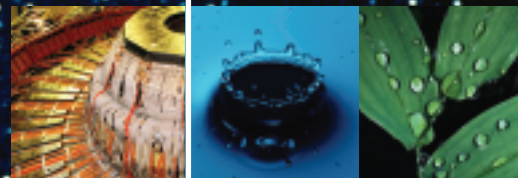


- 1 - L'atome
- 2 - La radioactivité
- 3 - L'homme et les rayonnements
- 4 - L'énergie
- 5 - L'énergie nucléaire : fusion et fission
- 6 - Le fonctionnement d'un réacteur nucléaire
- 7 - Le cycle du combustible nucléaire
- 8 - La microélectronique



DE LA RECHERCHE
À L'INDUSTRIE

1 > L'atome



AU CŒUR DE LA MATIÈRE : LES ATOMES
ÉLÉMENTS CHIMIQUES ET ISOTOPES

LES QUATRE INTERACTIONS
FONDAMENTALES

LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE



© Commissariat à l'Énergie Atomique, 2002
Direction de la communication
Bâtiment Siège - 91191 Gif-sur-Yvette cedex
www.cea.fr



ISSN 1637-5408.



L'atome

AU CŒUR DE LA MATIÈRE : LES ATOMES 4

La composition des atomes 5

Les tailles d'un atome
et de son noyau 5

La masse de l'atome 6

La charge électrique
de l'atome 6

ÉLÉMENTS CHIMIQUES ET ISOTOPES 8

Les éléments chimiques 9

Les isotopes 9

Le tableau de Mendeleïev 11

LES QUATRE INTERACTIONS FONDAMENTALES 12

L'interaction forte 13

L'interaction
électromagnétique 13

L'interaction faible 14

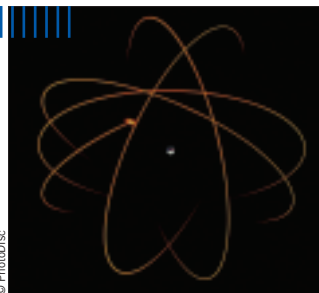
La gravitation 14

LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE 15

Une brève description
du noyau 16

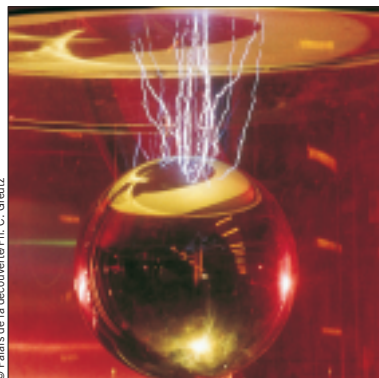
La microchirurgie du noyau 16

La fournaise nucléaire 19



Chaque atome est constitué d'un noyau entouré d'un cortège d'électrons.

© PhotoDisc



© Palais de la découverte/Ph. C. Greutz

Grêle électrostatique.



De gauche à droite : Joseph John Thomson, Ernest Rutherford et James Chadwick.

introduction

La découverte de l'atome est due à des philosophes, tels que Leucippe et Démocrite, qui, pour tenter de répondre aux questions portant sur le commencement et la fin du cosmos, l'unité et la diversité des êtres matériels, ont trouvé un dénominateur commun pour tous les êtres, pour tout l'univers : l'atome. Au fil des années et des siècles, cette volonté de comprendre l'origine du monde a contribué

à considérer l'atome comme un objet physique par les physiciens. Cette "petite unité de matière" a permis de faire un grand pas dans la compréhension de notre univers et est encore au centre de nombreuses recherches, mais elle n'a pas dit son dernier mot.

HISTORIQUE

- Dès le V^e siècle avant Jésus-Christ, Leucippe, puis Démocrite, nomment "atome" (du grec "atomos" qui ne peut être coupé) cette "petite unité de matière", éternelle, illimitée et constamment en mouvement rapide.
- Il faudra attendre plus de 2500 ans pour approfondir cette connaissance. En 1897, Joseph John Thomson découvre l'un des composants de l'atome, l'électron. En 1904, il imagine que les atomes sont des sphères remplies d'une substance électriquement positive et fourrée d'électrons négatifs.
- En 1911, un savant anglais, Ernest Rutherford, voit que des particules projetées sur de la matière la traversent comme si c'était du vide, sauf quelques-unes, très rares qui sont déviées ou même rebondissent comme des balles de fusil tirées contre une large et haute haie recelant quelques billes d'acier. Il découvre ainsi le noyau atomique qui concentre presque toute la masse de l'atome dans un volume cent mille fois plus petit que ce dernier.
- On trouve ensuite que la charge électrique positive du noyau est portée par plusieurs corpuscules, les protons. Et, en 1932, James Chadwick découvre le neutron, constituant neutre du noyau. Lorsqu'il est seul, il se désintègre en proton et en électron, lorsqu'il est à l'intérieur du noyau atomique, il est stable.
- En 1969, des physiciens bombardent des noyaux avec un faisceau de particules (des électrons) suffisamment accélérées pour pénétrer au cœur des nucléons. Et l'histoire de Rutherford se répète au sein même du nucléon, certains électrons rebondissent de façon apparemment bizarre. Ce ne peut être que sur des corpuscules encore plus petits. Ainsi sont découverts les quarks. Chaque nucléon en contient trois.
- La dernière découverte est celle du quark. Peut-être un jour découvrira-t-on des particules encore plus petites à l'intérieur des quarks ! Mais il faudra disposer d'accélérateurs de particules encore plus puissants. Plus on veut voir petit, plus le "microscope" doit être gros.

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



LA COMPOSITION DES ATOMES

Les planètes, l'air, l'eau, les pierres, les êtres vivants... tous les corps de la nature sont constitués à partir d'atomes ou d'assemblages d'atomes (molécules...). Contrairement à son

Assemblage de plusieurs atomes reliés par des liaisons chimiques.

étymologie, l'atome n'est pas indivisible. Comment est-il constitué?

Un atome est composé :

- d'un **noyau central** qui est un assemblage de **protons** et de **neutrons**. Les protons et les neutrons constituent les **nucléons** (du mot grec "*nucleus*" signifiant noyau);
- d'un **nuage périphérique** composé d'un cortège d'**électrons**, qui tournent à des vitesses prodigieuses autour du noyau. Il est impossible de vraiment se représenter leurs trajectoires: seules des formules mathématiques permettent de prédire dans le nuage qu'ils forment autour du noyau, les zones où l'on a le plus de chances de les rencontrer.

Il existe beaucoup d'atomes différents mais ils sont tous fabriqués à partir de protons, de neutrons et d'électrons tous identiques.

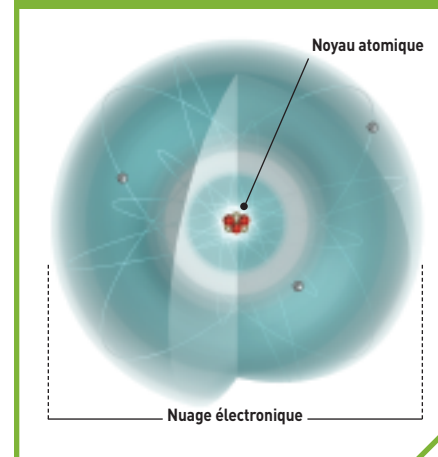
LES TAILLES D'UN ATOME ET DE SON NOYAU

Le diamètre du nuage électronique sphérique de l'atome est de l'ordre de 10^{-10} mètre. Cette taille est vraiment minuscule. Pour atteindre un centimètre, il faudrait aligner 100 millions d'atomes.

Le noyau est encore beaucoup plus petit. Il occupe une sphère d'un diamètre de 10^{-15} mètre en moyenne, soit près de 100 000 fois plus petite que l'atome avec son nuage d'électrons.

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" de l'atome de lithium. 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.



“L'espace entre le noyau et le nuage d'électrons est vide.”

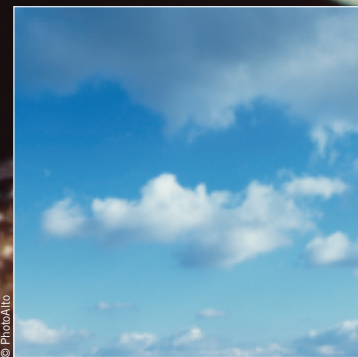
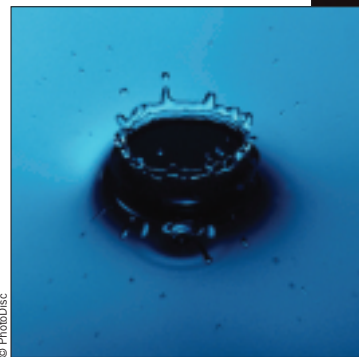
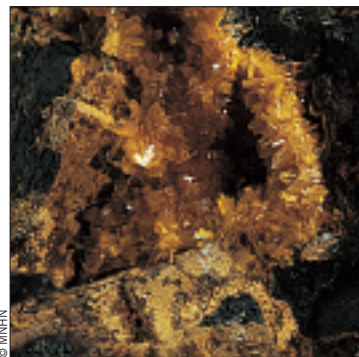
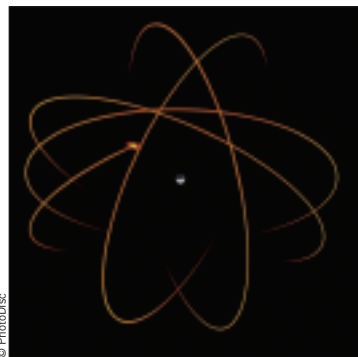
LA MASSE DE L'ATOME

Dans l'atome, la masse n'est pas répartie de façon homogène. Les protons et les neutrons ont à peu près la même masse, mais ils sont environ 2000 fois plus lourds qu'un électron, si bien que **le noyau concentre quasiment toute la masse de l'atome** et que la matière dont est fait un noyau est un million de milliards de fois plus dense que la matière ordinaire. Si tous les noyaux de la Terre venaient à se toucher, notre planète aurait à peine plus de cent mètres de diamètre et un grain de sable pèserait plus d'une tonne. Pour estimer la masse d'un noyau, il suffit donc de connaître son nombre de nucléons (appelé aussi nombre de masse). Sachant que **la masse d'un nucléon est d'environ $1,67.10^{-27}$ kg**, il est facile de calculer une masse approximative d'un atome. Cependant,

le résultat du calcul n'est qu'une estimation (voir livret *L'énergie nucléaire: fusion et fission*).

LA CHARGE ÉLECTRIQUE DE L'ATOME

Des trois éléments constituant l'atome, seul **le neutron ne porte pas de charge électrique**, il est neutre, d'où son nom. **Un proton porte une charge positive et un électron, une charge négative**. Un atome dans son état normal comprend autant de protons que d'électrons. Il est donc 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**.



© PhotoDisc

© MNHN

© PhotoDisc

© PhotoDisc

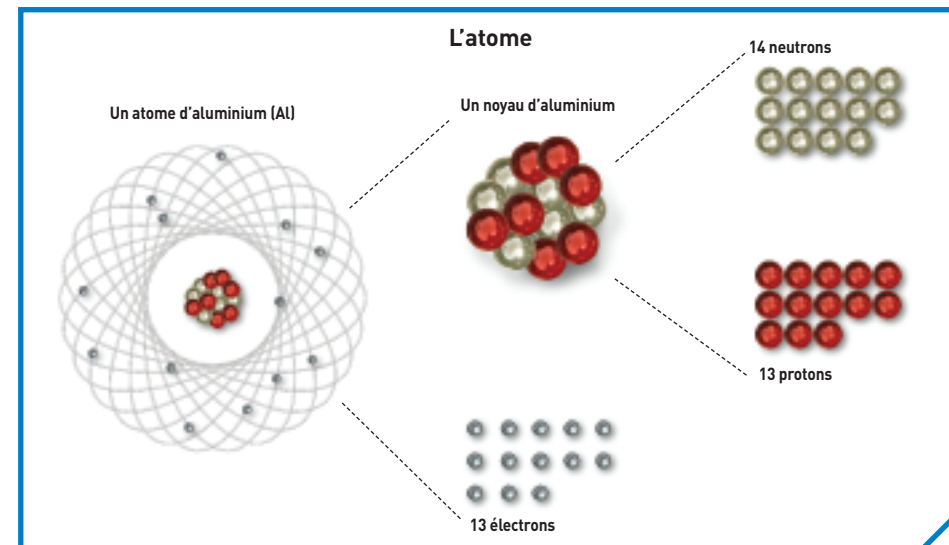
© PhotoDisc

© PhotoDisc



SELON LE NOMBRE DE LEURS
CONSTITUANTS, LES ATOMES RELÈVENT
DE CATÉGORIES DIFFÉRENTES.

Éléments chimiques et isotopes



LES ÉLÉMENTS CHIMIQUES

Un élément chimique est un ensemble d'atomes comportant le même nombre de protons. Il est désigné par un symbole d'une ou deux lettres (par exemple, ^1H pour l'hydrogène qui n'a qu'un proton, ^{26}Fe pour le fer qui a 26 protons). Les atomes présents naturellement sur Terre appartiennent à 90 éléments chimiques comprenant de 1 à 92 protons. Les éléments chimiques, technétium (Tc) avec 43 protons et prométhéum (Pm) avec 61 protons, n'existent pas à l'état naturel. Ils peuvent cependant être créés artificiellement ainsi que d'autres éléments

chimiques comprenant plus de 92 protons comme, par exemple, le plutonium (Pu) avec 94 protons.

LES ISOTOPES

Les noyaux ne sont pas uniquement constitués de protons, ils contiennent aussi des neutrons. **Des atomes d'un élément chimique comportant un nombre différent de neutrons sont des isotopes de cet élément.** Par exemple :

- Tous les isotopes de l'hydrogène ont un proton et zéro, un ou deux neutrons. Ce sont l'hydrogène léger (appelé souvent hydrogène tout

DANS LA NATURE, TOUS LES OBJETS
ONT UNE ACTION L'UN SUR L'AUTRE.
ON DIT QU'ILS INTERAGISSENT.

Les quatre interactions fondamentales



© Palais de la découverte/Ph. C. Greitz

“Une boussole est perturbée par les éclairs d'un orage : c'est l'une des manifestations de la force magnétique qui provient du mouvement des charges électriques.”

Dans la nature, les objets sont soumis à toutes sortes de forces qui s'exercent à distance. Ainsi, par exemple, deux masses s'attirent, deux charges électriques s'attirent ou se repoussent suivant leur signe. Les objets ont une action l'un sur l'autre. Ils interagissent. Suivant la nature des objets, les forces d'interaction (ou plus simplement interactions) sont de quatre types fondamentaux : l'interaction forte, l'interaction électromagnétique, l'interaction faible et la gravitation.

L'INTERACTION FORTE

L'interaction forte, ou force nucléaire forte, assure la cohésion du noyau en faisant fortement s'attirer les nucléons. Elle ne s'exerce qu'à des distances très courtes, quelques diamètres de noyaux. À distance égale, elle est 100 à 1 000 fois plus intense que l'interaction électromagnétique.

L'INTERACTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

L'interaction électromagnétique se manifeste sous deux formes, la force électrique et la force magnétique. La première régit les phénomènes électriques comme la foudre, les cheveux qui se dressent sur la tête quand il y a de l'électricité dans l'air, et la deuxième, les phénomènes magnétiques comme la boussole, les électroaimants, etc. La force magnétique est un effet provenant du mouvement des charges électriques, ainsi une boussole est perturbée par les éclairs d'un orage. Cette interaction fait se

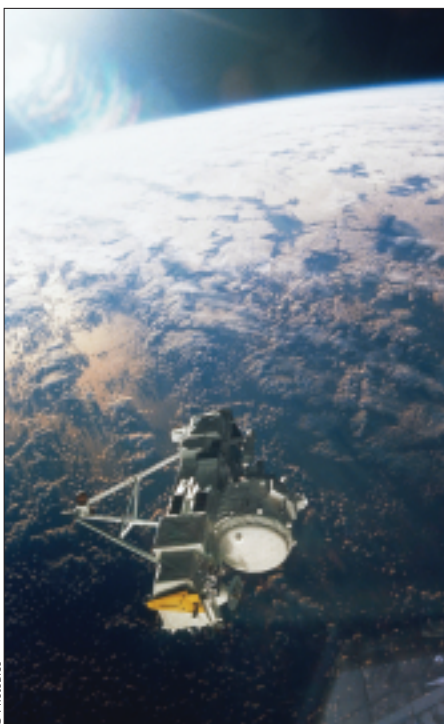
repousser deux charges électriques de même signe (deux protons, par exemple), et s'attirer deux charges de signes opposés (un électron et un noyau). Elle porte à l'infini, mais elle est quatre fois plus faible à distance double (loi de "l'inverse carré de la distance"). Elle soutient les propriétés chimiques des atomes.

La force électrique régit les phénomènes comme la foudre et intervient dans l'interaction électromagnétique.



© PhotoDisc

“La gravitation varie avec la distance. Quand on tombe de haut, on se fait mal !”



La gravitation, plutôt faible comparée à d'autres forces, est pourtant celle que nous ressentons le plus.

L'INTERACTION FAIBLE

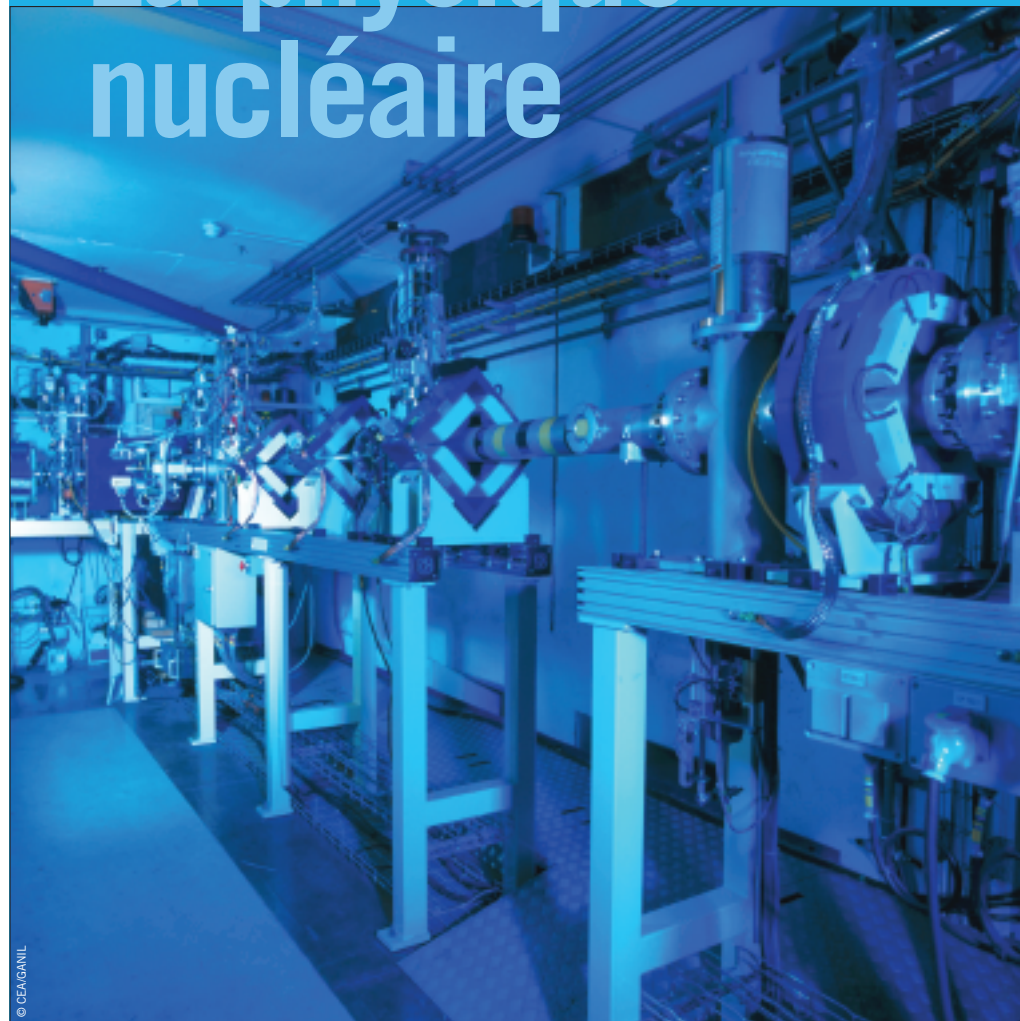
L'interaction faible, ou force nucléaire faible, est responsable de certains phénomènes de la radioactivité (par exemple, la radioactivité bêta). Sa portée est extrêmement faible, de l'ordre de quelques centièmes de la taille d'un nucléon, mais elle régit les réactions thermonucléaires qui permettent au Soleil et aux étoiles de produire de l'énergie. Elle est environ 100 000 fois plus faible que l'interaction forte.

LA GRAVITATION

La gravitation, responsable de l'attraction des masses, explique la pesanteur et le mouvement des corps célestes. Elle varie avec la distance suivant la même loi que la force électromagnétique. C'est de très loin la force la plus faible des quatre : 10^{-40} fois plus faible que la force électromagnétique ! Pourtant c'est celle que nous ressentons le plus : quand on tombe de haut, on se fait mal ! Car la masse qui nous attire est gigantesque, c'est celle de la Terre. Mais, si parfois on se casse une jambe, on ne se casse jamais un atome, encore moins un noyau...

Étudier le noyau atomique et ses composants, voilà en quoi consiste la physique nucléaire.

La physique nucléaire



“Au cœur de l’atome, protons et neutrons “dansent” à plus de 30 000 km/s. Pourtant, grâce à la force nucléaire, ils ne s’éparpillent pas.”

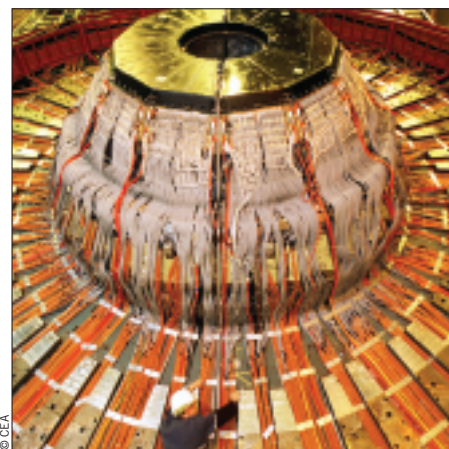
UNE BRÈVE DESCRIPTION DU NOYAU

Un atome est donc une sorte de système solaire en miniature : des mini-planètes, les électrons, tournent autour d’un mini-soleil, le noyau. **La physique nucléaire, c’est l’étude du noyau atomique et de la force énorme – l’interaction forte – qui lie ses constituants, les nucléons (protons et neutrons).**

Le noyau est un objet extrêmement dense, complexe et petit. Il est comme une poupée russe qui contient des poupées de plus en plus petites, des poupées gigognes : **le noyau contient des nucléons, qui renferment chacun trois quarks.** Il y a deux sortes de nucléons : les protons, chargés positivement et les neutrons qui sont neutres.

Dans ce minuscule volume, non seulement les protons se repoussent très fortement car ils sont porteurs de charges électriques de même signe, mais protons et neutrons dansent un vertigineux ballet à plus de 30 000 km/s (plus d’un dixième de la vitesse de la lumière, soit le tour de la Terre en 1,34 seconde) ! Pourtant, le noyau ne s’éparpille pas en gerbes de nucléons et garde sa cohésion. En son sein, **une force colossale provoque une attraction entre nucléons bien supérieure à la force électrique qui sépare les protons.** Cette force nucléaire ou interaction forte qui maintient la cohésion des noyaux est la plus puissante des quatre interactions ou forces fondamentales de la nature.

Accélérateur de particules du CERN, en Suisse.

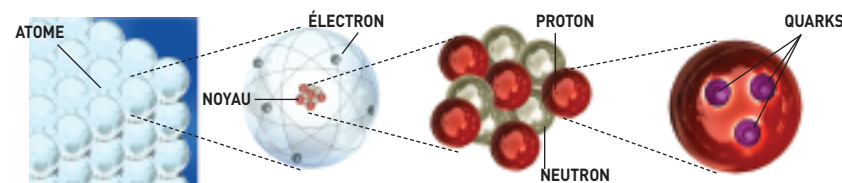


© CEA

LA MICROCHIRURGIE DU NOYAU

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 leur comportement. Pour cela, on sonde les noyaux avec un véritable microscalpel adapté à leurs dimensions. On utilise un faisceau de particules accélérées (voir encadré page 18) qui permet de regarder quelle est la proportion des particules déviées ou absorbées. Il permet aussi de voir comment réagissent les

Caractéristiques des particules élémentaires



		LEPTONS	QUARKS		
		Peuvent se déplacer librement.		Prisonniers de particules plus grandes, ils ne sont pas observés individuellement.	
FERMIONS La matière ordinaire est composée de particules de ce groupe. Pour la plupart, ces particules étaient présentes juste après le "Big Bang". Aujourd'hui on ne les trouve que dans les rayons cosmiques et auprès des accélérateurs.	PREMIÈRE FAMILLE	ÉLECTRON Responsable de l'électricité et des réactions chimiques. Sa charge est de - 1.	NEUTRINO ÉLECTRON Sans charge électrique et interagissant très rarement avec le milieu environnant.	BAS d Sa charge électrique est de - 1/3. Le proton en contient un, le neutron deux.	HAUT u Sa charge électrique est de + 2/3. Le proton en contient deux, le neutron un.
	DEUXIÈME FAMILLE	MUON Un compagnon plus massif de l'électron.	NEUTRINO MUON Propriétés similaires à celles du neutrino électron.	ÉTRANGE s Un compagnon plus lourd du "bas".	CHARME c Un compagnon plus lourd que "haut".
	TROISIÈME FAMILLE	TAU Encore plus lourd.	NEUTRINO TAU Propriétés similaires à celles du neutrino électron.	BEAUTÉ b Encore plus lourd.	TOP t

BOSONS

VECTEURS

Particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature.

PHOTON
Grain élémentaire de la lumière, porteur de la force électromagnétique.

GLUON
Porteur de la force forte entre quarks.

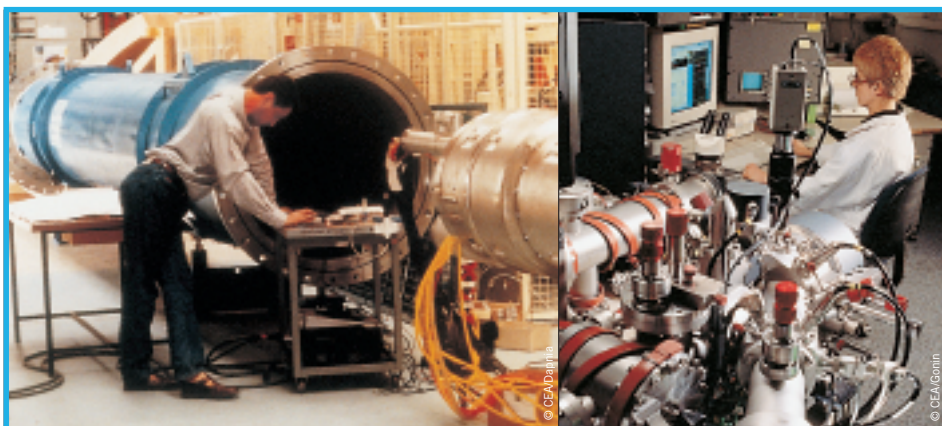
W-, W+, Z0
Porteurs de la force faible, responsables de certaines formes de désintégration radioactive.

GRAVITON
Supposé véhiculer la force de gravité.

BOSONS DE HIGGS ?



Responsables de la "brisure de symétrie électro-faible".



COMMENT “VOIR” DES NOYAUX ET DES PARTICULES ?

En réalité, on ne voit pas les noyaux.

On ne peut que déterminer leur taille, leur forme, en les bombardant avec des faisceaux de particules accélérées. On regarde ensuite comment ces particules rebondissent ou sont absorbées et comment réagit le noyau.

Ce processus n'est pas si différent de celui de la vision. Les objets renvoient à notre œil la lumière dont on les éclaire, en en absorbant parfois une partie. On voit aussi leur taille, leur couleur, etc.

Or, la lumière, c'est à la fois une collection de grains lumineux, les photons, et une vibration, une onde, tout comme la houle en mer. Cette onde transporte d'autant plus d'énergie qu'elle vibre plus vite, autrement dit, que ses ondulations sont plus serrées. La distance entre deux crêtes successives s'appelle la longueur d'onde. Plus petite est la longueur d'onde, plus l'onde est énergétique. Et plus elle permet de voir fin. Pour la lumière visible, la longueur d'onde va de 0,4 à

0,8 micromètre (millionième de mètre). À peu près, la taille d'un microbe. C'est justement le genre d'objet que l'on peut observer au microscope optique, mais si on veut voir plus petit, celui-ci ne suffit plus. Pour voir des atomes, il faut un microscope électronique dans lequel un faisceau d'électrons accélérés joue le rôle de la lumière, car il se conduit comme une onde, mais une onde dont la longueur d'onde est de l'ordre d'une fraction de nanomètre (milliardième de mètre). C'est environ le diamètre d'un atome (soit 10 000 fois plus petit que celui d'un microbe) que permet de voir le microscope électronique dont "l'onde" électronique est 10 000 fois plus énergétique que la lumière visible. Pour "voir" un noyau, il faut encore gagner au moins un facteur 100 000 en finesse d'observation et donc disposer d'un faisceau au moins 100 000 fois plus énergétique que celui du microscope électronique le plus puissant. C'est possible grâce aux accélérateurs de particules.

Le CERN de Genève, en partenariat avec le CEA, accueillera bientôt le "Large Hadron Collider" - LHC. Cet accélérateur de particules, le plus grand du monde, sera muni de 400 aimants quadripolaires qui focaliseront les faisceaux de protons, afin de produire des collisions à une énergie de 14 TeV (soit 14 000 milliards d'électrons volts). L'un des objectifs est de révéler le boson de Higgs.

En haut à gauche: un aimant quadripôle pour le LHC.
En haut à droite: le microscope analytique SIMS permet d'accéder à la localisation des radionucléides émetteurs de rayonnements faibles.
Il fonctionne selon le principe d'un microscope à balayage électronique et remplace le faisceau d'électrons primaires par un faisceau d'ions permettant l'analyse élémentaire de surfaces solides.

“Pour étudier les atomes, certains effectuent une remontée dans le temps, en recréant des conditions extrêmes proches des premiers instants de l'Univers.”

noyaux: éjection de nucléons, production d'autres particules, etc. On arrive à faire des observations extraordinaires: voir la différence entre la taille d'un proton isolé et celle d'un proton plongé dans son noyau ou encore mesurer l'influence de la rotation des quarks sur celle du nucléon qui les contient, c'est-à-dire déterminer comment trois petites toupies

qui tournent perpétuellement en baignant dans une sorte de glu et enfermées dans une toupie mille fois plus grande (et pourtant si minuscule elle-même) peuvent entraîner partiellement sa rotation...

LA FOURNAISE NUCLÉAIRE

C'est l'étude "globale" du noyau en tant qu'échantillon de cette matière nucléaire très dense dont on connaît assez mal les propriétés. Pour en savoir plus, on l'étudie dans des conditions extrêmes, identiques à celles qui régnaient aux premiers instants de l'Univers. C'est donc une véritable remontée dans le temps.

La méthode consiste à précipiter les uns sur les autres des paquets de noyaux qu'on accélère jusqu'à des vitesses proches de celle de la lumière.

Les chocs sont d'une violence inouïe. La pâte nucléaire se retrouve dans des états extrêmes de température, de pression, de déformation, d'instabilité. Les noyaux se fondent les uns dans les autres, forment de nouveaux noyaux dont la plupart n'existent pas sur Terre, se fissurent, et au-dessus d'une certaine température éclatent, se vaporisent littéralement en une gerbe de nucléons. C'est une fantastique aubaine pour les physiciens car cette température n'est autre que celle en dessous de laquelle les noyaux ont pu se former lors du refroidissement de la purée primordiale issue du "Big Bang". Ils peuvent ainsi la mesurer 15 milliards d'années plus tard.

PLUS LOIN AVEC SPIRAL

Spiral est un équipement, implanté à Caen, au Ganil (Grand accélérateur national d'ions lourds), permettant de produire et d'accélérer des noyaux légers et moyennement lourds, appelés noyaux exotiques, qui n'existent pas sur Terre. 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 déjà synthétiser des noyaux exotiques en laboratoire, l'installation Spiral va permettre, pour la première fois, d'en produire en grande quantité, de les accélérer, d'observer leurs collisions avec d'autres noyaux, et ainsi de connaître leur structure. Comparativement aux autres installations existantes, Spiral permet en outre d'étendre de manière considérable l'éventail des éléments exotiques produits et le domaine d'énergie accessible.

En septembre 2001, Spiral a produit son premier faisceau d'un noyau exotique: le Néon 18. Grâce à l'observation des collisions de ce faisceau sur une cible d'hydrogène solide, Spiral a permis de dévoiler la structure du sodium 19, noyau inconnu sur Terre, notamment pour comprendre certaines réactions thermonucléaires par lesquelles sont créés les éléments dans l'Univers.