

Physique atomique et moléculaire

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

Le cours de l'année 2001-2002 a été consacré à l'étude des propriétés de rotation des condensats de Bose-Einstein. Il s'agissait d'étudier le comportement du condensat quand on fait tourner le piège qui le contient et d'analyser les différences entre le champ de vitesses d'un tel objet et celui d'un corps solide en rotation. Un autre problème important qui a été abordé est celui des tourbillons quantiques qui apparaissent dans un condensat en rotation. Les propriétés essentielles de ces tourbillons ont été étudiées, comme la quantification de la circulation de la vitesse. Les diverses méthodes utilisées pour mettre en évidence ces propriétés ont été également passées en revue.

Le cours commence par un rappel de quelques résultats importants relatifs à la condensation de Bose-Einstein et explicités dans les cours antérieurs : description des interactions en termes de champ moyen ; équation de Gross-Pitaevskii décrivant l'évolution de la fonction d'onde commune à N bosons identiques condensés sous l'effet du potentiel de piégeage et du potentiel moyen exercé sur un boson par les $N-1$ autres bosons ; autres formes équivalentes de l'équation de Gross-Pitaevskii à la limite où l'effet du champ moyen est prédominant devant l'énergie cinétique de confinement. Une attention particulière est prêtée aux « modes de surface » qui ne font pas intervenir la compressibilité du condensat car ils s'effectuent à densité constante. Leur analogie avec les ondes de gravité à la surface de l'eau (sans contribution de la tension superficielle) est soulignée.

Modes propres de vibration d'un condensat — Étude par les règles de somme

Les modes propres de vibration d'un condensat se révèlent être un outil commode pour étudier les propriétés de rotation d'un condensat : moment d'inertie, présence de tourbillons quantiques. La méthode des règles de somme permet d'ob-

tenir très simplement des résultats analytiques sur les fréquences des modes propres de vibration. Il a donc semblé utile de présenter en détail une telle méthode.

On commence par introduire les modes propres de vibration les plus bas d'un condensat, ceux qui sont le plus souvent étudiés expérimentalement. On décrit leur structure et la manière dont ils peuvent être excités.

La réponse du condensat en fonction de la fréquence d'excitation permet de définir une densité spectrale. On montre que les moments d'ordre k de cette densité spectrale peuvent être mis sous la forme de valeurs moyennes de commutateurs dans l'état non perturbé du condensat.

Il se trouve que le calcul exact de ces commutateurs est possible. Il conduit à des relations exactes entre les fréquences des modes propres de vibration d'une symétrie donnée et les valeurs moyennes dans l'état non perturbé du condensat de l'énergie cinétique, de l'énergie de piégeage et de l'énergie d'interaction. On montre alors comment de telles relations permettent de calculer les fréquences des modes propres de vibration les plus bas, dans l'hypothèse où un seul mode de vibration de symétrie donnée contribue de manière prépondérante à la règle de somme. L'excellent accord entre la valeur analytique ainsi prédite pour la fréquence de vibration de ce mode et celle obtenue par un calcul numérique justifie l'hypothèse à la base d'une telle approche.

Condensat dans un piège tournant. Densité spatiale et champ de vitesses

Le problème posé est le suivant. Un condensat est contenu dans un piège anisotrope décrit par le potentiel

$$V_{\text{ext}}(x, y, z) = \frac{1}{2} m \left[\omega_x^2 x^2 + \omega_y^2 y^2 + \omega_z^2 z^2 \right]$$

L'anisotropie d'un tel potentiel autour de l'axe z est caractérisée par le paramètre

$$\varepsilon = \frac{\omega_x^2 - \omega_y^2}{\omega_x^2 + \omega_y^2}$$

On tourne le potentiel de piégeage V_{ext} autour de l'axe z à la vitesse angulaire Ω . Quelle est la nouvelle forme spatiale du condensat en régime stationnaire ? Quelle est l'allure du champ de vitesses ? Comment varient les phénomènes en fonction de ε et Ω ?

On commence par rappeler quelques résultats de mécanique classique sur les rotations. L'expression du nouvel hamiltonien H' décrivant la dynamique du système dans le référentiel tournant est établie. Il s'écrit

$$H' = H - \Omega L'_z$$

où H est l'hamiltonien dans le référentiel du laboratoire et L'_z la composante z du moment cinétique orbital. On montre également que les moments conjugués de la position, \vec{p} dans le référentiel du laboratoire, \vec{p}' dans le référentiel tournant,

coïncident, de sorte que \vec{p}'/m représente physiquement la vitesse dans le référentiel du laboratoire et que $L'_z = L_z$.

En l'absence d'interactions, les calculs de la nouvelle densité spatiale et du champ de vitesses sont très simples. Un calcul perturbatif de la nouvelle fonction d'onde du condensat dans le référentiel tournant est tout d'abord présenté à la limite des faibles vitesses de rotation Ω , l'effet de la perturbation $-\Omega L_z$ étant évalué à l'ordre le plus bas. En fait, la structure quadratique de l'hamiltonien H' en position et impulsion permet un calcul exact de la fonction d'onde pour toute valeur de Ω . Les résultats obtenus sont discutés en détail. La forme spatiale du condensat n'est pas modifiée aux faibles vitesses angulaires Ω . Le champ de vitesses a une structure complètement différente de celle correspondant à un corps solide en rotation.

Une autre limite intéressante est celle de Thomas-Fermi où le terme d'énergie cinétique de l'équation de Gross-Pitaevskii peut être négligé devant celui décrivant l'effet des interactions. À partir de l'équation ainsi obtenue dans le référentiel tournant, il est possible, en faisant apparaître le module et la phase de la fonction d'onde, d'obtenir des équations d'évolution de la densité spatiale (équation de continuité) et du champ de vitesses (équation d'Euler) dont l'interprétation physique est discutée en détail. Une solution quadratique vis-à-vis des coordonnées spatiales est obtenue. La structure du champ de vitesses est analogue à celle obtenue en l'absence d'interactions. Il est à noter qu'une telle solution n'est pas la seule solution possible de l'équation de Gross-Pitaevskii. D'autres solutions, décrivant les tourbillons quantiques, seront discutées plus loin.

Condensat dans un piège tournant — Moment cinétique et moment d'inertie

Les résultats ainsi obtenus sont utilisés pour calculer le moment cinétique et le moment d'inertie d'un condensat contenu dans un piège qui tourne à la vitesse angulaire Ω autour de l'axe z . Le résultat essentiel d'un tel calcul est que la valeur du moment d'inertie du condensat est beaucoup plus petite que la valeur rigide qui serait obtenue si le condensat tournait comme un corps solide. Le facteur de réduction est ε^2 , où ε est le paramètre d'anisotropie du piège introduit plus haut.

Le résultat obtenu pour le moment d'inertie d'un condensat dans un piège tournant est comparé à celui prédit pour d'autres systèmes. Pour un gaz parfait classique contenu dans un piège tournant on trouve la valeur rigide pour le moment d'inertie. Pour un gaz parfait de bosons partiellement condensé, on trouve que les $N - N_0$ bosons non condensés tournent comme un corps rigide, même quand ω_x tend vers ω_y , alors que les N_0 bosons condensés ont un moment d'inertie ε^2 fois plus petit que la valeur rigide.

Les paramètres qui décrivent l'anisotropie de la densité spatiale du condensat tournant et son champ de vitesses dépendant de ε et Ω . L'évolution de ces paramètres quand Ω augmente est étudiée. On montre que l'anisotropie de la densité

spatiale augmente brusquement quand Ω se rapproche de la fréquence d'un mode propre de surface du condensat. L'interprétation physique d'un tel résultat est donnée et l'analogie avec la résonance d'un oscillateur non linéaire soulignée.

Les modes ciseaux

Le cours suivant est consacré à l'étude d'un type particulier de modes propres de vibration du condensat permettant de mettre clairement en évidence la réduction du moment d'inertie du condensat prédite plus haut. Ces modes, appelés modes ciseaux, correspondent à des oscillations angulaires de faible amplitude du condensat dans le plan xOy , autour de sa position d'équilibre.

Le résultat essentiel du calcul de la fréquence des modes ciseaux est que cette fréquence reste élevée et inchangée même quand ω_x tend vers ω_y , c'est-à-dire quand ε tend vers 0. Or le moment des forces de rappel dues au potentiel de piégeage quand le condensat est écarté d'un petit angle de sa position d'équilibre tend vers 0 comme ε^2 quand ε tend vers 0. On s'attendrait donc à ce que la fréquence des oscillations angulaires tende elle aussi vers 0 quand ε tend vers 0. Si cette fréquence reste constante, c'est parce que le moment d'inertie du condensat tend lui aussi vers 0 comme ε^2 quand ε tend vers 0.

La comparaison avec le comportement d'autres systèmes, comme un gaz parfait de bosons partiellement condensé est, ici aussi, instructive. On trouve que les modes ciseaux ont toujours une fréquence élevée pour les N_0 bosons condensés, alors qu'il ont également une composante de fréquence basse, tendant vers 0 quand ε tend vers 0, pour les $N - N_0$ bosons non condensés.

L'existence de modes ciseaux de fréquence élevée est donc une caractéristique importante des condensats de Bose-Einstein. Des expériences récentes ayant mis en évidence un tel effet sont rapidement décrites.

Les tourbillons quantiques

Les tourbillons quantiques correspondent à des situations où tous les atomes d'un condensat sont dans un même état excité de moment cinétique non nul par rapport à l'axe Oz .

On commence par étudier le cas plus simple d'un condensat homogène. La fonction d'onde décrivant un tourbillon quantique est obtenue à partir de l'équation de Gross-Pitaevskii écrite en coordonnées cylindriques. La structure de la densité spatiale du tourbillon est ainsi déterminée. Elle décroît et s'annule sur l'axe Oz du tourbillon dans une zone appelée « cœur » du tourbillon. La dimension de ce cœur ainsi que l'énergie par unité de longueur du tourbillon sont calculées et interprétées physiquement. Le résultat le plus important concerne le champ de vitesses. Il a une symétrie de révolution autour de l'axe Oz et la circulation de la vitesse le

long d'un contour entourant l'axe Oz est quantifiée en unités de h/M , où h est la constante de Planck, M la masse des atomes condensés.

Les résultats précédents sont ensuite généralisés au cas d'un condensat inhomogène contenu dans un piège de symétrie cylindrique autour de Oz . Une expression analytique est obtenue pour l'énergie du condensat en fonction de h , M , du rayon R et de la longueur Z du condensat, de la longueur de relaxation ξ_0 et du nombre N d'atomes condensés.

On montre enfin que, si le piège contenant le condensat tourne, l'état à un tourbillon peut devenir l'état thermodynamique stable si la vitesse de rotation dépasse une certaine valeur critique qui est calculée.

Tourbillons quantiques et modes propres de vibration

L'un des problèmes essentiels posés par les tourbillons quantiques est leur détection. Comme la mesure des fréquences des modes propres de vibration est très précise, il est naturel de se demander si la présence d'un tourbillon quantique dans un condensat peut être détectée par une modification des fréquences des modes propres de vibration.

La méthode des règles de somme décrite plus haut est particulièrement commode pour répondre à une telle question. On calcule ainsi, en utilisant cette méthode, la différence $\omega_+ - \omega_-$ entre les fréquences des deux modes de surface quadrupolaires $m = +2$ et $m = -2$ tournant dans le même sens que le tourbillon et dans le sens opposé. Elle est proportionnelle au moment cinétique I_z de chacun des atomes condensés. La validité des approximations effectuées pour mener à bien un tel calcul est discutée. D'autres géométries de piégeage, correspondant par exemple à un condensat contenu dans un récipient de forme torique, sont enfin analysées.

Modes propres de vibration d'un gaz classique d'atomes dans un piège harmonique

Le comportement des modes ciseaux pour un condensat a été comparé plus haut à celui d'un gaz parfait de bosons où les interactions entre atomes sont négligées. Il est intéressant d'essayer d'inclure l'effet des collisions entre atomes pour un gaz classique d'atomes non condensés et d'étudier comment les collisions modifient la fréquence et l'amortissement des modes propres de vibration du nuage d'atomes non condensés.

La méthode utilisée consiste à partir de l'équation cinétique de Boltzmann décrivant l'évolution de la fonction de distribution des atomes dans l'espace des phases sous l'effet des collisions binaires entre atomes. On en déduit l'équation d'évolution des valeurs moyennes de grandeurs physiques reliées aux modes propres de vibration étudiés. Ces valeurs moyennes sont en général couplées aux valeurs

moyennes d'autres grandeurs physiques, ce qui conduit à un ensemble d'équations d'évolution couplées qu'il faut essayer de résoudre moyennant certaines approximations. Les grandeurs conservées au cours d'une collision, comme l'impulsion totale ou l'énergie totale, jouent un rôle important dans une telle approche car leur équation d'évolution ne fait pas intervenir le terme de collision apparaissant dans l'équation de Boltzmann.

La méthode exposée dans ce cours, et initialement introduite par D. Guéry-Odelin, F. Zambelli, J. Dalibard et S. Stringari, est illustrée tout d'abord au moyen d'un exemple simple, celui du mode monopolaire de compression d'un condensat dans un piège sphérique, correspondant à une vibration de $\langle r^2 \rangle$, où r est la distance des atomes au centre du piège. L'étude de l'équation d'évolution de $\langle r^2 \rangle$ conduit à un ensemble fermé d'équations d'évolution couplées ne faisant intervenir que des grandeurs conservées au cours des collisions. Le résultat d'un tel calcul est que le mode monopolaire de compression n'est pas amorti et garde la même fréquence quelle que soit la fréquence des collisions.

Le second exemple étudié est celui des modes ciseaux. Le calcul est alors plus compliqué car apparaissent alors dans les équations d'évolution couplées des grandeurs non conservées au cours de collisions. Une approximation simple, consistant à prendre une déformation quadrupolaire dans la distribution des vitesses, est alors introduite et permet de résoudre les équations d'évolution couplées. Une expression analytique peut être obtenue pour la fréquence complexe (incluant le taux d'amortissement) du mode ciseaux, permettant d'étudier l'évolution des phénomènes quand on passe d'un régime sans collision (où le temps τ_c entre collisions est beaucoup plus long que la période d'oscillation des atomes dans le piège) au régime hydrodynamique (où τ_c est beaucoup plus court que la période d'oscillation). Les résultats analytiques ainsi obtenus sont en excellent accord avec ceux d'une résolution numérique de l'équation de Boltzmann, ce qui justifie a posteriori l'approximation introduite plus haut sur la déformation quadrupolaire de la distribution des vitesses.

Une étude plus précise est enfin présentée pour la limite hydrodynamique où il est justifié de supposer qu'un équilibre thermodynamique local peut être atteint en tout point du nuage. À partir de l'équation cinétique de Boltzmann et des équations d'évolution de grandeurs conservées au cours des collisions écrites en supposant une fonction de distribution d'équilibre local variant d'un point à l'autre du nuage, il est possible de déduire une équation aux dérivées partielles décrivant la propagation du champ de vitesses du gaz d'atomes. Cette équation est alors utilisée pour étudier un certain nombre de modes propres de vibration du gaz classique d'atomes non condensés et pour comparer leurs propriétés avec celles des modes correspondants du condensat piégé dans le même potentiel.

ENSEIGNEMENT À L'ÉTRANGER

Quatre cours et un séminaire ont été donnés au Technion à Haïfa en Israël.

Les quatre cours ont été consacrés à une présentation générale de la théorie des interactions atome-photon : introduction de plusieurs approches possibles pour la description des processus quantiques dissipatifs, comme l'émission spontanée ; étude des propriétés de la lumière de fluorescence émise par un atome excité par un faisceau laser résonnant ; calcul et interprétation des forces radiatives exercées par un faisceau laser sur un atome ; application au refroidissement et au piégeage laser des atomes.

Le séminaire a été consacré à une revue des résultats récents obtenus sur les atomes ultra-froids et la condensation de Bose-Einstein.

SÉMINAIRES 2000-2001

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.

Sept séminaires ont été organisés :

T.W. HÄNSCH (Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching et Ludwig-Maximilians Universität, Munich),

« *Coherent matter waves in microscopic traps* ».

P. NOZIERES (Institut Laue Langevin, Grenoble),

« *Condensation de Bose-Einstein et supraconductivité* ».

R. BALIAN (Service de Physique Théorique, Centre d'Etudes de Saclay, Gif sur Yvette),

« *Un modèle simple exhibant la réduction du paquet d'ondes* ».

C. SALOMON (Laboratoire Kastler Brossel, ENS, Paris),

« *Mélanges d'isotopes du Lithium ultrafroids : un condensat au milieu d'une mer de Fermi* ».

T. EBBESEN (Laboratoire des Nanostructures, ISIS, Université Louis Pasteur, Strasbourg),

« *Les tamis à photons : la transmission optique exaltée à travers une ouverture nanométrique et le contrôle de sa diffraction* ».

A. HEIDMANN (Laboratoire Kastler Brossel, Université P. et M. Curie, Paris),

« *Mesure et contrôle du mouvement Brownien d'un miroir* ».

J. DALIBARD (Laboratoire Kastler Brossel, ENS, Paris),

« *L'expérience du baquet tournant avec un condensat de rubidium : nucléation et dynamique de tourbillons quantiques* ».

ACTIVITÉ SCIENTIFIQUE

M. Claude Cohen-Tannoudji effectue ses recherches au sein du Laboratoire Kastler Brossel de l'École Normale Supérieure. Il anime 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} mars 2001 par M. Franck Laloë, Directeur de Recherche au CNRS.

Le personnel du Laboratoire comporte : 15 enseignants-chercheurs (professeurs, maîtres de conférences, agrégés-préparateurs), 28 chercheurs au CNRS (directeurs et chargés de recherche), 20 chercheurs et post-doctorants étrangers, 35 élèves de grandes écoles et thésitifs, 21 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 de l'équipe atomes ultrafroids en 2001, ainsi que celle des thèses soutenues par des membres de cette équipe au cours de cette même année.

PUBLICATIONS

BIZE S., SORTAIS Y., MANDACHE C., CLAIRON A., SALOMON C., *IEEE trans. on Instr. and Measur.* **50** (2001) p. 503-506 : « Cavity Frequency Pulling in Cold Atom Fountains ».

BLANCHET L., SALOMON C., TEYSSANDIER P., WOLF P., *Astronomy and Astrophysics* **370** (2001) p. 320-329 : « Relativistic theory for time and frequency transfer to order c^{-3} ».

CARUSOTTO I., CASTIN Y., *J. Phys. B : At. Mol. Opt. Phys.* **34** (2001) p. 4589-4608 : « An exact stochastic field method for the interacting Bose gas at thermal equilibrium ».

CARUSOTTO I., CASTIN Y., DALIBARD J., *Phys. Rev. A* **63** (2001) 023606 : « N-boson time dependent problem : a reformulation with stochastic wave functions ».

CASTIN Y., p. 1-136, in *Coherent atomic matter waves*, Lecture Notes of Les Houches summer School, édité par R. Kaiser, C. Westbrook et F. David, EDP Sciences and Springer Verlag (2001).

CASTIN Y., HERZOG C., *CR Acad. Sci. Paris, t. 2, Série IV* (2001) p. 419-443 : « Bose-Einstein condensates in symmetry breaking states ».

CHEVY F., MADISON K. W., BRETIN V., DALIBARD J., *Phys. Rev. A* **64** (2001) 031601R : « Interferometric detection of a single vortex in a dilute Bose-Einstein condensate ».

COHEN-TANNOUJJI C., « Light and Matter » in Proceedings of the Jubilee Plenary Session 10-13 November 2000 on « Science and the future of Mankind : Science for man and Man for Science », Pontificia Academia Scientiarum, (Vatican City 2001) p. 213-227.

COHEN-TANNOUJJI C., ROBILLIARD C., *CR Acad. Sci. Paris, t. 2, Série IV* (2001) p. 445-477 : « Wave functions, relative phase and interference for atomic Bose-Einstein condensates ».

DALIBARD J., *Images de la Physique 2001*, (revue éditée par le CNRS) (2001) : « La condensation de Bose-Einstein ».

DALIBARD J., COHEN-TANNOUJJI C., in Atomic and Molecular Beams, The State of Art 2000, R. Camargue (Ed. Springer-Verlag) (2001) p. 43-62 : « Laser Cooling and Trapping of Neutral Atoms ».

LEMONDE P., LAURENT P., SANTARELLI G., ABGRALL M., SORTAIS Y., BIZE S., NICOLAS C., ZHANG S., SCHEHR G., CLAIRON A., DIMARCQ N., PETIT P., MANN A., LUITEN A., CHANG S., SALOMON C. : « Cold Atom Clocks on Earth and in Space » in Topics Appl. Phys. 79, Frequency measurement and control, A. Luiten ed., Springer Verlag (2001) p. 131-152.

MADISON K., CHEVY F., BRETIN V., DALIBARD J., *Phys. Rev. Lett.* **86** (2001) 4443 : « Stationary states of a rotating Bose-Einstein condensate : Routes to vortex nucleation ».

MINGUZZI A., FERRARI G., CASTIN Y., *Eur. Phys. J. D* **17** (2001), p. 49 : « Dynamic structure factor of a superfluid Fermi gas ».

PEREIRA DOS SANTOS F., RASEL E., UNNIKISHNAN C. S., LEDUC M., COHEN-TANNOUJJI C., *Phys. Rev. Letters* **86** (2001) p. 3459-3462 : « Bose-Einstein Condensation of Metastable Helium ».

PEREIRA DOS SANTOS F., PERALES F., LEONARD J., SINATRA A., WANG J., PAVONE F. S., RASEL E., UNNIKISHNAN C. S., LEDUC M., *Eur. Phys. J. D.* **14** (2001) p. 15-22 : « Penning collisions of laser-cooled metastable helium atoms ».

PEREIRA DOS SANTOS F., PERALES F., LEONARD J., SINATRA A., WANG J., PAVONE F. S., RASEL E., UNNIKISHNAN C. S., LEDUC M., *Euro. Phys. J. AP* **14** (2001) p. 69-76 : « Efficient magneto-optical trapping of a metastable helium gas ».

SALOMON C., DIMARCQ N., ABGRALL M., CLAIRON A., LAURENT P., LEMONDE P., SANTARELLI G., UHRICH P., BERNIER L. G., BUSCA G., JORNOD A., THOMANN P., SAMAIN E., WOLF P., GONZALEZ F., GUILLEMOT P., LEON S., NOUEL F., SIRMAIN C., FELTHAM S., C. R. Acad. Sci. Paris, T2, série IV (2001) p. 1313-1330 : « Cold atoms in space and atomic clocks : ACES ».

SALOMON C., SORTAIS Y., BIZE S., ABGRALL M., ZHANG S., NICOLAS C., MANDACHE C., LEMONDE P., LAURENT P., SANTARELLI G., CLAIRO A., DIMARCQ N., PETIT P., MANN A., LUITEN A., CHANG : « Cold Atom Clocks on Earth and in Space » in Proc. of the 17th Int. Conf. On Atomic Physics, E. Arimondo, M. Inguscio, ed., World Scientific (2001).

SALOMON C. : « Cold atoms in space and atomic clocks » in ESA book « A world without gravity, Research in space for Health and Industrial Processes », G. Seibert ed., ESA-SP 1251 (2001) p. 292-304.

SCHRECK F., FERRARI G., CORWIN K. L., CUBIZOLLES J., KHAYKOVICH L., MEWES M.-O., SALOMON C., *Phys. Rev. A* **64** (2001) 011402 : « Sympathetic cooling of bosonic and fermionic lithium gases towards quantum degeneracy ».

SCHRECK F., KHAYKOVICH L., CORWIN K. L., FERRARI G., BOURDEL T., CUBIZOLLES J., SALOMON C., *Phys. Rev. Lett.* **87** (2001) 080403 : « Quasipure Bose-Einstein Condensate Immersed in a Fermi Sea ».

SINATRA A., LOBO C., CASTIN Y., *Phys. Rev. Lett.* **87** (2001) 210404 : « Classical-Field Method for Time Dependent Bose-Einstein Condensed Gases ».

SINHA S., CASTIN Y., *Phys. Rev. Lett.* **87** (2001) 190402 : « Dynamic instability of a Rotating Bose-Einstein Condensate ».

SORTAIS Y., BIZE S., ABGRALL M., ZHANG S., NICOLAS C., MANDACHE C., LEMONDE P., LAURENT P., SANTARELLI G., DIMARCQ N., PETIT P., CLAIRO A., MANN A., LUITEN A., CHANG S., SALOMON C., *Physica Scripta* **T95** (2001) p. 50-57 : « Cold Atom Clocks ».

WOHLLEBEN W., CHEVY F., MADISON K., DALIBARD J., *Eur. Phys. Jour. D.15* (2001) p. 237 : « An atom faucet ».

THÈSES

BIZE Sébastien, Thèse de doctorat de l'Université Paris VI, « *Tests fondamentaux à l'aide d'horloge à atomes froids de rubidium et de césium* », (1 octobre 2001).

CHEVY Frédéric, Thèse de doctorat de l'Université Paris VI, « *Dynamique d'une condensat de Bose-Einstein* », (17 décembre 2001).

SORTAIS Yvan, Thèse de doctorat de l'Université Paris VI, « *Construction d'une fontaine double à atomes froids de 87 Rb et 133 Cs ; Étude des effets dépendant du nombre d'atomes dans une fontaine* », (20 décembre 2001).

ACTIVITÉS DIVERSES — MISSIONS — CONFÉRENCES

Conférences invitées à des conférences internationales

— *Eigth Rochester Conference on Coherence and Quantum Optics (CQO8)*, Rochester, États-Unis, juin 2001.

— *Colloque sur les Lasers et l'Optique Quantique (COLOQ 7)*, Rennes, France, septembre 2001.

— *Bose Einstein condensation 2001 (BEC 2001)*, San Feliu de Guixols, Espagne, septembre 2001.

— *Symposium Frontiers in Laser Spectroscopy* à l'occasion du 60^e anniversaire du Professeur Theodor W. Hänsch, Université Ludwig-Maximilian, Munich, Allemagne, novembre 2001.

Conférences spéciales et commémoratives

— *Lawrence C. Biedenharm Lectures, University of Texas*, Austin, États-Unis, mars 2001.

— *50^e anniversaire de l'École de physique des Houches*, Les Houches, France, juin 2001.

— *Enrico Fermi and Modern Physics*, Pise, Italie, octobre 2001.

— *Jubilee Nobel Symposium of Physics*, Göteborg, Suède, décembre 2001.

Séminaire

— *Conférence à l'École Normale Supérieure*, Cachan, France, mars 2001.

Conférences d'information scientifique

— *Conférence à l'École Centrale*, Châtenay-Malabry, France, janvier 2001.

— *Conférence dans le cadre de l'Université de Tous les Savoirs*, Paris, juillet 2001.

— *Conférence à la Faculté des Sciences*, Rabat, Maroc.

Responsabilités diverses

Membre du forum d'initiative franco-indien (New Delhi, février 2001).