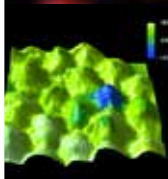


1

# → L'atome



AU CŒUR DE LA MATIÈRE :  
LES ATOMES

PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES  
DE LA MATIÈRE

LE NOYAU ATOMIQUE, UN AUTRE  
MONDE, UNE AUTRE PHYSIQUE



# L'atome

## AU CŒUR DE LA MATIÈRE : LES ATOMES 4

Origine et destin des noyaux  
atomiques 5

Qu'est-ce qu'un atome ? 6

Diamètres atomiques  
et nucléaires 7

Volume, masse  
et masse volumique 7

Charge électrique 8

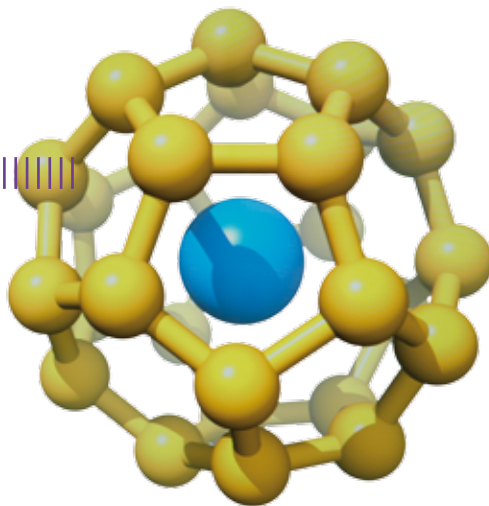
Éléments chimiques  
et isotopes 9

## PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES DE LA MATIÈRE 11

Propriétés chimiques  
de l'atome 12

Propriétés physiques  
de la matière 13

Les quatre interactions  
fondamentales 15



Crédit : D.R.

Modélisation théorique  
de composés chimiques.

## LE NOYAU ATOMIQUE, UN AUTRE MONDE, UNE AUTRE PHYSIQUE 17

Descente dans  
l'élémentaire 18

Stabilité des noyaux 20

La physique nucléaire 21

Synthétiser et étudier de  
nouveaux noyaux 21

La matière nucléaire 22



© Jacques Boyer-Roger-Viollet



© Roger-Viollet



© Roger-Viollet

De gauche à droite :  
John Dalton,  
Ernest Rutherford et  
James Chadwick

L'idée que la matière est composée d'unités insécables appelées « atomes » a traversé les siècles, en étant parfois rejetée et parfois acceptée.

Les débuts de la chimie quantitative, au début du XIX<sup>e</sup> siècle, marquent son retour en force. Durant ce siècle, adversaires et partisans de « l'hypothèse atomique » se sont combattus avec ardeur.

Enfin, au XX<sup>e</sup> siècle, physiciens et chimistes n'ont pu qu'admettre la structure microscopique de la matière qui compose notre Univers et s'atteler à l'étude de ces objets complexes que sont les atomes.

## HISTORIQUE

- L'idée que la matière est composée d'éléments insécables est apparue dès le V<sup>e</sup> siècle avant l'Ère Chrétienne.
- De 1600 à 1800, le recours à des entités extrêmement petites (molécules ou atomes) pour décrire la matière se trouve sous la plume d'auteurs réputés : Galilée dans « *Il Saggiatore* » ou Descartes dans « *Le Monde* ».
- En 1808, John Dalton reprend l'idée d'atomes afin d'expliquer les lois chimiques. Dans sa théorie atomique, il fait l'hypothèse que les particules d'un corps simple sont semblables entre elles, mais différentes lorsque l'on passe d'un corps à un autre. Toute réaction chimique doit alors pouvoir être identifiée comme étant un nouvel agencement d'atomes, ces derniers ne subissant aucune altération.
- En 1897, Joseph John Thomson montre que les rayons cathodiques sont composés de particules massives et chargées négativement : les électrons. Il imagine alors que les atomes sont constitués d'une matière chargée positivement et aussi pleine d'électrons.
- En 1908, Jean Perrin démontre définitivement que la matière est constituée d'atomes.
- En 1911, Ernest Rutherford découvre, en envoyant des particules sur une feuille d'or, que l'essentiel de la matière atomique est concentrée dans un noyau très petit entouré d'électrons dont le comportement reste à éclaircir. C'est encore lui qui, en 1918, imagine que les noyaux atomiques sont composés de protons, particules beaucoup plus massives que les électrons et chargées positivement. Mais les mesures de masses et de charges des noyaux atomiques démontrent qu'il existe des protons neutres, nommés neutrons dès 1920. James Chadwick les découvre en 1932.
- En 1913, Niels Bohr propose le premier modèle décrivant les niveaux d'énergie des électrons.
- En 1964, Murray Gell-Mann et Georg Zweig développent la première forme de la théorie des quarks qui ont été mis en évidence en 1968.

UN ATOME EST CONSTITUÉ D'UN NOYAU DE PROTONS  
ET DE NEUTRONS, ET D'UN NUAGE D'ÉLECTRONS.

# Au cœur de la matière : les atomes

## ORIGINE ET DESTIN DES NOYAUX ATOMIQUES

La matière que nous connaissons constitue 5 % du contenu total de l'Univers. La plupart des atomes qui le composent (hydrogène, hélium et un peu de lithium) ont été formés dans ses premiers instants. C'est ce que l'on appelle la nucléosynthèse primordiale. Tous les noyaux atomiques stables ont été formés au cœur des étoiles par la réaction de fusion nucléaire qui conduit des noyaux légers à fusionner et former des noyaux plus lourds.

Au cours de leur existence, les étoiles créent ainsi des noyaux pouvant avoir jusqu'à 26 protons, c'est-à-dire des noyaux d'atomes de fer.

A la fin de leur évolution, les étoiles les plus massives explosent en supernova. L'énergie considérable de cette explosion permet de synthétiser de nombreux noyaux plus lourds. Ceux qui sont stables, ou qui ont une très longue période radioactive, se retrouvent dans les nuages de gaz et de poussière à partir desquels de nouvelles étoiles se forment.

Ainsi, la Terre est composée de 32,1 % de fer, 30,1 % d'oxygène, 15,1 % de silicium, 13,9 % de magnésium, et de tous les autres éléments en proportions inférieures. Elle renferme aussi des isotopes instables (radioactifs) dont la désintégration régulière est à l'origine de son état thermique interne : potassium 40, uranium 238 et thorium 232 principalement.



© Photodisc



Tous les corps sont constitués d'assemblages d'atomes.  
De gauche à droite :  
métal – cristal ou polymère.



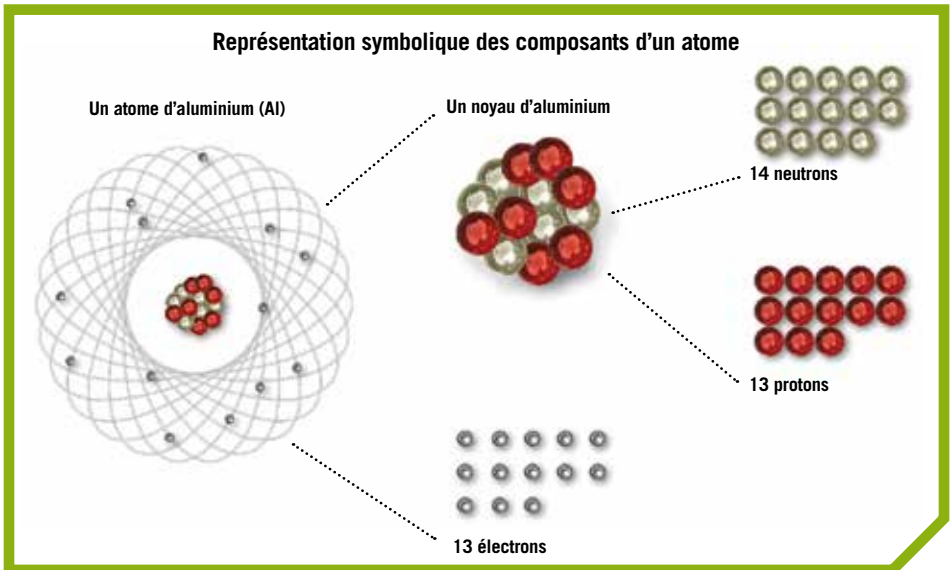
## QU'EST-CE QU'UN ATOME ?

Bien qu'il soit probable qu'une proportion importante de la masse de l'Univers soit de nature inconnue (matière noire), la matière qui nous est familière est constituée d'atomes. Les multiples modes d'assemblage de ces atomes les uns avec les autres produisent l'immense diversité matérielle des molécules, macromolécules, polymères, cristaux, métaux, nanomatériaux...

Trois briques composent les atomes : les protons, les neutrons et les électrons.

Le **noyau central** est un assemblage de protons et de neutrons. Les **protons** et les **neutrons** constituent les nucléons (du mot latin "nucleus" signifiant noyau).

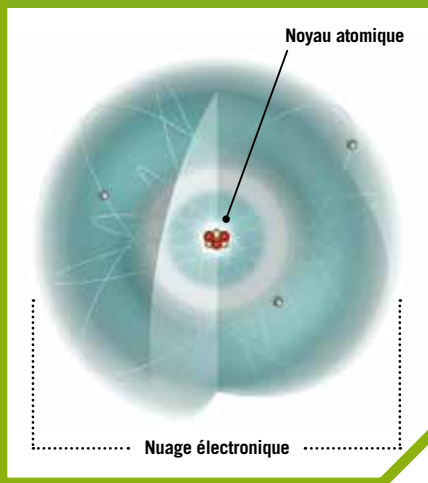
Chargés négativement, les **électrons** (qui appartiennent à la catégorie des fermions) restent à proximité du noyau chargé, lui, positivement. Individuellement, ils ne sont pas vraiment des corpuscules, mais forment un **nuage électronique** où leurs énergies plus ou moins grandes leur confèrent une agitation plus ou moins intense. Ils sont comme étalés dans l'espace, mais on peut calculer la probabilité de les détecter en tel ou tel endroit.



## REPRÉSENTATION DU NUAGE ÉLECTRONIQUE DE L'ATOME DE LITHIUM

L'atome de lithium représenté a trois protons, quatre neutrons et trois électrons.

On ne peut pas donner la position exacte des trois électrons dans le «nuage électronique». Dans cette représentation, les électrons se trouvent, de façon plus probable, dans les zones les plus foncées. Cette image est le résultat de formules mathématiques.



## DIAMÈTRES ATOMIQUES ET NUCLÉAIRES

Le diamètre du nuage électronique va de  $0,5 \times 10^{-10}$  m (hydrogène) à  $4,3 \times 10^{-10}$  m (radium). C'est très petit : il faudrait « empiler » 1 000 000 d'atomes d'hydrogène pour obtenir le diamètre d'un cheveu !

Longtemps considérés comme inexistant car impossibles à visualiser, les atomes sont devenus une réalité tangible depuis l'invention des microscopes à sonde locale.

Le noyau atomique est beaucoup plus petit. Celui de l'atome d'hydrogène (un unique proton) a un diamètre de  $2 \times 10^{-15}$  m, celui de l'atome d'uranium est de  $2 \times 10^{-14}$  m. **Le diamètre du noyau est à peu près 100 000 fois plus petit que celui de l'atome lui-même.**

## VOLUME, MASSE ET MASSE VOLUMIQUE

Les corps solides qui constituent notre environnement courant (métaux, cristaux, polymères) sont constitués d'atomes qui sont attachés les uns aux autres par l'intermédiaire de liaisons assurant leur cohésion. Ainsi, la masse volumique des atomes est voisine de celles de ces corps.

Très petits, les atomes ont à la fois une masse et un volume minuscules. Si l'on prend par exemple une tête d'épingle en fer, d'un volume de  $1 \text{ mm}^3$ , elle est constituée de 60 millions de milliards d'atomes de fer !

Un proton et un neutron ont à peu près la même masse, qui est 1 840 fois plus grande que celle d'un électron, si bien que **le noyau concentre quasiment toute la masse de l'atome**. Le diamètre d'un noyau d'atome de fer est de l'ordre de  $10^{-14}$  m, sa masse vaut  $9,3 \times 10^{-26}$  kg, la masse volumique de ce noyau est donc de  $1,4 \times 10^{17} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , ce qui fait un peu plus de cent milliards de kilogrammes par centimètre cube. Si la tête d'épingle n'était constituée que de noyaux d'atomes de fer, sa masse serait égale à  $1,4 \times 10^8$  kg, soit 140 000 tonnes !

Pour estimer la masse d'un noyau, il suffit de connaître son nombre de nucléons. Sachant que la masse d'un nucléon est d'environ  $1,67 \cdot 10^{-27}$  kg, il est facile de calculer une masse approximative d'un atome. Cependant, le résultat du calcul n'est qu'une estimation.

Mais on sait mesurer directement la masse d'un atome à l'aide d'un spectromètre de masse. Les atomes sont introduits à l'état de vapeur dans une chambre d'ionisation, puis accélérés par un champ électrique. Ils arrivent dans une zone où règne un champ magnétique qui courbe leur trajectoire. Leur point d'arrivée sur le détecteur est caractéristique de leur masse qui peut ainsi être mesurée précisément.



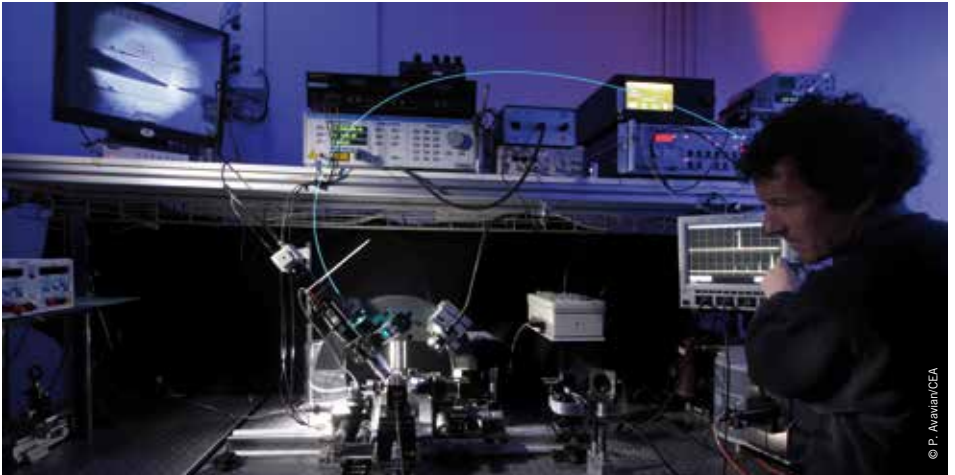
Spectromètre de masse permettant une mesure isotopique rapide sur un échantillon.

## CHARGE ÉLECTRIQUE

La charge électrique positive du proton est exactement l'opposée de celle, négative, de l'électron (le neutron est neutre). Ainsi tout atome, qui possède autant de protons dans son noyau que d'électrons dans son nuage électronique, est électriquement neutre.

Cependant, dans certaines conditions (réactions chimiques...), l'atome peut perdre ou gagner un ou plusieurs électrons et peut alors être chargé positivement ou négativement. **Il est alors appelé ion.**

Microscope optique en sonde locale.





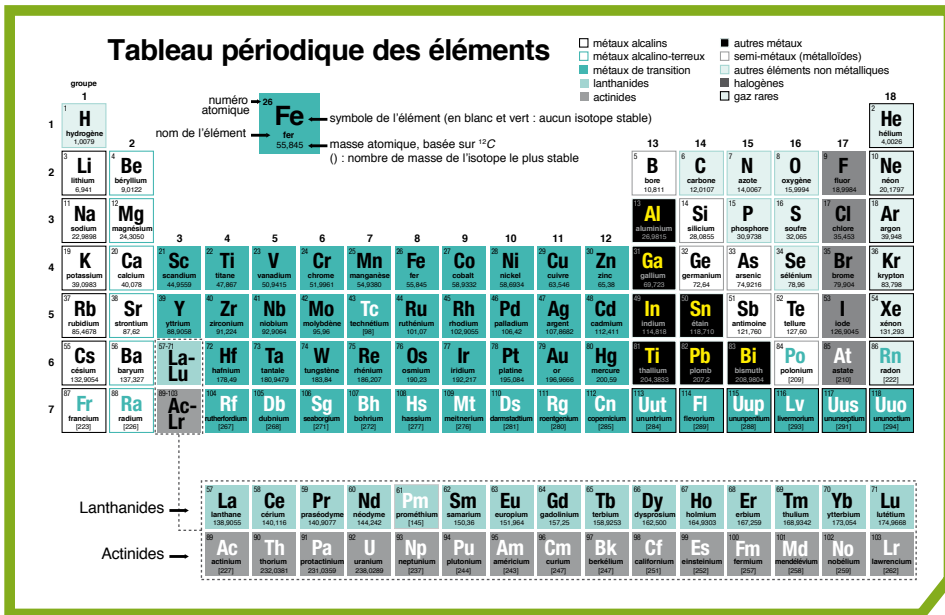
## ÉLÉMENTS CHIMIQUES ET ISOTOPES

Pour un atome donné, le nombre Z de protons, qui est aussi celui des électrons, est son numéro atomique. Le nombre de ses neutrons est noté N. La somme  $N + Z = A$  comptabilise donc les nucléons et est appelée nombre de masse.

Ces nombres définissent les éléments chimiques. Chacun est désigné par un symbole et son numéro atomique ; par exemple,  ${}_1\text{H}$  pour l'hydrogène qui n'a qu'un proton,  ${}_{26}\text{Fe}$  pour le fer qui en a 26. Imaginé en 1869 par

Dimitri Mendeleïev afin de classer les atomes en fonction de leur masse et de leurs propriétés chimiques, son tableau a progressivement pris sa forme actuelle.

On trouve sur Terre 90 éléments chimiques comprenant de 1 à 92 protons. Certains, comme le technétium avec 43 protons ou le prométhium avec 61 protons, n'existent pas à l'état naturel. Ils peuvent cependant être créés en laboratoire, ainsi que d'autres éléments créés chimiquement comprenant plus de 92 protons, comme par exemple le plutonium avec 94 protons.



### Représentation symbolique des isotopes de l'hydrogène

L'hydrogène  ${}^1\text{H}$



1 électron  
Noyau { 1 proton }

Le deutérium  ${}^2\text{H}$  ou D



1 électron  
Noyau { 1 proton  
1 neutron }

Le tritium  ${}^3\text{H}$  ou T



1 électron  
Noyau { 1 proton  
2 neutrons }

Tous les atomes d'un élément chimique donné comportent le même nombre de protons (c'est d'ailleurs ce nombre qui définit l'élément chimique). Mais ils peuvent ne pas tous avoir le même nombre de neutrons. Deux atomes ayant le même nombre de protons et un nombre différent de neutrons sont des **isotopes** de cet élément.

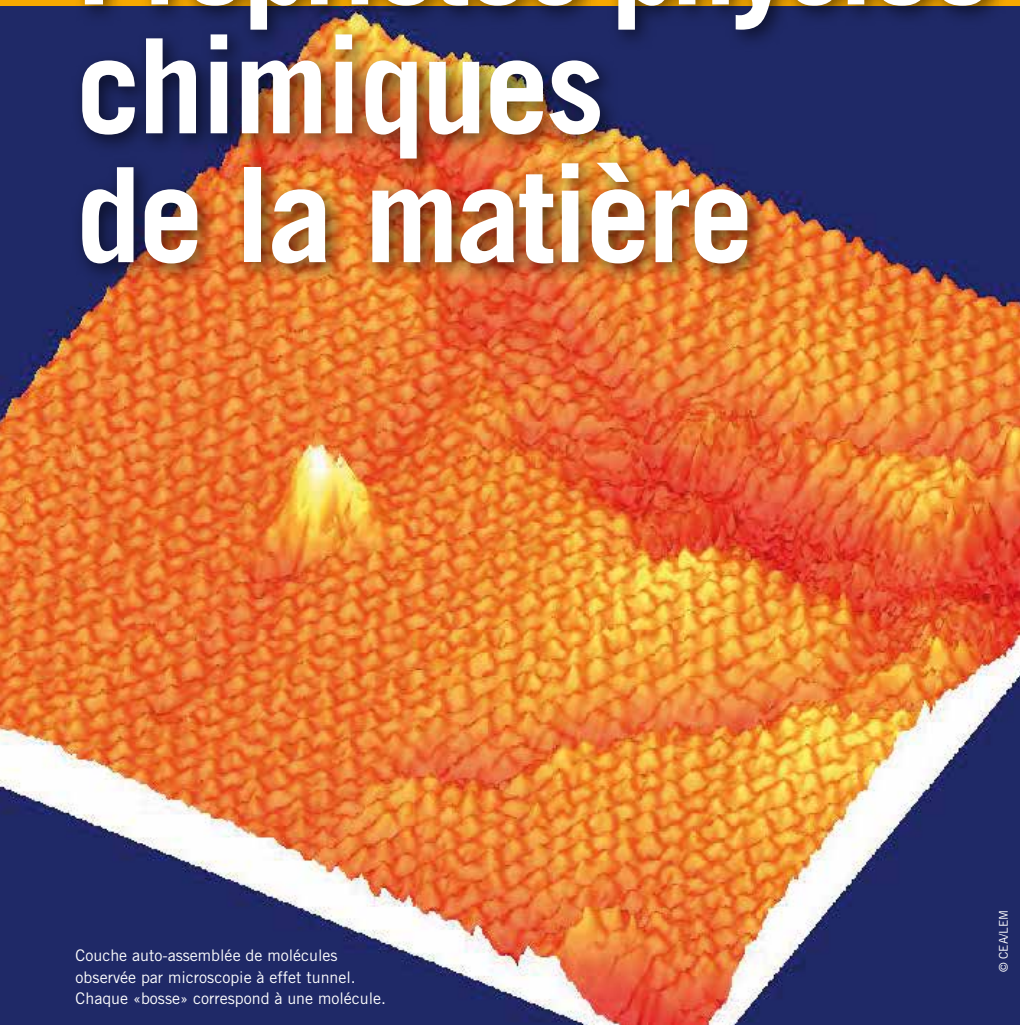
Par exemple :

- Tous les isotopes de l'hydrogène ont un seul proton mais peuvent avoir zéro, un ou deux neutrons. Ce sont l'hydrogène simple (le plus répandu), le deutérium et le tritium.
- Tous les isotopes du carbone ont 6 protons. Les plus abondants ont 6, 7 ou 8 neutrons.
- Tous les atomes d'uranium ont 92 protons. Deux isotopes existent dans la nature : l'uranium 235 avec 143 neutrons ( $235 = 92 + 143$ ) et l'uranium 238 avec 146 neutrons ( $238 = 92 + 146$ ).

Un isotope est appelé par le nom de son élément chimique associé au nombre total de ses nucléons, ce qui donne par exemple pour le carbone :  ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{13}\text{C}$  et  ${}^{14}\text{C}$ .

DU NUAGE ÉLECTRONIQUE DÉPEND LA DIVERSITÉ MATÉRIELLE.

# Propriétés physico-chimiques de la matière



Couche auto-assemblée de molécules observée par microscopie à effet tunnel. Chaque «bosse» correspond à une molécule.

© CE/LEM



Manipulations chimiques sur une rampe à vide.

**Les propriétés chimiques d'un atome dépendent seulement du nombre et de la disposition des électrons dans leur nuage ; tous les isotopes d'un même élément ont donc les mêmes propriétés chimiques. Cependant, la légère différence de masse de leur noyau fait que leurs propriétés physiques se différencient quelque peu.**

## PROPRIÉTÉS CHIMIQUES DE L'ATOME

Les électrons du nuage électronique d'un atome ne peuvent se comporter n'importe comment. S'il n'est pas possible de leur assigner des trajectoires bien définies, on peut en revanche décrire l'état dans lequel chacun se trouve grâce à quatre propriétés : leur énergie, leur **moment cinétique**, la projection de ce moment

Propriété décrivant la vigueur du mouvement orbital.

cinétique sur une direction donnée et leur **spin**.

Propriété interne à l'électron, assimilable à la rotation.

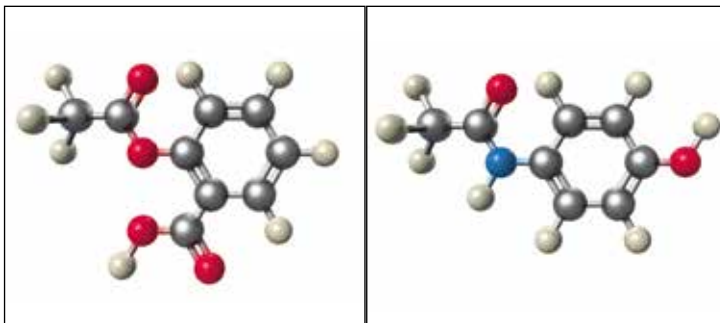
La structure du nuage électronique qui résulte de la distribution de ces propriétés a deux conséquences. La première est la répartition des symboles chimiques dans le tableau de Mendeleïev. La seconde est la nature des propriétés chimiques des différents éléments.

Certaines configurations de nuages électroniques sont particulièrement stables. De tels atomes ne réagissent pas chimiquement, ils sont inertes. Ce sont les atomes des gaz rares dont les symboles sont écrits dans la colonne la plus à droite du tableau de Mendeleïev.

Les atomes à proximité des gaz rares tendent à modifier leur nuage électronique de façon à ce qu'il ressemble à celui d'un gaz rare. Pour cela, ils s'ionisent, en gagnant ou perdant un ou plusieurs électrons, ou établissent une liaison

**covalente** avec d'autres atomes. Ils partagent alors la propriété de certains électrons.

Chacun des atomes liés met en commun un électron d'une de ses couches externes afin de former un doublet d'électrons liant les deux atomes.



Les molécules de l'aspirine à gauche et du paracétamol à droite se ressemblent beaucoup. Elles sont toutes deux composées d'atomes de carbone (en gris), d'hydrogène (en blanc) et d'oxygène (en rouge). En bleu, un atome d'azote.

La matière dite « organique », c'est-à-dire construite autour de la covalence des atomes de carbone, oxygène, azote et hydrogène, est une mine inépuisable de molécules.

Les autres atomes du tableau périodique ont des structures électroniques plus complexes. Ils s'organisent collectivement en s'associant par liaison **métallique**. Le métal obtenu est solide

Les atomes mettent en commun un ou plusieurs électrons dits libres, ou **délocalisés**.

à température normale et conducteur de courant électrique.

## PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DE LA MATIÈRE

Toutes les propriétés physiques de la matière : dureté, malléabilité, ductilité, transparence, couleur, températures de changements d'états, caractère conducteur ou isolant... ainsi que toutes ses propriétés chimiques : acide ou base, oxydant ou réducteur, solvant ou soluté... sont dues aux différents comportements adoptés par les électrons dans les nuages électroniques.

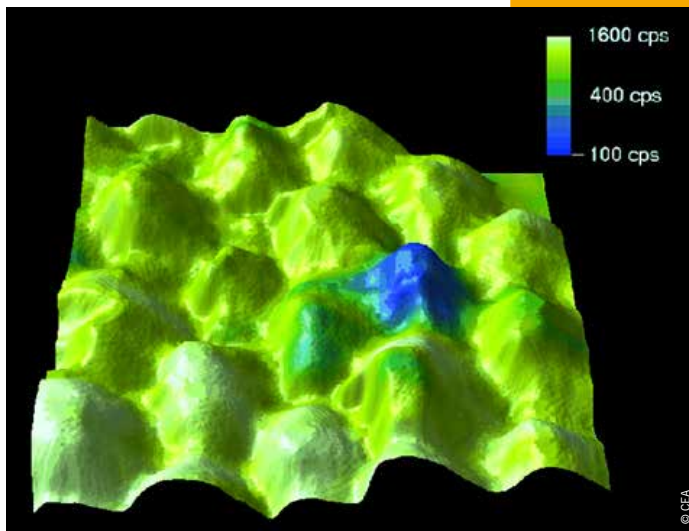
On sait aujourd'hui organiser ces atomes de façon à obtenir des propriétés nouvelles, comme la supraconduction à haute température, des propriétés magnétiques renforcées, une miniaturisation des circuits électriques ou la possibilité d'y stocker de l'information.



Le MesoXcope est un microscope à émission de photoélectrons, qui permet d'étudier la chimie et la structure électronique des surfaces, à haute résolution spatiale (50 nm) et spectroscopique (50 meV).



Luminescence de nanoparticules d'argent produite sous l'effet d'un courant électrique injecté localement par la pointe d'un microscope à effet tunnel.



© CEA

## VOIR ET SONDER LES ATOMES

De notre échelle à celle du micromètre, il est possible de former des images à l'aide des ondes lumineuses, en utilisant un microscope optique. Pour former les images d'objets plus petits, il faut utiliser des particules, comme des électrons, dont la longueur d'onde associée est plus petite que le micromètre. Le principe des microscopes électroniques est le même que celui des microscopes optiques (par exemple les microscopes électroniques à balayages MEB). En poussant leurs performances à l'extrême, les chercheurs sont parvenus à descendre jusqu'à l'échelle atomique (0,1 nm).

Depuis le début des années 1980, les microscopes à sonde locale ont vu le jour. Leur principe repose sur l'exploration d'une surface relativement plane par une sonde très fine qui interagit avec les atomes. On peut citer le microscope à effet tunnel (STM pour Scanning tunneling microscope) qui utilise un faible courant électrique passant entre l'échantillon et une pointe, le microscope à force atomique (AFM) qui utilise l'interaction mécanique entre

l'échantillon et une pointe montée sur levier souple, et le microscope optique à champ proche qui exploite, à l'aide d'une fibre optique très fine, les ondes évanescentes au voisinage de la surface de l'échantillon. Un dernier type est apparu récemment : le microscope à luminescence induite par effet tunnel (STL). Tous ces microscopes permettent l'étude, à l'échelle atomique, de diverses molécules et de leur comportement sur différents substrats.

Il n'est guère possible de former des images des noyaux atomiques. Il est cependant possible d'en produire en calculant la répartition des masses et des charges à l'intérieur des noyaux et en confron-

tant ces calculs à la mesure de certaines de leurs propriétés.

## LES QUATRE INTERACTIONS FONDAMENTALES

Pour rendre compte de tous les phénomènes auxquels ils ont accès, les physiciens ont besoin de ne faire intervenir que quatre forces, qu'ils jugent « fondamentales ». Quelles sont-elles ?

- La gravitation, bien sûr, identifiée par Isaac Newton il y a plus de trois siècles ;
- l'interaction électromagnétique, identifiée en tant que telle par James Clerk Maxwell dans la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, et qui rend compte de la cohésion de la matière à notre échelle ;
- l'interaction nucléaire faible, découverte dans les années 1930, qui gère certains processus radioactifs, notamment la radioactivité bêta ;
- l'interaction nucléaire forte - découverte à peu près au même moment que l'interaction nucléaire faible - qui lie très solidement entre eux les constituants des noyaux atomiques.

**La gravitation.** Elle gouverne bien d'autres phénomènes, de la chute des corps au mouvement des planètes. Elle est également à l'origine de la formation des étoiles à partir du gaz primordial, qu'elle oblige à se contracter. Et, grâce à elle encore, les étoiles, une fois formées, s'attirent les unes les autres, formant ainsi des galaxies. L'interaction gravitationnelle est attractive et de portée infinie (c'est-à-dire que la force qui existe entre deux masses n'est nulle que si ces deux masses sont séparées d'une distance infinie). Nul écran ne pouvant en stopper l'influence, il est vain d'espérer l'amoinrir ou la supprimer. Mais son intensité est beaucoup plus faible que celle des autres interactions, si bien qu'on peut négliger ses effets à l'échelle des particules, soumises par ailleurs à des forces beaucoup plus intenses.

**L'interaction électromagnétique** est beaucoup plus intense que la gravitation. Elle agit de façon manifeste autour de nous puisqu'elle fait fonctionner tous nos appareils électroménagers. Mais à un niveau plus fondamental, elle assure surtout la cohésion des atomes et des molécules, gouverne toutes les réactions chimiques et aussi les phénomènes optiques (puisque la lumière est constituée d'ondes électromagnétiques, structurées en photons). À l'instar de l'interaction gravitationnelle, elle a une portée infinie, mais, étant tantôt attractive, tantôt répulsive (selon le signe des charges électriques en présence), ses effets cumulatifs sont annulés à grande distance du fait de la neutralité globale de la matière.


**L'interaction nucléaire faible** a une portée très courte, d'environ un milliardième de milliardième de mètre. Autant dire qu'il s'agit, comme la colle, d'une interaction de contact : deux particules ne peuvent interagir par elle que si elles se touchent quasiment. Elle est notamment responsable de la radioactivité bêta, par laquelle un neutron se désintègre en un proton et un électron. Comme son nom l'indique, l'interaction faible est caractérisée par une très faible intensité qui la rend difficile à observer. Mais cela ne l'empêche pas de jouer un rôle capital, notamment dans le Soleil, où elle régit les réactions de fusion des noyaux d'hydrogène. Si elle disparaissait de l'Univers, notre étoile cesserait de briller...

**L'interaction nucléaire forte** est la plus intense des quatre interactions fondamentales, mais elle est restée longtemps cachée. Les physiciens ont deviné son existence dans les années 1930, lorsqu'ils se sont rendus compte que la stabilité des noyaux atomiques avait quelque chose d'étonnant. Puisqu'ils portent des charges électriques de même signe, les protons au sein d'un noyau atomique se repoussent du fait de la force électrique qui tend à les séparer. Et pourtant, ils semblent très solidement attachés les uns aux autres. Par quoi donc est combattue leur répulsion électrique ? Aucune force classique ne pouvait expliquer cette cohésion nucléaire. De là l'hypothèse, vérifiée depuis, qu'il existe au sein des noyaux atomiques une force très intense, l'interaction nucléaire forte, de portée très courte, environ un millionième de milliardième de mètre...

Cette force agit comme une sorte de glu entre deux nucléons (proton ou neutron) en contact l'un avec l'autre, mais dont la force s'affaiblit très rapidement dès qu'on les écarte un tant soit peu l'un de l'autre. Cela ne l'empêche pas d'être incroyablement puissante. Elle est par exemple capable d'arrêter, sur quelques millionnièmes de milliardième de mètres, un proton lancé à cent mille kilomètres par seconde...

EN PHYSIQUE NUCLÉAIRE,  
TOUT OU PRESQUE RESTE À DÉCOUVRIR.

# Le noyau atomique, un autre monde, une autre physique



Microscope à effet tunnel Joule-Thomson,  
pour l'étude des propriétés électroniques de la matière  
à l'échelle sub-atomique et à très basse température.

© P. Luminis/OEA

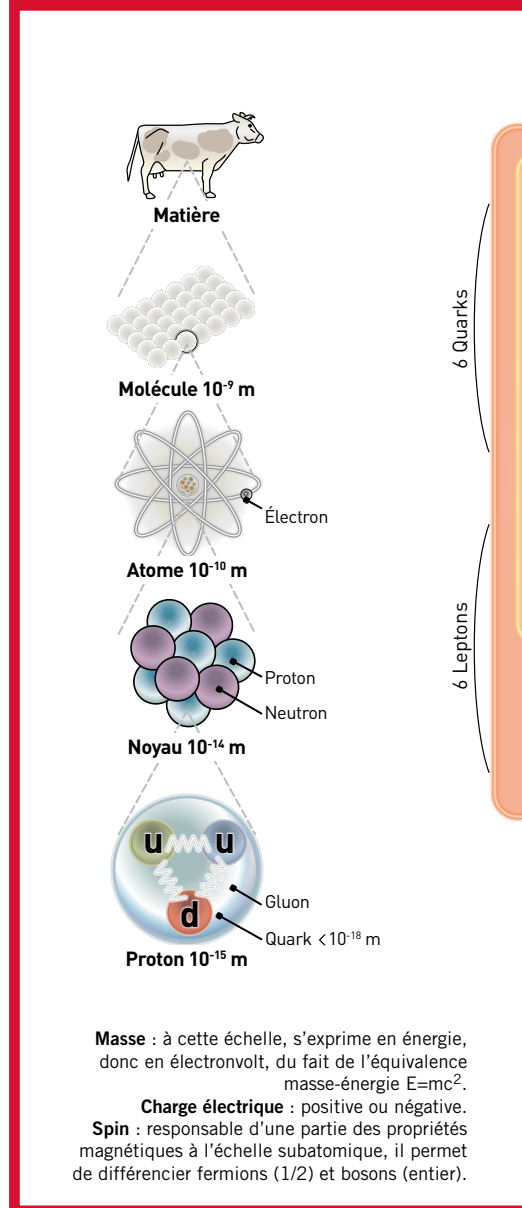
## DESCENTE DANS L'ÉLÉMENTAIRE

Si l'échelle des atomes et de leur nuage électronique est le nanomètre ( $10^{-9}$ ), celle des noyaux atomiques et des nucléons est le femtomètre ( $10^{-15}$ ). La taille des particules aujourd'hui considérées comme élémentaires est de l'ordre de  $10^{-18}$  mètres.

Le noyau est un objet extrêmement dense, complexe et petit. Il est comme une poupée russe qui contient des poupées gigognes de plus en plus petites. On a longtemps pensé que les protons et les neutrons étaient des particules élémentaires, c'est-à-dire qu'elles n'avaient aucune structure interne. Cependant, dans les années 1950 et 60, les observations faites avec des accélérateurs de particules, qui augmentaient régulièrement de taille et de puissance, montrèrent que de très nombreuses particules apparaissaient à l'issue des collisions.

Cette diversité a été interprétée en supposant qu'elles étaient composées de constituants encore plus petits, baptisés quarks. Les nucléons contiennent des quarks up et down qui s'assemblent par groupe de 3 grâce à l'interaction forte.

Les quarks sont des fermions (comme les électrons) ; on en connaît actuellement six, répartis en trois générations. Ils interagissent attractivement en échangeant des gluons qui sont des bosons. En plus d'une charge électrique égale à  $-1/3e$  ou  $2/3e$ , ils portent une autre charge appelée couleur : bleu, vert ou rouge. Il ne s'agit pas de véritables couleurs mais d'un code obéissant à une logique ternaire ressemblant à celle de l'interaction forte.



**Masse** : à cette échelle, s'exprime en énergie, donc en électronvolt, du fait de l'équivalence masse-énergie  $E=mc^2$ .

**Charge électrique** : positive ou négative.

**Spin** : responsable d'une partie des propriétés magnétiques à l'échelle subatomique, il permet de différencier fermions (1/2) et bosons (entier).



**FERMIONS**

1<sup>re</sup> famille

2<sup>e</sup> famille

3<sup>e</sup> famille

<p>2,4 MeV <b>2/3</b></p> <p><b>U</b> up 1/2</p> <p>1964 1968</p>	<p>1,27 GeV <b>2/3</b></p> <p><b>C</b> charm 1/2</p> <p>1970 1974</p>	<p>173,2 GeV <b>2/3</b></p> <p><b>t</b> top 1/2</p> <p>1977 1995</p>
<p>4,8 MeV <b>-1/3</b></p> <p><b>d</b> down 1/2</p> <p>1964 1968</p>	<p>104 MeV <b>-1/3</b></p> <p><b>s</b> strange 1/2</p> <p>1964 1968</p>	<p>4,2 GeV <b>-1/3</b></p> <p><b>b</b> bottom 1/2</p> <p>- 1977</p>
<p>0,511 MeV <b>-1</b></p> <p><b>e</b> électron 1/2</p> <p>1874 1897</p>	<p>105,7 MeV <b>-1</b></p> <p><b>μ</b> muon 1/2</p> <p>- 1936</p>	<p>1,777 GeV <b>-1</b></p> <p><b>τ</b> tau 1/2</p> <p>- 1975</p>
<p>&lt;2,2 eV <b>0</b></p> <p><b>ν<sub>e</sub></b> e-neutrino 1/2</p> <p>1930 1956</p>	<p>&lt;0,17 MeV <b>0</b></p> <p><b>ν<sub>μ</sub></b> μ-neutrino 1/2</p> <p>1956 1962</p>	<p>&lt;15,5 MeV <b>0</b></p> <p><b>ν<sub>τ</sub></b> τ-neutrino 1/2</p> <p>1975 2000</p>

**BOSONS VECTEURS**

Interaction forte

Interaction électromagnétique

Interaction faible

<p>0 eV <b>0</b></p> <p><b>g</b> gluons 1</p> <p>1965 1979</p>	
<p>≈1,25 GeV <b>0</b></p> <p><b>H</b> boson de Higgs 0</p> <p>1964 2012</p>	
<p>0 eV <b>0</b></p> <p><b>γ</b> photon 1</p> <p>1900 1922</p>	
<p>80,4 GeV <b>±1</b></p> <p><b>W<sup>±</sup></b> bosons W 1</p> <p>1968 1983</p>	<p>91,2 GeV <b>0</b></p> <p><b>Z</b> boson Z 1</p> <p>1968 1983</p>

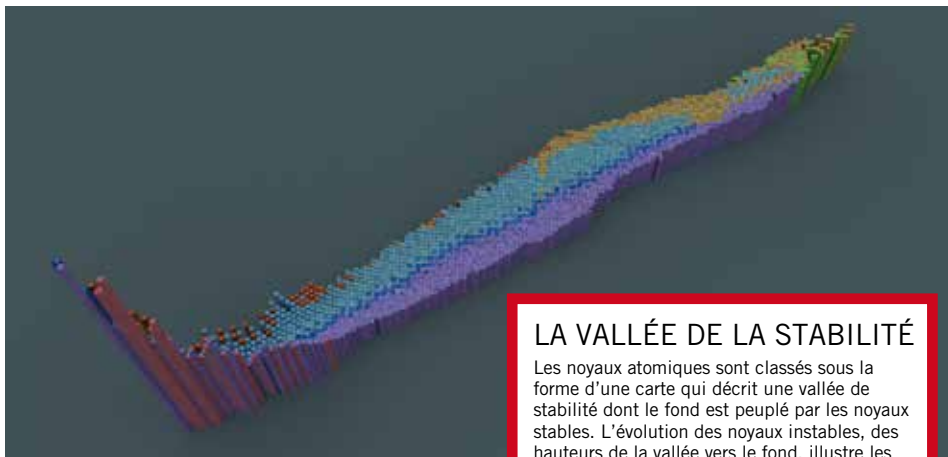
**LE MODÈLE STANDARD DE LA PHYSIQUE DES PARTICULES**

Ce modèle standard est la théorie qui décrit les particules de la matière et les particules médiatrices des interactions fondamentales qui s'exercent entre elles, le tout à des échelles inférieures à 10<sup>-15</sup> m.

Certaines de ces particules ont été observées et étudiées depuis longtemps. D'autres, comme le boson de Higgs prédit dès 1964 mais découvert seulement en 2012 au Cern (voir page 23), commencent à l'être.

Masse	≈125 GeV	<b>0</b>	Charge électrique
Symbole	<b>H</b>		
Nom	boson de Higgs	<b>0</b>	Spin
Date de prédiction théorique	1964	2012	Date de découverte expérimentale

D'après Infographie : Fabrice Mathé



### LA VALLÉE DE LA STABILITÉ

Les noyaux atomiques sont classés sous la forme d'une carte qui décrit une vallée de stabilité dont le fond est peuplé par les noyaux stables. L'évolution des noyaux instables, des hauteurs de la vallée vers le fond, illustre les différents types de radioactivité.

Voir la version animée sur <http://irfu.cea.fr/la-vallee-de-stabilite/index.php>

Réalisation Frédéric Durillon - Animea 2011

## STABILITÉ DES NOYUX ATOMIQUES

Composés de  $Z$  protons et de  $N$  neutrons, les noyaux atomiques doivent leur cohésion à l'interaction nucléaire forte. Elle se manifeste par l'échange de mésons  $\pi$  entre nucléons, comme l'avait imaginé Hideki Yukawa dès 1935 (1<sup>er</sup> physicien japonais à recevoir, grâce à cette prédiction, le prix Nobel de physique en 1949). Plus tard, on comprendra que les mésons  $\pi$  sont constitués d'un quark et d'un antiquark de la même famille.

Neutrons et protons se répartissent l'énergie du noyau et se trouvent animés de mouvements très rapides.

L'assemblage de nucléons peut être stable (on connaît 256 noyaux stables pour 80 éléments) ou instable (près de 3 000 noyaux). On définit, pour chacun de ces noyaux instables, un temps de demi-vie, ou période radioactive  $T$ , au bout duquel la moitié des noyaux s'est désintégrée. Les noyaux instables cherchent à revenir à un état stable, via une chaîne de désintégrations. Ainsi, le césium (période 1,2 s) devient néodyme stable en se changeant en baryum (période 14,5 s), lanthane (période 14,2 min), cérium (période 33 h) et praséodyme (période 13,5 j).

## LA DÉCROISSANCE RADIOACTIVE

L'activité d'un échantillon radioactif (qui s'exprime en becquerels) diminue avec le temps du fait de la désintégration progressive des noyaux instables qu'il contient. Pour chaque isotope radioactif, et pour chacun des processus de désintégration qu'il peut connaître, on définit le temps de demi-vie, ou période radioactive, comme étant la durée au bout de laquelle la moitié des atomes radioactifs initialement présents a spontanément réagi. Selon les noyaux radioactifs concernés, cette période est très variable : cela peut aller de quelques millisecondes à plusieurs milliards d'années !

## LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE

**La physique nucléaire est l'étude du noyau atomique et des interactions dont il est le siège.**

C'est l'étude du noyau en tant que collection de nucléons qui bougent et s'attirent, celle des mécanismes intimes de leur attraction et de l'influence des quarks sur leurs propriétés et leurs comportements. Pour cela, on sonde les noyaux avec un véritable micro-scalpel adapté à leurs dimensions. On utilise un faisceau de particules accélérées qui permet de regarder quelle est la proportion des particules déviées ou absorbées. Il permet aussi de voir comment réagissent les noyaux : éjection de nucléons, production d'autres particules, etc.

Différentes modélisations des noyaux atomiques se sont succédées et complexifiées au cours des dernières décennies afin de mieux expliquer les observations de plus en plus variées et précises que les avancées techniques ont permis. Les modèles, étudiés notamment grâce à des simulations faites sur ordinateurs, ont évolué. Ils passent à des structures complexes où les nucléons forment des agrégats stables au sein du noyau ou, dans d'autres cas, constituent un halo diffus entourant un centre plus dense. C'est toute une nouvelle physique nucléaire qu'il faut réinventer.

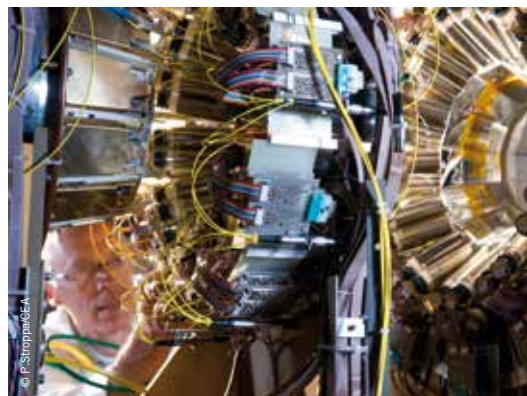
## SYNTHÉTISER ET ÉTUDIER DE NOUVEAUX NOYAUX

Depuis la découverte de la radioactivité artificielle en 1933 par Frédéric Joliot et Irène Joliot-Curie, de nombreux noyaux atomiques ont été synthétisés. Si les centres de Doubna (en Russie), de Darmstadt (en Allemagne) ou de Berkeley (aux USA) synthétisent des noyaux de numéro atomique élevé, le Grand accélérateur national d'ions lourds (Ganil) du CEA/CNRS installé à Caen permet l'étude de la stabilité de ceux qui y sont produits, de façon à mieux comprendre comment l'interaction nucléaire forte maintient les nucléons entre eux.

Deux axes de recherche sont développés : l'étude des noyaux stables dans leurs états plus ou moins excités, et la production et l'étude de **noyaux exotiques**. Le Ganil a commencé à fonctionner en 1983 et son extension, Spiral2, démarrée en février 2012, sera bientôt opérationnelle.

Noyaux caractérisés par leur déséquilibre neutrons/protons et leur temps d'existence extrêmement bref avant qu'ils ne se désintègrent.

fonctionner en 1983 et son extension, Spiral2, démarrée



Multidétecteur de particules chargées Indra, dédié à l'étude de la collision d'ions lourds.



© P. Stropia/CEA

Quadrupôles de l'accélérateur linéaire Spiral2

**SPIRAL** (Système de productions d'ions radioactifs en ligne) est un équipement, implanté depuis 2001 au Ganil, permettant de produire et d'accélérer des noyaux exotiques. Ceux-ci se caractérisent par un fort déséquilibre entre leur nombre de protons et de neutrons et un temps d'existence extrêmement bref avant de se désintégrer. Leur étude est essentielle dans de nombreux domaines de la physique nucléaire, mais aussi de l'astrophysique, notamment pour comprendre la formation des noyaux des atomes au sein des étoiles et des supernovae. Si les physiciens savent synthétiser des noyaux exotiques en laboratoire, l'installation Spiral leur permet d'en produire en grande quantité, de les accélérer, d'observer leurs collisions avec d'autres noyaux, et ainsi de connaître leur structure.

Pour aller plus loin, l'installation Spiral2 permettra de produire des noyaux exotiques à un taux mille fois plus élevé que ce qui se fait jusqu'à présent. L'objectif sera toujours de produire ces noyaux de synthèse pour découvrir leur nature et comprendre les lois qui gouvernent leur comportement. Mais à la différence du premier accélérateur, il permettra de produire et d'étudier des noyaux plus lourds, voire des noyaux « super-lourds » jamais observés à ce jour.



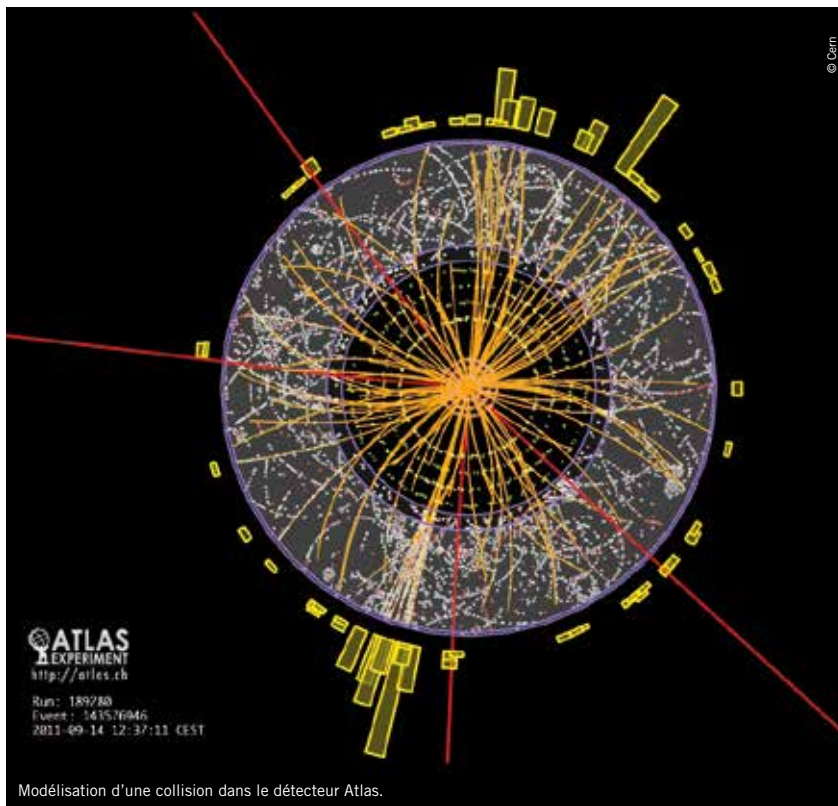
Au Cern, l'expérience Alice est dédiée à l'étude de la matière dans ses états extrêmes de température et de densité.

## LA MATIÈRE NUCLÉAIRE

L'interaction nucléaire forte permet de former des noyaux atomiques dont le nombre de masse (nombre de nucléons) ne dépasse pas 300. Mais il est possible de contraindre les nucléons à former temporairement une assemblée plus nombreuse en accélérant des ions lourds (comme des ions de plomb) avec des énergies colossales (de plusieurs TeV).

Les noyaux atomiques s'entrechoquent de face. Leurs nucléons se mélangent pendant la durée du choc et les conditions qui règnent au sein du plasma de quarks et de gluons ressemblent aux conditions de température et de pression qui étaient celles de l'Univers à ses premiers instants (scénario du Big Bang). Le plasma ainsi formé n'est pas stable et la plus grande partie de l'énergie apportée pour le constituer se transforme en un très grand nombre de particules de toutes sortes qui sont détectées instantanément. Des collisions proton-plomb permettent de distinguer ce qui se passe dans un plasma froid par rapport à un plasma chaud (plomb-plomb). L'intérêt de ces collisions est de tester les mécanismes de nucléosynthèse primordiale en confrontant les mesures actuelles avec le résultat de ce qui a eu lieu il y a 13,7 milliards d'années. C'est ce qui a été réalisé au LHC et sera poursuivi après sa remise en marche prévue en 2015.

## LE BOSON DE HIGGS



Modélisation d'une collision dans le détecteur Atlas.

Au **Large Hadron Collider (LHC)** ce sont parfois des protons, noyaux d'hydrogène, qui circulent en paquets très denses, 100 milliards de protons par paquet ! Le collisionneur est un anneau de 27 km de circonférence, situé à 100 m sous terre à la frontière franco-suisse. Ces paquets de protons font 11 000 tours par seconde et se rencontrent en quatre points de collisions toutes les 25 ns. L'énergie disponible alors, de 7 à 8 TeV, permet de remonter aux conditions de température et de pression régnant dans l'Univers juste après le Big Bang.

Sur les 6 millions de milliards de collisions proton-proton produites dans le LHC de 2010 à 2012, les expériences Atlas et CMS ont chacune enregistré environ 5 milliards de collisions intéressantes. Grâce à cette accumulation de données, des événements isolés s'ajoutent les uns aux autres et le signal émerge du bruit de fond. En juillet 2012, 400 collisions environ ont permis de mettre en évidence des événements signalant la particule qui ressemble au boson de Higgs. Celui-ci, prédit dès 1964 par les théoriciens François Englert, Robert Brout et Peter Higgs, leur ont valu de recevoir le prix Nobel de physique 2013.



## LA COLLECTION

- 1 → L'atome
- 2 → La radioactivité
- 3 → L'homme et les rayonnements
- 4 → L'énergie
- 5 → L'énergie nucléaire : fusion et fission
- 6 → Le fonctionnement d'un réacteur nucléaire
- 7 → Le cycle du combustible nucléaire
- 8 → La microélectronique
- 9 → Le laser
- 10 → L'imagerie médicale
- 11 → L'astrophysique nucléaire
- 12 → L'hydrogène
- 13 → Le soleil
- 14 → Les déchets radioactifs
- 15 → Le climat
- 16 → La simulation numérique
- 17 → Les séismes
- 18 → Le nanomonde
- 19 → Energies du XXI<sup>e</sup> siècle
- 20 → La chimie pour l'énergie

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



© Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, 2014  
Direction de la communication  
Bâtiment Siège  
91191 Gif sur Yvette cedex - [www.cea.fr](http://www.cea.fr)

ISSN 1637-5408.

