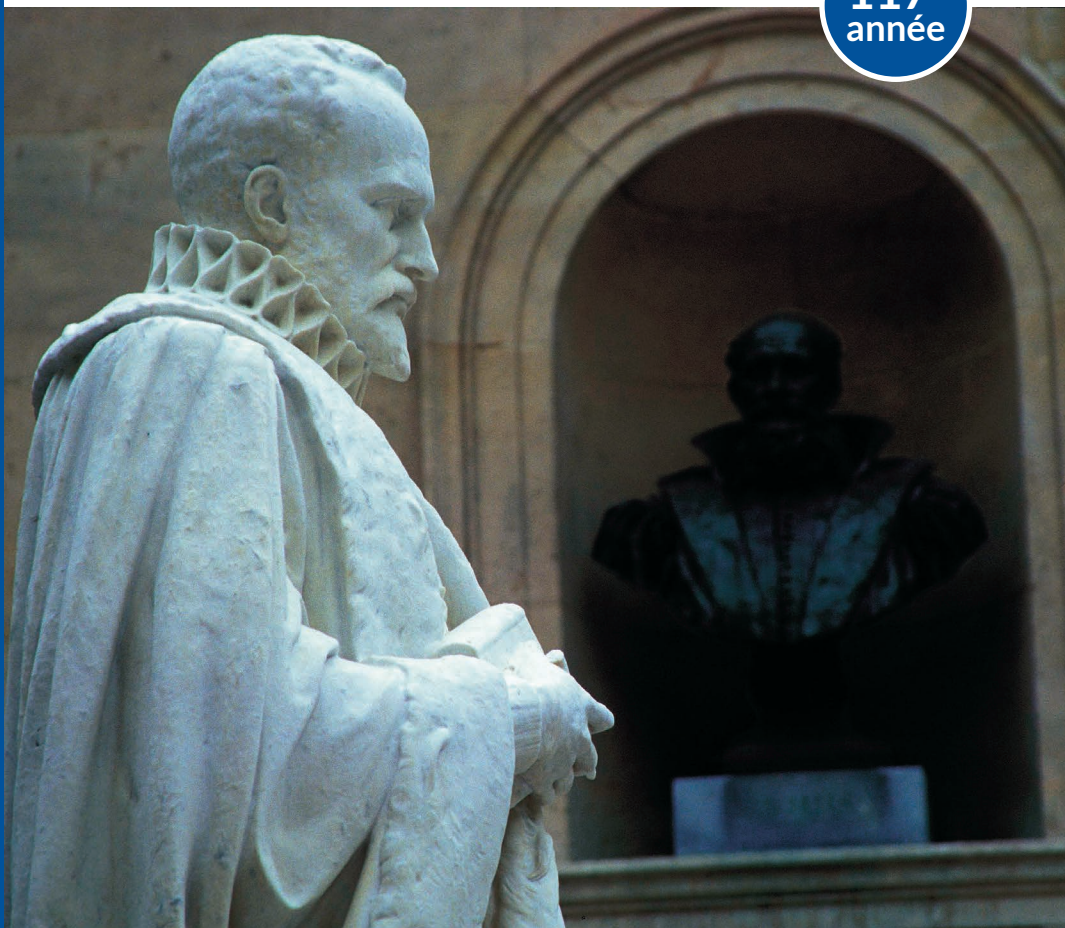


# ANNUAIRE du **COLLÈGE DE FRANCE** 2016 - 2017

Résumé des cours et travaux

117<sup>e</sup>  
année



COLLÈGE  
DE FRANCE  
— 1530 —

# ATOMES ET RAYONNEMENT

Jean DALIBARD

Membre de l'Institut (Académie des sciences),  
professeur au Collège de France

---

Mots-clés : physique quantique, physique statistique, atomes froids, vortex, polaritons

---

La série de cours et séminaires « Fluides quantiques de basse dimension et transition de Kosterlitz-Thouless » est disponible, en audio et/ou en vidéo, sur le site internet du Collège de France (<https://www.college-de-france.fr/site/jean-dalibard/course-2016-2017.htm>) ainsi que les notes de cours au format pdf ([http://www.college-de-france.fr/media/jean-dalibard/UPL6519324985816302006\\_notes\\_cours\\_total.compressed.pdf](http://www.college-de-france.fr/media/jean-dalibard/UPL6519324985816302006_notes_cours_total.compressed.pdf)).

## ENSEIGNEMENT

COURS – FLUIDES QUANTIQUES DE BASSE DIMENSION  
ET TRANSITION DE KOSTERLITZ-THOULESS

### Introduction

Que deviendraient les objets « ordonnés » de notre monde physique – cristaux, aimants, superfluides – si nous vivions dans un espace de dimension réduite, sur un plan par exemple ? L'analyse initiée par Peierls dans les années 1930 a montré que les fluctuations thermiques et quantiques auraient alors une importance accrue et empêcheraient l'apparition d'un ordre similaire à celui observé à trois dimensions. Mais si une transition « ordre-désordre » conventionnelle ne peut se produire en dimension réduite, cela n'entraîne pas la disparition de toute transition de phase. Les travaux de Kosterlitz et Thouless, récompensés par le prix Nobel de physique 2016, ont montré qu'un nouveau mécanisme pouvait émerger. La transition correspondante est qualifiée de « topologique », car elle se produit entre états qui ne peuvent être reliés par une déformation continue. Le cours a été consacré à la caractérisation de cette transition de Kosterlitz-Thouless dans des systèmes physiques comme les gaz d'atomes froids ou les cavités résonantes pour la lumière. Nous y avons montré le

rôle essentiel des interactions entre particules pour former les défauts topologiques que sont les vortex. Nous y avons également décrit une série d'expériences récentes qui ont caractérisé l'émergence d'un ordre superfluide dans ces fluides de basse dimension.

### **Cours 1 – Peierls et l'ordre cristallin en basse dimension**

Le cours de cette année a été consacré à l'étude de gaz quantiques en dimension réduite, essentiellement en dimension deux. Du fait de cette dimension réduite, le phénomène de condensation lié à la statistique de Bose-Einstein est absent, au moins à la limite thermodynamique, c'est-à-dire pour un système infini. En d'autres termes, l'ordre à longue portée qui caractérise un condensat de Bose-Einstein, c'est-à-dire la corrélation en phase de la fonction d'onde qui décrit le gaz, disparaît à deux ou à une dimension. Les fluctuations thermiques jouent en effet un rôle plus important qu'à trois dimensions, et elles viennent détruire l'ordre que la statistique ou les interactions auraient tendance à créer. C'est le physicien Rudolf Peierls, d'origine allemande, mais travaillant en Angleterre à partir de 1933, qui a le premier formalisé cette perte possible de l'ordre à longue portée dans les systèmes de dimensions réduites. Il ne s'intéressait pas aux condensats de Bose-Einstein, mais à l'ordre d'un solide et il a montré qu'un cristal ne pourrait pas exister dans un monde uni ou bidimensionnel. Dans ce cours, nous avons d'abord examiné les arguments de Peierls à une, puis à deux dimensions. Nous avons ensuite décrit quelques expériences récentes menées sur des colloïdes, qui ont permis de tester la prédiction de Peierls. Nous avons également montré que l'absence d'ordre cristallin n'entraîne pas un désordre complet : ces assemblées colloïdales peuvent être « presque » cristallines à basse température, avant de devenir complètement liquides à température plus élevée. Cela a constitué notre première rencontre avec une transition de phase induite par des défauts topologiques, concept formalisé par Berezinskii d'une part, et par Kosterlitz et Thouless d'autre part (BKT).

### **Cours 2 – Gaz quantique en dimension deux : du cas idéal aux interactions binaires**

Nous avons abordé dans ce cours la notion de « fluide quantique à deux dimensions ». L'essentiel de la leçon a été consacré au cas du gaz parfait régi par la statistique de Bose-Einstein. Nous nous sommes intéressés successivement au cas uniforme, pour lequel il n'y a pas de condensation à la limite thermodynamique, et au cas d'un gaz piégé pour lequel la condensation peut se produire. Nous avons ensuite décrit des expériences menées sur une assemblée de photons en cavité illustrant cette prédiction. Dans une dernière partie, nous avons mis en place le formalisme permettant de prendre en compte les interactions entre particules à deux dimensions en nous intéressant à une collision binaire entre atomes identiques.

### **Cours 3 – Le quasi-ordre à longue portée**

À partir de ce cours, nous nous sommes intéressés au cas d'un gaz en interaction. Cette leçon a été consacrée au régime de basse température, pour lequel l'état du gaz peut être décrit comme un « quasi-condensat », c'est-à-dire un condensat avec une phase fluctuante. Nous avons adopté une description du fluide atomique en termes

de champ classique, ce qui a apporté des simplifications importantes par rapport à la description complètement quantique. Nous avons toutefois montré que cette description en termes de champ classique contient toujours un « élément quantique » essentiel, la quantification de la circulation de la vitesse. Cette dernière joue un rôle central au cours 4, où nous nous penchons sur la physique des vortex. Dans ce cours 3, nous nous sommes concentrés sur les excitations « douces » du gaz, c'est-à-dire les phonons, qui sont prépondérantes à basse température. Notre résultat essentiel a consisté à montrer que les interactions répulsives entre atomes, qui sont à la base de cette physique des phonons, induisent un quasi-ordre à longue portée dans le gaz, avec une décroissance algébrique de la fonction de corrélation à un corps  $G_1(r)$ . Ce résultat est radicalement différent de celui trouvé pour un gaz parfait dans le cours précédent ; nous avons en effet montré que  $G_1(r)$  décroissait toujours exponentiellement avec la distance en l'absence d'interactions.

#### **Cours 4 – Le point critique de la transition BKT**

Dans ce cours, notre but a été d'aller au-delà du modèle purement phononique pour les excitations du gaz et de prendre en compte les vortex. Leur influence peut se comprendre de manière intuitive : supposons que l'on ait – après avoir pris en compte les phonons – une certaine cohérence de phase entre deux points A et B ; si un vortex avec son enroulement de phase de  $2\pi$  peut être aléatoirement inséré sur le segment AB, la différence de phase va basculer entre sa valeur initiale et cette valeur additionnée de  $\pi$ . Ce déphasage aléatoire fera perdre toute cohérence entre A et B, et le quasi-ordre en phase qui pouvait exister entre ces deux points sera détruit. Nous avons étudié successivement le rôle d'un vortex isolé, puis d'une paire de vortex de circulations opposées, avant de nous intéresser à la thermodynamique d'une assemblée de vortex. Finalement, nous avons abordé le rôle des vortex dans le cadre du groupe de renormalisation. Cela nous a permis d'établir un critère clair de superfluidité ; nous avons trouvé en particulier que la densité superfluide dans l'espace des phases est soit nulle, soit supérieure à 4.

#### **Cours 5 – La transition BKT explorée avec des gaz d'atomes ou de polaritons**

Le but de ce cours a été de montrer comment les gaz dilués formés d'atomes ou de particules composites matière-lumière permettent de tester les différentes propriétés étudiées jusqu'ici sur le plan théorique. Nous sommes d'abord revenus sur le formalisme de champ classique pour déterminer la position du point de transition en termes de variables thermodynamiques usuelles, comme la densité totale, la température ou le potentiel chimique. Nous avons ensuite décrit une série d'expériences récentes menées sur des gaz d'atomes bosoniques ou fermioniques (mais pouvant dans ce dernier cas former des molécules diatomiques qui sont donc des bosons). Ces expériences ont permis de tester à la fois la position du point critique et les propriétés du gaz de part et d'autre de ce point. Nous avons terminé par la description de quelques expériences de même nature menées cette fois sur les polaritons de cavité.

## Cours 6 – Invariance d'échelle classique, anomalies quantiques

L'invariance d'échelle est un concept que l'on rencontre dans de nombreuses branches de la physique, depuis le comportement d'un système au voisinage d'une transition de phase jusqu'à la physique des hautes énergies. Dans ce dernier cours, nous l'avons abordée sous l'angle de la théorie de champ classique utilisée jusqu'ici pour décrire un gaz de Bose à deux dimensions. Elle consiste à tirer parti du fait que les différentes contributions à l'énergie du fluide se comportent de manière très simple quand on multiplie plusieurs variables thermodynamiques par un même facteur d'échelle. Cette invariance d'échelle a également des conséquences sur les propriétés dynamiques du système. Nous en avons donné un exemple à propos du « mode de respiration » d'un gaz confiné dans un piège harmonique isotrope, qui oscille toujours à la fréquence double de celle du piège, quelle que soit la force des interactions. Les résultats que nous venons de mentionner portent sur un fluide décrit par un champ classique, dans lequel les interactions sont prises en compte par un paramètre constant et sans dimension. Décrire les interactions de cette façon revient à supposer que le potentiel entre atomes est proportionnel à une distribution de Dirac à deux dimensions. Toutefois, cette approche est singulière sur le plan quantique et il est nécessaire de régulariser la distribution de Dirac. On se retrouve alors face à un phénomène connu sous le nom d'« anomalie quantique » : on part d'un problème qui présente une symétrie exacte au niveau classique, en l'occurrence l'invariance d'échelle. Mais la quantification du problème nécessite une régularisation pour éliminer certaines divergences. L'anomalie réside alors dans le fait que la version régularisée amène obligatoirement une brisure de la symétrie initiale. Dans le cas du gaz 2D, la régularisation du potentiel de contact introduit nécessairement une énergie qui brise l'invariance d'échelle trouvée avec le champ classique. Après avoir décrit en détail cette procédure de régularisation, nous avons terminé ce cours en examinant les conséquences de la brisure de l'invariance d'échelle sur le mode de respiration.

### SÉMINAIRES

#### Séminaire 1 – Une dualité onde/particule à échelle macroscopique : le rôle d'une mémoire

Yves Couder (laboratoire Matière et systèmes complexes, université Paris Diderot),  
le 3 mai 2017

Le comportement des objets de la physique à échelle microscopique est dominé par leur dualité onde/particule. Cette caractéristique fondamentale, parfaitement décrite dans le cadre quantique, est souvent considérée comme sans équivalent dans la physique classique. Ce séminaire a été consacré à la possibilité d'introduire un système d'échelle macroscopique où une particule et une onde sont dynamiquement associées. Une gouttelette rebondissant sur un bain liquide vibrant peut devenir autopropulsée par son couplage aux ondes de surface qu'elle génère. Il en résulte la formation d'une entité composite formée de la goutte et de son onde associée. Un échange itératif d'information se produit entre ces deux composantes du système : la goutte génère l'onde et l'onde détermine où la goutte va aller. Les ondes ont un long temps de vie, si bien que le champ d'onde global contient une mémoire de la

trajectoire antérieure. En présence de cette « mémoire de chemin », plusieurs comportements de dualité onde-particule peuvent être observés en dépit de la nature classique de ce système.

### **Séminaire 2 – *A relaxed approach to quantum state engineering***

Klaus Moelmer (Aarhus University, Danemark), le 10 mai 2017

In order to prepare and observe coherent and entangled superposition states, immense efforts are being devoted to eliminate relaxation and decoherence. Recent works, however, have pursued an exactly opposite approach and actively employed dissipation for quantum state engineering. Unlike unitary evolution, where controllability can be assessed and optimal solutions can be found in systematic ways, the combined use of dissipation mechanisms and interaction Hamiltonians currently offers a zoo of different methodologies and working principles : coherent dark states, Zeno dynamics, heralding, cascaded systems, coherent feedback... This seminar has been devoted to the description of some recent ideas and methods for dissipative generation of useful quantum states and their possible implementation in atomic and quantum optical systems.

### **Séminaire 3 – *Contexts, systems, modalities: A physically realist framework for quantum mechanics***

Alexia Auffeves (Institut Néel - CNRS, Grenoble), le 17 mai 2017

This seminar has been devoted to the presentation of a possible way to make usual quantum mechanics fully compatible with physical realism, defined as the statement that the goal of physics is to study entities of the natural world, existing independently from any particular observer's perception, and obeying universal and intelligible rules. A new ontology for quantum mechanics is proposed, where physical properties are attributed jointly to the system, and to the context in which it is embedded. In combination with a quantization principle, this non-classical definition of physical reality sheds new light on counter-intuitive features of quantum mechanics such as the origin of probabilities, non-locality, and the quantum-classical boundary. Eventually, this quantum ontology translates into physically realist axioms, allowing to recover the quantum formalism and Born's rule: in this heuristic approach, quantization comes first, interferences second.

### **Séminaire 4 – *Berezinskii-Kosterlitz-Thouless transition and Sine-Gordon theory: from superconductors to cold atomic gases***

Thierry Giamarchi (université de Genève, Suisse), le 24 mai 2017

The Berezinskii-Kosterlitz-Thouless (BKT) transition provides a remarkable example of a transition controlled by topological effects. In addition to its consequences for classical two-dimensional systems, the BKT transition directly applies to one-dimensional quantum problems as well. It was shown in this seminar how, using a formalism initially developed by Haldane, one can relate the BKT problem to another paradigmatic quantum problem, namely the so-called sine-Gordon theory. This mapping allows one to derive several interesting consequences both for clean (in periodic or quasi-periodic lattices) and dirty bosons. Such

problems were examined in the seminar, in particular in the context of cold atomic gases. It was also shown how using this mapping one can go back to the case of two dimensional systems, namely disordered superconducting films.

### **Séminaire 5 – Dipolar quantum gases and liquids**

Tilman Pfau (université de Stuttgart, Allemagne), le 31 mai 2017

Dipolar interactions are fundamentally different from the usual van der Waals forces in real gases. Besides the anisotropy, the dipolar interaction is nonlocal and as such allows for self-organized structure formation similar to the Rosensweig instability in classical magnetic ferrofluids. In the experiments with quantum gases of Dysprosium atoms performed in the team of the seminar speaker, the formation of a droplet crystal was observed. In contrast to theoretical mean field based predictions, the superfluid droplets did not collapse. It was confirmed experimentally that this unexpected stability is due to beyond-mean-field quantum corrections of the Lee-Huang-Yang type. Self-bound droplets in three dimensions were also observed, which can interfere with each other. These droplets are 100 million times less dense than liquid helium droplets and they open new perspectives as a truly isolated quantum system. Under strong confinement in one dimension, the formation of a striped phase was also observed, with random mutual phases between the stripes.

### **Séminaire 6 – La physique des fluides de Bose à une dimension : l'utilisation des gaz ultra-froids comme simulateurs quantiques**

Isabelle Bouchoule (laboratoire Charles Fabry, Palaiseau), le 7 juin 2017

La physique des gaz de Bose à une dimension est très différente de ce que l'on observe à deux et trois dimensions. Les fluides 1D constituent des systèmes modèles pour la physique à N corps pour lesquels on dispose de techniques théoriques et numériques puissantes avec, dans certains cas, des solutions exactes. Le séminaire a été consacré à une revue des résultats obtenus récemment sur des gaz 1D d'atomes froids, avec la présentation du modèle de Lieb-Lininger, l'étude de la transition de quasi-condensation observée à partir des fluctuations de densité, la caractérisation de leur distribution en impulsion et enfin l'étude de la dynamique de ces fluides particuliers, caractérisée par l'intermédiaire de leur facteur de structure.

### **COURS À L'EXTÉRIEUR – LECTURES ON QUANTUM GASES: FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS**

Université de Pékin, du 8 au 10 novembre 2016

Cette série de cours a été consacrée à une revue de la physique des atomes froids et de leurs applications. Nous avons commencé par décrire les mécanismes de refroidissement des gaz atomiques pour arriver aux notions de condensation de Bose-Einstein et de cohérence macroscopique, qui apparaissent pour un fluide suffisamment dense. Nous avons ensuite pris en compte les interactions entre particules pour faire émerger la notion de superfluidité, caractérisée par l'existence de courants métastables. Nous avons également discuté le rôle de la dimensionnalité d'espace sur la nature de la transition de phase susceptible d'être observée dans ces fluides. La dernière partie a été consacrée à la physique des champs de jauge

artificiels, qui peuvent être générés à l'aide de faisceaux lumineux. Pour un choix judicieux de ces faisceaux lumineux irradiant le gaz atomique, on peut faire émerger des phases géométriques topologiquement non triviales (phase de Berry), qui permettent de simuler avec des gaz d'atomes des situations similaires à celle de l'effet Hall quantique se produisant pour des fluides d'électrons confinés dans un puits quantique.

## RECHERCHE

Notre équipe étudie le comportement collectif d'atomes refroidis au microkelvin et en deçà. Elle a installé au Collège de France plusieurs montages expérimentaux dédiés aux thèmes suivants : (i) l'étude des gaz quantiques à deux dimensions et de la transition superfluide de type Kosterlitz-Thouless ; (ii) la physique des gaz spinneurs, avec la recherche d'une transition vers des états magnétiquement ordonnés ; (iii) la matière quantique topologique, en lien avec la création de champs magnétiques artificiels permettant de reproduire des états de type effet Hall quantique et des supraconducteurs topologiques. Cette recherche s'inscrit globalement dans le programme de simulation quantique qui vise à utiliser des assemblées d'atomes ou de photons pour émuler des problèmes encore ouverts dans d'autres branches de la physique, notamment en matière condensée.

Parmi les résultats marquants obtenus cette année, signalons d'abord l'étude de la fusion de plusieurs condensats d'atomes de rubidium préparés de manière indépendante et disposés tout le long d'un anneau. Après la fusion, l'anneau est parcouru par un courant permanent aléatoire dont nous avons mesuré la loi de probabilité. Nous avons en particulier caractérisé la variation de l'intensité moyenne de ce courant avec le nombre de condensats et montré que l'on retrouvait une loi d'échelle connue théoriquement sous le nom de « règle géodésique ». Cette recherche offre une perspective nouvelle sur le mécanisme de Kibble-Zurek, qui décrit le comportement de systèmes physiques lorsqu'ils traversent une transition de phase.

Un deuxième résultat porte sur les gaz spinneurs d'atomes de sodium et leur condensation de Bose-Einstein. Puisque les atomes utilisés ont un spin 1, ils peuvent exister dans trois états internes différents et on peut donc observer jusqu'à trois transitions différentes, correspondant à la condensation de chacun des états de spin. Si le point de condensation le plus chaud est facilement calculable par la théorie du gaz parfait, il n'en va pas de même pour les deux autres puisque les transitions se produisent alors en présence du premier condensat et sont donc fortement influencées par les interactions. Il s'agit par conséquent d'un problème complexe et intéressant, sur lequel nous avons publié nos premiers résultats expérimentaux et engagé en parallèle une collaboration avec une équipe de théoriciens.

Signalons enfin notre étude d'un gaz d'ytterbium dans le régime « isolant de Mott ». Ce gaz est piégé aux nœuds d'un réseau optique avec un ou deux atomes par site du réseau. Grâce à une étude spectroscopique de ce gaz, menée en comparant les résultats obtenus pour les sites à un et à deux atomes, nous avons pu déterminer les paramètres d'interaction entre particules en fonction de leur état interne. Il s'agit d'une mesure utile à la fois pour la métrologie, puisque l'atome d'ytterbium est un candidat potentiel aux futurs standards de fréquence, et pour notre recherche à long terme sur les champs de jauge artificiels, puisque les interactions entre atomes y seront déterminantes pour générer des états fortement intriqués.



## PUBLICATIONS

SALA A., NÚÑEZ D. L., MARTORELL J., DE SARLO L., ZIBOLD T., GERBIER F., POLLS A. et JULIÁ-DÍAZ B., « Shortcut to adiabaticity in spinor condensates », *Physical Review A*, vol. 94, n° 4, 2016, 043623, DOI : 10.1103/PhysRevA.94.043623.

ZHANG J., BEUGNON J. et NASCIBÈNE S., « Creating fractional quantum Hall states with atomic clusters using light-assisted insertion of angular momentum », *Physical Review A*, vol. 94, n° 4, 2016, 043610, DOI : 10.1103/PhysRevA.94.043610 [arXiv:1608.07460].

BEUGNON J. et NAVON N., « Exploring the Kibble-Zurek mechanism with homogeneous Bose gases », *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, vol. 50, n° 2, 2017, 022002, DOI : 10.1088/1361-6455/50/2/022002 [arXiv:1611.01145].

SINGH V.P., WEITENBERG C., DALIBARD J. et MATHEY L., « Superfluidity and relaxation dynamics of a laser-stirred 2D Bose gas », *Physical Review A*, vol. 95, n° 4, 2017, 043631, DOI : 10.1103/PhysRevA.95.043631 [arXiv:1703.02024].

VILLE J.L., BIENAIMÉ T., SAINT-JALM R., CORMAN L., AIDELSBURGER M., CHOMAZ L., KLEINLEIN K., PERCONTE D., NASCIBÈNE S., DALIBARD J., BEUGNON J., « Loading and compression of a single two-dimensional Bose gas in an optical accordion », *Physical Review A*, vol. 95, n° 1, 2017, 013632, DOI : 10.1103/PhysRevA.95.013632 [arXiv:1611.07681].

FRAPOLLI C., ZIBOLD T., INVERNIZZI A., JIMÉNEZ-GARCÍA K., DALIBARD J. et GERBIER F., « Stepwise Bose-Einstein condensation in a spinor gas », *Physical Review Letters*, vol. 119, n° 5, 2017, 050404, DOI : 10.1103/PhysRevLett.119.050404 [arXiv:1702.08265].

LI H., WYART J.-F., DULIEU O., NASCIBÈNE S. et LEPERS M., « Optical trapping of ultracold dysprosium atoms : transition probabilities, dynamic dipole polarizabilities and van der Waals  $C_6$  coefficients », *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, vol. 50, n° 1, 2017, 014005, DOI : 10.1088/1361-6455/50/1/014005 [arXiv:1607.05628].

DREON D., SIDORENKOV L. A., BOUAZZA C., MAINEULT W., DALIBARD J. et NASCIBÈNE S., « Optical cooling and trapping of highly magnetic atoms : The benefits of a spontaneous spin polarization », *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, vol. 50, n° 6, 2017, 065005, DOI : 10.1088/1361-6455/aa5db5 [arXiv:1610.02284].

AIDELSBURGER M., VILLE J. L., SAINT-JALM R., NASCIBÈNE S., DALIBARD J. et BEUGNON J., « Merging  $N$  independent condensates: Disentangling the Kibble-Zurek mechanism », *Physical Review Letters*, vol. 119, n° 19, 2017, 190403 [arXiv:1705.02650].

CORMAN L., VILLE J. L., SAINT-JALM R., AIDELSBURGER M., BIENAIMÉ T., NASCIBÈNE S., DALIBARD J. et BEUGNON J., « Transmission of near-resonant light through a dense slab of cold atoms », *Physical Review A*, vol. 96, n° 5, 2017, DOI : 10.1103/PhysRevA.96.053629 [arXiv:1706.09698].

BOUGANNE R., AGUILERA M.B., DAREAU A., SOAVE E., BEUGNON J. et GERBIER F., « Clock spectroscopy of interacting bosons in deep optical lattices », *New Journal of Physics*, vol. 19, n° 11, 2017, p. 113006, DOI : 10.1088/1367-2630/aa8c45 [arXiv:1707.04307].

MATHEY L., GÜNTER K.J., DALIBARD J. et POLKOVNIKOV A., « Dynamic Kosterlitz-Thouless transition in 2D Bose mixtures of ultra-cold atoms », *Physical Review A*, vol. 95, n° 5, 2017, DOI : 10.1103/PhysRevA.95.053630 [arXiv: 1112.1204].

ZIBOLD T., CORRE V., FRAPOLLI C., INVERNIZZI A., DALIBARD J. et GERBIER F., « Spin nematic order in antiferromagnetic spinor condensates », *Physical Review A*, vol. 93, n° 2, 2016, 023614, DOI : 10.1103/PhysRevA.93.023614 [arXiv:1506.06176].