

ATOMES ET RAYONNEMENT

Jean DALIBARD

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

Mots-clés : superfluidité, matière quantique, atome, physique quantique

La série de cours et séminaires « Cohérence et superfluidité dans les gaz atomiques » est disponible, en audio et/ou en vidéo, sur le site internet du Collège de France (<http://www.college-de-france.fr/site/jean-dalibard/course-2015-2016.htm>) ainsi que les notes de cours au format pdf (http://www.college-de-france.fr/media/jean-dalibard/UPL378823497387772639_cours_2016.pdf).

ENSEIGNEMENT

COURS – COHÉRENCE ET SUPERFLUIDITÉ DANS LES GAZ ATOMIQUES

Introduction

Grâce au refroidissement lumineux complété par le refroidissement par évaporation, on sait abaisser la température des gaz atomiques en dessous du microkelvin. Quand les atomes sont des particules de spin entier, donc des « bosons », ce refroidissement peut donner naissance à un condensat de Bose-Einstein. Ce phénomène observé pour la première fois il y a une vingtaine d'années a donné naissance à un vaste champ de recherche, allant de la physique à N corps à la métrologie.

Le cours de cette année a été consacré à l'étude des propriétés de cohérence et de superfluidité de ces gaz d'atomes. La cohérence apparaît comme une conséquence directe du phénomène de condensation prédit par Albert Einstein en 1925 à partir des travaux de Satyendranath Bose. L'accumulation d'atomes dans un état particulier donne naissance à une onde de matière macroscopique dont la cohérence peut être évaluée à partir d'expériences d'interférence. En parallèle avec la cohérence macroscopique, on observe dans ces gaz un comportement superfluide, se traduisant par une absence de chauffage lorsqu'ils sont traversés par une impureté. La superfluidité se manifeste également par l'existence de courants permanents,

excitations macroscopiques métastables de longue durée de vie. Il existe donc un lien étroit entre la physique des gaz d'atomes froids et celle de l'hélium liquide, en dépit d'une différence de 8 à 10 ordres de grandeur entre leurs densités.

Dans ce cours, nous avons cherché à établir des liens entre les différentes propriétés des fluides quantiques atomiques. À partir de modélisations théoriques relativement simples (équation de Gross-Pitaevskii, méthode de Bogoliubov, *ansatz* de Gutzwiller), nous avons étudié le cas des systèmes homogènes ainsi que celui des gaz confinés dans des réseaux optiques, avec notamment la transition entre un état superfluide et un état « isolant de Mott ». Nous avons également décrit une série d'expériences récentes menées sur ces systèmes, mettant en évidence différentes facettes de la cohérence macroscopique et de la superfluidité.

Cours 1 – Statistique de Bose-Einstein et condensation

Le premier cours a été consacré à un problème simple, l'étude de l'état d'équilibre d'un gaz parfait composé de particules indiscernables. Nous sommes partis du travail de Bose, qui s'est le premier posé ce problème dans le cadre de ses études sur le rayonnement du corps noir, c'est-à-dire un gaz thermique de photons. La généralisation par Einstein à un gaz de particules matérielles fut presque immédiate et permit d'introduire le concept de saturation des états excités : pour un système de taille finie et de température donnée, le nombre de particules que l'on peut placer dans l'ensemble des niveaux d'énergie en dehors du niveau fondamental est borné. Les particules en excès de cette borne ne peuvent donc occuper que le niveau fondamental, formant un condensat de Bose-Einstein.

Une fois cette saturation acquise, pour un gaz confiné dans une boîte ou dans un piège harmonique, nous avons étudié comment prendre la limite thermodynamique du système, en faisant tendre la taille du gaz vers l'infini tout en gardant constants les paramètres intensifs (densité, température). Nous avons montré que la « survie » de la saturation dépend à la fois de la dimensionnalité de l'espace et de la nature du confinement du gaz. Nous avons illustré ces différents concepts par des résultats expérimentaux récents, obtenus notamment avec des pièges « à fond plat ». Nous avons terminé ce cours par une toute première discussion de la condensation de Bose-Einstein au-delà du gaz parfait, avec le critère proposé par Penrose et Onsager.

Cours 2 – Du gaz de Bose à l'état superfluide

Le but de ce cours a été l'étude du lien entre la condensation d'un gaz de particules bosoniques et son éventuelle superfluidité. Nous sommes partis du fait que la condensation de Bose-Einstein d'un fluide, qu'il soit parfait ou en interaction, se caractérise par une propriété mathématique simple : l'existence d'une valeur propre macroscopique pour l'opérateur densité à un corps, ce qui traduit un ordre à longue portée. Nous avons donc commencé par décrire la méthode utilisée en pratique pour accéder à cette quantité pour des gaz d'atomes froids.

Nous sommes ensuite passés au phénomène de superfluidité. La définition même de la superfluidité et la détermination des paramètres qui l'accompagnent – densité superfluide, vitesse superfluide – sont complexes. La notion de superfluidité fait appel à des phénomènes physiques variés qu'il importe de bien identifier. Nous l'avons fait en prenant deux situations emblématiques de l'étude des superfluides ; il s'agit « d'expériences de pensée » pour lesquelles le fluide est soit à l'équilibre, soit

dans un état métastable. En ce qui concerne les atomes froids, ces expériences de pensée ont été réalisées récemment et nous avons décrit brièvement leurs protocoles et leurs principaux résultats. Une fois identifiées ces deux situations, nous avons décrit le modèle à deux fluides initialement proposé par Tisza, puis approfondi par Landau, pour rendre compte de la superfluidité de l'hélium liquide.

Cours 3 – Gaz en interaction et critère de Landau

Contrairement à la condensation de Bose-Einstein, qui se produit pour un gaz parfait, la superfluidité est un phénomène qui requiert des interactions entre particules. En effet, un des critères de superfluidité – l'existence de courants permanents – n'est pas satisfait dans un gaz idéal : ce sont les interactions répulsives entre particules qui assurent qu'un courant peut exister dans un état métastable, en étant protégé par une barrière d'énergie de la relaxation vers l'état fondamental.

Le but de ce troisième cours a été l'exploration détaillée du rôle essentiel des interactions. Nous avons commencé par une description qualitative de leur impact en termes de fragmentation, d'hybridation ou encore d'intrication de l'état quantique du fluide. Nous avons ensuite étudié la fonctionnelle d'énergie de Gross-Pitaevskii, puis le formalisme de Bogoliubov qui lui est associé. Cela nous a permis de déterminer quantitativement le spectre en énergie du gaz en interaction. Nous avons établi le critère de Landau, qui exprime à quelle condition un écoulement superfluide peut être stable vis-à-vis d'une perturbation. Nous avons également examiné comment aller au-delà de ce critère en étudiant le freinage d'un écoulement superfluide par nucléation de paires de tourbillons quantiques.

Cours 4 – Condensation et superfluidité dans un réseau

Après l'étude de la superfluidité des gaz de Bose homogènes, nous avons abordé dans ce cours le comportement du fluide en présence d'un réseau périodique. Cette étude nous a notamment conduits à la transition de phase quantique entre l'état superfluide et l'état « isolant de Mott », transition mise en évidence sur des atomes froids en 2002.

Notre point de départ a été l'état superfluide, décrit par une approche de Gross-Pitaevskii similaire à celle utilisée dans le cours 3. Nous avons décrit quelques expériences qui ont montré que la présence d'un potentiel périodique peut déstabiliser un courant permanent et briser la superfluidité. Cela nous a conduits à la transition de phase superfluide-isolant ; cette transition, initialement étudiée dans un contexte de matière condensée, a ensuite été transposée aux atomes froids en 1998. Elle est désormais devenue emblématique de la possibilité d'atteindre des états fortement corrélés avec des gaz dilués. Nous avons abordé cette transition superfluide-isolant par plusieurs approches, notamment le traitement théorique simple fondé sur l'*ansatz* de Gutzwiller.

Cours 5 – Cohérence et modes collectifs dans un réseau

Après avoir décrit le principe de la transition de phase superfluide-isolant dans un réseau optique, nous sommes passés à l'étude expérimentale de ce phénomène. Nous avons analysé une expérience de temps de vol, dans laquelle la cohérence associée à

l'état superfluide se manifeste par des « pics de Bragg » correspondant à une accumulation d'atomes autour de classes d'impulsions bien précises.

Comme la plupart de ces expériences sont menées avec un piège harmonique superposé au réseau optique, ceci nous a amenés à affiner notre description théorique. Après avoir introduit la notion d'incompressibilité de l'état isolant, nous avons adopté la variable associée au point de vue grand-canonique, à savoir le potentiel chimique, et nous avons introduit l'approximation de densité locale pour décrire la transition. Nous avons alors montré que la transition vers l'état isolant se manifeste par des plateaux de densité constante, qui ont effectivement été observés dans les expériences récentes de « microscope atomique ».

Dans la dernière partie de ce cours, nous sommes revenus sur la nature de la transition de phase superfluide-isolant, en partant du modèle bien connu de Landau-Ginsburg pour les transitions du deuxième ordre. Nous avons abordé une spécificité de cette transition liée au rôle symétrique qu'y jouent les particules et les trous. Nous avons expliqué pourquoi cela permet d'y observer un mode collectif pour lequel l'amplitude du paramètre d'ordre oscille. Ce mode, qui est formellement très proche du mode de Higgs de la physique des particules, était absent de la dynamique fondée sur l'équation de Gross-Pitaevskii que nous avons étudiée auparavant pour un gaz uniforme.

SÉMINAIRES

Séminaire 1 – Effet Hanbury Brown et Twiss, effet Hong, Ou et Mandel : des photons aux atomes

Alain Aspect (Institut d'optique, université Paris-Saclay, Palaiseau)

Dans ce premier séminaire de la série, le conférencier a montré comment des effets emblématiques de la lumière, liés aux corrélations en intensité du champ électromagnétique, pouvaient se transposer à des gaz d'atomes et donner naissance à des outils de diagnostic remarquablement précis pour caractériser l'état du fluide quantique. Des expériences récentes, mettant en évidence les deux effets « Hanbury Brown et Twiss » et « Hong, Ou et Mandel » avec des atomes d'hélium portés dans un niveau métastable, ont été décrites.

Séminaire 2 – *Bose-Einstein condensation of light*

Martin Weitz (université de Bonn, Allemagne)

Alors que la condensation de Bose-Einstein est traditionnellement associée à des particules matérielles, le conférencier a montré qu'elle pouvait également se manifester pour des gaz de photons, pourvu que ceux-ci soient produits et confinés dans une cavité de sorte qu'on peut leur attribuer un potentiel chimique et une masse effective non nulle. Il a notamment discuté la différence entre ce phénomène de condensation photonique et l'effet laser bien connu.

Séminaire 3 – Une découverte dans la tourmente : la superfluidité

Sébastien Balibar (laboratoire Pierre Aigrain, École normale supérieure, Paris)

Le conférencier a décrit l'émergence du concept de superfluidité depuis les découvertes expérimentales de Kapitza, Allen et Misener, jusqu'aux approches

théoriques de Tisza, London et Landau. Il a souligné le rôle d'accueil tout particulier joué par le Collège de France dans cette intense période de découvertes qui a précédé la Seconde Guerre mondiale. Il a également fait le lien avec les points de vue « modernes » sur ce sujet, qui ont joué un rôle essentiel dans le développement de la physique statistique contemporaine.

Séminaire 4 – *Measurement of entanglement of cold atoms in optical lattices*

Peter Zoller (université d'Innsbruck et Académie autrichienne des sciences)

Ce séminaire a porté sur la description théorique d'un protocole de mesure de l'intrication quantique d'une assemblée composée de quelques atomes. Ce protocole a été proposé par le conférencier et son équipe et il vient d'être implémenté dans une expérience menée à Harvard. Il offre une caractérisation très originale des corrélations quantiques qui peuvent apparaître dans les systèmes de particules en interaction.

Séminaire 5 – *Bose-Einstein condensation and superfluidity*

Sandro Stringari (université de Trento, Italie)

Le conférencier a fait le point sur les multiples manifestations de la superfluidité, depuis l'hélium liquide jusqu'aux supraconducteurs, en passant par les gaz d'atomes froids. Il a décrit le rôle de la dimension d'espace, en particulier le cas de la dimension 2 pour lequel la superfluidité n'est pas associée à l'apparition d'un condensat. Il a également abordé les conséquences d'un couplage spin-orbite reliant les degrés de liberté interne et externe des atomes, sujet actuellement exploré dans de nombreux laboratoires.

Séminaires 6 et 7 – *Exact results for disordered systems/superfluids*

Nikolay Prokof'ev (université du Massachusetts à Amherst, États-Unis)

Cette série de deux séminaires a porté sur l'étude théorique des systèmes désordonnés et de leurs éventuelles propriétés superfluides. Le conférencier a commencé par prouver le « théorème d'inclusion », qui porte sur la topographie du diagramme des phases d'un système désordonné. Il a ensuite établi la forme générale de la frontière entre la phase superfluide et la phase « verre de Bose » dans le plan formé par les deux paramètres de contrôle, désordre et force des interactions. La dernière partie de l'exposé a porté sur les nouvelles classes d'universalité susceptibles d'apparaître pour des superfluides unidimensionnels dans le cas d'un désordre de grande amplitude.

COURS À L'EXTÉRIEUR

Atomes froids et simulation quantique : des réseaux optiques aux phases topologiques de la matière

Série de 6 cours de 1 h 30, donnée à l'invitation de l'ENS de Lyon et de l'université Claude-Bernard

Le refroidissement et la manipulation d'atomes par laser ont connu au cours des vingt dernières années des progrès spectaculaires. On sait désormais produire au

laboratoire une nouvelle matière quantique, évoluant dans des « paysages de potentiel » contrôlables allant du simple piège harmonique au réseau périodique tridimensionnel. Cette matière ultra-froide – au microkelvin, voire en deçà – permet de simuler des phénomènes quantiques macroscopiques rencontrés dans d'autres contextes comme la superfluidité de l'hélium liquide, la supraconductivité ou encore l'effet Hall quantique. Elle ouvre également la voie à des situations nouvelles qui ont des retombées aussi bien en métrologie avec les oscillations de Bloch, qu'en physique à N corps avec la transition de Mott entre un état conducteur et un état isolant.

Cette série de cours a fait le point sur quelques-unes des avancées marquantes de la physique des atomes froids ; on y a présenté les expériences les plus représentatives ainsi que le cadre théorique permettant de faire le lien avec d'autres champs de la physique statistique et de la matière condensée.

The 2D Bose gas, in and out of equilibrium

Cours et séminaire donnés à l'invitation de l'université de Lisbonne

The physics of many-body systems strongly depends on their dimensionality. With the realization of quantum wells for example, it has been possible to produce two-dimensional gases of electrons, which exhibit properties that dramatically differ from the standard three-dimensional case, some of them still lacking a full understanding.

During the last decade, a novel environment has been developed for the study of low-dimensional phenomena. It consists of cold atomic gases that are confined in tailor-made electromagnetic traps. In this lecture I discussed some experimental aspects of this research, including dynamical features like the emergence of coherence in the gas when it is rapidly cooled across the superfluid transition.

PUBLICATIONS ET PRÉPUBLICATIONS

NASCIMBENE S., GOLDMAN N., COOPER N.R. et DALIBARD J., « Dynamic optical lattices of sub-wavelength spacing for ultracold atoms », *Physical Review Letters*, vol. 115, n° 14, 2015, DOI : 10.1103/PhysRevLett.115.140401 [arXiv:1506.00558].

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

GOLDMAN N., COOPER N.R. et DALIBARD J., « Preparing and probing Chern bands with cold atoms », arXiv:1507.07805.

DAREAU A., LEVY E., BOSCH AGUILERA M., BOUGANNE R., AKKERMANS E., GERBIER F. et BEUGNON J., « Direct measurement of Chern numbers in the diffraction pattern of a Fibonacci chain », arXiv:1607.00901.

ZHANG J., BEUGNON J. et NASCIMBENE S., « Creating fractional quantum Hall states with atomic clusters using light-assisted insertion of angular momentum », arXiv:1608.07460.