

aucune limite inférieure. Pour les mathématiciens, les infinis, tant grands que petits, sont définis grâce à un processus de passage à la limite.

En physique, les situations qui imposent un tel passage ne manquent pas. Au début du XX^e siècle, les astronomes se représentaient l'Univers comme un espace plein d'étoiles, dont le Soleil. Puis ils ont découvert que les étoiles étaient les constituants élémentaires de galaxies, et que des milliards de galaxies existent. L'Univers s'était brusquement agrandi de plusieurs ordres de grandeur. Cette évolution invite à se demander quelles structures encore plus grandes pourraient exister. Et finalement, on s'interroge : le Cosmos est-il infini ? Ces questions restent ouvertes, même si plusieurs indices militent effectivement pour un Univers sans limites.

Il en va de même lorsqu'on essaie d'explorer l'infiniment petit. L'histoire des sciences révèle que l'homme a progressivement appris à diviser de plus en plus la matière. L'un des premiers à y penser fut Démocrite (460-370 avant notre ère). Le philosophe grec a supputé que la matière peut être divisée jusqu'à une échelle ultime, celle de petits constituants élémentaires invisibles, qu'il nomme *Atomos*. Pour Démocrite, comme pour les physiciens d'aujourd'hui, le processus de division de la matière est donc limité. Bien que très petit, un atome n'est pas infiniment petit. Son diamètre est d'environ un dixième de milliardième de mètre, taille qu'une expérience simple met en évidence : un film huileux répandu sur l'eau s'étire jusqu'à atteindre une hauteur qui correspond au diamètre d'une molécule, voire d'un atome. Or, grâce au microscope à effet tunnel, les physiciens sont capables d'observer des atomes. Que voient-ils ? De petites balles de tennis, dont il faudrait 100 millions accolées pour faire un centimètre.

Atomos signifie indivisible

Le mot *Atomos* signifie indivisible en grec ancien. Pourtant le caractère indivisible des atomes a été remis en cause à la fin du XX^e siècle, quand les physiciens ont montré que les atomes peuvent être dissociés en constituants plus petits : le noyau et le nuage électronique. La taille de l'enveloppe impose celle des atomes, tandis que sa masse représente moins d'un millième de leur masse. Le plus simple des atomes est



2. WERNER HEISENBERG est l'un des pères de la mécanique quantique. Les physiciens du début du XX^e siècle ont inventé cette théorie, notamment pour mieux expliquer la structure des atomes.

l'hydrogène. Son enveloppe ne contient qu'un seul électron, chargé négativement, en rotation autour du noyau, qui porte une charge électrique positive. Sa rotation permanente l'empêche d'être attiré par l'attraction électrique qu'exerce le noyau. L'électron se comporte en fait comme une minuscule planète, dont l'orbite est stable parce que la force centrifuge due à la rotation équilibre l'attraction électrique du noyau.

Lorsqu'ils eurent compris cela, les physiciens s'étonnèrent des particularités des systèmes atomiques : tels une infinité de frères jumeaux, tous les atomes d'hydrogène ont la même structure. Or, dans le modèle planétaire, si l'électron tournait plus vite, il serait plus éloigné du noyau. Pourquoi le noyau de l'atome d'hydrogène ne fixe-t-il qu'un seul et unique électron, toujours à la même distance ? Autre mystère : les physiciens savent que les particules chargées accélérées rayonnent de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques. Or, l'électron est soumis en permanence à une accélération et les particules chargées et accélérées perdent leur énergie en émettant un « rayonnement de freinage ». Pourquoi l'électron de l'atome d'hydrogène n'émet-il aucune onde électromagnétique ? Quel mécanisme le stabilise sur son orbite ? Les physiciens durent se rendre à l'évidence : la physique classique ne suffisait plus à expliquer la stabilité des atomes.

Pour répondre à ces questions, les physiciens du début du XX^e siècle ont créé la mécanique quantique. Le

concept central de la théorie quantique est celui de la probabilité d'événements. Ainsi, on calcule la probabilité qu'un électron se trouve en un endroit précis, à un instant donné ; qui plus est, la position et la vitesse d'un électron ne peuvent être déterminées simultanément. Le physicien allemand Werner Heisenberg fut le premier à formuler cette propriété quantique. Ces « relations d'incertitude de Heisenberg » s'appliquent à tous les systèmes qui ont un comportement quantique. Le calcul montre toutefois que l'approximation classique est excellente pour les systèmes macroscopiques. Si la probabilité quantique qu'une voiture traverse brusquement le mur du garage où elle était garée n'est pas nulle, elle est si faible qu'en pratique l'événement peut être considéré comme impossible !

Atomes hypothétiques

C'est justement cette incertitude sur la position de l'électron qui détermine la taille d'un atome. Dans le cas de l'atome d'hydrogène, cette taille est égale à 10^{-10} mètre. Supposons que nous observions un atome d'hydrogène, dont l'enveloppe serait beaucoup plus petite, disons cent fois plus petite. L'électron serait alors localisé avec une précision plus grande que dans l'atome d'hydrogène normal. Selon la relation d'incertitude, la précision de la vitesse de l'électron serait dans ce cas 100 fois inférieure, de sorte qu'il devrait se déplacer beaucoup plus vite que dans l'atome normal. Une vitesse plus élevée signifierait aussi une énergie supérieure. Un atome d'hydrogène hypothétiquement plus petit posséderait donc une énergie supérieure à celle d'un atome normal. Or, que ce soit en physique classique ou en mécanique quantique, les systèmes évoluent toujours vers leur état de moindre énergie. Un atome d'hydrogène plus petit que la normale ne serait pas stable, mais perdrait de l'énergie en rayonnant des ondes électromagnétiques : l'électron ralentirait, son enveloppe augmenterait et se stabiliserait lorsque l'atome aurait atteint sa taille « normale ». De même, un atome d'hydrogène hypothétique 100 fois plus grand qu'un atome normal ne serait pas stable. Pour le fabriquer, il faudrait éloigner l'électron du noyau, et donc lui apporter de l'énergie, de façon à contrecarrer l'attraction électrostatique. Pour évoluer vers un état de moindre énergie,

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.

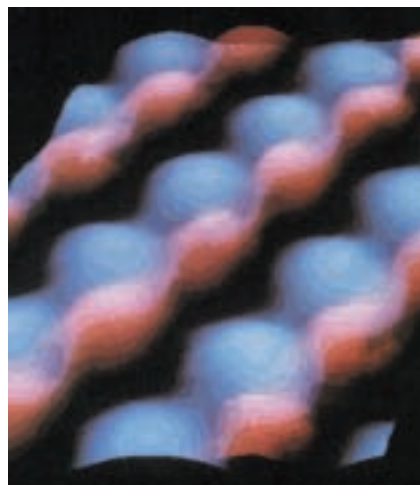
Pour comprendre pourquoi, examinons ce que les physiciens ont découvert du monde subnucléaire en commençant par les noyaux atomiques. Ces derniers représentent la plus grande partie de la masse atomique. Dans le cas de l'hydrogène, par exemple, le noyau est 1 840 fois plus lourd que l'électron. Le noyau 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-