

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^e 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^e 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

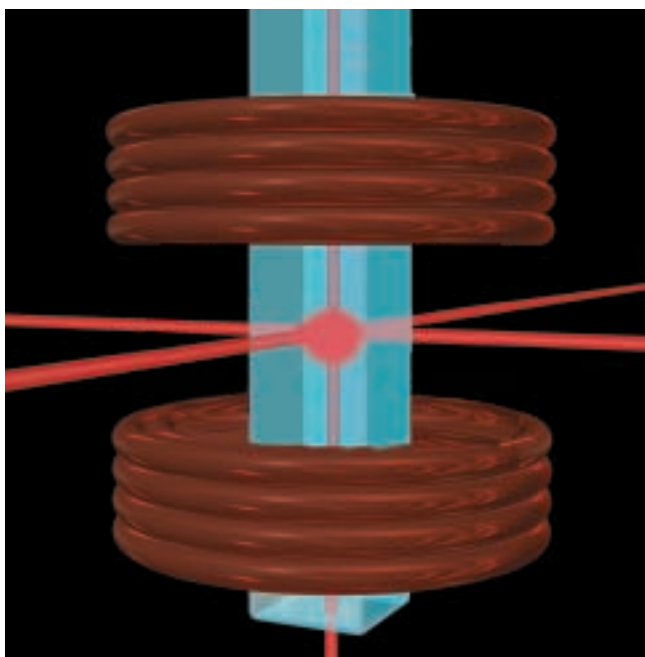
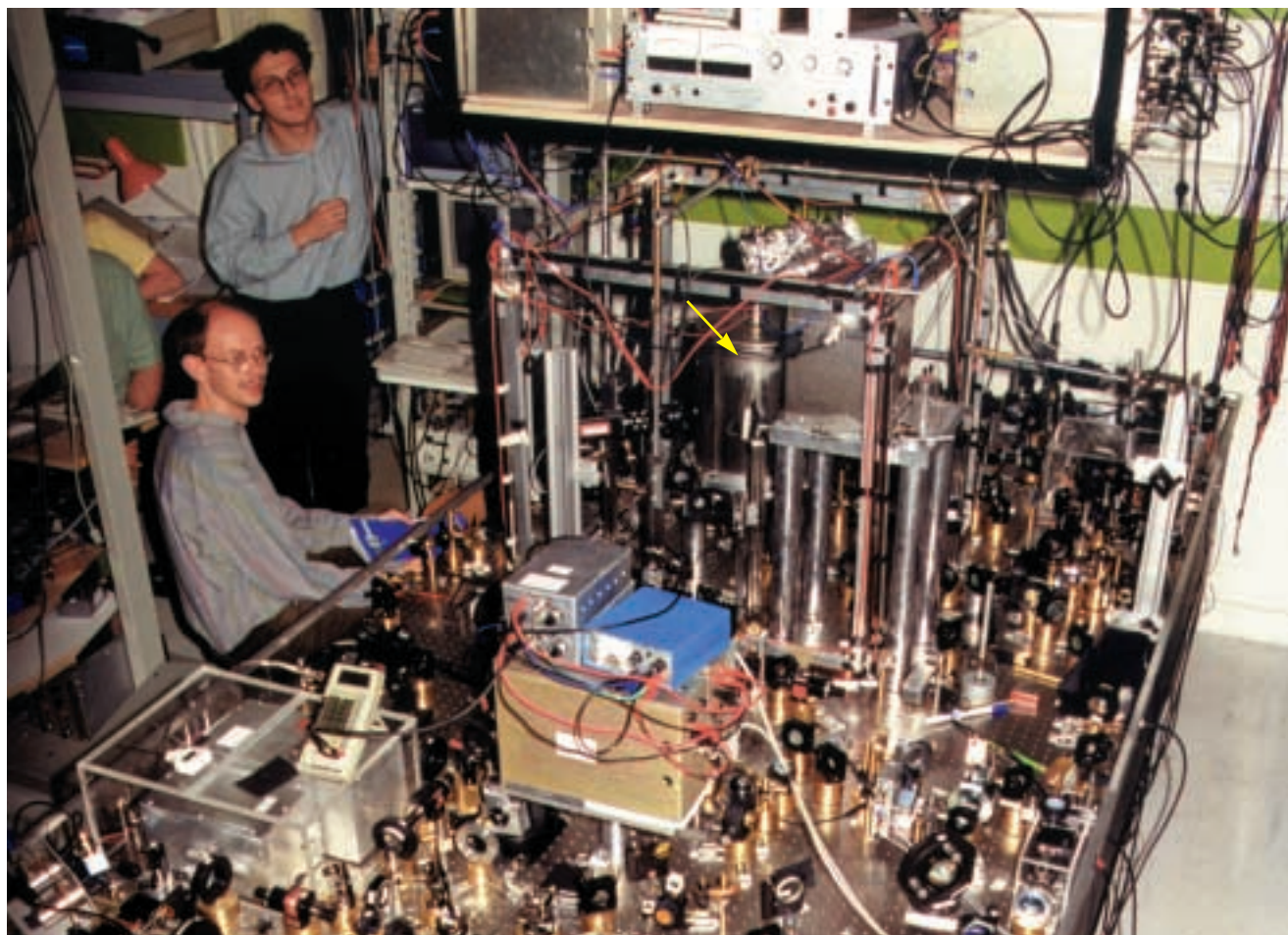


1. FÉLIX BLOCH (1905-1983) fut un pionnier de la résonance magnétique nucléaire. Il reçut le prix Nobel de physique en 1952, pour cette découverte, mais il avait bien d'autres titres à cette récompense : il avait étudié la propagation des électrons dans les solides cristallins, il avait identifié ce 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.

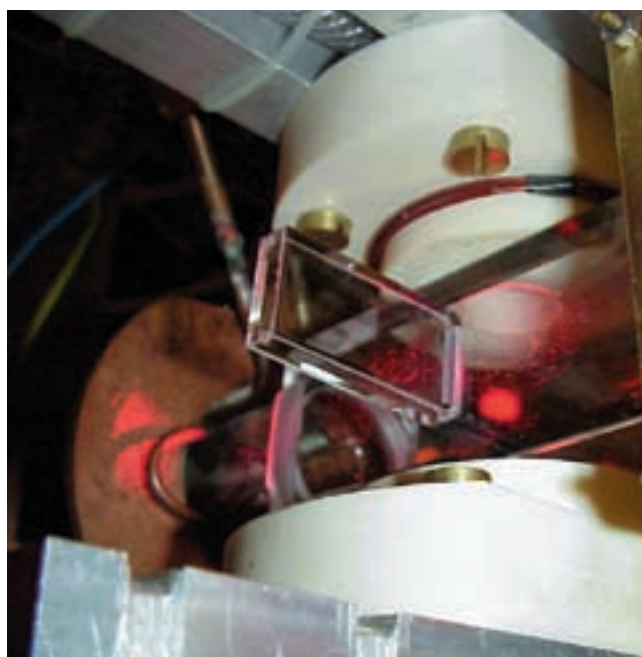
plane modulée par une fonction ayant la périodicité du cristal : au lieu d'être attaché à un ion particulier, chaque électron est délocalisé sur tout le réseau, avec une probabilité de présence augmentée entre les atomes. Ce résultat constitue la base de la théorie quantique du solide, qui décrit si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

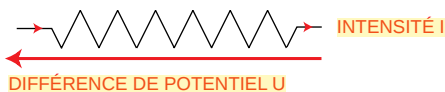
à intervalles périodiques aide à comprendre le phénomène. Les ouvertures dans la digue sont des sources d'ondes qui interfèrent, de sorte que, pour certaines directions seulement, derrière la digue, les contributions de toutes les vagues sont en phase et s'ajoutent.

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.

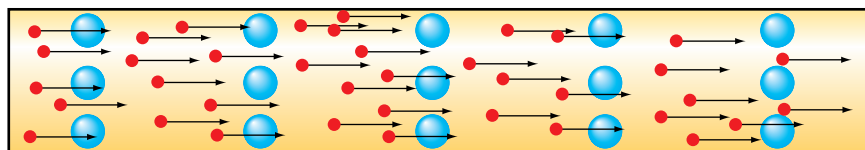
Plus précisément, imaginons un électron délocalisé sur tout le cristal et accéléré par une force électrique qE , où q est la charge de l'électron et E l'intensité du champ électrique (dans toute la suite de l'article, on se limitera à un mouvement à une seule dimension ; d'ailleurs, ce sont des oscillations 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

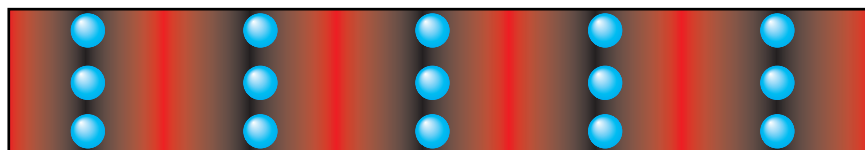
PHYSIQUE CLASSIQUE



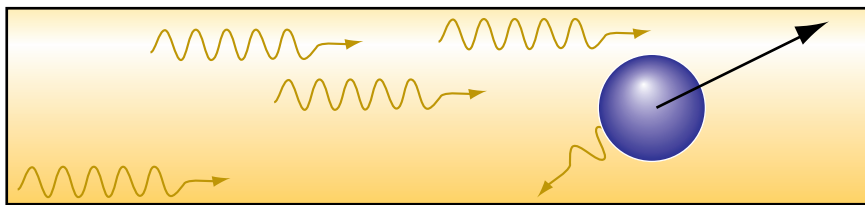
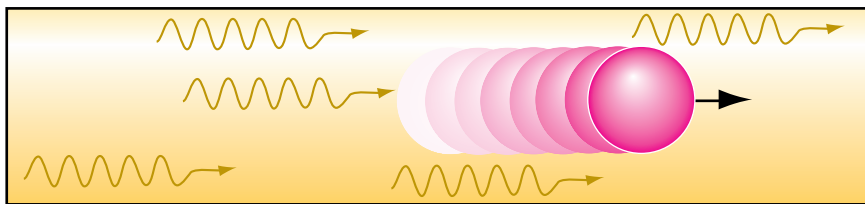
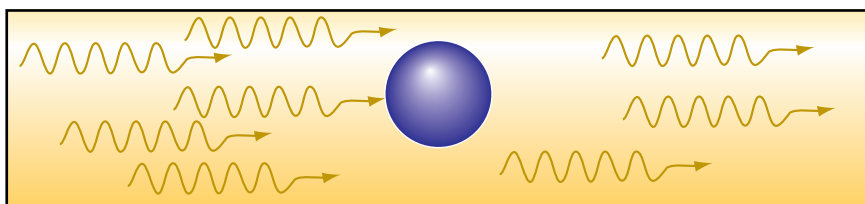
LOI D'OHM
 $U = RI$



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.