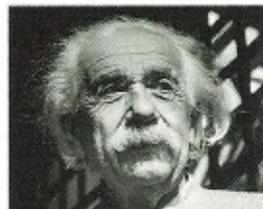




# Atomes et noyaux

### ATOME ET PHILOSOPHIE

Le concept d'atome en tant qu'entité insécable, ou plus petite portion de matière qui puisse exister, a germé dans l'esprit des philosophes dès l'Antiquité. Nous sommes aujourd'hui si familier avec cette vision atomiste du monde qu'il nous est difficile de comprendre la raison d'être de ce très long débat qui agita le monde scientifique pendant des siècles et qui est relatif à la réalité des atomes : existent-ils oui ou non ? En fait, la question débattue porte davantage sur la structure continue ou discontinue de la matière que sur la forme ou la nature des atomes. En somme, on veut savoir si à très petite échelle la matière est granulaire ou non ? Il y a environ cent ans, les physiciens se forment la conviction que oui en étudiant au microscope le mouvement d'agitation désordonnée de petits grains en suspension dans une goutte d'eau. Mais cette vision granulaire de la matière est progressivement nuancée. En effet, au fil des percées scientifiques, le sens même des termes « grains » et « matière » change et se charge de subtilités. L'équivalence matière-énergie qu'établit **Albert Einstein**



(1877-1955) dans le cadre de la théorie de la relativité, la dualité corpuscule-onde qu'introduit Louis de Broglie (1892-1987) et qui conduit à la physique quantique à la fin des années 1920, les avancées théoriques en physique des particules, l'acceptation de l'existence des photons ou « grains » de lumière, sont les quatre principaux ingrédients qui ne permettent plus de dire aujourd'hui si à très petite échelle la matière présente une structure continue ou discrète. En fait, dans le cadre des théories modernes où de surcroît l'espace et le temps viennent se mêler à la matière, la question n'a plus de sens... Le problème essentiel vient de l'ambiguïté de l'expression « à très petite échelle ». Qu'entend-on par là ? Ajoutons à cela que la physique moderne ne prétend plus comme au siècle des Lumières nous dévoiler le monde à la manière d'une œuvre que l'on découvre en retirant la voile qui la couvre, mais prétend décrire ce qui restera à jamais voilé. Ainsi, il faut

être conscient que tout ce que nous allons présenter sur les atomes et les noyaux dans ce qui suit n'est qu'une représentation, une bonne description du monde atomique et nucléaire, « bonne » au sens où elle est en accord avec les résultats expérimentaux.

### ATOME ET MOUVEMENT BROWNIEN

Après l'invention du **microscope**, certains naturalistes observent vers



1760 un mouvement frénétique de petits grains en suspension dans une goutte d'eau. À cette époque, on attribue cela à l'émergence de la vie. En 1827, le botaniste Robert Brown (1773-1858) redécouvre ce phénomène avec des grains de pollens. Puis on constate que ce mouvement d'agitation désordonnée que l'on appelle désormais « mouvement brownien » a lieu avec tout type de grains, à condition que leur taille soit suffisamment petite. À la fin du  $xix^e$  siècle ce phénomène restait énigmatique. Cependant, la majorité des physiciens, persuadés de l'existence des atomes, c'est-à-dire de la structure granulaire de la matière en général, et de l'eau en particulier, étaient favorables à l'explication suivante : en raison de la température supérieure au zéro absolu de l'eau, les atomes constituant celle-ci doivent être en agitation ; leurs innombrables chocs et rebonds sur les petits grains en suspension sont responsables du mouvement erratique de ces derniers. Il s'agissait là d'une explication qualitative impossible à valider à l'aide d'une expérience. Pour cela, on avait besoin d'une théorie mathématique du mouvement brownien afin de pouvoir comparer ses prévisions avec les observations expérimentales. C'est Einstein qui établit cette théorie en 1905, et c'est



**Jean Perrin** (1870-1942) qui étudie expérimentalement le mouvement des grains au microscope et valide la théorie d'Einstein. Dans la mesure où pour

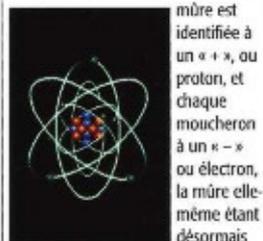
l'élaboration de sa théorie, le physicien allemand avait posé comme hypothèse l'existence des atomes, Perrin valide non seulement la théorie mais apporte par la même occasion la preuve expérimentale de la réalité des atomes.

### L'ATOME ET LE VIDE

Au début, on se représente un atome comme une petite sphère pleine. Comme les recherches menées sur l'électricité depuis le  $xix^e$  siècle avaient convaincu les physiciens qu'il existait dans la matière deux sortes d'électricité que l'on avait pris l'habitude de désigner par « + » et « - », force était d'admettre que cette électricité était dans l'atome. Ce dernier était donc imaginé comme une sphère formée de « + » et de « - ». Mais les expériences réalisées par deux physiciens Hans Geiger et Ernst Marsden, interprétées par **Ernest Rutherford** (1871-1937) montrent



que la sphère pleine est une mauvaise représentation de l'atome. Il vaud mieux se le représenter comme une **mûre autour de laquelle tournent des moucheron** : chaque drupe de la mûre est identifiée à un « + », ou proton, et chaque moucheron à un « - », ou électron, la mûre elle-même étant désormais



désignée par « noyau ». Le résultat choquant que révèle alors Rutherford est que si l'on respecte l'échelle, les moucheron devraient voltiger autour de la mûre à... un kilomètre de celle-ci ! En effet, les électrons tournent autour du noyau à une distance 100 000 fois supérieure au diamètre de ce dernier. L'atome est donc loin d'être une sphère pleine, puisqu'il est essentiellement vide, la partie pleine ne représentant qu'un dixième de milliardième de milliardième de pour cent du volume total ! Cette incroyable révélation implique à son tour que la matière qui nous entoure est elle-même vide, puisqu'elle est constituée d'atomes. Rutherford montre également que la masse d'un atome est quasiment

entièrement concentrée au niveau de son noyau. En effet, dans la mesure où un électron pèse près de 2 000 fois moins qu'un proton, masse atomique et masse nucléaire se confondent à 99,98 %. Puisque l'atome est vide, pourquoi alors la matière est-elle si dure et incompressible ? Le Danois **Niels Bohr** (1885-1962) apporte une première réponse à cette question.



### L'ATOME DE BOHR

En raison de l'interaction électrique entre le noyau (positif) et les électrons (négatifs), l'atome possède une énergie. Or, de très nombreuses expériences montraient que l'atome est capable d'absorber ou d'émettre de l'énergie sous forme de lumière (d'ondes électromagnétiques de manière plus générale) mais de manière discrète, ou comme on dit de manière « quantifiée ». Cela signifie que l'énergie émise ou absorbée ne prend pas n'importe quelle valeur. Autrement dit, lorsqu'on note ces valeurs, on s'aperçoit qu'elles sont en nombre fini et relativement limité. Par ailleurs, les valeurs des énergies absorbées coïncident avec celles émises. On obtient ainsi un spectre discret d'énergies qu'un atome est capable d'émettre ou d'absorber. Ce spectre est spécifique à chaque espèce d'atome et constitue en quelque sorte son « empreinte digitale ». Le caractère discret de ce spectre implique que les états d'énergie dans lesquels un atome peut se trouver ont une distribution discrète. Cela suggère à son tour que l'interaction des électrons avec le noyau — interaction qui représente cette énergie — est elle-même discrétisée. Et cela signifie que les électrons ne tournent pas autour du noyau sur n'importe quelle orbite sphérique : pour chaque espèce d'atome, il existe un certain nombre d'orbites sphériques bien précises à la surface desquelles les électrons peuvent évoluer. Ainsi, les sauts électroniques d'une orbite à l'autre modifient l'énergie de l'atome de manière quantique, l'évolution sur une orbite éloignée correspondant à une énergie plus grande. Cette représentation correspond à ce que l'on appelle le modèle atomique de Bohr. Les orbites étant quantifiées et le nombre d'électrons pouvant évoluer sur une orbite étant limité,

on comprend pourquoi malgré le vide qui règne dans l'atome ce dernier soit si dur, et si peu compressible...

### LA CONSTITUTION DE L'ATOME

On savait au début du  $xix^e$  siècle que l'atome d'hydrogène, le plus léger des atomes est formé d'un proton (+) autour duquel tourne un électron (-). On savait aussi que le noyau de l'atome d'hélium porte une charge électrique +2 autour duquel tournent deux électrons, assurant ainsi la neutralité électrique de l'atome. L'hélium devait donc peser deux fois plus que l'hydrogène. Au lieu de cela, on trouvait qu'il pesait quatre fois plus ! On résout ce problème en admettant qu'en plus des deux protons, le noyau possède deux paires proton-électron. Comme la masse de l'électron est négligeable devant celle du proton, un atome d'hélium constitué de 4 électrons dont deux dans un noyau formé de 4 protons, pèse bien quatre fois plus que l'hydrogène, possède bien un noyau chargé +2, et demeure bien électriquement neutre. Tous les autres atomes étaient imaginés selon ce même schéma : Z électrons périphériques tournant autour d'un noyau constitué de A protons et (A - Z) électrons dits nucléaires. C'est seulement à partir de 1932 que l'on abandonne les (A - Z) paires proton-électron nucléaires. Pourquoi ? Car on découvre le neutron de masse quasiment identique à celle du proton mais électriquement neutre. Un atome neutre est constitué d'autant de protons que d'électrons, et un atome non neutre est un atome auquel il manque des électrons ou un atome qui en a trop. Cela correspond à ce que l'on appelle respectivement « anion » et « cation ».

### LE NUCLÉON

Aujourd'hui, dans le cadre de la physique des particules, le proton et le neutron constituent en fait les deux « facettes », les deux états d'une même particule que l'on nomme nucléon. Ainsi, proton et neutron sont au nucléon ce que pile et face sont à une pièce de monnaie. À cela près que lorsqu'on passe de pile à face, la pièce effectue une rotation dans l'espace à trois dimensions, alors que la rotation qui permet de changer un proton en neutron ou inversement s'effectue dans un espace plus abstrait, l'espace dit de l'isospin. Ainsi, un proton peut se transformer en

### Au cœur de la matière

**$10^{15}$**   
Le volume du noyau est  $10^{15}$  fois inférieur à celui de l'atome.

**1940**  
Le premier transurannique a été synthétisé en 1940.

**1 sur 1 000 milliards**  
Dans la nature, un atome de carbone sur 1 000 milliards est du carbone 14.

**1911**  
Découverte du noyau atomique.

**$10^{26}$  watts**  
Les réactions nucléaires dans le Soleil libèrent  $10^{26}$  watts.

**1932**  
James Chadwick découvre le neutron 1932.

**Plus de 3 000**  
Il existe une centaine d'atomes mais plus de 3 000 isotopes.

**350**  
Sur Terre, il existe 350 isotopes naturels dont 60 sont radioactifs.

**1 million**  
L'énergie nucléaire est 1 million de fois supérieure à l'énergie chimique.

**Le fer 56**

**$^{56}_{26}\text{Fe}$**

Le noyau le plus stable

## Notation symbolique du noyau



- **M** : symbole chimique de l'élément
- **A** : nombre de masse (nombre de nucléons)
- **Z** : numéro atomique (nombre de protons)

neutron ou inversement, toutefois en respectant certaines règles de conservation de la physique des particules, par exemple celle de la charge électrique. On obtient ainsi :

- radioactivité bêta plus :  $p \rightarrow n + e^+ + \bar{\nu}$
- radioactivité bêta moins :  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$

( $\nu$  : neutrino ;  $\bar{\nu}$  : antineutrino)

On note symboliquement le noyau de la manière suivante :  ${}^A_ZM$  où M est le symbole de l'élément, A le nombre de nucléons ou « nombre de masse », Z le nombre de protons que l'on appelle aussi « numéro atomique ».

## LES ÉLÉMENTS

Le terme « élément » est à comprendre au sens « espèce » d'atome. Pour des raisons historiques, le critère que l'on a employé pour identifier les différents éléments était relatif à la réactivité chimique. Ainsi, deux atomes possédant – à la précision de l'expérience près – exactement les mêmes propriétés chimiques étaient identifiés comme étant le même élément. Vers la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, on avait ainsi isolé près de 80 éléments. En remarquant des similitudes dans le comportement chimique d'éléments différents, le chimiste russe **Dmitri Mendeleïev**



(1834-1907) imagine un système simple de classification : le tableau périodique des éléments où ces derniers sont rangés en 18 colonnes, les éléments d'une même colonne étant chimiquement similaires. Le modèle atomique de Bohr permet de comprendre ces similitudes. En simplifiant, on peut dire que les propriétés chimiques d'un atome dépendent du nombre d'électrons présent dans l'orbite la plus externe. Ainsi, tous les éléments de la première colonne (hydrogène, lithium, sodium, potassium, rubidium, césium, francium) ont tous 1 seul électron sur leur orbite la plus externe et de ce fait possèdent des propriétés chimiques similaires. « Similaires » mais non exactement

pareilles, car ces éléments n'ont pas au total le même nombre d'électrons. En effet, c'est le nombre total d'électrons qui définit plus précisément les propriétés chimiques d'un atome. Le nom d'un élément dépend ainsi du nombre d'électrons (ou de protons) qu'il possède à l'état neutre. Il existe près de 90 éléments dans la nature.

## ISOTOPES, ISOBARES ET ISOTONES

### LES ISOTOPES

Peu de temps après que Bohr eut établi son modèle atomique, on se rend compte que certains éléments ne possèdent pas la même masse bien que chimiquement identiques. Ce sont les isotopes, de « iso » (même) et « topos » lieu, car on les range dans la même case du tableau périodique. Il s'agit d'éléments possédant le même nombre Z de protons (et donc d'électrons) mais ayant un nombre (A-Z) différent de neutrons. Il existe par exemple trois isotopes naturels de l'hydrogène. Dans l'ordre de l'abondance, on a d'abord l'hydrogène ordinaire dont le noyau est formé d'un seul proton ; vient en suite le deutérium dont le noyau est constitué d'un proton et d'un neutron ; enfin le tritium, très rare, dont le noyau est formé d'un proton et de deux neutrons. Alors qu'il existe à peine une centaine d'éléments, le nombre d'isotopes connus s'élève à plusieurs milliers, si l'on compte non seulement les isotopes naturels, mais aussi ceux que les physiciens fabriquent à l'aide d'accélérateurs de particules. Beaucoup de ces isotopes sont instables (radioactifs) si bien qu'ils se désintègrent. C'est le cas du tritium, et cela explique sa rareté. Alors que dans la nature un atome d'hydrogène sur 6000 est du deutérium, cette proportion vaut  $10^{-15}$  dans le cas du tritium. Certains atomes ne possèdent pas d'isotopes à l'état naturel. Le fluor, le sodium, l'aluminium, le phosphore, le cobalt, l'iode, l'or en sont quelques exemples. D'autres au contraire en possède 7 ou plus, comme c'est le cas du mercure, de l'osmium, du cadmium... le record étant détenu par l'étain avec 10 ! Signalons ici que dans la mesure où la cinétique d'une réaction chimique dépend de la masse des réactifs en jeu, deux isotopes d'un même élément réagissent avec une cinétique légèrement différente, ce qui permet de relever une différence chimique entre ces isotopes.

### LES ISOBARES

Les isobares sont des éléments différents ayant le même nombre A de nucléons, comme par exemple le carbone 14 et l'azote 14 ou le nickel 64, le zinc 64 et le cuivre 64.

### LES ISOTONES

Les isotones sont définis comme des éléments différents ayant le même nombre de neutrons, comme le tritium et l'hélium 4 ; le carbone 13 et l'azote 14 ; le carbone 14 et l'azote 15.

### LES TRANSURIENS

Il existe à l'état naturel environ 90 espèces différentes d'atome, l'uranium

étant l'élément abondant dont le numéro atomique est le plus élevé (Z = 92). Cependant, depuis près de 65 ans, les physiciens parviennent à produire des éléments avec un nombre de protons bien supérieur à 92, le maximum étant 116. Ce sont les « transuraniens », tous très instables. L'intérêt de produire des éléments aussi lourds que 116 est d'ordre théorique.

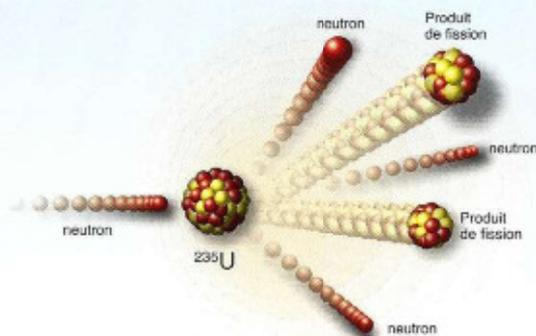
## LA COHÉSION DU NOYAU

La présence de protons dans le noyau pose un problème relatif à sa cohésion. En effet, comment malgré la répulsion électrostatique entre protons, ces derniers sont-ils maintenus ensemble ? Cela se fait grâce à une interaction d'un nouveau genre, très différente de l'électromagnétisme : l'interaction nucléaire forte. Cette dernière dont la portée est très faible, typiquement de l'ordre de  $10^{-15}$  mètre, agit comme un ciment et lie les nucléons ensemble. La très courte portée de cette interaction explique pourquoi le nombre de protons dans un noyau ne peut dépasser une certaine limite (environ cent). En effet, à mesure que le nombre de nucléons croît, la taille du noyau augmente. Il arrive alors un stade où la taille est si importante que l'interaction nucléaire forte n'est plus efficace, alors même que la répulsion électrostatique dont la portée est infinie continue d'agir repoussant les différentes parties du noyau... Signalons ici que l'énergie de liaison nucléaire est de l'ordre du million de fois supérieure à l'énergie chimique, celle-ci résultant de l'interaction électron-noyau.

### ÉNERGIE DE LIAISON NUCLÉAIRE

Les noyaux les plus stables, ceux dans lesquels l'énergie de liaison par nucléon est la plus importante sont ceux dans lesquels un bon équilibre est établi entre d'une part la quantité de « ciment », donc de nucléons, et d'autre part la taille. On comprend alors que les noyaux de ce genre sont ceux qui ne sont ni trop petits, ni trop gros. Les noyaux moyens sont ceux qui tiennent le mieux, le noyau de fer 56 ou  ${}^{56}\text{Fe}$  étant le plus « solide ». En vertu du principe du minimum d'énergie selon lequel un état de moindre énergie est plus stable, le gain en stabilité s'effectue de manière concomitante à une

## La fission



La fission s'accompagne d'un important dégagement de chaleur.

libération d'énergie. Cela signifie que les réactions produisant des noyaux moyens sont libératrices d'énergie. Clairement il existe deux méthodes pour produire des noyaux de taille moyenne : casser de gros noyaux, coller des petits. Ces deux réactions nucléaires sont appelées respectivement fission et fusion.

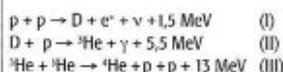
### FISSION

La fission est la méthode employée dans toutes les centrales nucléaires. On brise un noyau d'uranium 235 en deux fragments, chacun desquels libère à son tour un neutron ce qui donne 2 neutrons au total. Chacun de ces derniers provoque à son tour la fission d'un nouveau noyau d'uranium ce qui donne 4 neutrons et ainsi de suite. Cette réaction en chaîne finit par provoquer la fission d'un grand nombre de noyaux d'uranium par seconde. Comme chaque fission s'accompagne d'une libération importante d'énergie, cela permet de chauffer de grande quantité d'eau pour produire de la vapeur nécessaire à faire tourner les alternateurs des turbines pour la production d'électricité.

### FUSION

Les étoiles libèrent de l'énergie grâce à des réactions de fusion nucléaire, principalement grâce à la fusion de noyaux d'hydrogène, c'est-à-dire de deux protons. Ces réactions dites pp produisent des deutons D (noyau du

deutérium), lesquels capturent chacun un proton pour donner des noyaux d'hélium 3. Enfin, ces derniers fusionnent en hélium 4 avec éjection de deux protons. Ainsi, les deux protons employés au début de la chaîne de réactions sont libérés en fin de chaîne. Cela constitue donc un cycle.



Au total, il y a production d'un noyau d'hélium 4 à partir de 4 protons. Le bilan énergétique est égal à :  $(2 \times 1,5) + (2 \times 5,5) + 13 = 27 \text{ MeV}$ . Plus de 90 % de l'énergie du Soleil provient du cycle pp. Ainsi, toutes les secondes, le Soleil produit  $10^{28}$  noyaux d'hélium 4, soit près de 700 millions de tonnes ! Cela fait  $10^{28} \times 27 \text{ MeV}$ , c'est à dire  $4.10^{26}$  joules par seconde, soit  $4.10^{26}$  watts ! Dans certaines étoiles, les noyaux  ${}^3\text{He}$  fusionnent ensuite trois par trois pour donner du carbone  ${}^{12}\text{C}$ . Ces étoiles synthétisent ainsi du carbone (Z=6). Puis, par captures successives de protons, l'étoile produit de l'azote (Z=7) et de l'oxygène (Z=8). Après quoi, la fusion de l'oxygène (Z=8) avec de l'hélium (Z=2) produit du néon (Z=10). La fusion du néon avec l'hélium donne ensuite du magnésium (Z=12). Par ailleurs, la fusion de deux oxygène donne du soufre (Z=16). Grâce à de nombreuses autres réactions de ce genre, les étoiles synthétisent tous les autres noyaux atomiques. Sans les étoiles l'univers serait constitué d'hydrogène et rien d'autre.

## L'hydrogène et ses isotopes

### Hydrogène ${}^1\text{H}$



1 proton  
1 électron

### Deutérium ${}^2\text{H}$



1 proton  
1 neutron  
1 électron

### Tritium ${}^3\text{H}$



1 proton  
2 neutrons  
1 électron