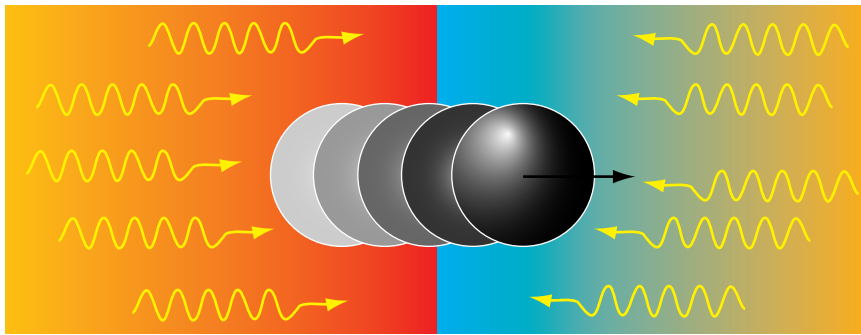




6. PRINCIPE DU REFROIDISSEMENT DOPPLER. Un atome est éclairé par deux faisceaux laser identiques mais qui se propagent en sens inverses. La fréquence des lasers est choisie légèrement inférieure à la fréquence qu'absorbent les atomes au repos. Quand un atome bouge, il voit la fréquence de l'onde opposée à son mouvement augmentée (décalée vers le bleu pour la lumière visible, moitié droite de l'image) : il absorbe alors les photons de cette onde. Inversement, il voit le faisceau qui se propage dans le même sens que lui est vu à une fréquence inférieure (lumière décalée vers le rouge (à gauche) : l'atome absorbe beaucoup moins les photons de ce faisceau. Ainsi apparaît un déséquilibre entre les pressions de radiation des faisceaux, ce qui ralentit l'atome. Ce mécanisme est très efficace. À trois dimensions, les atomes ainsi refroidis restent englués dans les faisceaux et forment une mélasse optique.

éclairés par de la lumière à une longueur d'onde égale à 0,852 micromètre, la vitesse de recul est de 3,5 millimètres par seconde.

Toutefois un nuage d'atomes froids n'est pas homogène : c'est précisément la répartition des vitesses des différents atomes du nuage qui détermine la température ; plus les vitesses des divers atomes du nuage sont différentes, plus la température est élevée. Or cette diversité des vitesses atomiques est associée par la mécanique quantique à une indétermination sur la position des particules : c'est ce que l'on nomme la longueur de cohérence. Celle-ci correspond à la distance sur laquelle le centre de masse d'un atome du nuage est délocalisé, c'est aussi la dimension de la zone sur laquelle les propriétés ondulatoires du paquet d'onde atomique peuvent se manifester.

En refroidissant un gaz d'atomes, on sait préparer des échantillons tels que la longueur de cohérence soit supérieure à la longueur d'onde utilisée pour refroidir les atomes. Cette propriété ouvre la voie à de nouvelles expériences. Dans notre laboratoire, nous avons obtenu par refroidissement laser une température de seulement trois nanokelvins (deux milliardièmes de degré au-dessus du zéro absolu, égal à $-273,15^\circ\text{C}$), qui correspond à une longueur de cohérence de sept micromètres, bien supérieure à la longueur d'onde utilisée, égale à 0,85 micromètre.

En pratique, pour préparer un paquet d'atomes ultrafroids, nous procédons en deux étapes que nous allons examiner : d'abord nous capturons 100 millions d'atomes de césium dans

une cellule à l'aide d'un piège magnéto-optique, qui les confine dans un volume de quelques millimètres cubes et les refroidit jusqu'à une température de cinq microkelvins ; comme cette température est encore bien trop élevée pour observer les oscillations de Bloch, nous utilisons ensuite une technique de «refroidissement subrecul», avec laquelle nous obtenons une température de 12 nanokelvins.

Dans le piège magnéto-optique (voir la figure 1), la capture des atomes est assurée par le refroidissement Doppler, proposé en 1975 par Theodore Hänsch et Arthur Schawlow, de l'Université de Stanford. Ce refroidissement englué les atomes dans le volume de recouvrement des faisceaux, que l'on nomme mélasse optique. L'idée est de régler la fréquence des lasers, de sorte qu'ils n'apportent pas une énergie exactement égale à la différence entre le niveau fondamental et le premier niveau excité de l'atome, mais légèrement inférieure.

Examinons le principe de l'expérience à une dimension. Si l'atome est au repos, les deux pressions de radiation des faisceaux opposés sont égales, et elles se compensent parfaitement. Si l'atome bouge, il voit la fréquence du faisceau opposé à son mouvement augmentée à cause de l'effet Doppler (tout comme le son d'une ambulance qui s'approche de nous paraît plus aigu) et il absorbe davantage de photons. En revanche, il absorbe moins le faisceau qui se dirige dans la direction de son propre mouvement, car l'effet Doppler réduit l'énergie des photons vus par l'atome. Il s'ensuit un déséquilibre entre les deux

pressions de radiation opposées, et la vitesse de l'atome est amortie à une dizaine de centimètres par seconde.

Un autre type de refroidissement, encore plus efficace, prend alors le relais, abaissant la température de la mélasse optique à cinq microkelvins, bien au-dessous de la limite obtenue par refroidissement Doppler. Variante astucieuse de la mélasse optique, ce mécanisme a été proposé théoriquement en 1986 par notre ami Jean Dalibard et mis en œuvre pour la première fois en 1987 par les équipes de Steven Chu et David Pritchard : un champ magnétique non homogène dans l'espace (appliqué par les deux bobines, de part et d'autre de la cellule) et des polarisations convenables pour les faisceaux de mélasse permettent de créer, outre la force de viscosité décrite précédemment, une force de rappel vers le point où le champ magnétique est nul, au centre des faisceaux. Cette force accumule les atomes froids dans un volume de quelques millimètres cubes.

Enfin on coupe le piège et on procède au refroidissement subrecul. Dans ce cas, l'effet (optique) est analogue à celui que l'on obtient quand on fait vibrer une plaque sur laquelle on a versé une poudre légère : les particules de la poudre s'accumulent aux endroits où la plaque ne vibre pas. Dans nos montages, ce sont les atomes qui s'accumulent à très faible vitesse, à une température de 12 nanokelvins. L'étude des oscillations de Bloch avec les atomes peut commencer.

Les oscillations d'atomes ultrafroids

Les atomes refroidis permettent de sonder les propriétés des potentiels qui varient sur une distance de l'ordre de la longueur d'onde des lasers. Par exemple, quand on illumine un nuage d'atomes avec deux faisceaux lasers opposés, de même longueur d'onde, les atomes sont soumis à un potentiel lumineux (l'analogue du potentiel électrique qui agit sur les électrons dans un conducteur) qui est proportionnel à l'intensité de la lumière divisée par le désaccord, c'est-à-dire la différence d'énergie entre la lumière laser et la longueur d'onde qu'absorbent les atomes (cette fois, on choisit un désaccord très grand). En raison de l'interférence entre les deux faisceaux laser opposés, l'intensité du potentiel lumineux est périodique, et la période est la moitié de la période de l'onde lumineuse.

Toutefois, nous avons vu que les atomes qui absorbent les photons les réémettent dans une direction aléatoire. Ce phénomène est gênant, car il conduit à une dispersion des vitesses atomiques qui rend la longueur de cohérence inférieure au pas du réseau lumineux. Il joue le même rôle pour les atomes que les collisions avec les défauts pour les électrons dans un cristal. Toutefois, la cadence des processus d'émission spontanée est proportionnelle à l'intensité lumineuse et inversement proportionnelle au carré du désaccord. On peut donc la réduire en augmentant le désaccord. Dans l'expérience que nous avons effectuée, nous utilisons des faisceaux tels que l'émission spontanée ne soit que d'un photon toutes les 250 millisecondes, ce qui est un temps bien supérieur à la durée de l'expérience (25 millisecondes environ).

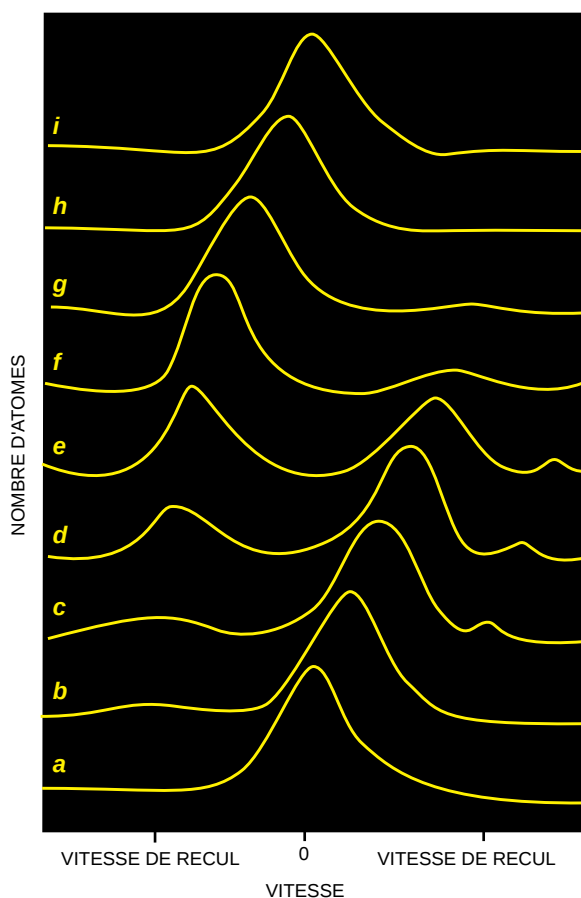
Le comportement de ces atomes froids ressemble ainsi beaucoup à celui

des électrons dans un potentiel périodique sans défaut. En outre, les nuages d'atomes refroidis présentent de nombreux avantages. D'une part, le potentiel qui agit sur les atomes est induit par une onde lumineuse stationnaire, de sorte qu'il est parfaitement périodique, sans défaut, et ne contient aucune impureté. D'autre part, on contrôle très bien l'amplitude et la présence du potentiel (contrairement au potentiel ionique des cristaux, l'expérimentateur l'allume ou l'éteint à sa guise). Grâce au refroidissement subrecul, l'état initial du système est connu très précisément. Enfin à la différence des électrons, les atomes (électriquement neutres) n'interagissent pas entre eux, aux densités considérées.

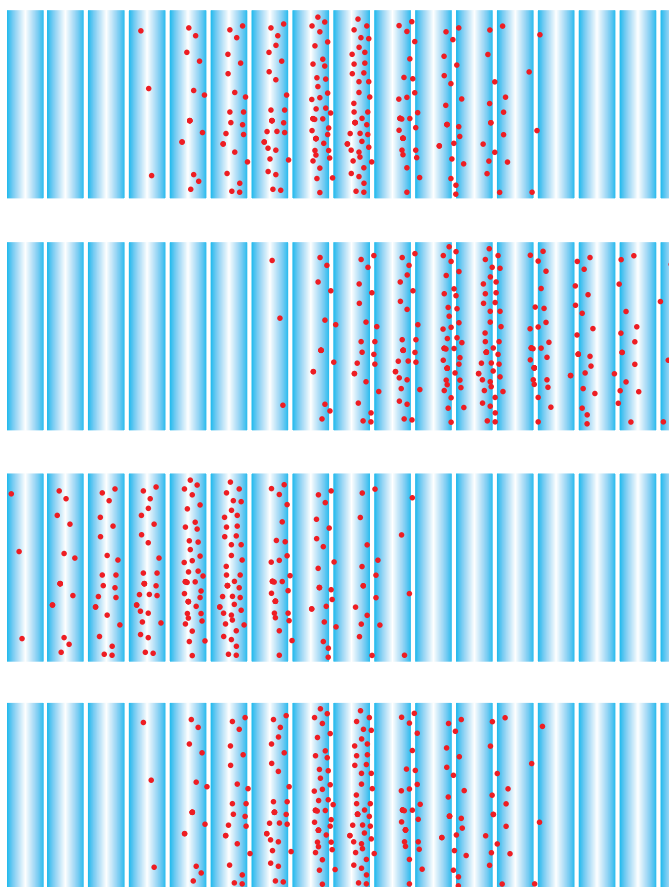
Dans les expériences que nous avons effectuées avec Ekkehard Peik, Jakob Reichel, Isabelle Bouchoule et Yvan Castin, les atomes sont initialement refroidis pendant une dizaine de millisecondes jusqu'à 12 nanokelvins. À cette

température, les vitesses des atomes sont inférieures à 0,87 millimètre par seconde. On allume alors l'onde stationnaire, c'est-à-dire que l'on applique le potentiel stationnaire en éclairant le nuage par deux lasers opposés, et l'on observe le paquet d'onde sur huit périodes spatiales.

Puis on applique une force constante afin d'accélérer les atomes pendant un temps variable, et l'on coupe ensuite brusquement la lumière de l'onde stationnaire, pour mesurer la répartition des vitesses des atomes. Les atomes de césium étant des particules neutres, on ne peut appliquer un champ électrique homogène pour produire une force constante comme pour les électrons. On peut utiliser la force de pesanteur, comme l'ont fait des physiciens de l'Université Yale après nos expériences, mais, à Paris, nous avons préféré produire une force artificielle, d'origine inertielle, ajustable à volonté : dans l'un des bras de



7. LES OSCILLATIONS DE BLOCH ont été observées à l'aide d'atomes ultrafroids piégés dans un réseau de lumière. On a mesuré (à gauche) la probabilité qu'ont les atomes d'avoir une vitesse particulière en fonction du temps à partir duquel on applique une force. Par exemple, la courbe inférieure, en forme de cloche (a), indique que la plupart des atomes sont initialement immobiles. Sous l'action de la force, la répartition des vitesses se décale vers la droite jusqu'à une valeur particulière, nommée vitesse de recul (b à d). Au voisinage de cette valeur, l'onde de matière associée aux atomes est réfléchi et la



répartition des vitesses se dédouble (e) : chaque atome a une probabilité d'être réfléchi qui augmente progressivement. Finalement la totalité de l'onde de matière est réfléchi (f à h). Après une période complète de huit millisecondes (i), on retrouve la répartition initiale des vitesses. Les oscillations de Bloch sont la répétition de ce phénomène. À droite, on a représenté le mouvement correspondant de l'onde de matière dans le réseau de lumière, de période égale à 0,47 micromètre : c'est également une oscillation, mais dans l'espace.