

**Le refroidissement des atomes par laser
par Claude Cohen-Tannoudji**

Introduction

Au cours des deux dernières décennies, des progrès spectaculaires ont été réalisés dans notre maîtrise du mouvement des atomes. En faisant interagir ces atomes avec des faisceaux laser de direction, de fréquence et de polarisation convenablement choisies, nous pouvons maintenant contrôler la vitesse de ces atomes, réduire leurs mouvements d'agitation désordonnée, en quelque sorte les assagir, ce qui revient à diminuer leur température. Ces nouvelles méthodes portent le nom de «refroidissement laser». On sait également depuis peu contrôler la position des atomes et les maintenir confinés dans de petites régions de l'espace appelées « pièges ».

Le sujet de cet exposé est le refroidissement laser. Son objectif est double. Je voudrais tout d'abord expliquer en termes très simples comment fonctionne le refroidissement laser.

Lorsqu'un atome absorbe ou émet de la lumière, il subit un recul. Comment peut-on utiliser ce recul pour ralentir et refroidir des atomes ? Je voudrais également dans cet exposé passer en revue les principales motivations de ces travaux, les nouvelles perspectives qu'ils ouvrent et essayer de répondre à quelques interrogations : À quoi peuvent servir les atomes ultrafroids ? Quels problèmes nouveaux permettent-ils d'aborder ? Quelles nouvelles applications peut-on envisager ?

Pour ceux d'entre vous qui ne sont pas familiers avec la physique des atomes et du rayonnement, j'ai pensé qu'il serait utile de commencer cet exposé par un rappel succinct de quelques notions de base très simples sur les photons et les atomes, sur les mécanismes d'absorption et d'émission de photons par les atomes. J'aborderai ensuite la description de quelques mécanismes physiques à la base du refroidissement laser : le recul de l'atome émettant ou absorbant un photon, ce qui se passe lorsqu'on place l'atome dans un faisceau laser résonnant, comment les reculs successifs que subit alors l'atome permettent de le ralentir et de le refroidir. Je terminerai enfin mon exposé en passant en revue quelques applications de ces travaux : les horloges à atomes froids, d'une extrême précision, puis l'interférométrie atomique qui utilise des phénomènes d'interférence résultant de la superposition des ondes de de Broglie atomiques, et enfin ces nouveaux états de la matière qui sont nommés condensats de Bose-Einstein. L'apparition, à des températures très basses, de ces nouveaux objets ouvre la voie vers de nouvelles applications comme les lasers à atomes qui sont analogues à des lasers ordinaires dans lesquels les ondes lumineuses seraient remplacées par des ondes de de Broglie.

Quelques notions de base

La lumière

La lumière est un objet d'études qui a toujours fasciné les physiciens et les scientifiques en général. Elle est apparue successivement au cours des siècles comme un jet de corpuscules ou comme une onde. Nous savons aujourd'hui qu'elle est à la fois une onde et un ensemble de corpuscules.

La lumière est tout d'abord une onde électromagnétique, c'est-à-dire un champ électrique et un champ magnétique oscillant à la fréquence ν et se propageant dans le vide à une vitesse considérable $c = 3 \times 10^8$ m/s. Comme toute onde, la lumière donne naissance à des phénomènes d'interférence. Lorsqu'on superpose deux ondes différentes d'égale amplitude,

en certains points, les ondes vibrent en phase et l'amplitude est doublée, en d'autres points, les ondes vibrent en opposition de phase et l'interférence est destructive. Sur un écran, on peut ainsi apercevoir une succession de zones brillantes et de zones sombres appelées franges d'interférence.

La couleur de la lumière est liée à sa fréquence ν . Le spectre de fréquence des ondes électromagnétiques s'étend de quelques Hertz aux rayons X et gamma. La lumière visible ne couvre qu'une très petite région de ce domaine spectral. Il est possible d'analyser le contenu spectral d'un rayonnement grâce à des appareils dits dispersifs qui font subir à un rayon lumineux une déviation qui dépend de la fréquence. Ainsi, si l'on fait passer un rayon solaire à travers un prisme, ses différentes composantes de couleur sont déviées de manière différente et on observe ce que l'on appelle un spectre.

Au début du siècle, à la suite des travaux de Planck et d'Einstein, il est apparu que la lumière n'était pas seulement une onde, mais qu'elle était aussi une assemblée de corpuscules : les « photons ». À une onde lumineuse de fréquence ν , sont ainsi associés des corpuscules, les photons, qui possèdent une énergie $E = h\nu$ proportionnelle à ν , une quantité de mouvement $p = h\nu/c$ également proportionnelle à ν . Dans ces équations, c est la vitesse de la lumière, ν sa fréquence et h une constante que l'on appelle la constante de Planck, introduite en physique par Planck il y a exactement 100 ans.

L'idée importante qui s'est dégagée au cours du siècle précédent est la *dualité onde-corpuscule*. La lumière est à la fois une onde et un ensemble de corpuscules. Il est impossible de comprendre les divers phénomènes observés en termes d'ondes uniquement ou de corpuscules uniquement. Ces deux aspects de la lumière sont tous deux indispensables et indissociables.

Les atomes

Les atomes sont des systèmes planétaires analogues au système solaire. Ils sont formés de particules très légères, « les électrons », particules de charge négative, qui gravitent autour d'une particule de masse beaucoup plus élevée, dont la charge est positive : « le noyau ». Pour comprendre le mouvement de ces électrons autour du noyau, les physiciens se sont vite rendu compte que la mécanique classique était inadéquate et conduisait à des absurdités. Ils ont alors « inventé » la mécanique quantique, qui régit la dynamique du monde à l'échelle microscopique. Il s'agit là d'une révolution conceptuelle aussi importante que la révolution de la relativité restreinte et de la relativité générale. Une des prédictions les plus importantes de la mécanique quantique est la quantification des grandeurs physiques, en particulier, la quantification de l'énergie.

Dans le système du centre de masse de l'atome, système qui coïncide pratiquement avec le noyau car le noyau est beaucoup plus lourd que les électrons, on observe que les énergies des électrons ne peuvent prendre que des valeurs discrètes, quantifiées, repérées par des « nombres quantiques ». Pour illustrer la quantification de l'énergie, j'ai représenté ici le niveau fondamental d'énergie la plus basse, le premier niveau excité, le deuxième niveau excité.

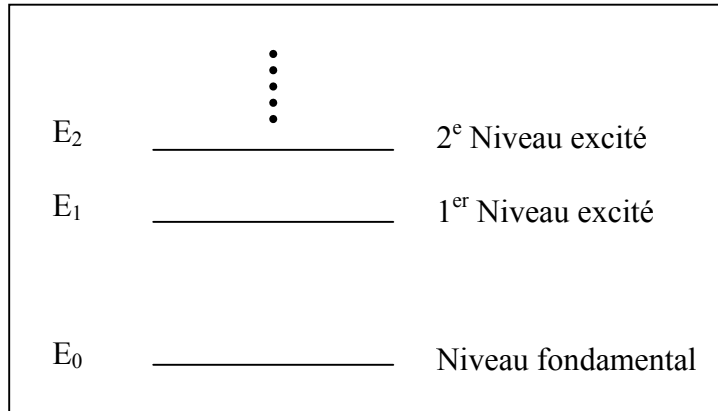


Figure 1 : Niveaux d'énergie d'un atome. Chaque trait horizontal a une altitude proportionnelle à l'énergie du niveau correspondant.

Interaction matière-lumière

Comment un tel atome interagit-il avec la lumière ?

Émission et absorption de lumière par un atome

Un atome, initialement dans un état supérieur E_b , peut passer de ce niveau à un niveau inférieur E_a . Il émet alors de la lumière de fréquence ν , plus précisément un photon d'énergie $h\nu$, telle que $E_b - E_a = h\nu$. Autrement dit, l'énergie perdue par l'atome, lorsqu'il passe du niveau E_b au niveau E_a , est évacuée par le photon d'énergie $h\nu$. La relation entre la perte d'énergie de l'atome et la fréquence de la lumière émise n'est donc en fait que la traduction exacte de la conservation de l'énergie.

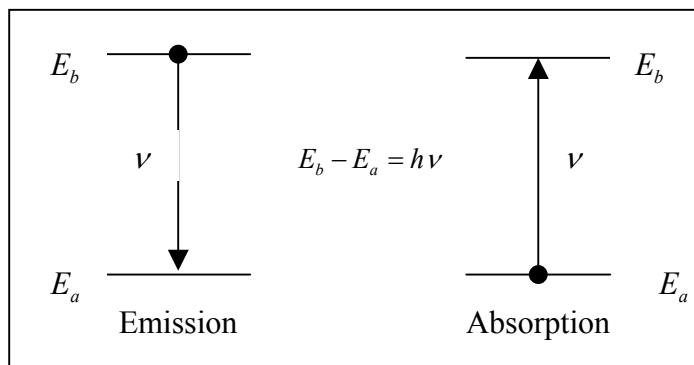


Figure 2 : Processus élémentaires d'émission (figure de gauche) et d'absorption (figure de droite) d'un photon par un atome.

Le processus inverse existe, bien sûr : le processus d'absorption de lumière par un atome. L'atome, initialement dans un état inférieur E_a peut passer dans un niveau supérieur E_b en gagnant l'énergie $h\nu$ du photon absorbé. En d'autres termes, l'atome absorbe un photon et l'énergie du photon qu'il absorbe lui permet de passer de E_a à E_b . Il apparaît ainsi clairement que la quantification de l'énergie atomique sous forme de valeurs discrètes entraîne le caractère discret du spectre de fréquences émises ou absorbées par un atome.

La lumière : une source essentielle d'informations sur la structure des atomes

Un atome ne peut émettre toutes les fréquences possibles, il ne peut émettre que les fréquences correspondant aux différences des énergies de ses niveaux. Ce résultat est extrêmement important. Il montre en effet que la lumière est une source d'information essentielle sur le monde atomique. En effet, en mesurant les fréquences émises ou absorbées, on peut reconstituer les différences $E_b - E_a$ et obtenir le diagramme d'énergie d'un atome.

C'est ce que l'on appelle la « spectroscopie ». Le spectre d'un atome varie d'un atome à l'autre. Les fréquences émises par l'atome d'hydrogène diffèrent de celles émises par l'atome de sodium, de rubidium ou de potassium. Le spectre de raies émises par un atome constitue en quelque sorte son « empreinte digitale » ou, pour utiliser des termes plus actuels, son « empreinte génétique ». Il est possible d'identifier un atome par l'observation des fréquences qu'il émet. Autrement dit, en observant la lumière provenant de différents types de milieux, on peut obtenir des informations sur les constituants de ces milieux. Ainsi, en astrophysique, par exemple, c'est la spectroscopie qui permet de déterminer la composition des atmosphères planétaires et stellaires et d'identifier les molécules qui sont présentes dans l'espace interstellaire. L'observation du décalage des fréquences émises par des objets astrophysiques permet de mieux comprendre la vitesse de ces objets et de mesurer ainsi l'expansion de l'univers. L'observation du spectre de la lumière émise ou absorbée permet aussi d'étudier des milieux hostiles comme des plasmas ou des flammes et d'analyser in situ les constituants de ces milieux.

Durée de vie d'un état excité

Considérons un atome isolé, initialement préparé dans un état excité E_b . L'expérience montre qu'au bout d'un certain temps, très court, l'atome retombe spontanément dans un état inférieur E_a , en émettant et dans n'importe quelle direction, un photon d'énergie $h\nu = E_b - E_a$. Ce laps de temps, très court, à la fin duquel se produit le processus d'émission est appelé la durée de vie de l'état excité E_b .

Il apparaît ainsi qu'un atome ne peut pas rester excité indéfiniment. La durée de vie de l'état excité, qui varie d'un atome à l'autre, est typiquement de 10^{-8} s, c'est-à-dire 10 milliardièmes de seconde.

Les mécanismes physiques

Après ces brefs rappels de notions de base, abordons maintenant la seconde partie de cet exposé qui traite des mécanismes physiques à la base du refroidissement laser.

Le recul de l'atome lors de l'émission ou de l'absorption d'un photon

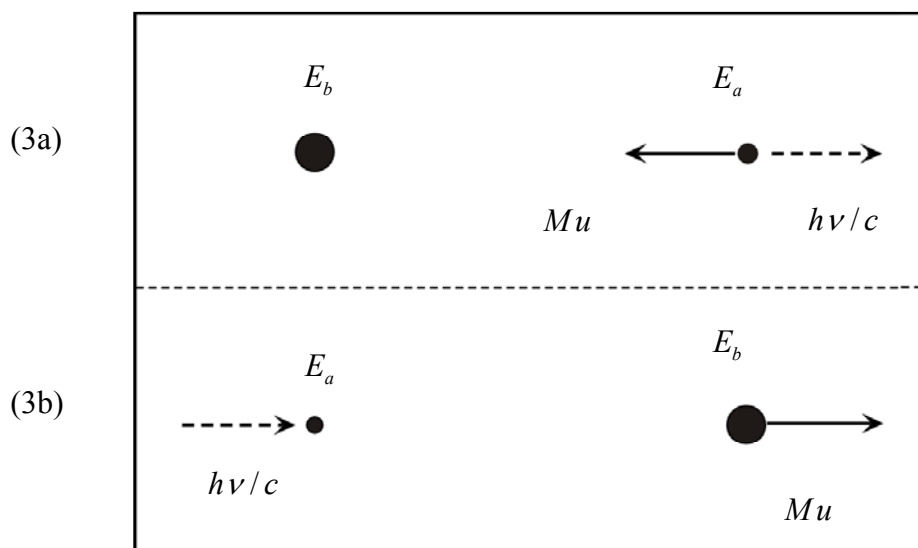


Figure 3 : Recul d'un atome lors de l'émission (figure 3a) ou de l'absorption (figure 3b) d'un photon par cet atome.

En physique, il y a une loi fondamentale qui est « la conservation de la quantité de mouvement ». Considérons un atome excité dans un état E_b supérieur, initialement immobile, et supposons qu'à l'instant $t = 0$, cet atome émette un photon, lequel a une quantité de mouvement $h\nu/c$. Dans l'état initial, l'atome étant tout seul et immobile, la quantité de mouvement globale est nulle. Dans l'état final, comme le photon part avec une quantité de mouvement $h\nu/c$, l'atome recule avec la quantité de mouvement opposée $Mv = -h\nu/c$. Vous avez certainement déjà vu, en réalité ou à la télévision, un canon tirer un obus : lorsque le canon tire un obus, il recule. De même, lorsqu'un atome émet un photon, il recule à cause de la conservation de la quantité de mouvement. Sa vitesse de recul est donnée par $v_{\text{rec}} = h\nu/Mc$.

Le même phénomène de recul s'observe lors de l'absorption. Considérons un atome dans un état fondamental E_a , initialement immobile, et supposons qu'on envoie sur lui un photon : l'atome absorbe le photon et parvient à l'état excité. Il recule alors avec la même vitesse de recul $h\nu/Mc$. De même, lorsqu'on tire une balle sur une cible, la cible recule à cause de la quantité de mouvement qui lui est communiquée par le projectile. Par ailleurs, nous savons que l'absorption de photon qui porte l'atome, initialement immobile, à l'état excité, est nécessairement suivie d'une émission puisque l'atome ne peut rester excité indéfiniment. Il retombe donc, au bout d'un temps qui est la durée de vie de l'état excité, dans l'état inférieur, en émettant spontanément un photon. Dans ce cycle absorption-émission au cours duquel l'atome absorbe un photon, recule puis émet un photon, la probabilité qu'il émette ce photon dans telle direction ou dans telle autre, dans un sens ou dans le sens opposé, est la même de sorte, qu'en moyenne, la vitesse qu'il perd lors de l'émission est nulle. Il s'ensuit donc que le changement de vitesse de l'atome est, en moyenne, uniquement lié au processus d'absorption et a pour valeur $v_{\text{rec}} = h\nu/Mc$. Ce résultat est important pour la suite.

L'atome dans un faisceau laser

Essayons maintenant de comprendre comment réagit l'atome en présence, non pas d'un seul photon incident, mais d'un faisceau laser résonnant. Un flot de photons arrive alors sur lui. Il en absorbe un premier, monte dans l'état excité, retombe en émettant un photon, puis absorbe un second photon laser, monte dans l'état excité, retombe en émettant un autre photon, puis en absorbe un troisième et ainsi de suite. L'atome, ainsi plongé dans un faisceau laser, enchaîne les cycles absorption-émission sans pouvoir s'arrêter et, à chacun de ces cycles, sa vitesse change en moyenne de $v_{\text{rec}} = h\nu/Mc$. Comme la durée de vie moyenne de l'atome excité est de 10^{-8} s, il se produit de l'ordre de 10^8 cycles absorption-émission par seconde, c'est-à-dire 100 millions de cycles par seconde ! A chacun de ces cycles, la vitesse de l'atome change de $h\nu/Mc$. Pour l'atome de sodium, le calcul de cette vitesse de recul donne 3cm/s. Pour l'atome de césium, on obtient 3mm/s. Ces vitesses sont très faibles, comparées par exemple aux vitesses des molécules de l'air qui nous entoure, qui sont de l'ordre de 300m/s. C'est pourquoi pendant longtemps les changements de vitesse d'un atome dûs aux effets de recul ont été considérés comme négligeables. En fait la situation est radicalement différente pour un atome dans un faisceau laser. Les cycles d'absorption-émission se répètent 100 millions de fois par seconde, générant un changement de vitesse par seconde de l'ordre de 100 millions de fois la vitesse de recul. On obtient ainsi des accélérations (ou décélérations) de l'ordre de 10^6 m/s^2 . A titre de comparaison, prenons un exemple dans la vie courante : quand

un objet tombe, l'accélération g qu'il subit du fait de la pesanteur est de 10 m/s^2 . Un atome de sodium irradié par un faisceau laser est soumis à une accélération, ou une décélération, qui peut atteindre $10^5 g$. A titre de comparaison encore, cette accélération est 100 000 fois supérieure à celle, de l'ordre de $1g$, que subit une voiture qui roule à 36 km/heure et qui s'arrête en 1 seconde.

Ralentissement d'un jet atomique

Cette force considérable qu'exerce la lumière sur les atomes, résultant de l'accumulation d'un très grand nombre de petits changements de vitesse, permet d'arrêter un jet atomique. Considérons un jet d'atomes sortant d'un four à la température de 300°K ou 400°K et se propageant à une vitesse de l'ordre de 1 km/s . Si ce jet est éclairé tête bêche par un faisceau laser résonnant, la force de pression de radiation que les atomes subissent va ralentir ces atomes, les arrêter et même leur faire rebrousser chemin. Un atome de vitesse initiale v_0 de 1 km/s , soit 10^3 m/s , va être arrêté avec une décélération de 10^6 m/s^2 , au bout de 10^{-3} seconde, c'est-à-dire en une milliseconde. En une milliseconde, il passe ainsi de 1 km/s à zéro ! La distance L parcourue par l'atome avant qu'il ne s'arrête est donnée par une formule classique de terminale. Elle est égale au carré de la vitesse initiale divisée par deux fois la décélération subie. On obtient ainsi $L = 0,5 \text{ m}$. On peut donc ainsi, dans un laboratoire, sur une distance de l'ordre du mètre, arrêter un jet d'atomes avec un faisceau laser approprié. Evidemment, au fur et à mesure que les atomes sont ralentis, à cause de l'effet Doppler, ils sortent de résonance. Il faut donc modifier la fréquence du faisceau laser ou modifier la fréquence des atomes pour maintenir la condition de résonance et conserver la force à sa valeur maximale tout au long du processus de décélération.

Ralentir les atomes consiste à diminuer leur vitesse moyenne. Par contre la dispersion des valeurs de la vitesse autour de la valeur moyenne demeure en général inchangée. Il faut en fait faire une distinction très claire entre le mouvement d'ensemble caractérisé par la vitesse moyenne et le mouvement d'agitation désordonnée autour de la valeur moyenne de la vitesse. En physique, c'est cette vitesse d'agitation désordonnée qui caractérise la température. Plus un milieu est chaud, plus les vitesses d'agitation désordonnée de ses constituants sont élevées. Refroidir un système, cela veut dire diminuer les vitesses d'agitation désordonnée de ses constituants. Comment peut-on refroidir des atomes avec des faisceaux laser ?

Refroidissement Laser Doppler

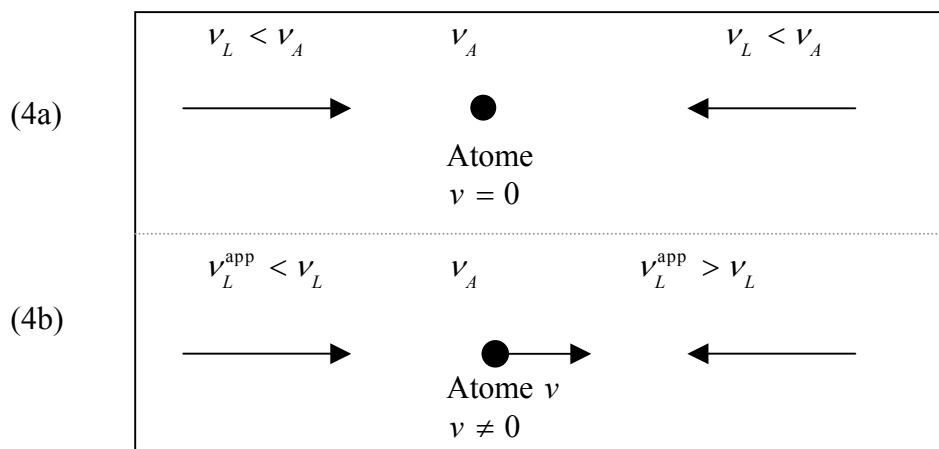


Figure 4 : Principe du mécanisme de refroidissement laser par effet Doppler. Pour un atome au repos (figure 4a) les deux forces de pression de radiation s'équilibrent exactement. Pour

un atome en mouvement (figure 4b), la fréquence apparente de l'onde se propageant en sens opposé augmente et se rapproche de résonance. Elle exerce une force de pression de radiation plus grande que celle de l'onde qui se propage dans le même sens que l'atome et dont la fréquence apparente, diminuée par effet Doppler, s'éloigne de résonance.

Le mécanisme de refroidissement laser le plus simple utilise l'effet Doppler et a été proposé au milieu des années 70 par Hansch, Schawlow, Wineland et Dehmelt. L'idée est simple : l'atome est éclairé non plus par une seule onde laser, mais par deux ondes laser se propageant dans des sens opposés. Ces deux ondes laser ont même intensité, et même fréquence ν_L , cette fréquence ν_L étant légèrement inférieure à celle, ν_A , de la transition atomique. Que se passe-t-il alors ? Si l'atome est immobile, avec donc une vitesse nulle, $v = 0$, il n'y a pas d'effet Doppler. Dans ce cas, les deux faisceaux laser ont la même fréquence apparente. Les forces qu'ils exercent ont même module et des signes opposés. La force de pression de radiation venant de la gauche et la force de pression de radiation venant de la droite s'équilibrent donc exactement et l'atome n'est soumis à aucune force. Si l'atome se déplace vers la droite, avec une vitesse v non nulle, à cause de l'effet Doppler, la fréquence de l'onde qui se propage en sens opposé apparaît plus élevée. Cette fréquence apparente est ainsi augmentée et se rapproche de résonance. Le nombre de photons absorbés est alors plus élevé et la force augmente. Par contre, l'onde qui se propage dans le même sens que l'atome a sa fréquence apparente qui est diminuée par effet Doppler et qui s'éloigne donc de résonance. Le nombre de photons absorbés est alors moins élevé et la force diminue. A cause de l'effet Doppler, les deux forces de pression de radiation ne s'équilibrent plus. C'est la force opposée à la vitesse qui l'emporte et l'atome est ainsi soumis à une force globale non nulle, opposée à sa vitesse. Cette force globale F peut être écrite pour une vitesse v assez faible sous la forme $F = -\alpha v$ où α est un coefficient de friction. Autrement dit, l'atome qui se déplace dans cette configuration de deux faisceaux laser se propageant dans des sens opposés est soumis à une force de friction opposée à sa vitesse. Il se retrouve dans un milieu visqueux, que l'on appelle une *mélasse optique* par analogie avec un pot de miel. Sous l'effet de cette force, la vitesse de l'atome va être amortie et tendre vers zéro.

Refroidissement Sisyphé

L'étude théorique du mécanisme de refroidissement laser Doppler permet de prédire les températures qui pourraient être obtenues par un tel mécanisme et qu'on trouve de l'ordre de quelques centaines de microkelvin soit quelques 10^{-4} K. Ce sont des températures très basses comparées à la température ordinaire qui est de l'ordre de 300 K. En fait, quand, à la fin des années 80, on a pu mesurer ces températures de manière plus précise, on s'est aperçu, et ce fut une réelle surprise, que les températures mesurées étaient 100 fois plus basses que prévues, ce qui signifiait que d'autres mécanismes étaient en jeu. C'est l'un deux, le refroidissement *Sisyphé* que nous avons, mon collègue Jean Dalibard et moi-même, identifié et étudié en détail.

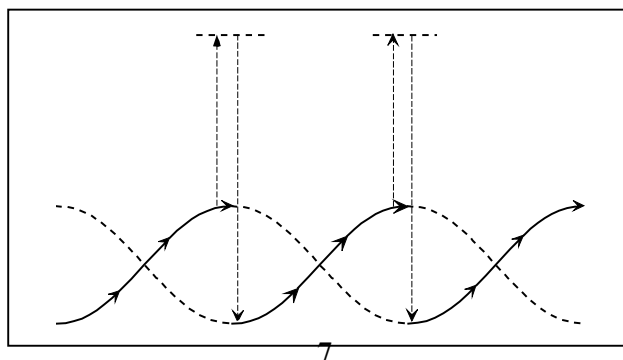


Figure 5 : l'effet Sisyphe

Sans entrer dans les détails d'un tel mécanisme, essayons d'en donner une idée générale. Les expériences de refroidissement laser utilisent des paires d'ondes laser se propageant dans des sens opposés (voir par exemple la figure 4). Ces ondes interfèrent et l'onde résultante a donc une intensité et une polarisation qui varient périodiquement dans l'espace. Or, on peut montrer que les niveaux d'énergie d'un atome sont légèrement déplacés par la lumière, d'une quantité proportionnelle à l'intensité lumineuse et qui dépend de la polarisation lumineuse. De plus, chaque atome possède en général plusieurs « sous-niveaux » d'énergie dans son état fondamental, qui correspondent chacun à une valeur différente d'une grandeur physique qui, comme l'énergie, est quantifiée. En l'occurrence, il s'agit ici du moment cinétique, l'atome pouvant être considéré comme une petite toupie qui tourne sur elle-même. La figure 5 représente deux tels sous-niveaux dont les énergies sont modulées dans l'espace sous l'effet de la lumière. L'atome en mouvement se déplace donc dans un paysage de collines et de vallées de potentiel, paysage qui change suivant le sous-niveau dans lequel il se trouve. Considérons alors un atome se déplaçant vers la droite et initialement au fond d'une vallée de potentiel, dans un certain sous-niveau (Fig.5). Cet atome gravit la colline de potentiel et atteint le sommet de cette colline où il peut avoir une probabilité importante d'absorber et d'émettre un photon, processus à l'issue duquel il va se retrouver dans l'autre sous-niveau d'énergie, au fond d'une vallée. Le même scénario peut alors se reproduire, l'atome gravissant à nouveau une colline de potentiel avant d'atteindre le sommet et d'être transféré dans l'autre sous-niveau au fond d'une vallée, et ainsi de suite... Comme le héros de la mythologie grecque, l'atome est ainsi condamné à recommencer sans cesse la même ascension, perdant à chaque fois une partie de son énergie cinétique. Au bout d'un certain temps, il est tellement épuisé qu'il n'arrive plus à gravir les collines et se retrouve pris au piège au fond d'un puits. L'étude théorique et la comparaison avec les résultats expérimentaux ont conforté la réalité de ce mécanisme de refroidissement qui permet d'atteindre le microkelvin, c'est-à-dire une température de 10^{-6} K. Nous avons aussi mis au point au laboratoire d'autres méthodes, que je n'ai pas le temps d'approfondir aujourd'hui, qui permettent d'aller encore plus loin et d'atteindre le nanokelvin, c'est-à-dire 10^{-9} K, un milliardième de Kelvin.

À de telles températures, les vitesses des atomes sont de l'ordre du cm/s voire du mm/s alors qu'à température ordinaire, elles sont de l'ordre du km/s. Ces méthodes de refroidissement ont donc permis d'assagir considérablement le mouvement d'agitation désordonnée des atomes, de les rendre presque immobiles. Mentionnons également, sans entrer dans le détail des phénomènes, qu'on peut confiner les atomes dans une petite région de l'espace, appelée piège, grâce à l'utilisation de gradients d'intensité lumineuse ou de gradients de champ magnétique.

Description de quelques applications

Les horloges atomiques

$$\Delta \nu$$

$$\nu_0$$

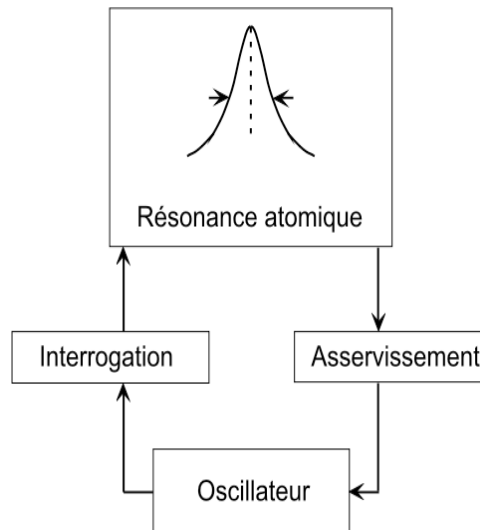


Figure 6 : Principe d'une horloge atomique

Les applications des atomes froids et les nouvelles perspectives qu'ils ouvrent sont essentiellement liées au fait qu'ils sont animés d'une très faible vitesse. Cette particularité permet de les observer pendant une durée beaucoup plus longue. Or, en physique, une mesure est d'autant plus précise que le temps d'observation est plus long. On comprend très bien alors que, grâce à l'extrême précision des mesures pouvant être faites sur des atomes ultrafroids, des progrès ont pu être réalisés, dans la conception des horloges notamment. Rappelons tout d'abord en quoi consiste une horloge. C'est essentiellement un oscillateur, par exemple un quartz qui oscille à une certaine fréquence. Cependant, la fréquence d'un quartz livré à lui-même, fluctue au cours du temps. Elle accélère ou ralentit. Pour réaliser une horloge stable, il est donc nécessaire d'empêcher sa fréquence de dériver. Pour ce faire, on va maintenir la fréquence du quartz égale à la fréquence centrale d'une raie atomique. Le principe de cette opération est schématisé sur la figure 6. Un oscillateur, piloté par le quartz, délivre une onde électromagnétique de même fréquence ν que la fréquence d'oscillation du quartz. Cette onde permet une « interrogation » des atomes utilisés pour stabiliser l'horloge. En l'envoyant sur les atomes et en balayant la fréquence ν du quartz, on observe une « résonance » quand ν coïncide avec la fréquence $\nu_0 = (E_b - E_a) / h$ correspondant à l'écart d'énergie $E_b - E_a$ entre deux niveaux d'énergie de cet atome. Un dispositif « d'asservissement » ajuste alors en permanence la fréquence ν du quartz pour la maintenir au centre de la raie atomique. On stabilise ainsi ν en forçant ν à rester égal à ν_0 . En fait, c'est l'atome de césium qui est utilisé pour définir l'unité de temps, la seconde. Par convention internationale, la seconde correspond à 9 192 631 770 périodes d'oscillation $T_0 = 1 / \nu_0$, où ν_0 est la fréquence correspondant à une certaine transition reliant deux sous-niveaux d'énergie de l'état fondamental de l'atome de césium. Cette fréquence ν_0 est universelle. Elle est la même pour tous les atomes de césium, où qu'ils se trouvent. Les raies de résonance atomiques ne sont pas infiniment étroites. Elles ont une « largeur » $\Delta \nu$ (voir figure 6). Plus cette largeur est faible, plus l'asservissement sera efficace, et plus l'horloge sera stable. Or, on peut montrer que la largeur d'une transition atomique reliant deux sous-niveaux de l'état fondamental d'un atome est inversement proportionnelle au temps d'observation T_{obs} . Plus T_{obs} est long, plus la raie est fine. Comme les atomes froids permettent d'allonger la durée de ce temps d'observation et par conséquent de disposer de raies très fines, il est aujourd'hui possible de réaliser des horloges extrêmement précises. Les horloges qui ont été réalisées jusqu'à ces dernières années utilisent des jets d'atomes de

césium se propageant à des vitesses de l'ordre du km/s, dans des appareils dont la longueur de l'ordre du mètre. Le temps d'observation accessible avec de tels systèmes est donc de l'ordre d'une milliseconde. Avec des atomes froids, il a été possible d'allonger ce temps d'observation par un facteur 100 et d'améliorer donc les performances des horloges atomiques par le même facteur. En fait, on n'utilise pas dans ces nouveaux dispositifs un jet horizontal d'atomes ralentis, car ils tomberaient rapidement dans le champ de pesanteur. Dans les nouvelles horloges, les jets atomiques sont verticaux. Plus précisément, les atomes refroidis dans une mélasse optique sont lancés vers le haut au moyen d'une impulsion laser et forment une sorte de « fontaine ». Ils traversent la cavité électromagnétique dans laquelle la résonance atomique est mesurée, une première fois dans leur mouvement ascendant, une seconde fois dans leur mouvement descendant quand ils retombent sous l'effet du champ de pesanteur. Les temps d'observation peuvent atteindre alors quelques dixièmes de seconde et être ainsi de l'ordre de cent fois plus longs que dans les horloges précédentes. De telles horloges à atomes froids ont été réalisées à Paris par un des mes collègues, Christophe Salomon en collaboration avec André Clairon du L.P.T.F.-B.N.M. (Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences et Bureau National de Métrologie). Ils ont pu ainsi mettre au point, avec une fontaine haute de 1m, l'horloge la plus stable et la plus précise jamais réalisée dans le monde. Deux critères permettent de définir la qualité d'une horloge. Le premier, la stabilité, indique la fluctuation relative de fréquence au cours du temps. Elle est de l'ordre de quelques 10^{-16} pour un temps de Moyen-Âge de l'ordre de 10^4 s. Concrètement, cela signifie qu'une horloge atomique qui aurait été mise en marche au début de la création de l'univers ne serait, dix milliards d'années plus tard, désaccordée que de quelques secondes. Le second critère, c'est la précision. Si on réalise deux horloges, leur fréquence coïncide à 10^{-15} près, compte tenu des déplacements de fréquence liés à des effets parasites.

Ces horloges à atomes froids ont de multiples applications : le GPS ("Global Positioning System"), système de positionnement par satellite, la synchronisation des réseaux de télécommunications à haut débit, les tests de physique fondamentale (relativité générale, variation des constantes fondamentales). Pourrait-on encore augmenter leurs performances en réalisant des fontaines plus hautes, de 10 mètres par exemple ? En fait, un tel projet ne serait pas réaliste car le temps d'observation ne croît que comme la racine carrée de la hauteur et il faudrait blinder le champ magnétique terrestre (qui peut déplacer la fréquence de l'horloge) sur des distances de plus en plus grandes. La solution qui s'impose alors de manière évidente consiste à se débarrasser de la gravité et c'est la raison pour laquelle nous nous sommes engagés en France dans des expériences de microgravité depuis 1993. Ces expériences se déroulent à bord d'un avion avec lequel le pilote effectue plusieurs paraboles d'une vingtaine de secondes chacune. Pour ce faire, le pilote accélère l'avion à 45° en phase ascendante, puis coupe brutalement les gaz. Pendant les 20 secondes qui suivent l'avion est en chute libre et sa trajectoire est une parabole. A l'intérieur de l'avion, les objets flottent et ne tombent plus sur les parois de l'avion. Tout se passe comme s'il n'y avait plus de gravité. Puis le pilote remet les gaz et redresse la trajectoire de l'avion pour se remettre en phase ascendante et effectuer une nouvelle parabole. On a donc pu ainsi effectuer des tests sur le comportement des divers composants de l'expérience dans ces conditions, et leurs résultats ont montré qu'il est possible de réaliser des horloges à atomes froids en apesanteur. A la suite de ces tests, un accord a été signé pour prolonger l'expérience et placer une horloge atomique à atomes froids à bord de la station spatiale internationale qui doit être mise en orbite en 2004.

Les interférences atomiques

Depuis les travaux de Louis de Broglie, nous savons qu'à toute particule de masse M est associée une onde qu'on appelle « l'onde de de Broglie » dont la longueur d'onde λ_{dB} ,

donnée par l'équation $\lambda_{dB} = h/Mv$, est inversement proportionnelle à la vitesse v . Plus la vitesse est faible, plus la longueur d'onde de de Broglie est grande. Les atomes froids qui sont animés de faibles vitesses ont donc de grandes longueurs d'onde de de Broglie et leur comportement ondulatoire sera par suite beaucoup plus facile à mettre en évidence. Considérons par exemple l'expérience des fentes de Young réalisée avec des ondes lumineuses. Une source lumineuse éclaire un écran percé d'une fente. La lumière issue de cette fente arrive sur une plaque percée de deux fentes en dessous de laquelle est placé un écran. L'onde lumineuse suit ainsi deux trajets passant par l'une ou l'autre de ces fentes avant d'arriver sur l'écran d'observation qui enregistre l'intensité lumineuse. Selon la position du point d'observation sur cet écran, les deux ondes qui arrivent en ce point et qui sont passées par les deux trajets possibles se superposent, en phase ou en opposition de phase. L'intensité de l'onde résultante varie donc entre une valeur élevée et une valeur nulle et on observe ce qu'on appelle « *les franges d'interférence d'Young* ».

Depuis quelques années, plusieurs expériences analogues ont été réalisées, non plus avec des ondes lumineuses, mais avec les ondes de de Broglie associées à des atomes froids. Des physiciens japonais de l'université de Tokyo, le Professeur Fujio Shimizu et ses collègues, ont ainsi réalisé une expérience tout à fait spectaculaire. Elle consiste à laisser tomber en chute libre un nuage d'atomes froids initialement piégés au-dessus d'une plaque percée de deux fentes. Après traversée des deux fentes, les atomes viennent frapper une plaque servant de détecteur et l'on observe une succession d'impacts localisés. Au début, la localisation de ces impacts semble tout à fait aléatoire. Puis, au fur et à mesure que le nombre d'impacts augmente, on constate qu'ils s'accumulent préférentiellement dans certaines zones et on voit apparaître nettement une alternance de franges brillantes avec des impacts très denses et de franges sombres avec très peu d'impacts. Cette expérience illustre parfaitement la dualité onde-corpuscule. Les atomes sont des corpuscules dont on peut observer l'impact localisé sur un écran de détection. Mais en même temps, il leur est associé une onde et c'est l'onde qui permet de calculer la probabilité pour que le corpuscule se manifeste. Comme l'onde associée aux atomes peut passer par les deux fentes de la plaque, elle donne naissance au niveau de l'écran de détection à deux ondes qui interfèrent et qui modulent donc spatialement la probabilité de détection de l'atome. On est là au cœur de la mécanique quantique, de la dualité onde-corpuscule qui régit le comportement de tous les objets physiques.

La condensation de Bose-Einstein

Depuis quelques années, des progrès spectaculaires ont été réalisés dans un autre domaine : la condensation de Bose-Einstein. A température très basse et à densité suffisamment élevée, l'extension spatiale des ondes de de Broglie associée à chaque atome devient plus grande que la distance moyenne entre deux atomes de sorte que les paquets d'ondes se recouvrent et interfèrent. Il apparaît alors un phénomène nouveau, qu'on appelle « *la condensation de Bose-Einstein* » : Tous les atomes se condensent dans le même état quantique, le niveau fondamental du puits qui les contient. Ce phénomène, prévu il y a longtemps par Bose et Einstein, joue un rôle important dans certains fluides, comme l'hélium superfluide. Il a été observé également il y a cinq ans, pour la première fois aux Etats-Unis, sur des systèmes gazeux, formés d'atomes ultrafroids. Il fait actuellement l'objet de nombreuses études, tant théoriques qu'expérimentales dans de nombreux laboratoires.

L'ensemble des atomes condensés dans l'état fondamental du piège qui les contient porte le nom de « condensat ». Tous les atomes sont décrits par la *même* fonction d'onde. On obtient ainsi une onde de matière géante. De tels systèmes quantiques macroscopiques ont des propriétés tout à fait originales : cohérence, superfluidité, qui ont pu être observées et étudiées en grand détail. Plusieurs groupes s'efforcent également d'extraire d'un condensat de Bose-Einstein un faisceau cohérent d'atomes, réalisant ainsi un « laser à atomes », qui peut être

considéré comme l'équivalent, pour les ondes de de Broglie atomiques, des lasers mis au point, il y a trente ans, pour les ondes électromagnétiques . Quand de telles sources cohérentes d'ondes de de Broglie atomiques deviendront opérationnelles, on peut raisonnablement penser qu'elles stimuleront un développement spectaculaire de nouveaux champs de recherche, comme l'interférométrie atomique, la lithographie atomique.

Conclusion

L'étude des propriétés de la lumière et de ses interactions avec la matière a fait faire à la physique des progrès fantastiques au cours du XXe siècle. Ces avancées ont eu plusieurs retombées. Elles ont donné lieu à une nouvelle compréhension du monde microscopique. La mécanique quantique est née. La dualité onde-corpuscule est maintenant une évidence. De nouvelles sources de lumière, les lasers, sont apparues.

J'espère vous avoir convaincu que la lumière n'est pas seulement une source d'information sur les atomes mais également un moyen d'agir sur eux. On sait maintenant « manipuler » les divers degrés de liberté d'un atome, contrôler sa position et sa vitesse. Cette maîtrise accrue de la lumière et de la matière ouvre aujourd'hui de nouvelles perspectives à la recherche . De nouveaux objets d'étude sont apparus, comme les ondes de matière, les lasers à atomes, les systèmes quantiques dégénérés, dont les applications, encore insoupçonnées, verront le jour demain, au XXIe siècle.

Pour en savoir plus :

<http://www.lkb.ens.fr/recherche/atfroids/tutorial/welcome.htm>

De la lumière laser aux atomes ultrafroids.

Des explications simples sur le refroidissement et le piégeage d'atomes par laser et les applications de ce champ de recherche.

<http://www.ens.fr/cct>

Le cours de Claude Cohen-Tannoudji au Collège de France

Etude et analyse des travaux de recherche récents sur la Condensation de Bose-Einstein

L'auteur remercie Nadine Beaucourt pour son aide dans la rédaction de ce texte à partir de l'enregistrement de la conférence et Nicole Neveux pour la mise en forme du manuscrit.