

Impénétrable matière

On pourrait traverser les murs et la matière s'effondrerait sur elle-même, si les lois quantiques n'y mettaient bon ordre.

La matière solide est dure et impénétrable, et nous serions fort étonnés de traverser sans mal murs et portes. Pourtant, à l'échelle microscopique, la matière est très lacunaire : un noyau atomique est 100 000 fois plus petit qu'un atome et l'on peut considérer les électrons comme ponctuels. Qu'est-ce qui empêche les atomes de se traverser ? Par ailleurs, pourquoi le vide au sein d'un atome subsiste-t-il alors que son noyau et ses électrons s'attirent fortement ? L'atome ne devrait-il pas s'effondrer sur lui-même ? Nous allons le voir, la réponse à ces interrogations se trouve du côté de la physique quantique.

Les propriétés d'une particule élémentaire telle que l'électron ne se comprennent qu'à l'aide de notions empruntées à la fois à la mécanique usuelle et aux ondes. Ainsi, un électron en mouvement a non seulement une quantité de mouvement mv , égale au produit de sa masse par la vitesse, mais aussi, comme l'a stipulé le physicien français Louis de Broglie en 1923, une longueur d'onde égale au rapport de la constante de Planck ($h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg/s}$) par sa quantité de mouvement.

Cette relation a une conséquence cruciale. Lorsqu'une particule est confinée dans un certain espace, la longueur d'onde qui lui est associée est nécessairement plus courte que la taille du volume dans lequel la particule se trouve – de la même façon que la vibration sinusoïdale d'une corde de guitare a

une longueur d'onde égale, au plus, au double de la longueur de la corde. Doté d'une longueur d'onde finie, l'électron a alors une quantité de mouvement non nulle (égale au quotient de h par la longueur d'onde). Autrement dit, une particule confinée ne peut jamais, par nature, être immobile.

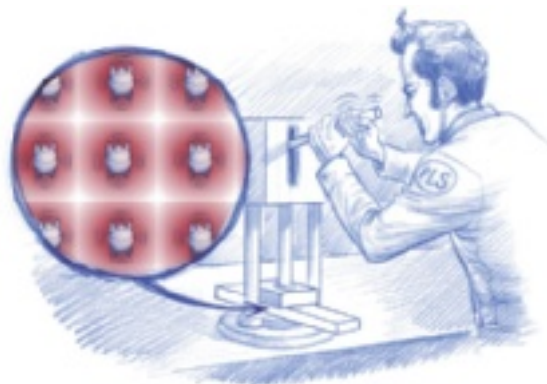
Plus on est serré, plus on s'agite

Quelle est l'importance de cet effet ? Déterminons la quantité de mouvement et l'énergie cinétique minimales d'un électron placé dans une boîte cubique. Dans un cube de un mètre de côté, sa quantité de mouvement minimale est de l'ordre de 3×10^{-34} unité du système international, soit une vitesse de 4×10^{-4} mètre par seconde et une énergie cinétique de l'ordre de 6×10^{-38} joule ou 4×10^{-19} électronvolt, valeur dérisoire même à l'échelle microscopique. Mais pour un cube de un angström (10^{-10} mètre) de côté, la vitesse minimale est de 4 000 kilomètres par seconde et l'énergie cinétique vaut quelques dizaines d'électronvolts. Ce mouvement incessant exerce une pression sur les parois, heurtées par l'électron. La pression est minuscule (environ 4×10^{-38} pascal) pour un électron confiné dans un mètre cube, mais elle passe à 40 millions d'atmosphères pour un volume de un angström cube !

Cette propriété explique pourquoi la matière est stable. Prenons l'exemple le plus simple, l'atome d'hydrogène. Il est composé d'un proton chargé positivement et d'un élec-



Dessins de Bruno Vézaro



1. Plus le volume accessible à une particule est faible, plus la longueur d'onde associée (*en rouge, l'étendue de l'onde associée à la particule*) est courte. La longueur d'onde étant inversement proportionnelle à la quantité de mouvement, une particule s'agite d'autant plus que le volume disponible est petit.

2. Un solide est très peu compressible en raison du principe d'exclusion de Pauli, qui interdit à deux électrons d'être dans un même état quantique. Ainsi, les ondes (*en rouge*) associées aux électrons ne peuvent se recouvrir, d'où résulte une pression quantique insurmontable. L'impénétrabilité de la matière en est aussi une conséquence.

tron chargé négativement. L'attraction électrostatique entre ces deux particules est considérable. Pourtant, malgré cette force, l'électron reste à environ un angström du noyau – une bonne distance sachant que le proton a un rayon d'environ un femtomètre (10^{-15} mètre).

Pourquoi l'électron ne se rapproche-t-il pas du noyau ? Cela reviendrait à le confiner dans un espace de plus en plus restreint, donc à accroître sa vitesse. Plus précisément, si la vitesse de l'électron est inversement proportionnelle à la taille de la boîte « atome », son énergie cinétique sera inversement proportionnelle au carré de cette taille, alors que l'énergie potentielle électrostatique lui est simplement inversement proportionnelle : lorsqu'on rétrécit l'atome, l'énergie cinétique de l'électron croît plus vite que l'énergie potentielle ne décroît. La taille de l'atome correspond à l'énergie la plus basse, c'est-à-dire à un compromis entre petite taille (énergie potentielle très faible, énergie cinétique élevée) et grande taille (énergie potentielle élevée, énergie cinétique faible). Une évaluation simple donne un angström : c'est la valeur mesurée !

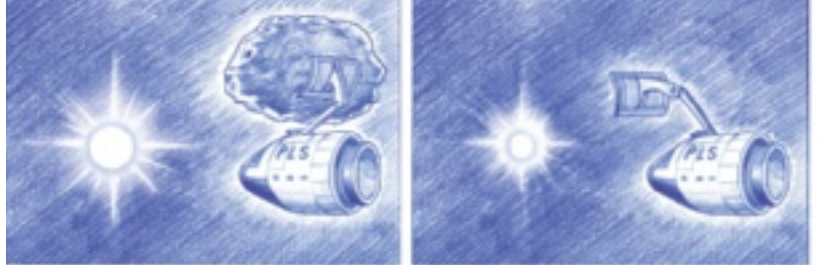
Un compromis quantique, de l'atome à l'étoile

La relation de De Broglie permet ainsi de comprendre la stabilité d'un atome et fournit sa taille approximative. Pour comprendre pourquoi la matière est impénétrable, il faut invoquer une autre propriété quantique : le « principe d'exclusion de Pauli ». Quoique ponctuels, deux électrons ne peuvent occuper le même espace. Aussi, lorsque plusieurs électrons sont enfermés dans une boîte, l'espace de chacun n'est pas le volume de la boîte, mais ce volume divisé par le nombre d'électrons présents.

Considérons un morceau macroscopique de matière, et, pour faire simple, du cuivre. Dans ce métal, chaque atome cède à la communauté un électron « libre » : au lieu d'être confiné au voisinage de son atome d'origine, cet électron peut se déplacer dans tout le volume du matériau, d'où la bonne conductivité électrique du cuivre.

En vertu du principe d'exclusion de Pauli, le volume disponible pour chacun des électrons libres est égal au volume du métal divisé par le nombre d'atomes de cuivre (les électrons internes des atomes, confinés près du noyau, n'interviennent pratiquement pas). Chaque atome ayant perdu un électron, il est chargé positivement comme un proton. La situation est comparable à celle de l'atome d'hydrogène et le compromis entre énergie potentielle électrostatique et énergie cinétique due au confinement correspond à un volume similaire : les atomes sont séparés de quelques angströms.

Ainsi, les atomes ne s'interpénètrent pas grâce à la répulsion quantique entre électrons, et le volume total est simplement proportionnel au nombre d'atomes. Pour comprimer



3. Pour certaines étoiles, la masse est tellement énorme que l'énergie de gravitation favorise l'effondrement de la matière sur elle-même, malgré l'énergie cinétique d'origine quantique et due au confinement. Ainsi, lorsqu'elle accumule de la matière, une étoile massive diminue de taille.

le métal, il faut vaincre la pression électronique qui s'exerce sur ses bords. Le chiffre précédent (des dizaines de millions d'atmosphères), corrigé pour tenir compte des dimensions réelles des « boîtes » électroniques, donne une excellente estimation de la compressibilité d'un métal. Autrement dit, si nous ne passons pas à travers une plaque d'acier et si celle-ci ne se comprime pas sous notre poids, c'est avant tout grâce aux lois quantiques. Pour d'autres matériaux, le raisonnement est parfois plus compliqué, mais l'ingrédient de base (le principe de Pauli) et les ordres de grandeur sont les mêmes.

Après avoir considéré un seul atome, puis un morceau de matière (quelque 10^{23} atomes), changeons encore d'échelle pour passer aux étoiles massives (10^{50} atomes). La force gravitationnelle, toujours attractive, devient prépondérante (les forces électrostatiques ne s'exercent qu'entre proches voisins : charges positives et négatives se compensent à grande échelle, la matière étant globalement neutre). Dans une étoile, chaque particule interagit gravitationnellement avec toutes les autres.

Qu'advient-il lorsqu'on ajoute de la matière à une étoile suffisamment massive ? Dans le nouveau compromis à trouver entre énergie potentielle et énergie cinétique de confinement, l'énergie potentielle prend le dessus et favorise l'effondrement : lorsqu'on ajoute de la masse, la taille de l'étoile diminue ! Autrement dit, contrairement à la matière habituelle, plus l'étoile est massive, plus son diamètre est faible. Bien entendu, ce raisonnement fait peu de cas de la pression cinétique due à la température très élevée du cœur de l'étoile (quelques millions de degrés pour le Soleil). Mais il est valable pour les étoiles relativement froides (et pas trop massives pour éviter un effondrement gravitationnel total), telles les naines blanches.

J.-M. LÉVY-LEBLOND et F. BALIBAR, *Quantique*, Masson, 1997.

N. STRAUMANN, *The role of the exclusion principle for atoms to stars : a historical account*, téléchargeable sur <http://arxiv.org/pdf/quant-ph/0403199>.

Blog des auteurs : <http://fausstroll.free.fr/blog/>