

Annuaire du Collège de France

122^e année

2021
2022

Résumé des cours et travaux



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

ATOMES ET RAYONNEMENT

Jean Dalibard

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

La série de cours « Interactions entre particules dans les gaz quantiques (II) : de 2 à N corps » est disponible en audio et en vidéo sur le site internet du Collège de France (<https://www.college-de-france.fr/fr/agenda/cours/interactions-entre-particules-dans-les-gaz-quantiques-ii-de-2-corps>), de même que la série de séminaires qui lui est associée (<https://www.college-de-france.fr/fr/agenda/seminaire/interactions-entre-particules-dans-les-gaz-quantiques-ii-de-2-corps>). Les notes détaillées de cet enseignement sont également disponibles en ligne, en français et en anglais (<https://pro.college-de-france.fr/jean.dalibard/index.html>), ainsi que les notes de cours du professeur invité Wilhelm Zwerger relatives à sa série de conférences « Basic concepts and some current directions in ultracold gases » (<https://www.college-de-france.fr/fr/agenda/conferencier-invite/wilhem-zwerger>).

ENSEIGNEMENT

COURS - INTERACTIONS ENTRE PARTICULES DANS LES GAZ QUANTIQUES (II) : DE 2 À N CORPS

Comment passer de l'individuel au collectif, du microscopique au macroscopique ? La connaissance des constituants de la matière ordinaire, atomes et molécules, permet-elle de prédire le comportement d'une grande assemblée de particules ? Dans le cours de cette année, nous abordons cette question pour les fluides quantiques ultra-froids, pour lesquels la distance entre particules est inférieure à la longueur de de Broglie. Nous étudions d'abord le régime d'interaction faible, pour lequel la distance entre

particules reste supérieure à la longueur de diffusion caractérisant les interactions. Ce régime peut être traité quantitativement par la méthode de Bogoliubov et ses corrections à la Lee-Huang-Yang, et nous présentons des résultats expérimentaux récents qui ont confirmé ces prédictions théoriques. Nous passons ensuite au cas de particules interagissant fortement, de sorte que la longueur de diffusion devient supérieure à la distance entre particules. Nous montrons qu'il reste possible de relier les caractéristiques microscopiques du fluide, sa fonction de corrélation à deux corps par exemple, à ses propriétés macroscopiques. Nous présentons le formalisme du « contact », qui s'applique aux fluides bosoniques et fermioniques, et nous décrivons une série d'expériences récentes ayant permis de valider ce formalisme.

Cours 1 - Gaz quantiques faiblement dégénérés : l'approche « développement du viriel »

Le 11 mars 2022

Nous abordons dans ce cours une première méthode pour relier la physique à petit nombre de corps et les propriétés macroscopiques d'un fluide. Cette méthode, qui porte le nom de « développement du viriel », est utilisable pour des fluides faiblement dégénérés. Elle consiste à développer une fonction thermodynamique du fluide, sa pression par exemple, en puissances de la densité ou de la fugacité. Ce type de développement a été proposé par Kamerlingh Onnes au début du xx^e siècle pour un fluide décrit par la thermodynamique classique. De manière remarquable, le coefficient du terme d'ordre n (avec en pratique n de l'ordre de 2 à 5) est calculable pourvu que l'on sache traiter exactement le problème à n corps, donc un « petit » système, loin du cas macroscopique.

Nous commençons par un rappel des bases de la description thermodynamique d'un gaz quantique parfait, décrit par la statistique de Bose ou de Fermi. Nous trouvons ainsi une première source de déviation des coefficients du développement du viriel par rapport à un gaz de Boltzmann. Dans la deuxième partie, nous nous intéressons au premier coefficient du viriel non trivial. Nous détaillons son calcul dans le cas d'interactions « standard », du type interactions de van der Waals, et nous retrouvons un résultat célèbre de Beth et Uhlenbeck. Nous discutons enfin le cas d'interactions binaires résonantes, en particulier le modèle du gaz de Fermi de spin $1/2$ unitaire. Il s'agit d'un système qui joue actuellement un rôle central en physique des gaz quantiques, car il permet de tester différentes approches théoriques en les confrontant à des résultats expérimentaux.

Cours 2 et 3 – L’approche de Bogoliubov quantique et l’énergie de Lee-Huang-Yang

Les 18 et 25 mars 2022

Nous abordons dans ces deux cours la description d’une méthode puissante pour traiter le cas d’un gaz de Bose en interaction, l’approche de Bogoliubov. Cette approche permet de décrire l’état fondamental du gaz ainsi que son spectre d’excitation à basse énergie, moyennant un certain nombre d’approximations que nous détaillons. Cette méthode part d’un potentiel binaire d’interaction entre les particules et est fondée sur l’hypothèse que l’action de ce potentiel ne modifie pas beaucoup l’état fondamental du fluide par rapport au cas du gaz parfait.

La méthode de Bogoliubov, même si elle est un outil communément employé, comporte certaines subtilités provenant du fait qu’il est difficile de l’utiliser avec le potentiel interatomique réel. Pour toutes les espèces atomiques utilisées au laboratoire, ce potentiel – qui décrit notamment l’interaction de van der Waals – contient en effet de nombreux états liés à deux particules. Le véritable état fondamental du système est donc très différent du condensat de Bose-Einstein formé à partir du gaz monoatomique trouvé dans le cas sans interaction, et également très éloigné du fluide préparé, dans un état métastable, dans les expériences d’atomes froids.

On utilise fréquemment la méthode de Bogoliubov avec un potentiel de contact, donc de portée nulle. Le couplage est alors défini à partir de la longueur de diffusion a du problème physique. Toutefois, on sait (cf. cours 2020-2021) qu’un tel potentiel conduit à des divergences dès l’ordre 2 de la série de Born. *A fortiori*, il ne permet pas de décrire de manière simple l’interaction entre N particules. Certaines expressions, comme la vitesse du son ou la déplétion quantique, peuvent être calculées sans difficulté alors que d’autres, comme l’énergie de l’état fondamental, divergent.

L’approche que nous explorons dans un premier temps utilise un potentiel régulier, de portée non nulle, dont la transformée de Fourier est également régulière. Nous supposons que l’action de ce potentiel à deux corps peut être décrite dans le cadre de l’approximation de Born. Dans un gaz de Bose sans interaction, l’état fondamental est obtenu en plaçant les N particules dans l’état d’impulsion nulle $k = 0$. Nous commençons donc par utiliser le fait que le potentiel peut être traité comme une faible perturbation pour effectuer un développement systématique de l’hamiltonien à N corps, en supposant que la population moyenne de l’état d’impulsion nulle reste majoritaire. Cela nous permet d’obtenir une expression approchée de l’hamiltonien ne contenant que des termes quadratiques en les opérateurs création et destruction d’une particule dans un état d’impulsion k non nulle. Plus précisément, la structure de l’hamiltonien fait apparaître une somme de termes indépendants, portant chacun sur une paire $(+k, -k)$. Nous commençons par nous concentrer sur une paire donnée pour détailler la méthode de Bogoliubov, qui utilise une transformation canonique pour diagonaliser cet hamiltonien de paires. Nous nous illustrons cette méthode de diagonalisation sur le cas d’un gaz spinoir à l’approximation du

mode spatial unique. Enfin, nous décrivons le retour vers un nombre infini de paires et vers un potentiel de contact, avec les problèmes de convergence qui peuvent alors se poser. Nous calculons l'énergie de l'état fondamental du système, appelée énergie de Lee-Huang-Yang, et nous discutons la validité du développement à la base de cette méthode. Pour finir, nous décrivons un certain nombre d'expériences récentes qui ont permis de mesurer précisément la valeur des différentes quantités physiques prédites par cette approche.

Cours 4 - L'état fondamental du gaz de Bose : du spectre d'excitation aux gouttelettes quantiques

Le 1^{er} avril 2022

Ce cours a débuté par la description des mesures expérimentales de l'énergie de Lee-Huang-Yang (LHY) faites sur des gaz atomiques dilués. Nous sommes ensuite passés aux mesures du spectre d'excitation, avec les résultats désormais classiques obtenus à l'Institut Weizmann qui sont très bien décrits par l'approche de Bogoliubov. Nous nous sommes également intéressés à des expériences plus récentes menées à Boulder et Cambridge, qui ont étendu la plage de mesure à des nombres d'onde k de l'ordre de $1/a$, où a est la longueur de diffusion. La dernière partie de ce cours a été consacrée à l'état fondamental d'un mélange de deux gaz quantiques notés 1 et 2. Selon les valeurs des trois paramètres d'interaction g_{ij} avec $i, j = 1, 2$, ce mélange peut être miscible ou immiscible dans le cadre de la théorie de champ moyen. En particulier, l'immiscibilité se produit quand la relation de dispersion du mélange homogène fait apparaître des fréquences complexes, conduisant à des divergences exponentielles d'une petite perturbation initiale. Nous avons alors montré, en suivant la proposition due à Dmitry Petrov, comment il est possible d'utiliser des effets LHY, au-delà du champ moyen, pour stabiliser malgré tout ce mélange sous forme de gouttelettes quantiques.

Cours 5 et 6 - Le contact à deux corps : définition et mesures

Les 8 et 15 avril 2022

Dans les cours précédents, nous nous sommes intéressés au lien entre la physique à deux corps, décrite par la longueur de diffusion, et les propriétés d'un système à N corps, abordées par la méthode de Bogoliubov. Ce lien a été possible pour un gaz en interaction faible. Le but de ces deux derniers cours est d'explorer le lien « 2 corps – N corps » sans faire d'hypothèse sur la force des interactions. Plus précisément, nous ne mettons pas de contrainte sur la valeur de la longueur de diffusion a , qui peut être ajustée à une valeur arbitrairement grande pour les espèces atomiques présentant une résonance de Fano-Feshbach. En revanche, nous supposons toujours que le système est dilué, c'est-à-dire que la portée du potentiel est petite devant la distance entre particules.

Pour le cas des gaz tri-dimensionnels qui nous intéresse ici, le lien « 2 corps – N corps » a été en grande partie initié par Shina Tan, qui a établi des relations universelles pour un gaz de Fermi à deux composantes, avec des interactions décrites dans la limite de portée nulle. Ces relations relient des quantités microscopiques, comme la distribution en impulsion du gaz ou sa fonction de corrélation à deux corps, à des grandeurs macroscopiques, comme l'énergie libre ou la pression. Elles font intervenir une quantité appelée « contact », une dénomination justifiée par le fait qu'elle constitue une mesure de la probabilité d'avoir deux particules proches l'une de l'autre. L'intérêt des relations faisant intervenir le contact est qu'elles ne requièrent pas de connaissance précise de l'état du système, que l'on ne serait d'ailleurs pas en mesure de fournir dans le cas des interactions fortes.

Dans ces deux cours, nous présentons d'abord en détail le formalisme de Tan pour un gaz de Fermi. Nous décrivons ensuite une série d'expériences qui ont permis d'explorer différentes facettes du contact, comme la mesure de la distribution des vitesses des particules du gaz, la réponse du fluide à une excitation radio-fréquence ou encore l'observation des pertes d'atomes induites par des collisions inélastiques. Nous terminons par une brève discussion de l'extension possible de ce formalisme au cas d'un gaz de Bose, en soulignant la difficulté posée dans ce cas par les processus à trois corps. L'étude de ce « problème à trois corps », passionnante mais difficile, fera l'objet d'une prochaine série de cours.

SÉMINAIRE

Séminaire 1 – Circuits quantiques hybrides : de la physique atomique sur puce aux détecteurs de la matière noire de l'univers

Takis Kontos (CNRS, ENS), le 11 mars 2022

Dans cet exposé, j'explique pourquoi les circuits quantiques hybrides ouvrent des perspectives dans trois voies de recherche reliées à l'information quantique. En particulier, je montre qu'ils peuvent être utilisés pour élaborer des unités binaires quantiques de spin, dites « topologiques », pour le calcul quantique. Je montre également qu'ils peuvent simuler des systèmes hybrides de fermions et de bosons en interaction. Enfin, je présente leur dimension de sonde quantique avec des applications pour la détection de particules axioniques du halo galactique, qui seraient, si elles existent, des candidats pour expliquer la matière noire de l'univers.

Séminaire 2 – *Does a disordered isolated spin system thermalize?*

Matthias Weidemüller (Universität Heidelberg), le 18 mars 2022

It is often conjectured, that the far-from-equilibrium dynamics of generic disordered isolated systems exhibits thermalization. While this process is notoriously difficult to be treated theoretically, we can experimentally probe the relaxation dynamics

in an isolated spin system realized by a frozen gas of Rydberg atoms. Here, I explain how Rydberg atoms can serve as a veritable quantum simulator for the dynamics of a disordered spin system of Ising or Heisenberg type, why this system exhibits dynamics similar to a spin glass, how the symmetry of the system can be controlled using Floquet Hamiltonian Engineering, and how the Eigenstate Thermalization Hypothesis can be tested by exposing the system to an effective transverse field.

Séminaire 3 - Exploring and controlling Fermi gases with light in a high-finesse cavity

Jean-Philippe Brantut (École polytechnique fédérale de Lausanne), le 25 mars 2022

Cavity quantum electrodynamics (QED) is one of the most powerful frameworks to observe and leverage quantum phenomena. While it has been thoroughly studied for simple quantum systems such as two-level systems or harmonic oscillators, it has only recently become available for complex, correlated quantum many-body systems. In the last five years, we have developed systems combining cavity QED with ultra-cold Fermi gases. In this talk, I describe several intriguing consequences of the interplay of strong atom-atom and strong light-matter coupling, such as the onset of coherent excitations mixing Fermion pairs and photons. I then present the use of the cavity to induce long-range interactions in a strongly interacting Fermi gas, leading to density-wave order, a system of direct relevance to condensed matter physics. Lastly, I outline the perspectives open by the convergence of cavity QED with Fermionic quantum matter, in particular the possibility of programming cavity-mediated interactions at will between atoms.

Séminaire 4 - Tan contact in one-dimensional quantum gases

Anna Minguzzi (CNRS), le 1^{er} avril 2022

The Tan's contact is related to two-body interactions in quantum gases with short-range interactions. It is an ubiquitous quantity, determining *e.g.* the interaction energy, the two-body correlation function at zero distance, the tails of the momentum distribution and the radiofrequency-spectroscopy tails. I present our results for the Tan's contact of strongly interacting bosons and fermions in a tight atomic waveguide, highlighting its universal aspects, its temperature dependence and the possibility to use it to extract the symmetry properties of a quantum mixture.

Séminaire 5 - Strongly correlated electrons in atomically thin semiconductors

Atac Imamoglu (Institute for Quantum Electronics, ETH Zürich), le 8 avril 2022

In this talk, I describe recent experiments in atomically-thin transition metal dichalcogenides (TMDs) where Coulomb interactions between electrons dominate

over their kinetic energy. Our measurements provide direct evidence that the electrons at densities lower than $3 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ in a pristine MoSe_2 monolayer form a Wigner crystal even at $B = 0$. This is revealed by our low-temperature ($T = 80 \text{ mK}$) magneto-optical spectroscopy experiments that utilize a newly developed technique allowing to unequivocally detect charge order. This method relies on the modification of excitonic band structure arising due to the periodic potential experienced by the excitons interacting with an electronic lattice. Under such conditions, optically-inactive exciton states with finite momentum matching the reciprocal Wigner lattice vector $k = k_W$ get Bragg scattered back to the light cone, where they hybridize with the zero-momentum bright exciton states. This leads to emergence of a new, *umklapp* peak in the optical spectrum heralding the presence of periodically-ordered electronic charge distribution. Twisted bilayers of TMDs in turn offer a wealth of new phenomena, ranging from dipolar excitons to correlated insulator states. Another striking example of qualitatively new phenomena in this system is our recent observation of an electrically tunable two-dimensional Feshbach resonance in exciton-hole scattering, which allows us to control the strength of interactions between excitons and holes located in different layers. Our findings enable hitherto unexplored possibilities for optical investigation of many-body physics, as well as realization of degenerate Bose-Fermi mixtures with tunable interactions.

Séminaire 6 - Realizing a one-dimensional topological gauge theory in an optically dressed Bose-Einstein condensate

Leticia Tarruell (ICFO – The Institute of Photonic Sciences), le 15 avril 2022

Quantum gases constitute a versatile testbed for exploring the behavior of quantum matter subjected to electric and magnetic fields. While most experiments consider classical gauge fields that act as a static background for the atoms, gauge fields appearing in nature are instead quantum dynamical entities that are influenced by the spatial configuration and motion of matter, and that fulfill local symmetry constraints. Here, I discuss our recent realization of the chiral BF theory: a topological field theory for linear anyons that corresponds to a possible one-dimensional reduction of the Chern-Simons gauge theory effectively describing fractional quantum Hall systems. By using the local symmetry constraint of the theory, we encode the gauge field in terms of the matter field. The result is a system with chiral interactions, which we engineer in a potassium Bose-Einstein condensate by synthesizing optically dressed atomic states with a momentum-dependent scattering length. Theoretically, we show that this system realizes the chiral BF Hamiltonian at the quantum level. Experimentally, we observe the chirality of the interactions, the formation of chiral bright solitons – self-bound states of the matter field that only exist when propagating in one direction – and exploit the local symmetry constraint of the theory to reveal the BF electric field.

COURS À L'EXTÉRIEUR

Série de cours donnée dans le cadre de la chaire d'accueil Ernst Robert Curtius, université de Bonn/Institut français, 2-6 mai 2022. À l'invitation de mes collègues, la seconde conférence a été prononcée en premier lieu à l'université technique de Kaiserslautern le 2 mai 2022.

Investigating two-body physics in a Bose gas: the spectroscopic way

Le 3 mai 2022

The thermodynamic equilibrium of any homogeneous fluid is characterized by its equation of state. This equation gives the variations of a thermodynamic potential, for example the internal energy, with respect to a set of variables such as the number of particles, their temperature and their interaction strength. Regarding this latter variable, the relevant thermodynamic quantity for an ultra-cold gas is the so-called Tan's contact, which unifies many different properties from the momentum distribution to the spatial two-body correlation function.

In this talk, I explain how one can use a Ramsey interferometric scheme between the two hyperfine clock states of rubidium atoms to map out the variations of Tan's contact in a two-dimensional Bose gas, from the strongly degenerate superfluid case to the non-degenerate case. I also show a somewhat surprising result, revealed by this precise microwave spectroscopy in a two-dimensional fluid: in spite of the fact that each clock state is non-magnetic, a mixture of the two states still displays a magnetic dipole-dipole interaction comparable to the one expected for the other (magnetic) Zeeman states.

Quantum gases in low dimension: from scale invariance to Quantum Hall physics

Le 6 mai 2022

The physics of many-body systems depends strongly on their dimensionality, as illustrated by the unique properties of electron gases confined in quantum wells. More recently, advances in cold atom physics have led to new developments in the study of the "quantum Flatland". By freezing certain dimensions of space, or by exploiting synthetic extra-dimensions, one can reveal spectacular features of low-dimensional physics at ultra-low temperature. In this talk, I will illustrate the richness of this 2D world by describing the emergence of scale invariance for flat atomic gases and discussing their connection with Quantum-Hall-type phenomena.

RECHERCHE

Le thème général de la recherche menée dans l'équipe de chaire porte sur la matière ultra-froide, obtenue en partant d'une assemblée d'atomes confinés par des faisceaux laser. Notre activité est essentiellement expérimentale, avec plusieurs projets tous 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 conférences 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. Ce degré de liberté de spin vient s'ajouter aux variables habituelles, position et impulsion, des particules. Dans ce projet dédié aux gaz spineurs, nous avons mis au point les années précédentes une imagerie de très haute sensibilité, qui nous permet de compter les atomes un à un en fonction de leur état de spin. La dernière expérience menée sur ce montage a consisté à utiliser cette imagerie pour caractériser un état de la matière très original : un condensat fragmenté. Il s'agit d'un état fortement corrélé d'une centaine de particules, chacun de spin 1, le spin total de l'assemblée étant nul. Contrairement aux condensats de Bose-Einstein habituels où seul un état à une particule est macroscopiquement peuplé, ce sont ici trois états à une particule qui se partagent de manière quasi-égale la population totale. L'existence de cet état « condensat fragmenté » avait été prévue dans plusieurs travaux théoriques, mais elle n'avait encore jamais été confirmée expérimentalement. Elle vient offrir une perspective originale sur la transition de phase à la base de la condensation, ordinairement vue comme une brisure spontanée de symétrie dans laquelle tout l'échantillon acquiert une phase microscopique.

GAZ QUANTIQUES À DEUX DIMENSIONS (PROJET « RUBIDIUM »)

Ce projet vise à explorer les conséquences de l'invariance d'échelle propre aux gaz de Bose évoluant dans un espace à deux dimensions. Nous avons poursuivi notre étude des solitons de Townes commencée l'an dernier. Ces solitons peuvent exister avec n'importe quelle taille, pourvu que le nombre de particules soit égal à un nombre d'atomes critique. Nous nous sommes intéressés aux modes d'excitation de ces solitons, et nous avons étudié le lien entre ces systèmes et les gouttelettes quantiques

observées dans plusieurs laboratoires. Sur ce même montage, nous avons par ailleurs entrepris une mesure originale de la fraction superfluide en étudiant la vitesse du son dans ce gaz planaire quand on le plonge dans une onde stationnaire créée par un faisceau lumineux. Cette mesure exploite le lien profond qui existe entre la distorsion de phase à la base de la définition de la fraction superfluide, et la masse effective qu'acquière les particules quand elles bougent dans un potentiel périodique.

MATIÈRE QUANTIQUE ET PHÉNOMÈNES DISSIPATIFS (PROJET « YTTERBIUM »)

Le projet « atomes d'ytterbium dans des réseaux optiques » est consacré à l'étude de la dynamique de systèmes quantiques en interaction forte, notamment dans le cas dit « non hermitien », c'est-à-dire en présence de mécanismes dissipatifs tels que les pertes inélastiques de particules. Nous avons exploré expérimentalement cette dynamique tout d'abord dans le cadre de paires d'atomes, puis dans le cadre de systèmes à une dimension d'espace en nous concentrant d'abord sur la dynamique du nombre de particules, puis sur les propriétés de cohérence quantique dans ce système. En parallèle, nous avons amélioré le dispositif expérimental existant pour nous permettre d'étudier désormais un plan unique d'atomes d'ytterbium. Nous projetons d'utiliser ce système original pour approfondir notre compréhension de l'interaction lumière-matière dans un régime où les effets collectifs sont dominants.

GAZ EN DIMENSION SYNTHÉTIQUE (PROJET « DYSPROSIUM »)

Ce projet porte sur la réalisation de gaz ultra-froids d'atomes de dysprosium présentant un effet Hall quantique. Ce phénomène intervient habituellement lorsque des particules chargées sont soumises à un champ magnétique. Pour des atomes neutres, nous simulons le champ magnétique en couplant au moyen de faisceaux laser le mouvement des atomes à leur spin interne, qui joue le rôle d'une dimension synthétique. La versatilité des techniques de manipulation du spin nous a permis de réaliser des systèmes de Hall non conventionnels. Un premier projet a porté sur un système en géométrie cylindrique permettant de réaliser la fameuse expérience de pompe topologique de Laughlin, expliquant ainsi de manière élégante la quantification de la réponse transverse dans une expérience d'effet Hall. Dans un second projet, nous avons réalisé un système de Hall dont la dynamique implique quatre dimensions, deux spatiales et deux synthétiques, et nous avons caractérisé ses propriétés topologiques.

MÉLANGE DE GAZ QUANTIQUES (PROJET « DYSPROSIUM-POTASSIUM »)

Notre groupe a démarré la construction d'un nouveau dispositif expérimental qui combine deux espèces atomiques : le dysprosium et le potassium. L'objectif de cette expérience est de sonder des gaz quantiques en forte interaction dans lesquels la formation d'édifices à trois corps n'entraîne pas de pertes inélastiques. Nous avons observé un premier gaz d'atomes de dysprosium refroidis par laser en juillet 2022.

PUBLICATIONS

Satoor T., Fabre A., Bouhiron J.-B., Evrard A., Lopes R. et Nascimbene S., « Partitioning dysprosium's electronic spin to reveal entanglement in nonclassical states », *Physical Review Research*, vol. 3, n° 4, 2021, art. 043001, <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.3.043001>.

Evrard B., Qu A., Dalibard J. et Gerbier F., « Observation of fragmentation of a spinor Bose-Einstein condensate », *Science*, vol. 373, n° 6561, 2021, p. 1340-1343, <https://doi.org/10.1126/science.abd8206>.

Lopes R., « Radio-frequency evaporation in an optical dipole trap », *Physical Review A*, vol. 104, n° 3, 2021, art. 033313, <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.104.033313>.

Fabre A., Bouhiron J.-B., Satoor T., Lopes R. et Nascimbene S., « Laughlin's topological charge pump in an atomic Hall cylinder », *Physical Review Letters*, vol. 128, n° 17, 2022, art. 173202, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.128.173202>.

Fabre A., Bouhiron J.-B., Satoor T., Lopes R. et Nascimbene S., « Simulating two-dimensional dynamics within a large-size atomic spin », *Physical Review A*, vol. 105, n° 1, 2022, art. 013301, <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.105.013301>.

Aguilera M.B., Ghermaoui A., Vatré R., Bouganne R., Beugnon J. et Gerbier F., « Adiabatic quantum Zeno dynamics of bosonic atom pairs with large inelastic losses », 2022, <https://arxiv.org/abs/2207.02080>.

Bakkali-Hassani B., Maury C., Stringari S., Nascimbene S., Dalibard J. et Beugnon J., « The cross-over from Townes solitons to droplets in a 2D Bose mixture », 2022, <https://arxiv.org/abs/2207.06939>.