

## Atomes et rayonnement

M. Jean DALIBARD, membre de l'Institut  
(Académie des sciences), professeur

ENSEIGNEMENT : DES CAGES DE LUMIÈRE POUR LES ATOMES

Le cours de cette année a porté sur la manipulation d'atomes par laser. La leçon inaugurale<sup>a</sup>, présentée le 18 avril 2013, a fait le point sur les perspectives ouvertes par le refroidissement de gaz de particules par la lumière. Les six cours qui ont suivi ont été consacrés à la physique des réseaux optiques, formés d'ondes lumineuses stationnaires dans lesquelles le mouvement des atomes présente de fortes analogies avec celui d'électrons dans les réseaux cristallins des solides usuels.

### Leçon inaugurale : Atomes et rayonnement

Les deux mots *atomes* et *rayonnement* qui composent le titre de cette chaire représentent l'essentiel du monde physique qui nous est familier. La lumière est à la fois un canal d'information sur notre environnement et un moyen de le contrôler ; canal d'information pour l'astronome par exemple, qui, en observant la couleur d'une étoile, en déduira son âge ; moyen d'action, car la lumière peut apporter localement une quantité d'énergie déterminée, le bistouri laser du chirurgien en étant une illustration frappante. La théorie qui permet de décrire le rayonnement en interaction avec la matière, *l'électrodynamique quantique*, est extraordinairement précise et n'a jamais été mise en défaut, malgré des tests de plus en plus contraignants. Son succès même pose une question essentielle : sur le plan fondamental, reste-il des problèmes ouverts dans la science des atomes et de la lumière ? Le but de cette leçon a été de prouver toute la vitalité de cette discipline à travers l'exemple d'un champ de recherche : le refroidissement des gaz d'atomes.

---

a. La leçon inaugurale est éditée sous forme de livre imprimé (Collège de France/Fayard, 2013). Le texte intégral est disponible en ligne : [books.openedition.org/cdf/3301](http://books.openedition.org/cdf/3301) (édition numérique de l'ouvrage, Collège de France, 2013), et les enregistrements audio et vidéo sur le site Internet du Collège de France : <http://www.college-de-france.fr/site/jean-dalibard/inaugural-lecture-2012-2013.htm> [Ndlr].

Le refroidissement de la matière par la lumière est sans conteste une des applications les plus paradoxales du laser. Alors que ce dernier est traditionnellement associé à l'idée de chaleur, il permet également de diminuer considérablement le mouvement désordonné des particules d'un gaz pour arriver à un ordre quasi parfait : les températures obtenues sont un milliard de fois plus basses que la température usuelle ! Un des mécanismes les plus efficaces pour obtenir ce refroidissement porte le nom d'« effet Sisyphé » ; l'atome est mis dans la situation du héros de la mythologie grecque et doit monter sans cesse des collines de potentiel. Une fois que son énergie n'est plus suffisante pour atteindre le sommet de la colline suivante, l'atome s'arrête, piégé au fond d'une cuvette de lumière.

Les voies de recherche ouvertes par les atomes froids sont nombreuses. Un exemple emblématique porte sur la mesure du temps qui, depuis 1967, est fondée sur une référence atomique particulière, le césium. Construire une horloge revient à mesurer la fréquence de l'onde électromagnétique susceptible d'interagir avec cette espèce atomique. Or, les mesures sont d'autant plus précises que les atomes bougent peu. Le refroidissement de gaz par laser a donc permis une amélioration spectaculaire de la précision de la mesure du temps : les horloges à atomes froids, si elles fonctionnaient depuis le *Big Bang*, retarderaient ou avanceraient de quelques secondes seulement. Une telle performance trouve des applications dans la navigation et le positionnement par satellite, ou encore la géodésie.

Les horloges utilisent les atomes froids pour mesurer le temps. Ces mêmes atomes peuvent également caractériser l'espace, plus précisément déterminer des champs d'accélération ou de rotation. Pour cela, on met à profit leur nature ondulatoire en réalisant des interféromètres à ondes de matière. Ces dispositifs permettent par exemple de mesurer le champ de gravitation terrestre avec une précision qui approche le milliardième de l'accélération de la pesanteur. Ils ouvrent des perspectives très intéressantes dans des domaines tels que la géophysique et la détection minière.

L'extrême stabilité des horloges atomiques est une illustration spectaculaire du degré de précision que les atomes froids permettent d'atteindre. Cette précision, unique dans l'histoire de la physique, peut se révéler pertinente pour certaines études fondamentales de l'infiniment grand et de l'infiniment petit. Mentionnons par exemple la mesure d'une possible variation temporelle des constantes fondamentales, qui est un enjeu essentiel pour la cosmologie. On apprend dans les manuels de physique que le rapport entre la masse du proton et la masse de l'électron vaut environ 1836. Mais le proton sera-t-il toujours 1836 fois plus lourd que l'électron, ou ce rapport est-il en train d'évoluer ? On espère répondre à cette question en comparant pendant une longue durée des horloges atomiques utilisant pour référence des espèces atomiques différentes. Une autre illustration de l'impact des mesures de grande précision en physique atomique porte sur la possible asymétrie entre matière et antimatière. Cette asymétrie semble nécessaire pour expliquer pourquoi notre Univers est composé presque uniquement de matière ; elle pourrait être mise en évidence par des mesures ultra-précises menées sur des molécules ou des atomes refroidis par laser. Une de ses conséquences serait en effet un électron « imparfaitement rond », phénomène détectable dans une expérience de spectroscopie à très haute résolution.

Le comportement collectif des gaz d'atomes froids donne naissance à une *matière quantique*, aux propriétés radicalement différentes des fluides usuels. Le seuil de formation de cette matière résulte de la comparaison de deux échelles de longueur :

l'une est la distance moyenne entre particules, l'autre est liée à l'onde de matière de chaque atome. Dans un gaz froid et dense, la seconde échelle de longueur dépasse la première ; les ondes associées aux différents atomes se recouvrent et le comportement macroscopique du gaz est dominé par les règles quantiques. C'est en particulier le cas des condensats de Bose-Einstein, obtenus pour une des deux classes de particules existant dans la nature, les bosons. Une illustration de l'étrangeté de cette matière quantique est la propriété de superfluidité, découverte d'abord pour l'hélium liquide dans les années 1930 : ce liquide peut s'écouler sans la moindre viscosité en remontant par capillarité le long des parois d'un récipient. Cette propriété de superfluidité existe également pour les gaz d'atomes froids ; on l'observe sur l'universalité de la physique quantique : deux systèmes *a priori* différents sont décrits par un formalisme similaire si certains paramètres leur sont communs. Les gaz d'atomes froids, du fait de la grande flexibilité dont on dispose pour leur préparation, constituent des simulateurs idéaux pour de nombreux autres systèmes physiques. Après avoir préparé le gaz dans les conditions initiales adéquates, on le laisse évoluer puis on mesure son état final. La nature « fait le calcul » à notre place et l'universalité quantique garantit que le résultat obtenu pour nos atomes est également valable pour le système modélisé. Parmi les applications potentielles de cette simulation, figure le phénomène de supraconductivité ; si on arrive à mieux l'appréhender, on peut espérer concevoir des matériaux qui transporteront l'électricité sans perte pour les applications de la vie courante.

Une autre grande classe d'applications des gaz d'atomes froids est la *simulation quantique*. Le point de départ de cette recherche réside dans le fait que les systèmes à grand nombre de particules sont souvent trop complexes pour que leurs propriétés soient calculables avec des ordinateurs conventionnels. Suivant une proposition de Richard Feynman, on peut choisir de simuler plutôt que calculer. Cette approche est fondée sur l'universalité de la physique quantique : deux systèmes *a priori* différents sont décrits par un formalisme similaire si certains paramètres leur sont communs. Les gaz d'atomes froids, du fait de la grande flexibilité dont on dispose pour leur préparation, constituent des simulateurs idéaux pour de nombreux autres systèmes physiques. Après avoir préparé le gaz dans les conditions initiales adéquates, on le laisse évoluer puis on mesure son état final. La nature « fait le calcul » à notre place et l'universalité quantique garantit que le résultat obtenu pour nos atomes est également valable pour le système modélisé. Parmi les applications potentielles de cette simulation, figure le phénomène de supraconductivité ; si on arrive à mieux l'appréhender, on peut espérer concevoir des matériaux qui transporteront l'électricité sans perte pour les applications de la vie courante.

La physique des atomes manipulés par la lumière est donc un domaine de recherche extrêmement riche, tant sur le plan fondamental que sur celui des applications. Les liens avec d'autres disciplines, mathématiques et chimie par exemple, sont également bien réels : les mathématiciens s'intéressent aux équations non linéaires qui régissent le comportement de ces gaz, les chimistes y trouvent un nouvel éclairage sur la notion de dynamique réactionnelle. Le but de l'enseignement lié à la chaire Atomes et rayonnement est avant tout l'établissement d'un langage commun à toutes ces communautés, et la mise en place d'une réflexion approfondie sur les nouveaux états de la matière que les atomes froids permettront de réaliser.

## **Cours : la physique des pièges et des réseaux optiques**

Grâce à la lumière issue de faisceaux lasers, il est possible de créer des « paysages de potentiel » qui permettent de contrôler le mouvement d'atomes préalablement refroidis. Les atomes peuvent rester confinés dans ces cages de lumière pendant de longues durées et leur dynamique y prend des formes très variées, en fonction de

la nature du paysage réalisé. Un type de confinement particulièrement intéressant est celui obtenu grâce à une onde lumineuse stationnaire, qui permet de réaliser un potentiel périodique appelé *réseau optique*. Le mouvement des atomes dans un réseau optique présente une analogie profonde avec celui des électrons dans un cristal, ce qui en fait un outil important pour le programme de simulation quantique de phénomènes de la matière condensée à l'aide d'atomes froids.

L'enseignement de cette année, composé de six leçons de 1 h 30 chacune<sup>b</sup>, a été consacré à la présentation des principes qui régissent le mouvement des atomes dans ces réseaux optiques. Nous y avons également décrit un certain nombre d'expériences récentes exploitant cette dynamique très particulière.

### *Cours 1. Le potentiel dipolaire*

Nous avons montré comment évaluer la force créée par un faisceau lumineux monochromatique quand ce faisceau présente un gradient d'intensité. Nous avons calculé cette *force dipolaire* d'abord pour un modèle simple « d'atome à deux niveaux », puis pour un modèle plus réaliste de transition atomique. Nous avons montré que cette force dérive d'un potentiel, appelé *potentiel dipolaire*, proportionnel à l'intensité lumineuse dans la limite des faibles flux. Nous avons également évalué le rôle des processus d'émission spontanée qui peuvent créer un chauffage indésirable des atomes piégés.

### *Cours 2. Réseaux optiques : les principes de base*

Nous avons centré notre discussion sur le cas du potentiel dipolaire périodique créé par une onde stationnaire d'intensité variant sinusoïdalement dans l'espace. Nous avons appliqué à ce problème les outils développés initialement en physique du solide pour traiter le mouvement d'électrons dans le potentiel périodique d'un réseau cristallin. Nous avons montré que l'échelle d'énergie naturelle est donnée par « l'énergie de recul », c'est-à-dire l'énergie cinétique qu'acquiert un atome initialement au repos quand il absorbe un photon. Nous avons présenté le théorème de Bloch, la notion de zone de Brillouin et nous avons décrit la limite des liaisons faibles où le potentiel lumineux est petit devant l'énergie de recul. Cette limite est utilisée en particulier dans les nombreuses expériences de diffraction de Bragg.

### *Cours 3. Réseaux optiques dans le régime des liaisons fortes*

Nous avons poursuivi la transposition des concepts de physique des solides aux réseaux optiques, en nous intéressant cette fois-ci au cas des liaisons fortes correspondant à un potentiel lumineux grand devant l'énergie de recul. Nous avons notamment introduit le concept de *fonction de Wannier*. Dans cette limite des liaisons fortes, le passage par effet tunnel d'un atome d'un site à un autre n'est possible que si ces deux sites sont contigus. On peut alors décrire la dynamique des particules dans le réseau par un hamiltonien très simplifié, l'*hamiltonien de*

---

b. Les enregistrements audio et vidéo des cours sont disponibles sur le site Internet du Collège de France : <http://www.college-de-france.fr/site/jean-dalibard/course-2012-2013.htm> [Ndlr].

*Hubbard*, dont nous avons décrit les principales propriétés. Nous avons également abordé le rôle joué par les interactions dans un réseau en nous intéressant à la stabilisation de dimères occupant un même site.

#### *Cours 4. Réseaux dépendant du temps*

La possibilité de faire varier dans le temps les paramètres du laser créant l'onde stationnaire ouvre de nombreuses perspectives. On peut par exemple réaliser des réseaux en mouvement, dans lesquels la position des nœuds et des ventres défilent selon une fonction contrôlée du temps. Nous avons tout d'abord établi l'équivalence de plusieurs hamiltoniens pour ce problème en utilisant des transformations unitaires, chaque hamiltonien pouvant se révéler utile pour aborder un phénomène donné. Nous nous sommes ensuite intéressés au phénomène de localisation dynamique, obtenu en modulant périodiquement la position du réseau. Nous avons montré que cette modulation peut avoir des conséquences spectaculaires, comme la suppression quasi totale de l'effet tunnel. Nous avons décrit la mise en évidence et l'exploitation de cet effet pour des réseaux à une ou à deux dimensions.

#### *Cours 5. Les oscillations de Bloch dans un réseau optique*

Quand on superpose une force constante à la force périodique créée par un réseau, un phénomène quantique étonnant apparaît : les particules se mettent à osciller. Les atomes froids confinés dans des réseaux optiques ont permis d'étudier en grand détail ce phénomène et nous en avons présenté plusieurs mises en évidence expérimentales. Nous avons également discuté l'intérêt métrologique de ces oscillations de Bloch, à la fois pour déterminer des constantes fondamentales et pour mesurer très précisément des forces comme la gravité.

#### *Cours 6. Topologie dans un réseau : l'exemple des points de Dirac*

Les réseaux optiques permettent de réaliser des potentiels plus complexes que les potentiels sinusoïdaux. En particulier, on peut produire des réseaux bi-dimensionnels analogues à celui du graphène, pour lesquels certains points singuliers de la zone de Brillouin, appelés points de Dirac, apparaissent. Au voisinage de ces points, le comportement des particules est similaire à celui de particules ultra-relativistes, avec une relation de dispersion quasi linéaire. Nous avons montré comment le contrôle des paramètres du réseau permet de faire bouger les points de Dirac à l'intérieur de la zone de Brillouin, voire même les faire disparaître. Nous avons décrit une expérience récente qui a permis de mettre ces points en évidence et d'exploiter le contrôle disponible sur la topologie de la zone de Brillouin.

### **Séminaires**

Une série de dix séminaires, dont quatre dans le cadre d'un mini-colloque d'une demi-journée, ont accompagné et complété ce cours :

- Claude Cohen-Tannoudji (Collège de France et École normale supérieure, Laboratoire Kastler Brossel) : Les déplacements lumineux : du pompage optique à l'électrodynamique en cavité.
- Markus Arndt (Université de Vienne, Autriche) : New concepts for matter wave interferometry: atoms, molecules, clusters, clusters of molecules and nanoparticles.

- Tilman Esslinger (ETH Zurich, Suisse) : Applying the Toolbox of Mesoscopic Physics to Quantum Gases.
- Alberto Amo (Laboratoire de Photonique et de nanostructures, Marcoussis) : Manipulation of polariton condensates in engineered potentials.
- Jacques Vigué (Laboratoire Collisions-agrégats-réactivité, Toulouse) : Measurement of He-McKellar-Wilkens and Aharonov-Casher topological phases by atom interferometry.
- Bart van Tiggelen (Laboratoire de Physique et modélisation des milieux condensés, Grenoble) : Strong localization of cold atoms in an optical molasses.
- Mark Kasevich (Stanford University, États-Unis) : Long Interrogation Time Precision Atom Interferometry.
- Robin Kaiser (Institut non-linéaire de Nice) : Un laser aléatoire avec des atomes froids.
- Jean-Claude Garreau (Laboratoire de Physique des lasers, atomes et molécules, CNRS et université de Lille) : Étude de la transition d'Anderson avec des atomes froids en régime de chaos quantique.
- Mikhail Lukin (Harvard University, États-Unis) : Exploring new interfaces between quantum optics and nanoscience.

## PUBLICATIONS

### Articles originaux

- L. Chomaz, L. Corman, T. Yefsah, R. Desbuquois, J. Dalibard : « Absorption imaging of a quasi 2D gas: A multiple scattering analysis », *New J. Phys.*, 14, 055001 (2012).
- I. Bloch, J. Dalibard et S. Nascimbène : « Quantum simulations with ultracold quantum gases », *Nature Physics*, 8, 267 (2012).
- R. Desbuquois, L. Chomaz, T. Yefsah, J. Léonard, J. Beugnon, C. Weitenberg, J. Dalibard : « Superfluid behaviour of a two-dimensional Bose gas », *Nature Physics*, 8, 645 (2012).
- D. Jacob, L. Shao, V. Corre, T. Zibold, L. De Sarlo, E. Mimoun, J. Dalibard et F. Gerbier : « Phase diagram of spin 1 antiferromagnetic Bose-Einstein condensates », *Phys. Rev. A*, 86, 061601(R) (2012).
- N. Goldman, J. Beugnon et F. Gerbier : « Detecting Chiral Edge States in the Hofstadter Optical Lattice », *Phys. Rev. Lett.*, 108, 255303 (2012).
- S. Nascimbène, Y.-A. Chen, M. Atala, M. Aidelsburger, S. Trotzky, B. Paredes, I. Bloch : « Experimental realization of plaquette resonating valence bond states with ultracold atoms in optical superlattices », *Phys. Rev. Lett.*, 108, 255301 (2012).
- N.R. Cooper et J. Dalibard : « Reaching Fractional Quantum Hall States with Optical Flux Lattices », *Phys. Rev. Lett.*, 110, 185301 (2013).
- N. Goldman, J. Dalibard, A. Dauphin, F. Gerbier, M. Lewenstein, P. Zoller, I.B. Spielman : « Direct imaging of topological edge states in cold-atom systems », *PNAS* 110(17), 6736-6741 (2013).
- N. Goldman, E. Anisimovas, F. Gerbier, P. Ohberg, I.B. Spielman, G. Juzeliunas : « Measuring topology in a laser-coupled honeycomb lattice: From Chern insulators to topological semi-metals », *New Journal of Physics*, 15, 013025 (2013).
- S. Nascimbène : « Realizing one-dimensional topological superfluids with ultracold atomic gases », *Journal of Physics B*, 46, 134005 (2013).

## Chapitres de livres

F. Chevy et J. Dalibard, « Bose-Einstein condensation of atomic gases », in K.H. Bennemann & J.B. Ketterson (éd.), *Novel Superfluids*, Oxford University Press, 2013, 398-428.

## AUTRES ACTIVITÉS

### Principales conférences invitées

- « Exploring Flatland with cold atoms », conférence DAMOP, Los Angeles, États-Unis, 4-8 juin 2012 (J. Dalibard).
- Table ronde sur la physique atomique, conférence ICAP 2012 (International Conference on Atomic Physics), Palaiseau, 23-27 juillet 2012 (J. Dalibard).
- « Cold atomic gases in two dimensions », conférence Quo Vadis BEC, Bad Honnef, Allemagne, 21-25 août 2012 (J. Dalibard).
- « Exploring Flatland with cold atoms », colloquium de l'Université de Boulder, États-Unis, 26 septembre 2012 (J. Dalibard).
- « Pannel discussion on the meaning of the wave function », Quantum Foundation Symposium, University of Maryland, États-Unis, 10-12 octobre 2012 (J. Dalibard).
- « Cold atomic gases in 2D: From Kosterlitz-Thouless to Quantum Hall Physics », conférence Frontiers in Quantum Photon Science, Hambourg, Allemagne, 5-7 novembre 2012 (J. Dalibard).
- « Artificial gauge fields for neutral atoms in optical lattices », atelier Cold atoms: a European endeavour, Aarhus, Danemark, novembre 2012 (F. Gerbier).
- « Cold atoms and two-dimensional physics », colloquium de l'Université d'Innsbruck, Autriche, 15 janvier 2013 (J. Dalibard).
- « From Kosterlitz-Thouless to Quantum Hall Physics », conférence Non-linear optical and atomic systems: deterministic and stochastic aspects, Lille, 21-25 janvier 2013 (J. Dalibard).
- « Artificial gauge potentials with flux lattices », conférence Pushing the boundaries with cold atoms, Nordita, Stockholm, Suède, 3-8 février 2013 (J. Dalibard).
- « Realizing topological superfluids with ultracold atomic gases », conférence Topological Phenomena in Quantum Dynamics and Disordered Systems, Banff, Canada, 3-8 février 2013 (S. Nascimène).
- « Artificial gauge fields for neutral atoms in optical lattices », atelier Topological states of matter, Freiburg, Allemagne, mars 2012 (F. Gerbier).
- « Artificial magnetism with Optical flux lattices », New magnetic field frontiers in atomic/molecular and solid-state physics, Les Houches, 6-10 mai 2013 (J. Dalibard).
- « Superfluid behavior of a 2D Bose Gas », conférence DAMOP, Québec, Canada, 3-7 juin 2013 (J. Beugnon).
- « Realizing one-dimensional topological superfluids with ultracold atomic gases », conférence Summer Programme on Synthetic Gauge Fields for Photons and Atoms, Trento, Italie, 1<sup>er</sup>-12 juillet 2013 (S. Nascimène).

### Direction de thèses

David Jacob (25/05/2012, directeurs : Jean Dalibard et Fabrice Gerbier) : « Condensats de Bose-Einstein de spin 1 : étude expérimentale avec des atomes de sodium dans un piège optique ».

Rémi Desbuquois (03/06/2013, directeur : Jean Dalibard) : « Thermal and superfluid properties of the two-dimensional Bose gas ».

## Participation aux programmes nationaux et internationaux

Agence nationale pour la recherche, *Physique des milieux condensés et dilués*, programme blanc édition 2012 : projet AGAFON.

European Research Council, Programme Synergy 2012 : projet UQUAM.

### ACTIVITÉS DE RECHERCHE DE LA CHAIRE

#### Condensats atomiques spinoriels

Ce projet, placé sous la responsabilité de Fabrice Gerbier et de Jean Dalibard, porte sur l'étude expérimentale d'un gaz d'atomes de sodium et sur sa modélisation théorique. Ces atomes possèdent un moment cinétique de spin égal à 1 dans leur niveau fondamental, et les forces entre atomes à basse température correspondent à une interaction effective de type anti-ferromagnétique entre les différentes composantes de spin. Nous avons mesuré le diagramme de phase de ce gaz, en fonction de la température et du champ magnétique appliqué. Pour des champs magnétiques appliqués faibles, nous avons observé des fluctuations anormalement grandes (bien au-delà d'une loi de Poisson) pour les populations des trois composantes de spin. Nous avons interprété et modélisé ces fluctuations en termes de condensat fragmenté : au lieu d'avoir un seul état macroscopiquement occupé, le condensat de Bose-Einstein produit à partir de ces gaz spinoriels possède des populations comparables pour plusieurs états. Nous avons développé une étude théorique de ce phénomène selon deux approches complémentaires, l'une à base d'états à symétrie brisée et l'autre fondée sur des états respectant la symétrie de spin initiale.

#### Gaz quantiques à deux dimensions

Ce projet est placé sous la responsabilité de Jérôme Beugnon, Sylvain Nascimbène et Jean Dalibard. Nous avons poursuivi notre étude des gaz bidimensionnels d'atomes obéissant à la statistique de Bose-Einstein, en l'occurrence des atomes de rubidium. Un résultat important de l'année 2012 a été la mise en évidence directe d'une transition superfluide dans ces gaz. Ce passage à l'état superfluide résulte d'une transition de Kosterlitz-Thouless et il se produit en absence de condensation de Bose-Einstein, contrairement à ce qui se produit dans un gaz tridimensionnel. Nous avons par ailleurs modifié le montage expérimental existant pour être en mesure d'observer les atomes individuellement et de les placer dans des puits de potentiel de formes variées, en particulier des boîtes à fond plat. Nous avons également entrepris la construction d'un nouveau montage de condensation du rubidium qui sera installé à terme dans le nouvel Institut de physique du Collège de France. Sur le plan théorique, en collaboration avec Nigel Cooper de l'université de Cambridge, nous avons étudié les réseaux de flux, qui permettent de simuler le comportement de gaz bidimensionnels d'électrons dans un champ magnétique uniforme. Nous avons montré en particulier que certaines phases de la matière susceptibles d'apparaître dans ces réseaux de flux étaient topologiquement équivalentes à des phases connues de la physique de l'effet Hall quantique, comme l'état de Laughlin ou l'état de Moore-Read.



## **Champ magnétiques artificiels et réseaux optiques**

Notre recherche expérimentale sur ce thème est menée sur des atomes d'Ytterbium et elle est dirigée par Fabrice Gerbier et Jérôme Beugnon. Nous avons obtenu cette année un piège magnéto-optique d'Ytterbium opérant sur une raie atomique étroite. L'optimisation du chargement et du refroidissement ultérieur conduit à un nuage contenant environ deux cents millions d'atomes à une température de dix microKelvins. Ces atomes sont ensuite transférés dans un piège dipolaire formé d'un seul faisceau laser focalisé, transportés dans une chambre de science, puis refroidis par évaporation jusqu'à la condensation de Bose-Einstein. Nous obtenons des condensats quasiment purs de cinquante milliers de particules. Nous avons procédé aux premières expériences de chargement dans des réseaux optiques à une et deux dimensions. Nous travaillons en parallèle à la construction d'un laser ultrastable asservi sur une cavité optique de très haute finesse, qui permettra de coupler de manière cohérente l'état fondamental et un état excité de très longue durée de vie. La mise au point de ce laser et sa stabilisation en fréquence (au niveau d'une dizaine de hertz ou moins) constituera l'étape clé permettant la réalisation de champs de jauge artificiels.

## **Vers de supraconducteurs topologiques avec des gaz froids**

Ce nouveau projet, placé sous la responsabilité de Sylvain Nascimbène et Jean Dalibard, porte sur la réalisation de superfluides topologiques, une phase de la matière inexplorée dans laquelle les excitations de bord sont des fermions de Majorana. Ces particules ont une statistique quantique exotique qui pourrait servir au développement de l'information quantique topologique. Nous avons travaillé cette année sur la conception et les premières étapes de la réalisation d'un dispositif expérimental qui permettra de produire ces superfluides topologiques. Notre dispositif est basé sur la combinaison du contrôle des interactions interatomiques et de potentiels optiques vectoriels – combinaison rendue possible par les propriétés électroniques de l'atome de Dysprosium.

## **Études théoriques complémentaires**

En collaboration avec Nathan Goldman (Bruxelles), nous avons dégagé des pistes pour caractériser les états topologiques réalisables dans des gaz d'atomes froids. Nos études portent sur un gaz parfait d'atomes obéissant à la statistique de Fermi-Dirac. Nous supposons que le gaz remplit entièrement une bande topologique, réalisant ainsi l'analogie atomique d'un état de Hall quantique entier obtenu dans les systèmes électroniques. Nous avons proposé une méthode spectroscopique permettant de sonder les états de bords associés à une phase topologique, de prouver leur chiralité et de sonder leur relation de dispersion. Nous avons également étudié le comportement dynamique de ces états suite à un changement brutal du potentiel de piégeage ; nous avons montré que leur dynamique permet en principe de visualiser directement ces états et de démontrer leur caractère chiral. Avec Nathan Goldman et Maciej Lewenstein (Barcelone), nous avons par ailleurs proposé une méthode pour réaliser expérimentalement des champs de jauge non abéliens de type  $SU(N)$  sur un réseau carré. Nous avons montré que ces champs non abéliens pouvaient être employés pour réaliser des isolants topologiques définis en principe sur des réseaux plus complexes.