

Les condensats de Bose-Einstein

**Jean Dalibard, Laboratoire Kastler Brossel, Ecole normale supérieure
Conférence à l'UTLS, le 22 juin 2005**

Notre description physique du monde microscopique, particules élémentaires, atomes, molécules, est entièrement fondée sur la mécanique quantique. Cette théorie, née au début du vingtième siècle, est un outil incontournable pour comprendre la stabilité des édifices atomiques ou les propriétés du rayonnement. Parallèlement, elle a joué un rôle clé dans le développement des hautes technologies, électronique, lasers, nanosciences, et son impact économique est considérable. En dépit de ses succès, la mécanique quantique reste néanmoins une discipline mystérieuse et sujette à de nombreux débats. L'origine des discussions réside dans le caractère non intuitif des raisonnements à mener dans le cadre quantique : une particule peut, selon l'expérience menée et les mesures effectuées, se comporter comme un corpuscule ou comme une onde ; elle peut être préparée simultanément dans deux états différents, et cette superposition d'états donne naissance à des interférences observables ; l'indéterminisme joue un rôle crucial dans le formalisme quantique, l'impossibilité de prédire un résultat de mesure individuel étant élevée au rang de principe fondamental. Pour obtenir un éclairage plus direct sur le monde quantique, les physiciens sont donc à la recherche de situations nouvelles où cette mécanique se manifesterait de manière plus évidente, améliorant ainsi notre compréhension de la théorie et pouvant ouvrir la voie à de nouvelles applications, inenvisageables dans un cadre classique.

Conçue en tant que théorie microscopique, la mécanique quantique est bien souvent masquée à l'échelle macroscopique. Le choc de boules de billard, l'écoulement de l'eau dans un récipient, le mouvement des planètes autour du soleil, se décrivent dans les termes classiques posés il y a trois siècles par Newton. Notre intuition physique, forgée sur des observations à grande échelle, découle de ces concepts classiques : nous assignons une position et une vitesse aux objets matériels qui nous entourent, nous calculons leur trajectoire, même si nous savons que ces notions perdent ultimement leur sens en physique quantique. Mais cette séparation entre deux mondes, l'un microscopique et quantique, l'autre macroscopique et classique, est-elle inévitable ? Puisque les physiciens sont convaincus que la physique quantique est « supérieure » à la mécanique classique, qui n'en est qu'un cas limite, peut-on trouver des situations macroscopiques, visibles à l'œil nu ou presque, dans lesquelles la mécanique quantique se manifeste de manière évidente ?

Les manifestations macroscopiques de la mécanique quantique existent, mais ne sont pas nombreuses. Deux exemples, découverts dans la première moitié du vingtième siècle, ont joué un rôle considérable dans le développement des idées en physique moderne. Il s'agit de la supraconductivité de certains matériaux et de la superfluidité de l'hélium liquide, toutes deux illustrées sur la figure 1 ci-dessous. Le point commun entre les deux phénomènes est la nécessité d'une basse température. Quand on refroidit un morceau de métal comme l'aluminium ou le niobium à quelques kelvins, un courant peut circuler sans aucune dissipation : l'effet Joule disparaît complètement. De même, l'hélium liquide en dessous de 2 kelvins peut s'écouler sans aucune viscosité. L'étude théorique de ces effets, extrêmement difficile, dépasse largement le cadre de cet exposé et elle est d'ailleurs loin d'être achevée, au moins en ce qui concerne la supraconductivité. La condensation de Bose-Einstein dans un gaz, observée en 1995, va nous fournir un terrain de jeu beaucoup plus simple pour explorer quelques unes des manifestations quantiques à l'échelle macroscopique.

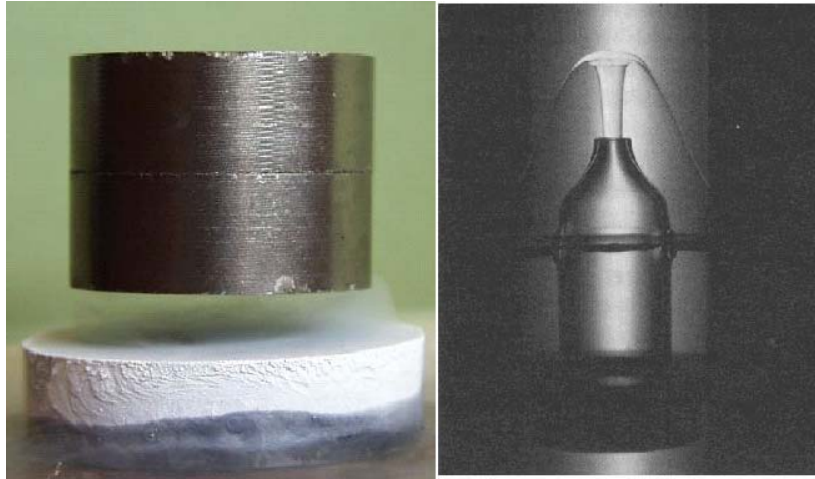


Figure 1 : deux manifestations de la mécanique quantique à l'échelle macroscopique. A gauche, un matériau supraconducteur refroidi à la température de l'azote liquide fait léviter au dessus de lui un petit aimant cylindrique. A droite, un écoulement sans viscosité se produit dans un récipient rempli d'hélium liquide superfluide (effet fontaine).

Particules identiques et condensation de Bose-Einstein

La condensation de Bose-Einstein dans les gaz présente un point commun essentiel avec les autres phénomènes quantiques macroscopiques que sont la supraconductivité et la superfluidité : elle se produit à basse température. La raison en est simple : la nature ondulatoire d'une particule, élément clé de sa description quantique, est caractérisée par sa longueur d'onde, introduite par Louis de Broglie en 1923 : $\lambda = h/(Mv)$, où h est la constante de Planck, M la masse de la particule et v sa vitesse. A haute température, la vitesse d'agitation thermique des atomes ou des molécules d'un gaz est grande et leur longueur d'onde est donc petite. Ainsi, dans l'air à température ambiante, la longueur d'onde associée aux molécules d'azote ou d'oxygène est bien inférieure à leur taille, elle-même de l'ordre de quelques angströms (1 angström est un dix-milliardième de mètre). Avec une longueur d'onde si courte, les effets ondulatoires sont extrêmement faibles ; le gaz se décrit en bonne approximation par les lois de la physique classique, comme une assemblée de billes animées de mouvements désordonnés et s'entrechoquant. En revanche, à basse température, les vitesses sont faibles, les longueurs d'onde deviennent appréciables, et les effets quantiques vont pouvoir se manifester plus clairement (figure 2).

Un deuxième ingrédient va jouer un rôle essentiel dans notre description de la condensation de Bose-Einstein. Il s'agit de l'indiscernabilité des particules quantiques. A notre connaissance, tous les électrons de l'univers ont rigoureusement les mêmes caractéristiques : même masse, même charge. Il en va de même pour les protons ou les neutrons. Cette notion d'indiscernabilité n'a rien d'évident ; Leibniz l'utilisait en fait pour prouver la non-existence des atomes, en déclarant : « S'il y avait des atomes (...), il y en aurait d'indistingables en soi (...), ce qui est contre un des plus grands principes de la raison ». Malgré tout, contrairement au souhait de Leibniz, la théorie quantique postule (et l'expérience ne l'a pas démentie) l'existence de particules indiscernables.

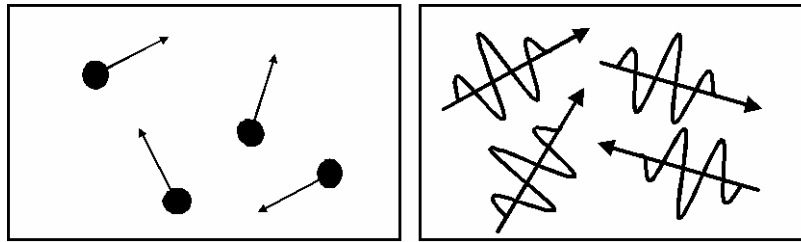


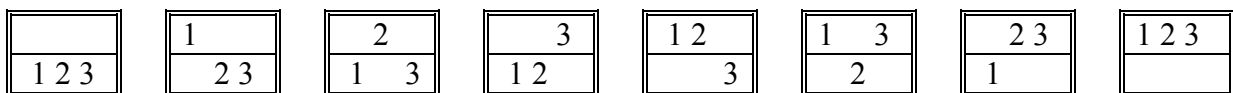
Figure 2 : les deux descriptions possibles pour un gaz. La figure de gauche correspond à un traitement classique du mouvement des particules ; c'est une description approchée, valable à haute température. La figure de droite illustre le fait que les particules sont en fait des objets quantiques, dont il faut prendre en compte la nature ondulatoire ; les effets qui en résultent sont visibles à basse température, quand la longueur d'onde associée aux particules devient grande. Si les particules du gaz sont identiques, il importe alors de savoir si ce sont des bosons, au « tempérament grégaire », ou des fermions, au « tempérament individualiste ».

Puisqu'une particule est décrite en mécanique quantique par son « état », qui caractérise l'ensemble des connaissances dont on dispose *a priori* sur cette particule, une question naturelle se pose alors : deux particules identiques peuvent-elles être dans le même état ? L'étude de cette question est ardue et la réponse fut apportée par Wolfgang Pauli en 1940 : « cela dépend de la particule ». Il existe deux classes de particules, baptisées bosons et fermions. Les particules de la classe boson peuvent effectivement s'accumuler en un nombre arbitrairement grand dans un même état. Ce sont à ces particules, au comportement grégaire, que nous allons nous intéresser dans la suite de cet exposé. Les fermions ont au contraire un tempérament individualiste, et il est impossible de mettre plus d'une particule dans un état donné ; nous en dirons un mot en conclusion. D'une manière étonnante, le fait qu'une espèce de particules ou d'atomes soit de la classe boson ou fermion ne dépend que d'un paramètre, qui caractérise la manière dont la particule tourne sur elle-même : le moment cinétique intrinsèque des particules, encore appelé spin. On peut montrer à partir des premiers principes que le spin est toujours un multiple de $h/(4\pi)$. Pauli a établi que si le coefficient de proportionnalité est un entier pair, alors la particule appartient à la classe boson. Si ce coefficient est impair, la particule est un fermion. Par exemple, l'isotope 6 de l'atome de lithium est un fermion alors que l'isotope 7 est un boson. En effet, le lithium 6 est formé par 3 protons, 3 neutrons et 3 électrons, chacune de ces particules ayant un spin $h/(4\pi)$. Comme le nombre total de particules ($3+3+3=9$) est impair, on obtient un spin total multiple impair de $h/(4\pi)$. En revanche le lithium 7 est composé de 3 protons, 4 neutrons et 3 électrons ; avec un nombre total de particules égal à 10, son spin total est un multiple pair de $h/(4\pi)$, ce qui assure sa nature bosonique.

Considérons maintenant une assemblée de bosons, placés dans une boîte. En 1924, le jeune physicien indien Satyendra Bose avait abordé ce problème pour l'étude du rayonnement électromagnétique. Il avait montré qu'en traitant ce rayonnement comme un gaz de particules identiques, les quanta lumineux (baptisés plus tard photons), on retrouvait la formule établie par Max Planck en 1900 pour décrire le rayonnement du corps noir, formule qui avait signé l'acte de naissance de la physique quantique. Albert Einstein, à qui Bose avait envoyé son manuscrit, fut très intéressé par ce travail. Il traduisit l'article de Bose en allemand et veilla à sa publication. Einstein généralisa ensuite l'approche de Bose à l'étude d'un gaz de particules matérielles, et il arriva alors à un résultat fort curieux : si on abaisse suffisamment la température du gaz, une condensation doit se produire quand la longueur d'onde de de Broglie devient de l'ordre de la distance entre particules. Cette condensation correspond à l'accumulation d'une fraction macroscopique des atomes dans l'état fondamental de la boîte confinant les particules. La valeur prévue par Einstein pour la température de condensation

était extrêmement basse, environ 10 000 fois plus basse que la température usuelle. C'est pourquoi la condensation prévue par Einstein fut considérée comme un phénomène purement académique par les physiciens de l'époque. Einstein lui-même écrivait : « l'idée est belle mais contient-elle une part de vérité ? » Ce n'est que 14 ans plus tard que Fritz London, dans les mois qui suivirent la découverte de la superfluidité de l'hélium liquide, suggéra que ce phénomène était relié à la condensation de Bose-Einstein. Mais le lien ne pouvait être que ténu : l'hélium liquide est un milieu dans lequel les interactions entre particules jouent un rôle essentiel, alors que la transition de phase prédite par Einstein, et c'est une de ses particularités étonnantes, peut se produire pour un gaz parfait.

L'origine de la condensation de Bose-Einstein réside dans l'indiscernabilité des particules. Grâce à elle, les configurations où plusieurs particules occupent un même état peuvent se produire avec une probabilité importante. Nous n'allons pas reprendre ici l'ensemble de la démarche théorique d'Einstein, mais nous allons examiner un cas très simple où nous disposons de trois particules, que nous devons répartir dans deux boîtes. En suivant les principes généraux de la mécanique statistique, tels qu'ils furent énoncés par Boltzmann, nous devons dénombrer les configurations possibles du système formé par nos trois particules, et poser qu'elles ont toutes la même probabilité de se produire. Si les particules sont discernables, on peut les numéroter de 1 à 3, et il y existe alors 8 manières différentes pour répartir ces 3 particules entre la boîte du haut et la boîte du bas, chacune de ces configurations se produisant avec une probabilité de $1/8$:



L'état condensé correspond à la situation où toutes les particules sont dans le même état (ici dans la même boîte). Il se produit donc dans deux cas sur huit (soit une probabilité de $1/4$), correspondant respectivement à la situation où les trois particules sont dans la boîte supérieure, et celle où les trois sont dans la boîte inférieure. Considérons maintenant des particules indiscernables. Il n'est alors plus possible de distinguer les deuxième, troisième et quatrième configurations de la ligne ci-dessus. Il en va de même pour les cinquième, sixième et septième configurations. Il n'y a donc que 4 façons de répartir nos trois particules entre la boîte du haut et la boîte du bas, chacune se produisant avec une probabilité de $1/4$:



La probabilité de trouver une état condensé est donc de $1/2$, puisqu'on a une chance sur 4 de trouver toutes les particules en haut, et une chance sur 4 de les trouver toutes en bas. Quand on généralise ce raisonnement à un grand nombre de particules, on trouve que l'indiscernabilité augmente d'une manière spectaculaire la probabilité des configurations condensées. C'est l'origine de l'effet trouvé par Einstein.

Les atomes refroidis par laser

Avec le développement des méthodes de cryogénie moderne et de réfrigérateurs très performants, on pouvait espérer qu'il serait possible de refroidir un gaz d'atomes ou de molécules à une température suffisamment basse pour atteindre le seuil prédit par Einstein. Mais ces méthodes, appliquées à une assemblée de particules confinées dans une enceinte

matérielle, conduisent à une difficulté qui semble insurmontable : à basse température, les atomes se collent sur les parois du récipient pour y former un liquide ou un solide « ordinaire » et la condensation de Bose-Einstein ne peut se produire. Pour remédier à ce problème, est apparue l'idée de confiner les atomes dans des boîtes immatérielles, faites de champs magnétiques ou de faisceaux laser. En parallèle, les techniques de manipulation et de refroidissement d'atomes par des faisceaux lumineux se sont développées. Grâce à l'utilisation combinée de ces différentes techniques, le premier condensat de Bose-Einstein gazeux a pu être observé en 1995. Le développement de ces méthodes a donné à lieu à deux prix Nobel de physique dans cette dernière décennie. En 1997, S. Chu, C. Cohen-Tannoudji et W.D. Phillips ont été récompensés pour la mise au point du refroidissement et du piégeage d'atomes par la lumière ; en 2001, E. Cornell, W. Ketterle et C. Wieman ont reçu le prix Nobel pour la mise en évidence expérimentale de la condensation de Bose-Einstein.

Le refroidissement d'atomes par la lumière consiste à tirer parti des échanges d'impulsion entre matière et rayonnement pour diminuer considérablement l'agitation thermique d'une assemblée d'atomes, sans jamais la mettre en contact avec une paroi matérielle refroidie. Les températures qu'on atteint par refroidissement laser sont dans le domaine du microkelvin, et correspondent à une vitesse d'agitation de quelques millimètres par seconde seulement. Par comparaison, à température ordinaire, la vitesse d'agitation thermique des atomes est de plusieurs centaines de mètres par seconde. Pour refroidir efficacement une vapeur atomique grâce à un faisceau laser, la seule contrainte est de disposer d'une source lumineuse relativement intense, de longueur d'onde voisine de la fréquence de résonance des atomes. Ceci a conduit les physiciens à s'intéresser en premier lieu aux atomes alcalins, car leur raie de résonance correspond à de la lumière visible ou infra-rouge, pour laquelle des sources laser fiables sont disponibles.

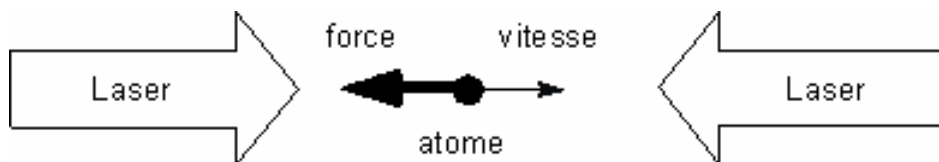


Figure 3 : principe du refroidissement laser ; une paire d'ondes lumineuses crée sur un atome en mouvement une force opposée à sa vitesse.

Plusieurs forces entrent en jeu dans la manipulation d'atomes par la lumière. La plus connue est la force de pression de radiation, qui avait été pressentie par Kepler pour expliquer l'orientation de la queue des comètes par rapport au soleil. Un atome placé dans un faisceau laser est poussé comme une poussière dans un courant d'air. La force exercée par le laser est d'autant plus grande que sa fréquence est voisine de la fréquence de résonance de l'atome. La force de pression de radiation est mise à profit dans le « refroidissement Doppler », le plus simple des mécanismes de refroidissement d'atomes par laser. Pour présenter son principe, considérons le mouvement des atomes selon une seule direction (figure 3). On éclaire les atomes par deux ondes laser de même fréquence et de même intensité, ces deux ondes se propageant en sens opposé. La fréquence des ondes lumineuses est choisie légèrement inférieure à la fréquence de résonance des atomes. Considérons d'abord un atome immobile ; par symétrie, les deux forces de pression de radiation sont de même intensité et de sens opposé. Elles se compensent et l'atome ne ressent aucune force résultante. Considérons maintenant un atome en mouvement, par exemple vers la droite. En raison de l'effet Doppler, l'atome verra l'onde venant à sa rencontre avec une fréquence augmentée, donc plus proche de résonance. La force de pression de radiation créée par cette onde sera donc plus grande que

pour un atome au repos. En revanche, l'onde venant de la gauche, allant dans le même sens que l'atome, est vue avec une fréquence plus basse que sa fréquence réelle. La force qu'elle engendre est diminuée par rapport à celle agissant sur un atome immobile. Au final, l'équilibre entre les deux forces est rompu pour un atome en mouvement, au profit du faisceau laser venant à la rencontre de l'atome. La force résultante est opposée à la vitesse atomique, et elle correspond donc à une force de friction. Il en ira de même si on considère un atome en mouvement vers la gauche, qui ressentira une force dirigée vers la droite. Le raisonnement ci-dessus se transpose sans difficulté à trois dimensions. Les photons du laser créent pour l'atome un milieu visqueux, et les atomes y sont englués comme une cuillère dans un pot de miel. Ce milieu visqueux, dont le volume est de l'ordre du centimètre cube, est appelé une mélasse optique (voir figure 4). On y capture jusqu'à un milliard d'atomes, qui sont refroidis à une température de l'ordre d'une centaine de microkelvins en quelques millièmes de secondes.

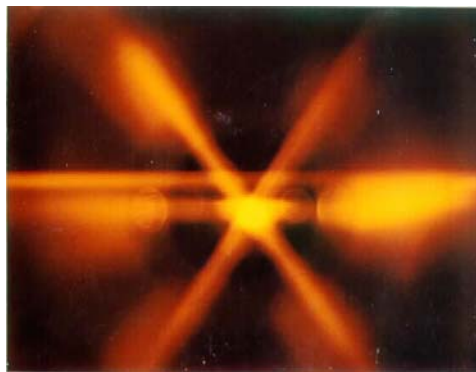


Figure 4 : une mélasse optique de sodium observée au NIST Gaithersburg dans le groupe de W.D. Phillips. Trois paires d'onde laser sont utilisées pour capturer et refroidir des atomes de sodium. Chaque onde a un diamètre de l'ordre du centimètre et on peut voir le trajet des faisceaux laser grâce à la lumière de fluorescence émise par les atomes de sodium. Le nombre d'atomes au niveau de la zone d'intersection est ici de quelques dizaines de millions.

Le refroidissement par évaporation

L'utilisation exclusive du refroidissement laser n'a pas encore permis d'atteindre la condensation de Bose-Einstein. En effet, si on cherche à augmenter la densité atomique au sein des mélasses optiques pour atteindre le seuil de condensation, l'irradiation laser favorise la formation de molécules : quand deux atomes sont proches l'un de l'autre, l'absorption d'un photon peut conduire à la formation d'un dimère qui s'échappe ensuite de la mélasse optique. Fort heureusement, cet obstacle peut être contourné : une fois la mélasse optique obtenue, on éteint tous les faisceaux laser, on transfère les atomes dans un piège magnétique, puis on procède à une seconde phase de refroidissement, fondée sur l'évaporation des atomes les plus énergétiques, pour atteindre la condensation.

Le piégeage magnétique des atomes utilise le fait que les particules portent un moment magnétique. Si on plonge les atomes dans un champ magnétique en orientant leur moment dans la direction opposée à celle du champ, les atomes vont être attirés vers les zones de faible champ. Il suffit donc que le champ magnétique soit minimum au centre de l'enceinte à vide dans laquelle l'expérience a lieu : on forme ainsi une cuvette de potentiel dans laquelle les atomes sont confinés. On laisse ensuite les plus énergétiques d'entre eux s'échapper en tronquant la profondeur de la cuvette de potentiel. Les atomes restants atteignent un nouvel état d'équilibre, à une température plus basse. On enlève de nouveau la fraction la plus

énergétique de la distribution et ainsi de suite, jusqu'à ce que la température des particules restantes soit suffisamment basse pour que la condensation prédite par Einstein puisse se produire. La durée de l'ensemble de cette séquence varie selon les expériences entre une seconde et une minute. Les températures obtenues sont spectaculairement basses : on peut descendre au nanokelvin, ce qui est 300 milliards de fois inférieur à la température ambiante ! Il s'agit des systèmes les plus froids jamais observés, dans lesquels la vitesse d'agitation des atomes est de l'ordre du millimètre par seconde, plus basse que celle d'un escargot.

Il faut enfin détecter le condensat formé. Pour cela, on éclaire le nuage d'atomes par une brève impulsion lumineuse résonnante et on enregistre sur une caméra rapide l'image de l'ombre créée par l'assemblée atomique sur le faisceau laser. On a ainsi accès à la distribution spatiale des atomes dans le potentiel magnétique. On peut également couper le piège magnétique et laisser l'assemblée atomique s'étaler pendant une durée de quelques dizaines de millisecondes avant d'envoyer l'éclair lumineux. De l'étendue du nuage atomique après étalement, on déduit la distribution en vitesse initiale (figure 5).

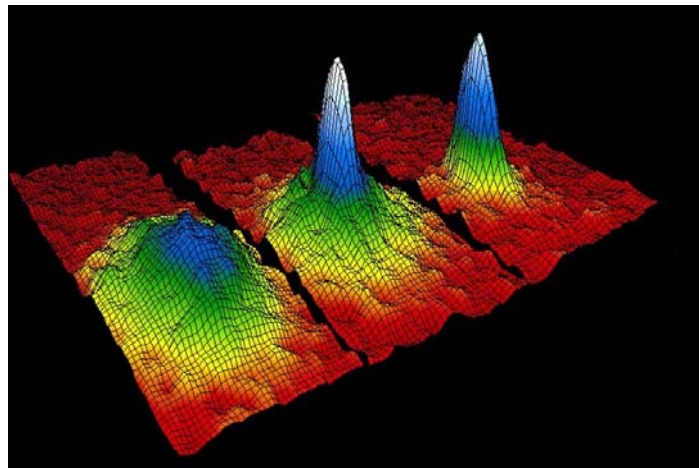


Figure 5 : condensation d'un gaz d'atomes de rubidium observé à Boulder dans le groupe d'Eric Cornell et Carl Wieman à Boulder en 1995. La figure donne la distribution en vitesse des atomes dans le piège. A gauche, le nuage d'atomes est encore relativement chaud, la dispersion des vitesses atomiques est grande, et le condensat ne s'est pas formé. Au centre, on observe la superposition du condensat (pic étroit au centre) et d'un piédestal correspondant aux atomes plus énergétiques, non condensés. Sur l'image de droite, le refroidissement a été suffisamment fort pour que pratiquement tous les atomes soient condensés.

La cohérence quantique à l'épreuve

L'accumulation de la majorité des atomes dans le même état quantique confère aux condensats de Bose-Einstein des propriétés de cohérence spectaculaires. Le seul équivalent connu est la lumière laser, constituée d'un grand nombre de photons dans le même mode du champ électromagnétique. Comment mettre en évidence cette cohérence, liée à la formation d'une onde de matière macroscopique ? La réponse se trouve dans tous les manuels de physique : avec une onde, on doit observer des interférences ! L'idée va donc être de fabriquer deux sources atomiques issues d'un condensat, les faire arriver dans une même région de l'espace, et observer si ces faisceaux d'atomes « interfèrent » ; en d'autres termes, il faut voir s'il y a des endroits où les amplitudes des deux ondes s'ajoutent, ce qui correspond à une probabilité de présence accrue pour les atomes (on parle alors d'interférence constructive) et d'autres endroits où les amplitudes des deux ondes se soustraient, ce qui correspond à une réduction de la probabilité de présence (interférence destructive).

Cette expérience a été réalisée dans plusieurs laboratoires et nous citerons ici un travail pionnier mené à Munich. Les chercheurs de Munich ont « percé » deux trous dans un condensat, et regardé l'interférence des deux jets d'atomes s'échappant de ces trous. Bien sûr, il ne s'agit pas de trous matériels, mais d'une utilisation habile du piégeage magnétique : ils ont irradié le condensat par une onde radio-fréquence qui fait basculer le moment magnétique des atomes confinés dans le piège magnétique en deux endroits différents. Les positions de ces points de bascule varient de manière contrôlée avec la fréquence de l'onde radio. Une fois leur moment magnétique basculé, les atomes ne sont plus piégés et ils tombent simplement sous l'effet de la pesanteur, comme un filet d'eau s'écoulant d'un robinet mal fermé. L'interférence entre les deux jets d'atomes s'échappant des deux trous a révélé de manière spectaculaire la cohérence quantique du condensat : les chercheurs de Munich ont observés, dans la région où les deux jets se superposent, des zones pratiquement noires où l'interférence destructive est quasi-complète, et des zones brillantes correspondant à une interférence constructive (voir figure 6).

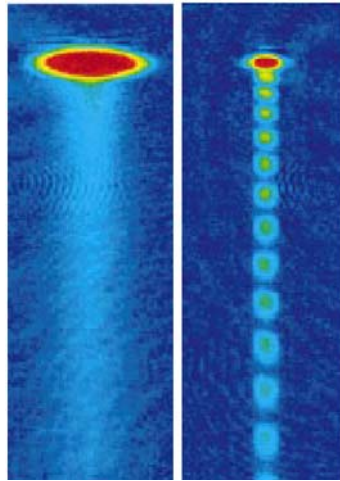


Figure 6 : interférences entre deux jets d'atomes tombant d'un nuage atomique. A gauche, le nuage n'est pas assez froid pour être condensé et on n'observe aucune interférence entre les deux jets d'atomes. A droite, on travaille avec un condensat de Bose-Einstein et on observe des interférences destructives en certains points et constructives en d'autres (photo : I. Bloch, T.W. Hänsch et T. Esslinger, Munich)

Cette expérience illustre bien le terme de « laser à atomes » souvent utilisé pour décrire le jet de particules issu d'un condensat. Tout comme la lumière laser, l'onde de de Broglie correspondante est complètement cohérente. Toutefois, à la différence de son grand frère lumineux, qui se propage dans un gaz ou dans un verre, le laser à atomes ne peut exister que dans une enceinte où règne un vide poussé. Si on cherchait à faire se propager un laser à atomes dans l'air ambiant, les collisions des atomes du jet avec les molécules d'azote ou d'oxygène détruiraient immédiatement la cohérence quantique. En dépit de cette limitation, les lasers à atomes sont des outils très prometteurs ; ils devraient permettre en particulier de réaliser des interféromètres à onde de matière de grande précision, qui pourraient être utilisés comme capteurs ultra-sensibles de rotation, d'accélération ou pour la mesure du temps. Un défi encore ouvert est la réalisation d'un laser à atomes continu qui, à la différence de celui réalisé à Munich, se remplirait de nouveaux atomes au fur et à mesure que les atomes condensés s'échappent du piège magnétique.

Gaz parfait ou gaz réel ?

Le raisonnement d'Einstein de 1924 portait sur un gaz parfait, c'est-à-dire une assemblée de particules n'interagissant pas entre elles. La condensation n'était pas provoquée par une liaison attractive entre particules (comme c'est le cas par exemple dans la condensation de la vapeur d'eau dans un nuage), mais simplement par la nouvelle statistique introduite par Bose traitant les particules comme des objets indiscernables. Mais les atomes (alcalins ou autres) utilisés au laboratoire interagissent entre eux de manière relativement complexe. Considérons par exemple le cas d'une paire d'atomes. Quand ils sont éloignés l'un de l'autre, ils s'attirent : c'est l'interaction connue sous le nom de force de van der Waals. En revanche, quand les atomes sont proches l'un de l'autre (un ou deux angströms), ils se repoussent car leurs nuages électroniques se recouvrent. Les forces d'attraction et de répulsion s'équilibrent à une distance intermédiaire, de quelques angströms, ce qui conduit à la possibilité de former une molécule di-atomique. De même, si trois atomes sont simultanément présents, on peut former un trimère et, avec beaucoup d'atomes, des agrégats.

Puisque les atomes peuvent se combiner pour former des molécules arbitrairement complexes, comment se fait-il que l'on puisse malgré tout prendre des photos de condensats atomiques comme celles montrées ci-dessus ? Cela devrait être impossible, puisqu'à très basse température, l'état thermodynamiquement stable d'une assemblée d'atomes de sodium ou de rubidium est un solide, pas un gaz comme ce qui est observé dans l'expérience. La réponse à cette question provient de la faible densité spatiale de ces assemblées d'atomes. Pour former des molécules ou des agrégats qui conduiront ultimement à un bloc de sodium ou rubidium solide, il faut des collisions impliquant plusieurs partenaires. Ainsi, si on cherche à former une molécule di-atomique, il faut qu'un troisième atome soit au voisinage de la paire d'atomes qu'on cherche à réunir, pour emporter l'énergie libérée lors de la formation de la molécule. Or, pour ces systèmes dilués, la probabilité d'avoir trois atomes au voisinage immédiat les uns des autres est très faible. Il s'ensuit que la formation de molécules est extrêmement lente. Elle ne constitue donc pas un obstacle à l'observation d'un condensat atomique gazeux : ce condensat n'est que métastable, mais sa durée de vie est en pratique suffisamment longue pour qu'on puisse lui appliquer les principes habituels qui régissent l'équilibre thermodynamique.

Puisqu'on peut ignorer la formation de molécules dans les condensats, peut-on considérer les condensats comme des gaz parfaits, semblables à celui étudié par Einstein ? Certainement pas. L'interaction entre atomes y joue un rôle important, mais du fait de la basse température et de la faible densité spatiale, cette interaction est un phénomène cohérent, qui ne détruit pas la condensation. On peut rapprocher cette situation de celle de la lumière se propageant dans un verre : la diffusion de chaque photon sur les atomes du verre ne brouille pas la cohérence du faisceau lumineux, mais se décrit simplement par un indice de réfraction, à prendre en compte pour déterminer la propagation du faisceau. Dans un condensat gazeux, chaque atome voit un potentiel moyen, répulsif ou attractif selon les cas, créé par les autres atomes du gaz. La dynamique du condensat dans son ensemble est donc régie par une équation (appelée équation de Gross-Pitaevskii) qui est non-linéaire, puisque la forme du condensat à un instant donné va influencer l'évolution de cette forme aux instants suivants. Les solutions de cette équation présentent, selon le problème étudié, une variété impressionnante de structures, qui vont de solitons au mélange non linéaire d'ondes, en passant par les tourbillons quantiques auxquels nous allons nous intéresser dans le paragraphe qui suit.

Comment tourne un condensat ?

La mise en rotation d'un système quantique macroscopique est un moyen remarquable pour illustrer sa profonde différence avec un fluide classique. Dans un liquide ou un gaz classique, la rotation donne lieu à des phénomènes bien connus, analogues à ce qui se passe quand on tourne son café avec une cuillère. Après une phase de turbulence initiale, le champ de vitesse du fluide devient semblable à celui d'un corps rigide en rotation, comme un manège : plus on est loin du centre, plus la vitesse linéaire est grande. Dans un objet quantique macroscopique, on peut montrer que cette distribution de vitesse est impossible. En effet, la vitesse des particules dans un condensat est directement reliée à la phase de l'onde de matière, ce qui impose de fortes contraintes sur les mouvements possibles. Ces contraintes sont même tellement exigeantes qu'on a cru dans les années 1940-50 qu'un superfluide devait toujours rester au repos. Toutefois, les physiciens Onsager et Feynman ont éclairci la situation et ont montré qu'un superfluide pouvait tourner, mais de manière très spéciale. Sa rotation est obtenue en générant des tourbillons quantiques (ou vortex), tous identiques, dont la taille dépend directement de la constante de Planck. Au centre de chaque tourbillon, la densité du condensat s'annule ; si on parcourt un chemin fermé entourant ce centre, la phase du condensat varie de 2π . L'observation de ces tourbillons est donc une mise en évidence directe de la nature quantique du condensat.

Pour faire apparaître ces tourbillons dans un condensat, on utilise un « agitateur », par exemple un faisceau laser. Le condensat est confiné dans un piège magnétique circulaire et l'agitateur tournant va le mettre en rotation, comme la cuillère fait tourner le café dans la tasse. Si la rotation est suffisamment rapide, on crée un tourbillon, puis un deuxième, etc. On observe ces vortex en mesurant la répartition spatiale des atomes. Puisqu'ils correspondent à des endroits où la densité du condensat s'annule, ils apparaissent comme des trous dans le nuage atomique. Un résultat caractéristique est indiqué sur la figure 7.

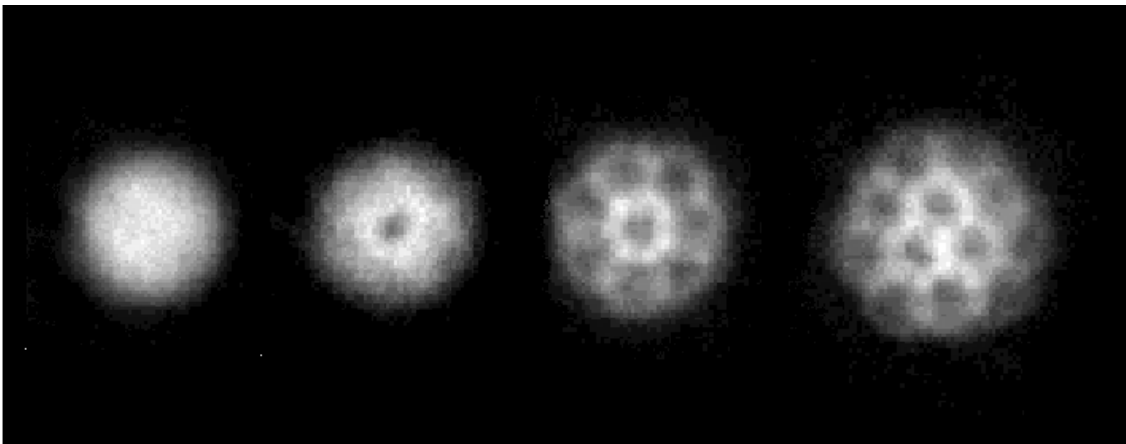


Figure 7 : un condensat mis en rotation avec un agitateur laser. (a) La fréquence de rotation est en dessous d'une fréquence critique et rien ne se produit. (b) Juste au dessus de la fréquence critique, le premier vortex apparaît. (c,d) La fréquence de rotation est notablement supérieure à la fréquence critique et un réseau régulier de vortex se forme (photo LKB-ENS).

De nombreuses études ont été menées ces dernières années sur ces vortex. Outre le caractère spectaculaire intrinsèque des photos obtenues (on voit directement une fonction d'onde quantique), les tourbillons posent de nombreuses questions intéressantes et difficiles, aussi bien sur le plan physique que mathématique : quelle est la forme d'une ligne de vortex, quels sont les paramètres du réseau régulier qui apparaît quand plusieurs tourbillons sont présents,

que se passe-t-il quand on tourne vraiment très vite ? Une voie de recherche en cours d'exploration est le lien entre ces condensats en rotation et la physique de l'effet Hall quantique, qui se produit lorsqu'on place dans un grand champ magnétique un matériau semi-conducteur confinant un gaz d'électrons à deux dimensions. Même si les ordres de grandeur sont très différents (la masse d'un atome est 100 000 fois plus grande que la masse d'un électron), les analogies entre les deux situations semblent fortes ; on peut donc espérer utiliser ces condensats en rotation pour modéliser des systèmes complexes de physique du solide, en tirant parti de l'universalité de la physique quantique.

Perspectives

L'étude de la condensation de Bose-Einstein dans les gaz est devenue l'un des domaines de recherche les plus actifs en physique. Pour donner une idée du niveau de cette activité, mentionnons simplement qu'elle se traduit par la publication d'environ un millier d'articles par an. Les raisons d'un tel intérêt pour les gaz de bosons condensés sont simples à comprendre. Tout d'abord, il s'agit de systèmes quantiques bien contrôlés, pour lesquels la confrontation théorie – expérience peut être menée avec une très bonne précision. L'environnement des atomes, constitué par le piège magnétique ou par des faisceaux laser, est modifiable à volonté et des géométries très variées peuvent être envisagées : le potentiel confinant les atomes peut former une simple cuvette, un double puits, ou encore présenter une modulation périodique, voire aléatoire. On peut donc utiliser ces gaz d'atomes froids pour modéliser des systèmes plus compliqués comme les électrons en mouvement dans un solide. Nous avons déjà mentionné le rapprochement entre les gaz en rotation et l'effet Hall quantique ; d'autres analogies font également l'objet de recherches intensives, comme l'étude de la transition conducteur-isolant qui se produit lorsqu'on place des particules quantiques dans un potentiel périodique et qu'on varie la force des interactions entre ces particules. En faisant preuve d'un peu d'optimisme, on peut espérer réaliser grâce à ces atomes froids le simulateur quantique imaginé dans les années 1980 par Richard Feynman : partant d'un problème quantique qu'on ne sait pas résoudre théoriquement (par exemple une question complexe de matière condensée), on réaliserait une expérience avec des atomes froids en cherchant à les mettre dans une situation telle que les équations du mouvement quantique seraient formellement les mêmes que celles du problème de départ (même si les ordres de grandeur sont quant à eux très différents). L'expérience réalisée avec les atomes pourrait alors apporter la réponse cherchée.

La moisson de résultats obtenus sur les gaz d'atomes bosoniques a bien sûr stimulé des études analogues sur les gaz d'atomes fermioniques ultra-froids. Chaque état quantique ne pouvant contenir au maximum qu'un seul fermion, la répartition des atomes sur les niveaux d'énergie du piège est très différente du cas bosonique. Si les spins de ces fermions sont tous orientés dans la même direction, on peut montrer que ces fermions n'interagissent pratiquement pas entre eux, ce qui en fait des candidats remarquables pour la métrologie et la fabrication d'horloges atomiques très performantes. En effet, on peut accumuler un grand nombre de ces particules sans que leurs interactions ne viennent perturber le signal qu'on cherche à mesurer sur chacune d'entre elles. En revanche, si on met dans un même piège des fermions avec différentes orientations possibles pour leurs spins, ces fermions interagissent et cela donne naissance à des effets nouveaux particulièrement intéressants. En fait, on atteint alors une situation qui rappelle fortement celle de la supraconductivité mentionnée en introduction, qui apparaît quand un gaz d'électrons (des fermions eux aussi!) est refroidi en dessous d'une certaine température. Un domaine de recherche très actif est la confrontation des expériences menées sur ces gaz d'atomes fermioniques avec les théories existantes de la

supraconductivité, comme la théorie BCS (nommée d'après ses inventeurs Bardeen, Cooper, et Schrieffer). Peut-on vraiment observer une transition BCS dans des systèmes d'atomes fermioniques froids ? Ces systèmes atomiques pourront-ils aider à comprendre le mystère de la supra-conductivité à haute température, observée depuis 20 ans sur certains matériaux ? Ces questions illustrent à quel point ce domaine de recherche se révèle fécond par les développements auxquels il donne naissance, 80 ans après la parution des articles de Bose et d'Einstein.

Pour en savoir plus :

C. Cohen-Tannoudji, J. Dalibard et F. Laloë, *La condensation de Bose-Einstein dans les gaz*, dans « Einstein aujourd'hui », Savoirs actuels, EDP Sciences-CNRS Editions, Paris 2005.

Conférences Nobel 1997:

- S. Chu, *The manipulation of neutral particles*, Rev. Mod. Phys. **70**, 685-706 (1998)
- C. Cohen-Tannoudji, *Manipulating atoms with photons*, Rev. Mod. Phys. **70**, 707-719 (1998)
- W.D. Phillips, *Laser cooling and trapping of neutral atoms*, Rev. Mod. Phys. **70**, 721-741 (1998)

Conférences Nobel 2001:

- E.A. Cornell, C.E. Wieman, *Bose-Einstein condensation in a dilute gas, the first 70 years and some recent experiments*, Rev. Mod. Phys. **74**, 875-893 (2002)
- W. Ketterle, *When atoms behave as waves: Bose-Einstein condensation and the atom laser*, Rev. Mod. Phys. **74**, 1131-1151 (2002)