

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.

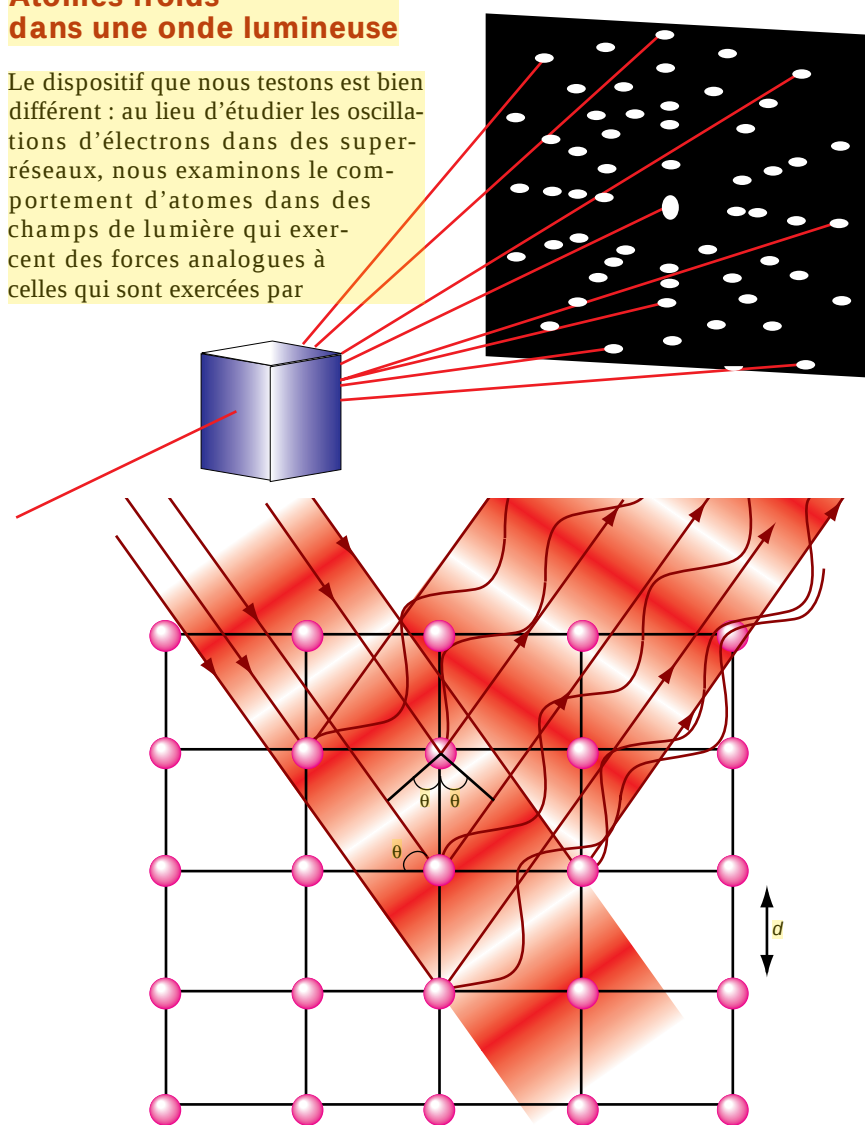
Dans les super-réseaux, les champs électriques peuvent être considérables (plusieurs centaines de millions de volts par mètre). De ce fait, la période des oscillations de Bloch (inversement proportionnelle à la force électrique et au pas du réseau) est réduite au point qu'elle devient alors inférieure 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

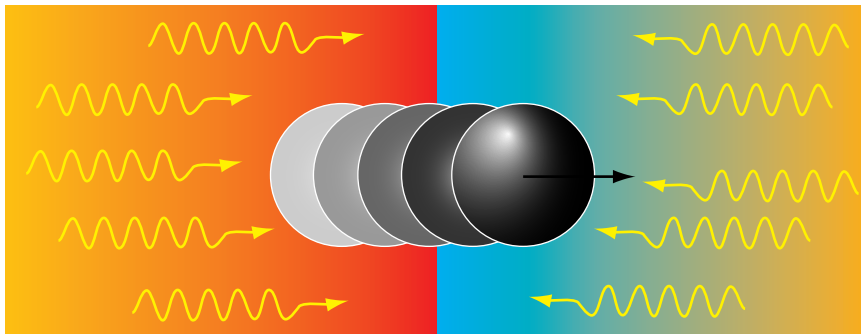
Le dispositif que nous testons est bien différent : au lieu d'étudier les oscillations d'électrons dans des super-réseaux, nous examinons le comportement d'atomes dans des champs de lumière qui exercent des forces analogues à celles qui sont exercées par

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 θ 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 $-273,15^\circ\text{C}$), 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 englobe 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.