Au cœur de l'atome

Jacques Deferne

Dessin A. Gassener

©Jacques Deferne, révisé le 26 avril 2023

Avertissement

Après le succès du "Monde étrange des Atomes", l'idée d'explorer l'intérieur du noyau des atomes m'est venue naturellement à l'esprit. Mais la tâche n'est pas aisée et je n'ai pas réussi à trouver un fil rouge analogue à celui que j'avais adopté dans mon ouvrage précédent.

Bien que de culture scientifique, je ne suis pas un physicien nucléaire et je ne prétends pas tout savoir sur ce thème.

L'étude du noyau des atomes est inséparable de notions très diverses qui touchent à la radioactivité, à la décroissance radioactive, à la fission et à la fusion nucléaire, aux centrales nucléaires, à la bombe atomique, aux déchets nucléaires, aux rayons cosmiques, à la nature des particules, aux forces fondamentales, à la nucléosynthèse et aux accélérateurs du CERN.

Trouver un fil conducteur à tous ces thèmes n'est pas aisé et l'ouvrage que je vous livre vous paraîtra peut-être un peu disparate. Aussi je sollicite votre indulgence. Toutes les remarques qui me permettraient d'améliorer cet essai seront les bienvenues !

J'ai essayé de trouver un style et un langage parfois imagé afin de mieux faire appréhender au lecteur des notions dont l'abstraction augmente lorsque les dimensions diminuent. Tout ne pas être dit et la difficulté du vulgarisateur est de savoir jusqu'où aller dans les explications.

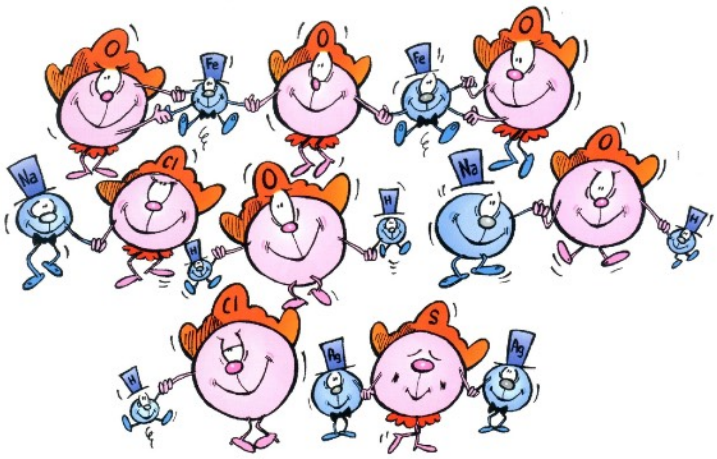
Les termes qui apparaissent en ***couleur*** *renvoient au glossaire qui se trouve à la fin de cet ouvrage.*

Je vous souhaite un agréable voyage dans le monde infiniment petit du noyau des atomes !

Chimistes et physiciens

Atomes, matière, particules

Dans le **Monde étrange des atomes**, *nous nous étions plongé dans l'univers de la petite centaine de familles d'atomes qui constituent notre environnement. Nous avions décrit leurs caractéristiques avec leur poids, leur nombre de bras, leurs affinités pour des membres d'autres familles qui les portent à créer des corps composés.*



Nous avions aussi étudié leur comportement social et examiné superficiellement leur anatomie. Nous avions vu encore que quelques-uns d'entre eux étaient exposés à des maladies génétiques qui, petit à petit, les transmutaient en d'autres atomes ou même les scindaient brutalement en deux atomes plus légers.

Les constituants de la matière, selon les chimistes

Les autopsies pratiquées sur certains atomes avaient révélé qu'ils étaient constitués de trois particules qui semblaient élémentaires : **le proton**, **le neutron** *et* **l'électron**.

Dans la périphérie des atomes, les électrons, petites particules extrêmement légères, - elles pèsent environ 0.00054 gron[1] *- sont porteurs chacun d'une charge électrique négative. Extrêmement agités, les électrons parcourent, dans une ronde vertigineuse, des orbites très diverses autour d'un noyau central, lui-même extrêmement petit et qui constitue le cœur de l'atome. Le volume grossièrement sphérique défini par la zone d'influence des électrons constitue ce qu'on a coutume d'appeler le volume de l'atome, déterminant du même coup sa taille.*

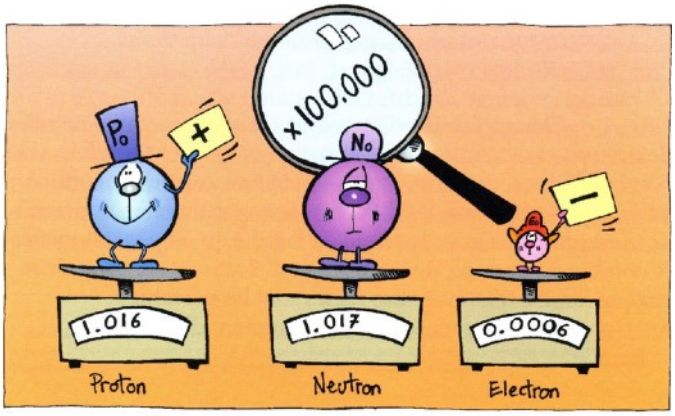
---

1 C'est une unité imaginaire utilisée uniquement dans le "Monde étrange des Atomes". En réalité, c'est le poids, exprimé en grammes, de 602.488 milliards de milliards d'atomes d'hydrogène. Ce grand nombre est connu sous le nom de "Nombre d'Avogadro" (célèbre chimiste italien, 1776-1856). On peut ainsi comparer entre eux des mêmes nombres d'atomes et en exprimer le poids en grammes. En réalité les chimistes ont défini plus précisément "l'unité de masse atomique" (U.M.A.) comme le douzième du poids du carbone ^{12}C*, ce qui équivaut à* 1.66×10^{-24} *gr.*

Le cœur de l'atome est constitué de deux sortes de particules, les neutrons et les protons. Ils sont agglutinés au centre de l'atome, maintenus ensemble par des forces très puissantes, formant un noyau dont le rayon est environ 100.000 fois plus petit que celui de l'atome lui-même !

Aux yeux des ***chimistes****, les constituants fondamentaux de l'atome sont donc :*

- ***Le proton****, particule comportant une charge électrique positive. Il pèse 1,016 gron, Il en faut 602'448 milliards de milliards pour faire un gramme! Cela correspond approximativement au poids d'un des frères Hydrogène.*
- ***Le neutron****, particule sans charge électrique, pesant 1,0017 gron, donc de poids presque identique à celui du proton.*
- ***L'électron****, particule porteuse d'une charge électrique négative, pesant 0,00054 gron soit environ 1840 fois plus légère qu'un neutron ou qu'un proton.*



Caractéristiques des constituants des atomes selon les chimistes		masse	charge	état	rémission	produits de désintégration
Noyau central	Proton	1,016	+1	stable		
	Neutron	1,017	0	instable[1]	18 min.	proton + électron + neutrino[2]
Enveloppe	Electron	0,0006	-1	stable		

1. lorsqu'il est isolé, hors du noyau
2. particule neutre, probablement sans masse ou avec une masse extrêmement faible, quasi indétectable et qui intéresse beaucoup les physiciens et les astrophysiciens

On constate aussi que la quasi totalité de la masse d'un atome est concentrée dans son noyau. Toute la matière familière qui constitue notre environnement est régie par les relations que ces trois particules entretiennent entre elles. Toutes les réactions chimiques qui font vivre cette matière dépendent uniquement du comportement des électrons.

Un premier casse-tête

Comme nous connaissons la masse du proton et celle du neutron, il paraît donc facile de calculer la masse du noyau d'un atome en additionnant les masses des protons et des neutrons qui le constituent. Mais, ô surprise, on constate que la masse du noyau est infé-

rieure à la somme des masses de ses constituants. Qu'est donc devenue la masse manquante ? C'est là qu'intervient la fameuse équation d'Einstein $E = m \times c^2$*, qui nous enseigne qu'une partie de la masse de ces constituants a été transformée en énergie, énergie colossale nécessaire pour garder confinés protons et neutron dans cet ensemble très petit qu'est le noyau de l'atome. C'est* ***l'énergie de liaison****. C'est elle qui assure la cohésion des particules constituant le noyau. C'est aussi l'énergie qu'il faut fournir à ce noyau si on veut en séparer les constituants.*

Une force d'un genre nouveau

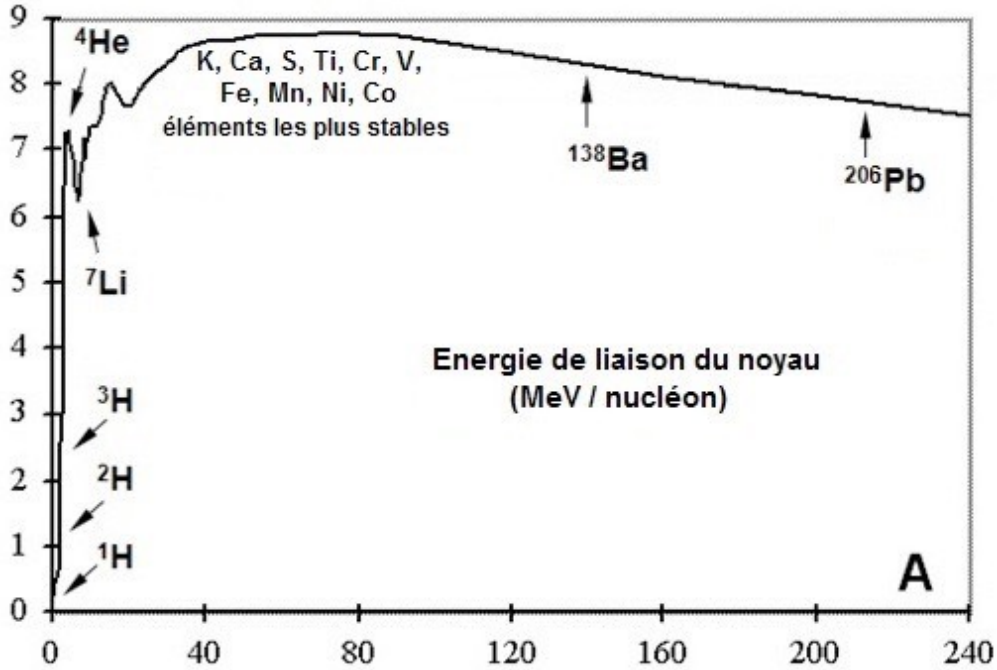
On voit donc apparaître une force d'un genre nouveau, une force mystérieuse qui n'est ni la gravité qui permet à la pomme de Newton de tomber, ni la force électromagnétique qui attire ou repousse des objets porteurs de charges électriques.

C'est ce que les physiciens nomment ***l'interaction forte****. Nous en parlerons plus loin.*

L'interaction forte assure la cohésion des noyaux

En soustrayant la masse d'un noyau d'atome de la somme des masses des protons et des neutrons qui le constituent, on connait donc l'énergie de liaison qui assure la cohésion de ce noyau. On peut diviser cette énergie par le nombre de nucléons qui constituent le noyau. On obtient alors une valeur appelée ***énergie de liaison par nucléon****. Cette valeur reflète la stabilité du noyau.*

Energie de liaison par nucléon, exprimée en MeV



nombre de nucléons dans le noyau

On constate que les éléments les plus stables se situent autour du Fer. On voit que les éléments légers sont plutôt instables. Ils vont essayer de fusionner pour construire des éléments plus stables. Du côté des éléments lourds, l'instabilité augmente avec le

nombre de nucléons. Les phénomènes de décroissance radioactive ou de fission permettront à ces éléments de se retrouver dans une zone de plus grande stabilité.

Comme des gouttes d'eau

Les physiciens ont parfois utilisé la métaphore de la goutte d'eau pour expliquer la différence entre la fusion et la fission nucléaire. Les très petites gouttes d'eau cherchent à ***fusionner*** *avec d'autres pour devenir plus grandes alors que les très grosses gouttes ont tendance à se diviser (****fission****) en deux gouttes plus petites mais plus stables.*

Les constituants de la matière, selon les physiciens

Les physiciens ont réussi à disséquer ces diverses particules et ont découvert qu'elles étaient elle-mêmes constituées de particules encore plus petites. En particulier, les neutrons et les protons se sont révélés ne pas être des particules élémentaires. Ils ont mis en évidence l'existence des ***quarks****, des petites particules qui vivent comme des triplés inséparables, trois par trois. Ces quarks sont les constituants intimes des neutrons et des protons. Nous les examinerons plus attentivement dans la suite de cet exposé.*

Les atomes qui remplissent notre univers actuel sont donc constitués de particules très diverses qui présentent des comportements bien différents les unes des autres. C'est en pratiquant l'autopsie des atomes et en reconstituant, dans les laboratoires du CERN, les conditions physiques qui régnaient durant les premières fractions de seconde d'existence de l'univers, qu'on est parvenu petit à petit à mesurer les caractéristiques de chacune d'entre elles.

Les forces qui régissent l'Univers

Pendant longtemps, on ne connaissait que la force de l'attraction terrestre puis, avec la découverte des phénomènes liés à l'électricité, on a identifié la force électromagnétique. En 1935, le japonais Hideki Yukawa a suspecté l'existence d'une force particulière, extrêmement puissante, nécessaire au maintien de la cohésion des protons et des neutrons au niveau du noyau des atomes. Puis, l'étude des causes de la radioactivité à permis de découvrir une quatrième force, très mystérieuse, force qui est à l'origine de cette radioactivité.

D'une manière imagée, nous pouvons dire qu'au Panthéon du monde qui nous entoure, quatre forces dominent de leur puissance toute la matière qui constitue l'Univers.

On peut comparer ces forces à deux dieux et deux déesses qui régneraient sur l'ensemble de l'Univers. Ils sont responsables de la façon dont la matière est organisée, ils règlent les mouvements des astres, ils confinent les particules élémentaires pour constituer les noyaux d'atome et régissent toutes les formes d'énergie. Ils ont pour nom :

Gravitor, Elektra, Megakratos et Perturbora.

Ils sont en constants désaccords les uns avec les autres, chacun d'entre eux essayant de contrecarrer les efforts des autres. La querelle explosive qui a vu naître leurs divergences semble s'être produite au cours d'un événement catastrophique qui a eu lieu il y a un peu plus de quatorze milliards d'années et que les astrophysiciens nomment le Big-Bang.

Les physiciens les plus imaginatifs pensent, qu'avant cet épisode, ces dieux vivaient en bonne harmonie dans une sorte d'âge d'or, dans un univers précédent dont les secrets exacerbent au plus haut point leur imagination.

Gravitor est responsable de la gravité

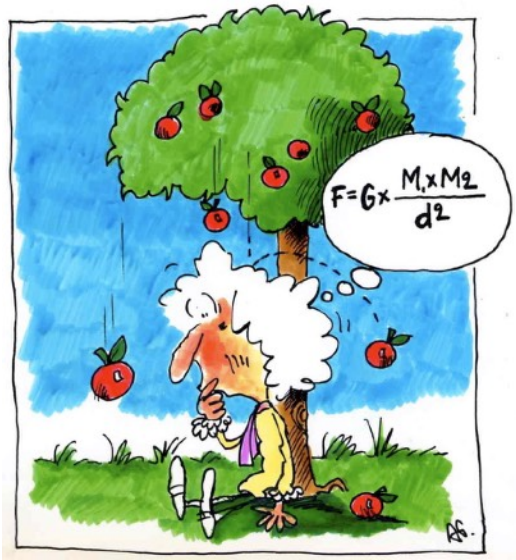
Le placide Gravitor, celui qui nous est le plus familier, est le plus grand d'entre eux. Depuis longtemps il s'est désolidarisé des autres divinités, attendant patiemment que les particules issues du Big-Bang s'éloignent suffisamment les unes des autres pour les rappeler à l'ordre et organiser leur répartition dans l'Univers.

Il règne souverainement sur la totalité de l'Univers sans s'inquiéter des chamailleries auxquelles se livrent ses trois autres collègues au sein du petit monde des atomes. Son influence ne souffre d'aucune exception et s'étend à toutes les particules qui peuplent l'Univers. Sa force est uniquement attractive. Elle tend à rapprocher toutes les particules entre elles.

Le placide Gravitor

L'union fait la force

Toutefois, cette force d'attraction est extraordinairement faible, des milliards de milliards[1] de fois plus faible que la force qui, par exemple, colle un aimant sur du fer. Aussi, pour bien marquer son importance, Gravitor applique l'adage "l'union fait la force". Ainsi, les centaines de milliards de milliards de particules qui forment la Lune unissent leur extrême faiblesse d'attraction pour rester dans la zone d'influence des centaines de milliards de milliards de particules qui constituent la Terre. Cette force est bien connue sous le nom de **force gravitationnelle** *ou, plus simplement, sous le nom de* **gravité.**



C'est, dit-on, en observant la chute d'une pomme qu'Isaac Newton eut l'intuition qui lui fit découvrir, en 1667, la loi de gravitation universelle.

C'est elle qui fait tomber la pomme d'un arbre, maintient nos pieds solidement accrochés à la Terre et empêche l'atmosphère de s'échapper dans l'Espace.

Elle assure la cohésion des matériaux qui constituent les astres et leur confère leur forme sphérique, elle retient la Lune autour de notre Terre et organise la ronde des planètes autour du Soleil et des étoiles dans le cosmos. Cette force attractive qui lie deux corps est proportionnelle à la masse de l'un des corps (M_1) multipliée par la masse de l'autre (M_2), et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare (d^2).

$$F = G\frac{(M_1 \times M_2)}{d^2}$$

G est une constante que Newton n'a pas réussi à mesurer. Elle a été déterminée par Henry Cavendish en 1798. Elle vaut $G = 6{,}67428 \times 10^{-11}$ [m^3 kg s^{-2}]. Dès lors il devenait facile de calculer la masse de la Terre, celle de la Lune ainsi que celles du Soleil et celle des autres planètes.

En 1798, Henry Cavendish imagine l'expérience suivante : un haltère constitué de deux petites masses M1 liées par une tige est suspendue à un fil très fin. Sous l'influence de deux grosses masses M2 qu'il approche des précédentes, il mesure la force de torsion F qui s'exerce sur le fil. Connaissant la distance d, il détermine la valeur de la constante G.

---

1 *Cette estimation est encore fortement sous-estimés. En réalité elle est de l'ordre de 10^{-39}*

Elektra est la déesse des forces électromagnétiques

Cette déesse ne s'occupe que des objets porteurs de charges électriques, en particulier les ***protons*** *et les* ***électrons****. Elle ignore les objets neutres. Elle exerce une force répulsive pour les particules de même charge, attractive pour les particules de charge opposée. C'est elle qui détient l'exclusivité d'organiser la chevauchée fantastique des électrons autour du noyau des atomes. C'est elle aussi qui lie les atomes entre eux pour constituer les molécules. Elle est donc responsable de toutes les réactions chimiques et permet l'existence de tous les composés chimiques que nous utilisons journellement.*

Elektra s'intéresse aux particules chargées

Elle commande aussi la foudre, rend possible les moteurs électriques et tout ce qui touche à l'électricité, au magnétisme et à l'électronique.

Tout comme la force de gravité, son influence ne connaît pas de limite et est inversement proportionnelle au carré de la distance à laquelle elle s'exerce. Toutefois, dans l'immensité de l'Univers, elle n'a aucune influence majeure car les corps célestes sont globalement constitués d'autant de charges positives que de charges négatives, ce qui annule les effets de la force électromagnétique à l'échelle des étoiles et des planètes. Son influence est surtout prépondérante dans l'environnement proche des atomes et c'est elle qui régit toutes les lois de la chimie.

Dans l'infiniment petit, elle exerce une énorme force répulsive entre les protons qui sont agglomérés au sein des noyaux atomiques, force contrée par son ennemi héréditaire Megakratos.

Megakratos règne sur le monde de l'infiniment petit

Le nain Megakratos montre une force herculéenne, mais sa très forte myopie limite sa sphère d'influence. Il règne sur le monde de l'infiniment petit. Sa zone d'influence est inférieure à un cent milliardième de millimètre. Sa force ne s'exerce donc qu'au sein du noyau des atomes dont il assure la cohésion. Les particules qui lui sont soumises sont appelées ***hadrons*** *par les physiciens. Ce sont principalement les protons, les neutrons, en ce qui concerne la matière qui nous entoure. Les* ***quarks*** *qui sont les constituants de ces particules sont également soumis aux volontés de Mégakratos.*

Le nain Megakratos règne sur le noyau des atomes

Le mode d'action de cette force est curieux en soi : contrairement à ce qui se passe chez ses autres collègues, cette force augmente avec la distance à laquelle elle s'exerce puis cesse brutalement au delà d'une certaine limite. On pourrait comparer cette force à celle d'un élastique dont la force augmente lorsqu'on l'étire mais qui se rompt subitement au-delà d'une certaine limite.

La principale tâche de Megakratos est de souder les quarks trois par trois grâce aux gluons, des particules qui lui sont entièrement dévouées et qui exécutent ses ordres pour constituer les protons et les neutrons et pour lier aussi ces derniers entre eux et assurer la cohésion du noyau atomique. Son principal souci est de réprimer les velléités des protons à vouloir échapper à son contrôle sous l'influence sournoise de sa collègue Elektra qui cherche à exercer sa force répulsive entre les protons qui portent tous une charge positive.

La petite déesse Perturbora joue les trouble-fête

La petite déesse Perturbora montre une animosité marquée envers Megakratos. Environ 100'000 fois plus faible que son rival, elle attend patiemment les moments de distraction de ce dernier pour couper subrepticement les liens qui tiennent ensemble les particules du noyau, occasionnant alors les phénomènes de radioactivité qui, à leur tour, permettent la transmutabilité de certains éléments.

Son rayon d'action est encore plus limitée que celle de Megakratos (un millionième de milliardième de mm) et ne s'exerce qu'à l'intérieur des particules, au niveau des quarks, au sein même des protons et des neutrons.

Perturbatora rend les quarks nerveux

Perturbora rend les quarks nerveux

Elle modifie en permanence le caractère des quarks en les bombardant de grosses particules extrêmement fugitives qui apparaissent comme par

*magie puis disparaissent aussi subitement qu'elles sont apparues. Elles sont connues sous les noms de bosons **W+, W- et Zo**. Les quarks sont rendus furieux et changent de comportement. Les physiciens imaginent que les quarks peuvent devenir bleus de peur, verts de rage ou rouges de honte. Ce bouillonnement constant provoque en permanence la transmutation de protons en neutrons ou de neutrons en protons. Parfois, excédés par cette animosité incessante, il arrive que des noyaux d'atome s'auto-mutilent, engendrant ainsi le phénomène de la radioactivité, voire même, plus rarement, celui de la fission des atomes.*

Les physiciens pensent que Perturbora et Elektra mettent en commun leur mode d'action pour contrer la surveillance de l'irascible Megakratos. Ils en sont presque certains.

Les physiciens du CERN, curieux jusqu'à l'angoisse de connaître les circonstances de la querelle initiale qui a engendré le Big-bang, essayent de reconstituer les conditions qui régnaient lors de cet événement, dans le but de connaître les relations qui existaient entre ces divinités lorsqu'elles vivaient en bonne harmonie dans l'âge d'or qui a précédé leur querelle.

*Ces même physiciens, qui n'ont pas toujours le sens de la poésie, désignent ces quatre divinités par les expressions : **force gravitationnelle, force électromagnétique, interaction forte** et **interaction faible**. Ces quatre divinités règnent sans partage sur tout l'Univers, de l'infiniment petit à l'infiniment grand.*

Ces forces ont besoin de domestiques : ce sont les bosons.

*Ces dieux et déesses n'exercent pas directement leur pouvoir mais ils délèguent à divers domestiques le soin de transmettre les ordres aux particules qui dépendent d'eux. Les physiciens ont classé ces particules intermédiaires sous le nom général de **bosons**. Ce sont, en quelque sorte, des médiateurs qui interviennent dans toutes manifestations des forces. Malgré toutes les études faites à leur sujet, toutes n'ont pas encore été formellement identifiées.*

*Les **photons** transmettent les ordres d'Elektra pour assurer les interactions électromagnétiques.*

Perturbora dirige son interaction faible, comme nous l'avons déjà vu, par l'intermédiaire de trois serviteurs, désignés par les physiciens sous les noms de bosons W+, W- et Z0. Il sont relativement massifs et leur espérance de vie est extrêmement faible. Le boson Z_0 est neutre, les bosons W+ et W- portent l'un une charge positive, l'autre une charge négative.

*Quant à Megakratos, il a sous ses ordres une brigade de huit sortes de **gluons** qui assurent le confinement des quarks à l'intérieur des neutrons et des protons et retiennent solidement ces derniers dans les noyaux des atomes.*

*On suppose que Gravitor utilise aussi une particule intermédiaire pour faire exécuter ses ordres. On l'a baptisée **graviton**, mais on ne l'a pas encore été formellement identifié.*

Et le boson de Higgs ?

Un des défis majeurs qui empêchent les physiciens de dormir est la question : qu'est-ce qui confère une masse aux particules ?

Ils ont alors imaginé qu'il devait exister des bosons qui rempliraient tout l'espace et s'opposeraient au déplacement des diverses particules. Les particules seraient comme "freinées", ce qui leur conféreraient à chacune une certaine ***inertie*** *que l'on interprète comme étant une* ***masse****. Les diverses particules seraient différemment sensibles à ce boson et auraient donc des masses différentes. C'est ainsi que le* ***photon****, insensible à l'action du boson de Higgs, paraît n'avoir aucune masse, ce qui lui permet de se déplacer à la vitesse de la lumière. Les recherches sont encore en cours !*

L'autopsie du noyau de l'atome

Avant toutes choses, il faut raconter l'histoire passionnante des découvertes successives qui ont permis de lever le voile sur l'anatomie interne des noyaux d'atomes et qui ont conduit à expliquer la radioactivité et fait apparaître la complexité des particules qui participent, de près ou de loin, à l'activité de l'infiniment petit. Le chapitre suivant résume cette histoire.

Une petite histoire de l'atome

(et une moisson de prix Nobel)

Au XIXe siècle, on connaissait déjà bien les éléments chimiques. On avait mesuré leur masse atomique, établi la périodicité de leurs propriétés et construit le tableau périodique cher à Monsieur Mendeleiev. Ces notions étaient largement suffisantes pour ***les chimistes****. Mais on ne savait rien de la structure de l'atome.*

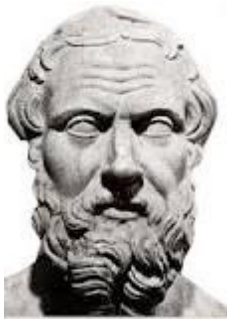
La découverte de la radioactivité et l'analyse des spectres lumineux provoqués par l'excitation des atomes sont des phénomènes qui concernent avant tout ***les physiciens*** *!*

La fin du XIXème siècle et la première moitié du XXème siècle ont vu donc une éclosion de chercheurs qui se sont penchés sur la nature intime de l'atome. Les prix Nobel ont parsemé les parcours de ces savants au fil des découvertes de l'électron, du proton, du noyau atomique, du neutron et des quarks. Parmi ceux-ci, on peut considérer ***Ernest Rutherford*** *comme le père de de la physique nucléaire. Puis,* ***Niels Bohr*** *est arrivé qui a su percevoir la structure de l'atome.*

Il faut donc nous interrompre un instant pour nous pencher sur l'histoire de ces découvertes et rendre hommage aux savants qui ont permis de pénétrer au cœur de l'atome.

L'invention de l'atome

*Au Ve siècle avant Jésus-Christ, le philosophe grec Démocrite, reprend les idées de son maître Leucippe et imagine qu'on ne peut pas diviser la matière indéfiniment et, qu'à la limite, on doit trouver une unité élémentaire insécable et à laquelle il donne le nom d'***atome.** *Il faudra attendre encore près de 2'500 ans pour en savoir plus !*



Démocrite, -460 à -370

Les mystérieux rayons X

En décembre 1895, l'Allemand Wilhelm Rœntgen remarque qu'un écran fluorescent s'illumine au voisinage d'un tube sous vide à l'intérieur duquel il fait passer une décharge électrique. Cette fluorescence existe même lorsque le tube est enfermé dans une boîte en carton noir. Il devine l'existence d'un mystérieux rayonnement, invisible à l'œil, qu'il baptise rayonnement X. Il remarque que de nombreux corps semblent transparents aux rayons X, certains plus que d'autres. A Noël 1895, il obtient la première image du squelette de la main de son épouse. La radiographie était inventée ! Il reçut, en 1901, le premier prix Nobel de physique jamais décerné.

Wilhelm Röntgen 1845-1923

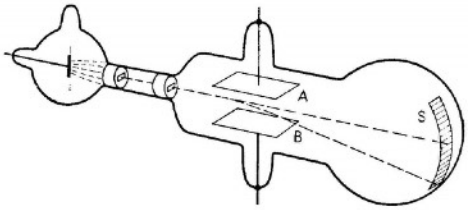
Première radiographie : la main d'Anna Röntgen réalisée le 22 décembre 1895.

Découverte de l'électron

Joseph John Thomson, 1856-1940

En 1897, l'anglais John Thomson découvre l'électron qu'il identifie comme étant un des composants de l'atome.

En étudiant la déviation d'un rayon cathodique par des électrodes chargées, il postule qu'il s'agit d'un flux de particules négatives beaucoup plus légères que l'atome d'hydrogène.

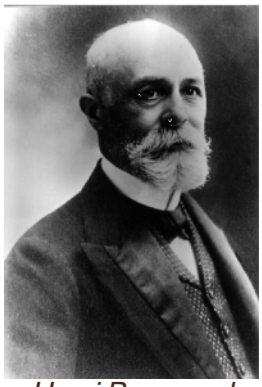


Il conclut que ces particules font parties intégrantes de la matière et sont donc un des constituants de l'atome. Il découvre ainsi ***l'électron*** *et en mesure la masse.*

Plus tard, en 1912, en étudiant la déviation d'un courant anionique de néon par un champs magnétique, il découvrira l'existence des ***isotopes****, ^{20}Ne et ^{22}Ne. Il venait ainsi de mettre au point le spectrographe de masse. Il reçut le prix Nobel de physique en 1906.*

Les rayons uraniques

La découverte de la radioactivité, le premier mars 1896, est due un peu au hasard et à l'intuition d'Henri Becquerel un physicien français. Il étudiait la phosphorescence de diverses substances pour savoir s'il y avait une relation entre la lumière émise par phosphorescence et les rayons X découverts quelques mois plus tôt par le physicien allemand Wilhelm Röntgen.



Henri Becquerel (1852-1908)

Il avait laissé dans un même tiroir des plaques photographiques soigneusement emballées dans du papier opaque noir et des préparations de sels d'uranium. Le lendemain son intuition l'avait poussé à développer une plaque photographique et il a eu alors la surprise de

constater qu'elle avait été impressionnée par un rayonnement invisible qui provenait vraisemblablement des sels d'uranium.

Immédiatement il reprit ses expériences et il pu confirmer alors que l'uranium émettait en permanence un rayonnement invisible qui impressionnait les émulsions photographique. Il venait de découvrir ce que nous appelons aujourd'hui la radioactivité. Becquerel baptisa ce rayonnement "rayons uraniques". En 1903, il partagea le prix Nobel de physique avec Pierre et Marie Curie.

Baptême de la radioactivité

Marie et Pierre Curie

*Cette même année, Marie Sklodowska, épouse de Pierre Curie, entreprend l'étude du rayonnement produit par l'uranium et qu'on appelle encore "**rayons uraniques**". Elle découvre que la pechblende, un minerai d'uranium, présente une activité beaucoup plus intense que celle de l'uranium. Avec son mari Pierre Curie, elle découvre le Polonium, élément 400 fois plus actif que l'uranium, puis le Radium, 900 fois plus actif. Ils donnent le nom de radioactivité à la propriété d'un corps d'émettre des rayonnements analogues à ceux de l'uranium. Ils partagèrent le prix Nobel de physique avec Henri Becquerel en 1903 et Marie Curie reçut, plus tard, le prix Nobel de chimie en 1911.*

James Chadwick (1891-1974)

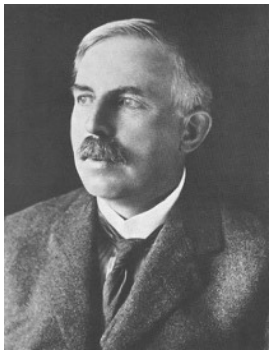
La radioactivité induite

*Irène Curie, la fille de Marie, découvre, en 1934, avec son mari Frédéric Joliot, la radioactivité induite. Ils démontrèrent qu'en bombardant des éléments légers avec des rayons α, cela pouvait entrainer la radioactivité de ces éléments qui montraient ensuite une activité, même après l'arrêt de la source α. Frédéric Joliot fut le premier à entrevoir la possibilité d'une bombe atomique grâce à ses travaux sur la "**masse critique**".*

Irène et Frédéric Joliot-Curie

Nature de la radioactivité

L'année suivante, pendant que les Curie remuaient des tonnes de pechblende pour en extraire une fraction de gramme de radium, un chercheur anglais, Ernest Rutherford, s'employait à déterminer la nature du rayonnement radioactif. En soumettant ce rayonnement à des champs magnétiques, il fut conduit à distinguer trois sortes d'émissions :



Ernest Rutherford, 1871-1937,

- ***les rayons alpha**, constitués de particules chargées positivement et relativement massives,*
- ***les rayons bêta**, constitués d'électrons,*
- ***les rayons gamma**, non porteurs de charges, et de nature semblable à celle des rayons X.*

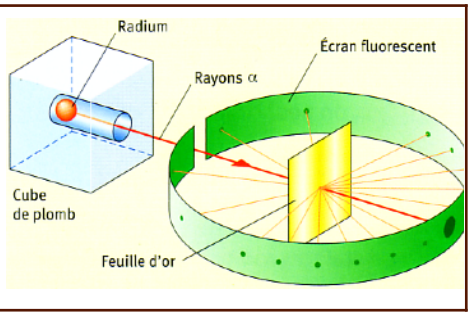
*C'est lui aussi qui montrera plus tard, en 1909, que le rayonnement alpha est constitué de noyaux d'hélium, soit 2 protons et 2 neutrons. Il montre encore que ces rayonnements accompagnent la transformation de certains éléments en d'autres éléments différents. Il met ainsi en évidence la **transmutation des atomes.***

L'atome semble constitué de vide

Plus tard encore, en 1911, ce même Rutherford, par une expérience célèbre, découvre que presque toute la masse de l'atome et concentrée dans un noyau cent-mille fois plus petit que l'atome lui-même.

L'expérience de Rutheford

Une source de radium émet des particules α, des ions d'hélium, qui sont focalisées sur une feuille d'or extrêmement fine (0.6.µm). La grande majorité des ions traversent la feuille d'or sans être déviés. Quelques très rares ions sont déviés, voire même renvoyés vers l'arrière.



Rutheford arrive à la conclusion que l'atome est essentiellement constitué de vide et que la masse de l'atome est entièrement concentrée dans un noyau cent-mille fois plus petit que l'atome lui-même et que ce noyau est chargé positivement. Il imagine un noyau positif autour duquel gravitent des électrons négatifs.

Le proton identifié comme constituant de l'atome

Dès la fin du 19e siècle, on imagine que les noyaux des atomes pourraient être constitués de particules semblables à des atomes d'hydrogène. Cette hypothèse était suggérée par le fait que les masses des atomes sont approximativement des multiples entiers de la masse de l'atome d'hydrogène.

C'est en 1919, que Rutherford, toujours lui, démontre que le noyau des atomes est constitué de particules chargées positivement qu'il baptise protons. Le noyau de l'hydrogène est constitué d'un seul proton.

Découverte du neutron

Dès 1920, Rutherford avait aussi émis l'hypothèse de l'existence d'un atome neutre de masse un qui ne serait pas de l'hydrogène. Plusieurs chercheurs (Bothe et Becker en 1927, Frédéric et Irène Joliot-Curie en 1932) avaient imaginé bombarder divers éléments légers au moyen de particule α. En bombardant une cible de béryllium ils observèrent la production d'un rayonnement extrêmement puissant qu'ils assimilèrent à un rayonnement ϒ selon le schéma suivant :

$^{4}He + {}^{9}Be \Rightarrow {}^{13}C^{*} + \gamma$, ce qui se lit :

particule α + béryllium ⇨ carbone excité + rayon γ

Mais ils n'ont pas réussi à expliquer l'énergie excessive du rayonnement γ produit. C'est alors que James Chadwick, un assistant de Rutherford, se souvint de l'hypothèse de son patron et reprit les expériences précédentes mais avec des détecteurs beaucoup plus sensibles. Il mit en évidence que la réaction correspondait en réalité au schéma suivant :

$$^{4}He + {}^{9}Be \Rightarrow {}^{12}C^{*} + n \quad \text{suivi de :} \quad \Rightarrow {}^{12}C + \gamma,$$

ce qui se lit :

particule α + béryllium ⇨ carbone excité + neutron ⇨ carbone + γ

Chadwick avait donc identifié en 1932 cette particule mystérieuse qu'était le neutron. Il reçut le prix Nobel en 1935 pour cette découverte.

Tous les composants de l'atome étaient alors découverts. Il ne restait plus qu'à en imaginer le modèle !

Approche de l'architecture de l'atome

En 1904 déjà, Thomson avait proposé un modèle d'atome où les électrons baignaient dans une sorte de "soupe positive" dont la nature n'était pas précisée. C'est le modèle dit du pudding !

Après avoir démontré que toute la masse de l'atome était concentrée dans un noyau minuscule, Rutherford imagina, en 1911, un modèle dit planétaire avec un noyau chargé positivement et renfermant la plus grande part de la masse de l'atome, séparé par du vide, des électrons qui tournent autour de ce noyau comme les planètes autour du Soleil. Les neutrons, qui n'avaient pas encore été découverts, n'étaient évidemment pas pris en considération.

Niels Bohr s'en mêle

En 1913, le physicien danois Niels Bohr perfectionne le modèle de Rutherford en y introduisant la notion de **quantum d'énergie**. *Il parvient à expliquer les fréquences des raies lumineuses émises par l'hydrogène. Il montre que les électrons émettent ou absorbent l'énergie d'une manière parfaitement quantifiée en sautant d'une orbite à une autre. Les orbites correspondent à des niveaux d'énergie. Un électron peut passer d'un niveau d'énergie à un autre en émettant ou en absorbant un quantum d'énergie sous forme de photon. Ce modèle est connu sous le nom* **d'atome de Bohr**. *Il reçut le prix Nobel de physique en 1922 pour sa contribution à la compréhension de l'atome.*

Niels Bohr (1885-1962)

Mais cela n'explique pas tout

Ce modèle de l'atome satisfait parfaitement les chimistes. Il permet d'expliquer les propriétés de chaque famille d'atomes, la façons dont ils peuvent s'unir pour constituer des corps composés ainsi que toutes les réactions mutuelles les uns avec les autres.

Mais cela n'explique pas les phénomènes de la radioactivité et de la fission nucléaire. Les causes sont plus profondes et semblent provenir du noyau même de l'atome, de la nature des protons et des neutrons.

Par ailleurs, on n'avait pas d'explication satisfaisante pour comprendre la cohésion du noyau dont les protons auraient dû normalement "exploser" sous l'effet de la force électrostatique répulsive qui existe entre les particules de même charge.

Suspicions de l'existence d'une force nouvelle

Hideki Yukawa, 1907-1961,

C'est en 1935 qu'un chercheur japonais, Hideki Yukawa, imagina qu'il existait une force nucléaire puissante qui devait lier les protons et les neutrons. Mais la théorie de Yukawa était incomplète et ne donnait pas de résultats vraiment satisfaisants.

*Il reçut le prix Nobel de physique en 1949 pour sa prédiction de l'existence des **mésons** à partir de travaux théoriques sur les forces nucléaires. Il fut le premier Japonais à recevoir un prix Nobel. Mentionnons aussi le Suisse Ernst Stuekelberg qui, indépendamment de Hideki Yukawa, avait prédit la même année le mécanisme de l'interaction forte.*

Puis les quarks sont apparus

*Ce n'est qu'en 1964 que deux chercheurs américains Murray Gell-Mann et George Zweig émirent l'hypothèse, indépendamment l'un de l'autre, que les neutrons et les protons n'étaient pas des particules élémentaires mais qu'ils étaient composés de particules plus petites encore, les quarks. Ils postulèrent qu'il devait y avoir plusieurs sortes de quarks. Ainsi, ceux qui constituent les neutrons et les protons sont le **quark up** et le **quark down**.*

Murray Gell-Mann

George Zweig

Découverte de la fission nucléaire

Otto Hahn (1879-1968)

*En décembre 1938, le chimiste allemand Otto Hahn, et ses collaborateurs Fritz Strassman et Lise Meitner font part de leur découverte de la fission induite de l'Uranium 235. Ils pensent que l'absorption d'un neutron par un noyau d'uranium provoque parfois la scission de cet atome en deux autres atomes plus légers et approximativement de même masse. Ils constatent que cette réaction dégage une énergie colossale. Ils baptisèrent ce phénomène : **fission nucléaire.** Pour cette découverte, Otto Hahn reçut le prix Nobel de chimie en 1944.*

La fission spontanée de l'Uranium 238

*En 1940, deux chercheurs soviétiques, G.N. Flerov et K.A. Petrzak, qui travaillaient sur les noyaux de l'Uranium 238, mettent en évidence la **fission spontanée** de cet isotope de l'uranium.*

Exploitation de l'énergie nucléaire

*Le physicien italien Enrico Fermi est un des acteurs majeurs de l'exploitation de l'énergie nucléaire. Grâce à ses travaux sur la fission des atomes lourds au moyen de neutrons lents, il découvre le potentiel énergétique de la fission nucléaire. Le 2 décembre 1942, il met en marche, à Chicago, le premier réacteur nucléaire qui est encore appelé "**pile atomique**". Il travaille ensuite au projet "Manhattan" qui élaborera la première bombe atomique. Il reçut le prix Nobel de physique en 1938.*

Enrico Fermi (1901-1954)

Puis les rayons cosmiques se sont manifestés

Intrigués par la décharge continue des électroscopes attribuée à des radiations ionisantes de l'environnement, les chercheurs ont tout d'abord imaginé que c'étaient des émanations radioactives provenant de la Terre elle-même qui était la source ionisante. Mais des expériences ont montré que la décharge était beaucoup plus rapide en altitude. C'est Victor Hess, en 1912, à la suite d'expériences faites à bord de ballons, qui montre que ces rayonnements ionisant viennent de l'espace.

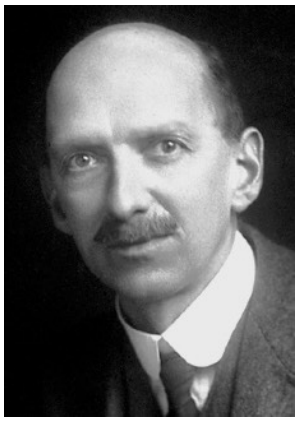
*C'est ainsi qu'on a constaté que la Terre subissait le bombardement de particules extrêmement énergétiques provenant de l'espace intergalactique, d'où leur nom de **rayons cosmiques.***

Victor Franz Hess (1883-1964)

Charles Wilson permet de visualiser les particules

Le physicien écossais Charles Thomson s'intéressait aux nuages. En essayant de recréer les conditions de formation des nuages dans une enceinte fermée, il découvre que le brouillard permet, sous certaines conditions, de visualiser le trajet des particules ionisantes.

*Il transforme son enceinte en un véritable détecteur de particule et présente, en 1912, sa "**chambre à brouillard**". C'est le premier détecteur que permet de visualiser les trajets des particules. Il reçoit le prix Nobel le physique en 1927 pour cette invention.*



Charles Wilson, (1869-1959)

De nouvelles particules étranges

Carl David Anderson
(1905-1991)

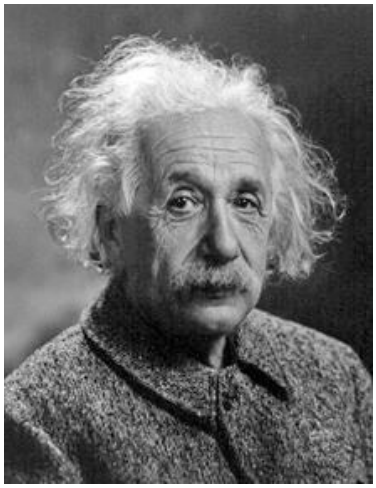
En 1932, Carl Anderson, un physicien suédois immigré aux U.S.A., s'intéresse aux rayons cosmiques. Sur des photographies prises dans une chambre à brouillard, il découvre une particule qui se comporte comme un électron mais de charge positive. Il vient de découvrir le ***positron****, un anti-électron. Cela confirme l'existence de* **l'antimatière** *comme l'avait prédit en 1931 Paul Dirac, un mathématicien, lui aussi prix Nobel de physique en 1933.*

En 1936, il découvre encore une nouvelle particule très étrange qui se comporte comme un électron mais qui est 207 fois plus massif que ce dernier. Il vient de découvrir le ***muon****. On parlera plus loin de cette particule.*

Et le rôle d'Einstein dans tout cela ?

On connait Einstein surtout à travers sa formule révolutionnaire :

$$e = m \times c^2$$



Albert Einstein,
1879-1955

Mais c'est en se penchant sur le problème de l'effet photoélectrique qu'il démontre, en 1905, la nature corpusculaire de la lumière. Cela a été un pas très important dans la reconnaissance du photon, cette particule sans masse, vecteur de la force électromagnétique. Einstein avait baptisé ce "grain de lumière" quanta de lumière. C'est plus tardivement qu'il a été baptisé photon. Il postule que le photon est associé à une longueur d'onde. La même année, il publia encore un article célèbre sur le mouvement brownien. C'est pour ces travaux qu'il reçut le prix Nobel de physique en 1921.

Toujours en 1905, il publie un article intitulé "Sur l'électrodynamique des corps en mouvement". Intrigué par la constatation que la vitesse de la lumière était identique pour tous les observateurs, peu importe la vitesse à laquelle ils se déplaçaient, il postule que l'éther, tel que l'imaginait Newton, n'existe pas, et que le temps et l'espace sont relatifs.

Les conséquences de cette nouvelle vision de la physique dépassaient largement l'entendement des physiciens de l'époque. Elle prédisait :

- *que l'écoulement du temps dépendait de la vitesse de l'observateur,*
- *que la masse des objets augmentait avec la vitesse,*
- *que les objets se dilataient avec la vitesse, dans la direction de la vitesse,*
- *que la masse est une forme d'énergie qui est proportionnelle à cette masse multipliée par le carré de la vitesse de la lumière.*

Par la suite, de nombreuses expériences ont toutes confirmé l'exactitude de cette théorie.

Toutefois, les effets de sa théorie ne sont perceptibles qu'aux très grandes vitesses, lorsqu'on se rapproche de la vitesse de la lumière. Au CERN, lorsqu'on accélère des particules à des vitesses qui peuvent atteindre 99,99999 % de la vitesse de la lumière, on constate que la masse de ces particules augmente de plusieurs milliers de fois la masse qu'elles avaient au repos.

L'avénement du CERN

En 1949, Louis de Broglie, lui aussi un prix Nobel pour sa découverte de la nature ondulatoire de l'électron, lance l'idée de créer un laboratoire scientifique européen. En 1952, onze gouvernements européens décident d'unir leurs forces et de créer un Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (CERN).

Il est décidé que ce centre serait implanté à Genève, près de la frontière française. En 1957, on met en service le premier accélérateur, le synchrocyclotron. Chaque étape du développement du CERN voit le jour d'un accélérateur plus puissant jusqu'à la mise en service récemment du LHC (Large Hadron Collider) un collisionneur de protons de 27 kilomètres de circonférence.

Louis de Broglie, 1892-1987

Le CERN emploie aujourd'hui un peu moins de 2'500 personnes à plein temps. C'est le plus grand centre de recherches en physique des hautes énergies du monde. En outre, il accueille environ 6 500 scientifiques (représentant 500 universités et plus de 80 nations, soit près de la moitié de la communauté mondiale dans ce domaine) qui se succèdent pour effectuer leurs expériences au CERN. De nombreuses découvertes dans le domaine des particules ont émaillé le parcours de tous les savants qui participent à cette grande aventure.

Des prix Nobel pour des travaux effectués au CERN.

Georges Charpak (1924-2010)

Georges Charpak, un chercheur français d'origine polonaise, ancien élève de Frédéric Joliot-Curie, reçoit le prix Nobel de physique en 1992 pour l'invention et le développement des détecteurs de particules élémentaires, notamment de la chambre proportionnelle multifils.

Carlo Rubbia, 1934

Carlo Rubia est un physicien italien qui a été directeur général du CERN entre 1989 et 1993. En 1976, il avait proposé de modifier le super synchroton à protons (SPS) pour provoquer des collisions entre des protons et des antiprotons dans le même anneau. Ce nouveau dispositif a permis la découvertes des bosons W et Z, les vecteurs de l'interaction faible. L'année suivante, en 1984, Carlo Rubbia et Simon van der Meer partagèrent le prix Nobel de physique pour cette découverte.

Simon van der Meer

Simon van der Meer, un physicien hollandais, a pris une part importante dans la découverte des bosons W et Z en apportant des perfectionnements essentiels au super synchroton. Son esprit inventif a beaucoup contribué au développement et au perfectionnement des accélérateurs de particules.

Récemment, en 2013, le Belge François Englert et le Britannique Peter Higgs reçoivent le prix Nobel de physique pour leur travaux théoriques qui les avaient conduits, en 1964, à la prédiction d'un boson encore inconnu et qui serait responsable de conférer leur masse aux diverses particules.

C'est grâce à la puissance du LHC, nouvellement mis en route au CERN, qu'il a été possible de confirmer, en juillet 2012, l'existence de ce boson.

Les Lauréats du prix Nobel de physique François Englert (à gauche) et Peter Higgs, le 4 juillet 2012 au CERN. Robert Brout, co-auteur de leurs travaux est malheureusement décédé avant d'avoir pu partager cette récompense.

Il y a encore beaucoup d'autres physiciens !

Beaucoup d'autres physiciens ont aussi contribué à l'avancement de la connaissance du noyau de l'atome. Parmi eux, mentionnons Luis Alvarez (1911-1988), un physicien américain qui dont les recherches sur la physique nucléaire et sur les rayons cosmiques lui ont valu l'attribution du prix Nobel de physique en 1981. Il a été responsable du développement et de la construction de l'accélérateur linéaire de protons de Berkeley. Il participa aussi à la mise au point des détonateurs des bombes atomiques et à la conception des chambres à bulles utilisant de l'hydrogène.

Luis Alvarez (1911-1988),

Richard Feynman (1918-1988),

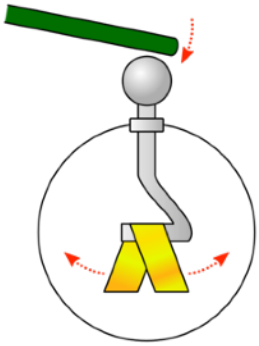
Richard Feynman a été un physicien très influent dans la recherche théorique de la physique quantique. Pendant la guerre, il a travaillé pour le projet Manhattan. Ses travaux sur l'électrodynamique quantique relativiste lui ont valu de partager le prix Nobel de physique en 1965 avec le théoricien japonais Sin-Itiro Tomonaga et le physicien américain Julian Schwinger.
On lui doit les "diagrammes de Feynman" un outil graphique qui permet de mieux comprendre les interactions entre particules élémentaires.

De nombreux autres physiciens ont contribué aussi à l'avancement de la connaissance du noyau de l'atome et des particules élémentaires. Tous n'ont pas été honorés par l'attribution d'un prix Nobel. Il n'a pas été possible ici de le citer tous !

Les mystérieux rayons cosmiques

Lors d'un orage, les masses nuageuses à l'intérieur des cumulus sont animées de mouvements violents et emmagasinent des charges électriques statiques en grande quantité. Ces masses nuageuses sont chargées positivement vers le haut et négativement vers le bas. La différence de potentiel entre le haut et le bas des nuages peut atteindre plusieurs dizaines de millions de volts. Ces nuages se comportent comme de gigantesques condensateurs. Lorsque la tension dépasse un certain seuil, une décharge électrique se manifeste : c'est l'éclair.

L'électromètre



Déjà au XVIIIe siècle on détectait la charge électrique de l'air au moyen d'électroscope (ou électromètre). Il s'agissait de deux feuilles très légères, conductrices de l'électricité, reliées à une électrode ou une antenne qui captait les charges électriques ambiantes. Les deux feuilles s'écartent l'une de l'autre sous l'effet de la répulsion des charges électriques de même signe.

Les scientifiques ont remarqué qu'un électromètre chargé puis isolé de sa source électrostatique se déchargeait lentement. Ils ont pensé que le rayonnement radioactif naturel provenant de la Terre ionisait l'air, le rendant légèrement conducteur de l'électricité et causait alors la lente décharge de l'électromètre.

On monte en ballon

En 1912, Victor Hess teste un électromètre à bord d'un ballon. Il constate que l'électromètre se décharge beaucoup plus rapidement en altitude et il postule que les particules ionisantes qui déchargent l'appareil proviennent de l'espace intersidéral. Toutes les expériences suivantes confirment cette constatation et bientôt on ne parle plus que de **rayons cosmiques**.

La tête dans les nuages

En 1912, Charles Wilson ne s'intéressait qu'aux nuages. Aussi a-t-il voulu reconstituer, dans une enceinte fermée, les conditions de formation des nuages. Cette enceinte renfermait de la vapeur d'eau à la limite de la condensation. Par instant, un piston fait diminuer la pression dans l'enceinte, ce qui provoque la formation d'une myriade de gouttelettes d'eau, simulant ainsi la formation d'un nuage. Il découvre alors des alignements de minuscules gouttes qui forment des traces rectilignes. En superposant à son enceinte un champ magnétique il voit que certaines trajectoires se recourbent. Il vient de visualiser le passage de particules ionisantes provenant de l'espace.

*Il vient d'inventer la "**chambre à brouillard**", le premier détecteur de particules. Il devient alors possible de calculer la charge et l'énergie de ces particules. Il faut se rendre à l'évidence : les rayons cosmiques ne consistent pas en un rayonnement électromagnétique, mais ce sont des particules très énergétiques qui proviennent de l'espace !*

Traces laissées par des particules dans une chambre à brouillard

De nouvelles particules

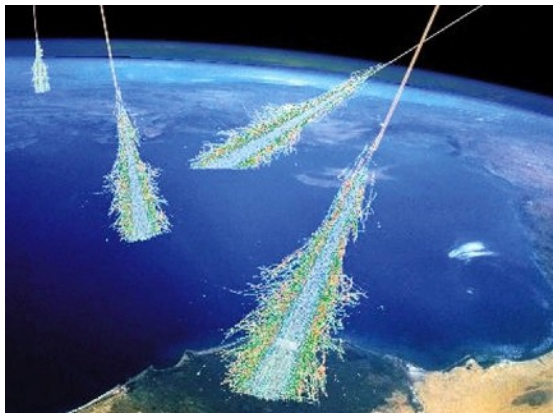
*En 1932, un américain d'origine suédoise, Carl Anderson, découvre dans une chambre à brouillard une particule identique à un électron, mais chargée positivement. Il vient de mettre en évidence le **positron**, un **anti-électron**, confirmant ainsi l'existence de l'antimatière, telle que l'avait prédite Paul Dirac, un mathématicien britannique.*

*En 1936, Anderson reprend ses expérience à plus de 4000 mètres d'altitude. Il découvre à nouveau une particule étrange, une sorte d'électron mais 200 fois plus lourd. Il vient de découvrir le **muon**, une particule éphémère qui a pris naissance au cours de phénomènes qui se déroulent à la limite de l'atmosphère.*

*L'utilisation d'émulsions photographiques pour étudier la trace des particules permet la découverte d'autres particules. C'est ainsi qu'on identifie le **pion**, en 1947 et le **kaon**, cet électron super-lourd.*

Une grande cascade

Le Français Pierre Auger s'intéresse à l'étude des rayons cosmiques. Les diverses expériences qu'il mène en altitude, en particulier au Jungfraujoch dans les Alpes bernoises, montrent que les rayons cosmiques qu'on enregistre ne sont que les fragments résultant de la collision de particules extraordinairement énergétiques provenant de l'espace intergalactique avec la haute atmosphère. Ces collisions engendrent d'immenses cascades de particules secondaires qui arrosent notre planète. Ce sont ces particules secondaires qu'on visualise dans les chambres à brouillard. Ce sont essentiellement des muons, des électrons et des positrons.



Vue artistique de rayons cosmiques provoquant des gerbes de particules secondaires (Illustration NASA).

Origine des rayons cosmiques

Les études montrent que les particules provenant de l'espace intersidéral sont constituées d'environ 85 % de protons, de 14% de noyaux d'hélium (particules alpha) et de 1% d'électrons, pour la partie chargée. La partie neutre consiste en des rayons gamma et des neutrinos. Leur énergie moyenne est d'environ 1 GeV. Mais certaines atteignent jusqu'à 10^{11} GeV, ce qui est gigantesque et dépasse même les énergies que peuvent conférer aux particules les meilleurs accélérateurs de nos physiciens.

C'est comme si ces particules avaient été éjectées dans l'espace par un gigantesque accélérateur et venaient heurter les molécules de la haute atmosphère de la Terre. L'accélération des particules se produit apparemment au sein d'une supernova qui résulte elle-même de l'explosion d'une étoile massive. Les supernovae semblent être ces super accélérateurs. C'est ensuite les noyaux d'azote et d'oxygène de la haute atmosphère terrestre qui constituent les cibles et jouent ainsi le rôle de détecteur.

Au CERN, on ne fait qu'imiter ce que produisent les rayons cosmique sur la haute atmosphère. Mais on le fait d'une manière parfaitement organisée et maitrisée ! On accélère des particules afin de leur conférer la plus grande énergie possible et on les précipite sur d'autres particules. On étudie ensuite les débris engendrés par ces collisions dans des détecteurs très perfectionnés, puis on essaye de reconstituer ces débris afin de comprendre le fonctionnement intime du cœur des atomes.

Dans l'espace intergalactique, il existe donc des zones qui fonctionnent comme de gigantesques accélérateurs de particules. Quelques unes de ces dernières croisent notre planète et provoquent des réactions semblables à celles qui se passent au cours des collisions organisées au CERN. Les expériences réalisées au CERN imitent donc ce qui se passe dans notre environnement, mais d'une manière beaucoup plus contrôlée.

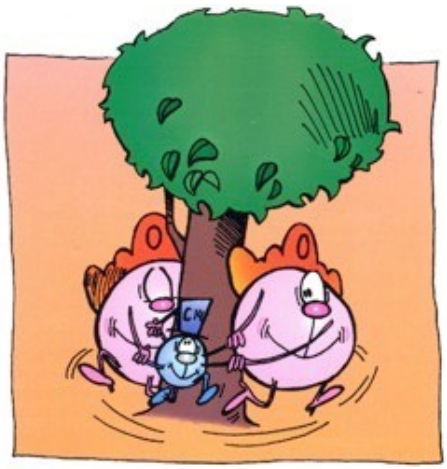
Le carbone 14 doit son existence aux rayons cosmiques

Tout le monde a entendu parler du père Carbone 14 (^{14}C). A vrai dire, c'est un requérant d'asile dans la famille Carbone. Au lieu d'être constitué de 6 protons et de 6 neutrons comme tous les membres de la famille ^{12}C, il comporte 2 neutrons supplémentaires qui portent son poids à 14 grons au lieu des 12 habituels. Il apparaît dans la haute atmosphère, région où les rayons cosmiques sont abondants. Ceux-ci sont générateurs de neutrons et, de temps à autre, un de ceux-ci vient frapper le noyau d'un des frères Azote, expulse un proton et prend sa place. Du coup le pauvre Azote se transmute, sans changer de poids, en un atome de Carbone (l'isotope ^{14}C).

Le Carbone 14 provient de la transmutation d'un atome d'Azote qui a absorbé par mégarde un neutron errant provenant de l'espace.

Mais c'est un pauvre ^{14}C malade, atteint par la décroissance radioactive avec une période de rémission (demi-vie) de 5'600 ans.

Dans la haute atmosphère où il a été créé, ce nouveau carbone épouse immédiatement deux sœurs Oxygène pour former la molécule CO_2. Démographiquement, dans l'atmosphère, le nombre des frères ^{14}C qui disparaissent, emportés par la maladie, est compensé par les nouveaux venus issus de la transmutation des frères Azote. La proportion de ^{14}C dans l'atmosphère demeure donc constante. Les végétaux absorbent du CO_2 durant toute leur vie, et la même proportion de $^{14}C/^{12}C$ qui existe dans l'atmosphère se retrouve aussi dans le bois.



Monsieur Carbone épouse deux sœurs Oxygène et prend le patronyme CO_2

Mais après l'abattage d'un arbre, l'échange de CO_2 avec l'air ambiant est interrompu. Le système se referme et, à l'intérieur du bois mort, les frères ^{14}C disparaissent petit à petit sans être remplacés par d'autres. Ainsi, un morceau de bois provenant de la tombe d'un Pharaon renferme beaucoup moins de ^{14}C qu'un bois fraîchement abattu. Comme la demi-vie de l'isotope 14 du carbone est de 5'600 ans, ce type d'horloge est particulièrement bien adapté pour les archéologues et leur permet de mesurer des âges compris entre quelques siècles et 20'000 ans environ.

Le carbone 14 rend de grands services aux archéologues

La foudre et les rayons cosmiques

Certains physiciens pensent que le déclenchement des décharges orageuses (les éclairs) au cours des orages serait favorisé par les particules ionisantes issues des collisions entre les rayons cosmiques et la haute atmosphère. En traversant les cumulus ils favoriseraient la conductibilité électrique entre masses nuageuses chargées d'électricité.

Les rayons cosmiques nous bombardent de particules

Les gerbes de particules, qui sont provoquées par l'impact des rayons cosmiques sur les cibles de la haute atmosphère, arrosent notre planète de particules secondaires. Au niveau du sol, des milliers d'entre elles traversent notre corps à chaque instant sans que cela ne nous affecte vraiment. Ce sont surtout les muons qui nous parviennent. Comme ils sont très énergétiques, ils peuvent perturber les expériences des physiciens. Pour s'en prémunir, certains laboratoires ont été installés dans des tunnels profonds ou à l'intérieur d'anciennes mines.

Au CERN, on casse tout

De même qu'il faut casser une tire-lire pour voir ce qu'il y a à l'intérieur, de même il faut des marteaux particulièrement puissants pour casser un noyau d'atome. La seule méthode possible est de lancer des atomes l'un contre l'autre avec une grande énergie. L'énergie nécessaire doit être supérieure à l'énergie de liaison qui maintient ensembles les particules qui constituent les noyaux des atomes. Le procédé consiste donc à accélérer les atomes et les amener à une vitesse la plus proche possible de celle de la lumière et les diriger sur des cibles que sont d'autres atomes.

Les accélérateurs permettent de briser la matière

Les accélérateurs sont les "super marteaux" des physiciens. Ils permettent d'organiser des collisions qui apportent aux particules l'énergie nécessaire pour les libérer du noyau des atomes.

Chaque étape du développement du CERN correspond à la mise en fonction d'un accélérateur plus puissant que le précédent. Dans l'ordre, on a mis en service successivement :

- *En 1957, le Synchro-Cyclotron à protons qui développait une énergie de 600 millions d'électronvolts,*
- *En 1960, le Synchroton à proton, développe une énergie de 26 GeV,*
- *En 1971, le Super Synchroton à protons est construit dans un anneau souterrain de 7 km de circonférence, dont l'énergie peut atteindre 450 GeV,*
- *En 1981, le LEP (Large Electron Positron collider) dans un anneau de 27 km, qui développait une énergie de 209 GeV TeV,*
- *En 2008, le LHC (Large Hadron collider) a remplacé le LEP. Il a été est mis en service en 2008. Il développe une énergie de 13 TeV.*

L'électron-volt l'unité d'énergie des physiciens

L'électron-volt [eV] est une unité d'énergie utilisée qui est égale à l'énergie acquise par un électron accéléré par une différence de potentiel de un volt. C'est une unité d'énergie très petite. Aussi utilise-t-on les multiples suivants :

- *1 kilo-électron volt [keV] = 10^3 eV (mille eV)*
- *1 Méga-électron volt [MeV] = 10^6 eV (un million eV)*
- *1 Giga-électron volt [GeV] = 10^9 eV (un milliard eV)*
- *1 Téra-électron volt [TeV] = 10^{12} eV (1000 milliards eV)*

Le Synchrocyclotron

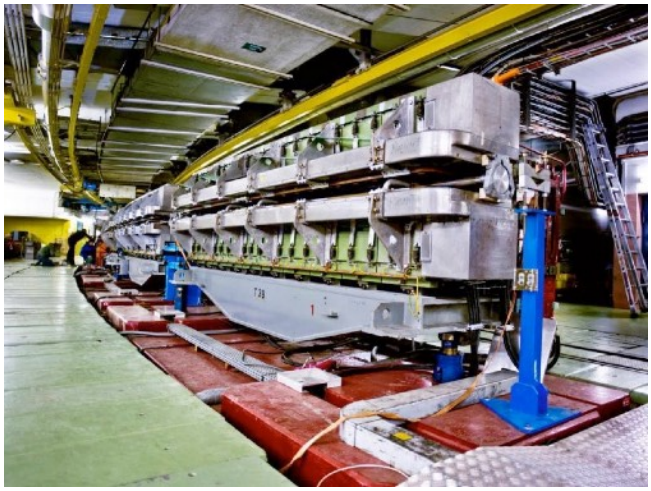
Le synchrocyclotron a été le premier accélérateur du CERN. Il a démarré en 1958 et a fonctionné jusqu'en 1990. Il avait un électro aimant dont les pôles mesuraient 5 mètres de diamètre ; 2500 tonnes d'acier composaient le circuit magnétique, excité par 2 bobines de 60 tonnes de cuivre chacune, qui consommaient 750 kW de puissance électrique. Rayon de l'orbite en fin d'accélération : 227 cm. L'énergie du faisceau de protons pouvait atteindre 600 MeV.

Le synchrocyclotron, un des premiers outils du CERN, va rejoindre le hall d'exposition

Le Synchrotron à proton (PS)

D'un diamètre de 200 mètres, il a une puissance de 26 GeV et sert à accélérer des protons. Au delà de sa fonction d'accélérateur de protons, il a accéléré aussi des antiprotons, des particules alpha, des noyaux d'oxygène, de soufre, des électrons et des positrons.

Mis en service en 1959, il est toujours en fonction aujourd'hui et sert de premier accélérateur et d'injecteur de protons pour les accélérateurs de nouvelles générations.



Le synchrotron à protons du CERN, un accélérateur de 629 m. de circonférence

Le Super synchrotron à protons (SPS)

Mis en service en 1976, c'est un accélérateur de 7 km de circonférence. Il développe une énergie de 450 GeV et accélère des protons et des ions de plomb. Il a été pendant longtemps un des plus puissants accélérateurs jamais construits. Il a permis de connaître la structure interne des protons et il a créé des conditions très proches des premiers instants de l'Univers.

Grâce à Carlo Rubbia et Simon van der Meer, il a été transformé en collisionneur de protons et d'antiprotons en 1981. Cette modification a permis la découverte des bosons W et Z. Aujourd'hui, il reçoit les particules accélérées du synchrotron à proton et les accélère encore pour alimenter le LHC.

Le super synchrotron à protons un accélérateur de 7 km de circonférence

Large Electron positron collider (LEP)

C'est le plus puissant collisionneur de leptons jamais construit. Il a été mis en service en 1989. Avec ses 27 km de circonférence, il accélérait des électrons dans un sens et des positrons en sens inverse. L'énergie colossale libérée lors des collisions a permis de mesurer la masse des bosons W^+, W^- et Z^0 de l'interaction faible.

Le LEP, dans un tunnel de 27 km de circonférence.

Large Hadron Collider (LHC)

Succédant au LEP, cet accélérateur est encore plus puissant. Contrairement à son prédécesseur, il accélère des protons ou des ions d'éléments lourds. Ils sont accélérés jusqu'à une énergie de 6.5 TeV, ce qui porte à 13 TeV l'énergie totale développée lors de collisions avec des antiparticules circulant en sens inverses. Il a été mis en service en septembre 2008.

Le LHD a succédé au LEP i dans ce même tunnel.

Récemment, le LHC a permis de confirmer l'existence du Boson de Higgs. Grâce à cet accélérateur, les physiciens espèrent découvrir la nature de la "matière noire" qui constituerait une grande partie de la masse de l'univers. Ils voudraient vérifier si on peut séparer les quarks et étudier un nouvel état de la matière, le plasma quark-gluon.

Le décélerateur d'antiprotons

L'idée géniale d'accélérer des particules dans un sens et d'antiparticules dans l'autre sens nécessite la production d'antiparticules. La production d'antiprotons se fait en projetant sur une cible métallique des protons de haute énergie provenant du synchrotron à protons. Le choc dégage une énergie suffisante pour créer (rarement mais sûrement) des paires protons-antiprotons. Les antiprotons se déplacent à des vitesses proches de celle de la lumière. On les décélère pour

Le décélérateur d'antiprotons du CERN

les étudier. Il faut les ralentir pour qu'ils puissent ensuite être injectés dans le LEP. Cette opération est réalisée dans le décélèrateur d'antiprotons.

Les détecteurs traquent les particules

La chambre à brouillard de Charles Wilson

Primitivement conçue pour étudier les conditions de formation des nuages, Charles Wilson découvre, en 1908, que des traces rectilignes de fines gouttelettes apparaissent dans l'enceinte qu'il a construite. Il pense tout de suite qu'il s'agit de gouttelettes de condensation qui suivent le cheminement de particules ionisantes.

Il présente alors sa chambre à brouillard comme détecteur de particules. Il s'agit d'une enceinte saturée d'humidité. Périodiquement, un piston fait diminuer la pression à l'intérieur de la chambre, provoquant une sursaturation momentanée. C'est à ce moment qu'apparaissent les traces des particules ionisantes. Un champs magnétique dévie certaines particules met en évidence leur charge électrique. Les trajets des particules sont enregistrés sur des émulsions photographiques. C'est grâce à cette chambre à brouillard qu'on a identifié le neutron, puis le positron et le muon parmi les particules issues des rayons cosmiques. L'inconvénient de la chambre à brouillard est qu'il faut attendre environ une minute que la stabilité soit rétablie avant d'actionner à nouveau le piston qui permet de recréer les conditions favorables nécessaires pour révéler le passage de nouvelles particules.

Traces laissées par le passage de particules dans une chambre à brouillard

La chambre à bulles

Au lieu d'avoir une enceinte gazeuse à l'état de sursaturation, le milieu détecteur est un liquide proche de son point d'ébullition. La détente provoquée par un piston met brusquement le liquide en état de bouillir et les premiers signes de bouillonnement ont lieu sur la trajectoire des particules. Là aussi, un champ magnétique modifie le cheminement des particules. Elles sont photographiées et analysées. La fréquence de mouvement du piston est d'environ une seconde, ce qui est un progrès considérable vis-à-vis de la chambre à brouillard. L'usage d'hydrogène liquide améliore en-

Traces laissées par des particules dans une chambre à bulles

core les performances de ce type de détecteur. Le physicien américain Luis Alvarez a largement contribué à la mise au point de ce détecteur.

La chambre à étincelle

Dans une enceinte remplie d'un mélange d'hélium et de néon, on dispose des plaques conductrices parallèles, distantes d'un cm les unes des autres. Ces plaques sont alternativement chargées d'une tension de 6000 volts pour les unes, nulle pour les autres. Un scintillateur placé au dessus de la chambre, un autre en-dessous, enclenche la haute tension lorsqu'une particule se manifeste. Une étincelle éclate, traverse toutes les plaques et matérialise le trajet de la particule.

Traces laissées par le passage de particules dans une chambre à étincelles

Un progrès significatif : le détecteur multifils

Destiné à mesurer l'intensité de la radioactivité, le compteur Geiger-Müller est composé d'un fil tendu dans l'axe d'un cylindre métallique. Une tension élevée est maintenue entre le fil et les parois du cylindre. Lorsqu'une particule traverse le compteur, elle ionise l'air et provoque une décharge électrique entre le fil et le cylindre. Chaque particule provoque une décharge. On peut donc compter les particules et évaluer l'importance de la radioactivité.

Au CERN, Georges Charpak reprend le principe du compteur Geiger mais dispose des plans de fils parallèles, qui jouent le rôle d'anode et qui alternent avec des plaques métalliques qui jouent le rôle de cathode. Tous les fils sont reliés à un ordinateur qui enregistre les réactions de chaque fil. Ce dispositif permet de reconstituer le parcours de chaque particule et mesurer son énergie. Le traitement numérique des impulsions fournies à l'ordinateur dispense l'opérateur de devoir analyser des milliers de photographies.

Le prix Nobel a récompensé Georges Charpak pour cette invention qui a permis de faire des progrès considérable à l'étude des particules.

Les calorimètres

Ce sont des appareils qui mesurent l'énergie des particules qui les traversent. Les particules sont arrêtées à l'intérieur du calorimètre par un milieu très absorbant, du plomb, par exemple. La quantité de chaleur enregistrée est proportionnelle à l'énergie de la particule.

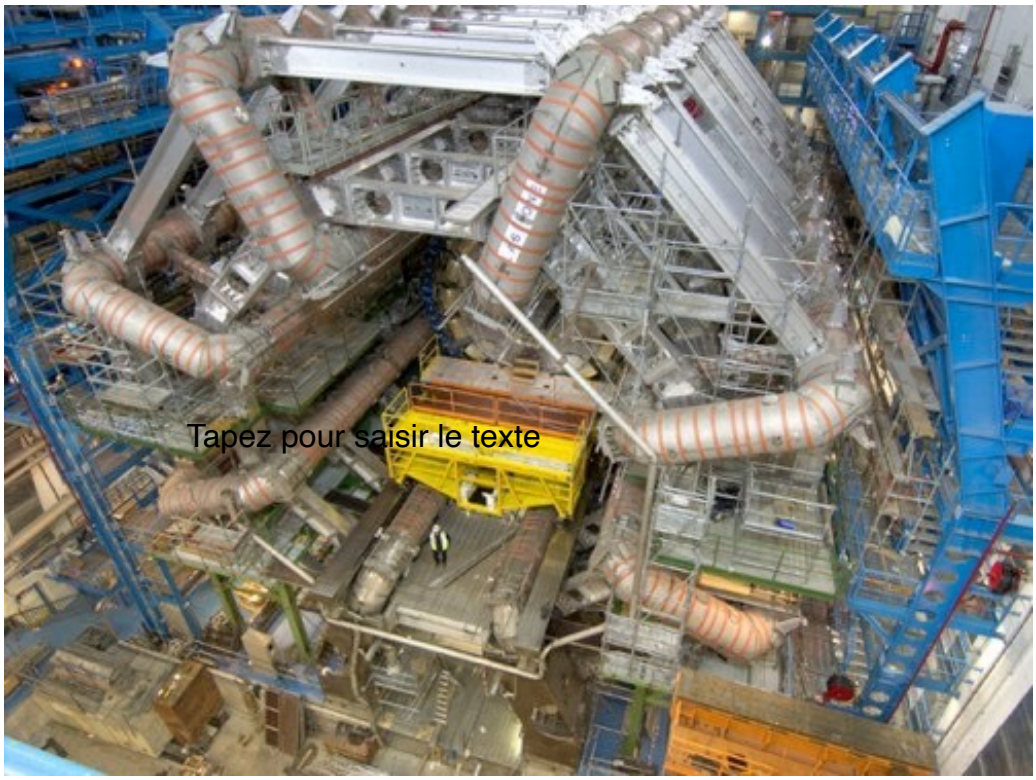
Le détecteur ATLAS

Dans les grands accélérateurs, aux endroits où les particules heurtent leur cible, on dispose tout autour des détecteurs multiples constitués de couches superposées de détecteurs divers, un peu comme dans un énorme sandwich.

*Le détecteur **Atlas**, est une énorme machine de plus de 7000 tonnes, 27 m. de diamètre et 46 m. de longueur. Les particules du LHC le traversent le long de son axe et les collisions ont lieu en son centre. Quatre sortes de détecteurs se superposent concentriquement, chacun enregistrant des données particulières.*

Ce sont des détecteurs très sophistiqués qui transmettent aux ordinateurs toutes les données qu'ils captent. Du centre vers l'extérieur on trouve :

- *le **détecteur interne** ou **trajectographe** est un cylindre d'un mètre de diamètre et de cinq mètres de longueur. Il soumet les particules à un intense champ magnétique et enregistre leur trace;*
- *le **calorimètre électromagnétique** entoure le trajectographe. Il mesure cinq mètres de diamètre et 10 mètres de long. Il détecte et mesure l'énergie des particules qui le traversent;*
- *le **calorimètre hadronique** qui détecte les hadrons qui n'ont pas été arrêtés par les détecteurs précédents et qui en mesure l'énergie;*
- ***le spectromètre à muons** qui détecte les particules qui ont traversé toutes les couches précédentes. Ce sont les muons. Les neutrinos ne sont pas détectés mais on calcule leur intensité à partir de l'énergie manquante.*

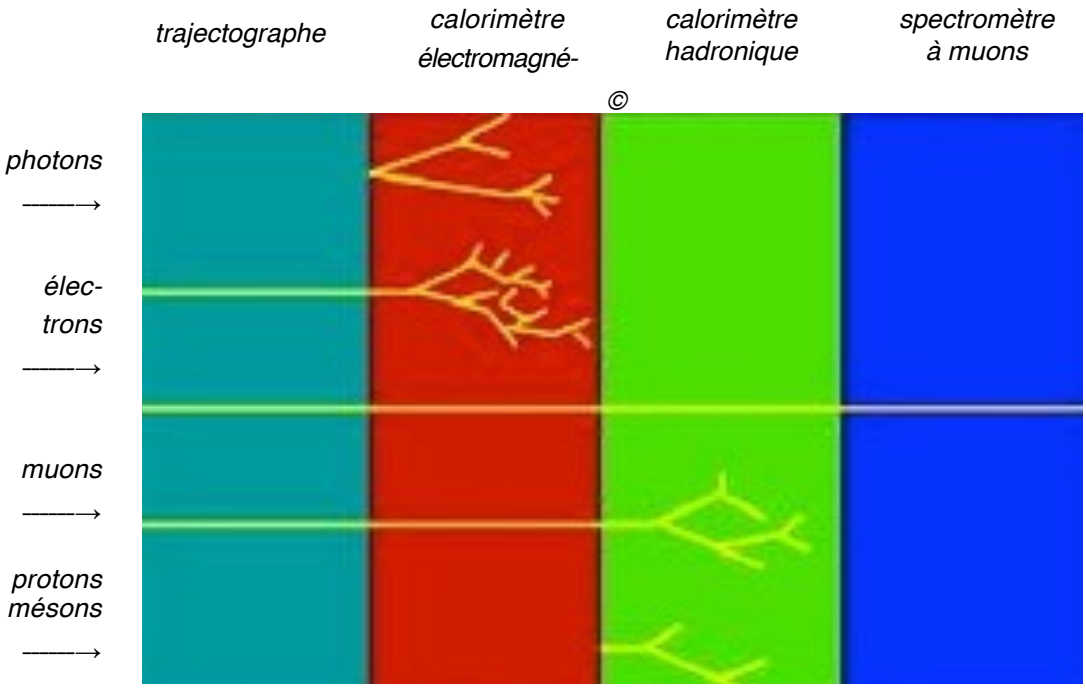


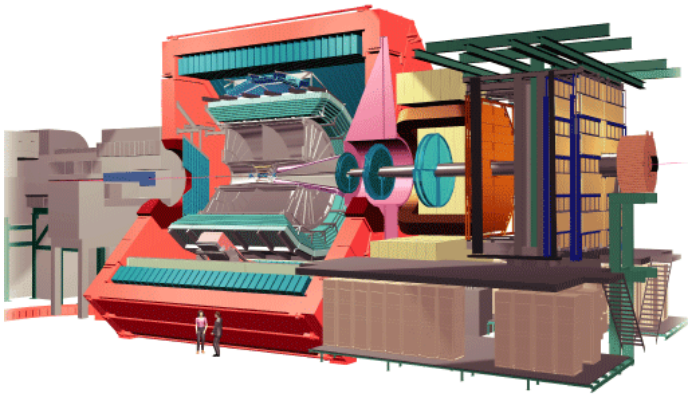
ATLAS en cours de construction.

Le petit personnage au centre donne l'échelle du gigantisme de cette machine. On remarque les bobinages des électro-aimants qui produiront le champ magnétique le plus puissant jamais produit.

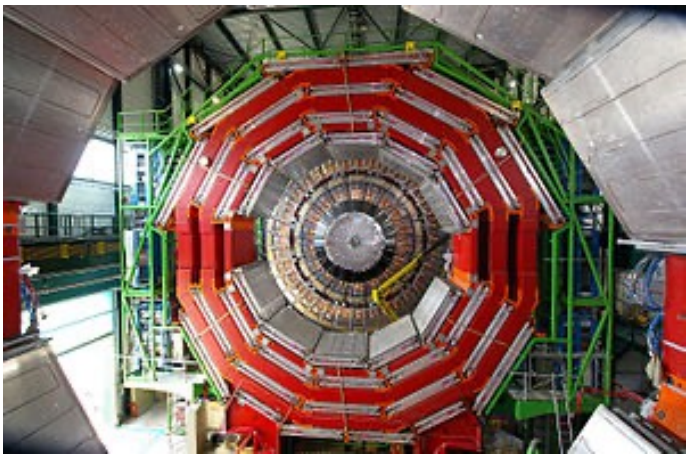
ATLAS est l'un des quatre détecteurs principaux qui jalonnent le parcours des hadrons au sein du LHC. D'autres, non moins performants, sont tournés vers d'autres aspects de la recherche. Parmi ceux-ci, citons le détecteur ALICE conçu pour étudier le plasma quarks-gluons tel qu'il devait être au cours du premier millionième de seconde qui a suivi le big-bang. Le détecteur LHCb mesure les différences qui existent entre matière et antimatière. Tout aussi gigantesque que son cousin ATLAS, le détecteur CMS pèse 12'500 tonnes. Le champs magnétique généré par son solénoïde supraconducteur est un des plus puissants jamais réalisés. Il est particulièrement préposé à la recherche du boson de Higgs.

Schéma de la succession des divers détecteurs disposés dans le dispositif ATLAS

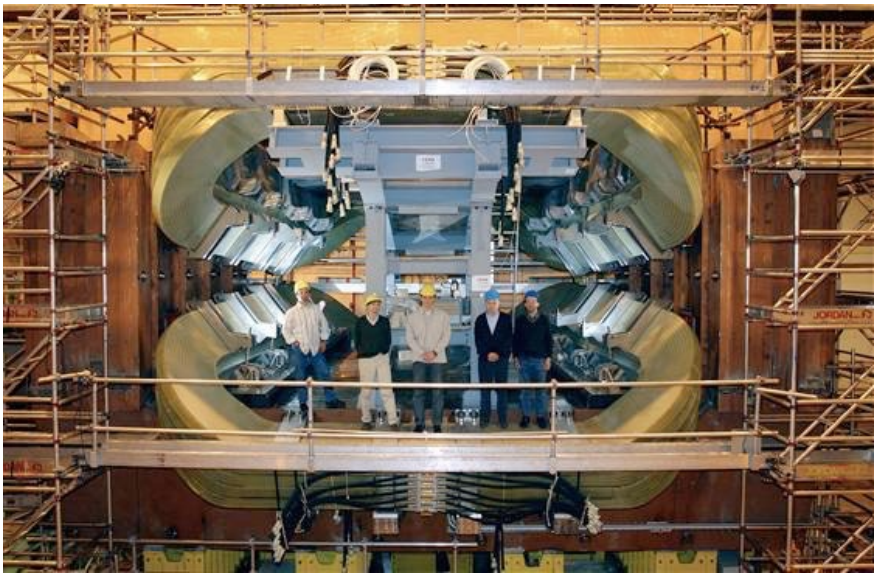




Le Détecteur ALICE



Le détecteur CMS



Le détecteur LHCb

Un puissant outil d'analyse

Tous les détecteurs envoient les résultats de leurs mesures à des ordinateurs qui sont programmés pour trier ces résultats et ne retenir que ceux qui présentent un intérêt nouveau pour la recherche scientifique. Les détecteurs du LHC génèrent environ 15 millions de giga-octets de données. L'analyse des résultats est effectuée par des dizaines de milliers d'ordinateurs dont les mémoires sont reliées les unes aux autres. Ces ordinateurs, disséminés dans 33 pays, mettent en commun leurs mémoires et leur puissance de calcul pour décrypter les mystères du monde intime des atomes !

Classons les particules

La plupart des dizaines de particules découvertes et décrites par les physiciens n'ont qu'une durée de vie extrêmement brève. Elles n'apparaissent que très épisodiquement dans certaines réactions nucléaires, en particulier au cœur des étoiles. Certaines particules apparaissent subitement puis disparaissent tout aussi vite. Elles ne semblent pas avoir de vie propre, mais paraissent servir d'intermédiaires pour de courtes missions de transmission d'instructions ou de forces entre d'autres particules.

Les fermions constituent la matière qui nous entoure

*Les différentes particules stables - ou dont l'espérance de vie est très longue. Celles qui constituent les atomes, donc la matière qui nous entoure, sont relativement peu nombreuses. Les physiciens les réunissent sous le terme de **fermions**. Ce sont les briques élémentaires qui constituent tout notre environnement. Elles sont bien connues des chimistes : ce sont les **protons**, les **neutrons** et les **électrons**. On a construit autour d'elles le fameux du tableau périodique de Dimitri Mendeleïev.*

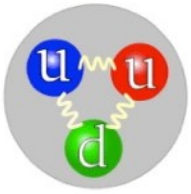
*Mais les physiciens, qui coupent les cheveux en quatre et les protons en trois, ont découvert que les neutrons et les protons ne sont pas vraiment des **particules élémentaires** mais des **particules composites**. Elles sont ainsi constituées de **quarks**.*

Quarks	Pressenti par Murray Gell-Mann en 1960 Mis en évidence par Hames Bjorken et Richard Feynman en 1969		
	Quark up [u]	Quark down [d]	
Masse : Charge électrique: Espérance de vie :	1,7 à 3,3 MeV/c^2 + ⅔ stable	4.1 à 5.8 MeV/c^2 - ⅓ stable	
Sensible aux quatre forces, constituants des neutrons, des protons et des mésons.			

Les quarks en sont les briques élémentaires

*Les quarks sont d'extrêmement petites particules. Ils ne peuvent pas exister de manière isolée. Ils ont l'instinct grégaire. Dans la matière ordinaire (les neutrons et les protons), ils sont toujours confinés trois par trois. Le quark up porte une charge électrique de + ⅔ , le quark down une charge de - ⅓ . Ces quarks sont sensibles à une "force nucléaire" connue sous le nom **d'interaction forte.** Il y a plusieurs sortes de quarks :*

- *le quark up porte une charge électrique de + ⅔ ,*
- *le quark down une charge de - ⅓ .*



*Ces quarks baignent dans le champ de l'interaction forte. Cette interaction s'effectue par l'intermédiaire d'une brigade de **gluons** (en blanc sur le schéma) qui lient les quarks très fortement ensemble.*

Il est impossible d'isoler un quark et aucun accélérateur n'est encore assez puissant pour le faire. Toutefois, au cours du premier millionième de seconde d'existence de

*l'univers, la température a dû être suffisamment élevée pour que l'agitation thermique empêche l'interaction forte de confiner les quarks. Mais très vite cette dernière a pris le dessus et a obligé les quarks à s'associer trois par trois pour constituer les protons et les neutrons ou deux par deux (un quark et un anti-quark) pour constituer les **mésons**.*

*Les particules que nous venons de décrire sont dites "**de première génération**", par opposition à des cousins éloignés qui ont des comportements semblables mais dont l'embonpoint ne permet pas de survivre longtemps.*

*Parmi ces cousins identifiés par les physiciens, se trouvent quatre autres quarks qui portent les noms poétiques de **strange**, **charmed**, **bottom** et **top**. Ils sont plus lourds, sont très instables et se désintègrent rapidement en quarks up et down. Ils n'interviennent pas directement dans la matière qui nous entoure. Suivant leur masse et la rareté de leur apparition on les a classés dans les catégories de deuxième et troisième génération.*

Quarks exotiques, dits de deuxième et troisième génération				
	Deuxième génération		*Troisième génération*	
	Quark charm [c]	*Quark strange* [s]	*Quark top* [t]	*Quark bottom* [b]
Masse :	*1,3 GeV/c²*	*80 à 130 MeV/c²*	*173.5 GeV/c²*	*4 GeV/c²*
Charge électrique:	+ ⅔	- ⅓	+ ⅔	- ⅓
Espérance de vie :	$\backsim 10^{-12}$ s.	1.24×10^{-8} s.	$\backsim 10^{-24}$ s.	$\backsim 10^{-10}$ s.
Désintégration :	c ⇨ s + W^-	s ⇨ u + W^+	c ⇨ s + W^-	b ⇨ c + W^+
- *Les quarks sont sensibles aux quatre forces.* - *Le kaon renferme un quark strange ou un anti quark strange.* - *Les quark charm et bottom apparaissent dans quelques rares mésons.* - *En raison de sa faible espérance de vie, le quark top n'entre dans aucun hadron.*				

L'électron, maître de la chimie

C'est une particule légère appartenant toujours à la classe des fermions mais insensible à l'interaction forte. Les électrons sont des leptons une sous-famille des fermions. Lepton vient du grec et signifie "léger". Les électrons sont porteurs d'une charge négative. Ils constituent l'enveloppe externe des atomes. Ils suivent des orbites complexes autour du noyau de l'atome. Leur zone d'influence, grossièrement sphérique, détermine le rayon atomique. Ils sont soumis à l'influence de la force électromagnétique. C'est leur comportement qui détermine toutes les lois de la chimie et régente les liaisons entre atomes.

Ils constituent aussi la particule bêta (β-) de la radioactivité. C'est un électron qui est expulsé du noyau à la suite de la transformation d'un neutron en proton sous l'effet perturbateur de l'interaction faible.

Electron [e^-]	Découvert en 1897 par John Thomson		
Masse : Charge électrique: Espérance de vie :	510.998 keV/c^2 - 1 stable		
- Insensible à l'interaction forte - Sensible aux interactions électromagnétique, faible et à la gravité - Un des constituants atomes. Les électrons gravitent autour du noyau. Ils sont responsables des réactions chimiques. - L'électron constitue aussi la particule bêta (β^-)de la radioactivité.			

Il y a encore un petit dernier : le neutrino

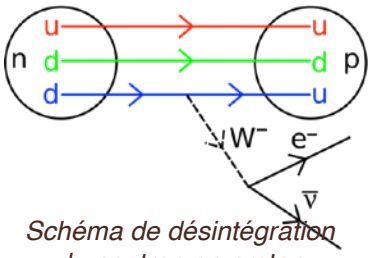


Schéma de désintégration du neutron en proton

Il faut ajouter aux fermions une particule insaisissable, très mystérieuse le **neutrino**. Il traverse la matière sans interagir avec d'autres particules. Des milliards de neutrinos traversent notre corps chaque seconde. Son existence a été pressentie en 1930 par Wolfang Pauli, puis confirmée par expérience en 1956. Le neutrino n'est sensible ni à l'interaction forte ni à l'interaction électromagnétique, ce qui rend sa détection très difficile. Il n'intervient que sur ordre de l'interaction faible au cours de diverses réactions nucléaires.

Par exemple, au cours de la transformation d'un neutron en proton, un quark down se transforme en quark up avec émission d'un électron e^- et d'un neutrino ν.

Il a probablement une masse extrêmement faible et participe peut-être à cette mystérieuse **matière noire** qui obsède les astrophysiciens. Paradoxalement, cette particule si discrète est une des plus abondantes dans l'univers. Le neutrino prend une part essentielle dans toutes les réactions nucléaires et toutes interactions énergétiques. Le neutrino qui nous est le plus familier est souvent associé à l'électron. Dans le schéma de désintégration du neutron, il accompagne l'électron produit. On parle alors de neutrino électronique.

Neutrino [ν_e]	Existence postulée par Wolfgang Pauli en 1930. Découvert expérimentalement par Frederick Reines et Clyde Cowan en 1956.		
Masse : Charge électrique: Espérance de vie :	510.998 keV/c^2 nulle stable		
- Insensible à l'interaction forte, sensible à l'interactions faible et à la gravité - Il s'agit du neutrino dit "électronique" qui apparaît au cours de la désintégration du neutron en proton. - Extrêmement difficile à détecter.			

Mais n'oublions pas les bosons !

Ce sont des particules qui ne participent pas directement à la matière mais qui servent d'intermédiaires entre les particules. Ce sont les vecteurs des différentes interactions. Dans l'approche imagée que nous avions faites des quatre forces qui régissent l'univers, nous avions parlé de domestiques. Il y a les photons qui interviennent pour la force électromagnétique, les gluons pour l'interaction forte, les bosons w-, w+ et wo pour l'interaction faible, l'hypothétique graviton pour la gravité et le boson de Higgs qui confère leur masse aux différentes particules.

Certains ne possède pas de masse et transmettent les ordres à la vitesse de la lumière. C'est le cas des photons et de l'hypothétique graviton. Leur rayon d'action est illimité.

Les bosons de la force faible sont très massifs et leur espérance de vie est extraordinairement faible. Cela explique pourquoi leur rayon d'action est très limité et ne dépasse pas l'intérieur de noyau d'atome.

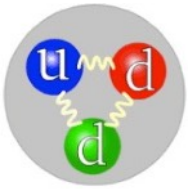
Photon [γ]	Boson vecteur de **l'interaction électromagnétique**	
Masse : Charge électrique: Espérance de vie :	nulle nulle stable	Imaginé par Albert Einstein à partir de 1905 Existence confirmée par Arthur Compton en 1923
Le photon présente la dualité de se comporter comme une particule à laquelle est associée une onde. Le photon est un grain d'énergie. L'énergie qu'il transporte est égale à $E = h \times v$ où **v** est la fréquence de l'onde et **h** la constante de Planck.		

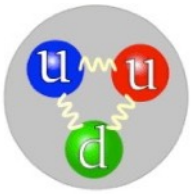
Gluon	Boson vecteur de **l'interaction forte**	
Masse : Charge électrique: Espérance de vie :	nulle nulle stable	La relation entre quarks et gluons est régie par la chromodynamique quantique, théorie imaginée par les physiciens, qui affecte les quark d'une couleur dont le changement affecte directement les autres quarks par le biais des gluons.
Les physiciens distinguent 8 sortes de gluons. C'est comme si ils étaient porteurs à la fois d'une de charges et d'une anti charge de couleur (rouge, vert ou bleu), ce qui donne 8 possibilités de mélange.		

W^-, W^+, Z^0.	Boson vecteur de **l'interaction faible**			
	W^-	W^+	Z^0	
Masse : Charge électrique: Espérance de vie [s]	80.39 GeV/c^2 -1 3×10^{-25}	80.39 GeV/c^2 +1 3×10^{-25}	91.19 GeV/c^2 0 3×10^{-25}	
Ces bosons sont très massifs et leur extrêmement faible espérance de vie limite leur action à l'environnement immédiat des quarks.				

Protons et neutrons, des particules composites

Les protons et les neutrons, que les chimistes croyaient être des particules élémentaires, sont, selon les physiciens, des particules composites constituées de quarks selon le schéma ci-dessous :

Neutron	Identifié en 1937 par James Chadwick.	
Symbole : n, n^0	Masse :	939,2565 MeV/c^2 (1.672'623 x 10^{-27} kg)
Famille des fermion Groupe des baryons 	Charge électrique:	nulle
	Espérance de vie :	- 885 secondes hors du noyau, - stable à l'intérieur du noyau.
	- Le neutron est constitué d'un quark up et de deux quarks down. - Sensible à l'interactions forte, faible et à la gravité. - Un des constituants du noyau des atomes - Hors du noyau, se désintègre rapidement, se transforme en proton avec émission d'un électron et d'un neutrino.	

Proton	Découvert en 1919 par Ernest Rutherford.	
Symbole : p, p^+	Masse :	938,272 MeV/c^2 (1.672'623 x 10^{-27} kg)
Famille des fermion Groupe des baryons 	Charge électrique:	+1
	Espérance de vie :	stable (supérieure à 10^{30} ans)
	- Le neutron est constitué de deux quarks up et de un quarks down. - Sensible aux quatre forces - Un des constituants du noyau des atomes. - Peut se transformer en neutron par capture électronique. Ce processus n'est pas spontané et nécessite un apport d'énergie.	

Composés de triplets de quarks, les neutrons et les protons sont concentrés dans les noyaux d'atome. Protons et neutrons s'associent intimement pour former la petite centaine d'atomes que l'on retrouve dans le tableau périodique qui nous est bien connu. L'atome le plus simple est l'hydrogène qui ne comporte qu'un proton en guise de noyau. Le plus complexe qu'on trouve dans la nature est l'uranium 238 dont le noyau comporte 92 protons et 146 neutrons.

Les neutrons ne se sentent en sécurité que lorsqu'ils sont confinés à l'intérieur d'un noyau. Ils peuvent y vivre indéfiniment. Hors d'un noyau, ils sont très menacés et leur espérance de vie n'est guère que d'un quart d'heure. Ils sont atteints par la décroissance radioactive et se transforment rapidement en protons.

Les physiciens aiment classer les objets

Ils ont subdivisé les fermions en deux catégories, les baryons qui sont les quarks et particules composites faites de quarks et sensibles à l'interaction forte, et les leptons qui échappent à l'interaction forte. Ainsi l'électron et le neutrino sont des leptons.

Tableau simplifié des particules élémentaires constituant la matière			
Fermions (composants de la matière)	Baryons (sensibles à l'interaction forte)	quark up quark down	Constituent les protons et les neutrons.
	Leptons (insensibles à l'interaction forte)	électron neutrino	
Bosons (vecteurs des interactions)		photon gluons w^-, w^+ et w^o graviton (?) boson de Higgs	interaction électromagnétique interaction forte interaction faible force gravitationnelle confère la masse aux particules

Malheureusement ce n'est pas si simple !

Cette classification aurait le mérite d'être simple, mais la découvertes de particules étranges est venue bousculer cet ordre si tranquille.

Au fur et à mesure des recherches effectuées dans les grands laboratoires de physique et sur les rayons cosmiques, on voit apparaître des particules qui échappent au beau tableau que nous venons d'établir. Leur existence, même si elle est extrêmement éphémère, joue un rôle important dans beaucoup de circonstances de la vie des atomes.

Le positron, première particule d'antimatière observée

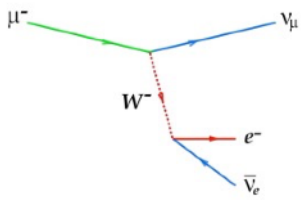
L'anti électron prédit par Paul Dirac en 1928 à partir de calculs théoriques a été découvert en 1932 par Carl Anderson parmi les particules détectées dans les rayons cosmiques.

Positron	Appelé encore anti électron car il ne se distingue de ce dernier que par sa charge électrique qui est inversée.	
Classe des fermion Groupe des Lepton	Masse :	511 keV/c^2 (9.11 x 10^{-31} kg)
Symbole : e^+	Charge électrique:	+1
	Espérance de vie :	stable

- Sensible à l'interaction électromagnétique, faible et à la gravité, insensible à l'interaction forte.
- Stable dans le vide. Dans la matière, en rencontrant un électron, les 2 particules s'annihilent et sont converties en énergie sous forme de deux photons gamma très énergétiques.

Muon	Classé par les physiciens parmi les particules de deuxième génération	
Symbole : μ^-	Masse :	105.66 MeV/c^2 (1.88 x 10^{-28} kg)
Classe des fermion Groupe des leptons	Charge électrique:	-1
	Espérance de vie :	2 millionième de seconde.

- Sensible à l'interaction électromagnétique, faible et à la gravité, insensible à l'interaction forte.
- Il a les mêmes propriétés que l'électron mais est 207 fois plus lourd.
- Il est produit dans la haute atmosphère par désintégration des pions chargés.
- Comme pour l'électron, il existe un neutrino muonique.



Le muon se désintègre en produisant un neutrino muonique et un bozon W^- qui disparaît aussitôt en émettant un électron et un anti-neutrino électronique.

Tauon	Classé par les physiciens parmi les particules de troisième génération	
Classe des fermion Groupe des Lepton	Masse :	1.777 GeV/c^2 (3.17 x 10^{-28} kg)
Symbole : τ^-	Charge électrique:	-1
	Espérance de vie :	1 millionième de milliardième de s.

- Sensible à l'interaction électromagnétique, faible et à la gravité, insensible à l'interaction forte.
- Il a les mêmes propriétés que l'électron mais est 3500 fois plus lourd que lui. Comme pour l'électron, il existe un neutrino tauonique.
- Extraordinairement instable, il se désintègre en un neutrino et un antineutrino.
- Il est produit dans la haute atmosphère par désintégration des pions chargés.
- Comme pour l'électron, il existe un neutrino tauonique.

L'antimatière existe donc bel et bien !

La découverte du positron a donc confirmé que l'antimatière existe donc bel et bien. On est capable aujourd'hui, au CERN par exemple, d'en produire en quantités infinitésimales. Ainsi, en novembre 2010, une expérience a réussi à produire 38 anti atomes d'hydrogène qui ont pu être conservés pendant plus d'un dixième de seconde ! Il s'agissait d'atomes constitués d'un antiproton autour duquel gravitait un positron.

Dans notre monde, l'antimatière ne peut avoir qu'une existence très éphémère car le contact d'une particule de matière avec son antiparticule entraîne immédiatement leur annihilation. Comme il y a disparition de la masse des deux particules, il y a dégagement d'une quantité énorme d'énergie sous la forme de photons gamma.

Nous sommes aujourd'hui dans un monde de matière. Mais un monde d'antimatière est tout aussi concevable, monde qui serait constitué d'anti quarks, d'anti-électrons, d'anti-protons, d'anti-neutrons et d'anti-neutrinos. Il faut donc imaginer que le tableau des particules présenté plus loin existe aussi pour l'antimatière.

On sait fabriquer l'antimatière

Au CERN, on sait aujourd'hui produire des positrons et, surtout, des antiprotons. C'est dans un décélérateur d'antiprotons qu'on produit des antiprotons de basse énergie. On lance des protons de haute énergie sur une cible métallique. L'énergie dégagée permet parfois de produire une paire proton-antiproton. On trie les uns des autres. Les antiprotons possèdent une vitesse proche de celle de la lumière. C'est là que le décélèrateur les ralentis et les rend aptes à être étudiés et à fabriquer de véritables atomes d'antimatière .

Les Muons, des trouble fêtes

*En compagnie des **positrons**, ces électrons chargés positivement, on a découvert des particules qui ont les mêmes propriétés que l'électron mais qui sont 207 fois plus massives. Ce sont les **muons**. On a même trouvé un électron super lourd, le **tauon**, 3500 fois plus lourd que l'électron. Mais leur espérance de vie n'est pas bien grande : deux millionièmes de seconde pour le muon, moins d'un millième de milliardième de seconde pour le tauon. Mais cela a obligé les chercheurs à compléter le catalogue des particules.*

*Puis on a identifié le **pion** et le kaon, des particules à l'espérance de vie extrêmement courte, toujours dans les rayons cosmiques. Pions et **kaons** sont des particules multiples et sont donc exclus du tableau des particules élémentaires. Pour ces dernières, il a donc fallu étoffer le catalogue des particules et modifier le beau tableau présenté plus haut.*

———————————

Le modèle standard des physiciens

Voici donc le tableau officiel actuel des particules élémentaires qui sert de référence aux physiciens d'aujourd'hui. C'est ce qu'ils ont appelé le **modèle standard**.

Les particules élémentaires qui sont les briques de la matière ordinaire qui nous est familière ont été définies comme faisant partie de la **première génération**. *Les cousins de ces particules, qui ont des masses plus élevées, qui sont instables et qui ne participent pas directement à la constitution de la matière, ont été regroupées sous les appellations de* **deuxième et troisième génération** *selon leur masse.*

Modèle standard des particules élémentaires		
Première génération	Deuxième génération	Troisième génération
Electron [e^-] 0.511 MeV	Muon [μ^-] 207 fois la masse de e-	Tauon [t^-] 3500 fois la masse de e-
Neutrino électronique [n_e]	Neutrino muonique [n_μ]	Neutrino tauique [n_t]
Quark up [u] + ⅔	Quark charm [c] + ⅔	Quark top [t] + ⅔
Quark down [d] - ⅓	Quark strange [s] - ⅓	Quark bottom [b] - ⅓

Il y a encore les **bosons**, *des particules qui ne participent pas directement à la constitution de la matière mais qui sont les vecteurs qui transmettent l'action des diverses forces.*

Bosons			
Interaction faible		Interaction électromagnétique	Interaction forte
Zo Bozon Z	W^+ W^- Bozon W	γ Photon	g Gluon

Le boson de Higgs et l'hypothétique graviton ne sont pas pris en compte dans ce tableau.

Les quarks jouent les triplés

Les quarks semblent donc être les briques élémentaires à partir desquelles il est possible de construire des particules composites. Leur instinct grégaire les rassemblent le plus généralement trois par trois pour former les protons et les neutrons. Ce sont les quarks up et les quarks down qui appartiennent à la première génération du tableau présenté plus haut.

Les quarks jumeaux ne survivent pas longtemps

*Les quarks essayent aussi de se réunir deux par deux. On les regroupe sous le terme général de **mésons.** Il s'agit toujours de l'association d'un quark et d'un **antiquark**. Les combinaisons possibles entre les six quarks reconnus et leur antiparticule sont très nombreuses mais leur existence est incertaine et leur espérance de vie ne dépasse généralement pas un millième de millionième de seconde. Ceux qui ont été bien identifiés sont le **Pion** et le **Kaon**. Il y a plusieurs sortes de pions. Le pion π^+ est constitué d'un quark up et d'un antiquark down, le pion π^- d'un quark down et d'un antiquark up. On les note respectivement π^+ et π^-. Il existe encore un pion neutre noté π^0.*

Il existe aussi plusieurs sortes de kaons. Ce sont des combinaisons de quarks up ou down et strange. On les note K^-, K^+ et K^0. Il y en a encore d'autres mais ce n'est pas utile d'en faire la description détaillée.

Les mésons, des particules constituées de 2 quarks

*Les mésons constituent donc une famille de particules très variées, constituées d'un quark et d'un anti quark. Toutefois, la présence simultanée d'un quark et de son antiparticule rend leur existence très précaire et donc leur espérance de vie est très faible. Beaucoup de ces particules ont été identifiées mais seuls les **pions** et les **kaons** ont une espérance de vie suffisante pour jouer un rôle notable dans les mécanismes nucléaires.*

Pion	*Symboles,* π^+, π^0, π^-			
*Appelé aussi **méson pi**, c'est une particule composite constituée d'un quark et d'un anti-quark.* *On distingue trois sortes de pions :*				
Symbole : π	π^+	π^0	π^-	
Composition *Masse:* *Charge électrique:* *Espérance de vie:* *Mode de désintégration:*	*up et anti-down* *139.15 MeV/c^2* *positive* *2.6 x10^{-8} s* $\mu^+ + \nu$	*up et anti-up* *134.97 MeV/c^2* *nulle* *8.4 x10^{-17} s* $e^- + e^+ + \gamma$	*down et anti-up* *139,57 MeV/c^2* *négative* *2.6 x10^{-25} s* $\mu^- + \nu$	
 représentation schématique d'un pion π^+.	*- Ces trois particules apparaissent très fugitivement dans la haute atmosphère par interaction des rayons cosmiques sur les noyaux d'azote ou au cours d'interactions nucléaires diverses. Ils peuvent être chargés ou neutres.* *- Ils jouent aussi un rôle déterminant dans la cohésion des neutrons et des protons au sein même du noyau des atomes.* *- Ils se désintègrent en produisant des muons et des neutrinos ou parfois même en émettant un électron et un positron.*			

Kaon	On constate l'existence de 4 sortes de kaons selon les combinaisons possibles de quarks up (u) et strange (s) et de leur antiparticule.			
Symbole : K	K^+	K^-	K^0_S	K^0_L
Composition: Masse: Charge électrique Espérance de vie :	up et anti-charm 493,7 MeV/c^2 +1 ≃ 10^{-8} s.	anti-up et charm 493,7 MeV/c^2 -1 ≃ 10^{-8} s.	superposition de 497,7 MeV/c^2 0 ≃ 10^{-10} s.	divers états 497,7 MeV/c^2 0 ≃ 10^{-8} s.
- Sensible à l'interaction forte - Extraordinairement instable, il se désintègre en un neutrino et un antineutrino. - Il est produit dans la haute atmosphère par désintégration des pions chargés.				

Dans le noyau rien n'est vraiment tranquille !

A l'intérieur d'un proton ou d'un neutron il y a trois quarks qui sont comme prisonniers des gluons. Les gluons se comportent comme des élastiques : tant que les quarks sont proches les uns des autres, il bénéficient d'une certaine liberté. Dès qu'ils tentent de s'éloigner, les gluons les retiennent plus fermement.

Les émotions étreignent les quarks

Pour expliquer les phénomènes qu'on observe à l'intérieur des protons et des neutrons, les physiciens ont imaginé que les quarks étaient soumis à des émotions fortes. Ils peuvent être soit bleu de peur, soit vert de rage ou encore rouge de honte. Toutefois ils doivent obéir à une règle simple : les trois couleurs doivent impérativement être représentées.

Si donc, sous le coup d'une émotion, un quark change de couleur, un autre quark doit impérativement changer aussi de couleur pour satisfaire à cette règle. Curieusement ce sont les gluons qui rétablissent l'ordre. Certains gluons changent le vert en bleu, d'autres le bleu en rouge, d'autres encore le rouge en vert. C'est comme si chaque gluon était porteur à la fois d'une charge de couleur et d'une anti-charge de couleur. Les combinaisons possibles montrent qu'il existe huit sortes de gluons.

Les nucléons sont hyperactifs

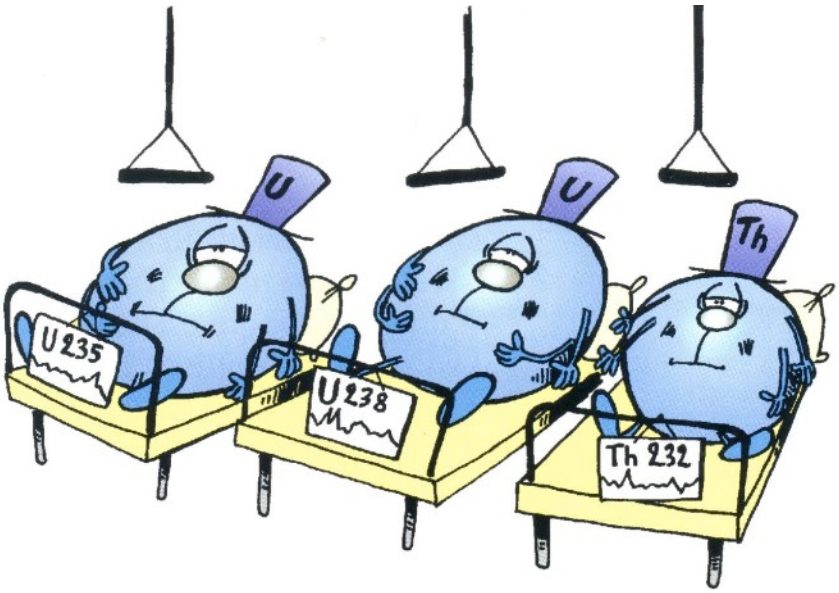
Quant aux protons et aux neutrons, il sont agglomérés pour former un noyau le plus stable possible. Mais pour maintenir confinés les protons qui se repoussent mutuellement sous l'influence de la force électromagnétique, il est impératif que l'interaction forte agisse avec vigueur.

La cohésion des nucléons (les protons et les neutrons) n'est pas directement gérée par les gluons mais c'est une conséquence secondaire de l'interaction forte. C'est par échange de pions entre nucléons que la cohésion du noyau est possible. C'est comme si les gluons avaient délégué une partie de leurs compétences aux pions pour maintenir l'ordre dans l'assemblage de protons et de neutrons qui constituent les noyaux !

Une approche ludique de la radioactivité[1]

La décroissance radioactive, une maladie génétique des atomes

*C'est comme si certaines familles d'atomes étaient atteintes d'une maladie génétique qui affectait leur noyau (neutrons et protons) et que les physiciens ont baptisé "**décroissance radioactive**". On s'est rendu compte que cette maladie participait à la transmutation d'éléments en d'autres éléments.*



La maladie affecte particulièrement les familles Uranium et Thorium

Cette maladie atteint particulièrement les familles Uranium, Thorium, ainsi que quelques autres familles de moindre importance. Certains isotopes rares de familles bien connues, sont aussi affectés par cette maladie. On en parlera plus tard. Cette maladie évolue plus ou moins rapidement suivant les familles.

Elle a été foudroyante pour les familles Technétium et Prométhéum qui ont été entièrement décimées et ont complètement disparu aujourd'hui de notre environnement. L'évolution est très lente, au contraire, pour les familles Uranium et Thorium.

Le triste cas de la famille Uranium

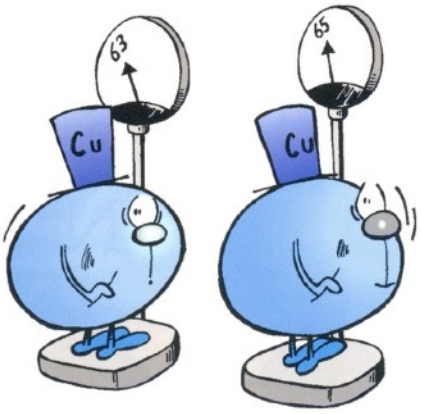
*Le cas de la famille Uranium est très typique, aussi allons nous l'étudier en détail : les membres de cette famille possèdent tous 92 protons. La plupart d'entre eux (99,3 %) possèdent 146 neutrons: c'est l'Uranium 238 (^{238}U) Les autres (0.7 %) n'en possèdent que 143: c'est l'uranium 235 (^{235}U). Ces deux **isotopes** sont atteints par la décroissance radioactive, mais la vitesse d'évolution de la maladie est différente pour chacun d'entre eux.*

---

[1] *Extrait de l'ouvrage du même auteur "Le Monde étrange des Atomes"*

Qu'est-ce qu'un isotope ?

Dans la plupart des familles, le nombre de neutrons peut varier d'un individu à l'autre. Par exemple les membres de la famille Cuivre ont tous 29 protons, mais certains d'entre eux possèdent 34 neutrons et d'autres 36. Sur le plan chimique leurs propriétés sont absolument identiques. Ce qui diffère, c'est leur poids atomique.



Certains atomes de Cuivre pèsent 63 grons, d'autres 65. Ce sont deux isotopes de la famille Cuivre. On les appelle ^{63}Cu et ^{65}C. Les isotopes les plus connus dans le public sont le carbone 14 (^{14}C) qui est utilisé pour dater certains objets préhistoriques, le cobalt 60 (^{60}Co) utilisé en médecine et l'uranium 235 (^{235}U) utilisé dans les centrales nucléaires conventionnelles. Nous y reviendrons plus loin.

Le cuivre qu'on trouve dans la nature est constitué de 69% de l'isotope ^{63}Cu et 31% de l'isotope ^{65}Cu. Le poids atomique du cuivre qui figure dans le tableau périodique est une moyenne pondérée des poids de ^{63}Cu et ^{65}Cu. C'est la raison pour laquelle le poids atomique de la famille Cuivre n'est pas un nombre entier. C'est un nombre fractionnaire: 63,541.

^{63}Cu et ^{65}Cu sont des cousins. Ils appartiennent à la famille du Cuivre.

Comment séparer les isotopes

Il n'est pas possible de distinguer les isotopes entre eux par de méthodes chimiques. Ainsi, les isotopes ^{204}Pb, ^{207}Pb et ^{208}Pb sont des cousins qui tous trois possèdent 82 protons et 82 électrons. Leurs propriétés chimiques sont identiques et ils ne peuvent pas être distingués l'un de l'autre par des voies chimiques. Il faut recourir à un spectromètre de masse, un appareil qui trie les atomes selon leur masse Le principe consiste à ioniser les atomes de plomb, les accélérer et les soumettre à un champ magnétique. Les ions seront déviés d'autant plus qu'ils sont plus légers. Des détecteurs placés à des endroits judicieux détectent sélectivement chaque isotope.

Un spectomètre de masse c'est comme un billiard !

Vitesse d'évolution de la maladie

Il n'est pas possible de prévoir l'évolution de la maladie pour un atome particulier. Par contre, on peut suivre statistiquement le comportement d'une communauté d'atomes, la décroissance radioactive se produisant d'une manière aléatoire au sein de cette communauté. Au Pays étrange des Atomes, on appelle période de rémission le temps nécessaire à la disparition de la moitié des individus d'une communauté (les physiciens

parlent de demi-vie). On peut donc diagnostiquer que la maladie est responsable de la disparition :

- *de la moitié de la communauté de ^{238}U chaque 4,5 milliards d'années,*
- *de la moitié de la communauté de ^{235}U chaque 710 millions d'années*[1]

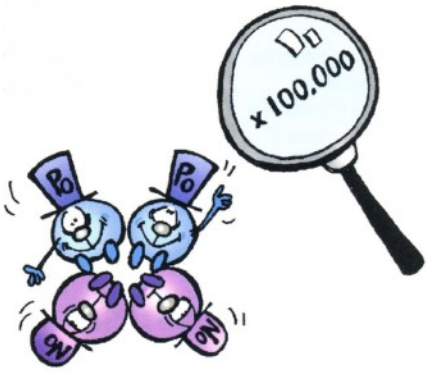
L'évolution de l'épidémie est déjà en elle-même très curieuse: à chaque instant les membres de la communauté savent que la moitié d'entre eux vont être atteints au cours d'une période qui est de 4,5 milliards d'années pour les frères ^{238}U et de 710 millions d'années pour les cousins ^{235}U.

Les symptômes

Prenons le cas de ^{238}U: tout commence par une subite convulsion interne suivie par des vomissements de divers produits issus du noyau. Dans ces produits, qui sont les constituants de la radioactivité, on peut trouver :

- ***les particules "alpha"[α]**, constituées chacune de deux protons et de deux neutrons*[2]*. Ils sont expulsés du noyau instable à la vitesse d'environ 16'000 km/seconde,*
- ***les particules "béta"[ß],** qui sont des électrons (formés dans le noyau par la transformation d'un neutron en proton). Ils sont expulsés à la vitesse de 270'000 km/seconde,*
- ***les rayons "gamma"[γ],** qui sont des rayons X très puissants qui se déplacent à la vitesse de la lumière. Ils sont produits par la désexcitation du noyau qui se "réarrange" à la suite de l'expulsion d'une particule alpha ou de particules béta.*

Ces émissions[3] *de particules s'accompagnent de la transmutation du pauvre ^{238}U en un individu marginal d'une autre famille (un isotope rare et instable de cette famille) puis, de rechute en rechute, après avoir transité, entre deux crises, par diverses autres familles, il finit par se transmuter définitivement en un isotope stable de la famille Plomb: ^{206}Pb.*



Une particule α est constituée de deux protons et de deux neutrons. C'est un noyau d'atome d'Hélium.

---

[1] *On remarque que ^{235}U disparaît beaucoup plus vite que son parent ^{238}U. Aujourd'hui il n'y a que 0.7 % de ^{235}U dans l'Uranium naturel. Mais cette proportion était de 14 % lors de la formation du système solaire, il y a 4.6 milliards d'années.*

[2] *Il est intéressant de noter qu'une particule α est, en fait, un noyau d'un atome d'Hélium ^{4}He.*

[3] *L'émission de ces diverses particules et du rayonnement γ constitue la radioactivité. Les cellules vivantes sont très vulnérables à ces rayons qui peuvent leur occasionner diverses dégénérescences, en particulier le cancer.*

Mécanisme de la maladie

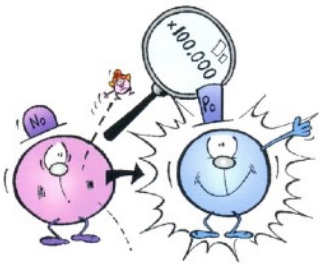
L'expulsion d'une particule α (2 protons et 2 neutrons) fait perdre 4 unités de poids à l'atome malade et le fait rétrograder de deux numéros atomiques dans le tableau périodique.

La perte d'une particule β (un électron produit par la transformation d'un neutron en un proton) ne cause aucune perte sensible de poids mais un des neutrons se transforme en un proton: l'atome malade change de matricule et avance d'une place dans tableau périodique.

Cette perte de particules α et β s'accompagne d'une forte fièvre qui provoque le dégagement de chaleur et de rayons X très énergétiques : on les appelle les rayons gamma, symbolisés par la lettre grecque γ.

Le premier symptôme qui atteint le pauvre ^{238}U est justement la perte d'une particule α. Il s'amaigrit de 4 unités et ne pèse plus que 234 grons. Comme il y a 2 protons dans la particule α, il rétrograde de 2 numéros dans le registre des matricules (ou numéro atomique). Il se transforme ainsi en un membre de la famille Thorium (matricule 90). Mais il ne s'agit pas d'un membre habituel de la famille Thorium, mais d'un isotope rare et instable, l'isotope ^{234}Th.

Une particule ß est un électron...



...produit par la transmutation d'un neutron en proton. Il y a aussi émission d'un neutrino, une particule encore très mystérieuse.

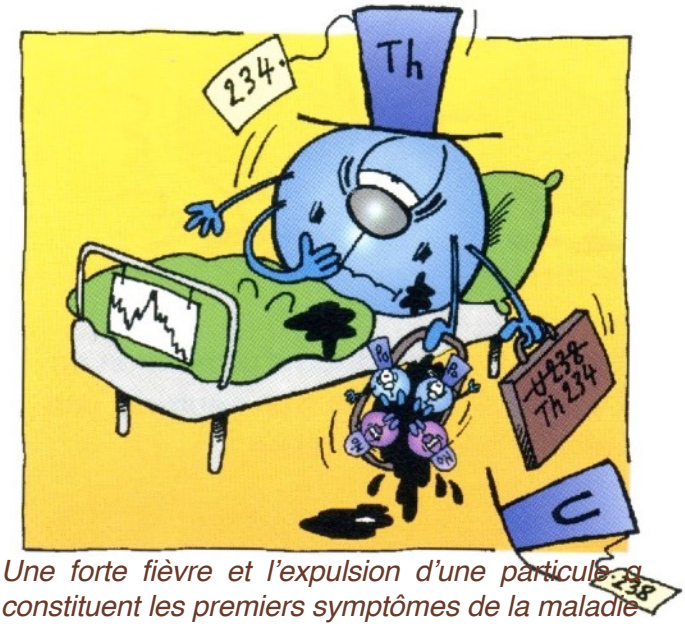
Les rayons γ sont des ondes électromagnétiques de très courte longueur d'onde.
Ce sont des rayons X extrêmement pénétrants.

Très vite, ce pauvre ^{234}Th va perdre successivement 2 particules β, ce qui va le transmuter en Protactinium 234 (^{234}Pa) pour quelques heures, puis en ^{234}U (isotope extrêmement rare de la famille Uranium).

Il transitera encore par une dizaine de familles d'atomes avant que la maladie ait terminé son évolution. Vous trouverez ci-contre le détail de cette évolution sur la feuille de maladie de ^{238}U.

La phase finale aboutit à un atome de la famille Plomb: ^{206}Pb. Cet isotope est immunisé contre la maladie: il est stable et n'évoluera plus au cours du temps. En résumé: la

maladie provoque chez Monsieur ^{238}U la perte successive de 8 particules α et 6 particules β, avec des périodes de rémission intermédiaires, pendant lesquelles il emprunte provisoirement l'identité d'autres éléments, avant d'aboutir à un état stable de Plomb 206 (^{206}Pb).



Une forte fièvre et l'expulsion d'une particule α constituent les premiers symptômes de la maladie

Les Terriens ont vainement essayé d'enrayer la maladie. Mais toutes les études qui ont été faites arrivent à la conclusion qu'il n'est possible ni de ralentir, ni d'accélérer cette évolution. D'une manière inéluctable, les deux isotopes naturels de la famille Uranium se transforment en divers isotopes de la famille Plomb selon le processus suivant :

^{238}U évolue vers le ^{206}Pb avec une période de rémission de 4,5 milliards d'années,

^{235}U évolue vers le ^{207}Pb avec une période de rémission de 704 millions d'années.

Une autre famille importante est atteinte par ce même genre de maladie: la famille Thorium.

^{232}Th évolue vers le ^{208}Pb avec une période de rémission de 14 milliards d'années.

La vitesse d'évolution de la maladie est beaucoup plus rapide pour ^{235}U que pour ^{238}U. Par conséquent, ^{235}U disparaît plus rapidement que ^{238}U. La proportion de ces deux isotopes a donc varié avec le temps. Aujourd'hui, la proportion ^{235}U / ^{238}U et de 0.7 %. Il y a 2 milliards d'années, cette proportion atteignait près de 4%, soit largement la teneur nécessaire au fonctionnement d'une centrale nucléaire.

Schéma de la décroissance radioactive de l'uranium 238

Feuille de maladie			Dr. Marie Sklodowska*			
Nom du patient : Uranium 238			*symptômes :*		*lourdeurs, fièvre, nausées*	
Symbole : *Nb. protons :* *Nb. neutrons :*	^{238}U 92 146		*diagnostic :*		*décroissance radioactive congénitale à longue période d'incubation (4.5 milliards d'années).*	
Etat	*N° atomique*	*Symbole*	*Poids*	*Rémission*	*Emission*	*Symptôme*
Uranium 238	92	^{238}U	238	4.5×10^9 ans	α	perd un noyau d'hélium
Thorium 234	90	^{234}Th	234	24 jours	ß	expulse un électron
Protactinium 234	91	^{234}Pa	234	6 h.45	ß	expulse un électron
Uranium 234	92	^{234}U	234	250'000 ans	α	perd un noyau d'hélium
Thorium 230	90	^{230}Th	230	80'000 ans	α	perd un noyau d'hélium
Radium 226	88	^{226}Ra	226	1'600 ans	α	perd un noyau d'hélium
Radon 222	86	^{222}Rn	222	4 jours	α	perd un noyau d'hélium
Polonium 218	84	^{218}Po	218	3 min.	α	perd un noyau d'hélium
Plomb 214	82	^{214}Pb	214	27 min.	ß	expulse un électron
Bismuth 214	83	^{214}Bi	214	20 min.	ß	expulse un électron
Polonium 214	84	^{214}Po	214	1 sec.	α	perd un noyau d'hélium
Plomb 210	82	^{210}Pb	210	21 ans	ß	expulse un électron
Bismuth 210	83	^{210}Bi	210	5 jours	ß	expulse un électron
Polonium 210	84	^{210}Po	210	138 jours	α	perd un noyau d'hélium
Plomb 206	82	^{206}Pb	206	totalement insensible à la maladie		

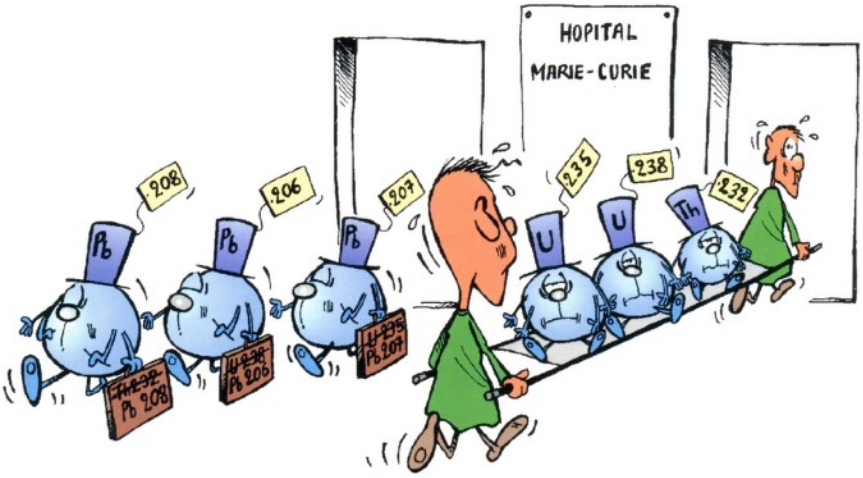
** nom de jeune fille de Marie Curie*

Schéma de la décroissance radioactive de l'uranium 235

Feuille de maladie			Dr. Marie Sklodowska			
Nom du patient : Uranium 235			*symptômes :*		*lourdeurs, fièvre, nausées*	
Symbole :	^{238}U		*diagnostic :*		*décroissance radioactive congénitale à longue période d'incubation (704 millions d'années).*	
Nb. protons :	*92*					
Nb. neutrons :	*146*					
Etat	*N° atomique*	*Symbole*	*Poids*	*Rémission*	*Emission*	*Symptôme*
Uranium 235	*92*	^{235}U	*235*	*704 x 10^6 ans*	α	*perd un noyau d'hélium*
Thorium 231	*90*	^{231}Th	*231*	*25.5 heures*	ß	*expulse un électron*
Protactinium 231	*91*	^{231}Pa	*231*	*33'000 ans*	α	*perd un noyau d'hélium*
Actinium 227	*89*	^{227}Ac	*227*	*21.8 ans*	ß	*expulse un électron*
Thorium 227	*90*	^{227}Th	*227*	*18.7 jours*	α	*perd un noyau d'hélium*
Radium 223	*88*	^{223}Ra	*223*	*11.4 jours*	α	*perd un noyau d'hélium*
Radon 219	*86*	^{219}Rn	*219*	*4 secondes*	α	*perd un noyau d'hélium*
Polonium 215	*84*	^{215}Po	*215*	*1.8 ms.*	α	*perd un noyau d'hélium*
Plomb 211	*82*	^{211}Pb	*211*	*36.1 min.*	ß	*expulse un électron*
Bismuth 211	*83*	^{211}Bi	*211*	*2.1 min.*	α	*perd un noyau d'hélium*
Thalium 207	*81*	^{207}Tl	*207*	*4.77 min.*	ß	*expulse un électron*
Plomb 207	*82*	^{207}Pb	*207*	*totalement insensible à la maladie*		

Schéma de la décroissance radioactive du Thorium 232

Feuille de maladie			Dr. Marie Sklodowska			
Nom du patient : Thorium 232			*symptômes :*		*lourdeurs, fièvre, nausées*	
Symbole : *Nb. protons :* *Nb. neutrons :*	^{232}Th *92* *143*		*diagnostic :*		*décroissance radioactive congénitale à longue période d'incubation (14 milliards d'années).*	
Etat	*N° atomique*	*Symbole*	*Poids*	*Rémission*	*Emission*	*Symptôme*
Thorium 232	*90*	^{232}Th	*232*	*14 x 10^9 ans*	*α*	*perd un noyau d'hélium*
Radium 228	*88*	^{234}Th	*228*	*5.75 ans*	*ß*	*expulse un électron*
actinium 228	*89*	^{234}Pa	*228*	*6 h.15*	*ß*	*expulse un électron*
Thorium 228	*90*	^{234}U	*228*	*1.19 ans*	*α*	*perd un noyau d'hélium*
Radium 224	*88*	^{230}Th	*224*	*3.63 jours*	*α*	*perd un noyau d'hélium*
Radon 220	*86*	^{226}Ra	*220*	*55.6 s.*	*α*	*perd un noyau d'hélium*
Polonium 216	*84*	^{222}Rn	*216*	*0.145 s.*	*α*	*perd un noyau d'hélium*
Plomb 212	*82*	^{218}Po	*212*	*10.64 h.*	*ß*	*expulse un électron*
Bismuth 212	*83*	^{214}Pb	*212*	*60.55 min.*	*ß*	*expulse un électron*
Polonium 212	*84*	^{214}Bi	*212*	*0.3 µs*	*α*	*perd un noyau d'hélium*
Plomb 208	*82*	^{214}Po	*208*	*totalement insensible à la maladie*		



Après une longue maladie, les membres des familles Uranium et Thorium ont été transmutés et adoptés par la famille Plomb.

Les isotopes du plomb

Le plomb possède 4 isotopes stables : ^{204}Pb (1.4 % des atomes), ^{206}Pb (24.1%), ^{207}Pb (22.1 %) et ^{208}Pb (52.4 %). Seul ^{204}Pb n'est pas radiogénique.

^{206}Pb est le stade final de la décroissance radioactive de ^{238}U,

^{207}Pb est le stade final de la décroissance radioactive de ^{235}U,

^{208}Pb est le stade final de la décroissance radioactive de ^{232}Th.

D'autres familles aussi sont sujettes à la maladie

D'autres familles aujourd'hui disparues ont été victimes de cette maladie. Prenons les cas des familles Technétium et Prométhéum que nous avons déjà signalées précédemment. Elles existaient au moment de la formation du système solaire. Mais en ce qui les concerne, la maladie a été foudroyante, la période de rémission étant d'un million et demi d'années pour l'un, deux ans et demi pour l'autre. Ces deux éléments se sont transformés en Ruthénium (Ru) pour l'un et en Samarium (Sm) pour l'autre.

^{98}Tc évolue vers ^{98}Ru avec une période de rémission de 1,5 million d'années.

^{147}Pm évolue vers ^{147}Sm avec une période de rémission de 2,5 ans.

Deux familles prématurément disparues pour cause de décroissance radioactive foudroyante.

Il y a le cas intéressant aussi de la famille Radium. Cette famille aurait dû disparaître depuis longtemps car son cas aussi est foudroyant : il se transmute très rapidement en plomb 206.

^{226}Ra évolue vers le ^{206}Pb avec une période de rémission de 1'600 ans.

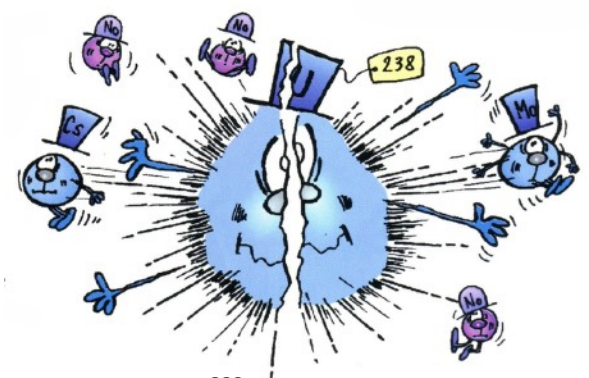
Mais on rencontre tout de même des représentants de cette famille, car elle constitue un stade intermédiaire de la maladie de ^{238}U. L'apparition par transmutation de ^{238}U en membres de la famille Radium leur assure une présence éphémère dans le monde des Atomes : ceux qui disparaissent sont remplacés par ceux qui apparaissent ! D'autres cas existent encore, mais ce n'est pas utile de les décrire tous ici.

Une autre maladie génétique : la fission des atomes

La fission spontanée des atomes

Les familles Uranium et Thorium souffrent aussi d'une autre maladie génétique, heureusement beaucoup plus rare que la décroissance radioactive: la ***fission spontanée des atomes****. Cette maladie se manifeste par la rupture brutale du noyau de l'atome atteint, accompagnée d'une fièvre colossale. Les deux fragments produits sont projetés avec une extrême violence, loin l'un de l'autre, constituant comme stade final deux atomes plus petits.*

Heureusement pour ceux qui sont sujets à cette affection, la période de rémission est très longue, largement supérieure à des millions de milliards d'années. Cela signifie pour eux, que la probabilité de disparaître par décroissance radioactive, la maladie la plus courante, est au moins un million de fois plus grande que celle d'être atteints par la fission spontanée.

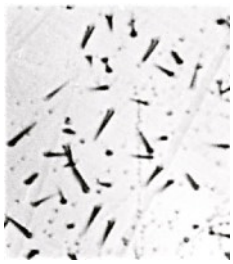


L'Uranium 238 (^{238}U) peut être victime de la fission spontanée, une maladie heureusement beaucoup plus rare que la décroissance radioactive.

Les minéraux peuvent enregistrer la fission spontanée de ^{238}U

L'uranium est omniprésent en faible quantité dans les roches de composition granitique. On le trouve piégé dans les minéraux accessoires de ces roches, principalement dans le zircon et dans l'apatite. Lorsqu'un atome de 238U subit la fission, les deux fragments produits s'éloignent l'un de l'autre à grande vitesse et provoquent une lésion dans le réseau cristallin du minéral hôte. Autour de cette lésion, la solubilité du minéral vis-à-vis d'un agent corrosif est plus importante que dans la région saine. On peut donc "révéler" par une attaque chimique appropriée la densité des événements de fission enregistrés dans le minéral.

Traces de fission développés sur une surface polie d'un cristal d'apatite, traitée à l'acide chlorhydrique.



Chaque trace correspond à la fission d'un seul atome de ^{238}U.

La fission induite des atomes

On ne parlerait même pas de cette fission, si les Terriens ne s'étaient aperçus que cette maladie provoquait une grosse fièvre, dégageait une quantité colossale d'énergie et, surtout, qu'ils pouvaient à leur gré accélérer son évolution d'une manière vertigineuse.

C'est ainsi que les Terriens ont réussi à inoculer cette terrible maladie à quelques familles d'atomes, principalement aux divers membres de la famille Uranium.

Le virus est un neutron. L'isotope ^{235}U peut absorber un tel neutron si celui-ci ne se déplace pas trop vite (on parle de neutron lent ou de neutron thermique).

Le virus est un neutron.

Mécanisme de la maladie

Après qu'on lui ait inoculé un neutron, le pauvre ^{235}U s'alourdit d'un gron, se transformant en ^{236}U, un gros lourdaud de la famille Uranium qui n'arrive plus à maintenir toutes ensembles les particules de son noyau. Comme une goutte d'eau qui devient trop grosse et se divise en deux gouttelettes plus petites, le pauvre ^{236}U éclate et se fragmente en deux atomes plus petits, expulsant en même temps deux ou trois neutrons rapides.

...puis il se partage en deux atomes plus petits, libérant du même coup quelques neutrons. Cet accès brutal dégage beaucoup d'énergie. Ici, les 2 éléments produits sont le molybdène 97 (^{97}Mo)et le barium 137 (^{137}Ba).

Un amaigrissement incompréhensible, une énergie colossale !

Si l'on pèse les deux atomes nouveaux plus les deux ou trois neutrons produits, on a la surprise de constater qu'on n'arrive pas tout à fait aux 236 grons que pesait notre patient ^{236}U juste avant sa crise. Il y a donc eu disparition d'un petit peu de matière au cours de cette fission. Et nous savons, grâce à Einstein, que cette matière s'est transformée en énergie selon la relation fameuse:

$$E = m \times c^2$$

Ce qui signifie en clair :

l'Energie [E] est égale à la masse disparue [m]
multipliée par le carré de la vitesse de la lumière [c^2]

La maladie s'accompagne d'une légère diminution de masse.

Cette maladie produit environ 200 millions de fois plus d'énergie par atome éclaté que celle que peut produire une molécule dans la réaction chimique la plus violente ! Voilà donc un procédé bien séduisant pour se procurer de grandes quantités d'énergie !

Mais que deviennent les neutrons ?

En inoculant un neutron dans le noyau du pauvre ^{235}U, on a provoqué sa fission, libéré de l'énergie et il reste en surplus 2 ou 3 neutrons errants[1]. Que vont-ils devenir? Ils sont expulsés dans la matière à grande vitesse. Comme ils sont neutres, ils ne sont pas influencés pas les orbites électroniques des atomes qu'ils pourraient rencontrer et, pour provoquer une nouvelle fission, ils doivent frapper de plein fouet un noyau de ^{235}U. Mais la cible est très petite et la probabilité de rencontrer un noyau d'Uranium pour le briser en deux demeure extrêmement faible. Par ailleurs, les neutrons sont eux-mêmes atteints de décroissance radioactive foudroyante qui les transforme très rapidement en un proton plus un électron[2].

On peut tout de même influencer la chance !

Les Terriens sont astucieux et savent modifier cette probabilité de fission de ^{235}U par un neutron en combinant deux actions :

---

[1] *appelés neutrons prompts par les physiciens*

[2] *il faut encore mentionner l'émission d'un neutrino, cette particule quasi indétectable qui emporte une partie de l'énergie dégagée.*

1. *En augmentant la concentration des atomes de ^{235}U.*

   Dans l'uranium naturel extrait des mines, il n'y a que 0.7% de ^{235}U contre 99.3 % de ^{238}U. On procède alors à l'enrichissement en ^{235}U dans de coûteuses usines, ce qui augmente le nombre de cibles par unité de volume. Pour les usages courants, on l'enrichit généralement aux alentours de 3%. On peut augmenter cet enrichissement autant qu'on le désire. Mais on ne le fait effectivement qu'à la demande des militaires, qui en ont besoin pour des usages bien particuliers.

2. *En ralentissant les neutrons*

   Les neutrons produits dans une réaction de fission sont trop rapides pour espérer pouvoir accrocher au passage un autre ^{235}U. Aussi va-t-on, à l'aide d'un modérateur, les ralentir pour les rendre plus "virulents". On place sur leur passage des atomes légers, Messieurs Hydrogène, Béryllium ou Carbone, par exemple. Les chocs successifs avec ces atomes légers vont augmenter la vitesse de ces derniers et ralentir les neutrons. Dans les centrales actuelle le modérateur est de l'eau dont l'hydrogène participe au ralentissement des neutrons.

En combinant ces deux conditions, on augmente l'efficacité des neutrons errants. Il devient alors possible de réaliser et d'entretenir une réaction en chaîne et, si on sait la contrôler, on peut du même coup construire une centrale nucléaire!

Comment fonctionne une centrale nucléaire

Les centrales nucléaires peuvent différer les unes des autres par les caractéristiques du combustible, par la nature du milieu ralentisseur de neutrons, et par le système d'échangeur de chaleur entre le réacteur et la turbine. Mais le principe du fonctionnement est toujours à peu près le même. Les atomes de ^{235}U se transforment ^{236}U par absorption d'un neutron. Extrêmement instable ^{236}U se scinde en deux atomes plus légers en émettant au cours de cette réaction deux ou trois neutrons rapides. Ces derniers sont ralentis par l'eau, leur permettant de réagir plus facilement avec d'autres atomes de ^{235}U.

Le combustible est constitué de barres d'uranium enrichi à environ 3 % de ^{235}U. Ces barres sont plongées dans de l'eau qui ralentit (grâce à M. Hydrogène) les neutrons émis par la fission d'atomes de ^{236}U, leur permettant à leur tour de provoquer la fission d'autres atomes. Ces réactions de fission dégagent une chaleur énorme qui permet de produire la vapeur nécessaire au fonctionnement d'une turbine, qui entraîne à son tour un générateur électrique. Dans ce schéma, l'eau joue le rôle double de modérateur de neutrons et de liquide caloporteur qui permet le transfert de l'énergie vers la turbine.

Pour arrêter la réaction, on laisse tomber dans le réacteur des barres de bore ou de cadmium qui ont la propriété d'absorber les neutrons et, par conséquent, d'interrompre la réaction.

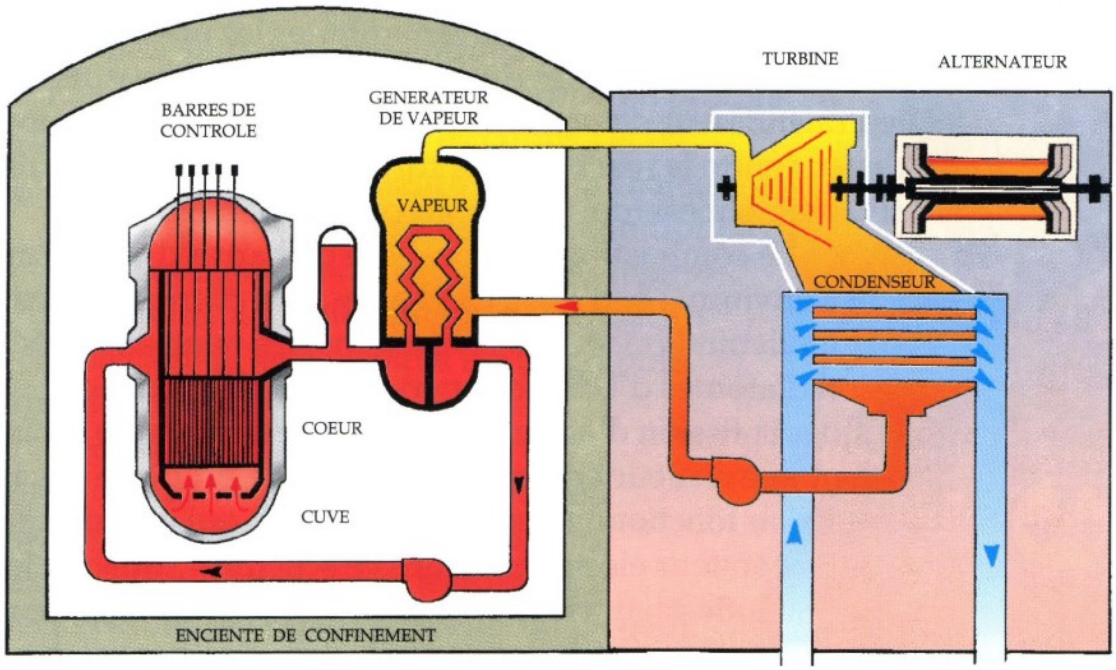


Schéma simplifié d'une centrale nucléaire

Mais où sont donc les déchets nucléaires ?

Si nous reprenons le cours de la maladie du pauvre ^{235}U, nous avons vu qu'après avoir absorbé un neutron et s'être transformé en ^{236}U, il se scindait en deux autres atomes plus légers. Quels sont donc ces atomes ? Les expériences montrent que chaque atome de ^{236}U peut se scinder de manière différente en donnant des paires de fragments de fission dont les poids atomiques sont compris généralement entre 72 et 166. Par exemple, on peut trouver la réaction :

$$^{235}U + n \rightarrow {}^{236}U \rightarrow {}^{93}Kr + {}^{140}Ba + 3\,n \qquad \text{ou encore :}$$

$$^{235}U + n \rightarrow {}^{236}U \rightarrow {}^{94}Sr + {}^{140}Xe + 2\,n$$

ce qui signifie qu'après avoir absorbé un neutron, l'uranium 235 s'est transformé en uranium 236 qui s'est immédiatement scindé soit en krypton, baryum et trois neutrons, soit en strontium, xénon et 2 neutrons. Ces exemples ne sont pas les seuls possibilités de fission mais font partie de la bonne trentaine d'éléments bien connus des services de l'Etat-civil du monde des atome. L'inconvénient est qu'il ont tous la désagréable propriété de comporter une trop forte proportion de neutrons par rapport au nombre habituel que comporte leur famille.

Ce sont donc des isotopes lourds de familles d'atomes bien connus. Ils n'existent généralement pas dans la nature et sont des isotopes artificiels issus de la fission induite des atomes.

Les déchets nucléaires sont non seulement radioactifs, mais ils dégagent aussi passablement de chaleur.

Il sont tous instables et atteints de décroissance radioactive[1]. Ce sont eux qui constituent les déchets nucléaires indésirables! Les neutrons excédentaires vont, plus ou moins rapidement, se transformer en protons en expulsant des particules β (des électrons) et en dégageant un fort rayonnement γ et de la chaleur.

Certains produits de fission atteindront leur état stable en quelques minutes, quelques heures ou quelques jours. Ils sont hautement radioactifs mais l'évolution de leur maladie est très rapide.

D'autres mettront des années ou des millénaires pour voir enfin leur activité diminuer de manière sensible. Ils sont peu radioactifs, mais ils le demeureront encore longtemps !

Par ailleurs cette décroissance radioactive dont, je vous le rappelle, on ne peut pas modifier la vitesse d'évolution, dégage beaucoup de chaleur qu'il faut évacuer de la centrale pendant longtemps encore après l'arrêt de la réaction de fission. C'est la raison pour laquelle on stocke le combustible usagé plusieurs mois, voire même plusieurs années dans une piscine avant de le retraiter.

Un réacteur naturel, il y a près de 2 milliards d'années

Au cours de l'exploitation du gisement d'uranium d'Oklo, au Gabon, les scientifiques ont constaté un appauvrissement anormal de la teneur de l'isotope ^{235}U. Une étude plus attentive a pu démontrer qu'une réaction en chaîne avait eu lieu il y a 1.7 milliard d'années et qu'un réacteur nucléaire avait fonctionné naturellement. En faits, toutes les conditions nécessaires au fonctionnement d'un réacteur avaient été réunies :

- *la concentration en ^{235}U était à l'époque d'environ 3.5 %, ce qui est approximativement la teneur des réacteurs actuels,*
- *le gisement était à haute teneur en uranium,*
- *une remontée de la nappe phréatique avait apporté l'eau nécessaire pour assurer le rôle de modération des neutrons.*

Concentration de minerai d'uranium dans le gisement d'Oklo au Gabon

---

1 Certains produits de fission sont aussi producteurs de neutrons différés (ou retardés), tel $^{87}Kr \rightarrow {}^{86}Kr + n$. Ces neutrons, bien que peu nombreux, jouent un rôle très important dans le contrôle de la réaction en chaîne.

Et si la réaction s'emballait ?

Les neutrons se déplacent à grande vitesse et, par le fait qu'ils n'ont aucune charge électrique, ils passent à travers les nuages électroniques des atomes sans les perturber. Il faut vraiment qu'ils heurtent le noyau d'un atome d'Uranium pour s'y incorporer. Or les noyaux étant des millions de fois plus petits que les atomes eux-mêmes, les neutrons peuvent traverser une certaine masse d'uranium sans rencontrer un noyau et fuir hors de la matière. Pour augmenter la probabilité de collision, il faut augmenter la concentration de l'uranium naturel en ^{235}U ou ralentir les neutrons, ou encore combiner ces deux actions.

Ainsi donc, si on réussit à rassembler une masse suffisamment importante ^{235}U débarrassé de son cousin ^{238}U (enrichissement à 100 %), on peut provoquer une réaction en chaîne. Cela signifie que, dès qu'il y a fission spontanée d'un seul atome, les neutrons produits vont à leur tour provoquer la fission d'autres atomes voisins, qui libèrent à leur tour de nouveaux neutrons qui vont provoquer d'autres fissions. Le nombre des événements de fission se multiplie alors avec une vitesse prodigieuse, dégageant une énergie colossale dans un laps de temps très court : c'est une **explosion nucléaire** *! Heureusement pour nous, ces conditions ne sont jamais remplies dans les centrales nucléaires et toute explosion nucléaire y est impossible !*

La masse nécessaire pour qu'il y ait réaction en chaîne s'appelle la ***masse critique****. Cette masse est de l'ordre d'une vingtaine de kg pour ^{235}U. Nous avons donc en main tous les éléments pour construire une bombe atomique :*

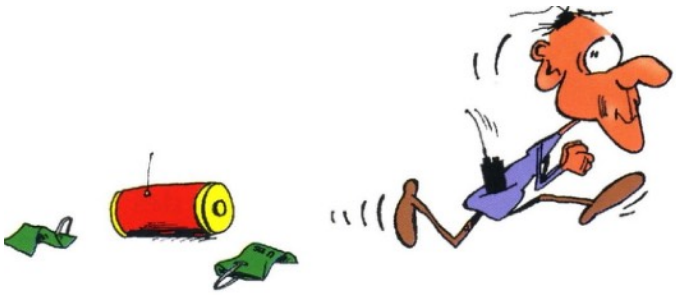
Recette pour construire une bombe atomique

- *Procurez-vous un peu de ^{235}U en quantité légèrement supérieure à la masse critique, tout en prenant la précaution de maintenir cet uranium en deux paquets séparés;*
- *disposez les deux moitiés de la masse de ^{235}U aux deux extrémités intérieures d'un solide tube court;*
- *prévoyez un système télécommandé qui rapproche brutalement les deux moitiés de ^{235}U l'une contre l'autre, au moyen d'une charge explosive, par exemple.*
- *Eloignez-vous à une distance raisonnable.*
- *Actionnez !*

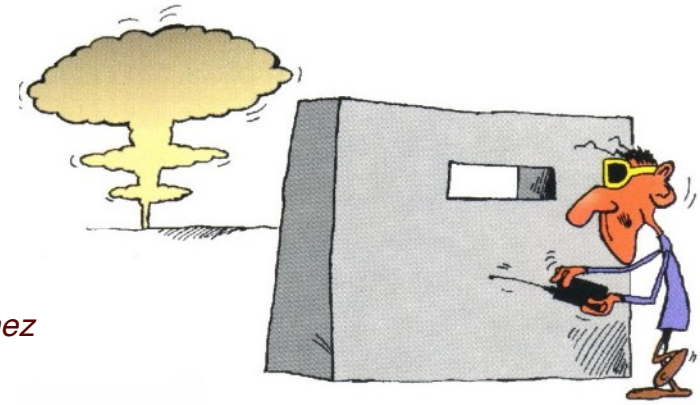
1- Procurez vous un peu de ^{235}U en quantité un peu supérieure à la masse critique, tout en prenant soin de maintenir cet uranium en deux paquets séparés.

2- Disposez les deux moitiés de ^{235}U aux deux extrémités intérieures d'un tube court.

3- Prévoyez un système télécommandé qui rapproche brutalement les deux moitiés de ^{235}U l'une vers l'autre. Au moyen d'un explosif puissant, par exemple.



4- Eloignez-vous à une distance raison-



5- Actionnez !

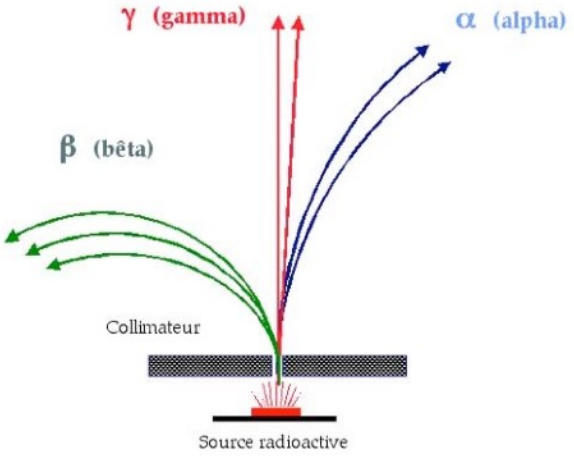
Fort heureusement ce n'est pas si facile

Cette recette est toute théorique et je vous déconseille de l'essayer car, en pratique, les choses sont (heureusement) beaucoup plus complexes. Tout d'abord le point [1] de la recette est difficile à réaliser car la production de matière fissile en quantité suffisante implique une technologie sophistiquée, des usines immenses, et une énorme quantité d'énergie. Personne ne peut donc produire discrètement de ^{235}U fortement enrichi. Le point [3] est également très difficile à réaliser car, si on ne rapproche pas suffisamment rapidement les deux demi-portions de ^{235}U, la réaction en chaîne ne peut pas se produire. En effet, la fission commence déjà au cours du rapprochement des deux moitiés de ^{235}U, et la chaleur dégagée est si grande qu'elle fond puis volatilise le combustible avant même que la masse critique ait pu être réunie.

———————————

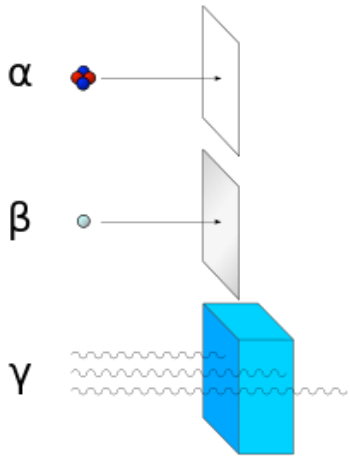
Redevenons sérieux

Nature du rayonnement



Nous avons vu qu'Ernest Rutherford avait décelé dans le flux de la radioactivité trois sortes de rayonnement :

- *les rayons alpha, constitués de particules chargées positivement, relativement massives, qui se sont révélées être des noyaux d'hélium, soit 2 neutrons et 2 protons. Ces particules sont expulsées du noyau à des vitesses comprises entre 15'000 et 20'00 km/seconde. Une feuille de papier ou quelques centimètres d'air suffisent à les arrêter. Leur énergie est variable et dépend du noyau qui les a expulsés.*
- *les rayons bêta, constitués d'électrons qui sont expulsés du noyau à environ 270'000 km/seconde. Ils sont arrêtés par une feuille d'aluminium de quelques millimètre d'épaisseur ou une couche d'air de quelques mètres.*
- *les rayons gamma, non porteurs de charges, et de nature semblable à celle des rayons X. Ils se déplacent à la vitesse de la lumière. Ils sont très pénétrants et transmettent toutes leur énergie à la matière qu'ils traversent. Cette énergie peut être très importante suivant la source émettrice.*



Les particules α sont peu pénétrantes et sont arrêtées par une simple feuille de papier.

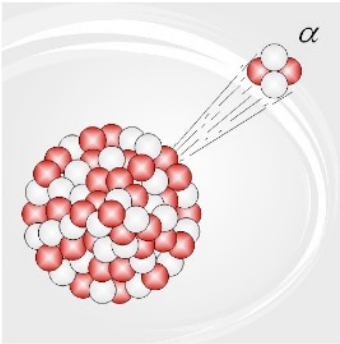
Les particules ß sont arrêtées par une feuille d'aluminium

Les rayons γ sont très pénétrants et leur énergie est transmise à la matière qu'ils traversent. Ils sont arrêtés par un écran de plusieurs centimètres de plomb. (Extrait de Wikipedia)

Les particules alpha (α)

Les particules alpha possèdent une énergie comprise entre 3 et 7 MeV. C'est une énergie relativement élevée. Mais comme elles ont aussi une masse élevée, cette énergie se trouve sous forme d'énergie cinétique, ce qui leur confère des vitesses comprises entre 15'000 et 20'000 km/s.

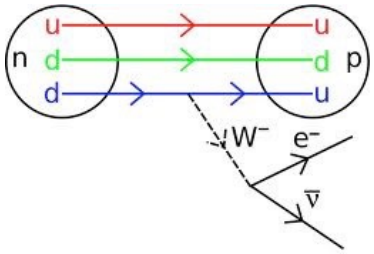
Elles sont facilement absorbées et ne parcourent que quelques centimètres dans l'air. Elles sont arrêtées par une simple feuille de papier. Par contre, si une source de rayon-



nement alpha pénètre dans le corps humain elle peut provoquer des dégâts importants aux chromosomes à cause de leur pouvoir ionisant important.

Ainsi le Polonium 210 (^{210}Po), un isotope qui est un produit intermédiaire dans la chaine de désintégration de l'Uranium, est un puissant émetteur de particules alpha. C'est un poison puissant et son ingestion provoque des dégâts irréversibles sur l'organisme humain et conduit rapidement à la mort. L'actualité politique nous en a donné des exemples !

Les particules bêta ($ß^-$)



C'est un excès de neutrons au sein d'un noyau qui entraîne la transformation d'un neutron en proton sous l'effet de l'interaction faible. Avec l'aide de son agent, le boson W^-, elle provoque la transformation d'un quark down en un quark up avec émission d'un électron (une particule bêta) et d'un neutrino (en réalité un antineutrino). Cette particule bêta ($ß^-$) est expulsée à une vitesse proche de 270'000 km/s.

Il y a aussi des particules bêta ($ß^+$)

Dans quelques cas, on assiste à la transformation d'un proton en neutron qui provoque l'émission d'un électron positif, un positron (ß+). C'est un quark up qui se transforme en un quark down avec émission d'un positon et d'un neutrino. La force faible se manifeste alors au travers du boson W+.

Les rayons gamma (γ)

C'est un rayonnement électromagnétique semblable aux rayons X, mais de beaucoup plus puissant. Il est produit par la désexcitation du noyau atomique qui se réarrange à la suite d'une désintégration. L'énergie des rayons gamma est comprise entre quelques keV et plusieurs centaines de GeV.

Tout comme l'énergie d'un photon témoigne de la chute d'un électron d'une orbite à une autre, la désexcitation du noyau procède par saut d'un état à un autre et l'énergie du photon gamma émis par un noyau radioactif porte la signature du noyau émetteur. On peut donc identifier les atomes émetteurs de rayons gamma en mesurant l'énergie de leur rayonnement.

Les rayons gamma sont beaucoup plus pénétrants que les particules alpha et bêta. Ils peuvent provoquer sur l'organisme des brûlures, des cancers et des mutations génétiques.

Principe de la détections des particules

Les diverses méthodes de détection de la radioactivité sont fondées sur les effets qu'elle produit sur la matière. Ainsi, les divers composants de la radioactivité ont pour effet :

- *de ioniser les gaz sur leur passage,*
- *de rendre fluorescentes certaines substances,*
- *de noircir les émulsions photographiques.*

Le compteur Geiger-Müller *a été imaginé par Hans Geiger en 1913 et mis au point par Walther Müller en 1928. Il est basé sur le principe de l'ionisation d'un gaz.*

C'est un tube métallique cylindrique au centre duquel est tendu un fil métallique. Il est rempli d'un gaz sous faible pression. Une tension d'environ 1000 volts règne entre le tube et le fil. Au passage d'un rayon ionisant (rayons alpha, bêta, gamma, rayons X) le gaz est ionisé et les électrons arrachés se multiplient, rendant le gaz conducteur et une décharge a lieu entre les deux électrodes, induisant un déclic sonore. Le courant détecté agit aussi sur l'aiguille d'un galvanomètre. Ce détecteur permet de compter une à une les particules qui traversent le tube. L'intensité de la radioactivité se manifeste par le nombre de clics par seconde. L'intensité du crépitement est proportionnel à l'intensité du rayonnement ionisant. Le compteur Geiger-Müller ne détecte pas les neutrons.

Les compteurs à scintillation *utilisent la propriété de certaines substances de devenir fluorescentes au passage d'un rayonnement. Un détecteur à scintillation amplifie le signal et compte les photons émis par le détecteur, ce qui permet de mesurer l'intensité du rayonnement.*

La radiographie *utilise la propriété des émulsions photographiques de réagir sous l'effet de rayons ionisants. Son utilisation en médecine est bien connue avec les appareils à rayons X.*

Les dosimètres *mesure la dose radioactive cumulée à laquelle une personne a été exposée pendant une durée de temps déterminée. Ils utilisent diverses techniques. Une des plus utilisée repose sur la capacité de certains sels de piéger les charges provoquées par les rayons ionisants. La lecture se fait sous l'impulsion de flash extérieurs qui libèrent les électrons piégés et induit une lumière qui est proportionnelle à la dose d'irradiation reçue.*

Les unités de mesure de la radioactivité

On utilise trois unités de mesure de la radioactivité suivant qu'on considère l'activité d'une source radioactive, la dose reçue par le corps humain ou les effets biologiques provoqués par le rayonnement. Ces trois unités sont :

- *le Becquerel [Bq] qui mesure l'activité d'une substance radioactive. Il correspond à une désintégration par seconde. C'est une unité très petite aussi utilise-t-on des multiples : kilobecquerel, mégabecquerel, etc.. Il a remplacé le curie [Ci], une ancienne unité[1]. Cette*

---

[1] *unité ancienne correspondant à l'activité de 1 g de radium 226. Il correspond à 3.7 x 10^{10} désintégrations par seconde.*

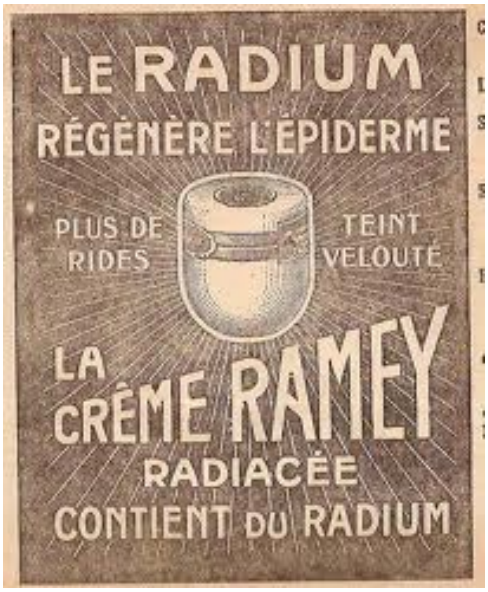
unité nous renseigne sur le nombre de désintégrations mais ne donne aucune indication ni sur l'énergie du rayonnement ni sur leur effet sur l'homme.

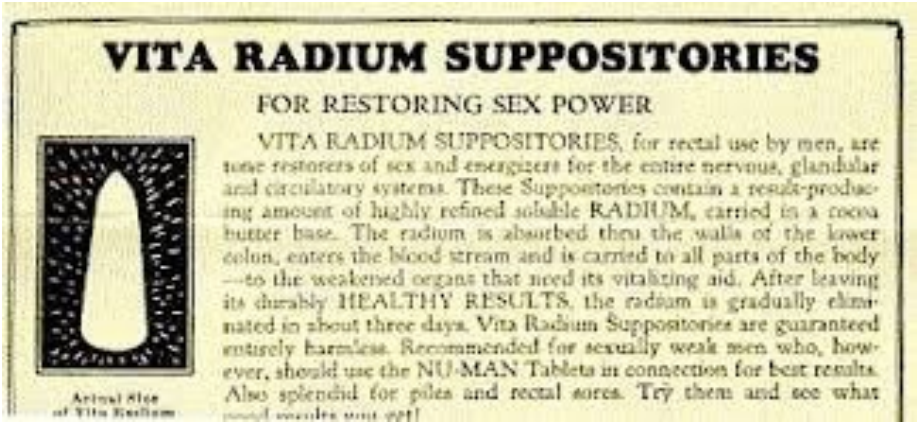
- *le Gray [Gy] qui mesure la dose radioactive reçue par le corps. Il correspond à l'absorption de un joule par masse de 1 kg.*
- *le Sievert [Sv] qui mesure l'effet biologique provoqué par un rayonnement ionisant. Il mesure donc la dose reçue. Il est équivalent à un Gray mais doit être pondéré par les effets la nature du rayonnement qui ne sont pas le mêmes suivant qu'il s'agit de protons ou de rayons gamma.*

Folies autour de la radioactivité

Peu après la découverte de la radioactivité, de très nombreuses firmes commerciales ont mis sur le marché de nombreux produits radioactifs censés apporter de nombreux bienfaits pour le corps. La médecine s'en empare et de nombreuses médications à base de radium sont prescrites pour toutes sortes d'affections. Les crèmes de beauté radioactives, les boissons radioactives, savons radioactifs, chocolats au radium envahissent le marché. On proposait même des suppositoires au radium sensés revigorer la sexualité !

On n'avait encore aucune idée sur les effets dangereux des substances radioactives et personne ne connaissait encore les effets des substances ionisantes sur les tissus vivants.





VITA RADIUM SUPPOSITORIES

FOR RESTORING SEX POWER

VITA RADIUM SUPPOSITORIES, for rectal use by men, are tone restorers of sex and energizers for the entire nervous, glandular and circulatory systems. These Suppositories contain a result-producing amount of highly refined soluble RADIUM, carried in a cocoa butter base. The radium is absorbed thru the walls of the lower colon, enters the blood stream and is carried to all parts of the body —to the weakened organs that need its vitalizing aid. After leaving its durably HEALTHY RESULTS, the radium is gradually eliminated in about three days. Vita Radium Suppositories are guaranteed entirely harmless. Recommended for sexually weak men who, however, should use the NU-MAN Tablets in connection for best results. Also splendid for piles and rectal sores. Try them and see what good results you get!

Actual Size of Vita Radium

Origine des éléments chimiques

L'univers est dynamique

La grande surprise des astrophysiciens du vingtième siècle est d'avoir découvert que l'Univers était en expansion : les galaxies lointaines s'éloignent de nous. Elles s'éloignent d'autant plus rapidement qu'elle sont plus éloignées. Toutes les observations actuelles confirment ce phénomène. C'est comme si nous nous trouvions à l'intérieur d'une gigantesque explosion !

Si on fait marcher le film à l'envers, force est de constater que l'Univers a eu un commencement, il y a 13.8 milliards d'années. Cette origine cataclysmique de l'Univers a été désigné par les astrophysiciens sous le nom de Big-Bang.

A l'aube du Big-Bang

Au cours des premières fractions de secondes de son d'existence, notre Univers était dans un état qui dépasse toute imagination : cet embryon d'univers devait avoir une masse volumique de plusieurs milliers de tonnes par cm^3 et la température devait dépasser 100 milliards de degrés.

Durant ces premiers instants, ce proto univers consistait en une "soupe" de photons possédant une énergie colossale, de quarks, de gluons, d'électrons, de positrons et de neutrinos.

Mais très vite, la température va diminuer et l'interaction forte impose le confinement des quarks trois par trois pour former des neutrons et des protons, ou deux par deux (un quark et un anti-quark) pour former des mésons, particules extrêmement instables. Après un dixième de seconde, la température s'est déjà abaissée à 30 milliards de degrés.

Lorsque deux photons se rencontraient, ils convertissaient leur énergie en matière : un électron et un anti-électron (un positron), un proton et un antiproton ou un neutron et un antineutron. Il y avait à peu près autant de particules que d'antiparticules, donc de matière et d'antimatière. Immédiatement, une particule s'annihilait au contact de son antiparticule pour redonner deux photons énergétiques. Il y avait en permanence un bouillonnement dans lequel les photons se transformaient en particules et les particules en photons.

Mais, très vite, avec l'abaissement de la température due à l'expansion de ce proto univers, les photons n'ont plus eu suffisamment d'énergie pour créer des protons et des neutrons et leurs antiparticules. Ces derniers finirent donc par s'annihiler, en achevant de s'autodétruire, particules contre antiparticules. Toutefois, les photons possédaient encore assez d'énergie pour créer des électrons et les positrons et, avec un peu de retard, le même mécanisme provoqua l'annihilation des électrons et des positrons.

Mais un mystère subsiste

Un mystère, non encore résolu par les physiciens, fit apparaître une légère asymétrie entre les quantités de matière et d'antimatière. L'antimatière disparut complètement et

une très petite quantité de matière subsista. C'est cet infime résidu de matière qui constitue aujourd'hui notre Univers.

Cet Univers primitif était donc rempli de protons et de neutrons, en nombre à peu près égal. Mais les neutrons en liberté n'ont qu'une espérance de vie d'une quinzaine de minutes alors que les protons semblent immortels. La proportion neutrons/protons va donc rapidement diminuer avec le temps et on a calculé que, lorsque la température était de un milliard de degrés, la proportion de neutron envers les protons était environ de 1 à 6.

A cette température, l'interaction forte va devenir importante et elle va se manifester en rassemblant protons et neutrons en des noyaux d'atomes très simples : c'est le début de la nucléosynthèse. Les neutrons deviennent alors stables lorsqu'ils sont inclus dans un noyau d'atome. Les combinaisons sont simples. En voici quelques unes :

$p + n \rightarrow D$ ***(le deutérium, un isotope rare de l'hydrogène)***

$D + n \rightarrow {}^{3}H$ ***(le tritium, un isotope rare de l'hydrogène)***

$D + p \rightarrow {}^{3}He$ ***(un isotope rare de l'hélium)***

$D + D \rightarrow {}^{4}He$ ***(un noyau d'hélium)***

Une série de combinaisons analogues à celles décrites ci-dessus va aboutir essentiellement à la formation de noyaux d'hydrogène et d'hélium dans la proportion d'environ 75% pour l'hydrogène et 25% pour l'hélium, ainsi que quelques traces de lithium. L'univers était constitué alors essentiellement de lumière (les photons), de neutrinos, d'antineutrinos avec un petit nombre de noyaux d'hydrogène et d'hélium. Il faudra attendre encore quelques centaines de milliers d'années que l'Univers se soit suffisamment refroidi et que les électrons puissent s'unir avec les noyaux existant pour former de vrais atomes d'hydrogène et d'hélium.

Pour le reste, tout vient des étoiles

Si un observateur provenant d'une autre planète étudiait attentivement de son vaisseau spatial les images de nos rues et de nos places publiques, il pourrait reconstituer la vie des Terriens. Il pourrait identifier les nouveau-nés dans les bras de leur maman ou dans leur poussette, les adultes nombreux, les vieillards peinant avec leur canne. Ils pourraient ainsi reconstituer la vie des habitants de notre planète depuis leur naissance, estimer la durée de leur vie d'adulte et finalement constater leur déclin et leur disparition programmée.

C'est la même chose pour les étoiles

D'une manière analogue, les astrophysiciens parviennent à reconstituer la vie des étoiles en observant les différents stades qui caractérisent chacune d'entre elles. Pour chaque étoile on peut connaître :

- ***la température de sa surface qui se répercute directement sur sa couleur,***
- ***sa masse reflétée directement par sa luminosité.***
- ***sa composition chimique qui se reflète sur son spectre lumineux.***

A l'aide encore de nombreuses autres observations, les astrophysiciens sont parvenus à reconstituer la vie des étoiles.

Les petites ont une grande espérance de vie

Ils ont découvert que les très grosses étoiles ont une durée de vie très courte (quelques millions d'années) alors que les petites étoiles ont une grande espérance de vie (jusqu'à plus de cent milliards d'années). Ainsi, notre Soleil, qui est une étoile de taille moyenne, a une espérance de vie d'environ 10 milliards d'années. Toutes les étoiles ont des masses comprises entre environ 0.1 à plus de 100 fois la masse de notre Soleil.

Comment naît une étoile

A l'origine de l'Univers, les seuls éléments chimiques issus de l'explosion primordiale qu'a été le «Big-Bang» étaient l'hydrogène et l'hélium dans la proportion de 75% pour le premier et 25% pour le second. Les autres éléments ne sont apparus que plus tard et proviennent de l'évolution même des étoiles.

Dans l'Univers, on rencontre de gigantesques nuages de gaz, l'hydrogène et l'hélium. Sous l'effet d'une perturbation, des atomes se rapprochent les uns des autres, créant un champ d'attraction (la gravité) qui entraîne petit à petit la contraction du nuage gazeux. En se contractant, le nuage devient de plus en plus dense et la gravité qui augmente comprime de plus en plus cette boule de gaz qui s'effondre rapidement sur elle-même. La compression entraîne une augmentation de la température des couches profondes et lorsque ces dernières atteignent la température de 10 millions de degrés, une réaction nucléaire s'amorce qui va transmuter petit à petit l'hydrogène et hélium. Cette réaction nucléaire (la fusion nucléaire) dégage une énergie considérable et un équilibre s'établit entre les forces qui essayent de comprimer le gaz et la radiation énergétique de la réaction nucléaire. Une étoile est née qui rayonne son énergie dans l'espace intersidéral.

Destin du Soleil

C'est ce qui s'est passé il y a environ quatre milliards et demi d'années pour notre Soleil. Aujourd'hui une partie de l'hydrogène renfermé à l'intérieur du Soleil a déjà été transformé en hélium. Mais il ne faut pas désespérer : il y a encore suffisamment d'hydrogène pour maintenir le rayonnement du Soleil pendant un peu plus de quatre milliards d'années !

Mais lorsque le Soleil aura brûlé tout son hydrogène, plus rien n'empêchera la contraction de l'hélium de reprendre sous l'action des forces gravitationnelles. La température du cœur augmentera encore et lorsqu'elle atteindra 100 millions de degrés, une autre réaction nucléaire s'amorcera, qui transformera alors l'hélium en carbone. Sous l'effet de cette nouvelle réaction nucléaire et de la contraction des gaz qui ne s'arrête pas immédiatement, la température augmente encore et lorsqu'elle atteindra 250 millions de degrés la fusion de l'hélium s'emballera et dégagera une telle énergie que le Soleil va se mettre à enfler. Son diamètre atteindra environ 300 millions de kilomètres et sa surface virera au rouge : ce sera ce que les astrophysiciens appellent **une géante rouge.** *Elle absorbera les planètes Vénus et Mercure, et si la Terre parvient à échapper à cet engloutissement, tout y sera carbonisé.*

L'hélium s'épuisera alors assez rapidement et la contraction du Soleil reprendra. Mais la masse solaire est insuffisante pour que l'augmentation de la température puisse atteindre le niveau suffisant qui aurait permis de déclencher la réaction suivante, c'est à dire la fusion du carbone en oxygène et en néon.

La taille de notre Soleil va alors diminuer et il se transformera rapidement en une ***naine blanche****, un tout petit point lumineux dans le ciel.*

Le Soleil transformé en géante rouge, vue de la Terre par l'artiste B. Jacobs (Wikipedia)

Une naine blanche.

La fusion nucléaire, source d'énergie des étoiles

La fusion de l'hydrogène en hélium est la première source d'énergie des étoiles naissantes. C'est une réaction extrêmement exothermique qui entretient la plus longue partie de la vie d'une étoile. En simplifiant beaucoup, on peut décrire la réaction de fusion de l'hydrogène en hélium :

$$4p \rightarrow {}^{4}He + 2e^{+} + 2\nu + E \qquad \text{soit :}$$

4 protons → un atome d'hélium + 2 électrons[1] + 2 neutrinos + énergie

En réalité, la réaction de fusion est beaucoup plus complexe et la relation exposée ci-dessus est le résultat final d'une série de réactions intermédiaires.

Lorsque l'hydrogène est épuisé, l'étoile reprend son effondrement sur elle-même et, lorsque la température atteint 100 millions de degrés, l'hélium va fusionner à son tour en carbone. A chaque épuisement d'un combustible on voit apparaître un nouveau cycle de fusion nucléaire. Mais chaque nouveau cycle de fusion est moins exothermique que le précédent et le combustible s'épuise plus rapidement. Seules les étoiles très massives peuvent effectuer toutes les étapes.

Destin dramatique des grosses étoiles

Au cœur des étoiles très massives, l'augmentation de la température, qui est la conséquence de l'effondrement des couches extérieures, est énorme et entraîne la transmutation de l'hélium en carbone, puis en oxygène, en néon, en silicium et finalement en fer.

---

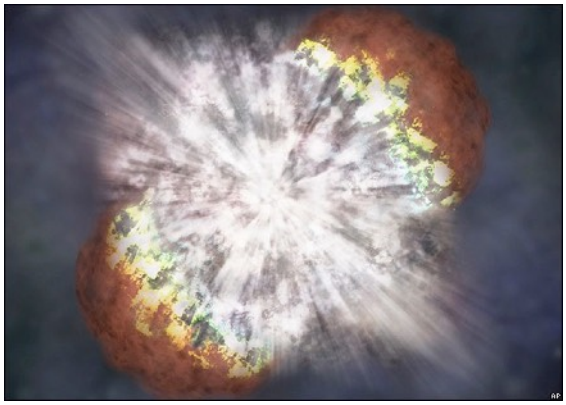
[1] *Ces électrons qui proviennent de la transformation de deux protons en neutrons.*

Ce dernier élément est le plus stable de la nature. Il ne peut plus se transmuter en d'autres éléments.

Une suite de réactions très complexes se produit alors et l'étoile massive explose dans un gigantesque feux d'artifice : c'est la ***supernova****.*

Les autres atomes naissent dans les supernovae

Au cours de cette explosion, les électrons pénètrent violemment dans le noyau des atomes, transmutant les protons en neutrons. Les neutrons libérés se propagent avec l'onde de choc, et réagissent très énergiquement avec les autres noyaux atomiques présents. Par addition rapide de neutrons, ils construisent à partir du carbone, l'oxygène, le silicium ainsi que pratiquement tous les éléments chimiques que nous connaissons. Ces éléments ainsi synthétisés ne représentent guère que 0,1 % de la masse éjectée. Cependant, c'est cette infime partie de matière qui constitue notre environnement d'aujourd'hui et a permis l'émergence de la vie !



Explosion d'une étoile de taille 150 fois supérieure à celle du Soleil.

Les supernovae engendrent des nébuleuses

Les cendres des supernovae, constituées des résidus de gaz et des poussières qui renferment maintenant tous les éléments chimiques, constituent de gigantesques nuages connus sous le nom de ***nébuleuses****. Ces nébuleuses sont des pépinières au sein desquelles de nouvelles étoiles, dite de seconde génération[1], vont prendre naissance. Notre Soleil est une étoile de seconde génération et c'est la raison qui fait quelle comporte tous les éléments chimiques du tableau périodique qui nous sont familiers.*

NGC 604, une nébuleuse en émission, pouponnière d'étoiles, dans la constellation du Triangle. (Photo

[1] *Ou peut-être même de troisième ou quatrième génération !*

Et les trous noirs ?

On appelle vitesse de libération la vitesse nécessaire qu'il faut conférer à un objet pour qu'il puisse échapper à l'attraction de l'astre sur lequel il se trouve. En ce qui concerne notre Terre, il faut communiquer à un objet une vitesse supérieure à 11.2 km par seconde pour qu'il puisse s'échapper définitivement à l'attraction terrestre. Plus une étoile est massive, plus la vitesse de libération est élevée.

Vitesse de libération des astres du système solaire

Astre	Vitesse de libération	Astre	Vitesse de libération
Soleil	617.5 Km/s	Jupiter	59.5 Km/s
Mercure	4.3 Km/s	Saturne	35.6 Km/s
Vénus	10.3 Km/s	Uranus	21.2 Km/s
Terre	11.2 Km/s	Nepetune	23.6 Km/s
Lune	2.4 Km/s	Pluton	1 Km/s
Mars	5 Km/s		

*Lors de effondrement d'une étoile géante en fin de vie la gravité se concentre sur un volume extrêmement petit . La gravité devient localement si élevée que la vitesse de libération dépasse la vitesse de la lumière et celle-ci n'arrivera plus à s'échapper du trou noir. On appelle **horizon** d'un trou noir la frontière qui l'entoure en-deça duquel la vitesse de libération égale celle de la lumière.*

Un trou noir n'exerce pas une attraction plus grande sur son environnement qu'une étoile de même masse. Si un trou noir prenait la place du Soleil, les planètes continueraient leur périple chacune sur son orbite sans aucune perturbation.

Il existe divers types de trous noirs mais et leur évolution est sujet à de nombreuses études cosmologiques. Mais notre propos s'arrête ici !

Conclusion

Le cœur de l'atome, les particules qui le constituent, les interactions entre ces particules conditionnent tout l'Univers. Par son intelligence, par ses observations de plus en plus performantes dans le domaine de l'infiniment petit qu'on ne peut plus dissocier aujourd'hui de l'infiniment grand qu'est notre Univers, l'Homme est presque parvenu à décrypter l'origine de notre Univers et à décrire les particules qui le constituent.

L'état de nos connaissances aujourd'hui sera probablement amélioré dans les décennies qui s'ouvrent devant nous par les nombreuses observations et expériences que les physiciens et les astrophysiciens entreprennent en permanence.

Aujourd'hui c'est l'état de nos connaissances actuelles que j'ai essayé de vous présenter !

Jacques Deferne

Glossaire

Actinides	*Série d'éléments chimiques dont les numéros atomiques sont compris entre 89 et 103. Leurs propriétés sont voisines de celles de l'Actinium. Tous sont radioactifs.*
Alpha (particule)	*Partie du rayonnement radioactifs chargée positivement. Il s'agit d'un noyau d'hélium constitué de deux neutrons et deux protons*
Antimatière	*Pour chaque particule existe une antiparticule : l'antineutron, l'antiproton, le positon (un électron positif). Ces antiparticules constituent ensemble l'antimatière. Peut après le big-bang, l'antimatière existait en quantité à peu près égale avec la matière. Plus tard, la matière et l'antimatière se sont annihilés mutuellement avec toutefois un très faible excès de matière qui constitue aujourd'hui notre environnement.*
Atome	*Terme défini par Démocrite au Ve siècle avant notre ère. Il imagine que la matière ne peut pas divisée indéfiniment et, qu'à la limite, on trouve une unité insécable à laquelle il donne le nom d'atome.*
Atome de Bohr	*Modèle atomique proposé par Niels Bohr qui décrit l'atome comme un noyau constitué de neutrons et de protons et autour duquel gravitent les électrons. Il introduit la notion de quantum d'énergie et postule que les électrons peuvent absorber ou émettre un quantum d'énergie en sautant d'une orbite à l'autre. Il peut ainsi expliquer la position des raies lumineuses qui composent les spectres d'émission des atomes.*
Baryon	*C'est un hadron constitué de trois quarks. Les neutrons et les protons sont des baryons.*
Becquerel	*Unité de mesure de la radioactivité qui exprime le nombre de désintégration de noyaux radioactifs par seconde.*
Bêta (particule)	*C'est un électron expulsé du noyau d'un atome*
Big-Bang	*Modèle cosmologique cataclysmique qui décrit les premiers instants de l'Univers et au cours desquels toute la matière qui constitue notre environnement est apparue.*
Boson	*Particule vecteur d'une interaction. Les gluons sont les vecteurs de l'interaction forte, les photons sont ceux de la force électromagnétique et les bosons W^+, W^- et W^0 transmettent l'interaction faible. Le graviton transmettrait la force gravitationnelle, mais il n'a pas encore été décelé.*
Boson de Higgs	*Particule imaginée dans les années 1970 par Robert Brout, François Englert et Peter Higgs, un boson responsable de conférer leur gravité aux particules. Détectée pour la première fois au CERN en 2012 cette découverte a valu le prix Nobel à leurs auteurs.*
Chambre à brouillard	*Détecteur de particules inventé par Charles WIlson. Enceinte à l'intérieur de laquelle on entretient une humidité à la limite de la condensation. Les particules ionisantes jouent le rôle de points de condensation et laissent une trainée de très fines gouttelettes qui révèle leur parcours.*
Compteur Geiger	*Appareil qui mesure le nombre de particules ionisantes qui traversent son détecteur. La mesure est basée sur la décharge électrique qui se produit entre les parois d'un cylindre et un fil tendu en son milieu.*

Compteur à scintillation	*Mesure également le nombre de particules ionisantes. Le mesure est basée sur la propriété de certains corps de devenir luminescents sous l'impact de particules ionisantes.*
Demi-vie	*Laps de temps au bout duquel la moitié d'un isotope radioactif a disparu. On perle aussi de période.*
Dosimètre	*Petit appareil qui mesure les doses cumulées de radioactivité au cours d'un certain laps de temps.*
Electron	*Particule élémentaire 1840 fois plus légère qu'un proton, porteuse d'une charge électrique négative. Les électrons participent à l'architecture de l'atome et gravitent autour du noyau.*
Electromètre	*Appareil qui mesure la charge électrique d'un corps. Il est constitué de deux feuilles métallisées extrêmement légères qui se repoussent mutuellement à cause de la force répulsive des charges électriques de même signe. Elles s'écartent l'une de l'autre proportionnellement à la charge ressentie par l'électrode à laquelle elles sont reliées.*
Electroscope	*Souvent confondu avec l'électromètre, l'électroscope détecte les charges électriques, l'électromètre les mesure.*
Energie de liaison	*Energie nécessaire pour maintenir les protons et les neutrons réunis au sein du noyau atomique.*
Explosion nucléaire	*Dégagement brutal d'une énergie colossale produite par la fission d'une masse importante de matière fissile provoquée par une réaction en chaîne.*
Fermion	*Les fermions regroupent les leptons, non soumis à l'interaction forte, et les quarks.*
Fission nucléaire	*Phénomène qui voit un atome instable se partager subitement en deux atomes plus petits avec émission de deux ou trois neutrons isolés. Le total des masses des produits de fission et légèrement inférieur à la masse de l'atome original. Cette perte de masse est convertie en une énergie colossale lors de cette fission.*
Fission induite	*Fission provoquée par bombardement du noyau d'un atome fissile au moyen de neutrons.*
Fission spontanée	*Fission qui se produit naturellement sans intervention extérieure. L'uranium 238 est le seul élément naturel qui peut fissionner spontanément. Toutefois la probabilité de la fission d'un atome d'uranium est cinq cents mille fois plus faible que sa probabilité de désintégration radioactive.*
Force électro-magnétique	*Force qui affecte les particules chargées électriquement. Elle est répulsives pour les charges de même signe, attractive pour les charges de signe opposé.*
Force gravitationnelle	*Force toujours attractive qui affecte la totalité des particules. Son intensité est extrêmement faible mais elle est cumulative.*
Fusion nucléaire	*C'est le phénomène inverse de la fission. Elle n'est possible qu'avec des éléments légers, de masse inférieure à celle du fer. La plus connue est la fusion de l'hydrogène en hélium au cœur des étoiles.*
Gamma (rayonnement)	*Onde électromagnétique de très courte longueur d'onde émise lors du réarrangement des neutrons et des protons lors d'un processus de décroissance radioactive. Ils sont encore beaucoup plus pénétrants que les rayons X.*

Géante rouge	*Etat d'évolution des étoiles de taille comparable à celle du Soleil. Au cours de la fusion de l'hélium en carbone, l'énergie dégagée est telle que l'étoile se met à enfler considérablement et sa surface prend une teinte rouge.*
Gluon	*Particule qui assure la transmission de l'interaction forte et assure la cohésion des quarks au sein des neutrons et des protons. Les physiciens distinguent huit sortes de gluons. Ce sont donc les bosons vecteurs de l'interaction forte.*
Gravité	*Effets visibles de la force gravitationnelle.*
Graviton	*Boson hypothétique de la force de gravité. Il n'a pas encore été identifié.*
Gray	*Unité de mesure de la dose radioactive absorbée par un organisme.*
Hadron	*Sous ce terme les physiciens regroupent toutes les particules affectées par l'interaction forte. Ce sont les quarks, les antiquarks et les gluons.*
Hélium	*Atome dont le noyau est constitué de deux protons et de deux neutrons. Ce noyau est extrêmement stable. Débarrassé des deux électron qui l'entourent, ce noyau constitue la particule alpha qui est un des produits de la radioactivité.*
Inertie	*C'est la capacité d'un corps de résister à une accélération. Cette capacité dépend de la masse de ce corps.*
Interaction faible	*Ni attractive, ni répulsive, l'interaction faible agit sur les quarks en perturbant leur stabilité. Elle provoque alors le phénomène de la radioactivité, en particulier la désintégration bêta (β).*
Interaction forte	*Force extrêmement puissante mais dont la portée ne dépasse pas les limites du noyau d'un atome. Elle lie entre eux les quarks pour constituer les neutrons et les protons. Elle assure aussi la cohésion du noyau en contrant la force répulsive que la force électromagnétique fait subir aux protons.*
Isotope	*Atome qui comporte le même nombre de protons qu'un autre mais diffère uniquement par le nombre de neutrons contenus dans son noyau. Ainsi, dans la nature, tous les atomes d'uranium renferment 92 protons mais certains renferment 143 neutrons (^{235}U), d'autres 146 neutrons (^{238}U).*
Kaon	*Particule extraordinairement instable, constituée d'un quark et d'un antiquark en combinant un quark up, un quark strange et leur antiparticule. Apparaît d'une manière fugace dans les réactions avec les rayons cosmiques.*
Lepton	*Particule insensible à l'interaction forte. Les électrons, muons, tauons, les neutrinos et leurs antiparticules sont des leptons.*
Masse	*C'est la grandeur physique qui est proportionnelle à la résistance d'un corps à une accélération. Elle se mesure en kg.*
Masse critique	*C'est la masse minimale nécessaire à d'un corps fissile pour que se déclenche spontanément une réaction en chaîne entraînant une explosion nucléaire. Elle est d'une cinquantaine de kg pour ^{235}U et d'env. 10 kg pour ^{239}Pu.*
Matière	*C'est tout ce qui compose les corps tangibles et qui a une masse.*

Matière noire	*Matière hypothétique non décelée jusqu'à présent qui pourrait expliquer l'excès de masse inexplicable des galaxies. Les neutrinos sont soupçonnés d'en faire partie.*
Méson	*Famille de particules très légères composées d'un quark et d'un antiquark et dont l'espérance de vie est extrêmement courte. Les mésons les plus connus sont les pions.*
Muon	*C'est une particule élémentaire de charge négative, 207 fois plus lourd que l'électron. Son espérance de vie ne dépasse pas un millionième de seconde. Il est créé dans la haute atmosphère par l'interaction de rayons cosmiques de très haute énergie sur les atomes de l'atmosphère.*
Naine blanche	*Stade final de l'évolution des étoiles de taille comparable à celle du Soleil après qu'elles aient achevé leur cycle de fusion nucléaire, faute de combustible.*
Nébuleuse	*Gigantesque nuage de gaz et de poussières interstellaires. Les nébuleuses sont issues de l'explosion d'une supernova. C'est aussi une pépinière de nouvelles étoiles dites de deuxième génération, la Terre, par exemple.*
Neutron	*Particule composite, électriquement neutre, constituée d'un quark up et de deux quarks down. Le neutron est un des composants du noyau des atomes,*
Nucléosynthèse	*Ensemble des processus qui ont abouti à l'élaboration des éléments chimiques.*
Particule composite	*Particule composée de plusieurs particules élémentaires. Les protons et les neutrons sont des particules composites, composées de quarks.*
Particule élémentaire	*Particule indivisible faisant partie du modèle standard établi par les physiciens.*
Période	*Synonyme de demi-vie, laps de temps au bout duquel la moitié d'un isotope radioactif a disparu.*
Période de rémission	*Terme imagé qui correspond à la demi-vie d'un élément ou d'une particule.*
Photon	*Particule élémentaire sans masse, vecteur associé à la force électromagnétique. Les photons représentent l'aspect corpusculaire des ondes électromagnétiques. Ils se déplacent à la vitesse de la lumière et leur énergie dépend de la longueur d'onde qui leur est associée.*
Pile atomique	*Premier nom donné à un réacteur nucléaire. Il était constitué d'empilement de briques de graphite, d'uranium et d'oxyde d'uranium. C'est Enrico Fermi qui a réalisé la première pile qui a été mis en marche à Chicago le 2 décembre 1942.*
Pion	*Famille de particules très légères composées d'un quark et d'un antiquark et dont l'espérance de vie est d'environ un millionième de seconde. Ils jouent un rôle important dans la cohésion des protons et des neutrons à l'intérieur du noyau atomique. Sous l'influence de l'interaction faible, ils se désintègrent en donnant des muons et des neutrinos.*
Positon	*Antiparticule de l'électron. C'est un électron dont la charge est positive.*
Proton	*Particule composite, chargée positivement, constituée de deux quarks up et d'un quark down. Le proton est un des constituants du noyau des atomes.*

Quantum d'énergie	*C'est la plus petite quantité d'énergie indivisible. La découverte que l'énergie ne varie pas de manière continue mais par petits paquets d'énergie, les quanta, est à la base de la physique quantique.*
Quark	*Particule élémentaire à l'instinct grégaire : toujours trois par trois, il constituent les neutrons et les protons. Il y a 6 sortes de quarks. Seuls deux d'entre eux constituent les neutrons et les protons. Ce sont le quark up et le quark down.*
Radioactivité	*Emission de particules ionisantes par un noyaux d'atome instable et qui entraîne à terme sa transmutation en un autre élément.*
Rayon alpha	*Une des particules, chargée positivement, émise au cours du phénomène de la radioactivité. Il s'agit d'un noyau d'hélium constitué de 2 neutrons et 2 protons.*
Rayon bêta	*Une des particules émise au cours du phénomène de la radioactivité. Il s'agit d'électrons porteurs d'une charge négative.*
Rayons cosmiques	*Rayons ionisants provenant de l'espace intergalactique. Ils sont créés probablement dans l'explosion de supernovae. En percutant les couches de la haute atmosphère, comme une cible dans les accélérateurs du CERN, ils engendrent des gerbes de particules secondaires qui bombardent notre planète.*
Rayon gamma	*Rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde, semblable à des rayons X extrêmement énergétiques. Ils sont émise au cours du phénomène de la radioactivité.*
Rayons uraniques	*Nom originel que Henri Bécquerel conféra au rayonnement mystérieux issu en permanence des sels d'uranium. On les appela plus tard "radioactivité".*
Rayons X	*Rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde qui a la propriété de traverser plus ou moins les corps opaques.*
Sievert	*Unité qui mesure les effets de la radioactivité sur les organismes vivants.*
Supernova	*Ensemble des phénomènes résultant de l'explosion brutale d'une étoile. C'est au cours de ce phénomène cataclysmique que se créent les éléments plus lourds que le fer. Les résidus gazeux et les poussière expulsées peuvent former une nébuleuse.*
Tauon	*C'est une particule élémentaire de charge négative, 3500 fois plus massive que l'électron. Son espérance de vie ne dépasse pas un dix milliardième de seconde.*
Transmutation	*Transformation d'un élément chimique en un autre élément au cours du phénomène de la décroissance radioactive.*
Transuraniens	*Eléments chimiques dont le numéro atomique se situe au delà de celui de l'uranium.*

Table des matières

Chimistes et physiciens	3
Les forces qui régissent l'Univers	7
Une petite histoire de l'atome	13
Les mystérieux rayons cosmiques	24
Au CERN, on casse tout	29
Les détecteurs traquent les particules	32
Classons les particules	37
Le modèle standard des physiciens	45
Une approche ludique de la radioactivité	48
Une autre maladie génétique : la fission des atomes	57
Redevenons sérieux	66
Origine des éléments chimiques	70
Glossaire	76