



La matière est faite surtout de vide

Pourquoi cette idée ?

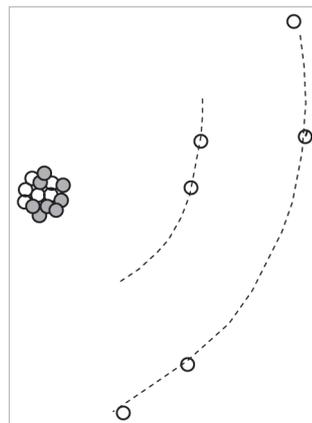
Le noyau de l'atome est extrêmement petit, les électrons ont une taille infime, la matière, qui est faite d'atomes, contient donc surtout du vide.

La réponse

La structure des atomes

On sait que la matière est constituée d'atomes, les différentes sortes d'atomes étant les éléments rassemblés dans la classification périodique de Mendeleïev. Ces atomes sont eux-mêmes constitués de protons, neutrons et électrons. On peut assimiler un atome à une petite sphère comportant au centre un noyau formé des nucléons (protons et neutrons) et plus loin des électrons qui gravitent autour de ce noyau.

Les nucléons du noyau subissent des forces nucléaires (l'interaction forte) extrêmement intenses, qui assurent la cohésion de ce noyau, et entre les électrons et le noyau s'exercent des forces électriques, qui assurent la cohésion de l'atome.



Les ordres de grandeur de la taille des différentes particules

Les électrons, les protons, les neutrons ont une taille de l'ordre du fermi ou femtomètre, ou fm ; ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ ou un millionième de milliardième de mètre). Les noyaux, formés de nucléons « collés » les uns contre les autres par les forces nucléaires ont eux aussi une taille de l'ordre de quelques fermis ; quant à l'atome, sa taille est de l'ordre de quelques angströms, ou

Å ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ ou un dix-milliardième de mètre). À l'échelle de l'atome, les électrons gravitent extrêmement loin du noyau : si on représente le noyau d'un atome par une sphère de diamètre 1 cm, les électrons ont une taille du même ordre et les électrons périphériques gravitent à quelques km du noyau. Si on fait le rapport des volumes, on peut dire que le volume de l'atome est quelque 10^{15} fois (un million de milliards de fois) celui de ses constituants, c'est dire que l'atome est fait essentiellement de vide.

Considérons les différents états de la matière qui nous entoure, c'est-à-dire la matière à l'état gazeux, liquide ou solide.

État gazeux

Un gaz est constitué de molécules en perpétuelle agitation désordonnée. À la pression ordinaire, le volume des molécules d'un gaz, rapporté au volume total occupé par ce gaz est de l'ordre de un pour quelques mille, ce qui signifie que les gaz sont constitués essentiellement de vide, avec ça et là des molécules très dispersées (molécules faites d'atomes comportant eux-mêmes essentiellement du vide).

États condensés, liquide ou solide

On peut dans un modèle simplifié de l'état solide considérer que les atomes sont des sphères qu'on empilerait dans des boîtes ; l'arrangement serait plus ou moins compact selon que les atomes seraient plus ou moins bien disposés. On voit qu'il subsiste beaucoup d'espace vide, celui qui se trouve entre ces sphères. Dans le cas des cristaux, où la structure est très bien ordonnée, l'état le plus compact correspond à un taux de remplissage d'environ 75 %. Il reste encore du vide !

À l'état liquide, il faudrait considérer que les particules libres de se mouvoir ont besoin de plus d'espace, c'est ainsi que la plupart des liquides ont une densité voisine de celle de l'eau alors que les solides ont des densités pouvant aller jusqu'à 20 ou 21 (c'est le cas des métaux tels que l'or ou le platine).

Dans l'espace

Disons enfin un mot de la matière qui constitue l'espace. On peut considérer que l'espace interstellaire est pratiquement dépourvu de matière puisqu'il comporte à peine quelques particules par mètre cube (une petite centaine environ). À titre de comparaison, un milligramme d'eau contient environ un milliard de milliards de molécules.

Dans ce milieu pratiquement vide, on trouve des îlots de matière : des étoiles avec éventuellement leur cortège de planètes, regroupées en galaxies puis les galaxies regroupées en amas de galaxies. Mais il règne essentiellement du vide puisque ces îlots de matière sont très espacés les uns des autres. Par exemple notre Soleil est à 500 secondes-lumière¹, et l'étoile la plus proche est à environ 4 années lumière. Entre eux, du vide interstellaire.

Quant à la densité² des étoiles, notre Soleil, qui est une étoile moyenne, est à peu près aussi dense que l'eau. Il existe des étoiles beaucoup plus denses, comme les naines blanches³ ou les étoiles à neutrons. Mais même dans un milieu très dense comme celui d'une naine blanche, la place occupée par la matière est infime par rapport au vide.

-
1. Une seconde-lumière est la distance parcourue en une seconde par la lumière dans le vide, soit 300 000 km. Une année-lumière est la distance parcourue en une année par la lumière dans le vide, à la célérité de 300 000 km/s, soit $9,5 \cdot 10^{15}$ m.
 2. La densité d'un corps par rapport à l'eau est le rapport de la masse volumique de ce corps sur la masse volumique de l'eau. On rappelle que l'eau a pour masse volumique 1 g/cm^3 ou 1 kg/L ou 10^3 kg/m^3 en unités du système international (système SI). La densité du Soleil est égale à 1,34.
 3. Voir à ce sujet les compléments ci-après.

Des compléments

Les noyaux

Si on se place dans le modèle dit de la « goutte liquide », où les nucléons du noyau sont collés les uns contre les autres par interaction forte, le rayon r du noyau peut s'exprimer en fonction du nombre A de ses nucléons par la relation

$$r = r_0 \cdot A^{1/3}, \text{ où } r_0 \text{ a une valeur comprise entre } 1,2 \text{ et } 1,4 \text{ fm.}$$

Cela signifie que le volume V d'un noyau comprenant A nucléons est proportionnel à ce nombre de nucléons.

Il existe aussi un modèle en couches du noyau, un peu similaire au modèle en couches de l'atome (où les électrons sont disposés selon leur niveau d'énergie).

Les gaz

Étudions par exemple l'argon, gaz de l'air constitué de molécules monoatomiques (= d'atomes) d'argon de rayon r voisin de 1 \AA . À la pression atmosphérique normale et à la température ordinaire, par exemple à la pression atmosphérique de 10^5 Pascal et à 25 °C , la loi d'Avogadro-Ampère stipule qu'une mole de gaz contient $6 \cdot 10^{23}$ particules (le nombre d'Avogadro N) et occupe un volume V de 24 litres. Dans ces conditions, le volume ν des molécules contenues dans ces 24 litres est égal à $\nu = N \cdot \nu_0$ où ν_0 est le volume d'une molécule.

$$\nu = N \cdot \frac{4\pi \cdot r^3}{3} = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ L.}$$

$$\text{On a alors } V/\nu = 24/2,5 \cdot 10^{-3} = 9,6 \cdot 10^3 \approx 10^4.$$

Le volume occupé par les molécules est dix mille fois moindre que le volume offert au gaz. Là encore on voit que la matière est faite surtout de vide.



Le vide dans les étoiles

Étudions le cas d'une naine blanche, phase ultime d'une étoile de masse voisine de celle du Soleil, qui s'est effondrée sur elle-même jusqu'à atteindre un rayon de l'ordre de celui de la Terre. Elle contient alors surtout des noyaux de carbone et d'oxygène, et des électrons qui se sont désolidarisés des noyaux. Prenons l'exemple d'une naine blanche de masse M égale à celle du Soleil, $M = 2.10^{30}$ kg et de rayon 10^4 km. Son volume est alors égal à 4.10^{21} m³, et sa masse volumique vaut 5.10^8 kg/m³. La masse volumique des métaux les plus lourds est de l'ordre de 2.10^4 kg/m³. Ainsi, la masse volumique de l'étoile est-elle considérablement plus élevée que tout ce qu'on connaît sur Terre.

Mais si on compte le nombre de noyaux que contient l'étoile (en faisant le rapport des masses de l'étoile et d'un atome de carbone ou d'oxygène), on trouve environ 7.10^{55} noyaux. Le volume offert à chaque noyau (obtenu en faisant le rapport du volume de l'étoile au nombre des noyaux) est alors de 6.10^{-35} m³. Quant au volume d'un noyau (assimilé à une petite sphère de rayon 2,5 fm ou $2,5.10^{-15}$ m) il est de l'ordre de 6.10^{-44} m³. On voit ainsi (en faisant le rapport $6.10^{-35}/6.10^{-44} = 10^9$) que le volume offert aux noyaux dans cette étoile est un milliard de fois le volume qu'ils occupent. La naine blanche contient surtout du vide.

Quant aux trous noirs, leur densité est très variable, selon leur masse¹.

1. Voir à ce sujet l'idée « Les trous noirs sont des objets extrêmement denses ».



Les atomes sont constitués de protons, neutrons et électrons qui sont des particules fondamentales

Pourquoi cette idée ?

On a appris que l'atome a une structure, et on connaît les particules élémentaires stables qui le constituent, protons, neutrons, électrons.

La réponse

Les atomes

Jusqu'où la matière peut-elle être divisée ? En d'autres termes, peut-elle être divisée à l'infini ? Dès l'antiquité grecque, deux écoles se sont affrontées, l'une affirmant que la matière est divisible à l'infini, l'autre affirmant qu'il existe une plus petite entité insécable, l'« atome » (qui ne peut être cassé). Démocrite, puis ses disciples Épicure et Lucrèce, ont décrit ces sortes d'atomes qu'ils imaginaient tenir ensemble grâce à des petits crochets (les « atomes crochus »).

L'essor de la chimie, dès le 18^e siècle a pu avoir lieu en postulant l'existence de différentes sortes d'atomes, mais sans démontrer réellement cette existence. Au 19^e siècle, le chimiste Mendeleïev entreprit le recensement et la classification des éléments dans son célèbre tableau. Mais il a fallu attendre le vingtième siècle et les travaux d'Einstein et de Jean Perrin sur le mouvement brownien pour démontrer de façon irréfutable l'existence des atomes.

À la fois les atomes ont acquis une existence et une structure. On les décrit comme formés d'un noyau central contenant les nucléons que sont les protons et les neutrons, et d'un cortège d'électrons¹. Si les atomes ont une structure, c'est qu'il existe des entités plus petites que les atomes, entités plus « élémentaires » qu'eux.

1. Voir l'idée « la matière est faite surtout de vide ».

Ce sont les électrons qui sont responsables des réactions chimiques : au cours de telles réactions, des électrons peuvent être amenés à quitter certains atomes pour former des ions, ou bien il peut y avoir une réorganisation des liaisons entre atomes¹.

Quant aux noyaux des atomes, on sait, depuis la découverte de la radioactivité naturelle et la naissance de la radioactivité artificielle qu'ils peuvent se scinder et les nucléons qui les constituent se réorganisent alors différemment².

Les atomes n'ont ainsi plus rien d'élémentaire, mais qu'en est-il des particules qui les constituent ?

Les protons, neutrons, électrons sont-ils des particules élémentaires ?

Dans le modèle dit « standard » qui a cours, les protons et les neutrons sont liés dans le noyau par interaction forte grâce à des « gluons », et on attribue à ces nucléons une structure interne : le proton est constitué de trois quarks, de deux natures différentes : un quark down (↓) et deux quarks up (↑) ; le neutron est constitué de trois quarks, un quark up et deux quarks down.

Les quarks ne peuvent être extraits du noyau et isolés. Les gluons³ sont des particules de champs, internes aux noyaux.

Quant aux électrons, ils demeurent à ce jour des particules élémentaires, dépourvus de structure.

-
1. Dans les molécules, les atomes sont liés entre eux par des liaisons de covalence, qui sont la mise en commun de certains électrons périphériques des atomes de ces molécules.
 2. Voir les idées « La masse d'un noyau atomique est la somme des masses des nucléons qui le constituent » et « On ne peut pas changer le plomb en or ».
 3. Voir l'idée « le vide ne contient rien ».

