



# Les oscillations de Bloch

MAXIME DAHAN • CHRISTOPHE SALOMON

*Dans un champ électrique uniforme, les électrons d'un cristal ont un mouvement oscillant. Cet effet, prédit théoriquement dans les années 1920, n'a été détecté que récemment. On l'a observé pour des atomes ultrafroids piégés par de la lumière.*

La description des circuits électriques est un pont aux ânes de la physique : dès le lycée, on apprend la loi d'Ohm, qui décrit le passage d'un courant dans un matériau conducteur, tel un fil de cuivre. Cette loi stipule que, quand on applique au matériau une différence de potentiel électrique  $U$ , l'intensité  $I$  du courant est reliée à  $U$  par la relation de proportionnalité  $U = RI$ , où  $R$  est la résistance électrique.

Pourquoi cette relation ? Les physiciens du XIX<sup>e</sup> siècle ont supposé que, sous l'action de la différence de potentiel constante, les électrons se déplaçaient en bloc, tous dans le même sens, engendrant un courant constant. Toutefois les pères de la mécanique quantique, au début du XX<sup>e</sup> siècle, ont montré que les électrons ne sont pas de simples petites billes ; dans certaines circonstances, ils présentent des propriétés analogues à celles des vagues à la surface de l'eau. Une équation fondamentale de la mécanique quantique, l'équation de Schrödinger, décrit leur comportement : selon les circonstances, les électrons se comportent comme une bille ou comme une onde.

Le problème particulier des électrons circulant dans un matériau conducteur a été abordé théoriquement dès les premières heures de la mécanique quantique : en 1929, le physicien suisse Félix Bloch (1905-1983) a utilisé la toute nouvelle mécanique pour l'appliquer d'abord aux électrons d'un matériau cristallin. Dans ces systèmes, les électrons sont soumis aux forces électriques

exercées par les ions positifs et négatifs du cristal. Ces ions sont régulièrement ordonnés dans les trois directions de l'espace : de ce fait, le champ électrique où baignent les électrons est périodique, c'est-à-dire invariant par translation (il se répète identique à lui-même quand on le décale d'une période de la structure cristalline).

Bloch calcula que, en raison de cette symétrie du réseau, chaque électron dans le cristal se comporte comme une onde

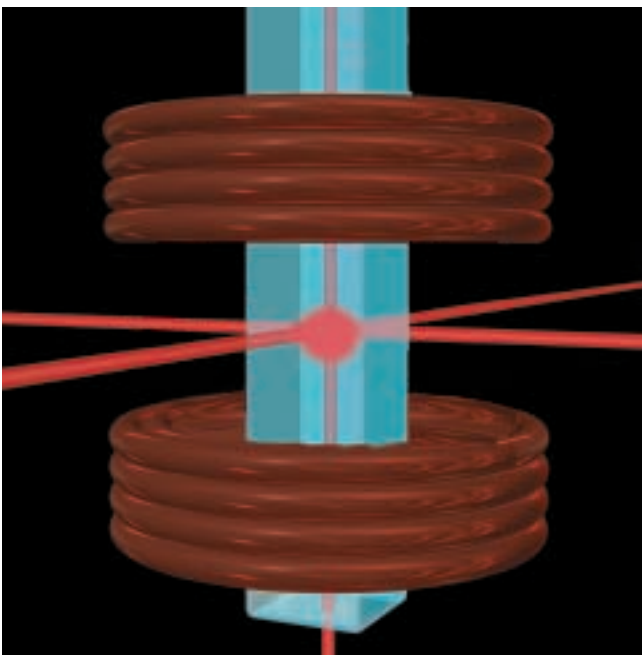
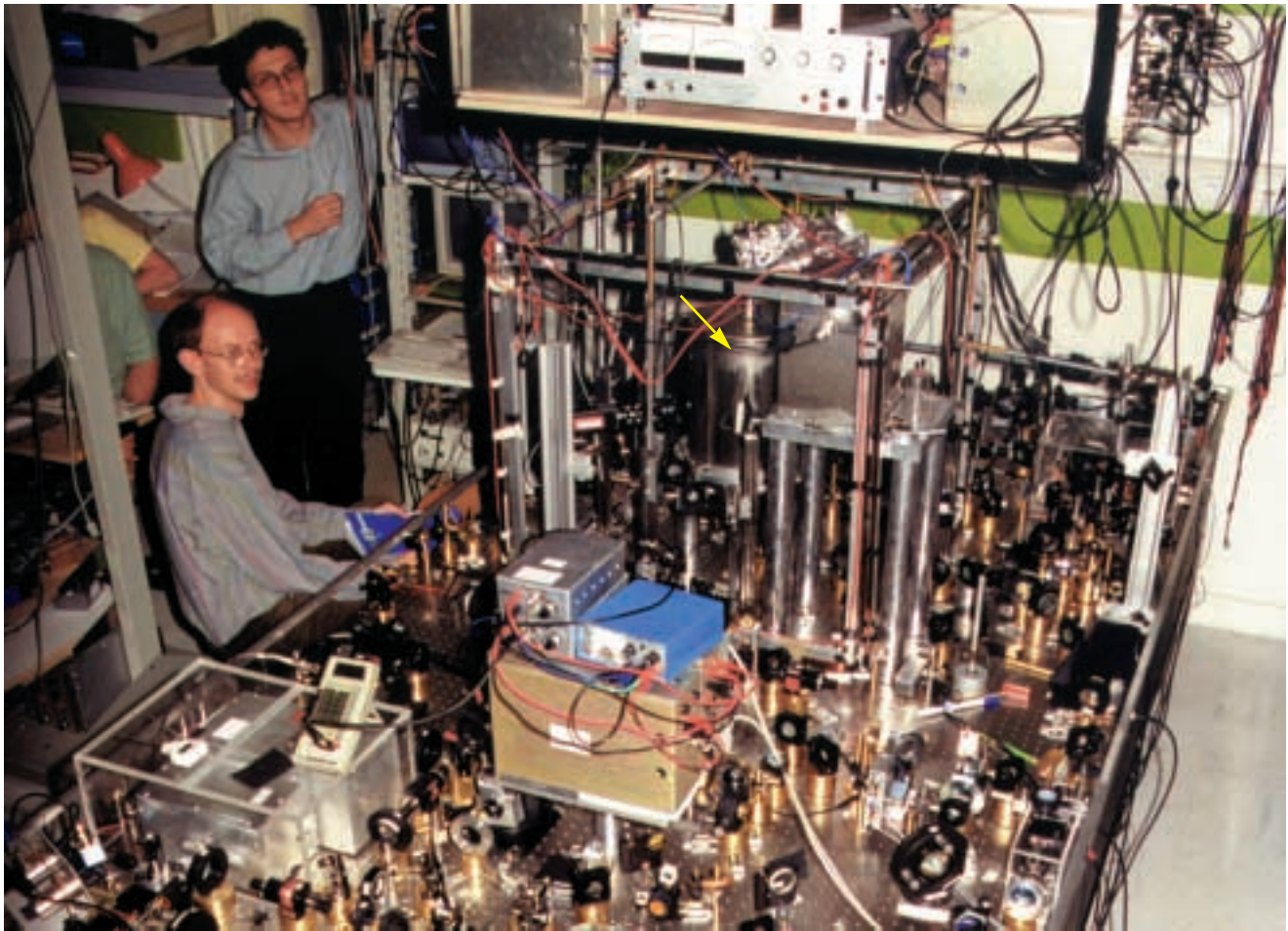


1. FÉLIX BLOCH (1905-1983) fut un pionnier de la résonance magnétique nucléaire. Il reçut le prix Nobel de physique en 1952, pour cette découverte, mais il avait bien d'autres titres à cette récompense : il avait étudié la propagation des électrons dans les solides cristallins, il avait identifié ce que l'on nomme aujourd'hui les parois de Bloch entre domaines magnétiques, dans les cristaux, et il avait mesuré le moment magnétique de l'électron. Bloch est le père de la physique du solide.

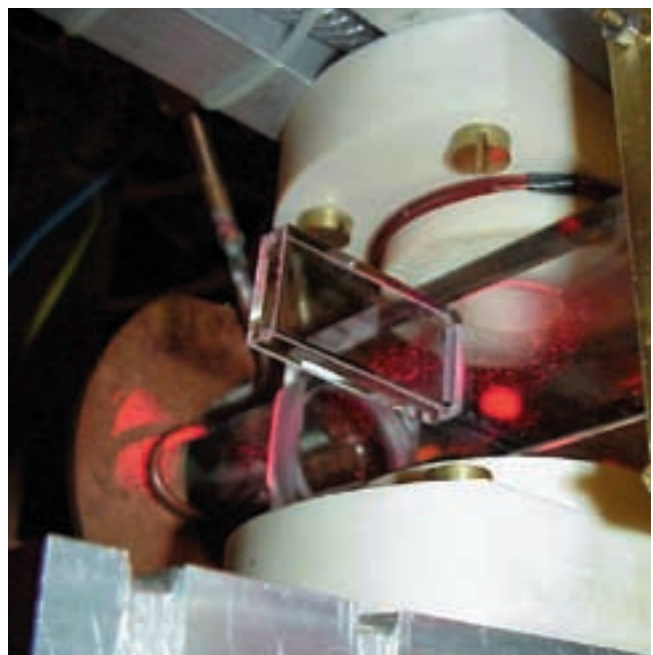
plane modulée par une fonction ayant la périodicité du cristal : au lieu d'être attaché à un ion particulier, chaque électron est délocalisé sur tout le réseau, avec une probabilité de présence augmentée entre les atomes. Ce résultat constitue la base de la théorie quantique du solide, qui décrit si bien les comportements de matériaux divers, tels les métaux, les isolants ou les semi-conducteurs.

Bloch avait également prévu un résultat surprenant : tant que les différences de potentiel appliquées restent faibles, les électrons oscillent ! En 1934, le physicien anglais Clarence Zener (1905-1993) poursuivit l'œuvre de Bloch en considérant des différences de potentiel supérieures, parce qu'il s'intéressait au problème pratique du «claquage des matériaux diélectriques» : il chercha la différence de potentiel maximale que l'on peut appliquer aux bornes d'un matériau isolant avant qu'il ne claque, c'est-à-dire qu'il ne devienne brusquement conducteur (dans l'air, quand on applique une différence de potentiel croissante entre deux électrodes, vient un moment où, l'air devenant conducteur, une étincelle apparaît : c'est le claquage). Zener analysa le comportement des électrons dans un cristal en présence d'un champ électrique constant. Il confirma que, dans un cristal parfait soumis à une différence de potentiel, les électrons oscillent, et il calcula les conditions du claquage.

L'oscillation des électrons est un effet d'origine quantique, bien différent de ce que décrivent les manuels élémentaires de physique : au lieu



2. LES OSCILLATIONS DE BLOCH pour des atomes ultrafroids ont été observées dans ce dispositif expérimental, à l'École normale supérieure de Paris. L'expérience s'effectue à l'intérieur du cylindre vertical, au centre du châssis (flèche). Dans le cylindre se croisent six faisceaux laser ayant tous la même longueur d'onde, au centre d'une cellule en verre qui contient des atomes de césium (en bas à gauche). Les faisceaux lasers capturent les atomes, les refroidissent et les confinent au point où le champ magnétique est nul, au centre des faisceaux. C'est l'échantillon dont on étudie les



oscillations de Bloch. La figure en bas à droite montre la lumière de fluorescence rouge émise par un nuage d'atomes de lithium piégés : la boule rouge, au centre, a un diamètre de cinq millimètres ; elle est composée de dix milliards d'atomes à une température de un millikelvin (un millième de degré au-dessus de la température du zéro absolu, lui-même à  $-273,15$  degrés Celsius). On distingue, en blanc, les deux supports de bobines (les bobines sont à l'intérieur) qui produisent le champ magnétique utilisé pour le confinement des atomes.

G. Ferrari, F. Schreck, M.-O. Mewes et C. Salomon

d'induire un courant constant, une différence de potentiel, pourtant continue, engendre un courant alternatif! Cette prévision étonnante n'a été expérimentalement testée que récemment, quand on a étudié le mouvement des électrons dans des matériaux semi-conducteurs nommés super-réseaux, ou le mouvement d'atomes piégés par de la lumière.

## Des ondes dans un cristal

Pour comprendre la nature de ce comportement surprenant, nommé aujourd'hui oscillations de Bloch, conservons l'idée que le matériau est périodique. Cette propriété joue un rôle crucial lors de l'interaction du réseau cristallin avec l'onde. L'analogie d'une vague qui arrive sur une digue percée de trous

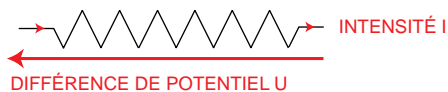
à intervalles périodiques aide à comprendre le phénomène. Les ouvertures dans la digue sont des sources d'ondes qui interfèrent, de sorte que, pour certaines directions seulement, derrière la digue, les contributions de toutes les vagues sont en phase et s'ajoutent.

En cristallographie, on utilise cet effet de «diffraction de Bragg» pour étudier la structure des matériaux : les ondes utilisées sont alors souvent des rayons X (voir la figure 5). Dans le cas de la conduction électrique dans un cristal, les ondes ne sont pas électromagnétiques ; ce sont des ondes de matière. Comme pour les vagues ou pour la lumière, ces ondes sont diffractées par le réseau ionique pour des vitesses et des directions particulières.

Plus précisément, imaginons un électron délocalisé sur tout le cristal et accéléré par une force électrique  $qE$ , où  $q$  est la charge de l'électron et  $E$  l'intensité du champ électrique (dans toute la suite de l'article, on se limitera à un mouvement à une seule dimension ; d'ailleurs, ce sont des oscillations de Bloch à une dimension que nous avons détectées). Initialement immobile, l'électron est mis en mouvement dans le sens opposé à celui du champ électrique (parce que sa charge électrique est négative). Sa vitesse augmente, de sorte que sa longueur d'onde diminue (le physicien français Louis de Broglie a montré qu'à un électron est associée une onde dont la longueur d'onde est inversement proportionnelle à la vitesse). Vient alors un stade où l'onde électronique est diffractée par le réseau cristallin : ses interférences constructives engendrent sa réflexion. La force électrique continue d'agir sur les électrons, mais elle est alors opposée au mouvement ; elle ralentit donc les électrons, les immobilise, puis les accélère dans la direction opposée, et ainsi de suite (voir la figure 7). Ce mouvement se répète périodiquement, et la période de cette oscillation est égale à  $h/Fd$ , où  $h$  est la constante de Planck,  $F$  la force appliquée et  $d$  le pas du réseau périodique (ici, la force  $F$  est la force électrique  $qE$ ).

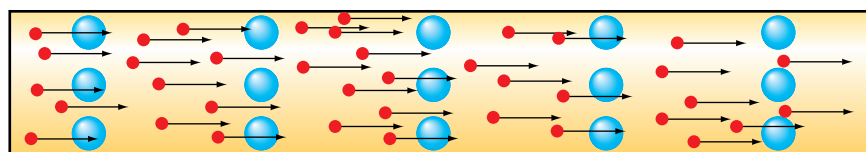
Si notre perception de la conductivité électrique reste dominée par la loi d'Ohm, c'est que ce mouvement oscillant ne se manifeste pas : dans un cristal usuel, la dynamique des électrons n'est pas seulement gouvernée par la diffraction par le réseau cristallin, mais aussi par des diffusions sur des impuretés ou sur des défauts du cristal. Ceux-ci sont si nombreux que

### PHYSIQUE CLASSIQUE

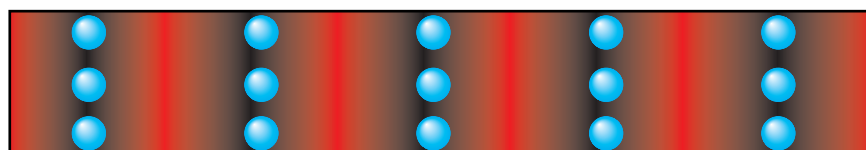


$$\text{LOI D'OHM}$$

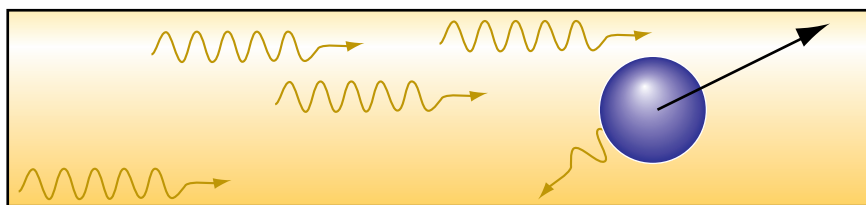
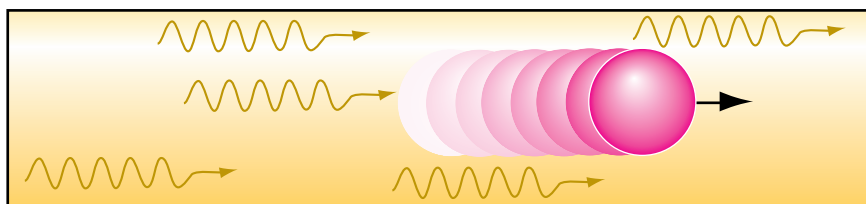
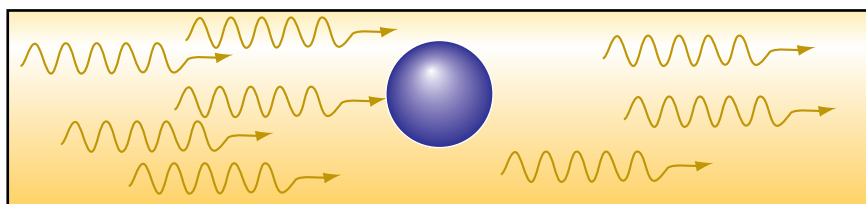
$$U = RI$$



### PHYSIQUE QUANTIQUE



3. LA LOI D'OHM stipule que l'intensité d'un courant électrique dans un conducteur cristallin est proportionnelle à la différence de potentiel appliqué. Cette relation suppose que les électrons sont des particules qui se déplacent toutes dans le même sens, sous l'action des forces électriques. Toutefois le physicien Félix Bloch, utilisant la physique quantique, a déterminé que chaque électron est délocalisé dans tout le conducteur, avec une probabilité de présence supérieure entre les noyaux d'atomes (en rouge sur le schéma inférieur). Il a prévu que les électrons oscillent, leur ensemble créant un courant alternatif, quand on applique une différence de potentiel pourtant continue aux bornes du cristal : un cristal parfait ne conduit donc pas le courant électrique.



4. LA PRESSION DE RADIATION D'UN FAISCEAU LASER pousse les atomes dans son sens de propagation. Un atome absorbe un photon et recule en raison de la conservation de la quantité de mouvement. Après un bref instant, il réémet ce photon dans n'importe quelle direction et recule à nouveau. Puis il absorbera à nouveau un photon, et ainsi de suite. En moyenne, l'atome est accéléré dans le sens du faisceau.

chaque électron n'effectue qu'une partie infime de l'oscillation avant d'entrer en collision. Il se comporte alors comme un électron libre qui, entre deux chocs, se déplace en ligne droite dans la direction du champ électrique. Globalement tous les électrons bougent dans le même sens, induisant un courant électrique constant.

Dans les échantillons étudiés en laboratoire, on observe que la durée moyenne d'évolution libre, entre deux chocs successifs, nommée temps de relaxation, est considérablement plus courte que la période d'oscillation : avec des champs électriques de quelques dizaines de volts par mètre, la période de Bloch dans un métal est de l'ordre du millionième de seconde, et le temps de relaxation est dix millions de fois inférieur.

C'est la raison pour laquelle, pendant plus de 50 ans, les oscillations de Bloch sont restées inobservées. Décrites dans tous les manuels de physique des solides, ces oscillations semblaient ne devoir rester qu'une expérience de pensée.

## Les super-réseaux

Comme souvent en physique, l'apparition de nouveaux dispositifs expérimentaux a conduit au but : ici, l'observation des oscillations prédites. Le premier progrès est venu de la physique des semi-conducteurs : ce fut la mise au point des « super-réseaux ». Dans ces systèmes, ce sont toujours des électrons qui oscillent, mais avec des périodes de l'ordre de la picoseconde (un millième de milliardième de seconde), bien plus courtes que dans les solides cristallins.

D'autre part, les progrès réalisés dans le domaine du refroidissement et de la manipulation d'atomes par laser ont engendré de nouveaux systèmes expérimentaux qui permettent d'aborder les problèmes de transport dans les potentiels périodiques. Dans les systèmes atomiques, les processus de relaxation peuvent être rendus négligeables, et les périodes de Bloch sont bien plus longues, supérieures à la milliseconde.

Les super-réseaux, tout d'abord, sont apparus dans les années 1970 : les physiciens du solide ont appris à utiliser des techniques d'évaporation sous vide pour déposer des couches atomiques spécifiques sur un support, et réaliser des structures de composition périodique dont ils savent régler le pas. Les pas obtenus sont d'une dizaine de nanomètres,

soit 100 fois supérieurs à la maille d'un réseau cristallin.

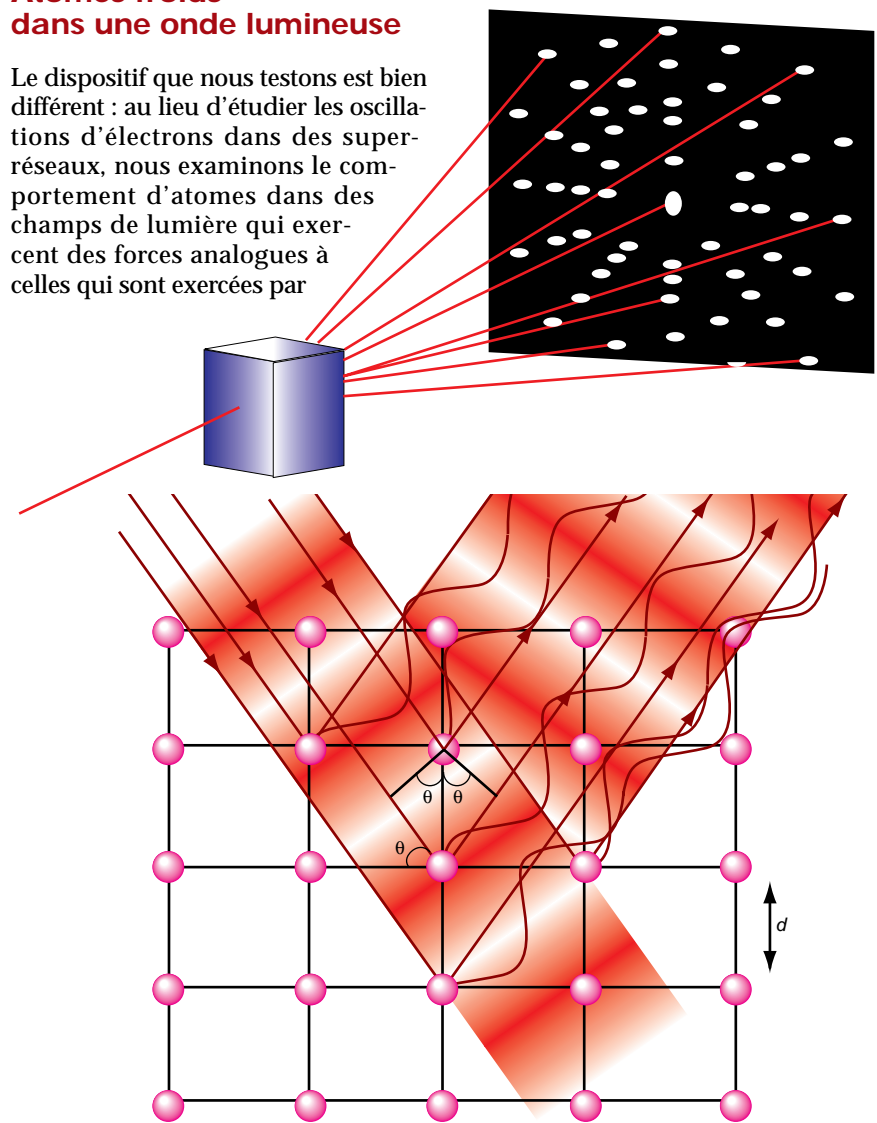
Dans les super-réseaux, les champs électriques peuvent être considérables (plusieurs centaines de millions de volts par mètre). De ce fait, la période des oscillations de Bloch (inversement proportionnelle à la force électrique et au pas du réseau) est réduite au point qu'elle devient alors inférieure au temps de relaxation, ce qui laisse apparaître le comportement oscillant. En 1992, les oscillations de Bloch électroniques ont été ainsi observées à une fréquence de plusieurs térahertz (milliers de milliards de hertz). Des études récentes ont précisé les observations.

## Atomes froids dans une onde lumineuse

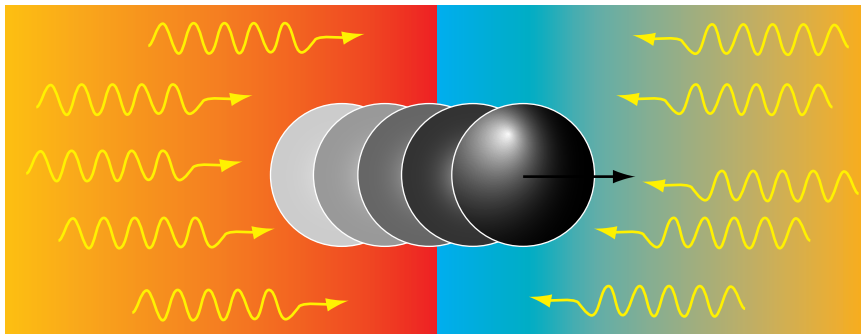
Le dispositif que nous testons est bien différent : au lieu d'étudier les oscillations d'électrons dans des super-réseaux, nous examinons le comportement d'atomes dans des champs de lumière qui exercent des forces analogues à celles qui sont exercées par

le réseau cristallin sur les électrons. Nous produisons des atomes ultrafroids dans des puits de lumière à l'aide de techniques de refroidissement d'atomes mises au point depuis une quinzaine d'années par Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji et William Phillips (ce travail leur a valu le prix Nobel de physique en 1997).

Dans les expériences de refroidissement laser, on utilise des photons (ou grains de lumière) pour exercer des forces sur les atomes : lorsqu'un atome absorbe ou émet un photon, sa vitesse est modifiée (d'une valeur nommée vitesse de recul), de sorte que la quantité de mouvement totale est conservée. Dans le cas d'atomes de césium



5. DES ONDES LUMINEUSES sont diffractées par un réseau régulier (*en haut*). William Henry Bragg et William Lawrence Bragg ont calculé pourquoi un cristal irradié par des rayons X ne diffracte que dans des directions particulières : la diffraction n'a lieu que pour les directions telles que les ondes réémises sont en phase. Comme la différence de marche entre deux rayons lumineux réémis par des plans successifs du réseau est égale à  $2d \sin \theta$ , la diffraction n'a lieu que pour les angles  $\theta$  tels que  $2d \sin \theta$  soit égal à un multiple entier de longueurs d'onde. Cet effet se retrouve pour des ondes de matière piégées dans un réseau de lumière.



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  $-273,15$  °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'analogie 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).

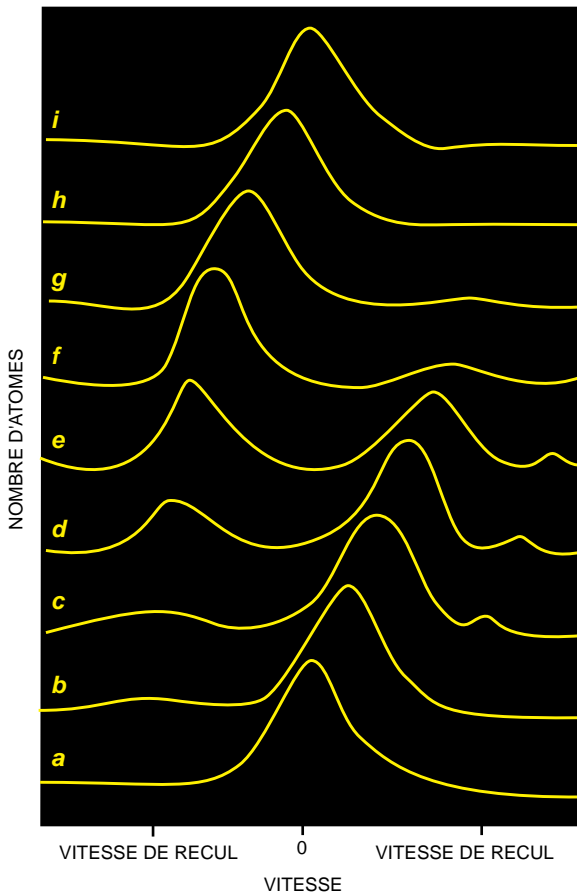
Le comportement de ces atomes froids ressemble ainsi beaucoup à celui

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.

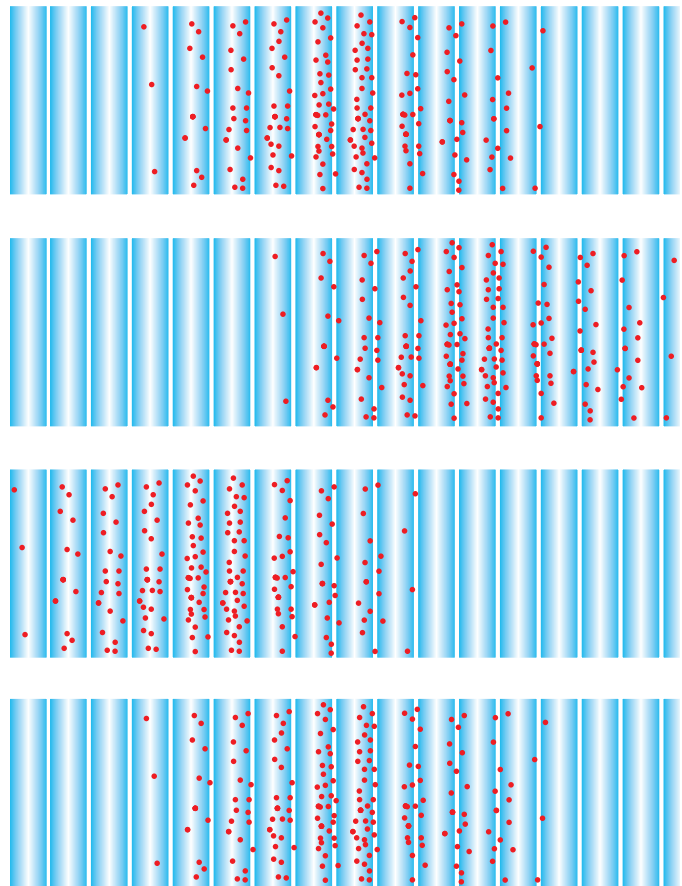
Dans les expériences que nous avons effectuées avec Ekkehard Peik, Jakob Reichel, Isabelle Bouchoule et Yvan Castin, les atomes sont initialement refroidis pendant une dizaine de millisecondes jusqu'à 12 nanokelvins. À cette

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



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.

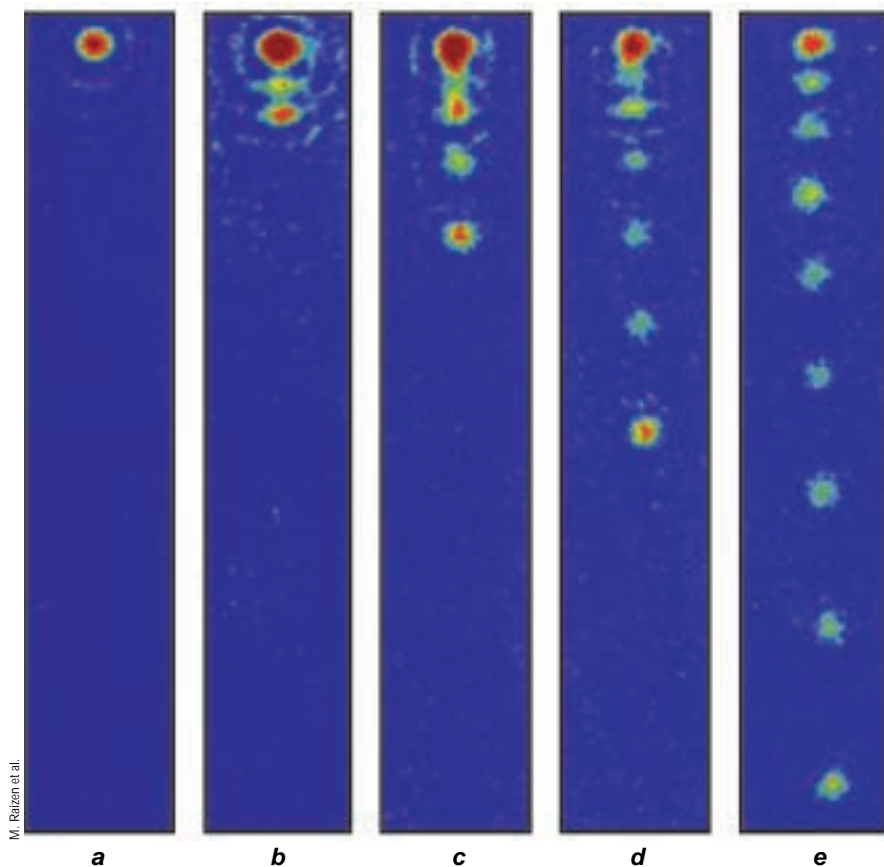
## Les expériences d'Austin

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.



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  $\lambda$  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