluwer Academic Publishers, 1997), p. 323-341, « Vector measurements from 8 GHz to the THz range, obtained in a real life experiment ».
34. FEBBRARO J.L., BREMOND-GIGNAC D., ARON B., GROSS M., ARON-ROSA D.S., *Ophtalmologie* **11** (1997), p. 282, « Traitement de l'astigmatisme myopique associé à myopie par Laser Excimer : résultat à 1 an ».
35. VAN BENTUM P.J.M., WITTLIN A., BOONMAN M., GROSS M., UCHIDA S., TAMASAKU K., *PHYSICA C* **C293** (1997), p. 136, « Plasma Resonances and Vortex Dynamics in La_{2-x}Sr_xCuO₄ ».
36. MENNERAT C., GUIDONI L., COURTOIS J.-Y., GRYNBERG G., *Europhys. Lett.* **38** (1997), p. 429-434, « Cooling and trapping cesium atoms in π -polarized potential wells : the jumping regime of optical lattices ».
37. GUIBAL S., MENNERAT C., LAROUSSERIE D., TRICHE C., COURTOIS J.-Y., GRYNBERG G., *Phys. Rev. Lett.* **78** (1997), p. 4709, « Radiation pressure in a rubidium optical lattice : an atomic analog to the photorefractive effects ».
38. GUIDONI L., TRICHE C., VERKERK P., GRYNBERG G., *Phys. Rev. Lett.* **79** (1997), p. 3363, « Quasiperiodic optical lattices ».
39. GREMAUD B., DELANDE D., *Europhys. Lett.* **40** (1997), p. 363, « Photo-ionization of the helium atom close to the double ionization threshold : towards the Ericson regime ».
40. DELANDE D., SORNETTE D., *J. Acoust. Soc. Am.* **101** (1997), p. 1793, « Acoustic radiation from membranes at high frequencies : the quantum chaos regime ».
41. ZAKRZEWSKI J., DELANDE D., *J. Phys. B Lett.* (1997), p. L87, « How to build experimentally a non-spreading wavepacket ? ».
42. MONTEIRO T.S., DELANDE D., CONNERADE J.P., *NATURE* **387** (1997), p. 863, « Have quantum scars been observed ? »
43. BUCHLEITNER A., DELANDE D., *Phys. Rev. A* (1997), p. R1585, « Secular motion of 3-D Rydberg states in a microwave field ».
44. MONTEIRO T.S., DELANDE D., *Phys. Rev. B* **56** (1997), p. 3913, « Bifurcations and the transition to chaos in the resonant tunneling diode ».
45. DELANDE D., ZAKRZEWSKI J., BUCHLEITNER A., *Phys. Rev. Lett.* **79** (1997), p. 3541, Comment on « New states of hydrogen in a circularly polarized electromagnetic field ».
46. ZAKRZEWSKI J., BUCHLEITNER A., DELANDE D., *Zeit. f. Phys. B* **103** (1997), p. 115, « Nondispersive wave packets as solitonic solutions of level dynamics ».
47. BOURZEIX S., DE BEAUVOIR B., NEZ F., DE TOMASI F., JULIEN L., BIRABEN F., *Optics Commun.* **133** (1997), p. 239-244, « Ultra-violet light gene-

ration at 205 nm by two frequency doubling steps of a CW titanium-sapphire laser ».

48. TOUAHRI D., ACEF O., CLAIRON A., ZONDY J.J., FELDER R., HILICO L., DE BEAUVOIR B., BIRABEN F., NEZ F., *Optics Commun.* **133** (1997), p. 471-478, « Frequency measurement of the $5S_{1/2}$ ($F=3$)- $5D_{5/2}$ ($F=4$) two photon transition in rubidium ».

49. SCHWOB C., SOUTO-RIBEIRO P., MAITRE A., FABRE C., *Optics Letters* **22** (1997), p. 1893, « Sub shotnoise high sensitivity spectroscopy with OPO twin beams ».

50. DORRER C., NEZ F., DE BEAUVOIR B., JULIEN L., BIRABEN F., *Phys. Rev. Lett.* **78** (1997), p. 3658-3661, « Accurate Measurement of the $23S_{1/2}$ - $33D_{1/2}$ Two-Photon Transition Frequency in Helium : New Determination of the $23S_{1/2}$ Lamb Shift ».

51. DE BEAUVOIR B., NEZ F., JULIEN L., CAGNAC B., BIRABEN F., TOUAHRI D., HILICO L., ACEF O., CLAIRON A., ZONDY J.J., *Phys. Rev. Lett.* **78** (1997), p. 440-443, « Absolute frequency measurement of the $2S$ - $8S/D$ transitions in hydrogen and deuterium : new determination of the Rydberg constant ».

52. HEIDMANN A., HADJAR Y., PINARD M., *Appl. Phys. B* **64** (1997), p. 173, « Quantum nondemolition measurement by optomechanical coupling », special issue on quantum nondemolition measurements.

53. JAEKEL M.T., REYNAUD S., *Europhys. Lett.* **38** (1997), p. 1-6, « Mass as a relativistic quantum observable ».

54. KASAI K., JIANGRUI G., FABRE C., *Europhys. Lett.* **40** (1997), p. 25, « Observation of squeezing using cascaded nonlinearities ».

55. BRAMATI A., JOST V., MARIN F., GIACOBINO E., *J. of Modern Optics* **44** (1997), p. 1929-1935, « Quantum noise models for semiconductor lasers : is there a missing noise source ? ».

56. FABRE C., COHADON P.F., SCHWOB C., *J. of Quantum and Semiclassical Optics* (1997), « c.w. optical parametric oscillators : single mode operation and frequency tuning properties ».

57. MARIN F., BRAMATI A., JOST V., GIACOBINO E., *Optics Commun.* **140** (1997), p. 146-157, « Demonstration of high sensitivity spectroscopy with squeezed semiconductor lasers ».

58. LAMBRECHT A., JAEKEL M.T., REYNAUD S., *Phys. Lett. A* **225** (1997), p. 188-194, « The Casimir force for passive mirrors ».

59. ZELAUQUETT KHOURY A., KIST T. B. L., *Phys. Rev. A* **55** (1997), p. 2304, « Trapping State Stabilization in a micromaser with a mixed atomic beam ».

60. BOSCOLO I., BRAMATI A., MALVEZZI M., PRATI F., *Phys. Rev. A* **55** (1997), p. 738, « Three-mode rotating pattern in a CO₂ laser with high cylindrical symmetry ».

61. LAMBRECHT A., JAEKEL M.T., REYNAUD S., *Phys. Rev. Lett.* **78** (1997), p. 2267, Comment on « Sonoluminescence as quantum vacuum radiation ».
62. JAEKEL M.T., REYNAUD S., *Rep. Prog. Phys.* **60** (1997), p. 863-887, « Movement and fluctuations of the vacuum ».

THÈSES

1. DREYER J., Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, 1997, *Atomes de Rydberg et cavités : observation de la décohérence dans une mesure quantique* (14 janvier 1997).
2. GUIBAL S., Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, 1997, *Atomes froids piégés dans un réseau lumineux : étude par spectroscopie pompe-sonde* (28 février 1997).
3. SCHWOB C., Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, 1997, *Utilisation des faisceaux corrélés au niveau quantique produits par un Oscillateur Paramétrique Optique en spectroscopie de grande sensibilité* (1 juillet 1997).
4. KULIN S., Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, 1997, *Préparation et manipulation de paquets d'ondes atomiques ultrafroids* (24 septembre 1997).
5. BEN DAHAN M., Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, 1997, *Transport et relaxation d'atomes de césium : oscillations de Bloch et résonance de diffusion* (2 octobre 1997).
6. LEMONDE P., Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, 1997, *PHARAO : Étude d'une horloge spatiale utilisant des atomes refroidis par laser ; réalisation d'un prototype* (19 novembre 1997).
7. TRICHE C., Thèse de Doctorat de l'École Polytechnique, 1997, *Refroidissement et dynamique d'atomes dans des potentiels lumineux : mélasses grises, réseaux de plots et réseaux brillants* (18 décembre 1997).

ACTIVITÉS DIVERSES — MISSIONS — CONFÉRENCES

Conférences Invitées à des Conférences Internationales

- Royal Society discussion meeting on « highlights in quantum optics », Londres, janvier 1997.
- Conférence à la AIO/OIO School on Coherence and Cold Atoms, Amsterdam, mai 1997.
- Nobel Symposium 104 : Modern Studies of Basic Quantum Concepts and Phenomena, Gimo Herrgård (Suède), juin 1997.
- Symposium en l'honneur du 70^e anniversaire du Prof. J. E. Blamont, Paris, juin 1997.

- Gordon Conference on Atomic Physics, Henniker (USA), juillet 1997.
- Congrès de la Société Française de Physique, Paris, juillet 1997.
- European Research Conference on « Bose-Einstein Condensation » (BEC), Castelvechio Pascoli (Italie), juillet 1997.

Séminaires

- Colloquium de l'ENS, Paris, février 1997.
- Séminaire à l'Université d'Amsterdam, Amsterdam, mars 1997,
- Conférence à l'Ecole des Ponts et Chaussées, Paris, mars 1997.
- 5 séminaires à Stockholm, Uppsala, Lund, Göteborg, avril 1997.
- Séminaire au Service de Physique Théorique, Saclay, juin 1997.
- 2 séminaires à JILA, Boulder, septembre 1997.
- 2 séminaires à CALTECH, Pasadena, novembre 1997.

Distinctions

- Wenner-Gren Foundation « Distinguished Lecturer », Stockholm, avril 1997.
- Alexander M. Cruickshank Lecture Award, Henniker (USA), juillet 1997.
- Distinguished visitor, JILA, Boulder (USA), septembre 1997.
- Prix Nobel de Physique, octobre 1997.
- Linus Pauling Lecturer, CALTECH, Pasadena (USA), novembre 1997.