

ce gros atome d'hydrogène perdrait très vite de l'énergie et reprendrait rapidement sa taille normale. En bref, c'est la relation d'incertitude entre la position et la vitesse des électrons qui détermine la taille des atomes.

Plus précisément, ce n'est pas la vitesse, mais la quantité de mouvement qui intervient dans la relation d'incertitude de Heisenberg. La quantité de mouvement est égale au produit de la vitesse par la masse. Pour cette raison, la taille de l'enveloppe électronique dépend directement de la masse de l'électron. La taille des atomes est donc déterminée par la masse de l'infime grain d'électricité élémentaire. Si cette masse était 100 fois plus petite que celle que l'on observe dans la nature, les atomes seraient tous 100 fois plus grands ! Si elle était 10 000 fois plus grande, le diamètre de l'enveloppe de l'atome serait alors si petit qu'il serait égal à quelque dix fois le diamètre du noyau.

Ainsi, le comportement quantique des électrons impose la taille universelle des atomes. Impose-t-il aussi la taille des noyaux ? Celle des électrons ? Dès qu'ils ont commencé à mieux comprendre la constitution des atomes, les physiciens ont voulu répondre à ces questions. Ils sont alors entrés dans le domaine de la physique des particules. Malgré l'énorme travail d'exploration accompli, ces questions restent ouvertes.

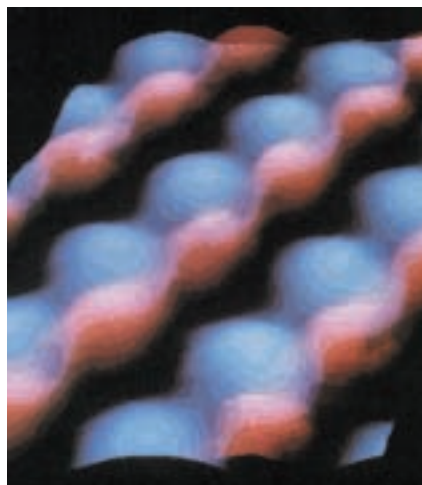
Pour comprendre pourquoi, examinons ce que les physiciens ont découvert du monde subnucléaire en commençant par les noyaux atomiques. Ces derniers représentent la plus grande partie de la masse atomique. Dans le cas de l'hydrogène, par exemple, le noyau est 1 840 fois plus lourd que l'électron. Le noyau de l'hydrogène est constitué d'une unique particule : le proton. Ceux des autres atomes contiennent tous des protons et des neutrons, des particules neutres dont la masse est comparable à celle des protons. Protons et neutrons sont apparentés, car ils sont soumis à l'interaction forte, force qui diffère de l'interaction électromagnétique (attraction électrique) laquelle s'exerce entre protons et électrons. Beaucoup plus intense, elle ne porte qu'à très courte distance : 10^{-15} mètre seulement ! Pour évaluer cette portée, les physiciens ont mesuré le diamètre des protons et des neutrons du noyau, qu'ils nomment nucléons. Pour cela, ils bombardent

des noyaux avec des électrons, dont ils étudient la déviation. Ils ont ainsi montré que la charge électrique positive du proton n'est pas concentrée en un point, mais qu'elle se répartit sur une sphère d'environ 10^{-15} mètre de diamètre.

À la fin du XIX^e siècle, les physiciens constatèrent que certains éléments naturels sont instables et que leur noyau émet un rayonnement ou des particules : ils sont radioactifs. Bombardés avec des nucléons, les noyaux réagissent et se transforment en nouveaux noyaux. En 1938, Otto Hahn (1879-1968) découvrit le premier noyau (l'uranium 23) capable de se fragmenter. L'étude de ce phénomène de fission nucléaire et celle de nombreuses réactions nucléaires révélèrent de nouvelles particules.

Un bestiaire de dizaines de nouvelles particules

Les découvertes furent si nombreuses qu'à la fin des années 1950 un bestiaire de dizaines de particules différentes issues de réactions nucléaires encombra l'esprit des physiciens. Il fallait mettre de l'ordre. Comment faire, sinon en regardant à une échelle encore plus petite ? Les physiciens ont constaté qu'ils pouvaient décrire simplement les nucléons ainsi que les particules des réactions nucléaires, s'ils admettaient qu'ils sont formés de trois constituants : les quarks. Deux types de quarks différents, désignés par les symboles *u* (up) et *d* (down), sont nécessaires pour constituer les protons et les neutrons.



3. LES ATOMES D'UN ÉCHANTILLON d'arsénure de gallium aperçus au microscope à effet tunnel. Cette image est l'addition de deux prises de vue, car les propriétés électriques des atomes de gallium (en bleu) et ceux d'arsenic (en rouge) empêchent de les visualiser en même temps.

Un proton est composé de deux quarks *u* et d'un quark *d*, ce que les physiciens notent en écrivant $p = (uud)$. Dans le neutron, les rôles de *u* et de *d* sont inversés : $n = (ddu)$.

Les charges électriques des quarks présentent un intérêt particulier, car elles ne sont pas des multiples entiers de la charge $+e$ du proton (opposée à la charge élémentaire $-e$ de l'électron). Ainsi, le quark *u* porte une charge égale à $2/3$ de la charge du positon, le quark *d* à un tiers de la charge de l'électron. Les charges des nucléons étant la somme de celles des quarks, la charge du proton est égale à $2e/3 + 2e/3 - e/3$, c'est-à-dire e , et celle du neutron : $2e/3 - e/3 - e/3$, c'est-à-dire 0. En fait, les charges des quarks du neutron s'équilibrent électriquement.

Au début, les physiciens supposèrent que les quarks n'étaient pas de véritables éléments constitutifs des nucléons, mais plutôt une sorte d'astuce d'écriture. Jusqu'à l'hypothèse des quarks, toutes les charges électriques observées étaient des multiples entiers de la charge e . Les physiciens considéraient que la charge de l'électron était élémentaire (la plus petite possible), et ils ne virent donc d'abord dans les quarks et leurs charges fractionnaires ($2e/3$, $e/3$, etc.) que des concepts pratiques pour décrire efficacement les particules et leur organisation. Toutefois, des expériences montrèrent bientôt que des «objets» se trouvent effectivement à l'intérieur des nucléons. Au SLAC, le grand accélérateur de particules de l'université de Stanford, on bombardait des noyaux atomiques avec des électrons préalablement accélérés jusqu'à une vitesse proche de celle de la lumière. On observa que la plupart des électrons n'étaient guère déviés de leur trajectoire, mais quelques-uns l'étaient très fortement. Ces constatations faites, les physiciens durent se rendre à l'évidence : toute se passe comme si les électrons subissaient parfois, quand ils traversent de la matière nucléaire, un choc frontal avec un objet ponctuel électriquement chargé. L'analyse fine de ces expériences révéla que ces «objets» portent des charges électriques fractionnaires égales à $2e/3$ et de $-e/3$. Il s'agissait bien de quarks, des particules apparemment «infiniment» petites !

Les collisions entre les électrons et les quarks devaient être extrêmement violentes. Malgré cela, on ne détecta aucun quark pas parmi les «débris», les particules issues de la col-