

Les échelles quantiques

THIERRY GIAMARCHI • EDMOND ORIGNAC • DIDIER POILBLANC

Composés hybrides, à mi-chemin entre les fils unidimensionnels et les conducteurs à deux ou trois dimensions, les échelles quantiques ont des propriétés électriques radicalement nouvelles.

La physique quantique s'est révélée indispensable non seulement pour comprendre les phénomènes atomiques ou subatomiques, mais aussi pour expliquer nombre de phénomènes macroscopiques, tels le ferromagnétisme, la supraconductivité ou l'effet Hall quantique. Tous ces phénomènes résultent d'une combinaison entre, d'une part, les interactions électriques des électrons et des ions chargés qui constituent les solides, et, d'autre part, des effets purement quantiques irréductibles à une description classique.

La description complète d'un objet sur la base de ces interactions est, *a priori*, inenvisageable, car le nombre de particules dans un échantillon macroscopique est gigantesque (de l'ordre de 10^{23}) et, même si les équations de base qui régissent le système étudié sont bien connues, le temps nécessaire pour les résoudre sur un ordinateur excède de plusieurs ordres de grandeur l'âge de l'Univers. Lorsque la mécanique quantique s'en mêle, la complexité du problème est encore augmentée par l'impossibilité de connaître en même temps la vitesse et la position de chaque particule (principe d'indétermination de Heisenberg). Enfin, le comportement collectif d'un très grand nombre d'électrons donne lieu, comme nous allons le voir, à des phénomènes radicalement nouveaux, qui ne peuvent être déduits de l'étude d'un petit nombre de particules en interaction.

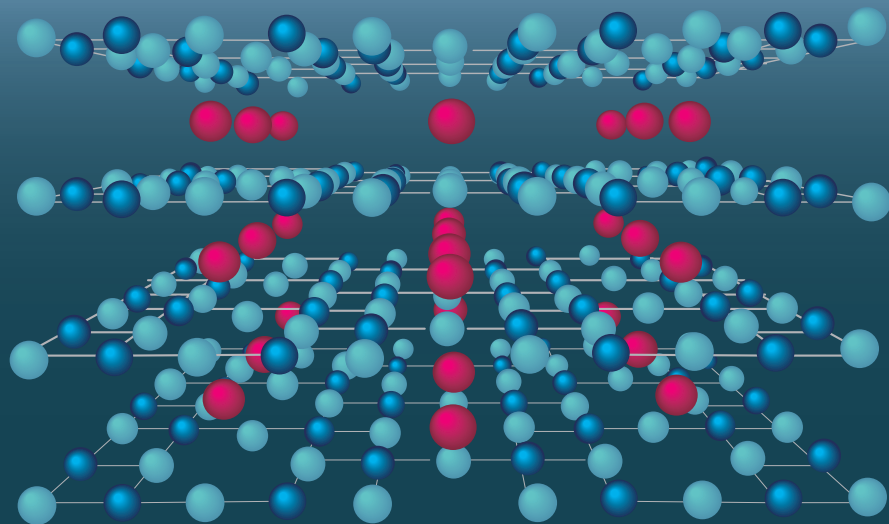
Heureusement, une description aussi complète n'est généralement pas nécessaire pour connaître les propriétés d'un corps à l'équilibre thermodynamique. Ainsi, à la fin du XIX^e siècle, Ludwig Boltzmann décrit de façon satisfaisante la physique des gaz parfaits ou dilués en introduisant l'usage des probabilités en physique, notamment pour décrire la position et la vitesse des particules. Par la suite, cette approche statistique a été généralisée par Josiah Gibbs qui exprima, pour un corps à la température T , la probabilité d'occupation de la configuration d'énergie E (proportionnelle à $\exp(E/kT)$ où k est une constante) sous une forme aisément transposable à la mécanique quantique. En physique des solides, il existe une simplification supplémentaire due au fait que l'on étudie des systèmes à basse température, et par conséquent, que l'on peut se contenter de considérer leur état fondamental (l'état de plus basse énergie) et les premiers états excités au-dessus du fondamental.

Comme nous le verrons, il résulte de ces méthodes que le comportement des électrons dans un conducteur de dimension égale à deux ou trois est très différent de celui des électrons contraints à se déplacer le long d'une direction unique. Au cours des dernières années les chimistes ont su synthétiser des matériaux constitués d'un petit nombre de chaînes d'atomes reliées par des ponts, les échelles, qui permettaient, pensaient les théoriciens, d'appréhender la structure des conducteurs bi ou tridimensionnels en partant de la limite unidimensionnelle qu'ils comprenaient bien. Or, de façon tout à fait inattendue, ces échelles quantiques se sont révélées dotées de propriétés très originales.

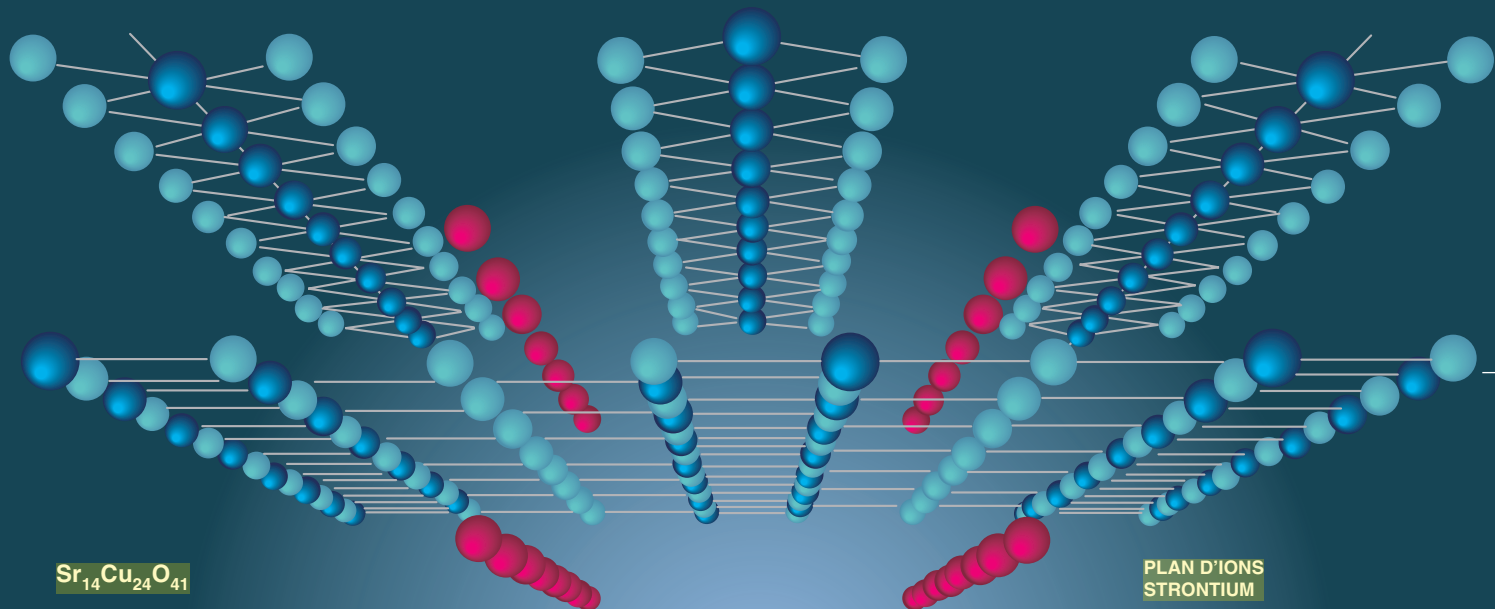
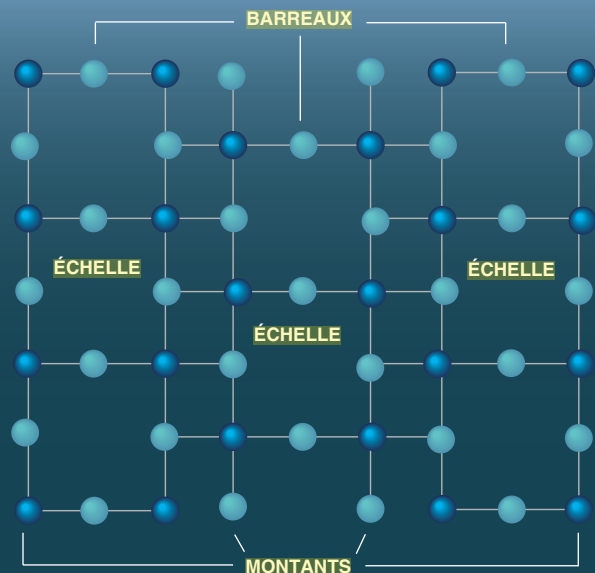
Gaz et liquides d'électrons

Dans un échantillon solide, les électrons se comportent comme un gaz ou une « mer » de particules chargées dont la structure détermine les propriétés de conduction du solide. Pour l'étudier plus en détail, rappelons qu'en mécanique quantique, on distingue deux classes de particules : les bosons (par exemple, les photons) et les fermions (par exemple, les électrons). Les bosons sont de véritables moutons de Panurge : la probabilité qu'un boson aille dans un état donné est proportionnelle au nombre de bosons qui l'occupent déjà. Au contraire, les fermions font figure de misanthropes : il est impossible de placer deux fermions dans le même état quantique (c'est le principe d'exclusion de Pauli). Les électrons, les protons et les neutrons ainsi que toute particule formée d'un nombre

1. LES ÉCHELLES QUANTIQUES sont des composés constitués de chaînes d'atomes – « les montants » – reliées par des ponts – « les barreaux ». Elles sont dotées de propriétés originales. Le composé de formule SrCu_2O_3 (en haut), un réseau cristallin constitué d'ions strontium Sr^{2+} (en rouge), cuivre Cu^{2+} (en bleu) et oxygène O^{2-} (en turquoise), est formé de plans d'ions strontium séparant les plans d'ions cuivre et oxygène (Cu_2O_3) qui contiennent les échelles (en haut et à droite). Ces échelles sont isolantes. Au contraire, les échelles du composé $\text{Sr}_{14}\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$ (en bas), sont supraconductrices sous certaines conditions. Cette fois, il y a trois types de plans : les plans d'ions strontium, des plans d'ions cuivre et oxygène, mais aussi des plans constitués de chaînes d'oxyde de cuivre (inactives pour le transport électronique). On sait synthétiser des échelles à un nombre n quelconque de montants, des composés de formule générale $\text{Sr}_n\text{Cu}_{n+1}\text{O}_{2n+1}$.

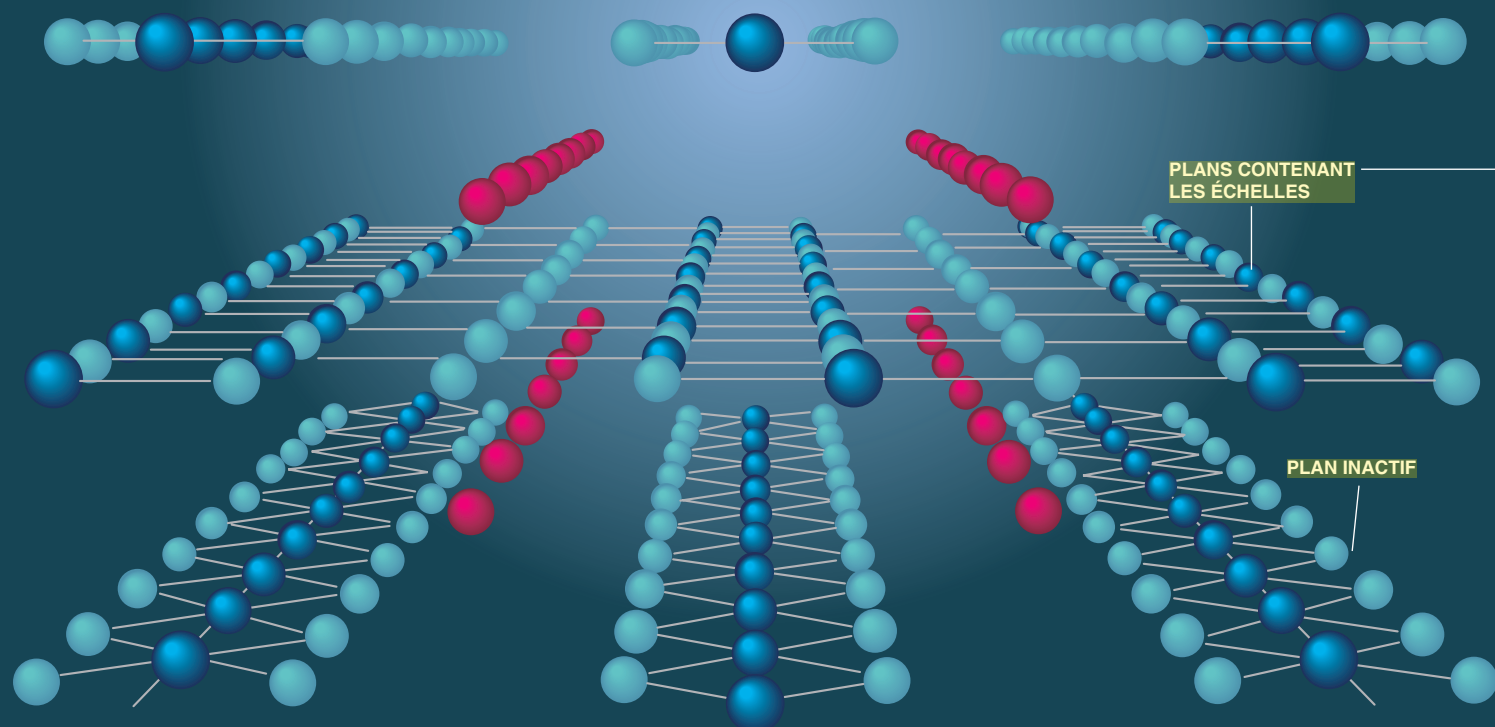


SrCu_2O_3



$\text{Sr}_{14}\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$

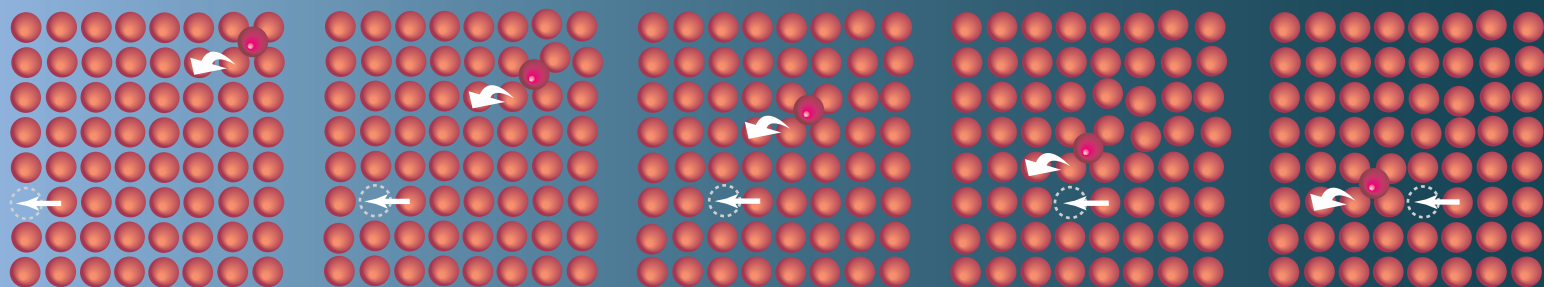
PLAN D'IONS
STRONTIUM



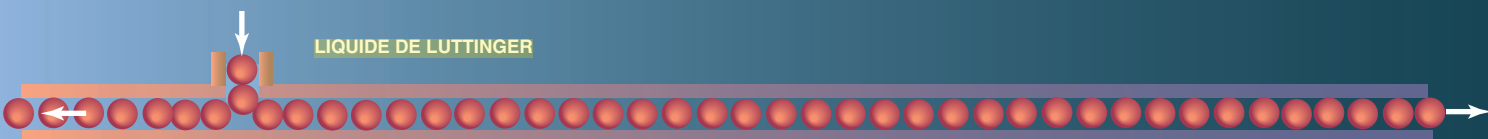
PLANS CONTENANT
LES ÉCHELLES

PLAN INACTIF

LIQUIDE DE FERMİ

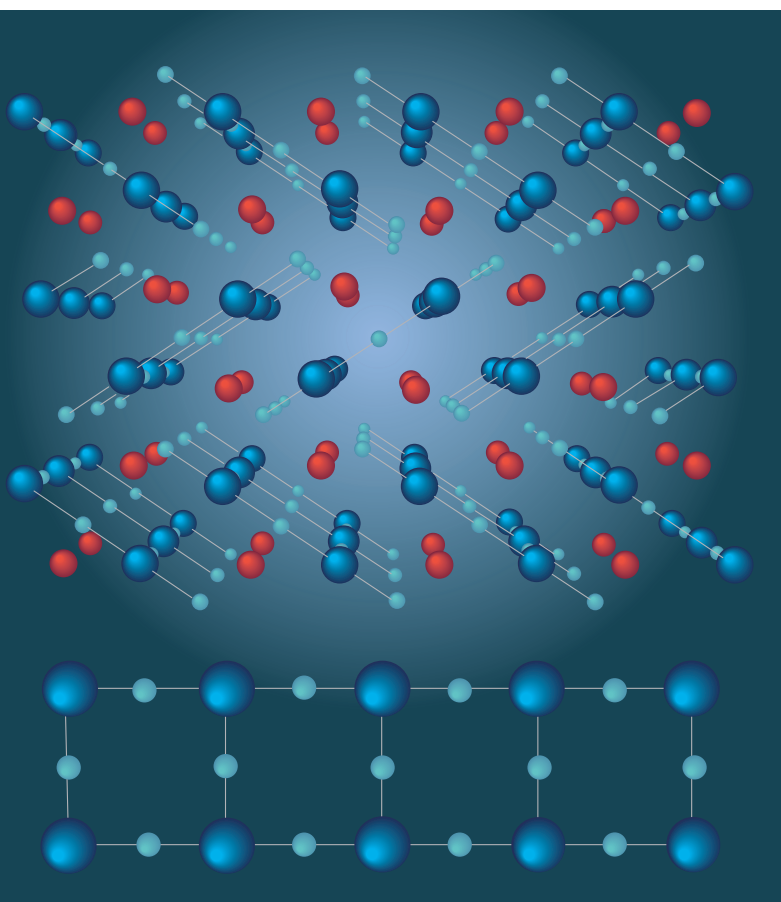


LIQUIDE DE LUTTINGER



2. LA CONDUCTION électrique dans un solide relève de descriptions différentes selon que les électrons se meuvent dans une dimension ou dans plusieurs. Le niveau de Fermi d'un solide peut être considéré comme la surface de sa « mer d'électrons ». Les transports de courant sont des excitations à la surface de cette mer, c'est-à-dire des particules ajoutées au niveau de Fermi (*en rouge*) ou des trous ôtés dans ce même niveau (*en pointillés*). Ici, un jeu de taquin formé de billes symbolise les

interactions entre les électrons qui ont pour résultat global que ces excitations se propagent comme des particules isolées formant un gaz dilué. Un tel système est qualifié de liquide de Fermi. Au contraire, dans un système unidimensionnel, une particule n'avance qu'en poussant celle qui précède, entraînant un mouvement collectif. Il n'existe pas d'excitations ressemblant à des fermions libres. Dans le cas de ces conducteurs à une dimension, on parle de liquide de Luttinger.



3. LE COMPOSÉ $\text{LaCuO}_{2,5}$ formé d'atomes de lantane (*en rouge*), de cuivre (*en bleu*) et d'oxygène (*en bleu turquoise*) est constitué de chaînes d'atomes unidimensionnelles dont certaines sont reliées par des ponts transverses, ce qui leur confère une structure en échelle. Les physiciens pensaient que ces conducteurs présenteraient des propriétés intermédiaires entre celles des systèmes à une dimension (liquides de Luttinger) et celles des systèmes à deux dimensions (liquides de Fermi). En réalité, les échelles présentent des propriétés complètement nouvelles, et constituent peut-être un modèle réduit qui nous conduira à la compréhension de la supraconductivité à haute température critique.

impair de fermions (par exemple, les atomes d'hélium 3) sont des fermions. En revanche, les particules formées d'un nombre pair de fermions (les atomes d'hélium 4) sont des bosons. À condition de négliger les possibles interactions entre les particules, il est facile de calculer (par la méthode de Gibbs) les propriétés thermodynamiques d'un gaz de bosons, nommé gaz de Bose, ou d'un gaz de fermions, nommé gaz de Fermi. Ainsi, par exemple, on s'est aperçu que, dans le cas des bosons, un phénomène remarquable se produit : la condensation de Bose-Einstein où tous les atomes adoptent le même état quantique. Dans le cas des fermions, il ne peut y avoir de condensation puisqu'il est impossible de placer deux fermions dans le même état quantique : ces particules « s'empilent » sur des niveaux d'énergie de plus en plus élevés. Le niveau de plus grande énergie occupé à l'état fondamental est qualifié de niveau ou d'énergie de Fermi.

Le modèle du gaz de Fermi suffit souvent à expliquer un grand nombre de propriétés de la « mer d'électrons » qui constitue les métaux, en particulier les métaux dits simples, tel le sodium. Or, ceci est paradoxal. Le modèle de Fermi, comme on l'a déjà signalé, est bâti en négligeant totalement les interactions coulombiennes électrostatiques entre les électrons, de la même façon que l'on néglige les interactions entre les atomes pour construire le modèle du gaz parfait en mécanique statistique classique. Pourtant, dans la réalité, ces interactions ne sont nullement négligeables.

Pour éclairer ce paradoxe, évoquons la théorie dite du « liquide de Fermi », proposée en 1958 par le physicien russe Lev Landau. Landau postula qu'en l'absence d'interactions coulombiennes, les électrons formeraient effectivement un gaz parfait quantique – un gaz de Fermi – dont la description théorique est connue depuis les années 1930. En mécanique classique, pour passer de la description du gaz parfait à celle du liquide, il suffit d'augmenter la force des interactions. Ce passage se fait continûment, de sorte qu'il n'existe aucun moyen de distinguer nettement un gaz d'un liquide (on parle de continuité de l'état fluide). Selon Landau, le même phénomène devait se produire lorsqu'on ajoute des interactions