

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).

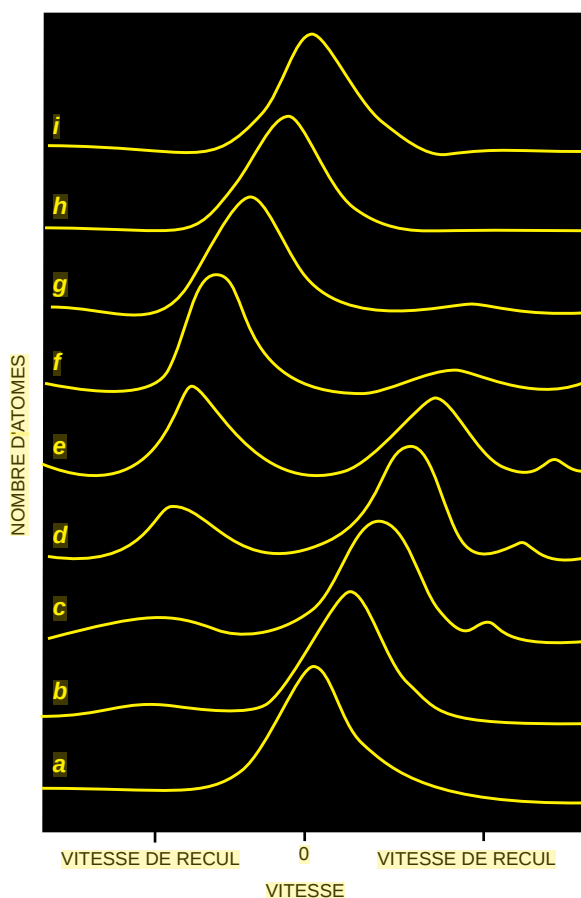
Le comportement de ces atomes froids ressemble ainsi beaucoup à celui

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.

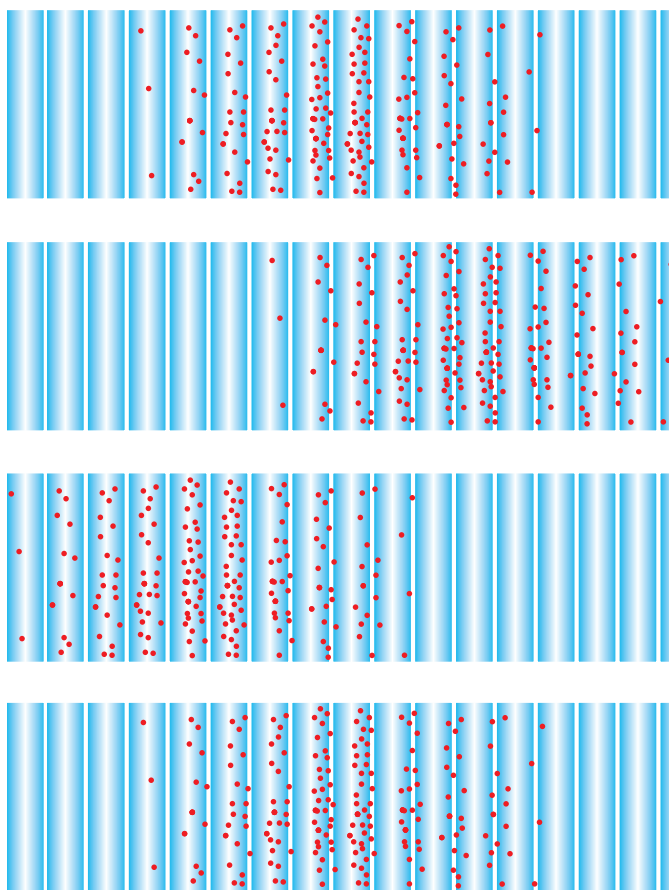
Dans les expériences que nous avons effectuées avec Ekkehard Peik, Jakob Reichel, Isabelle Bouchoule et Yvan Castin, les atomes sont initialement refroidis pendant une dizaine de millisecondes jusqu'à 12 nanokelvins. À cette

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.

l'onde stationnaire, nous avons introduit un décalage de fréquence variable. Plus précisément, en changeant la fréquence de la lumière dans une des directions, on modifie la figure d'interférence, donc le potentiel. Ainsi la lumière n'est stationnaire que dans un référentiel qui se déplace à vitesse uniformément accélérée. Or, selon le principe de relativité, les atomes sont soumis dans ce référentiel à une force d'inertie constante, en plus du potentiel périodique. Cette force se règle aisément, et c'est ainsi que nous avons observé des périodes de Bloch variées, comprises entre une et huit millisecondes.

Le résultat essentiel est présenté sur la figure 7. Initialement les atomes forment un nuage dont les vitesses sont nulles en moyenne : le nuage est immobile. Puis on applique la force, et les atomes sont mis en mouvement. Lorsque la vitesse approche une valeur qui satisfait la condition de Bragg

(vitesse égale à la vitesse de recul), l'onde de matière se dédouble ; une autre onde apparaît, symétrique de la première. Elle se propage donc à une vitesse opposée. Progressivement la première onde s'atténue au profit de l'onde symétrique, qui correspond à une réflexion de la première onde. Après une période de Bloch exactement, on retrouve la répartition initiale des vitesses : le nuage est à nouveau immobile. Si la force appliquée demeure, le phénomène oscillatoire se répète : nous avons observé jusqu'à une centaine d'oscillations successives.

L'effet observé est une réflexion de Bragg de l'onde atomique par le potentiel optique. L'onde de matière est réfléchiée par la structure lumineuse périodique, c'est-à-dire une situation symétrique de la réflexion de Bragg ordinaire, où l'onde lumineuse est réfléchiée par une structure matérielle périodique.

À l'oscillation des vitesses correspond naturellement une oscillation de

la position moyenne des atomes. Dans nos expériences, l'amplitude de ce mouvement est de quelques micromètres, de sorte que la position moyenne s'étend sur plusieurs périodes du potentiel. En pratique, cet effet reste néanmoins difficile à observer, car il est masqué par la répartition initiale du nuage.

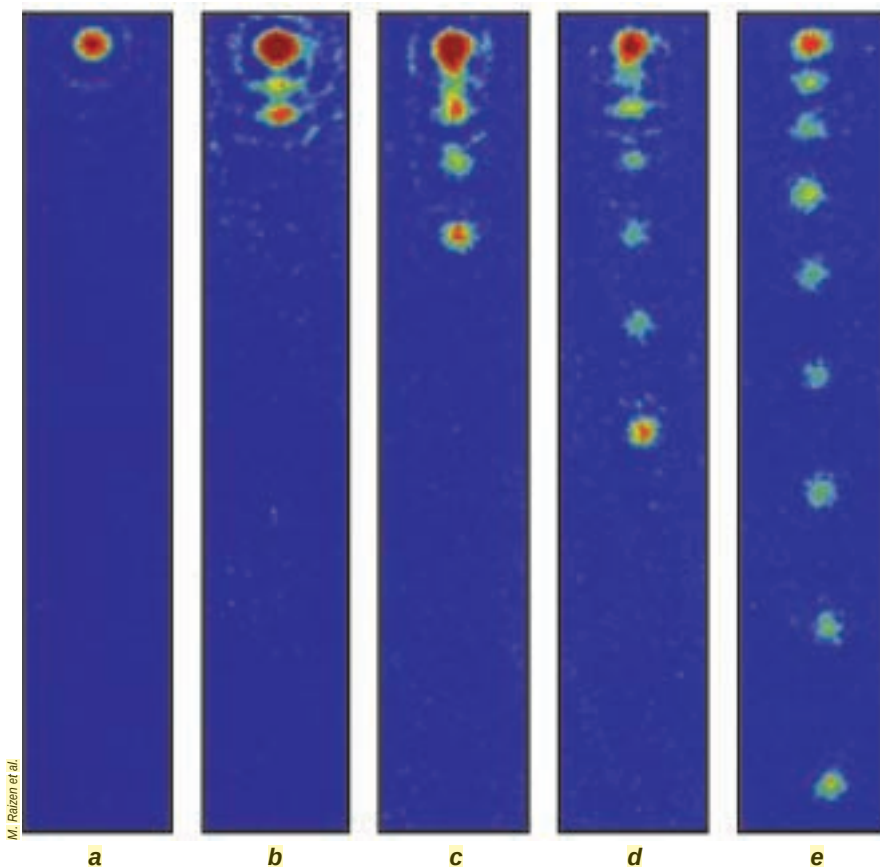
Les expériences d'Austin

Ces expériences montrent l'intérêt des atomes pour l'étude des propriétés de transport dans les réseaux. Les systèmes atomiques ont également été utilisés par Mark Raizen et ses collègues de l'Université d'Austin, qui ont mis en évidence les «échelles de Wannier-Stark atomiques». Cet effet est la contrepartie des oscillations de Bloch, mais dans l'espace des fréquences : les atomes deviennent capables d'absorber ou d'émettre de l'énergie à des fréquences qui sont des multiples de l'inverse de la période de Bloch.

L'existence d'une telle échelle fut initialement controversée, et elle n'a été établie qu'à la fin des années 1980. La méthode employée par l'équipe d'Austin est d'ajouter au potentiel périodique (les ondes stationnaires lumineuses) une faible modulation de phase sinusoïdale, qui le fait vibrer à une fréquence ajustable. Les atomes sont d'abord préparés dans leur niveau d'énergie inférieure, puis on accélère le potentiel afin de produire la force constante, et l'on mesure la proportion d'atomes entraînés par ce potentiel.

Lorsque la fréquence de la faible modulation du potentiel correspond à l'écart en énergie des niveaux de l'échelle de Wannier-Stark, les atomes passent dans des états d'énergie supérieure, et ils ne sont plus entraînés par le potentiel. L'équipe d'Austin observe alors une forte raréfaction d'atomes qui ont survécu à l'accélération imposée. Les autres atomes sont «semés en chemin». Lorsque la fréquence de la modulation n'est pas résonnante, il n'y a pas de perte d'atomes.

Enfin, avec les mêmes types de systèmes atomiques, les équipes de Paris et de Yale ont étudié les processus de fuite nommés transition de Landau-Zener, qui sont équivalents aux phénomènes de claquage électrique : pour chaque oscillation de Bloch, il existe une probabilité que l'atome ou l'électron soit transmis au lieu d'être réfléchi. Cette probabilité dépend de la force appliquée et de la profondeur du



8. CE LASER À ATOMES est pulsé à la fréquence de Bloch. Un nuage d'atomes de rubidium formant un condensat de Bose-Einstein (a) est placé dans un réseau de lumière vertical (non représenté) ; on obtient alors une onde de matière délocalisée sur un grand nombre de minima du potentiel. L'intensité de ce potentiel lumineux est ajustée de sorte que, par effet tunnel, une partie des ondes de matière fuit à travers les maxima de potentiel et tombe sous l'effet de la gravité. Ces ondes de matière toutes émises en phase par les minima interfèrent de façon constructive à des intervalles de temps réguliers, séparés par la période de Bloch (b, c, d, e). L'espacement croissant des paquets atomiques résulte de l'accélération de la pesanteur. Pour visualiser les bouffées d'atomes, on mesure sur une caméra numérique comment elles absorbent un faisceau laser.