

Annuaire du Collège de France

121^e année

2020
2021

Résumé des cours et travaux



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —



Annuaire du Collège de France

Cours et travaux du Collège de France

121 | 2024
2020-2021

Atomes et rayonnement

Jean Dalibard



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/annuaire-cdf/19233>

DOI : 10.4000/12ktm

ISBN : 978-2-7226-0778-1

ISSN : 2109-9227

Éditeur

Collège de France

Édition imprimée

Date de publication : 18 novembre 2024

Pagination : 81-89

ISBN : 978-2-7226-0777-4

ISSN : 0069-5580

Ce document vous est fourni par Collège de France



Référence électronique

Jean Dalibard, « Atomes et rayonnement », *L'annuaire du Collège de France* [En ligne], 121 | 2024, mis en ligne le 01 octobre 2024, consulté le 28 novembre 2024. URL : <http://journals.openedition.org/annuaire-cdf/19233> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/12ktm>

Le texte et les autres éléments (illustrations, fichiers annexes importés), sont « Tous droits réservés », sauf mention contraire.

ATOMES ET RAYONNEMENT

Jean Dalibard

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

La série de cours « Les interactions entre particules dans les gaz quantiques » est disponible en audio et vidéo, sur le site internet du Collège de France (<https://www.college-de-france.fr/agenda/cours/les-interactions-entre-particules-dans-les-gaz-quantiques>), ainsi que la série de séminaires du même nom (<https://www.college-de-france.fr/agenda/seminaire/les-interactions-entre-particules-dans-les-gaz-quantiques>) et les notes de cours, au format PDF (https://www.college-de-france.fr/sites/default/files/documents/jean-dalibard/UPL1464042088911247918_cours_total_dalibard_2020_2021_fr..pdf).

ENSEIGNEMENT

COURS - LES INTERACTIONS ENTRE ATOMES DANS LES GAZ QUANTIQUES

Introduction

Le cours de cette année est le premier d'une série consacrée à l'étude des interactions entre atomes neutres. Pris au pied de la lettre, il s'agit d'un programme extrêmement ambitieux puisqu'il recouvre l'ensemble de la physique moléculaire et de la physico-chimie. Il n'est donc pas question de réaliser ce programme dans toute sa généralité ; nous allons nous intéresser au cas d'atomes froids, pour lesquels la longueur d'onde de De Broglie est beaucoup plus grande que la portée des potentiels interatomiques. Cette hypothèse apportera des simplifications considérables en ramenant un

potentiel d'interaction compliqué à la connaissance de quelques nombres, comme la longueur de diffusion ou la portée effective. Dans la série de cours de cette année, nous nous sommes concentrés plus particulièrement sur le problème à deux corps : quelle est la nature de l'interaction entre une paire d'atomes, quel est le lien entre les états liés de cette paire et une collision élastique entre les deux particules, peut-on contrôler et manipuler cette interaction par des champs extérieurs ? Il s'agit là de questions qui se sont posées dès les débuts de la mécanique quantique, et qui ont repris une importance toute particulière au cours des vingt dernières années, avec les développements spectaculaires de la physique des gaz ultra-froids.

Cours 1 - Le potentiel d'interaction entre deux atomes

Le premier cours a été consacré à la description des processus physiques qui régissent l'interaction entre deux atomes : comment ces atomes se comportent-ils quand ils s'approchent l'un de l'autre ? Y a-t-il attraction, répulsion, possibilité de former un état lié ? Nous avons montré que pour des atomes froids, le comportement à longue portée du potentiel d'interaction joue un rôle essentiel. Nous avons débuté notre étude par le cas d'atomes relativement éloignés l'un de l'autre et nous avons montré que l'interaction correspondante, appelée *interaction de van der Waals*, se comporte comme $-C_6/r^6$, où r désigne la distance interatomique et où le coefficient C_6 est positif. Il s'agit donc d'une interaction attractive ; à de rares exceptions près, elle est suffisamment forte pour donner naissance à des dimères liés, même si les énergies de liaison sont très faibles par rapport aux molécules que l'on rencontre habituellement en chimie. Nous avons ensuite abordé la description de la « vraie » liaison chimique qui apparaît quand les atomes sont proches l'un de l'autre, et qui résulte de la possibilité pour un électron externe de sauter d'un atome à l'autre par effet tunnel. Pour finir, nous avons expliqué comment prendre en compte de la nature statistique, fermions ou bosons, des électrons et des noyaux en jeu. Ce dernier point joue un rôle central pour les gaz quantiques.

Cours 2 - Éléments de la théorie de la diffusion

Ce cours a été consacré à la mise en place des outils qui permettent de traiter quantitativement la collision entre deux atomes : équation intégrale de la diffusion, formalisme de la matrice S , développement de Born. Nous avons expliqué comment tirer parti de l'invariance par rotation, qui permet de décrire la collision en termes de canaux indépendants uni-dimensionnels, appelés « ondes partielles », chaque canal étant associé à un moment cinétique particulier. Cette description est particulièrement utile pour les gaz quantiques composés de bosons (resp. fermions) polarisés, puisque seuls les canaux de moment cinétique pair (resp. impair) sont ouverts dans ce cas.

Cours 3 - Collisions à basse énergie

Nous avons abordé dans ce cours le cas d'une collision à basse énergie telle que le vecteur d'onde relatif des deux partenaires de la collision est petit devant l'inverse de la portée du potentiel d'interaction. Ce problème est d'une grande importance pour la physique des atomes froids et il apporte une simplification considérable sur le plan mathématique : seules les ondes partielles les plus basses, de moment cinétique égal à 0 ou 1, contribuent de manière significative. De plus, on peut décrire quantitativement leur effet par seulement un ou deux paramètres physiques comme la longueur de diffusion ou la portée effective. Cette simplification permet en particulier de remplacer le potentiel réel entre atomes, qui peut être difficile à déterminer, par un potentiel beaucoup plus simple conduisant au même jeu de paramètres physiques. Nous avons illustré ce point à partir des exemples du puits carré et du pseudo-potentiel.

Cours 4 - Interaction de van der Waals et universalité à basse énergie

Parmi les résultats obtenus lors des cours précédents, nous avons établi qu'à basse énergie et pour un potentiel décroissant suffisamment vite à l'infini, l'interaction pouvait se caractériser essentiellement par un nombre, la longueur de diffusion. Le but de ce cours a été de concrétiser cette notion pour un potentiel atomique réaliste, le potentiel de van der Waals variant comme r^{-6} . Pour les espèces couramment utilisées dans les expériences d'atomes froids, ce potentiel contient de nombreux états de vibration. Il s'ensuit que le problème peut être abordé par une approche semi-classique, fondée sur la méthode WKB (Wentzel-Kramers-Brillouin). Cette approche permet de démontrer une universalité remarquable du résultat, reliant la valeur de la longueur de diffusion à l'énergie des états les plus faiblement liés dans le potentiel interatomique. Nous avons également présenté une méthode expérimentale permettant de déterminer la position des derniers états liés. Cette méthode, appelée « photo-association à deux couleurs », consiste à mesurer le taux de formation de dimères faiblement liés dans un gaz d'atomes ultra-froids éclairé par une paire de faisceaux lumineux résonants. Elle permet de déduire la longueur de diffusion grâce à l'universalité mentionnée ci-dessus.

Cours 5 et 6 - Les résonances de diffusion

Dans les deux derniers cours de cette série, nous avons abordé le sujet des résonances de diffusion et plus précisément des résonances de Fano-Feshbach. Il s'agit d'un outil essentiel de la physique des gaz quantiques qui ouvre la voie au régime des interactions fortes, que l'on atteint quand la longueur de diffusion devient de l'ordre de la distance entre particules du gaz. Les résonances de diffusion permettent également de préparer des gaz en interaction quasi-nulle, réalisant ainsi le modèle du gaz parfait. Elles sont une source de données très précises sur la

structure des dimères et donc sur les potentiels inter-atomiques. Elles ont enfin permis le développement d'une recherche très originale sur les systèmes à petit nombre de corps, avec notamment l'étude des états d'Efimov. Nous avons d'abord situé les résonances de Fano-Feshbach dans le cadre général des résonances de diffusion qui, pour une collision en onde s , conduisent à une divergence de la longueur de diffusion. Nous avons montré l'originalité des résonances de Fano-Feshbach qui mettent en jeu deux canaux de collision, l'un ouvert, l'autre fermé, dont on peut contrôler les énergies relatives, ce qui permet de traverser la résonance. Nous nous sommes également interrogés sur la signification d'une longueur de diffusion infinie et nous avons étudié pour cela un modèle très instructif, proposé par Busch *et al.*, qui donne de manière exacte les états propres d'un système à deux particules confinées dans un piège harmonique. Nous avons ensuite développé un modèle simple de résonance à deux canaux, pour lequel un traitement analytique est possible. Ce modèle permet de dégager la notion importante de largeur de résonance et de clarifier la contribution du canal fermé. Enfin, nous sommes passés à la description de traitements plus quantitatifs de ces résonances, pour terminer par la présentation de quelques expériences récentes. Nous avons décrit les principaux outils disponibles au laboratoire pour caractériser ces résonances et nous avons montré qu'elles peuvent avoir des prolongements inattendus, en lien par exemple avec la théorie du chaos quantique.

SÉMINAIRES LIÉS AU COURS

Séminaire 1 – Gaz quantiques annulaires en rotation : du courant élémentaire à l'écoulement supersonique

Hélène Perrin (laboratoire de Physique des lasers, CNRS/université Sorbonne Paris-Nord), le 5 mars 2021

Les gaz quantiques en interaction présentent des propriétés de superfluidité, comme l'existence d'une vitesse critique pour la création d'excitations ou l'apparition de tourbillons quantiques dans un superfluide en rotation. L'absence de viscosité permet, dans un piège parfaitement annulaire, l'établissement d'un écoulement permanent, dont la vitesse a une circulation quantifiée. Ce séminaire a présenté des résultats récents théoriques et expérimentaux qui mettent en jeu ces gaz quantiques en rotation dans deux situations extrêmes. On y a discuté, d'une part, les mécanismes de dissipation d'un courant permanent élémentaire d'un gaz unidimensionnel annulaire si l'on introduit une barrière de potentiel en un point de l'anneau. D'autre part, on a présenté la réalisation expérimentale d'un gaz quantique dont la forme annulaire est due à sa rotation très largement supersonique dans un piège magnétique en forme de bulle.

Séminaire 2 – *Detecting spin fluorescence with a microwave photon counter*

Patrice Bertet (service de Physique de l'état condensé, université Paris-Saclay/CEA Saclay/CNRS), le 12 mars 2021

Quantum systems respond to illumination by a monochromatic field by emitting some signals that are phase-coherent with the driving tone, arising from the oscillating dipole induced on the emitters, and some signals that are incoherent (called “fluorescence”), arising from cycles of absorption/spontaneous emission undergone by each individual emitter. Atoms and molecules are routinely detected by their fluorescence, with important applications in quantum technology and fluorescence microscopy. Spins, on the other hand, are usually detected by the coherent component of their response, either in continuous-wave or pulsed magnetic resonance. In this seminar, it was shown that using superconducting quantum devices, one can demonstrate the detection of a small ensemble of donor spins in silicon by their fluorescence at microwave frequency, at millikelvin temperatures. The potential of fluorescence detection as a novel methodology for magnetic resonance spectroscopy of small numbers of spins was discussed.

Séminaire 3 – *Mesurer la constante de structure fine pour affiner les prédictions du Modèle standard*

Saïda Guellati (laboratoire Kastler Brossel, Sorbonne Université/ENS/Collège de France/CNRS), le 19 mars 2021

La constante de structure fine α est ce nombre proche de $1/137$ qui caractérise la force de l'interaction entre la lumière et les particules élémentaires chargées, comme les électrons ou les muons. Connaître précisément sa valeur numérique est crucial pour tester, même avec des expériences de basses énergies, les calculs de l'électrodynamique quantique et certaines prédictions théoriques du Modèle standard. Dans le cadre de ce séminaire, on a présenté l'expérience d'interférométrie atomique qui a permis de déterminer récemment la constante de structure fine avec une incertitude relative de 8.1×10^{-11} et on a discuté l'impact de cette nouvelle mesure sur les tests du Modèle standard.

Séminaire 4 – *Cold molecules: A chemistry kitchen for physicists*

Olivier Dulieu (laboratoire Aimé Cotton, Orsay, université Paris-Saclay/CNRS), le 26 mars 2021

The title of this seminar was referring to a special issue of Journal of Physics B published in 2006. In the original publication, the title contained a question mark that has been removed here. Indeed, the amazing results obtained since then demonstrated the impact of ultracold molecule research in many areas, including not only chemistry, but also molecular spectroscopy, ultracold collisions, and exquisite

control of quantum systems. The seminar reviewed some of these aspects that were investigated in the Orsay group, in particular regarding the formation and destruction processes of ultracold molecules, and the control of their interactions using laser light.

Séminaire 5 – *Open quantum many-body systems*

Cristiano Ciuti (laboratoire Matériaux et phénomènes quantiques, université de Paris/CNRS), le 2 avril 2021

This seminar presented recent advances on the many-body physics of open quantum systems, an emerging field that is being explored both in atomic and solid-state platforms. A pedagogical introduction outlined the main theoretical framework and methods, focusing on the competition between strong interactions and dissipation/decoherence. Unconventional aspects of dissipative phase transitions and reservoir engineering protocols for the realization of unconventional phases were reviewed. It was shown how the concepts developed in this context can also be applied to the field of quantum information with noisy intermediate-scale quantum devices.

Séminaire 6 – *Stable p-wave resonant two-dimensional Fermi-Bose dimers*

Dmitry Petrov (LPTMS, CNRS/université Paris-Saclay), le 9 avril 2021

The seminar addressed the problem of two-dimensional weakly bound heterospecies molecules formed in a Fermi-Bose mixture with attractive Fermi-Bose and repulsive Bose-Bose interactions. Bosonic exchanges lead to an intermolecular attraction, which can be controlled and tuned to a p-wave resonance. Such attractive fermionic molecules can be realized in quasi-two-dimensional ultracold isotopic mixtures. It was shown that they are stable with respect to the recombination to deeply bound molecular states and with respect to the formation of higher-order clusters (trimers, tetramers, etc.).

RECHERCHE

Le thème général de la recherche menée dans l'équipe de chaire porte sur la matière ultra-froide, obtenue en refroidissant des gaz d'atomes par de la lumière. Nous nous intéressons principalement aux phénomènes collectifs qui apparaissent à très basse température, effets liés au comportement ondulatoire marqué des particules. Le critère d'apparition de ces effets est lié à la longueur d'onde associée à chaque atome, qui doit devenir plus grande que la distance entre particules. La nature statistique des atomes en jeu, bosons ou fermions, joue un rôle déterminant pour l'état d'équilibre ou la dynamique de ces nouveaux fluides.

L'activité menée dans notre équipe est essentiellement expérimentale, avec quatre projets distincts localisés sur le site Marcelin Berthelot. Ces projets sont encadrés par cinq chercheurs ou enseignants-chercheurs : Jean Dalibard (titulaire de la chaire), Jérôme Beugnon (maître de conférences à Sorbonne Université), Fabrice Gerbier (directeur de recherche au CNRS), Raphael Lopes (chargé de recherche au CNRS) et Sylvain Nascimbene (maître de conférence à l'École normale supérieure). Cette équipe fait partie du laboratoire Kastler Brossel, dont le Collège de France est cotutelle. Nous détaillons ci-dessous les principaux résultats obtenus sur chaque projet au cours de l'année académique écoulée.

PROJET « GAZ SPINEUR (ATOMES DE SODIUM) »

La plupart des espèces atomiques utilisées dans nos expériences peuvent exister dans plusieurs états internes distincts et ce degré de liberté vient s'ajouter aux variables habituelles, position et impulsion, des particules. Dans ce projet dédié aux gaz spineurs, nous avons mis au point une imagerie de très haute sensibilité, qui nous permet de compter les atomes un à un en fonction de leur état de spin. Nous l'avons mise à profit pour étudier les différentes formes de la dynamique d'un système à N corps, depuis une évolution purement réversible jusqu'à une thermalisation rapide. Nous nous sommes concentrés sur le cas où tous les atomes occupent le même mode spatial, la dynamique étant donc restreinte aux états de spins. Quand le système peut être décrit par une analyse de Bogoliubov, le spectre d'énergie est linéaire et conduit à des oscillations non amorties des observables à N corps. En dehors de ce régime, la non-linéarité du spectre conduit à un comportement irréversible, caractérisé par un comportement universel. En particulier, quand le système sort du régime intégrable, une dynamique chaotique émerge, qui conduit à une thermalisation du gaz en accord avec l'hypothèse ETH (*eigenstate thermalization hypothesis*).

GAZ QUANTIQUES À DEUX DIMENSIONS (PROJET « RUBIDIUM »)

Dans ce projet, nous nous sommes intéressés à une manifestation de l'invariance d'échelle propre aux systèmes bidimensionnels, l'existence d'ondes solitoniques pour un nombre critique de particules. Rappelons que la très grande majorité des observations de solitons portent sur des systèmes uni-dimensionnels, ces solitons existant alors pour n'importe quel nombre de particules, avec une taille qui s'ajuste en fonction de ce nombre. À deux dimensions et pour le cas générique d'une non-linéarité cubique, la situation est radicalement différente. Le *soliton de Townes*, baptisé du nom de son inventeur, peut exister avec n'importe quelle taille, pourvu que les interactions entre particules soient attractives et que le nombre de particules soit égal à une valeur précise. Notre expérience a été menée avec des atomes de rubidium, pour lesquels les interactions sont *a priori* répulsives, mais nous avons pu changer leur signe en réalisant un mélange binaire composé d'atomes dans l'état

interne attribué au soliton et d'un bain d'atomes dans un autre état interne. Grâce aux interactions médiées par ce bain, nous avons obtenu l'attraction recherchée. En utilisant un faisceau lumineux, nous avons « imprimé » la fonction d'onde du soliton de Townes sur le bain, ce qui nous a permis de stabiliser et de caractériser ce soliton. C'est à notre connaissance la première préparation déterministe d'un tel objet topologique, emblématique de l'invariance d'échelle dans un fluide quantique.

MATIÈRE QUANTIQUE ET PHÉNOMÈNES DISSIPATIFS (PROJET « YTTERBIUM »)

Ce dispositif expérimental a pour but d'étudier la physique des gaz ultra-froids confinés dans des potentiels périodiques créés par laser. Cette approche nous permet d'explorer des systèmes de différentes dimensionnalités. Le thème général des études que nous menons est celui des phénomènes dissipatifs dans les systèmes quantiques à N corps. Dans un premier temps, nous avons exploré la décohérence d'un réseau de gaz unidimensionnels (1D), c'est-à-dire un ensemble de fils d'atomes. La décohérence est induite en éclairant ce gaz de façon contrôlée par un laser résonant, générant ainsi un certain taux d'émission spontanée. L'intérêt majeur des études 1D repose sur la possibilité de confronter les résultats expérimentaux aux nombreuses approches théoriques disponibles grâce à la relative simplicité du problème. Une limite de ce type d'expériences est que les observables sont moyennées sur l'ensemble des fils. Dans un deuxième temps, nous avons donc développé de nouveaux outils pour confiner nos fils d'atomes dans un plan unique. Grâce à une imagerie à haute résolution, nous pouvons désormais observer individuellement chaque fil. Ces développements vont nous permettre d'explorer plus quantitativement les phénomènes de dissipation quantique.

GAZ EN DIMENSION SYNTHÉTIQUE (PROJET « DYSPROSIUM »)

Ce projet porte sur la réalisation de différentes phases de la matière quantique dans des gaz d'atomes de dysprosium, en tirant parti du grand spin électronique de cette espèce. Dans un premier projet, nous avons réalisé des états non classiques du spin, et interprété l'observation de corrélations quantiques en terme d'intrication entre sous-systèmes du spin électronique. Pour cela, nous avons soumis les atomes à un champ lumineux afin d'extraire une paire de bits quantiques au sein du spin électronique. Les mesures effectuées sur ces paires de bits quantiques nous ont alors permis de caractériser et mesurer l'intrication quantique. Dans un second projet, nous avons réalisé un système atomique dont la dynamique est analogue à celle d'une particule chargée dans un champ magnétique. Nous nous sommes intéressés aux propriétés topologiques des états quantiques sous-jacents, que nous avons révélées par une étude de la réponse des atomes à une force ou à un champ magnétique. Nous

cherchons maintenant à généraliser cette étude à des systèmes topologiques plus complexes, et à explorer le comportement des gaz en interaction soumis à un champ magnétique artificiel.

PUBLICATIONS

Barbiero L., Chomaz L., Nascimbene S. et Goldman N., « Bose-Hubbard physics in synthetic dimensions from interaction Trotterization », *Physical Review Research*, vol. 2, 2020, art. 043340, <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.2.043340>.

Zou Y.-Q., Bakkali-Hassani B., Maury C., Cerf É.L., Nascimbene S., Dalibard J. et Beugnon J., « Magnetic dipolar interaction between hyperfine clock states in a planar alkali Bose gas », *Physical Review Letters*, vol. 125, n° 23, 2020, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.233604>.

Bakkali-Hassani B., Maury C., Zou Y.-Q., Cerf É.L., Saint-Jalm R., Castilho P.C.M., Nascimbene S., Dalibard J. et Beugnon J., « Realization of a Townes soliton in a two-component planar Bose gas », *Physical Review Letters*, vol. 127, n° 2, 2021, art. 023603, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.127.023603> [arXiv : 2103.01605].

Zou Y.-Q., Cerf É.L., Bakkali-Hassani B., Maury C., Chauveau G., Castilho P.C.M., Saint-Jalm R., Nascimbene S., Dalibard J. et Beugnon J., « Optical control of the density and spin spatial profiles of a planar Bose gas », *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, vol. 54, n° 8, 2021, art. 08LT01, <https://doi.org/10.1088/1361-6455/abf298>.

Evrard B., Qu A., Dalibard J. et Gerbier F., « Coherent seeding of the dynamics of a spinor Bose-Einstein condensate: From quantum to classical behavior », *Physical Review A*, vol. 103, n° 3, 2021, art. L031302, <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.103.L031302> [arXiv : 2101.06716].

Evrard B., Qu A., Dalibard J. et Gerbier F., « From many-body oscillations to thermalization in an isolated spinor gas », *Physical Review Letters*, vol. 126, n° 6, 2021, art. 063401, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.126.063401>.

Zou Y.-Q., Bakkali-Hassani B., Maury C., Le Cerf É., Nascimbene S., Dalibard J. et Beugnon J., « Tan's two-body contact across the superfluid transition of a planar Bose gas », *Nature Communications*, vol. 12, n° 1, 2021, art. 760, <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20647-6>.

Zhang J., Eigen C., Zheng W., Glidden J., Hilker T.A., Garratt S.J., Lopes R., Cooper N.R., Hadzibabic Z. et Navon N., « Many-body decay of the gapped lowest excitation of a Bose-Einstein condensate », *Physical Review Letters*, vol. 126, 2021, art. 060402, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.126.060402>.

Christodoulou P., Gałka M., Dogra N., Lopes R., Schmitt J. et Hadzibabic Z., « Observation of first and second sound in a Berezinskii-Kosterlitz-Thouless superfluid », *Nature*, vol. 594, 2021, p. 191-194, <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03537-9>.

Rossini D., Ghermaoui A., Bosch Aguilera M., Vatré R., Bouganne R., Beugnon J., Gerbier F. et Mazza L., « Strong correlations in lossy one-dimensional quantum gases: from the quantum Zeno effect to the generalized Gibbs ensemble », *Physical Review A*, vol. 103, 2021, art. L060201, <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.103.L060201>.

Satoor T., Fabre A., Bouhiron J.-B., Evrard A., Lopes R. et Nascimbene S., « Partitioning dysprosium's electronic spin to reveal entanglement in non-classical states », *Physical Review Research*, vol. 3, 2021, art. 043001, <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.3.043001>.

