

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»).

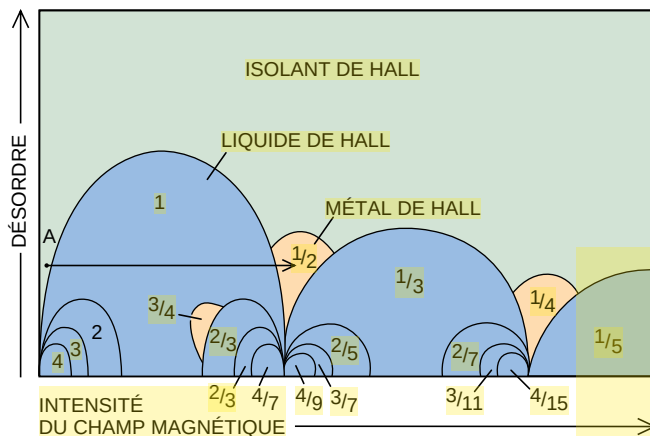
D'autres aspects de la supraconduction, plus obscurs, ont aussi leur analogie dans l'effet Hall quantique.

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.