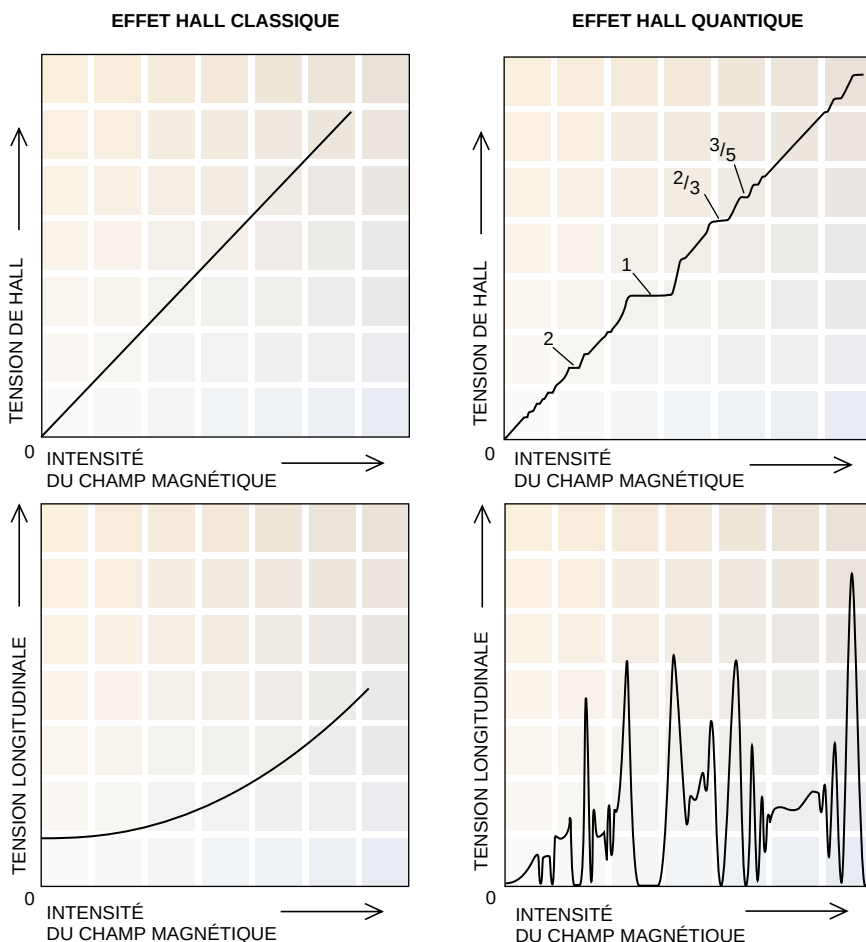




2. ON OBSERVE des manifestations de l'effet Hall quantique lorsque l'on compare certaines mesures avec celles qui se rapportent à l'effet Hall classique (non quantifié). Dans l'effet Hall classique, la tension transverse (tension de Hall) est proportionnelle au champ magnétique ; dans le cas quantique, 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.

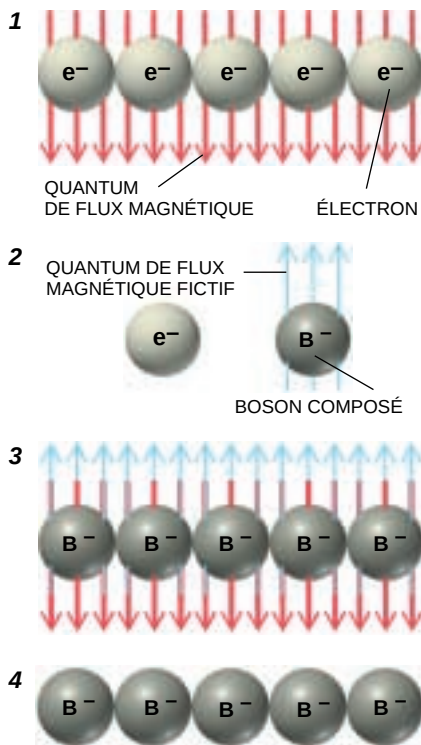
En exploitant une analogie mathématique entre l'effet Hall quantique et

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.



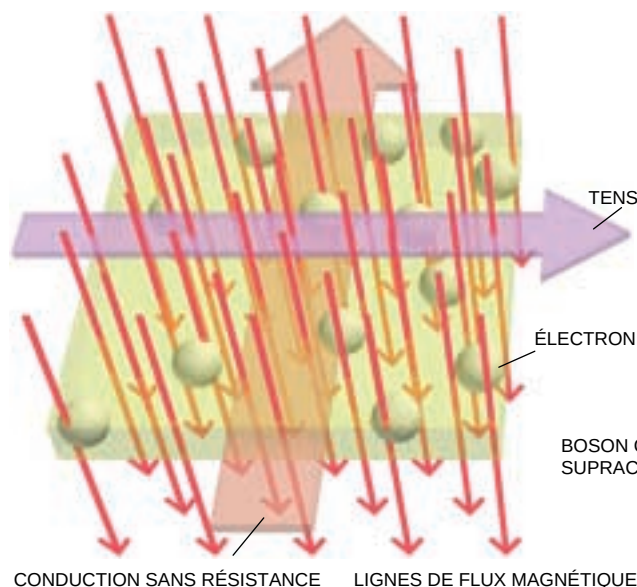
3. POUR EXPLIQUER L'EFFET HALL QUANTIQUE, on peut remplacer les électrons par des bosons composés. Par exemple, lorsque les conditions physiques correspondent à un facteur de remplissage égal à $1/3$, il y a trois quanta de flux (une mesure de l'intensité du champ magnétique) par électron (1). Les auteurs 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.

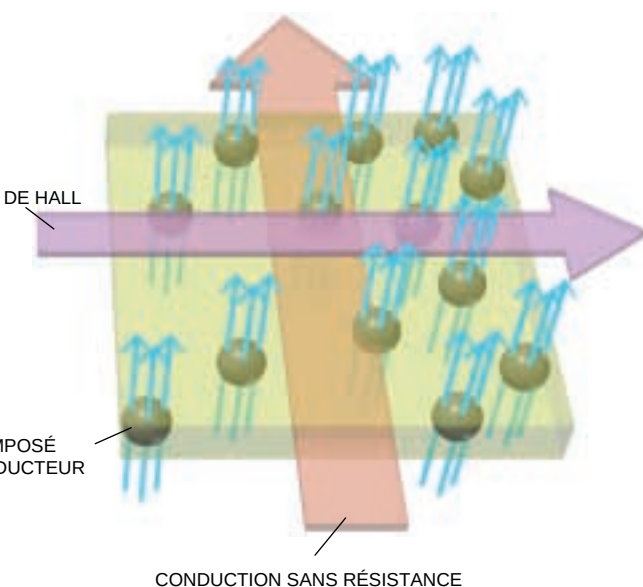
Ce comportement différent des fermions et des bosons explique beaucoup d'observations, telle la différence entre un supraconducteur et un métal ordinaire : la conduction électrique dans les métaux ordinaires découle des propriétés des fermions (plus particulièrement, des électrons), tandis que

EFFET HALL QUANTIQUE AVEC DES ÉLECTRONS



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



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.