

Atomes et rayonnement

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

ENSEIGNEMENT^a

Cours : Champs magnétiques artificiels

Les effets magnétiques jouent un rôle essentiel en physique quantique. Des notions ou des phénomènes aussi variés que l'invariance de jauge, l'effet Hall quantique, le couplage spin-orbite ou l'effet Aharonov-Bohm trouvent leur origine dans l'interaction entre des particules chargées et un champ magnétique. Puisque les gaz d'atomes froids sont désormais utilisés pour simuler les effets quantiques apparaissant dans d'autres systèmes physiques, il est important de comprendre comment ces phénomènes magnétiques peuvent y être générés et étudiés. Toutefois, la neutralité électrique des atomes nécessite de recourir à des « artifices » – par exemple des faisceaux lumineux de fréquences et de directions bien choisies – pour atteindre des situations équivalentes à celles rencontrées par exemple dans les fluides d'électrons de la matière ordinaire.

Le cours et les séminaires de cette année ont fait le point sur cette recherche très active, tant sur le plan théorique qu'expérimental¹. Nous sommes partis des éléments clés du magnétisme, comme la force de Lorentz ou la symétrie de jauge. Nous avons ensuite montré comment un champ de rotation ou une phase géométrique, comme la phase de Berry apparaissant dans une transformation adiabatique, permettent de simuler un magnétisme orbital pour des particules neutres. Pour finir, nous avons donné plusieurs exemples d'états de la matière susceptibles d'apparaître en présence de magnétisme artificiel, depuis les réseaux de vortex jusqu'à des états fortement corrélés rappelant ceux de l'effet Hall quantique.

a. Les cours sont disponibles en audio et en vidéo sur le site Internet du Collège de France. <http://www.college-de-france.fr/site/jean-dalibard/course-2013-2014.htm> [NdÉ].

Cours 1. Le magnétisme d'une particule ponctuelle

Le premier cours a été consacré à une discussion des bases du magnétisme, d'abord du point de vue des champs magnétiques *via* les équations de Maxwell, puis du point de vue du mouvement de particules chargées. Nous avons abordé successivement le formalisme classique (dynamique newtonienne), puis le formalisme quantique. Dans ce dernier cas, nous avons présenté la notion de changement de jauge, à la fois pour le champ électromagnétique et pour la dynamique des particules. Nous avons illustré ce formalisme sur deux exemples : l'effet Aharonov-Bohm, qui permet d'introduire le concept de phase géométrique, et la notion de monopole magnétique dont l'existence permettrait (selon un argument dû à Dirac) d'expliquer la quantification de la charge électrique. Nous avons terminé par la présentation d'une expérience récente simulant un tel monopole au sein d'un condensat de Bose-Einstein.

Cours 2. Champ magnétique uniforme et niveaux de Landau

L'étude du mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme permet de mettre en place de nombreux éléments du magnétisme. Après avoir rappelé brièvement les résultats obtenus en physique classique (dynamique newtonienne), nous sommes passés au cas quantique. Nous avons dégagé la notion de niveaux de Landau pour les sous-espaces propres de l'hamiltonien et discuté leur dégénérescence. Nous avons ensuite discuté quelques effets physiques particulièrement importants liés à cette quantification en niveaux de Landau. Nous avons en particulier dégagé la notion d'état de bord, qui joue un rôle central dans la physique de l'effet Hall quantique, et nous l'avons illustrée en décrivant une expérience d'interférométrie entre deux circuits électroniques ainsi qu'une transposition de ce concept à un gaz d'atomes froids confinés dans un réseau optique.

Cours 3. Phase de Berry et potentiels de jauge géométriques

Il est fréquent d'avoir recours en physique, classique ou quantique, à la notion d'évolution adiabatique. On considère un système dont l'état dépend d'un paramètre extérieur (volume d'une boîte confinant un fluide, champ extérieur appliqué au système, etc.) et on s'intéresse à une évolution au cours de laquelle celui-ci change lentement au cours du temps. Lorsque le paramètre extérieur reprend à la fin de l'évolution la valeur qu'il avait au départ, il est naturel de penser que le système étudié revient également dans son état initial. Toutefois, le résultat est parfois plus complexe que cette simple identité ; ainsi le pendule de Foucault (jouant le rôle de système) subit au bout de 24 heures une rotation de son plan d'oscillation, alors que le point de suspension du pendule (dans le rôle du paramètre extérieur), est revenu à son point de départ après une rotation complète de la Terre sur son axe. Dans ce cours, nous avons montré qu'on pouvait tirer parti de cette possibilité qu'ont certaines variables de ne pas revenir à leur valeur initiale alors que d'autres variables, qui pilotent le mouvement des premières, parcourent un cycle fermé. Nous avons dégagé la notion de phase de Berry et montré qu'elle permet de générer l'équivalent d'une phase d'Aharonov-Bohm, même si la particule considérée ne possède pas de charge électrique.

Cours 4 et 5. Magnétisme artificiel pour un atome isolé

Nous avons présenté dans ces deux cours différentes méthodes qui ont été proposées et mises en œuvre pour générer sur un gaz d'atomes neutres une dynamique équivalente au magnétisme bien connu des gaz d'électrons. Nous avons classé ces méthodes selon deux critères : i) souhaite-t-on tirer parti de la structure interne des atomes ? ii) l'hamiltonien dépend-il explicitement du temps ? Le premier critère est lié au fait qu'à la différence des électrons dans les solides, nos atomes possèdent une série de niveaux internes que l'on peut coupler entre eux par l'intermédiaire de faisceaux lumineux. Ce degré de liberté permet d'envisager la notion de suivi adiabatique d'un niveau « habillé », avec la phase de Berry et le champ de jauge géométrique qui vient avec. Cette flexibilité propre aux gaz atomiques n'est toutefois pas sans défaut ; elle nécessite l'utilisation de faisceaux lumineux de fréquence proche d'une résonance atomique, ce qui peut conduire à une diffusion de photons et à un chauffage des atomes qui brouillent les effets recherchés. Le second critère apparaît grâce à la possibilité de moduler temporellement le potentiel agissant sur les atomes. Cette modulation peut se faire avec une fréquence du même ordre que la fréquence cyclotron que l'on cherche à faire apparaître : c'est ce qui se produit avec la mise en rotation d'un système, où l'on simule la force magnétique de Lorentz par une force de Coriolis. On peut également choisir une fréquence de modulation beaucoup plus grande que la fréquence cyclotron, le champ de jauge apparaissant alors comme un terme séculaire résultant d'un micromouvement bien choisi. Nous avons terminé ces deux cours par une discussion sur le couplage spin-orbite ; cette variante du couplage magnétique peut conduire à de nombreux phénomènes originaux, à la fois sur le plan fondamental, avec la possibilité de simuler des nouvelles phases de la matière comme les isolants topologiques, et sur le plan appliqué, avec des analogies fortes avec les dispositifs de spintronique.

Cours 6. Magnétisme dans un réseau périodique

Une classe importante de problèmes porte sur le magnétisme orbital en présence d'un potentiel spatialement périodique. Ce type de questions apparaît par exemple quand on étudie l'effet d'un fort champ magnétique sur le fluide d'électrons d'un cristal. La richesse de ce problème est liée à l'existence de deux échelles de longueur qui peuvent être du même ordre : la première est la maille du réseau périodique, la seconde est la taille d'une orbite cyclotron élémentaire. La « compétition » entre ces deux échelles de longueur induit une physique radicalement nouvelle, avec un spectre d'énergie de structure fractale (papillon de Hofstadter). Nous avons montré dans ce cours comment ce régime peut être exploré avec des matériaux synthétiques et/ou des champs magnétiques artificiels, en particulier des atomes froids confinés dans un réseau optique.

Cours 7. Magnétisme artificiel et interactions : condensats en rotation

L'effet combiné d'un champ magnétique artificiel et des interactions entre particules constitue un sujet extrêmement vaste, donnant naissance à de nombreux phénomènes en physique de la matière condensée : ferro- et antiferromagnétisme, effet Hall quantique, supraconductivité et effet Meissner, spintronique, isolants et

supraconducteurs topologiques, etc. Nous avons abordé ce type de problèmes en nous concentrant sur le comportement d'un superfluide en présence d'un champ magnétique uniforme. Nous avons considéré un condensat de bosons en interaction répulsive, placé dans un piège harmonique tournant. Ce système en apparence très simple nous a permis d'introduire une série de notions importantes : l'approximation de champ moyen, la fréquence critique pour la nucléation d'un vortex, les réseaux d'Abrikosov, et enfin le passage vers des états fortement corrélés qui constitue un des grands défis actuellement ouvert en physique des atomes froids.

Séminaires

- Une série de séminaires a accompagné et complété ce cours :
- Immanuel Bloch (Max Planck Garching et LMU, Munich) : Engineering and probing topological Bloch bands with ultracold atoms.
 - Selim Jochim (Heidelberg University) : One, two, three, many: Creating quantum systems one atom at a time.
 - Nathan Goldman (université libre de Bruxelles et LKB Paris) : Les fibrés et l'effet Hall quantique : introduction au nombre de Chern et aux états topologiques de la matière.
 - Nathan Goldman (université libre de Bruxelles et LKB Paris) : La topologie dans le laboratoire : comment détecter le nombre de Chern et les phases topologiques dans un gaz d'atomes froids ?
 - Nigel Cooper (université de Cambridge) : Optical Flux Lattices.
 - David Guéry-Odelin (LCAR, université Paul Sabatier, Toulouse) : Comment court-circuiter l'adiabaticité ?
 - Iacopo Carusotto (INO-CNR BEC Center, université de Trente) : Synthetic gauge fields and topological effects in optics.

PUBLICATIONS

Articles originaux

DE SARLO L., SHAO L., CORRE V., ZIBOLD T., JACOB D., DALIBARD J. et GERBIER F., « Spin fragmentation of Bose-Einstein condensates with antiferromagnetic interactions », *New Journal of Physics*, 15(11), 2013, 113039, DOI : 10.1088/1367-2630/15/11/113039.

GOLDMAN N., GERBIER F. et LEWENSTEIN M., « Realizing non-Abelian gauge potentials in optical square lattices: an application to atomic Chern insulators », *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 46(13), 2013, 134010, DOI : 10.1088/0953-4075/46/13/134010.

NAVON N., NASCIBÈNE S., LEYRONAS X., CHEVY F. et SALOMON C., « Condensation energy of a spin-1/2 strongly interacting Fermi gas », *Physical Review A*, 88(6), 2013, 063614, DOI : 10.1103/PhysRevA.88.063614.

ANISIMOVAS E., GERBIER F., ANDRIJAUSKAS T. et GOLDMAN N., « Design of laser-coupled honeycomb optical lattices supporting Chern insulators », *Physical Review A*, 89(1), 2014, 013632, DOI : 10.1103/PhysRevA.89.013632.

GOLDMAN N. et DALIBARD J., « Periodically Driven Quantum Systems: Effective Hamiltonians and Engineered Gauge Fields », *Physical Review X*, 4(3), 2014, 031027, DOI : 10.1103/PhysRevX.4.031027.

DESBUQUOIS R., YEFSAH T., CHOMAZ L., WEITENBERG C., CORMAN L., NASCIBÈNE S. et DALIBARD J., « Determination of Scale-Invariant Equations of State without Fitting Parameters: Application to the Two-Dimensional Bose Gas Across the Berezinskii-Kosterlitz-Thouless Transition », *Physical Review Letters*, 113(2), 2014, 020404, DOI : 10.1103/PhysRevLett.113.020404.

CORMAN L., CHOMAZ L., BIENAIMÉ T., DESBUQUOIS R., WEINTENBERG C., NASCIBÈNE S., DALIBARD J. et BEUGNON J., « Quench-induced supercurrents in an annular two-dimensional Bose gas », *ArXiv:1406.4073 [cond-mat]*, juin 2014.

AIDELSBURGER M., LOHSE M., SCHWEIZER C., ATALA M., BARREIRO J.T., NASCIBÈNE S., COOPER N.R., BLOCH I. et GOLDMAN N., « Revealing the topology of Hofstadter bands with ultracold bosonic atoms », *ArXiv:1407.4205 [cond-mat, physics:quant-ph]*, juillet 2014.

Chapitres de livres

HADZIBABIC Z. et DALIBARD J., « BKT Physics with Two-Dimensional Atomic Gases », dans *40 Years of Berezinskii-Kosterlitz-Thouless Theory*, World Scientific, 2013, 297323.

AUTRES ACTIVITÉS

Principales conférences invitées

26-30 août 2013 : « Cold quantum gases: A bridge between atomic, photonic and condensed matter physics », conférence *PHOTONICA'13*, Belgrade, Serbie (Jean Dalibard).

7-13 septembre 2013 : « Bosonic Flatland : Equation of state and beyond », *Conference on Bose-Einstein Condensation : Frontiers in Quantum Gases (BEC2013)*, Sant Feliu de Guixols, Espagne (Jean Dalibard).

7-13 septembre 2013 : « Antiferromagnetism of spin 1 bosons : experimental study with ultracold sodium atoms », *Conference on Bose-Einstein Condensation : Frontiers in Quantum Gases (BEC2013)*, Sant Feliu de Guixols, Espagne (Fabrice Gerbier).

18 septembre 2013 : « Experiments with 2D Bose gases », conférence de lancement du projet UQUAM, Munich, Allemagne (Jérôme Beugnon).

15 octobre 2013 : « Les gaz ultra-froids : un monde quantique entre physique atomique et matière condensée », colloque *Aux frontières de la Physique quantique*, université de Montpellier (Jean Dalibard).

23-25 octobre 2013 : « Quantum simulation with cold particles : neutrals vs. Ions », colloque *IonTech2*, Paris (Jean Dalibard).

30 octobre 2013 : « Exploring Flatland with Cold Atoms », Cavendish Physical Society, Cavendish Laboratory, Cambridge, Royaume-Uni (Jean Dalibard).

13-15 novembre 2013 : « Bose-Einstein condensates and antiferromagnetic interactions : An illustration of symmetry breaking in Quantum Mechanics », colloque du *Federal state cluster of excellence 'The Hamburg Centre of Ultrafast Imaging (CUI)*', Hambourg, Allemagne (Jean Dalibard).

4 décembre 2013 : « Artificial gauge fields for cold atoms », journée scientifique de l'IFRAF, Orsay (Jean Dalibard).

14-15 janvier 2014 : « Simulating gauge potential for gases of neutral particles », Colloque *Math-Physics Meeting on cold atoms : topological defects and phase separation*, IHP, Paris (Jean Dalibard).

28 janvier 2014 : « The Atoms Which Came in from the Cold : new sensors, new calculators », 6^e Symposium International OPTRO, Paris (Jean Dalibard).

19 février 2014 : « Exploring Flatland with Cold Atoms », *John Anderson Colloquia series*, université de Strathclyde, Glasgow, Royaume-Unis (Jean Dalibard).

10 mars 2014 : « Shaking the atoms : fantastic !? », colloque *Frontiers in the Quantum World*, Florence, Italie (Jean Dalibard).

1^{er} avril 2014 : « Cold Atoms in Flatland », colloquium de l'Institut Solvay, Bruxelles, Belgique (Jean Dalibard).

8-10 avril 2014 : « A 2D Bose gas in a flat box », deuxième symposium international *Novel states in correlated condensed matter – from model systems to real materials*, KTC Königstein, Frankfurt, Allemagne (Jean Dalibard).

28 avril-3 mai : « Emergence of coherence in a uniform two-dimensional Bose gas », conférence internationale associée au projet ERC UQUAM, Venise, Italie (Lauriane Chomaz).

28-31 mai : « Emergence of coherence in a uniform two-dimensional Bose gas », conférence internationale *Quantum gases and Quantum Coherence*, Levico Terme, Italie (Lauriane Chomaz).

6 juin 2014 : « Une expérience peut-elle être élégante ? », conférence donnée à *La nuit des Sciences de l'ENS*, Paris (Jean Dalibard).

24-27 juin 2014 : « Spin-orbit coupling in an ultracold gas of Dysprosium : prospects towards topological superfluidity », conférence internationale *Quantum disordered systems : what's next ?* Toulouse (Sylvain Nascimbène).

1^{er}-4 juillet 2014 : « Bose-Einstein condensates and antiferromagnetic interactions : An illustration of symmetry breaking », *46th Conference of the European Group on Atomic Systems* (EGAS), Lille (Jean Dalibard).

7-15 juillet 2014 : « Introduction to the physics of artificial gauge fields », série de cours donnée à l'école de Physique « Enrico Fermi », *Quantum Matter at Ultralow Temperatures*, Varenna, Italie (Jean Dalibard).

7-10 juillet 2014 : « Spin-orbit coupling in an ultracold gas of Dysprosium », conférence *PAMO*, Reims (Sylvain Nascimbène).

28 juillet-1^{er} août 2014 : « Introduction to the physics of artificial gauge fields », série de cours donnée à l'école d'été ICAP, Williamsburg, Virginie, États-Unis (Jean Dalibard).

3-8 août 2014 : « The uniform 2D Bose gas, in and out of equilibrium », *International Conference on Atomic Physics*, Washington, DC, États-Unis (Jean Dalibard).

Direction de thèses

Lingxuan Shao (04/07/2014, directeurs : Jean Dalibard et Fabrice Gerbier) : « Theoretical and experimental study of spin-1 antiferromagnetic Bose-Einstein Condensates ».

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

Au cours de cette année, notre équipe a déménagé depuis les locaux qu'elle occupait au département de physique de l'École normale supérieure vers le bâtiment entièrement rénové de l'Institut de physique du Collège de France. Ce déménagement s'est opéré en deux temps, en avril pour la majorité des expériences, puis en juillet pour le montage restant. Toute notre activité de recherche est désormais regroupée sur le site Marcelin Berthelot, dans des laboratoires de grande qualité technique et bien adaptés à la recherche expérimentale en physique et en optique. Au 1^{er} juillet 2014, les différentes équipes contribuant à l'activité de recherche de la chaire étaient composées de quatre chercheurs permanents, un chercheur visiteur, cinq chercheurs post-doctorants, huit étudiants en thèse (dont une ATER Collège de France) et cinq 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, placé sous la responsabilité de Fabrice Gerbier (CR CNRS) et de Jean Dalibard, porte sur l'étude expérimentale du magnétisme d'un condensat de Bose-Einstein à plusieurs composantes, dit « condensat spinoriel ». Dans notre expérience, nous travaillons avec des atomes de sodium, de moment cinétique de spin égal à 1 dans leur état fondamental. Les interactions d'échange entre atomes à basse température sont de type antiferromagnétiques : il est donc favorable de minimiser la magnétisation de l'échantillon pour minimiser l'énergie d'interaction. Selon la théorie de champ moyen « standard », cela conduit à un état fondamental (en champ magnétique nul) dépolarisé, caractérisé par une magnétisation nulle et un moment quadrupolaire de spin non nul qui joue le rôle de paramètre d'ordre. Comme ce paramètre d'ordre a les mêmes symétries que celui décrivant l'orientation des molécules dans un cristal liquide nématique, le terme de phase « nématique de spin » est souvent utilisé dans la littérature pour désigner ce type de système.

Nous avons mis en évidence de manière directe l'existence d'un tel ordre dans les condensats spinoriels antiferromagnétiques. Pour cela, nous pilotons des oscillations de Rabi cohérentes entre les différents états de spin avec un champ oscillant extérieur. L'évolution dans le temps de la magnétisation permet de caractériser l'état de spin du condensat et de démontrer sans ambiguïté son caractère nématique. Par ailleurs, 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 associées au spin 1 de nos atomes. Ces fluctuations signalent la présence d'un condensat fragmenté : au lieu d'avoir un seul état macroscopiquement occupé, le système formé par ces gaz spinoriels possède des populations comparables pour plusieurs états. Nous avons affiné l'étude théorique de ce phénomène en prenant en compte la conservation du moment cinétique du condensat et la présence d'atomes non condensés. Ces améliorations de la modélisation de nos échantillons nous ont permis d'atteindre une compréhension complète de nos données expérimentales.

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. Il fait l'objet de la thèse de Lauriane Chomaz, ATER au Collège de France pour l'année 2013-14. Ce programme de recherche s'est concentré cette année sur de nouveaux types de piège, présentant un fond « plat » et permettant donc de réaliser des gaz de densité uniforme. Le fluide ainsi obtenu est proche des systèmes modèles considérés dans la plupart des approches théoriques, alors que les confinements réalisés jusqu'ici au laboratoire étaient obtenus par l'intermédiaire de potentiels harmoniques, conduisant à des fluides non homogènes. Le piège est réalisé en pratique en projetant l'image d'un masque sur un gaz d'atomes de rubidium ; en changeant la forme du masque, nous avons pu réaliser des gaz de géométrie variée : disque, carré, anneau.

Nous avons mis à profit ces pièges à fond plat pour étudier l'apparition de la cohérence quantique lorsque l'on refroidit le gaz depuis le régime classique. Nous avons détecté cette cohérence de deux manières. D'une part, nous avons mesuré la distribution en impulsion des atomes du gaz, d'autre part nous avons réalisé des expériences d'interférences entre ondes de matière issues de différentes régions du piège. Nous nous sommes intéressés en particulier au mécanisme de Kibble-Zurek, qui décrit comment la cohérence d'un fluide quantique est modifiée quand l'abaissement de température est rapide. Kibble et Zurek ont prédit que cette trempe du fluide quantique doit s'accompagner de la formation de défauts topologiques. Pour notre géométrie en anneau, ces défauts correspondent à la création spontanée de courants superfluides, que nous avons pu observer et caractériser.

Champs magnétiques artificiels et réseaux optiques

Cette recherche expérimentale, dirigée par Fabrice Gerbier et Jérôme Beugnon, est menée sur des atomes d'ytterbium. Son objectif est de réaliser l'analogue d'un gaz bidimensionnel d'électrons dans un fort champ magnétique, situation donnant lieu à l'effet Hall quantique. Partant d'un condensat de Bose-Einstein dans un réseau optique à deux dimensions, nous souhaitons synthétiser l'équivalent du potentiel vecteur de l'électromagnétisme pour notre gaz d'atomes neutres. Ce potentiel de jauge artificiel doit résulter 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.

Sur le plan pratique, la difficulté principale porte sur le contrôle du faisceau laser qui réalisera ce couplage cohérent ; sa fréquence et sa phase doivent en effet être contrôlées avec une précision comparable à celle des horloges optiques des instituts de métrologie, le facteur de qualité nécessaire de l'oscillateur laser étant *a minima* de l'ordre de $\sim 10^{13}$. Cette stabilité est obtenue par plusieurs asservissements, permettant de relier la fréquence du laser à une cavité optique ultrastable et de corriger divers effets néfastes. Nous avons récemment obtenu une largeur de raie de l'ordre de 30 Hz et une stabilité de la fréquence du laser de 3 kHz sur une journée, valeurs proches de celles requises pour l'expérience.

Couplage spin-orbite dans les gaz d'atomes fermioniques

Ce projet, placé sous la responsabilité de Sylvain Nascimbène et de Jean Dalibard, porte sur l'étude expérimentale des gaz atomiques en présence d'un couplage spin-orbite. Nous menons notre étude sur des atomes de dysprosium. Cette espèce atomique, de la famille des lanthanides, présente une structure électronique favorable pour la réalisation d'un couplage spin-orbite au moyen de faisceaux laser. Nous comptons à terme étudier le comportement physique des gaz composés de l'isotope fermionique de cet atome en présence d'un couplage spin-orbite. Nous espérons former ainsi une phase non conventionnelle de la matière, de type « superfluide topologique ».

Nous avons procédé cette année à la construction du dispositif expérimental et nous sommes parvenus à piéger et refroidir un gaz de dysprosium dans un piège magnéto-optique. Nous avons également préparé les étapes suivantes du refroidissement du gaz atomique dans une pince optique. Grâce à une étude théorique de l'interaction atome-laser pour le dysprosium, nous avons déterminé la configuration laser optimale pour obtenir le couplage spin-orbite recherché et nous procédons actuellement à la construction de ce système laser.

Études théoriques complémentaires

En collaboration avec Nathan Goldman (visiteur scientifique dans l'équipe), nous avons développé une approche théorique originale pour décrire le comportement de systèmes physiques soumis à un champ de force en oscillation rapide. Nous avons montré comment obtenir un hamiltonien effectif indépendant du temps à partir d'un développement en perturbations et nous avons appliqué cette méthode à plusieurs situations physiques permettant de générer des hamiltoniens de type couplage magnétique ou couplage spin-orbite. Cette méthode a été appliquée avec succès pour rendre compte des résultats expérimentaux obtenus dans l'équipe d'Immanuel Bloch à Munich.

