

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.

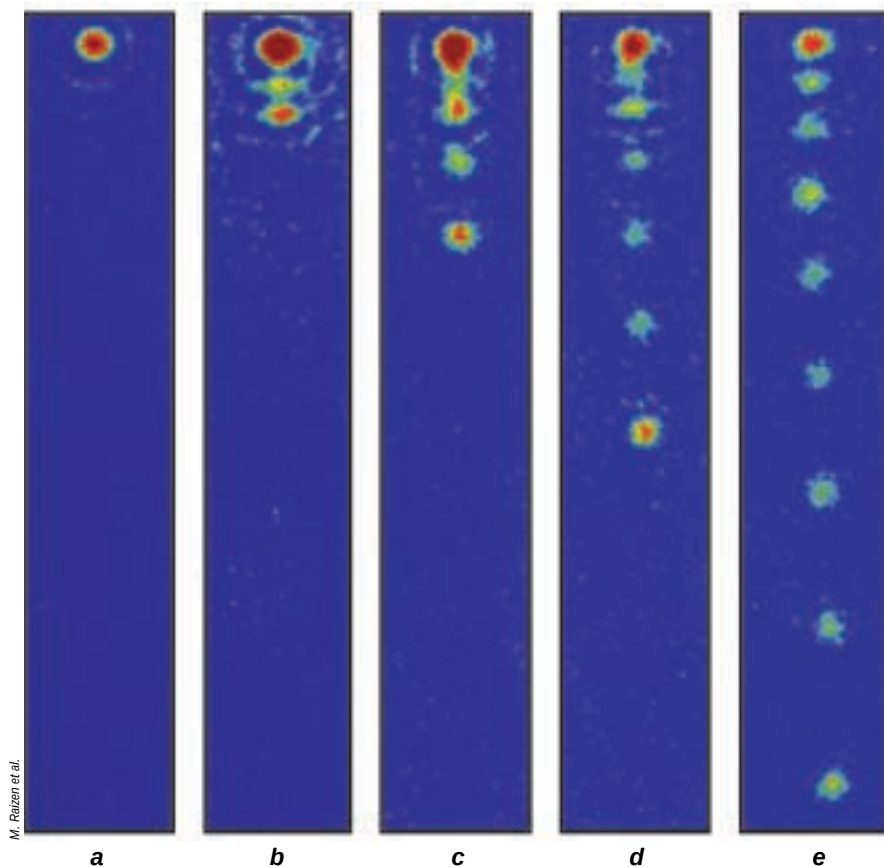
Les expériences d'Austin

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.

potentiel. On découvre alors que le claquage apparaît pour des valeurs de la force bien inférieure à celles que l'on calcule en considérant les atomes comme de petites billes «classiques».

Dans une expérience récemment menée à l'Université Yale, Mark Kasevich et ses collègues ont montré une spectaculaire application de ces oscillations de Bloch aux condensats de Bose-Einstein. La condensation de Bose-Einstein est un phénomène prédit par le physicien indien Satyendranath Bose et par Albert Einstein, en 1925, qui consiste en une accumulation d'un grand nombre d'atomes dans un même état quantique : l'état fondamental du piège. Tous les atomes perdent alors leur individualité et forment une sorte de «superatome», ayant la même position, la même vitesse et, plus généralement, toutes leurs propriétés physiques identiques. Leur température est alors extrêmement basse.

Un laser à atomes

Les physiciens de Yale ont placé un condensat d'atomes de rubidium dans une onde stationnaire laser verticale. Dans ce cas, la gravité joue le rôle de la force constante qui était induite de manière artificielle dans les expériences précédentes. Les atomes effectuent alors des oscillations de Bloch dans le réseau lumineux et restent confinés dans des sites espacés d'une demi longueur d'onde. En réduisant l'intensité lumineuse, on laisse fuir, par effet tunnel, une faible partie des ondes de matière, qui tombe sous l'action de la gravité. Chaque site se comporte alors comme un petit émetteur d'ondes de matière. Issus d'un même condensat de Bose-Einstein, tous ces émetteurs individuels sont initialement en phase. Ces ondes interfèrent alors constructivement à des instants précis, séparés par la période de Bloch. On obtient un laser à atomes

pulsé, c'est-à-dire une source d'atomes cohérente et brillante (les lasers classiques sont des sources cohérentes et brillantes de photons).

Les oscillations de Bloch des électrons et des atomes diffèrent par bien des ordres de grandeur. Les physiciens s'émerveillent que des systèmes aussi distincts que des atomes dans un champ lumineux et des électrons dans un solide aient des comportements similaires. La similitude des comportements corrobore l'universalité des lois de la physique quantique, et la dualité onde-particule.

Les applications des oscillations de Bloch sont nombreuses. Nous avons proposé, tout d'abord, d'utiliser la formule de Bloch pour déterminer précisément le rapport h/m : la période des oscillations de Bloch est égale à $2h/mg\lambda$, où h est la constante de Planck, m la masse de l'atome que l'on fait osciller et λ la longueur d'onde du laser qui crée le potentiel périodique. On peut aussi mesurer g , l'accélération de la pesanteur. Notre collègue François Biraben prépare cette expérience.

La méthode où l'onde stationnaire est balayée en fréquence permet aussi d'accélérer un gaz d'atomes ultrafroids sans le réchauffer. On pourra l'utiliser pour réaliser une fontaine atomique à partir d'un condensat de Bose-Einstein. De nombreuses autres situations peuvent être étudiées. En modifiant la configuration des faisceaux lumineux, on peut créer des potentiels plus complexes que ceux d'ondes stationnaires. On peut ainsi étudier le transport quantique des particules dans des potentiels quasi périodiques ou désordonnés.

Enfin on peut introduire des processus de relaxation contrôlés et, ainsi, étudier la transition entre les régimes quantiques et classiques. Tous ces exemples montrent que les atomes froids devraient apporter un éclairage nouveau sur le transport quantique.

Christophe SALOMON est directeur de recherche au Laboratoire Kastler-Brossel, à l'École normale supérieure de Paris. Maxime DAHAN est actuellement au Laboratoire Lawrence Berkeley, à Berkeley.

Felix BLOCH, *Zeitschrift für Physik*, vol. 52, p. 555, 1929.

Clarence ZENER, *Proceedings of Royal Society London Ser.*, A145, p. 523, 1934.

E. MENDEZ et G. BASTARD, *Physics Today*, vol. 46, p. 34, 1993.

M. BEN DAHAN, E. PEIK, J. REICHEL, Y. CASTIN et C. SALOMON, *Physics Review Letters*, vol. 76, p. 4 508, 1996.

S.R. WILKINSON, C.F. BHARUCHA, K.W. MADISON, Q. NIU et M.G. RAIZEN, *Physics Review Letters*, vol. 76, p. 4 512, 1996.

B.P. ANDERSON et A.M. KASEVICH, *Science*, vol. 282, p. 1686, 1998.

M. RAIZEN, C. SALOMON et Q. NIU, *New Light on Quantum Transport*, in *Physics Today*, 30 juillet 1997.

Ce magazine vous intéresse !



Vous y trouverez :

- ☐ Sciences-actualités
- ☐ L'actualité en astronomie
- ☐ Les actualités biomédicales
- ☐ Nouvelles de l'environnement
- ☐ Le texte intégral des conférences du samedi
- ☐ Le commentaire des expositions permanentes et temporaires
- ☐ Le programme des activités du Palais de la découverte

Je souscris un abonnement à la

REVUE DU PALAIS DE LA
DÉCOUVERTE

Je joins mon règlement par chèque
à l'ordre du

PALAIS DE LA DÉCOUVERTE
(CCP 9065 48 J PARIS)

Tarif France : 170 F (10 numéros par an)

Tarif étranger : 200 F

par mandat international uniquement
(par avion, supplément de 80 FF)

Abonnement de soutien : 230 F

Nom (M., Mme, Mlle) :

Prénom :

Adresse :

.....

Ville :

Code postal :

Profession :

à retourner avec votre règlement à
Revue du PALAIS DE LA DÉCOUVERTE
Av. Franklin-D.-Roosevelt - 75008 Paris.
Tél. : 01 40 74 80 00