



EMPLACEMENT DE L'EXPLOSION

LE 20 OCTOBRE 1964, À LOB NOR, EN CHINE

Lorsque les différentes nations se sont mises à construire des armes de destruction massive, les déserts et les régions reculées sont devenus des sites d'essais. Les analystes ont toujours scruté avec attention les photographies de telles régions. En décembre 1961, des photographies de la région de Lob Nor, dans le désert du Taklimakan, dans l'Ouest de la Chine, ont révélé l'existence d'une route circulaire de quatre kilomètres de diamètre. La situation et les dimensions de la route suggéraient une appartenance à un futur site d'essais nucléaires : la zone délimitée par la route était suffisamment vaste pour être le siège d'un essai nucléaire de surface laissant la route intacte. Par la suite furent construits un terrain d'aviation, une caserne et des installations logistiques, puis vint s'ajouter une tour de 100 mètres de

hauteur. Lorsque les lignes de communication et d'instrumentation enterrées furent reliées à des camions et à des bunkers équipés d'électronique, l'essai nucléaire était imminent.

Afin de prendre la vedette au gouvernement chinois, le président Lyndon Johnson demanda au ministre des Affaires étrangères d'annoncer publiquement qu'il savait que «la Chine communiste était sur le point de faire exploser son premier dispositif nucléaire». L'analyse de la photographie du 8 octobre montra que tout était prêt pour l'essai et que le personnel et les équipements avaient été évacués de la zone de tir. La surprise fut faible lorsque les Chinois firent exploser une bombe atomique de 28 kilotonnes, le 16 octobre 1964. Les images prises quatre jours plus tard par des satellites KH-4 montrent les effets d'un essai atmosphérique à l'endroit où s'élevait précédemment la tour.

observé les conséquences de catastrophes industrielles ou naturelles et la pollution de l'atmosphère, des ruisseaux et des rivières. Hiver après hiver, nous avons assisté au noircissement de la neige par la pollution dans un rayon de 150 kilomètres autour de Magnitogorsk, un centre russe de production d'acier. Nos observations donneraient matière à réflexion à quiconque nourrit l'illusion que notre Terre peut absorber sans dommages tous les ravages que lui fait subir l'homme.

La publication des centaines de milliers d'images Corona offre une occasion rare de mieux comprendre notre merveilleuse planète bleue, perpétuellement changeante, et ses habitants. J'ai par exemple suivi l'extension permanente du Sahara vers le Nord, grâce à des images prises périodiquement

durant la fin des années 1960. Les mêmes images montrent les sites des anciens camps romains et m'ont permis de comparer leurs positions avec ceux de la Légion étrangère française.

Nous n'avons fait que jeter un coup d'œil furtif sur la plupart de ces images. La navigation sur cet océan de données encore inexploré sera certainement captivante.

Dino BRUGIONI est l'un des fondateurs du Centre américain d'interprétation photographique.

Dino A. BRUGIONI et Robert G. POIRIER, *The Holocaust Revisited : A Retrospective Analysis of the Auschwitz-Birkenau Extermination Complex*, Central Intelligence Agency (ST-79-10001), 1979.

William E. BURROWS, *Deep Black : Space Espionage and National Security*, Random House, 1986.

Chris POCOCK, *Dragon Lady : The History of the U-2 Spyplane*, Airlife Publishing / Motorbooks International, 1989.

Jay MILLER, *Lockheed's Skunk Works : The First Fifty Years*, Midland Publishing, Leicester, 1993.

Corona : *America's First Satellite Program*, sous la direction de Kevin C. Ruffner, Central Intelligence Agency History Staff and the Center for the Study of Intelligence, 1995.

Robert A. McDONALD, *Corona : Success for Space Reconnaissance, a Look into the Cold War and a Revolution for Intelligence*, in *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 61, n° 6, pp. 689-720, juin 1995.

Les électrons dans un monde à deux dimensions

STEVEN KIVELSON • DUNG-HAI LEE • SHOU-CHENG ZHANG

Confinés dans un plan, les électrons peuvent manifester l'effet Hall quantique, un phénomène surprenant dont on comprend le lien avec la supraconduction.

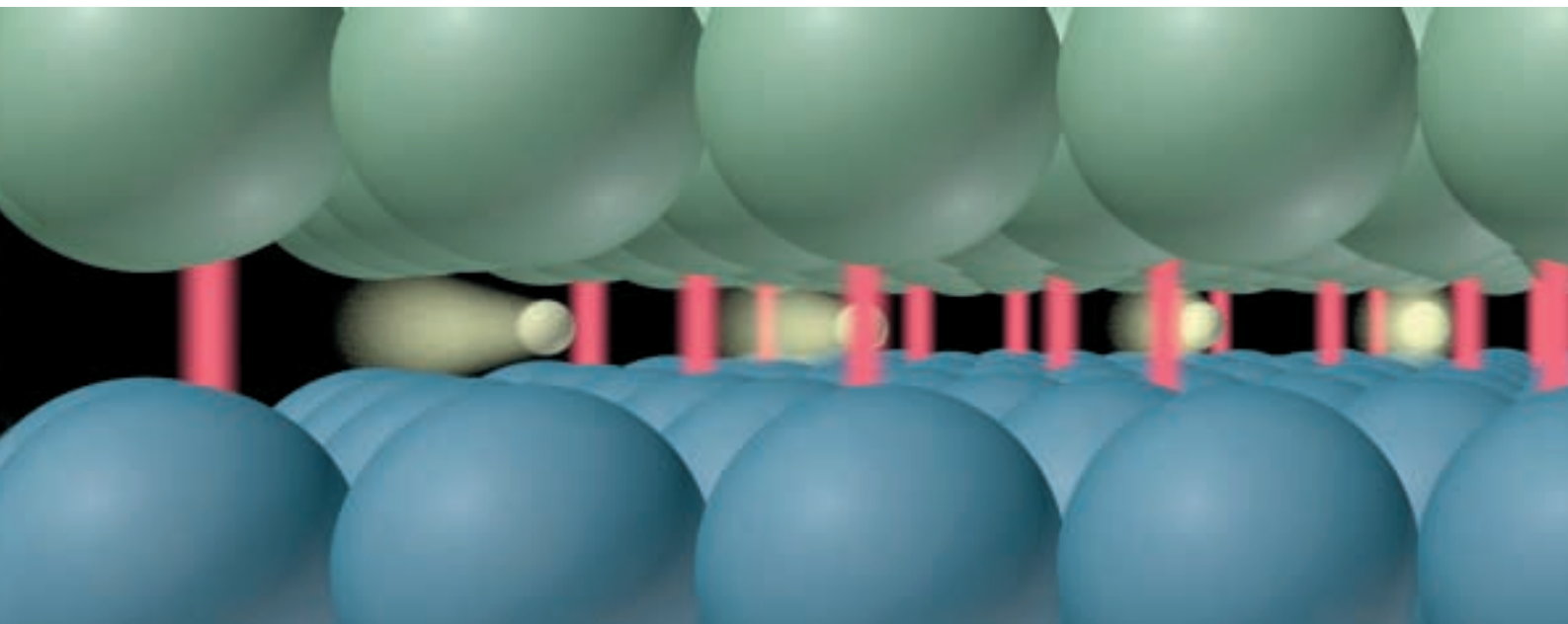
Depuis l'antiquité grecque, toutes les disciplines scientifiques ont pour objet principal de trouver un ensemble minimal de principes fondamentaux qui expliquent des phénomènes naturels variés. Cette philosophie réductionniste a bien réussi dans certains domaines, telle la physique des particules : les théoriciens de cette discipline ont regroupé toutes les particules en quelques familles et ils ont exprimé les lois fondamentales de la physique en fonction des interactions entre particules.

Les physiciens de la matière condensée ont eu moins de succès : les recherches faites au cours de ce siècle sur le comportement des électrons dans les solides ont révélé des états différents de

la matière, caractérisés par une myriade d'organisations des électrons. Habituellement, les solides sont soit des isolants, qui résistent fortement au passage du courant électrique, soit des métaux, qui conduisent bien le courant, avec une faible résistance. Dans certaines circonstances, des solides peuvent passer dans un état supraconducteur, où le courant électrique circule sans aucune perte. Les différentes interprétations théoriques de ces états ont été aussi variées que les états eux-mêmes.

Une unification pourrait toutefois apparaître, car les physiciens ont découvert un lien entre la supraconduction et un autre phénomène, très étudié en physique de la matière condensée : l'effet Hall quantique. Cet effet se pro-

duit lorsque les électrons sont soumis simultanément à trois conditions : ils sont piégés dans une couche mince, entre deux cristaux semi-conducteurs, de sorte qu'ils ne se déplacent que dans un plan ; ils sont refroidis à des températures proches du zéro absolu ; et ils sont dans un champ magnétique intense, perpendiculaire au plan de propagation. Le champ magnétique exerce sur les électrons une force qui les pousse perpendiculairement à leur direction de propagation, ce qui crée une différence de potentiel, nommée tension de Hall. Quand on intensifie le champ magnétique, cette tension croît par paliers. Ce phénomène, nommé effet Hall quantique, est la signature d'un nouvel état de la matière.



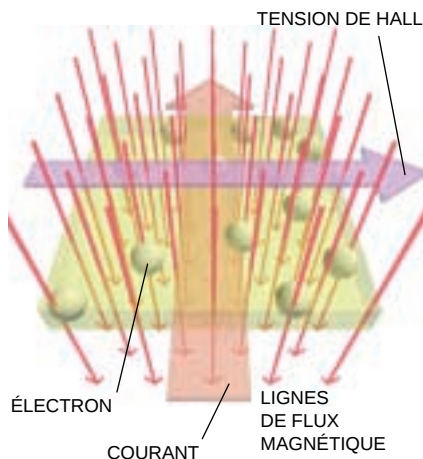
Lors de la découverte de l'effet Hall quantique, en 1980, les physiciens ont trouvé que les propriétés des électrons, dans ce nouvel état, étaient très différentes de celles de tous les autres états connus de la matière. Les dernières recherches dans ce domaine ont néanmoins révélé une relation entre l'effet Hall quantique et la supraconduction. Des études de cette relation ont même mené à la prédiction, confirmée par des expériences récentes, d'autres états de la matière jamais observés. Même si l'effet Hall quantique n'a pas d'application immédiate, son étude a stimulé la mise au point de concepts et d'outils théoriques nouveaux. Ces outils pourraient avoir de grandes répercussions en physique, de la même façon que la théorie de la supraconduction a fait progresser la physique des particules ou que l'étude des transitions de phase a permis de mieux comprendre l'Univers primordial. Enfin, les nouveaux principes pourraient être utiles en microélectronique, parce qu'ils permettraient de décrire les phénomènes dans des composants si petits, que les interactions entre les électrons devront être prises en compte.

La découverte de l'effet Hall quantique

L'effet Hall quantique est une manifestation inhabituelle d'un phénomène qui fut découvert par le physicien américain Edwin Hall au XIX^e siècle : lorsqu'une tension est appliquée entre les extrémités d'un fil conducteur, un cou-

rant y circule ; si le fil est dans un champ magnétique, les électrons en mouvement sont déviés latéralement, de sorte qu'ils s'accumulent d'un côté du fil.

Cette asymétrie produit une tension entre les deux bords du fil, perpendiculaire à la direction du courant. Pour la détecter, on relie les bords du fil à un voltmètre. L'intensité du courant étant fixée, la tension de Hall aug-

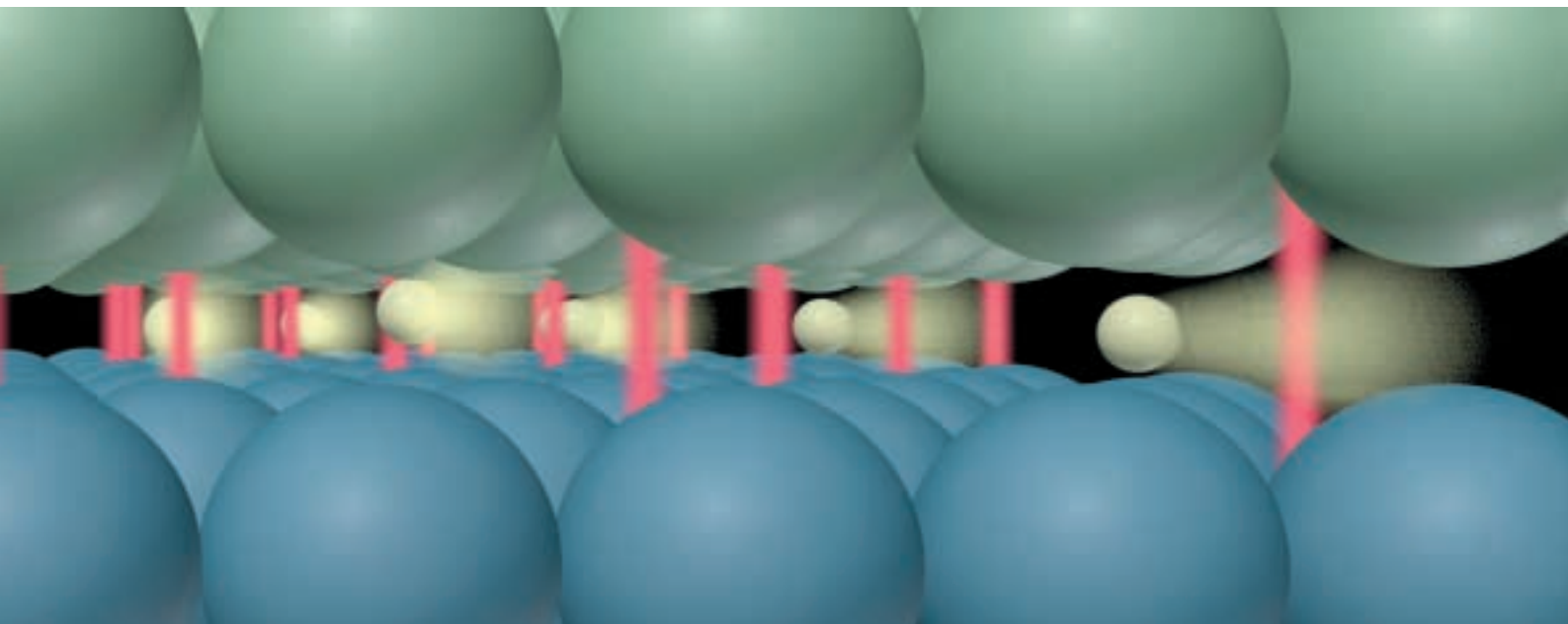


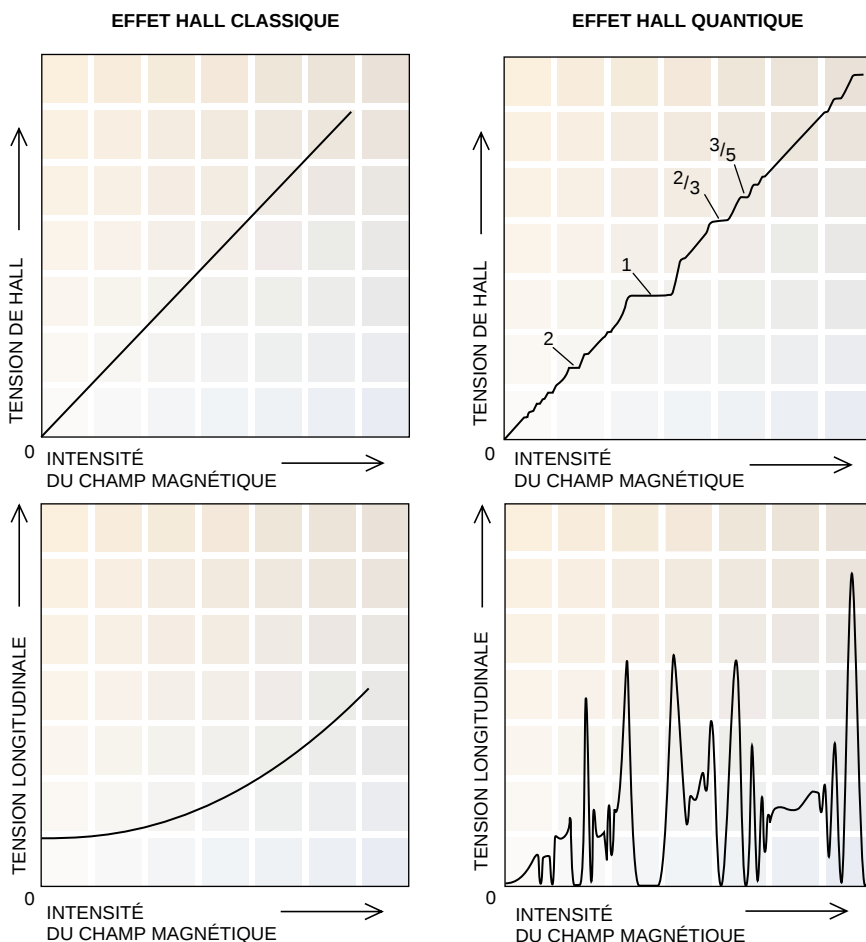
1. L'EFFET HALL QUANTIQUE se manifeste dans un plan entre deux semi-conducteurs refroidis à une température de quelques kelvins (ci-dessous) ; les atomes à la surface des semi-conducteurs sont représentés par des sphères vertes et bleues. Quand on applique un champ magnétique (lignes rouges), les électrons mobiles (petites sphères jaunes) se répartissent de façon à être plus nombreux d'un côté (à droite) que de l'autre. Cette redistribution des charges électriques engendre une différence de potentiel (la tension de Hall), perpendiculaire au courant (ci-dessus). L'effet Hall quantique correspond à une augmentation par paliers de la tension de Hall lorsque le champ magnétique croît.

mente régulièrement avec l'intensité du champ magnétique. Ce phénomène est l'effet Hall classique.

En 1980, Klaus von Klitzing et ses collègues du Laboratoire des champs magnétiques intenses de Grenoble découvrirent que, dans des circonstances particulières, l'effet Hall n'obéit plus aux règles classiques. Les progrès de la physique du solide avaient permis de confiner un ensemble d'électrons entre deux semi-conducteurs cristallins ; lorsque K. von Klitzing et ses collègues ont refroidi ces électrons à une température de un ou deux kelvins, ils ont observé que la tension de Hall n'augmentait pas régulièrement avec l'intensité du champ magnétique : elle augmentait par paliers, sa valeur ne variant pas dans de petits intervalles d'intensité du champ magnétique (voir la figure 2). De plus, la tension longitudinale – c'est-à-dire la tension dans le sens du courant – s'annulait presque lorsque la tension de Hall atteignait ces paliers. Autrement dit, les électrons sur le plan étaient devenus « parfaitement conducteurs » (ils ne sont pas supraconducteurs, car des électrons supraconducteurs expulsent un champ magnétique, ce que ne font pas ces électrons parfaitement conducteurs).

Plus étonnant encore, on a observé que la grandeur nommée conductance de Hall prenait une valeur particulière à chaque plateau. La conductance de Hall est le quotient de l'intensité du courant longitudinal par la tension de Hall (la conductance est l'inverse de la résistance). K. von Klitzing et





2. ON OBSERVE des manifestations de l'effet Hall quantique lorsque l'on compare certaines mesures avec celles qui se rapportent à l'effet Hall classique (non quantifié). Dans l'effet Hall classique, la tension transverse (tension de Hall) est proportionnelle au champ magnétique ; dans le cas quantique, la tension présente des plateaux pour des conductances égales à certains multiples entiers et fractionnaires d'une constante fondamentale (seuls quelques multiples ont été indiqués). Dans l'effet Hall classique, la tension longitudinale (parallèle au courant) varie régulièrement avec le champ magnétique, alors que, dans le cas quantique, elle s'annule lorsque apparaissent les plateaux de la tension de Hall.

ses collègues ont trouvé qu'à chaque plateau la conductance de Hall était un multiple entier du quantum de conductance e^2/h , où e est la charge de l'électron et h , la constante de Planck, qui relie la fréquence d'un rayon lumineux à la quantité d'énergie minimale qu'il peut transporter. Pour la découverte de cet «effet Hall quantique entier», K. von Klitzing obtint le prix Nobel de physique en 1985.

En 1982, aux Laboratoires *Bell*, Daniel Tsui, Horst Störmer et Arthur Gossard ont découvert que les plateaux de la tension de Hall étaient plus nombreux qu'on ne le pensait initialement : ils apparaissent non seulement pour des multiples entiers du quantum de conductance, mais aussi pour certains de ses multiples fractionnaires tels que $1/3$, $2/5$ et $3/7$, d'où le nom d'effet Hall quantique fractionnaire donné à ce phénomène.

Jusqu'à aujourd'hui, aucune expérience n'a montré de différences entre les conductances de Hall mesurées et les valeurs quantifiées. Elles sont égales entre elles avec une précision d'au moins un pour dix millions, et l'on a des indications indirectes qu'elles sont égales à un pour cent milliards. En raison de cette précision, l'Institut américain de normalisation a redéfini l'étalon de résistance comme le klitzing, qui est égal à h/e^2 , soit 25 012,8 ohms, et a choisi l'effet Hall quantique comme référence pour l'étalonnage des appareils de mesure de résistance.

Des remplissages magiques

Pourquoi la conductance de Hall prend-elle ces valeurs «magiques»? Les physiciens ont mis des années à comprendre que ces valeurs dépendent

de l'intensité du champ magnétique qui s'exerce sur chaque électron.

En mécanique quantique, la quantité de champ magnétique qui agit sur un échantillon est quantifiée : c'est un multiple d'un quantum de flux magnétique. On peut se représenter le quantum de flux comme une petite flèche. Pour mesurer l'intensité du champ magnétique, on compte le nombre de quanta de flux – le nombre de flèches – qui traverse la surface d'un échantillon.

Une autre grandeur liée à l'intensité du champ magnétique est le facteur de remplissage, que l'on définit comme le quotient du nombre d'électrons dans l'échantillon par le nombre de quanta de flux magnétique qui y pénètre. Lorsque le facteur de remplissage est égal à un, il y a un quantum de flux par électron ; lorsque le facteur de remplissage est égal à $1/3$, il y a trois quanta de flux pour chaque électron.

Il existe une correspondance entre les valeurs quantifiées de la conductance de Hall et les facteurs de remplissage, nommés facteurs de remplissage magiques : la conductance de Hall est égale au quantum de conductance (e^2/h) multiplié par le facteur de remplissage. Ainsi, lorsque le facteur de remplissage est égal à un, la conductance de Hall est égale à e^2/h ; lorsque le facteur de remplissage est égal à $1/3$, la conductance de Hall est égale à $(1/3) \times (e^2/h)$, et ainsi de suite.

Robert Laughlin, de l'Université de Stanford, est le premier à avoir expliqué l'existence des paliers de la conductance de Hall, en se fondant sur une description séparée des effets entier et fractionnaire. Conformément à la théorie quantique, il décrivait les électrons par des fonctions d'onde, c'est-à-dire des fonctions mathématiques qui indiquent l'état des particules.

Malgré son succès, l'approche de R. Laughlin envisageait des matériaux idéaux, bien différents des matériaux réels, toujours imparfaits. En outre, les fonctions d'onde, abstraites, ne donnaient pas d'explications intuitives des phénomènes. Son approche ne permettait pas de savoir s'il existait une relation entre l'effet Hall quantique et d'autres sortes d'activité électronique dans les solides. Enfin, il traitait différemment l'effet Hall quantique entier et l'effet Hall quantique fractionnaire, alors que ces effets se ressemblent.

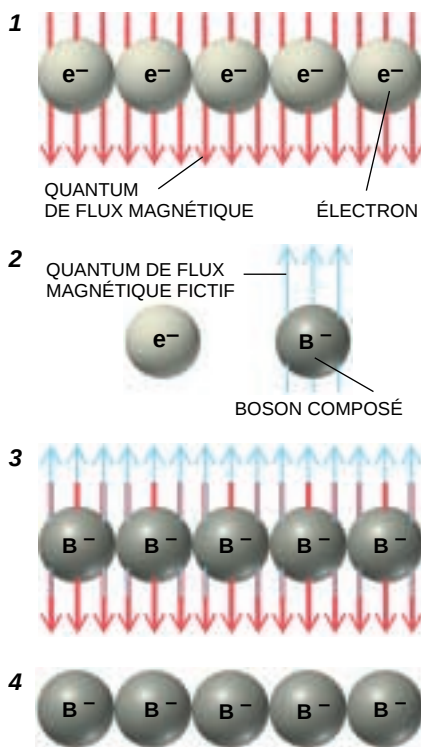
En exploitant une analogie mathématique entre l'effet Hall quantique et

la supraconduction, nous avons obtenu une nouvelle description de l'effet Hall quantique. Tout en unifiant deux phénomènes apparemment différents, cette analogie permet d'appliquer les connaissances de la supraconduction à l'effet Hall quantique. Cette approche, complémentaire de celle de R. Laughlin, reprend beaucoup de ses idées, mais elle s'en distingue parce qu'elle étudie des phénomènes macroscopiques réels du système physique plutôt que par les propriétés microscopiques d'un système idéal.

Bosons et fermions

Nous avons été mis sur la piste de cette analogie par Steven Girvin et Allan MacDonald, de l'Université d'Indiana, qui ont proposé une nouvelle interprétation des fonctions d'onde utilisées pour expliquer l'effet Hall quantique : ils ont imaginé que ces fonctions d'onde pouvaient représenter l'état supraconducteur d'un type de particule imaginaire, nommée boson composé.

Les physiciens classent les particules, d'après leur comportement statistique, en deux familles : les bosons et les fermions. La fonction d'onde décrivant un ensemble de bosons reste inchangée lorsque deux des particules sont échangées ; en revanche, la fonction d'onde des fermions change de signe lorsqu'on permute deux particules.



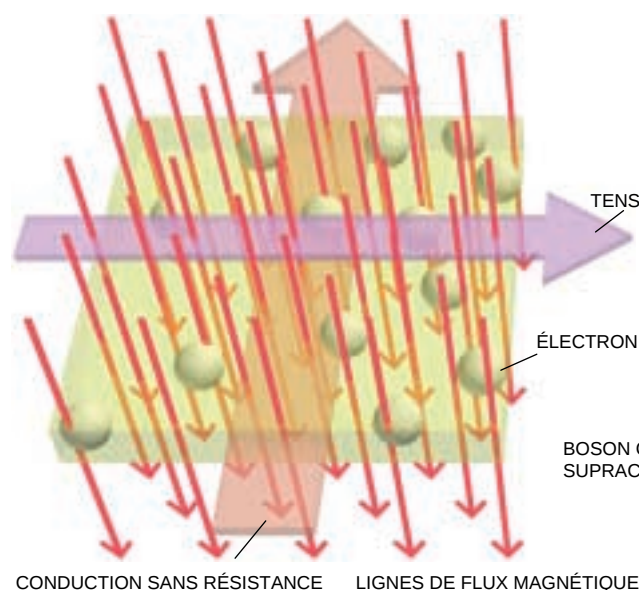
3. POUR EXPLIQUER L'EFFET HALL QUANTIQUE, on peut remplacer les électrons par des bosons composés. Par exemple, lorsque les conditions physiques correspondent à un facteur de remplissage égal à $1/3$, il y a trois quanta de flux (une mesure de l'intensité du champ magnétique) par électron (1). Les auteurs ont proposé de remplacer ces électrons par des bosons composés, des particules fictives ayant trois quanta de flux magnétique fictif (2) en sens inverse du flux magnétique réel (3). On annule ainsi le champ magnétique que chaque boson perçoit (4), ce qui facilite la modélisation de l'effet Hall quantique.

Les électrons, les protons et les neutrons sont des fermions. Un atome, qui contient ces trois types de particules, peut aussi être traité comme une seule particule composée. Cette particule se comporte comme un boson ou comme un fermion selon le nombre total de ses constituants : si ce nombre est impair, l'atome se comporte comme un fermion ; s'il est pair, comme un boson. Par exemple, l'isotope de l'hélium nommé hélium 4, composé de deux électrons, de deux protons et de deux neutrons, est un boson. En revanche, l'hélium 3, composé de deux électrons, de deux protons et de seulement un neutron, est un fermion.

Bosons et fermions diffèrent de plusieurs façons, mais la différence que nous avons surtout utilisée est leur façon d'occuper les états quantiques. Les fermions obéissent au principe d'exclusion de Pauli : deux fermions ne peuvent occuper le même état et, notamment, ils ne peuvent pas se trouver simultanément au même endroit. Cette loi ne s'applique pas aux bosons : plusieurs bosons peuvent cohabiter dans le même état.

Ce comportement différent des fermions et des bosons explique beaucoup d'observations, telle la différence entre un supraconducteur et un métal ordinaire : la conduction électrique dans les métaux ordinaires découle des propriétés des fermions (plus particulièrement, des électrons), tandis que

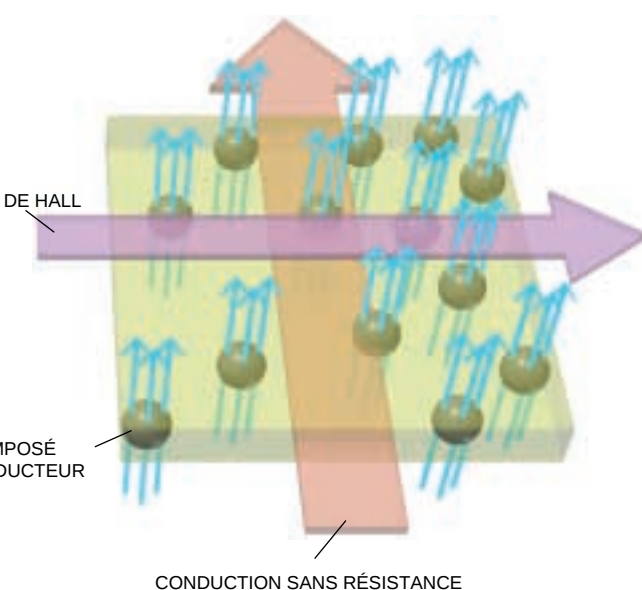
EFFET HALL QUANTIQUE AVEC DES ÉLECTRONS



CONDUCTION SANS RÉSISTANCE

4. L'EFFET HALL QUANTIQUE (à gauche) résulte de l'annulation du champ magnétique externe par les bosons composés (à droite, où, pour plus de clarté, le champ annulé a été omis). En l'absence de champ magnétique, les bosons chargés deviennent

EFFET HALL QUANTIQUE AVEC DES BOSONS COMPOSÉS



CONDUCTION SANS RÉSISTANCE

supraconducteurs : la conduction est alors parfaite dans la direction longitudinale. La tension de Hall apparaît en raison de l'induction : les flux magnétiques fictifs en mouvement produisent une tension transverse.

Comparaison entre la supraconduction et l'effet Hall quantique

SUPRACONDUCTION

Les paires d'électrons (paires de Cooper) sont les porteurs de charge fondamentaux

Conduction parfaite

Persistance de l'effet dans un champ magnétique et dans des matériaux contenant des impuretés

Les électrons repoussent un champ magnétique

Quantification du flux (une propriété des anneaux supraconducteurs, qui doivent contenir un nombre entier de quanta de flux magnétique)

EFFET HALL QUANTIQUE

Les bosons composés sont les porteurs de charge fondamentaux

Conduction parfaite dans le sens longitudinal

Plateaux de Hall quantifiés, dont la valeur persiste dans un petit intervalle d'intensités du champ magnétique

Dans un champ magnétique faible, les électrons s'opposent aux changements de densité (incompressibilité)

Charge fractionnaire (la quantification de la charge électrique en unités qui sont des fractions de la charge de l'électron)

la supraconduction résulte des propriétés des bosons.

Pourquoi cette différence, alors que les porteurs de charge, qui assurent le passage du courant électrique dans tous les solides, sont des électrons, c'est-à-dire des fermions ? Parce que, dans l'état supraconducteur, les électrons s'apparient, formant des « paires de Cooper » qui se comportent comme des bosons ; toutes ces paires peuvent se condenser dans le même état quantique, ce qui produit la supraconduction. En revanche, dans l'état métallique ordinaire, les électrons gardent leur identité de fermion ; ils sont nécessairement dans des états différents, comme l'exige le principe d'exclusion de Pauli, et ils n'assurent pas la supraconduction.

La théorie qui explique l'effet Hall quantique à l'aide de bosons composés a été introduite en 1989 par deux d'entre nous (S.-C. Zhang et S. Kivelson), en collaboration avec Hans Hansson, de l'Université de Stockholm. Nous avons proposé que les électrons qui se déplacent en deux dimensions dans un champ magnétique intense sont mathématiquement équivalents à un ensemble de bosons composés dans un champ magnétique beaucoup plus faible. Lorsque le facteur de remplissage d'électrons atteint une valeur magique (1, $1/3$ ou $1/5$), le champ magnétique auquel les bosons sont soumis devient nul. Dans ce cas, les bosons composés deviendraient supracon-

ducteurs, ce qui donnerait lieu aux conductances de Hall quantifiées.

En collaboration avec Matthew Fischer, de l'Université de Santa Barbara, l'un d'entre nous (D.-H. Lee) a étendu cette théorie pour expliquer les autres plateaux de conductance, associés à des facteurs de remplissage comme $2/5$ et $3/7$. Ces travaux sont à la base des recherches que nous avons menées à trois pour étudier l'effet Hall quantique dans des conditions variées.

Les électrons, des bosons composés

La théorie des bosons composés est fondée sur l'équivalence mathématique qui existe entre des électrons qui se déplacent dans deux dimensions de l'espace et un ensemble de bosons porteurs d'un paquet de flux magnétique fictif. Pour que les bosons composés aient le même comportement statistique que les électrons, chaque boson doit être porteur d'un nombre impair de quanta de flux magnétique fictif. Examinons sur un exemple l'effet du flux magnétique fictif.

Considérons l'un des facteurs de remplissage magiques, par exemple $1/3$, pour lequel un plateau apparaît dans la tension de Hall : il y a alors trois quanta de flux magnétique réel par électron. Considérons maintenant chaque électron non comme un fermion, mais comme un boson composé lié à trois quanta de flux fictif. Le flux perçu par

les bosons est la somme des flux réel et fictif. Si l'on oriente les trois quanta de flux fictifs dans le sens opposé à celui du champ magnétique externe, les bosons ne perçoivent en moyenne aucun flux magnétique. Comme les bosons sont supraconducteurs à basse température, des bosons composés froids et associés à un facteur de remplissage $1/3$ doivent également être supraconducteurs.

Pourquoi la supraconduction des bosons composés correspond-elle à une conduction parfaite dans le sens du courant et à une conductance de Hall quantifiée dans la direction perpendiculaire ? La première partie de la réponse est simple. Puisque les bosons composés sont supraconducteurs, il n'est besoin d'aucune tension pour maintenir le courant : la conduction est donc parfaite.

La seconde partie de la réponse est plus subtile. Rappelons-nous que chaque boson composé est porteur d'un nombre impair de quanta de flux magnétique fictif. En se déplaçant, les bosons composés entraînent les quanta de flux magnétique fictif avec eux. Ce déplacement de flux magnétique (même fictif) induit une tension électrique perpendiculaire au déplacement (c'est le physicien britannique Michael Faraday qui découvrit cette induction électromagnétique) proportionnelle à la quantité totale de flux fictif qui traverse l'échantillon en une seconde. Ainsi, pour un facteur de remplissage de $1/3$, le courant de flux magnétique est trois fois supérieur au courant électrique, de sorte que la conductance de Hall est égale au tiers du quantum de conductance.

De ce point de vue, la seule différence entre les divers facteurs de remplissage magiques réside dans le nombre de quanta de flux magnétique fictif que porte chaque boson composé. De plus, les conductances de Hall quantifiées (telles que 1, $1/3$, $2/5$, etc., multiplié par e^2/h) ne dépendent que du quotient de la charge électrique par le flux dans le boson composé, et non du matériau particulier où on les observe.

Le modèle des bosons composés explique aussi pourquoi la conductance de Hall est inchangée lorsque le facteur de remplissage diffère légèrement d'une valeur magique. Considérons un état physique où le facteur de remplissage de l'électron est légèrement supérieur à $1/3$. Dans ce cas, le flux fictif ne compense que partiellement le flux réel, et

les bosons composés subissent un faible champ magnétique résultant. Cependant, comme les supraconducteurs réels, les supraconducteurs de bosons composés supportent un faible champ magnétique, et la conductance de Hall est inchangée quand le facteur de remplissage n'est que voisin de $1/3$.

L'analogie entre la supraconduction et l'effet Hall quantique va encore plus loin. Par exemple, de même que les supraconducteurs repoussent un champ magnétique, les électrons présentant l'effet Hall quantique s'opposent à tout changement survenant dans le domaine qu'ils occupent (les électrons de l'effet Hall sont dits «incompressibles»).

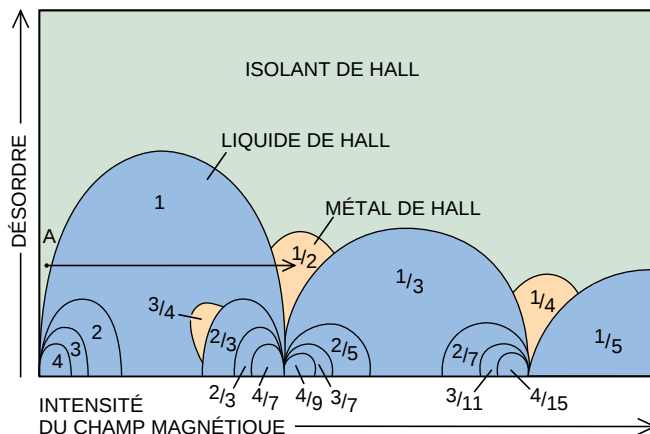
D'autres aspects de la supraconduction, plus obscurs, ont aussi leur analogie dans l'effet Hall quantique.

Une carte du confinement

À l'aide de la théorie des bosons composés, nous avons étudié l'effet Hall quantique dans de nombreuses conditions physiques et nous avons établi un diagramme de phase qui représente les divers comportements. Quand les physiciens étudient le comportement d'un composé comme l'eau, ils indiquent ses diverses formes – glace, liquide ou vapeur – en fonction, par exemple, de la pression et de la température.

Dans le cas des électrons en deux dimensions, les paramètres du diagramme de phase sont l'intensité du champ magnétique et le désordre des cristaux semi-conducteurs qui piègent les électrons. Nous avons obtenu ce diagramme théorique par analogie avec celui des supraconducteurs désordonnés. La reproduction des informations contenues dans le diagramme de phase pour les supraconducteurs fait apparaître une belle structure emboîtée (voir la figure 5).

La théorie des bosons composés a également conduit à la prédiction d'un état inattendu, où les électrons présentent simultanément les propriétés d'un isolant et d'un métal. Cette prédiction d'un «isolant de Hall» a été récemment confirmée par les expériences de Hong-Wen Jiang et



5. LES NOUVEAUX ÉTATS de la matière engendrés par le confinement d'électrons dans un plan (deux dimensions) sont représentés sur un diagramme de phase. Dans un champ magnétique faible et dans un matériau peu désordonné (point A, à gauche), les électrons se comportent comme un «isolant de Hall» (en vert), qui est à la fois isolant et métallique. Dans des champs magnétiques plus intenses, les électrons forment un «liquide de Hall» (en bleu) : ils manifestent l'effet Hall quantique. Dans certaines circonstances, ils provoquent l'apparition d'un «métal de Hall» (en beige). Les nombres indiquent les valeurs entières et fractionnaires de la conductance de Hall quantifiée.

de ses collègues de l'Université de Los Angeles : en augmentant le désordre dans les semi-conducteurs, ils ont atteint un point au-delà duquel il fallait appliquer une tension très importante pour entretenir le courant. Cette tension appliquée augmentait régulièrement, à mesure que l'on réduisait la température, jusqu'à atteindre presque le zéro absolu – ce qui est caractéristique d'un isolant. Toutefois, simultanément, la tension de Hall était constante, et elle augmentait avec l'intensité du champ magnétique – ce qui est caractéristique d'un métal.

D'autres expériences ont révélé une propriété étonnante des électrons au voisinage du facteur de remplissage $1/2$: les électrons se comportaient comme s'ils étaient dans un métal ordinaire, sans champ magnétique ; la conductance de Hall n'était pas quantifiée, mais proportionnelle au champ magnétique.

On peut expliquer la formation de ce «métal de Hall» en considérant les électrons comme des fermions composés. Un fermion composé ressemble à un boson composé, sauf qu'il est porteur d'un nombre pair de quanta de flux magnétique fictif et qu'il obéit donc à la statistique de Fermi.

Ces notions de bosons ou de fermions composés permettent de relier le comportement apparemment étrange des électrons en deux dimensions au comportement normal des particules composées. Ces particules

composées sont-elles réelles ou bien, comme les quarks en physique des particules, ne sont-elles que des abstractions utiles qui ne peuvent être étudiées individuellement ? La question reste posée.

Plus de 15 ans après sa découverte, l'effet Hall quantique reste l'un des domaines les plus passionnants de la physique de la matière condensée. La multiplicité des phénomènes en jeu a fourni un banc d'essai à de nombreuses idées théoriques. Il en ressort une vision qui unifie la compréhension de ces phénomènes avec celle d'autres phénomènes dans la matière condensée. Toutefois des questions importantes sub-

sistent. Par exemple, on est encore loin d'une compréhension satisfaisante de l'isolant de Hall ou du métal de Hall. On ne sait pas non plus comment intégrer dans cette vision d'autres propriétés des électrons, comme leur spin.

La véritable importance de l'effet Hall quantique ne réside pas dans ses applications éventuelles, mais dans la compréhension nouvelle que les physiciens ont acquise des propriétés particulières des systèmes d'électrons dans les champs magnétiques intenses. La nature peut très bien garder en réserve d'autres états surprenants de la matière auxquels personne ne pense aujourd'hui et qu'il nous reste à découvrir.

Steven KIVELSON et Dung-Hai LEE sont professeurs de physique à l'Université de Los Angeles. Shou-Cheng ZHANG est professeur à l'Université de Stanford.

Bertrand I. HALPERIN, *Quantized Hall Effect*, in *Scientific American*, vol. 254, n° 4, avril 1986.

Frank WILCZEK, *Les anyons*, *Pour la Science*, juillet 1991.

Shou-Cheng ZHANG, *The Chern-Simons-Landau-Ginzburg Theory of the Fractional Quantum Hall Effect*, in *International Journal of Modern Physics B*, vol. 6, n° 1, pp. 25-58, janvier 1992.

S. KIVELSON, D.-H. LEE et S.-C. ZHANG, *Global Phase Diagram in the Quantum Hall Effects*, in *Physical Review B*, vol. 46, n° 4, pp. 2223-2238, 15 juillet 1992.

Les mangroves des Caraïbes

KLAUS RÜTZLER • ILKA FELLER

Des plantes et des animaux se sont adaptés pour vivre à la limite entre la terre et la mer. Ils forment un écosystème diversifié, fragile et surprenant.

Une forêt de palétuviers déchiquetés et noueux qui émergent de la surface de l'eau, des racines qui plongent dans une vase noire et fétide, des frondaisons verdoyantes sous le soleil ardent, un bourdonnement incessant d'insectes : voilà les mangroves des côtes tropicales. Ici, la terre et la mer se mélangent.

Qu'est-ce qu'une mangrove ? S'agit-il d'un type particulier de récif corallien ou d'une forêt amphibie ? Par rapport aux forêts tropicales continentales, qui contiennent jusqu'à 100 espèces différentes d'arbres par hectare, la mangrove est monotone et pauvre : les forêts de mangroves les plus diversifiées, sur les côtes indopacifiques, ne contiennent qu'une quarantaine d'espèces de palétuviers au total. Ailleurs elles ne sont constituées que de huit espèces de palétuviers, dont seulement trois sont vraiment courantes.

«Palétuvier» n'est pas un nom phylogénétique ; il désigne tous les arbres capables de vivre dans l'eau de mer peu profonde. Leurs tissus repoussent

le sel ou l'excrètent. Leurs racines aériennes, qui assurent les échanges gazeux nécessaires à la respiration aérobie, leur permettent de survivre dans la zone intertidale, c'est-à-dire où le sol est régulièrement couvert et découvert par la marée. Un milieu salé n'est pas indispensable à la croissance des palétuviers, mais ils ne poussent qu'en bord de mer, car ils sont incapables d'entrer en compétition avec la flore d'eau douce.

L'extension géographique des zones de mangroves est aussi limitée par les contraintes climatiques. Comme les coraux, elles ont besoin d'une température douce : les palétuviers ne vivent que là où la température moyenne de l'eau est supérieure à 23 °C. Ainsi trouve-t-on des mangroves là où sont aussi présents des récifs coralliens : le long des côtes tropicales. Cette association connaît des exceptions : les côtes continuellement soumises à d'importants apports de sédiments, tels les rivages d'Afrique occidentale, et les zones où des eaux froides remontent vers la surface,

comme au large de l'Est du Venezuela, sont dépourvues de récifs coralliens, alors qu'elles abritent des mangroves importantes. À l'inverse, des îles coralliennes du Pacifique central ne sont pas bordées de forêts de mangroves, apparemment parce que les propagules flottantes, semences des palétuviers, ne les atteignent pas.

On distingue deux types d'écosystèmes de mangroves, selon qu'ils occupent la côte d'un continent ou d'une île. Les littoraux à mangroves des côtes continentales sont inondés à la fois par l'eau salée de l'océan et par l'eau douce des fleuves : elles s'adaptent au fort gradient de salinité qui s'étend de l'intérieur vers la mer. Les mangroves des îles, qui se forment sur des hauts-fonds ou sur des zones lagunaires éloignées du continent, subissent plutôt des variations de la salinité au cours du temps, en raison de l'évaporation intense et des pluies tropicales.

Les écosystèmes de mangroves sont-ils aussi variés et productifs que d'autres écosystèmes tropicaux ?



1. LES VASIÈRES MARITIMES des pays tropicaux (ci-dessus) sont souvent colonisées par une association végétale nommée mangrove, constituée principalement de palétuviers. Ces arbres (à droite), adaptés à de fortes concentrations en sel dans le sol, se développent dans les eaux aux températures moyennes supérieures à 23 °C. Les auteurs ont étu-

dié les écosystèmes à mangroves de la barrière de corail qui longe la côte du Belize (cartouche). Ces marais abritent une faune et une flore variées dans la voûte sombre des arbres et au pied des racines des palétuviers immergées en permanence. Des espèces se sont adaptées pour vivre dans la zone soumise au balancement des marées.