

Atomes et rayonnement

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

ENSEIGNEMENT

Cours : Une brève histoire des atomes froids^a

Peut-on contrôler l'équilibre thermodynamique d'un échantillon de matière en utilisant de la lumière aux caractéristiques bien choisies ? Depuis les articles fondateurs d'Einstein et de Kastler, cette question a accompagné le développement de la physique atomique et de l'optique quantique. À partir des années 1970, le développement des sources laser accordables est venu lui donner un nouvel éclairage, avec notamment les propositions de refroidissement de gaz d'atomes neutres ou d'ions. Les réponses qui ont été apportées sont allées bien au-delà des prévisions initiales les plus optimistes. Le refroidissement de particules atomiques par laser permet d'abaisser la température d'un gaz depuis la température ambiante jusqu'à un domaine compris entre le millikelvin et le microkelvin, voire même en dessous dans certains cas particuliers.

Les atomes froids sont omniprésents dans les expériences de métrologie du temps et des fréquences, ainsi que dans la plupart des mesures de haute précision en physique atomique. Le refroidissement radiatif a également ouvert la voie à la production de gaz quantiques comme les condensats de Bose-Einstein, dans lesquels un grand nombre de particules s'accumulent dans un seul état microscopique. Il permet en effet de s'approcher de la limite où la longueur d'onde thermique des atomes du gaz devient comparable à la distance entre particules. Notons toutefois que le refroidissement radiatif ne permet en général pas d'atteindre directement le seuil de condensation. Il est secondé par une phase de refroidissement par évaporation, qui permet d'abaisser la température d'encore d'un ou deux ordres de grandeur.

a. Les cours sont disponibles en audio et vidéo sur le site internet du Collège de France : <http://www.college-de-france.fr/site/jean-dalibard/course-2014-2015.htm> [NdÉ].

Le refroidissement radiatif a été appliqué à de nombreuses espèces atomiques, plus d'une trentaine à ce jour. Le seul élément déterminant est de disposer de sources laser continues et suffisamment intenses pour exciter de manière résonante une transition atomique. Le but de ce cours, composé de six leçons de 1 h 30 chacune, a été de présenter l'évolution des principales idées à la base du refroidissement radiatif et de discuter leurs performances et leurs limites. Nous n'avons pas cherché à décrire toutes les méthodes proposées, mais nous sommes concentrés sur quelques principes importants : (1) l'effet Doppler, qui permet d'obtenir une réponse de l'atome à l'onde lumineuse qui dépend de la vitesse atomique ; (2) le mécanisme Sisyphé, qui oblige l'atome à escalader plus de collines de potentiel qu'il n'en descend ; (3) l'utilisation d'états noirs, qui consiste à cacher les atomes dans l'obscurité, c'est-à-dire à les accumuler dans des états où ils sont effectivement découplés de la lumière.

Cours 1. Atomes et lumière en équilibre thermique

Le premier cours a été consacré à la démarche suivie par Einstein dans ses articles fondateurs. Il y montre comment le mouvement d'atomes couplés au rayonnement électromagnétique peut être vu comme un processus brownien, et pourquoi on observe une thermalisation des atomes grâce à l'effet Doppler. Le point de départ est le rayonnement du corps noir, c'est-à-dire le rayonnement électromagnétique émis par un corps matériel en équilibre thermodynamique avec son environnement. La distribution spectrale de ce rayonnement, donnée par la loi de Planck, est une fonction universelle qui ne dépend que de la température du corps. Considérant cette loi acquise, Einstein va étudier comment un rayonnement avec cette densité spectrale d'énergie va imposer sa température à une collection d'atomes. Pour cela, il introduit deux notions essentielles que nous avons décrites en détail : (i) une force de friction causée par la lumière sur un atome en mouvement ; (ii) une diffusion en impulsion due au caractère aléatoire des processus d'absorption et d'émission.

Cours 2. Le refroidissement Doppler et le piège magnéto-optique

Le deuxième cours a été consacré au refroidissement Doppler avec des sources lasers. Soixante ans après l'argument d'Einstein étudié au premier cours, deux articles, de Hänsch et Schawlow d'une part, et de Wineland et Dehmelt d'autre part, sont venus simultanément proposer d'exploiter la lumière des lasers accordables pour créer de nouveaux équilibres thermodynamiques. Dans le langage que nous avons développé au cours précédent, un laser monochromatique permet de réaliser une distribution spectrale de lumière arbitrairement étroite : c'est alors la largeur naturelle du niveau excité de l'atome qui va venir remplacer la largeur de la distribution du corps noir. En d'autres termes, il n'y a plus de température imposée « de l'extérieur » par la lumière incidente et ce sont les paramètres de la transition atomique utilisée qui déterminent la température d'équilibre. Comme dans l'article d'Einstein, c'est l'effet Doppler qui est à la base de la force de friction qui permet de refroidir les atomes. L'approche que nous avons suivie a donc été très similaire à celle développée pour le rayonnement du corps noir. Nous avons utilisé la théorie du mouvement brownien et déterminé à la fois un coefficient de friction et un coefficient de diffusion, pour arriver à la limite Doppler reliant la température d'équilibre et la largeur naturelle de la transition atomique. Une fois le principe de

ces *mélasses optiques* établi, nous l'avons transposé de l'espace des vitesses vers l'espace des positions, en substituant l'effet Zeeman à l'effet Doppler. Nous sommes ainsi arrivés au principe du piège magnéto-optique que nous avons décrit et illustré à partir d'expériences récentes, menées soit avec des atomes, soit avec des molécules.

Cours 3. Les vertus des raies étroites

Nous avons étudié dans ce cours la possibilité de manipuler des atomes à raie étroite, c'est-à-dire tels que la largeur naturelle du niveau excité est plus petite que l'énergie de recul associée à l'absorption ou l'émission d'un seul photon. Cette question est désormais très pertinente sur le plan expérimental : un grand intérêt est en effet porté aux atomes à deux électrons externes, notamment sur le plan métrologique. Or, ces atomes ont naturellement des raies de résonance étroites ; ces raies couplent le secteur où le spin total des deux électrons externes est nul (singulet de spin) et celui pour lequel le spin vaut 1 (triplet de spin). L'absorption ou l'émission d'un seul photon suffit dans ce cas à changer notablement le paramètre de saturation de l'atome et on ne peut plus adopter une approche de type « mouvement brownien continu ». Nous sommes donc passés à une description du mouvement dans laquelle chaque saut quantique est pris en compte de manière discrète. Nous avons montré que la distribution stationnaire a une largeur minimale donnée par la vitesse de recul. Nous avons terminé ce cours en décrivant une expérience menée récemment à Innsbruck, dans laquelle le seuil de condensation de Bose-Einstein a pu être atteint directement par refroidissement lumineux sur raie étroite.

Cours 4. Se cacher dans l'ombre

Le but principal de ce cours a été d'étudier la généralisation de la notion de « pompage optique dans l'espace des vitesses » qui se produit pour le refroidissement Doppler sur raie étroite. Nous avons montré comment on peut exploiter l'idée d'interférence entre chemins quantiques pour annuler la probabilité d'excitation de l'atome quand il a atteint la classe de vitesse désirée. Nous avons discuté deux schémas différents, conduisant aux mêmes lois statistiques : (i) le piégeage cohérent de population qui tire parti d'une superposition cohérente d'états internes, insensible à la lumière ; (ii) le refroidissement Raman, qui utilise des impulsions lumineuses de forme optimisée pour transférer un atome d'un sous-niveau donné du niveau électronique fondamental vers un autre, de manière sélective en vitesse.

Cours 5. Sisyphe brillant, Sisyphe gris

L'effet Sisyphe consiste à placer l'atome dans une situation où il gravit plus de collines de potentiel qu'il n'en descend. Il est à l'œuvre dans la plupart des expériences de refroidissement et conduit très simplement à des distributions en vitesse limitées seulement par le recul associé à un seul photon. Nous avons souligné le point clé suivant : pour un atome à plusieurs sous-niveaux fondamentaux, de longues constantes de temps peuvent apparaître, liées au temps de pompage optique entre sous-niveaux. À ces longues constantes de temps, peuvent être associées de basses énergies. Nous avons d'abord présenté l'effet Sisyphe dans sa version initiale, avant de passer à des développements récents qui généralisent ce type de

refroidissement à d'autres transitions atomiques. Nous nous sommes notamment intéressés aux mélasses grises, qui permettent d'étendre le concept de refroidissement Sisyphe à des espèces atomiques non concernées jusqu'ici.

Cours 6. Les réseaux optiques et le refroidissement par bande latérale

Le dernier cours, consacré au refroidissement par bande latérale, nous a donné l'occasion de faire le point sur la densité dans l'espace des phases que l'on peut espérer atteindre dans une expérience de refroidissement radiatif. Nous avons examiné les limites imposées par les effets collectifs dans les gaz éclairés par la lumière, en particulier du fait de la diffusion multiple des photons émis spontanément. Nous avons exposé quelques remèdes, comme le confinement dans un piège avec une fréquence d'oscillation élevée. Ceci nous a conduit vers un dernier mécanisme de refroidissement, le refroidissement par bande latérale, bien adapté à une assemblée d'atomes confinés aux sites d'un réseau optique. Pour finir, puisque l'obstacle majeur à l'obtention de gaz dégénérés est la diffusion multiple des photons émis spontanément lors du refroidissement, nous avons terminé ce cours en abordant une question récurrente du domaine : l'émission spontanée, qui est à l'origine du problème de la diffusion multiple, est-elle indispensable au refroidissement d'atomes par laser ?

Séminaires (en lien avec le cours)

Une série de séminaires a accompagné et complété ce cours :

Jean-François Roch (laboratoire Aimé Cotton et ENS Cachan, Orsay), « Centres NV du diamant : du matériau aux applications en information quantique et en magnéto-métrie ».

Antoine Browaeys (Institut d'optique, Palaiseau) : « Contrôle de l'interaction entre quelques atomes de Rydberg individuels ».

Arno Rauschenbeutel (université de Vienne) : « Chiral interaction of light and matter in confined geometries ».

Francesca Ferlaino (université d'Innsbruck) : « Dipolar physics with ultracold atomic magnets ».

Jacqueline Bloch (laboratoire de Photonique et de Nanostructures, Marcoussis) : « Fluides quantiques de lumière dans les microcavités à semiconducteurs ».

Zoran Hadzibabic (université de Cambridge) : « Quantum Gas in a Box ».

Un atelier d'une demi-journée portant sur la physique hors d'équilibre dans les gaz quantiques a réuni les orateurs suivants :

Leticia Cugliandolo (laboratoire de Physique théorique et hautes énergies, Paris) : « Fast and slow quenches across phase transitions in open systems ».

Zoran Hadzibabic (université de Cambridge) : « Critical Dynamics in a 3D Bose gas ».

Giovanna Morigi (université de Saarland, Sarrebruck) : « Quantum structures of photons and atoms ».

Jérôme Beugnon (laboratoire Kastler Brossel, Paris) : « Out-of-equilibrium physics with Bose gases in 2D geometries ».

Cours à l'étranger

Deux cours ont été donnés à l'université de Vienne (Autriche) en décembre 2014. Le premier de ces cours (*Artificial magnetism and cold atomic gases*) a porté sur les champs de jauge artificiels. Ce thème est particulièrement important dans le cadre du programme général visant à simuler des phénomènes de la matière condensée avec des gaz d'atomes froids. Nous avons expliqué dans ce cours comment on peut simuler avec ces gaz des phénomènes liés au magnétisme orbital, bien que les atomes utilisés ne portent pas de charge. L'ingrédient principal de cette simulation est la « phase de Berry » ou sa généralisation non abélienne. Partant de la notion générale de suivi adiabatique, nous avons discuté les phénomènes susceptibles d'apparaître quand un atome bouge dans un paysage énergétique bien choisi, généré par une lumière laser cohérente, et nous avons montré que les caractéristiques essentielles du magnétisme quantique pouvaient ainsi être retrouvées.

Le second cours, intitulé *Gauge fields in an optical lattice: when topology meets with experimental physics*, a porté sur les réseaux optiques et leur lien avec les fluides quantiques topologiques. Nous avons pris pour point de départ le problème classique d'une charge bougeant sur un réseau carré traversé par un champ magnétique. Nous avons expliqué comment la topologie des bandes d'énergie du spectre de la particule pouvait être caractérisée par un nombre entier, l'indice de Chern. Nous avons ensuite décrit des réalisations expérimentales récentes de cette situation modèle à partir de gaz d'atomes froids, et montré comment on pouvait accéder expérimentalement à sa caractérisation topologique.

PUBLICATIONS

Articles originaux

CORMAN L., CHOMAZ L., BIENAIMÉ T., DESBUQUOIS R., WEITENBERG C., NASCIBENE S., DALIBARD J. et BEUGNON J., « Quench-Induced Supercurrents in an Annular Bose Gas », *Physical Review Letters*, 113(13), 26 septembre 2014, 135302, DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.135302.

AIDELSBURGER M., LOHSE M., SCHWEIZER C., ATALA M., BARREIRO J.T., NASCIBÈNE S., COOPER N.R., BLOCH I. et GOLDMAN N., « Measuring the Chern number of Hofstadter bands with ultracold bosonic atoms », *Nature Physics*, 11(2), 22 décembre 2014, 162-166, DOI: 10.1038/nphys3171.

CORRE V., ZIBOLD T., FRAPOLLI C., SHAO L., DALIBARD J. et GERBIER F., « Spin-1 condensates at thermal equilibrium: A SU(3) coherent state approach », *EPL*, 110(2), avril 2015, 26001, DOI: 10.1209/0295-5075/110/26001.

DAREAU A., SCHOLL M., BEAUFILS Q., DOERING D., BEUGNON J. et GERBIER F., « Doppler spectroscopy of an ytterbium Bose-Einstein condensate on the clock transition », *Physical Review A*, 91(2), 24 février 2015, 023626, DOI: 10.1103/PhysRevA.91.023626.

CHOMAZ L., CORMAN L., BIENAIME T., DESBUQUOIS R., WEITENBERG C., NASCIBENE S., BEUGNON J. et DALIBARD J., « Emergence of coherence via transverse condensation in a uniform quasi-two-dimensional Bose gas », *Nature Communications*, 6 janvier 2015, 6162, DOI: 10.1038/ncomms7162.

NASCIMBENE S., GOLDMAN N., COOPER N.R. et DALIBARD J., « Dynamic optical lattices of sub-wavelength spacing for ultracold atoms », *Physical Review Letters*, 115(14), 2 octobre 2015, DOI : 10.1103/PhysRevLett.115.140401 [arXiv: 1506.00558].

ZIBOLD T., CORRE V., FRAPOLLI C., INVERNIZZI A., DALIBARD J. et GERBIER F., « Spin nematic order in antiferromagnetic spinor condensates », 19 juin 2015, *Physical Review*, A 93 023614, 2016 [arXiv: 1506.06176].

Chapitre de livres

DALIBARD J., « Introduction to the physics of artificial gauge fields », dans INGUSCIO M., KETTERLE W. et STRINGARI S. (éd.), *Quantum Matter at Ultralow Temperatures*, Amsterdam, IOS Press, coll. « Proceedings of the International School of Physics “Enrico Fermi” », à paraître, arXiv:1504.05520.

AUTRES ACTIVITÉS

Principales conférences invitées

8-11 septembre 2014 : « Antiferromagnetism and Fragmentation in Spin 1 Bose-Einstein Condensates », *Quantum Technologies V*, Krakow, Pologne (Fabrice Gerbier).

27-31 octobre 2014 : « Spin-orbit coupling in an ultracold gas of Dysprosium: prospects towards topological superfluidity », *ICTP Workshop on Probing and Understanding Exotic Superconductors and Superfluids*, Trieste, Italie (Sylvain Nascimbene).

17-19 novembre 2014 : « Les gaz ultra-froids : Un monde quantique entre physique atomique et matière condensée », *conférence à la réunion des GDR Information Quantique et Atomes froids* (Jean Dalibard)

27 janvier 2015 : « Cold Atoms in Faltdland », *colloquium du Département de Physique de l'Université d'Hannovre*, Allemagne (Jean Dalibard).

29 janvier 2015 : « Ultra-cold gases : A quantum world between atomic and condensed matter physics », *colloque d'ouverture du trimestre « Le monde quantique »*, IHES, Bures sur Yvette (Jean Dalibard).

19 février 2015 : « Quantum gases in low dimension : from atom circuits to topological states of matter », *colloquium du Département de Physique du MIT*, USA (Jean Dalibard).

4 mars 2015 : « The 2D Bose gas, in and out of equilibrium », *exposé donné dans le cadre du trimestre « Le monde quantique »*, IHES, Bures sur Yvette (Jean Dalibard).

23-27 mars 2015 : « Critical temperatures in a gas of sodium spin-1 atoms », *congrès annuel de la DPG*, Heidelberg, Allemagne (Tilman Zibold).

7 avril 2015 : « Lumière et matière : la physique quantique en action », *conférence à l'Espace des Sciences de Rennes* (Jean Dalibard).

7-10 avril 2015 : « Do Spin 1 bosons equilibrate? », *Winter School: Non-Equilibrium Quantum Systems: Theory and Experimental Implementation*, Obergurgl, Autriche (Fabrice Gerbier).

16-17 avril 2015 : « Dynamic optical lattices of sub-wavelength spacing for ultracold atoms », *17th Symposium on Topological Quantum Information*, Garching, Allemagne (Sylvain Nascimbene).

24 avril 2015 : « Gauge fields in an optical lattice: When topology meets with experimental physics », *21st Young Atom Opticians conference*, Zurich, Suisse (Jean Dalibard).

16 mai 2015 : « Présentation d'un laser », *Nuit de la Lumière 2015*, Musée des Arts et Métiers, Paris (Davide Dreon).

8-12 juin 2015: « Formation of topological defects in a two-dimensional Bose gas through quench cooling », *46th Annual DAMOP Meeting*, Columbus, Ohio, USA (Jérôme Beugnon).

29 juin-3 juillet 2015: « Cold atomic gases in a flat box: A new window on quantum many-body physics », *22nd International Conference on Laser Spectroscopy*, Singapour (Jean Dalibard).

29 juin-3 juillet 2015: "The uniform 2D Bose gas", *Lindau Nobel Laureate Meeting*, Lindau, Allemagne (Laura Corman).

20-22 juillet 2015: « Cold atomic gases in flat boxes: A new window on quantum many-body physics », conférence *Non-equilibrium quantum dynamics in low dimensions*, Durham, UK (Jean Dalibard).

20-22 juillet 2015 : « Do Spin 1 bosons equilibrate ? », conférence *Non-equilibrium quantum dynamics in low dimensions*, Durham, UK (Fabrice Gerbier).

Soutenances de thèses

Lauriane Chomaz (ATER Collège de France, directeurs Jean Dalibard et Jérôme Beugnon), « Coherence and superfluidity of Bose gases in reduced dimensions : from harmonic traps to uniform fluids », novembre 2014.

Matthias Scholl (directeurs : Jean Dalibard et Fabrice Gerbier), « Probing an ytterbium Bose-Einstein condensate using an ultranarrow optical line: towards artificial gauge fields in optical lattices », décembre 2014.

Vincent Corre (directeurs : Jean Dalibard et Fabrice Gerbier), « Magnétisme dans des condensats de Bose-Einstein spinéurs avec interactions antiferromagnétiques », décembre 2014.

Participation aux programmes nationaux et internationaux

Agence nationale pour la recherche, *Physique des milieux condensés et dilués*, programme blanc édition 2012 : projet AGAFON (2012-15).

European Research Council, Programme Synergy 2012 : projet UQUAM (2013-19).

Cluster-of-Excellence The Hamburg Centre for Ultrafast Imaging - Structure, Dynamics and Control of Matter at the Atomic Scale (2012-17).

Programme d'échange financé par la Royal Society : *Reaching the Fractional Quantum Hall Regime with Ultracold Atomic Gases*, en collaboration avec le professeur Nigel Cooper, université de Cambridge.

ACTIVITÉS DE RECHERCHE DE LA CHAIRE

Depuis l'été 2014, toute la recherche de l'équipe est effectuée dans le bâtiment rénové de l'Institut de physique du Collège de France, sur le site Marcelin-Berthelot. Au 1^{er} juillet 2015, les différentes équipes contribuant à l'activité de recherche de la chaire étaient composées de quatre chercheurs permanents, cinq chercheurs post-doctorants, sept étudiants en thèse (dont une future ATER Collège de France) et trois étudiants stagiaires. Nous bénéficions du support administratif et technique (atelier de mécanique) de l'Institut de physique du Collège de France, ainsi que des services du Laboratoire Kastler Brossel localisés à l'École normale supérieure et à l'université Pierre et Marie Curie.

Condensats atomique spinoriels

Ce projet est placé sous la responsabilité de Fabrice Gerbier (CR CNRS) et de Jean Dalibard. Il porte sur l'étude d'un condensat de Bose-Einstein à plusieurs composantes, dit *condensat spinoriel*. Par rapport aux condensats « habituels » à une composante, les interactions magnétiques entre les différentes composantes de spin viennent enrichir considérablement les phénomènes physiques observables. Dans notre expérience, ces condensats spinoriels sont réalisés avec des atomes de sodium, de moment cinétique de spin égal à 1 dans leur état fondamental et caractérisés par des interactions d'échange antiferromagnétiques.

Nos travaux précédents ont porté sur les propriétés magnétiques (diagramme de phase, paramètre d'ordre, fluctuations des populations dans les différents sous-niveaux Zeeman dues aux interactions d'échange) à très basse température, où pratiquement tous les atomes sont condensés. Nous avons récemment étendu ces mesures à température finie, en partant d'un gaz presque classique, au-dessus de la température critique de condensation, pour arriver aux échantillons les plus froids que nous pouvons réaliser. Nous avons alors observé un phénomène nouveau, correspondant à une succession de transitions de phase associées à plusieurs étapes de condensation. La composante la plus peuplée condense en premier, d'une manière analogue à la transition de Bose-Einstein. Les autres composantes condensent à des températures plus basses, à un moment où les interactions avec le condensat déjà présent jouent un rôle important. Ces deux condensations supplémentaires s'interprètent comme des transitions magnétiques où l'ordre de spin s'établit au sein du condensat.

Gaz quantiques en dimension réduite

Ce projet, placé sous la responsabilité de Jérôme Beugnon (MdC université Pierre et Marie Curie), Sylvain Nascimbène (MdC École normale supérieure) et Jean Dalibard, vise à explorer la physique des gaz de Bose à deux dimensions. Cette année a essentiellement été consacrée au développement d'un nouveau dispositif expérimental, désormais opérationnel. Nous avons mis au point le piégeage et le refroidissement d'atomes de rubidium jusqu'à la condensation de Bose-Einstein dans des pièges optiques et magnétiques. Une particularité de l'expérience est de pouvoir piéger optiquement les atomes dans des géométries arbitraires en réalisant l'image d'un motif programmé sur une matrice de micro-miroirs. Ce motif est contrôlable en temps réel : grâce à un système optique de grande ouverture numérique, nous pouvons choisir la forme du piège avec une résolution de l'ordre du micron. Nous avons également développé et testé un réseau optique de pas variable qui permet de modifier de façon dynamique la force du confinement qui limite le mouvement des atomes le long de la troisième dimension. La combinaison de ces outils va nous permettre d'étudier la physique hors d'équilibre dans ces systèmes et l'effet de champs de jauge artificiels. En parallèle, nous avons terminé l'exploitation des données acquises sur notre montage expérimental précédent, localisé dans les laboratoires de l'ENS. Nous avons mis en évidence sur ces données le phénomène de condensation transverse, observable quand le gaz d'atomes froids passe d'une situation tri-dimensionnelle à une géométrie quasi-bidimensionnelle.

Champ magnétiques artificiels et réseaux optiques

Ce projet expérimental est dirigé par Fabrice Gerbier et Jérôme Beugnon. Il utilise un gaz d'atomes d'ytterbium piégé dans un réseau optique pour réaliser l'analogie d'un champ magnétique pour atomes neutres. Nous souhaitons synthétiser l'équivalent du potentiel vecteur de l'électromagnétisme pour notre gaz d'atomes neutres. Ce potentiel de jauge résultera du couplage cohérent entre deux états internes de l'atome, induit par un faisceau laser qui imprime sa phase sur la fonction d'onde atomique. On peut identifier un régime de paramètres pour lequel cette phase est équivalente à la phase d'Aharonov-Bohm caractérisant le mouvement quantique de particules chargées dans un champ magnétique.

Nous avons abordé l'an dernier la difficulté expérimentale principale, à savoir le couplage cohérent sur une transition optique très étroite (largeur naturelle inférieure au milliHertz). La réalisation de couplage de manière stable nécessite de contrôler la phase du laser correspondant avec une précision métrologique. Après la période de reconstruction qui a suivi le déménagement, nous avons repris nos études de spectroscopie du condensat de Bose-Einstein d'ytterbium, avec pour objectif l'amélioration de la stabilité en phase du champ laser vu par les atomes. Alors que nous nous étions initialement restreints à des condensats en expansion dans l'espace libre, nous sondons désormais des condensats piégés dans un réseau optique. Plusieurs améliorations du dispositif nous ont permis d'observer des spectres optiques larges de quelques centaines de Hertz seulement, ainsi que des oscillations de Rabi entre le condensat dans l'état fondamental et le condensat dans l'état excité persistant pendant plusieurs millisecondes avant de s'amortir. Il semble que les interactions entre les atomes (élastiques ou inélastiques) jouent un rôle majeur dans l'amortissement observé, et nous cherchons désormais à caractériser et expliquer quantitativement ces mesures spectroscopiques de très haute précision.

Couplage spin-orbite dans les gaz d'atomes fermioniques

Ce projet, placé sous la responsabilité de Sylvain Nascimbène et Jean Dalibard, porte sur l'étude des gaz atomiques en présence d'un couplage spin-orbite. Notre but est de produire une phase non conventionnelle de la matière, de type « superfluide topologique ». Cette étude est menée sur des atomes de dysprosium, qui présentent une structure électronique favorable pour la réalisation d'un couplage spin-orbite au moyen de faisceaux laser. Suite au déménagement sur le site du Collège de France, nous avons poursuivi cette année la construction du dispositif expérimental ; les atomes sont désormais piégés dans une pince optique et nous sommes proches de la mise en place du refroidissement par évaporation, dernière étape avant la production d'un gaz dégénéré, bosonique ou fermionique.

En parallèle, nous avons mené un travail théorique sur la réalisation d'un nouveau type de réseau optique, caractérisé par une période spatiale nettement plus petite que les réseaux traditionnels. La conception de ce réseau s'est appuyée sur les progrès que nous avons faits l'an dernier concernant la compréhension de la dynamique d'un système dont l'hamiltonien dépendant périodiquement du temps. Nous prévoyons pour ces réseaux une échelle d'énergie pertinente beaucoup plus élevée que pour les réseaux usuels, ce qui pourrait rendre accessibles des états complexes de la matière jusqu'ici inatteignables. Le schéma que nous avons proposé est par ailleurs très bien adapté à la structure de niveau de l'atome de Dysprosium.

