

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.

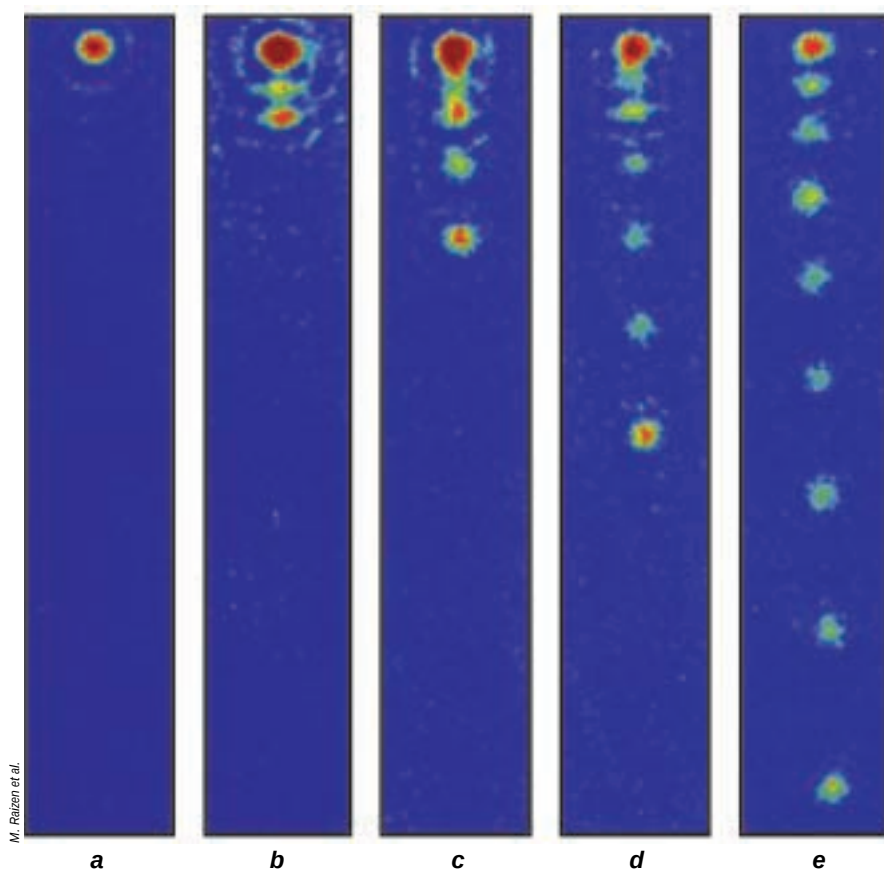
Les expériences d'Austin

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.