

FATOMES FROIDS ET PHYSIQUE DU SOLIDE

Frédéric Chevy, Xavier Leyronas, Laurent Sanchez-Palencia

Introduction

Des semi-conducteurs, qui forment le cœur des dispositifs électroniques modernes à la découverte de la magnétorésistance géante qui a permis des progrès importants dans le stockage de l'information et qui a valu à A. Fert le prix Nobel en 2007, l'explosion des technologies de l'information n'aurait pas été possible sans la découverte permanente de nouveaux matériaux et la compréhension fine de leurs propriétés électroniques.

Comme nous allons le voir, les propriétés macroscopiques de la matière, comme la conductivité électrique, ne peuvent être comprises que grâce à la mécanique quantique qui régit le comportement des électrons et des atomes à l'échelle microscopique. Durant le XXème, les chercheurs sont parvenus à isoler un certain nombre de paradigmes permettant de comprendre une grande variété de phénomènes physiques (Pourquoi y-a-t-il des conducteurs, des isolants et des semi-conducteurs ? Pourquoi certains matériaux perdent-ils leur résistance électrique à basse température et deviennent-ils supraconducteurs ?...). Cependant, dans le cas de matériaux où les interactions entre électrons sont trop importantes, les méthodes théoriques actuelles ne sont pas encore assez puissantes pour fournir une compréhension complète de ces systèmes.

Une des difficultés provient de la complexité des systèmes réels dont la description quantitative nécessite de considérer un grand nombre d'effets différents. Un solide est en effet constitué d'ions et d'électrons. Dans un solide cristallin, les ions sont arrangés selon un réseau périodique présentant des défauts : des lacunes, des impuretés atomiques d'une autre espèce chimique, l'agitation thermique qui fait vibrer le réseau. Par ailleurs, les électrons interagissent entre eux et avec les ions etc. Afin de simplifier le problème, il est utile d'isoler chaque effet de façon à l'étudier d'abord indépendamment des autres. Une fois ces phénomènes élémentaires bien compris, on pourrait les combiner pour mieux comprendre les propriétés du système complet. Dans les solides réels, la première étape est difficile voire impossible à réaliser car les paramètres physiques des matériaux ne peuvent pas être modifiés sur de grandes gammes.

Depuis une dizaine d'années, il est cependant possible d'utiliser les techniques de manipulation d'atomes par laser développées dans les années 80. Celles-ci permettent de réaliser des matériaux artificiels, dans lesquels pratiquement tous les paramètres physiques peuvent être modifiés. Dans ces matériaux de synthèse, le rôle des électrons est joué par des atomes refroidis à des températures extrêmement basses (une centaine de nanoKelvin, soit une centaine de milliardièmes de degré au dessus du zéro absolu). Il est possible de contrôler les différents paramètres caractérisant les propriétés d'un gaz d'atomes froids, et en particulier « d'allumer ou éteindre » certains effets, comme le réseau cristallin, le désordre ou bien les interactions (et même de modifier leur caractère attractif ou répulsif).

Structure de bande des solides et oscillations de Bloch

Les états de Bloch

Comme nous l'avons déjà mentionné, dans les matériaux réels les électrons se déplacent dans un réseau cristallin périodique résultant de l'interaction électrostatique avec les ions. On sait depuis les travaux de F. Bloch dans les années 1930 que le caractère isolant ou conducteur d'un solide est en grande partie conditionné par la structure des états quantiques électroniques dans ce potentiel périodique, ce que l'on appelle les états de Bloch (voir encadré 1). Dans les gaz d'atomes froids, ce cristal peut être simulé en utilisant l'interaction atome-lumière grâce à des « réseaux optiques ». Ces réseaux sont obtenus en superposant plusieurs faisceaux lasers créant par interférence une modulation spatiale de l'intensité lumineuse. En choisissant le nombre et la direction des différents faisceaux, il est possible de réaliser une grande variété de motifs cristallins. Le plus simple est le cristal cubique, réalisé en superposant trois paires de faisceaux lasers se propageant selon les trois directions de l'espace. Plus récemment, il a été possible de synthétiser le réseau en nid d'abeille caractéristique du graphène, un composé plan du carbone dont la découverte en 2004 a valu à ses découvreurs, Andre Geim et Konstantin Novoselov, le prix Nobel de physique en 2011. Dans les atomes froids, ce type de réseau peut être réalisé grâce à l'interférence de trois faisceaux se propageant dans un même plan à 120° les uns des autres.

Oscillations de Bloch

Les atomes froids dans les réseaux optiques ont été étudiés dès le début des années 1990. Des expériences pionnières réalisées à l'Ecole Normale Supérieure à Paris ont en particulier mis en évidence un effet quantique surprenant nommé oscillations de Bloch. Dans un cristal parfaitement périodique, on montre en effet que, du fait de la structure en bande des niveaux d'énergie, une particule soumise à une force constante subit un mouvement oscillatoire. En effet, considérons pour simplifier un cristal dans lequel on ne place qu'une seule particule que l'on prépare alors dans l'état de plus basse énergie de la bande de Bloch la plus basse. Si à présent on lui impose une force constante, elle va accélérer et gravir progressivement les niveaux de la bande, jusqu'à ce qu'elle atteigne le haut de celle-ci. Si la force est suffisamment faible, celle-ci ne permettra pas de franchir la bande interdite et l'on montre alors que la particule va « rebondir » sur le haut de la bande. Autrement dit la particule va rebrousser chemin et se diriger de nouveau vers le bas de la bande en perdant de l'énergie. Une fois arrivée à son point de départ au bas de la bande, elle va suivre un nouveau cycle d'oscillation entre les bords de la bande de Bloch. Si F est la force exercée sur la particule, a la période spatiale du réseau et h la constante de Planck, alors on montre que la période des oscillations de Bloch vaut $T=h/Fa$.

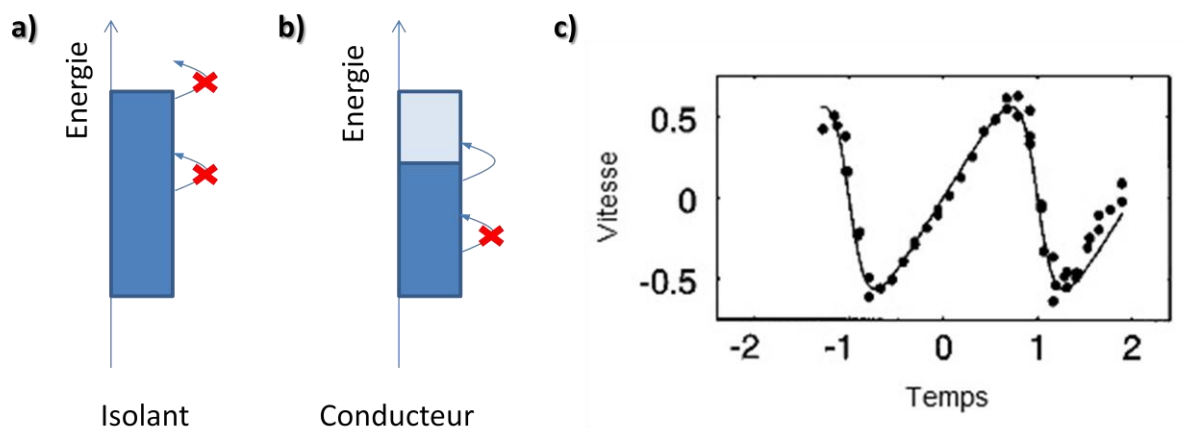


Figure 1 : a) Lorsqu'une bande de Bloch est complètement remplie, les électrons ne peuvent pas être accélérés par un champ électrique. Il n'y a pas d'état disponible pour ceux en haut de bande, puisqu'un gain d'énergie exigerait de pénétrer dans la bande interdite, ce qui est interdit ! Quant à ceux initialement au cœur de la bande, ils ne peuvent pas non plus accélérer car les états d'énergie supérieure sont déjà remplis et donc inaccessibles à de nouveaux électrons du fait du principe de Pauli. b) Si la bande n'est pas complètement remplie, les électrons au voisinage du dernier état occupé peuvent être accélérés et participent donc à la conduction. c) Oscillations de Bloch dans un réseau optique. Dans un cristal parfait, lorsque les particules atteignent le haut de la bande de Bloch, elle « rebondissent » et se mettent à perdre de l'énergie. Ces oscillations de Bloch ont été observées directement sur des gaz d'atomes froids (ici des atomes de césium) dans un réseau optique créé par des faisceaux lasers. Dans cette expérience, on mesure la vitesse des atomes en fonction du temps (tous les deux en unités arbitraires). On constate que la vitesse augmente linéairement, puis s'inverse brusquement lorsque les atomes « rebondissent » sur l'extrémité de la bande de Bloch (Figure courtoisie de Christophe Salomon).

Ce résultat surprenant semble contredire le comportement des électrons dans un conducteur ohmique. En effet, lorsque l'on impose une tension constante à un conducteur la loi d'Ohm prédit un courant constant. Celui-ci associé à une vitesse constante des électrons, et non pas oscillante comme attendu pour les oscillations de Bloch. Le paradoxe peut être levé en notant que dans un cristal réel, la périodicité n'est pas parfaite et lorsqu'un électron croise un défaut du cristal ou un autre électron il rebondit dessus, ce qui interrompt les oscillations de Bloch. Dans un cristal typique, le temps moyen séparant deux collisions est très court, bien plus petit que la période des oscillations de Bloch. Un électron ne peut pas atteindre un bord de bande entre deux collisions avec les défauts, ce qui explique l'absence d'oscillations de Bloch dans les conducteurs ohmiques. Pour des atomes froids dans un réseau optique, en revanche, la périodicité de la figure d'interférence est pratiquement parfaite et la densité est très faible, ce qui limite les collisions entre atomes, permettant ainsi d'observer des oscillations de Bloch sur de longues périodes. On peut exciter les oscillations de Bloch de plusieurs façons différentes. La plus simple est de réaliser un réseau vertical, et d'utiliser comme force de traction la pesanteur $F=mg$, où g est l'accélération de la pesanteur. En mesurant la période des oscillations de Bloch on réalise ainsi un gravimètre de haute précision, T , on peut ainsi réaliser un gravimètre de haute précision, en utilisant la formule $g=h/mTa$ puisque a et h sont très bien connus.

Localisation d'Anderson

Localisation des ondes de matière par le désordre

Comme on l'a vu, les matériaux réels sont le siège d'imperfections. On pourrait penser que, lorsque ces dislocations sont rares, elles ne provoquent que de faibles modifications de la propagation des électrons. On sait en fait depuis la fin des années 1950 qu'il n'en est rien et que même de faibles

imperfections peuvent conduire à une physique radicalement différente. Philip W. Anderson a ainsi montré que des impuretés placées aléatoirement dans un réseau cristallin peuvent conduire à l'absence totale de diffusion des électrons, formant des fonctions d'onde décroissant exponentiellement dans l'espace. Alors que ce travail attire peu d'attention pendant une dizaine d'années, la « localisation d'Anderson » commence à intriguer les physiciens à partir des années 1970, conduisant à une véritable explosion du domaine. On sait maintenant que la localisation d'Anderson résulte de subtils effets d'interférence au niveau des chemins de diffusion en boucle suivis par une particule parmi les impuretés du milieu (voir encadré 2). L'image physique qui en résulte permet de comprendre trois caractéristiques fondamentales de la localisation d'Anderson. Premièrement, il est crucial que la cohérence de l'onde soit préservée le long des boucles, de sorte que l'effet d'interférence sera d'autant plus fort que le rapport du libre parcours moyen classique l^* (la taille des boucles) et de la longueur d'onde (λ) sera petit. Deuxièmement, la localisation d'Anderson dépend très fortement de la dimension spatiale, d , parce que la probabilité de retour à l'origine dans une diffusion classique en dépend fortement. En effet, quand on se déplace aléatoirement le long d'une ligne (en une dimension), il est inévitable de revenir à son point d'origine. C'est plus difficile en deux dimensions, et pas certain en dimension trois (ou supérieure). La théorie dite d'échelle de la localisation montre que, pour $d \leq 2$, les électrons sont localisés quelle que soit leur énergie, même pour des amplitudes de désordre arbitrairement faibles. En $d > 2$ en revanche, apparaît une transition de phase séparant un régime où les états sont localisés d'un régime où les états sont diffusifs. Ces deux régimes sont séparés par une transition de phase, dite d'Anderson, qui apparaît lorsque le libre parcours moyen devient de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de Broglie, $l^* \sim \lambda$. Troisièmement, la localisation d'Anderson est un phénomène très général, subit par tout type d'onde se propageant dans un milieu aléatoire.

Observation de la localisation d'Anderson avec des atomes froids

L'étude expérimentale de la localisation d'Anderson dans les solides s'est rapidement heurtée à la difficulté de contrôler le milieu désordonné, ainsi que l'effet des interactions et de la dissipation dans ces systèmes. A partir de 2005, plusieurs groupes dans le monde, notamment au LENS (Florence, Italie) et à l'Institut d'Optique (Palaiseau, France) lancent un programme de recherche visant à étudier la localisation d'Anderson avec des atomes ultrafroids, d'abord en une dimension. L'idée est simple : créer un gaz d'atomes froids dans un piège magnétique ou optique, relâcher le piège pour laisser le gaz s'étendre dans un guide lumineux unidimensionnel en présence d'un potentiel désordonné, et faire une image directe du profil de densité du condensat (voir). En principe, on s'attend à ce que l'expansion s'arrête et que le condensat acquiert un profil exponentiel. Créer un condensat piégé d'atomes de rubidium 87 est une technique bien maîtrisée et relâcher le piège consiste à couper le courant, ce qui peut être fait instantanément. Le guide unidimensionnel consiste quant à lui en un faisceau laser qui attire les atomes vers son centre, mais les laissant libres dans la direction du faisceau. Pour créer le désordre, les chercheurs utilisent une méthode optique très bien maîtrisée : on fait passer un faisceau laser à travers un verre dépoli qui modifie aléatoirement la transmission des différents rayons optiques et on en fait l'image dans le plan focal d'une lentille. L'intensité lumineuse est un champ de tavelures (*speckle*) spatialement aléatoire. L'intérêt majeur de cette technique simple est que les propriétés du désordre sont parfaitement connues par application directe des lois de l'optique physique.

Reste à faire l'expérience. Malheureusement, les premiers résultats de 2005 sont décevants. L'expansion s'arrête bien, mais le profil n'est pas exponentiel et l'analyse théorique montre que la localisation est classique (les particules butent sur des barrières de potentiel, comme une balle de tennis sur un mur). Que faire ? Un problème majeur est que bien que les propriétés du *speckle* soient très bien connues, ce n'est pas le cas des propriétés de localisation dans ce type de désordre. Une équipe théorique à l'Institut d'Optique attaque le problème et montre qu'il faut travailler avec des amplitudes de désordre beaucoup plus faibles. Plus important, elle obtient un résultat inattendu : Bien que tous les états soient localisés dans un *speckle* unidimensionnel, la longueur de localisation présente un saut très important à une énergie donnée, et devient inobservable. Dans le schéma expérimental décrit ci-dessus, il en résulte que la localisation peut être exponentielle ou algébrique, selon les paramètres utilisés ! Fort de ces prédictions, les expériences sont reprises dans des régimes de paramètres adéquats. Cette fois, lorsque l'expansion du condensat s'arrête, on observe un profil qui décroît continûment avec la distance (). Il s'agit de la première observation directe de la localisation d'Anderson d'une onde de matière.

Le défi suivant était l'étude de la localisation d'Anderson en dimension trois, beaucoup plus difficile. En particulier, la théorie est beaucoup moins complète dans ce cas et si l'on sait qu'il existe une transition entre un régime localisé et un régime diffusif, on en connaît que très imparfaitement les propriétés. Deux groupes à Urbana Champaign (Illinois, USA) et à l'Institut d'Optique relèvent le défi en 2011. Le principe de l'expérience est le même qu'en une dimension à cela près qu'il n'y a plus de guide optique et qu'il faut compenser la gravité pour éviter la chute des atomes. Ceci est réalisé grâce à un dispositif de lévitation qui utilise une force magnétique agissant sur le moment magnétique interne des atomes. Au contraire du cas unidimensionnel, les observations expérimentales montrent un profil en double structure : une partie du gaz s'étend sans limite selon un processus diffusif, alors qu'une autre partie reste figée (). C'est la signature de la transition d'Anderson en trois dimensions, séparant un régime diffusif et un régime localisé. Les résultats expérimentaux permettent de mesurer les coefficients de diffusion de la partie localisée, ainsi que la fraction localisée, et montrent un bon accord avec les calculs théoriques.

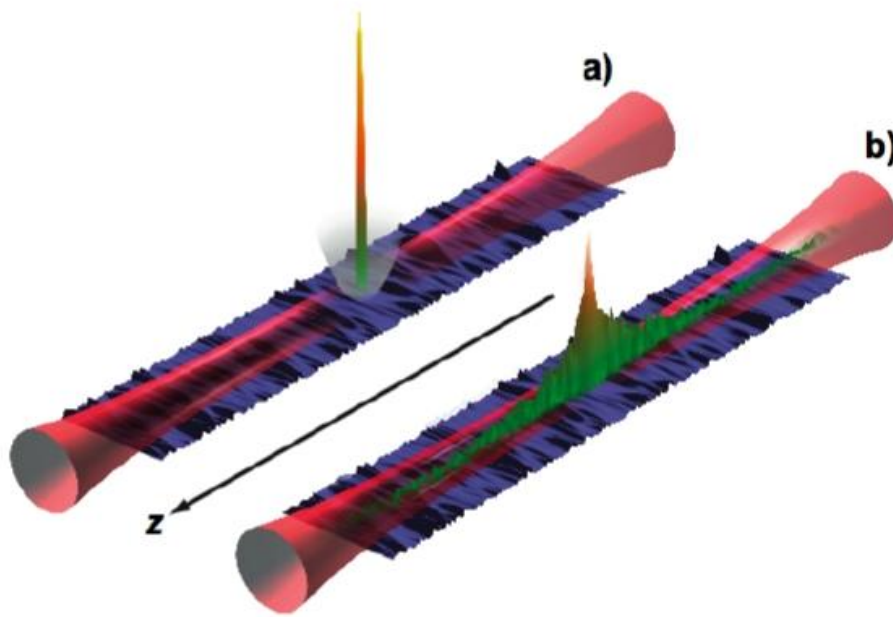


Figure 2 Principe de l'expérience de localisation 1D. (a) Un condensat de Bose-Einstein (vert-orange) est préparé dans un piège harmonique (gris) croisé avec un guide d'onde (rouge) en présence d'un potentiel aléatoire (bleu). Le piège est alors relâché, le condensat s'étend puis s'arrête dans le désordre par localisation d'Anderson.

[de Billy et al., Nature 453, 891 (2008)]

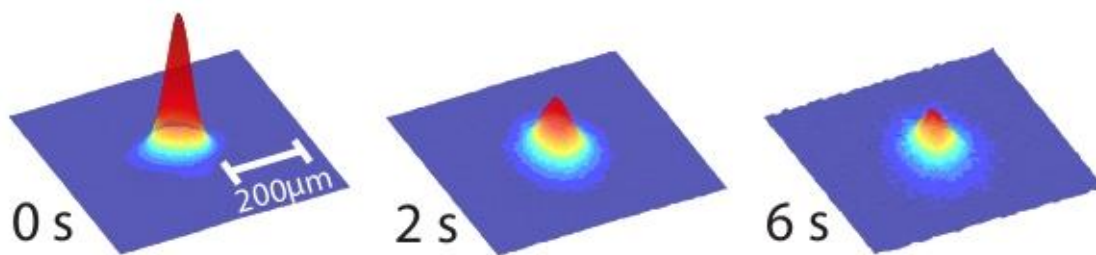


Figure 3: Localisation 3D. Un condensat, créé initialement dans un piégé et suspendu par un dispositif de lévitation qui compense la gravité, s'étend en trois dimensions. Le profil de densité (représenté en 2D) montre après 6s une double structure : un fond s'étend de façon diffusive, alors qu'un pic central localisé subsiste.

[de Jendrzejewski et al., Nat. Phys. 8, 398 (2012)]

Particules en interactions : Transition de Mott et superfluidité

Transition de Mott

Bien que dans la plupart des matériaux, les interactions entre électrons ne modifient pas qualitativement l'image physique décrite plus haut, ceci n'est pas toujours le cas. Si l'on considère un réseau cristallin dans lequel chaque puits est occupé par un atome, un électron devant passer d'un site à son voisin par effet tunnel doit aussi vaincre la répulsion électrostatique due à la présence de l'électron occupant le site adjacent. Sir Neville Mott a montré que la compétition entre effet tunnel et répulsion électrostatique donnait lieu à une transition de phase entre une phase conductrice lorsque l'effet tunnel l'emporte et une phase isolante dans le cas contraire (Figure 4). Dans un solide réel, explorer la transition de Mott n'est pas chose aisée, car on ne peut pas faire varier les paramètres physiques du cristal sur une grande gamme, et il faut donc trouver un composé naturellement proche du seuil de transition. Dans les atomes froids, ceci est au contraire très simple à réaliser : en contrôlant la puissance des faisceaux lasers, on peut modifier à volonté la hauteur de la barrière de potentiel séparant deux sites voisins du réseau, et ainsi augmenter ou diminuer l'intensité de l'effet tunnel. Une expérience de ce type a été réalisée en 2000 dans des gaz de bosons en Allemagne, puis plus récemment sur des fermions dans deux groupes, à Munich et à Zurich. Il est possible de « voir » la transition de Mott de plusieurs manières, mais récemment, les progrès dans la résolution des systèmes d'imagerie ont permis d'observer les atomes un à un dans les sites du réseau. En utilisant un objectif à très haute résolution, des physiciens à l'université de Harvard aux Etats Unis et Munich en Allemagne ont été capables de révéler la structure microscopique de l'isolant de Mott en imageant les atomes un à un et en montrant ainsi directement la répartition régulière des atomes dans la phase isolante.

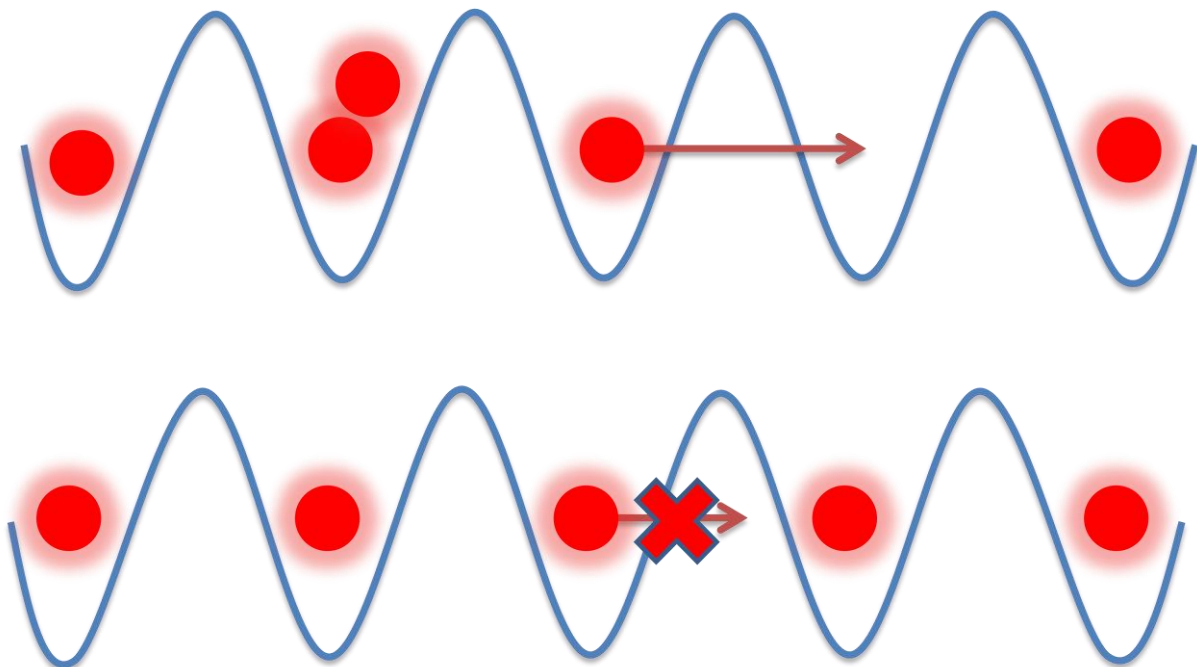


Figure 4 : En haut : dans un cristal périodique, des particules quantiques sans interactions mutuelles peuvent occuper en nombre arbitraire un puits de potentiel et peuvent évoluer par effet tunnel d'un site à l'autre. En bas : si les interactions entre particules sont fortement répulsives, l'effet tunnel est inhibé par la répulsion. On obtient alors un isolant de Mott dans lequel chaque puits est occupé par une seule particule.

Atomes froids, superconductivité et superfluidité

Nous terminons notre panorama par l'étude de la supraconductivité dans les métaux qui est un des effets les plus spectaculaires dus aux interactions entre électrons. En 2011, on a fêté le 100^{ème} anniversaire de la découverte de ce phénomène par Kamerlingh Onnes à Leyden qui observa pour la première fois la disparition abrupte de la résistance électrique d'un métal en deçà d'une température critique de l'ordre de quelques degrés au dessus du zéro absolu. Il a fallu près de 40 ans aux physiciens pour élucider le mystère de l'origine de la supraconductivité finalement percé par Bardeen, Cooper et Schrieffer qui ont obtenu le prix Nobel 1972 pour leur travail (Encadré 3).

La théorie BCS n'est valable que lorsque l'attraction entre électrons est faible et la taille des paires de Cooper est plus grande que la distance moyenne entre les électrons. Les paires de Cooper sont alors très enchevêtrées et, en toute rigueur, on ne peut donc pas à proprement parler de condensation de Bose-Einstein pour celle-ci, car la théorie originale d'Einstein ne s'applique qu'à un gaz très dilué de particules évoluant à grande distance les unes des autres. Au début des années 80, Anthony Leggett (qui a obtenu le prix Nobel en 2003 pour ses travaux sur l'Hélium 3 dont la viscosité disparaît à basse température selon un mécanisme similaire au scénario BCS) publia un article théorique généralisant le scénario BCS aux cas où l'interaction est fortement attractive, qu'il suggéra de tester sur des vapeurs atomiques. En effet dans la limite de forte attraction, la taille des paires de Cooper devient petite devant la distance inter-atomique et elles peuvent être considérées comme des molécules quasi-ponctuelles. Dans ce cas, la distance entre molécules devient suffisamment grande par rapport à leur taille pour pouvoir les décrire avec la théorie d'Einstein du gaz de bosons dilué.

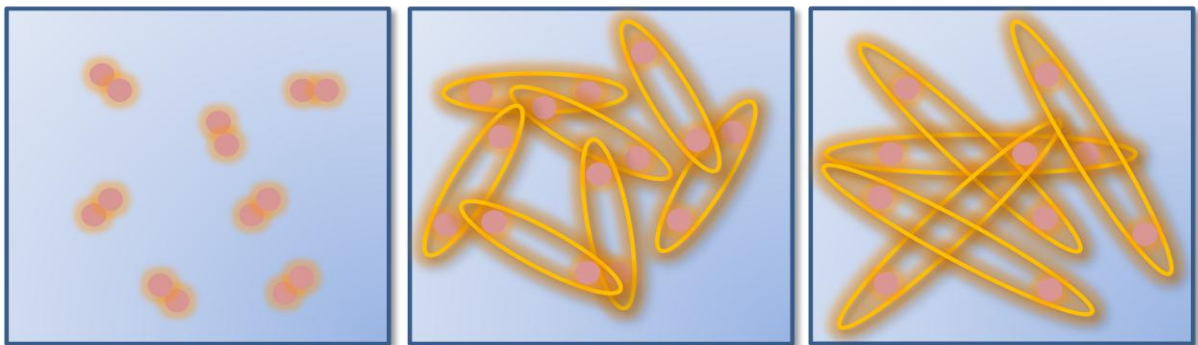


Figure 5 : Illustration de la théorie BCS-BEC. A gauche, dans le régime d'interactions fortement attractives, les molécules fortement liées peuvent être décrites par la théorie de la condensation de Bose-Einstein du gaz dilué. Plus on réduit la force des interactions, plus la taille des paires augmente, aboutissant alors à un enchevêtrement de celles-ci. Dans le régime BCS d'attraction faible (à droite), la taille des paires, appelées alors paires de Cooper devient très grande devant la distance entre particules.

Ce travail original d'A. Leggett est depuis appelé transition BCS-CBE, car il relie continument le superfluide BCS à la condensation de Bose-Einstein (CBE) de molécules (voir Figure 5). Ce modèle a motivé beaucoup de travaux théoriques, en particulier dans la communauté qui étudie les supraconducteurs. En 1986, J.G. Bednorz et K.A. Muller dans les laboratoires d'IBM à Zürich ont découvert une nouvelle classe de matériaux devenant supraconducteurs à des températures significativement plus hautes que celles observées précédemment. Cette découverte souleva une vague d'enthousiasme dans la communauté de la matière condensée car elle ouvrait la voie à la possibilité de supraconducteurs fonctionnant à température ambiante ce qui constituerait une révolution technologique majeure. Plus de vingt ans de recherches actives n'ont cependant pas

permis de percer le mystère de la supraconductivité à haute température, mais certains indices suggèrent que ces supraconducteurs se situent dans un régime d'attraction forte similaire à celui étudié par A. Leggett. Afin de pouvoir la confirmer expérimentalement, il est nécessaire de pouvoir modifier à volonté la force des interactions attractives entre particules. Ceci n'a été réalisé avec succès qu'en 2003 quand plusieurs équipes (au MIT et à Boulder aux Etats Unis, à l'Université d'Innsbruck en Autriche et à l'ENS à Paris) réussirent à réaliser expérimentalement la transition prédite par Leggett, entre le superfluide moléculaire et l'état BCS en utilisant les atomes ultra-froids. Ceux-ci ont en effet la propriété, bien connue en physique atomique et moléculaire, de présenter des résonances de Feshbach (autour de 800 G pour le Lithium 6), qui permettent de modifier la force de l'attraction entre atomes à l'aide d'un champ magnétique appliqué. Des molécules, puis des superfluides moléculaires ont ainsi été réalisés en amenant le champ magnétique vers le régime d'interaction faible il est ainsi devenu possible d'explorer les différents régimes prédits par A. Leggett.

Il a notamment été possible de mesurer la température critique en dessous de laquelle le gaz devient superfluide. Comme attendu par le modèle BEC-BCS, la température est d'autant plus haute que la force d'attraction entre particules est importante. Dans les expériences, celle-ci est de l'ordre de 100 nK (cent milliardième de degrés au dessus du zéro absolu). Cette température est très faible, car on ne travaille pas avec des électrons dans un solide, mais avec un gaz raréfié d'atomes et l'on peut montrer que la température critique est d'autant plus basse que la densité est faible et la masse des particules est élevée. Si l'on était capable d'atteindre la même force d'attraction avec des électrons, on aurait alors une température critique de l'ordre de 10 000 degrés Celsius, soit la température à la surface du Soleil !

A l'aide de faisceaux lasers, les chercheurs ont testé expérimentalement la superfluidité du gaz de fermions ultrafroids en faisant tourner le nuage atomique (Figure 6). Contrairement à un fluide classique qui se serait mis en rotation « en bloc » et aurait été expulsé vers l'extérieur du piège par la force centrifuge, il apparaît alors des tourbillons dont l'origine est purement quantique, qui s'arrangent en un réseau triangulaire. Ce phénomène est similaire au réseau d'Abrikosov dans les supraconducteurs de type II et est le signe indéniable d'une phase superfluide. Dans le cas des réseaux d'Abrikosov, ce réseau est créé par un champ magnétique extérieur qui pénètre le matériau le long de tube autour desquels les électrons tournent, comme les atomes autour des tourbillons apparaissant dans le gaz d'atomes froids.

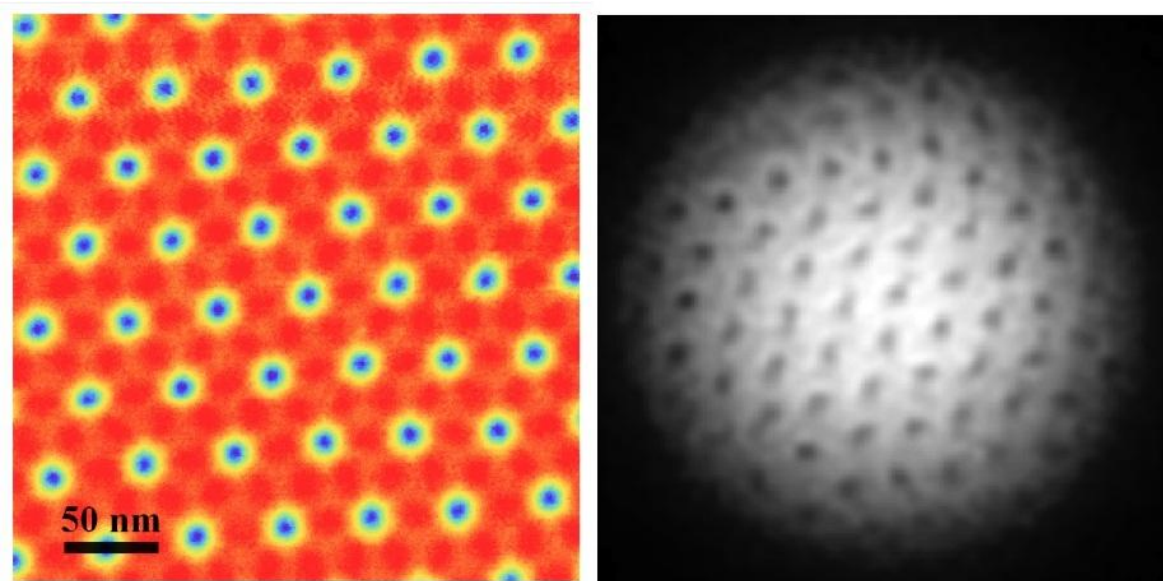


Figure 6 : Analogie entre la densité d'électrons d'un supraconducteurs (à droite) et un gaz d'atome froids (à gauche). Dans les deux cas, la mise en rotation des particules s'accompagne de l'apparition d'un réseau triangulaire, dit réseau d'Abrikosov (Photos courtoisie de D. Roditchev (INSP, à gauche) et M. Zwierlein (MIT, à droite))

Conclusion

Comme nous venons de le voir, les atomes ultrafroids se sont imposés comme un système modèle de particules en interaction forte et permettent de ce fait de mettre à l'épreuve dans des situations expérimentalement bien contrôlées les modèles développés par les théoriciens de la physique du solide. Cette convergence récente entre physique atomique et physique du solide a permis un enrichissement mutuel de ces deux domaines de recherche et nous permet d'affiner notre compréhension des mécanismes élémentaires à l'origine des propriétés électroniques des matériaux. À terme, ceci nous permettra d'améliorer leurs performances : Ainsi, si l'on était capable de reproduire avec des électrons la transition CBE-BCS décrite dans le présent article, il serait possible de réaliser des solides supraconducteurs fonctionnant à température ambiante. Une telle découverte aurait alors des conséquences technologiques et environnementales considérables puisqu'elle permettrait le transport de l'énergie électrique et son stockage sans aucune perte par effet Joule. Le domaine d'application de ces recherches s'étend par ailleurs à des domaines plus vastes, comme l'astrophysique. En effet, la transition CBE-BCS permet aussi de décrire la couche extérieure des étoiles à neutrons, des astres extrêmement denses constitués uniquement de neutrons. Ces astres lointains aux propriétés extrêmes ne peuvent évidemment pas être reproduits en laboratoire, et les atomes froids permettent de les simuler sur Terre.

Pour en savoir plus :

Les atomes froids et la supraconductivité, F. Chevy et Y. Castin, Reflets de la Physique n°29, p. 4

Des atomes ultrafroids sous le microscope, T. Lahaye et S. Kuhr, Reflets de la Physique n°29, p. 9

Les vortex dans les supraconducteurs - Une matière molle au sein de la matière dure, K. van der Beek et F. Lévy-Bertrand, Reflets de la Physique n°28, p. 4

Les gaz de fermions ultrafroids, F. Chevy et C. Salomon, Images de la Physique 2005, p. 90.

La localisation forte d'Anderson, D. Delande, J.-C. Garreau, L. Sanchez-Palencia and B. van Tiggelen, Images de la Physique, 2009, page 70

Localisation d'Anderson d'atomes ultrafroids dans des potentiels optiques: Vers des simulateurs quantiques, A. Aspect, P. Bouyer, V. Josse et L. Sanchez-Palencia, Images de la Physique 2009, page 87

Fifty years of Anderson localization, A. Lagendijk, B. van Tiggelen et D.S. Wiersma, Physics Today **62**, 24 (2009)

Site web du groupe fermions ultrafroids du Laboratoire Kastler Brossel à l'Ecole Normale Supérieure

<http://www.lkb.ens.fr/-Ultracold-Fermi-gases->

- Résumé en anglais

A new field of research emerged in the past ten years at the frontier between atomic physics and solid state physics. Using laser light and magnetic fields to cool down and manipulate atoms, it is possible to engineer artificial materials where electrons are replaced by atoms and where all physical parameters can be controlled with high precision. Recent experiments on cold atoms have shed new light on conduction phenomena, from the influence of disorder in crystals, to the role of interactions between electrons.

- Mini CVs des auteurs

Frédéric Chevy est professeur à l'Ecole Normale Supérieure. Il travaille au Laboratoire Kastler Brossel où ses centres d'intérêts vont des expériences sur les fermions ultra-froids jusqu'à la dynamique des fluides classiques.

Xavier Leyronas est maître de conférences à l'Université Pierre et Marie Curie. Il effectue ses recherches au Laboratoire de Physique Statistique de l'Ecole Normale Supérieure dans le domaine de la théorie de la matière condensée.

Laurent Sanchez-Palencia est chercheur au Centre National de la Recherche Scientifique et Professeur Chargé de Cours à l'Ecole Polytechnique. Il est responsable d'une équipe de Théorie de la Matière Quantique à l'Institut d'Optique dont les travaux portent sur les gaz quantiques désordonnés.

Encadré 1 : Dans un cristal décrit par la mécanique classique, les électrons restent liés à leurs ions car ils ne peuvent franchir la barrière de potentiel électrostatique les séparant des ions voisins. En mécanique quantique, du fait de leur comportement ondulatoire les électrons peuvent au contraire franchir cette barrière par effet tunnel et ainsi parcourir de proche en proche tout le cristal. Cet effet aboutit dans un cristal parfaitement périodique à une délocalisation des électrons dans tout le matériau. Ces états quantiques délocalisés sont appelés des *états de Bloch* dont les propriétés permettent d'expliquer la conduction dans les solides. Plus précisément, dans un atome isolé, on sait que la mécanique quantique ne permet pas à l'énergie électrons de prendre une valeur arbitraire. Seules certaines valeurs sont permises et l'on parle alors de niveaux *discrets*. Ces niveaux sont remplis selon le Principe de Pauli qui autorisent la présence d'au plus deux électrons par état. Dans un cristal contenant un grand nombre d'atomes, les niveaux quantiques sont très rapprochés et se regroupent en bandes d'énergies pratiquement continues séparées par des bandes interdites (appelées *gap* en français, cf Figure 7). Tout comme pour la structure en couche des atomes, on remplit les niveaux de Bloch du moins énergétique au plus énergétique en suivant le principe de Pauli. Si la bande la plus haute est complètement remplie, le matériau sera un isolant. Si elle ne l'est que partiellement, il sera conducteur. En effet, pour faire passer du courant dans le solide, il faut pouvoir accélérer les électrons, c'est à dire faire augmenter progressivement leur énergie. Ceci est impossible pour les électrons dans le cœur d'une bande remplie car ils ne peuvent pas venir peupler un niveau d'énergie voisine, déjà occupé par deux électrons. C'est néanmoins possible pour les électrons en haut de la zone remplie de la bande la plus haute, à condition qu'il y ait juste au-dessus des états. Ainsi, lorsque la bande la plus haute est complètement remplie, aucun électron ne peut bouger et le matériau est isolant. En revanche, lorsqu'elle n'est que partiellement remplie, les électrons du haut peuvent bouger et le matériau est conducteur.

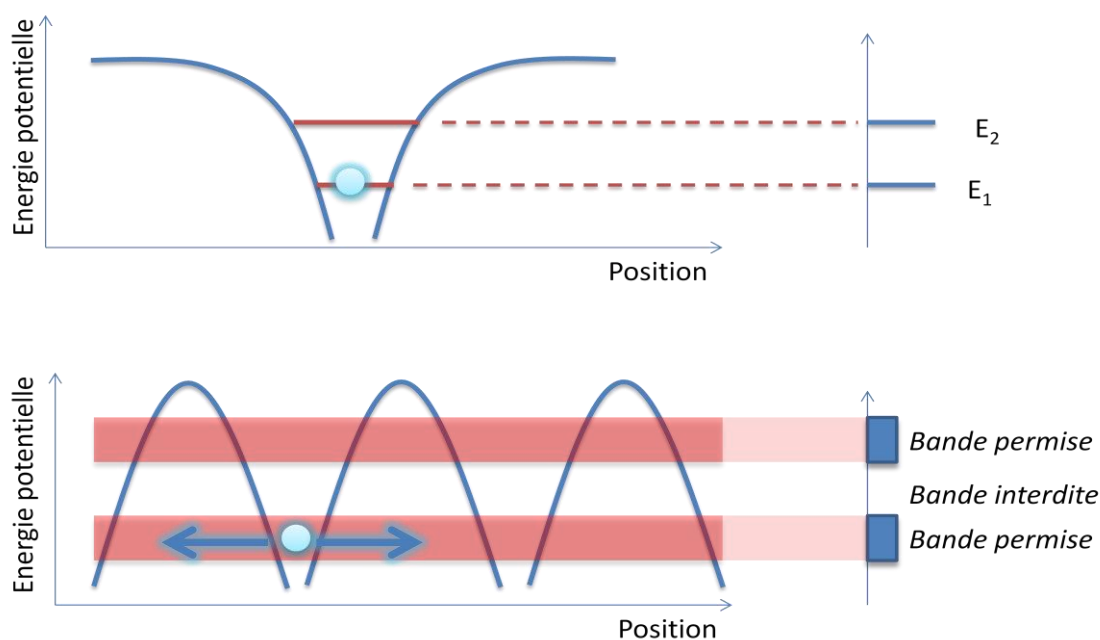
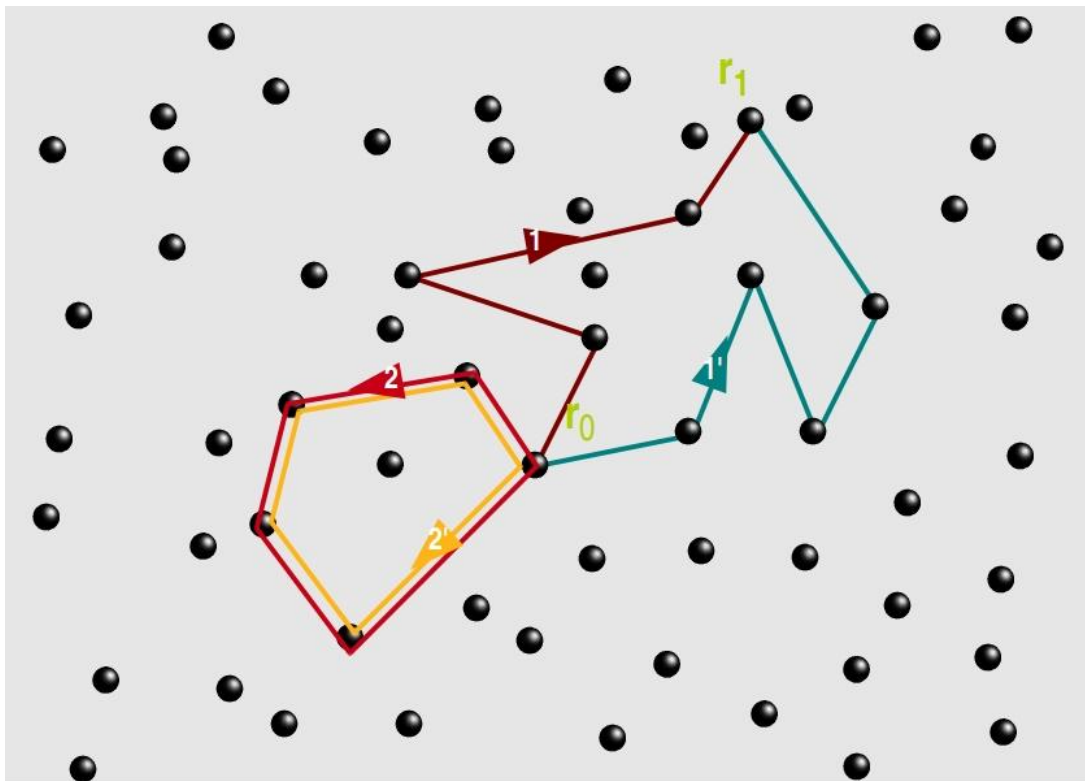


Figure 7 : En haut : état quantique pour un atome seul. L'électron est piégé par le puits de potentiel créé par l'attraction électrostatique du noyau (courbe bleue). En mécanique quantique, l'énergie de l'électron ne peut prendre que certaines valeurs (E_1 , E_2 ...) associées aux différentes orbitales. En bas : dans un cristal, le paysage d'énergie potentielle présente une série de puits répartis périodiquement. L'électron peut circuler d'un puits à l'autre par effet tunnel, ce qui aboutit à des états quantiques délocalisés le long du cristal. Les niveaux d'énergie permis se regroupent sous forme de bandes continues (appelées bandes de Bloch) séparés par des bandes interdites (*gap*).

Encadré 2 : Localisation d'Anderson

Considérons une onde électronique se propageant dans un milieu désordonné. Elle est diffractée par les impuretés, ce qui dans une vision classique conduit à la diffusion du nuage électronique. La taille du nuage augmente comme la racine carrée du temps [où D est le coefficient de diffusion]. On pourrait s'attendre a priori que les effets d'interférence des différents chemins de diffusion ne jouent aucun rôle. En effet, le long de deux chemins différents (notés 1 et 1' sur la figure) reliant un point r_0 à un point r_1 , la particule diffracte sur des impuretés différentes, accumulant des phases différentes et non corrélées. Les deux chemins deviennent alors incohérents. Pourtant, si la probabilité de retour à l'origine est non nulle, il existe des chemins en boucles fermées. A chaque boucle est associée deux chemins correspondants à des sens différents de propagation le long de la boucle (notés 2 et 2' sur la figure). La phase accumulée le long de ses deux chemins est alors exactement la même quelque soit l'arrangement des impuretés. Il en résulte que l'interférence est constructive au point de départ, ce qui amplifie la probabilité de retour à l'origine. On comprend ainsi que le coefficient de diffusion D est réduit par les effets d'interférence (localisation faible). Le résultat majeur d'Anderson est que le coefficient de diffusion D peut s'annuler complètement (localisation forte). C'est toujours le cas dans un système à une ou deux dimensions car la probabilité de retour à l'origine classique est grande. Ce n'est le cas que si le milieu est suffisamment diffusant, c'est à dire que le libre parcours moyen est suffisamment petit par rapport à la longueur d'onde de la particule, en dimension strictement supérieure à deux.



Encadré 3 : Un des obstacles à la compréhension de la supraconductivité était l'existence d'un phénomène similaire observé dans l'hélium liquide qui perd toute viscosité à basse température (on parle dans ce cas de superfluidité). La superfluidité avait été interprétée dans les années 30 par London qui avait postulé que ce phénomène était dû à la formation d'un nouvel état de la matière, le condensat de Bose-Einstein, dont l'existence avait été prévue par A. Einstein en 1927 suite aux travaux du physicien indien S. Bose et dans lequel tous les atomes s'accumulent dans le même état quantique. Le grand physicien russe L. Landau contestait cette interprétation. En effet, les atomes d'hélium 4 appartiennent à la famille des bosons, qui peuvent effectivement subir une condensation de Bose-Einstein, alors que les électrons appartiennent à une autre famille, celle des fermions, qui, comme l'électron, obéissent au Principe de Pauli, et ne peuvent donc tous s'accumuler dans le même état (comme on l'a vu plus haut, on peut mettre au plus deux électrons dans un même état). Selon Landau, si superfluidité et supraconductivité sont liées, elles ne peuvent pas dépendre du caractère bosonique ou fermionique des particules.

Dans le modèle BCS (nommé d'après Bardeen, Cooper et Schrieffer) on montre qu'un électron, en déformant légèrement le réseau cristallin sur son passage, crée un excès de charge positive, qui attire ainsi les autres électrons. Malgré la forte répulsion existant entre deux particules de même charge électrique, cette faible attraction suffit à deux électrons pour former une *paire de Cooper* qui s'apparente à une molécule de grande taille (en fait plus grande que la distance moyenne séparant deux électrons). Bardeen Cooper et Schrieffer ont ensuite montré que ces nouveaux objets possédaient des propriétés similaires à celles de bosons et pouvaient donc subir une sorte de condensation de Bose-Einstein.