

Laboratoire Souterrain de Modane Carré Sciences



Exposition permanente

Petits secrets de l'univers

Espace interactif
dédié à la culture scientifique

- Pourquoi un laboratoire souterrain ?
- "Ecouter" les rayons cosmiques avec le cosmophone
- EDELWEISS : à la recherche de la matière noire
- NEMO : qu'est-ce qu'un neutrino ?
- A la découverte des rayons X & la radioactivité
- Voir la radioactivité naturelle avec la chambre à brouillard
- Le petit train de la radioactivité naturelle
- Mesures pour la recherche environnementale
- Applications des mesures de radioactivité naturelle

Posters & films, multimédias & visite virtuelle,
à l'extérieur une statue interactive



du lundi au vendredi
de 14h à 17h
dès 10 ans
entrée gratuite
accès handicapé
groupes sur
réservation (+10 pers)

Laboratoire souterrain de Modane

Carré Sciences
1125 route de Bardonnèche
73500 MODANE
04 79 05 22 57

www.lsm.fr
contact@lsm.fr



Exposition permanente

Petits Secrets de l'Univers

Laboratoire souterrain de Modane



Livret d'accompagnement et d'approfondissement

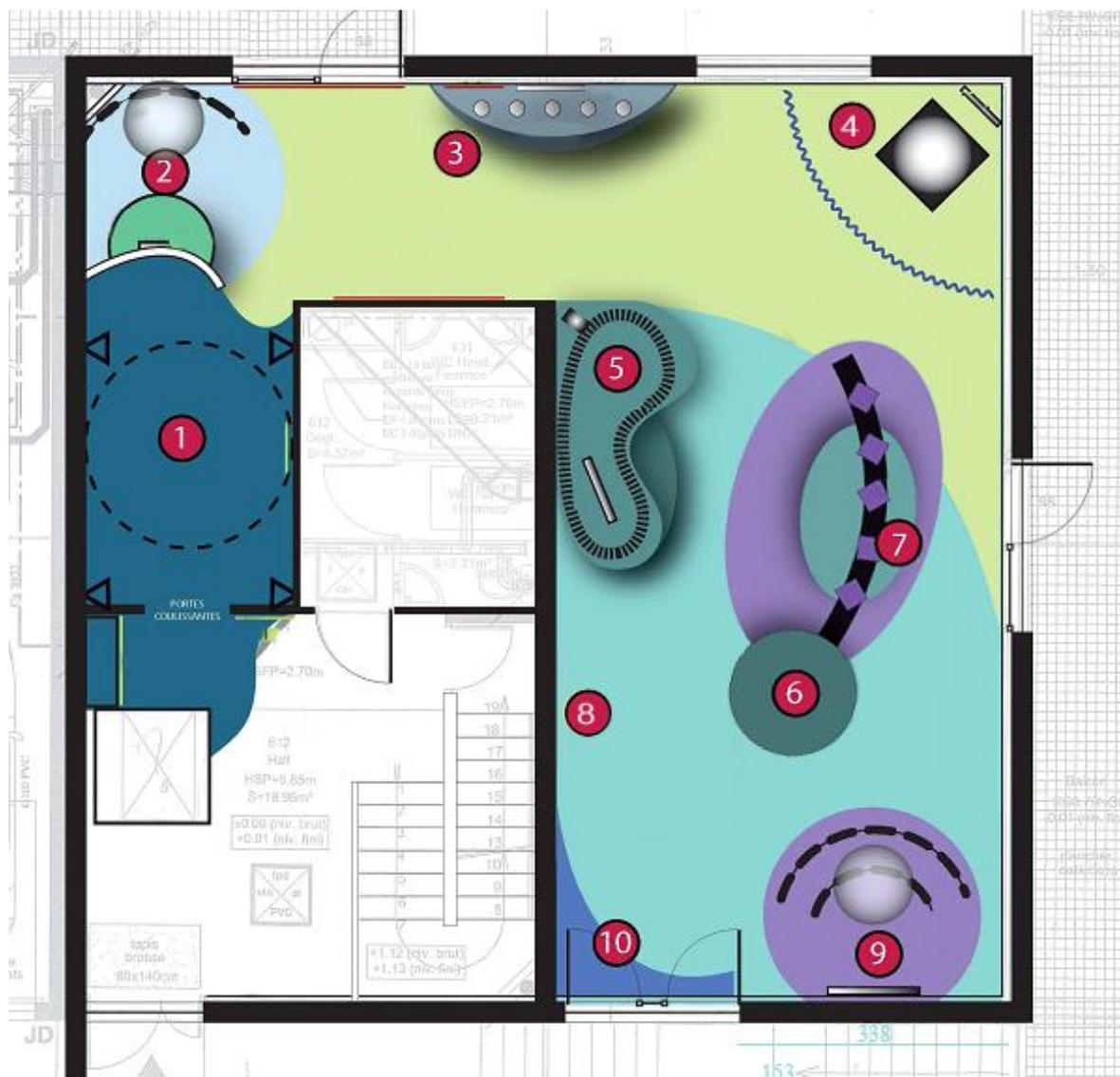
L'exposition "Petits secrets de l'univers" s'adresse à tous les publics et aux scolaires à partir du cycle 3. Elle permet d'aborder les découvertes des rayons X et de la radioactivité, les rayons cosmiques, la radioactivité naturelle et les recherches menées au laboratoire.

Le laboratoire souterrain de Modane (LSM) est un laboratoire de recherche scientifique du CNRS et du CEA (Centre National de la Recherche Scientifique et Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Renouvelables).

Il est situé au milieu du Tunnel du Fréjus (13 km de long), à 1700 m sous la pointe du Fréjus. L'épaisseur de roche et sa composition en font le laboratoire le plus profond d'Europe et le 2^{ème} plus profond du Monde, c'est comme si le laboratoire était à 4800 m sous l'eau !

Cette couverture rocheuse supprime presque totalement les rayonnements cosmiques provenant du soleil (qui est une grosse centrale nucléaire), des supernovae (étoiles en fin de vie) ou encore des pulsars (étoiles à neutrons). Chaque jour, 8 à 10 millions de rayons cosmiques (sous forme de muons) atteignent chaque m² de la surface de la Terre. Dans le laboratoire, il n'y a plus que 4 muons par m² et par jour.

Les mesures effectuées dans le laboratoire ne pourraient pas être réalisées à l'extérieur puisqu'elles seraient noyées dans le "bruit de fond" des rayonnements cosmiques.



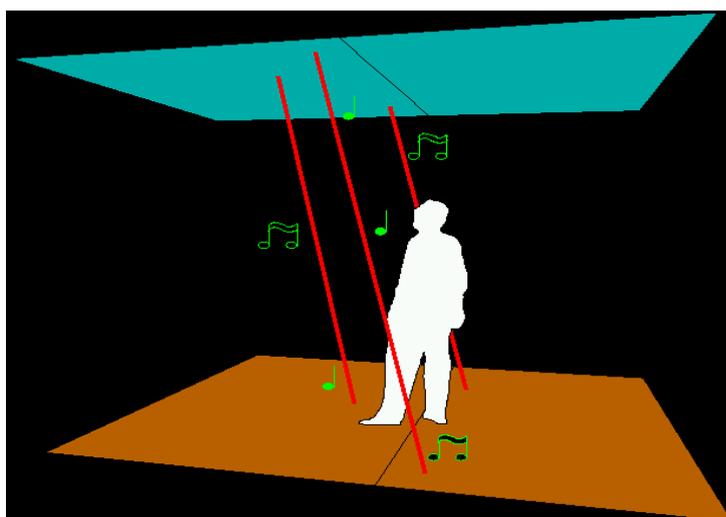
Sommaire

Le cosmophone : les rayons cosmiques	3
Des rayons et des Hommes	5
L'épopée du rayon X et de la radioactivité	12
La physique des particules	21
Quelques activités à réaliser	26
Questions réponses	31
Expérience Nemo, étude du neutrino	35
Expérience EDELWEISS, à la recherche de la matière noire	49

Le Cosmophone : les rayons cosmiques

L'espace qui nous entoure est constamment baigné de particules élémentaires issues de phénomènes galactiques lointains : les rayons cosmiques. Notre corps y est insensible, bien que plusieurs particules d'origine cosmique le traversent chaque seconde !

Le Cosmophone a été conçu pour les détecter et rendre leurs trajectoires et caractéristiques directement perceptibles autour de soi sous forme de sons.



Comme toutes les particules, on ne peut pas voir les muons mais on peut les détecter. Le cosmophone matérialise le passage des muons par l'émission d'un son. Il est composé de 8 détecteurs couplés à des haut-parleurs. Ainsi, à chaque fois qu'un muon passe par 2 détecteurs (un en haut, un en bas), on l'entend passer et on le voit sur l'écran.

Huit capteurs disposés autour de la pièce détectent le rayon cosmique par la lumière de scintillation qu'il induit dans un matériau spécial. Les informations sur son passage sont transmises quasi instantanément à un système de synthèse sonore, qui restitue sa trajectoire dans l'espace à l'instant et à l'endroit où il passe : la position du muon est indiquée par des sons d'impact à ses points d'entrée et de sortie.

Les avalanches d'électrons et anti-électrons produites de temps en temps par l'interaction d'un muon au-dessus de la pièce s'appellent des gerbes cosmiques.

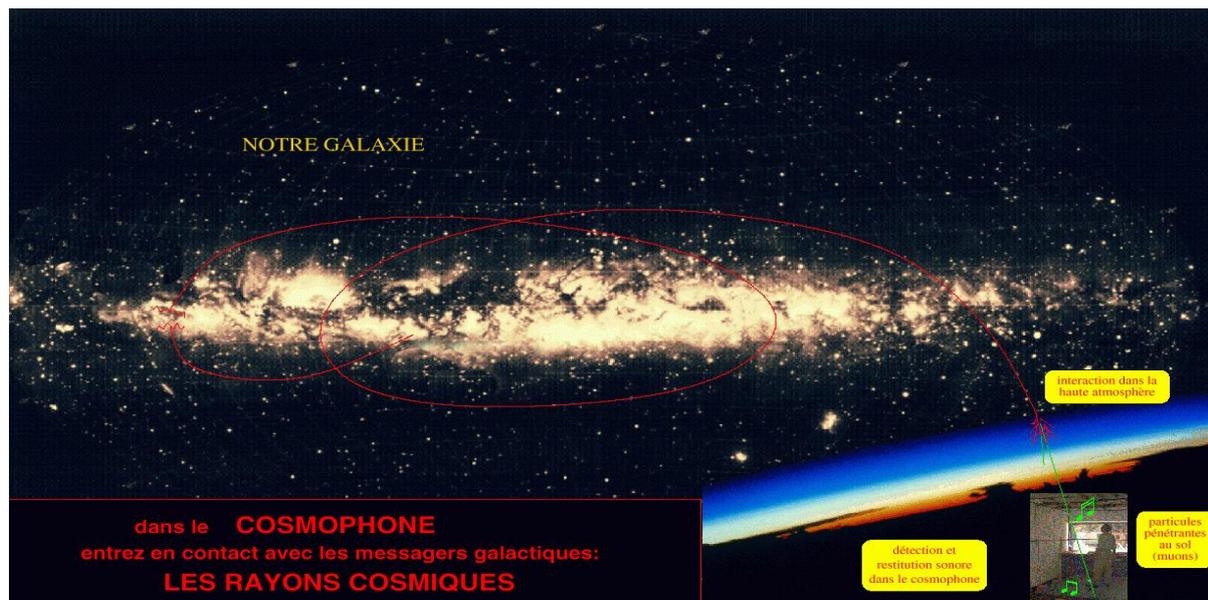
Les rayons cosmiques ?

L'espace est en permanence parcouru d'un flux de particules élémentaires de haute énergie : le rayonnement cosmique.

Composées surtout de protons (noyaux d'atomes d'hydrogène), ces particules sont la trace de phénomènes violents qui les ont libérées et accélérées quelque part dans l'Univers.

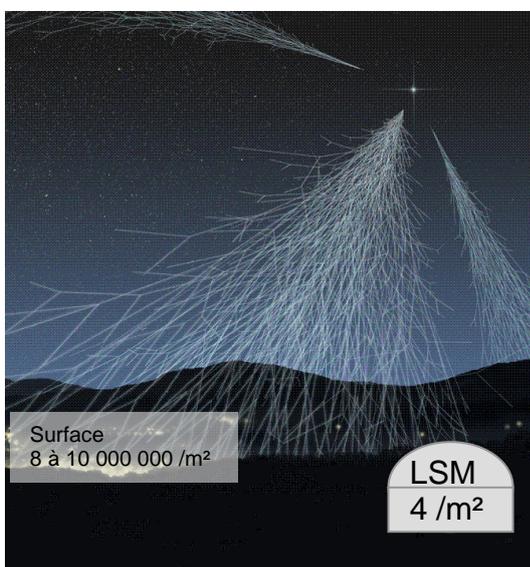
La plupart sont produites dans notre galaxie, par exemple lors des explosions d'étoiles en fin de vie, les supernovae.

Elles y restent confinées pendant plusieurs millions d'années par le champ magnétique galactique.



Au voisinage de la terre, les rayons cosmiques pénètrent dans la haute atmosphère en créant des avalanches de particules secondaires. En partie absorbées par l'atmosphère terrestre, ces avalanches sont à l'origine d'une grande variété de phénomènes mesurables au niveau de la mer avec les techniques de la physique des particules.

Au laboratoire ...



On reçoit environ 8 millions de muons par mètre carré chaque jour à la surface de la Terre :

Les 1700 mètres de roche au-dessus du laboratoire permettent de réduire cet afflux d'un facteur 2 millions.

Ainsi, au laboratoire il n'y a plus que 4 muons par mètre carré et par jour !

Le cosmophone est un détecteur à but



uniquement pédagogique, nous ne l'utilisons pas dans un but scientifique. Le laboratoire n'étudie pas les rayons cosmiques mais cherche à s'en protéger afin de réduire le "bruit de fond".

Le terme bruit de fond est un terme générique désignant toute perturbation (électrique, lumineuse, mécanique et bien sûr sonore) : il est plus facile de trouver un ver luisant la nuit noire, quand il n'y a pas de bruit de fond lumineux !

Des rayons et des Hommes

Sur Terre, tous les êtres vivants sont chaque jour bombardés par des rayonnements de natures et d'origines diverses. Certains, dont font partis les rayons X et les rayons engendrés par la radioactivité, sont dits ionisants.

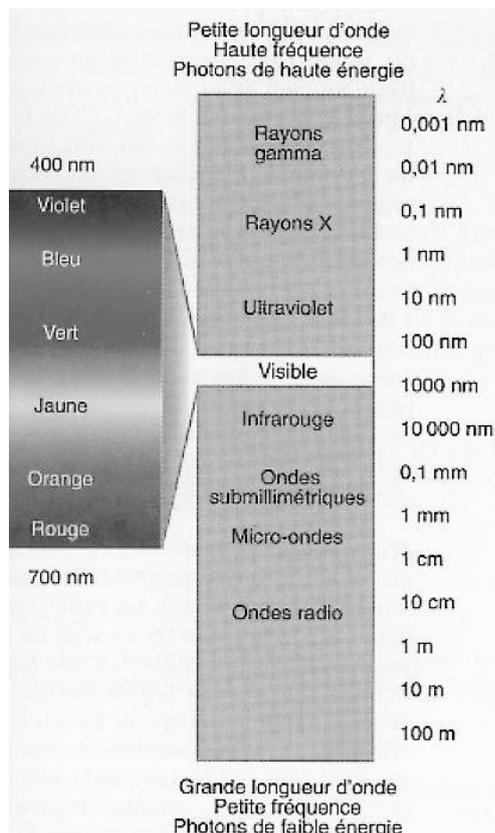
Lorsqu'ils sont maîtrisés, ces rayons ionisants ont beaucoup d'usages pratiques bénéfiques. Mais pour les organismes vivants, ils sont potentiellement nuisibles à la longue et mortels en cas de dose élevée.

1. Notre monde, un bain de rayonnements

Venus de l'espace ou émis par la matière radioactive, sous forme de rayonnements électromagnétiques ou de particules, les rayons sont omniprésents sur la planète.

1.1. Des rayons venus du ciel

L'Homme est exposé à de nombreux rayonnements venus de l'espace, dont fait bien évidemment partie la lumière visible provenant du Soleil. Celle-ci est constituée de rayonnements électromagnétiques que les physiciens représentent soit sous la forme d'ondes électromagnétiques, soit sous la forme d'un flux de photons.



Cependant, le Soleil émet également d'autres rayonnements électromagnétiques : les rayons gamma, caractérisés par une longueur d'onde très courte ou des photons de haute énergie, les rayons X, les ultraviolets, les infrarouges, les micro-ondes et les ondes radio, caractérisés par une grande longueur d'onde ou des photons de faible énergie.

Le spectre électromagnétique émis par le Soleil

Le spectre électromagnétique est épuré par les hautes couches de l'atmosphère et arrive à la surface de la Terre entre 200 nm, dans les ultraviolets, et 1 400 nm dans les infrarouges.

Longueur d'onde et fréquence

Chaque onde électromagnétique est caractérisée par sa longueur d'onde et sa fréquence.

La longueur d'onde λ , mesurée en mètre, équivaut à la longueur d'un cycle d'une onde, c'est-à-dire à la distance entre deux crêtes successives d'une onde.

La fréquence, mesurée en hertz, représente le nombre de cycles d'une onde par unité de temps.

1.2. Une radioactivité omniprésente

L'air, l'eau, les pierres, les êtres vivants... toute la matière est constituée d'atomes et d'assemblage d'atomes, les molécules. Sur Terre, si la plupart des atomes sont stables et ne se transforment pas, certains sont au contraire instables : ce sont des atomes radioactifs. Les atomes radioactifs se transforment spontanément en d'autres atomes, radioactifs ou non. Ainsi, d'atome radioactif en atome radioactif, ils tendent à se transformer en une forme stable. Cette transformation irréversible d'un atome radioactif en un autre atome est appelée désintégration. Elle s'accompagne d'une émission de différents types de rayonnements :

- les rayons gamma qui sont des rayons électromagnétiques ;
- les rayons alpha et bêta qui sont des particules. La particule alpha est un noyau d'hélium et la particule bêta, un électron (bêta -) ou un positron (bêta +).

Le positron

En physique des particules, le positron est la particule associée à l'électron.

De la même masse que ce dernier, il possède une charge électrique opposée à celle de l'électron.

Nom des éléments radioactifs	Période radioactive
Radon 222	4 jours
Iode 131	8 jours
Césium 137	30 ans
Carbone 14	5500 ans
Plutonium 239 ..	24 100 ans
Uranium 234	245 000 ans
Uranium 235	710 000 000 ans
Uranium 238	4,5 milliards d'années

Ainsi, depuis la formation de la Terre, il y a environ 5 milliards d'années, la majorité des atomes instables se sont désintégrés et ont fini par atteindre la stabilité. Cependant, il existe toujours quelques atomes radioactifs naturels : le carbone 14 et le radon 222 dans l'atmosphère, l'uranium 238, l'uranium 235 et le radium 226 dans la croûte terrestre ou encore le potassium 40 dans notre alimentation.

Période radioactive de quelques atomes

La période ou demi-vie d'un atome radioactif est le temps nécessaire pour que, dans un échantillon donné, la moitié des atomes radioactifs initialement présents disparaissent par désintégration spontanée.

Petit voyage au coeur de l'atome

1. Atome

Un atome est composé :

- d'un noyau central, qui est un assemblage de protons chargés positivement et de neutrons, neutres. Les protons et les neutrons constituent les nucléons ;
- d'un nuage périphérique composé d'un cortège d'électrons, chargés négativement.

Le nombre de protons étant égal au nombre d'électrons, un atome est donc électriquement neutre.

2. Élément chimique

Le nombre de protons détermine les propriétés chimiques des atomes.

Ainsi, les atomes ayant le même nombre de protons appartiennent à un même groupe appelé élément chimique, comme le chlore, le calcium, l'hélium, etc. Aujourd'hui, les scientifiques connaissent plus de 115 éléments chimiques dont 90 existent sur Terre à l'état naturel.

En voici quelques uns :

- un atome à 1 proton est un atome d'hydrogène ;
- un atome à 6 protons est un atome de carbone ;
- un atome à 53 protons est un atome d'iode.

3. Isotopes

Cependant, les noyaux ne sont pas uniquement constitués de protons.

Ils contiennent aussi des neutrons, dont le nombre peut varier. Ainsi, des atomes d'un même élément chimique comportant un nombre différent de neutrons sont des isotopes de cet élément.

Par exemple, il existe 3 isotopes de l'hydrogène :

- l'hydrogène à 1 proton et 0 neutron, ou hydrogène léger ;
- l'hydrogène à 1 proton et 1 neutron, ou deutérium ;
- l'hydrogène à 1 proton et 2 neutrons, ou tritium.

Un isotope est noté ${}^A_Z X$, X désignant le symbole chimique, A le nombre total de nucléons et Z le nombre de protons.

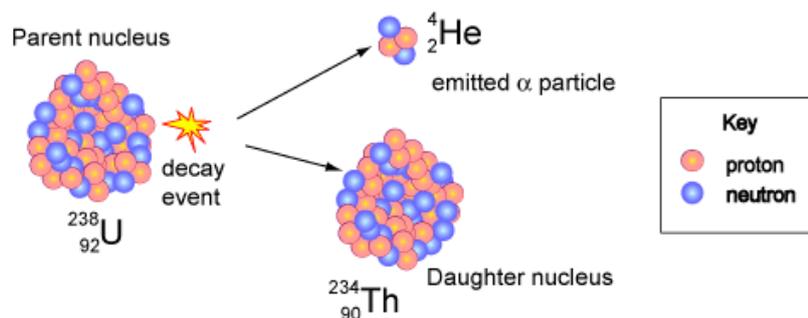
4. Radioactivité

Certains isotopes sont stables et restent identiques à eux-mêmes indéfiniment, tandis que d'autres sont instables. Cette instabilité peut être due à :

- un trop grand nombre de neutrons et de protons ;
- un écart trop important entre le nombre de protons et de neutrons.

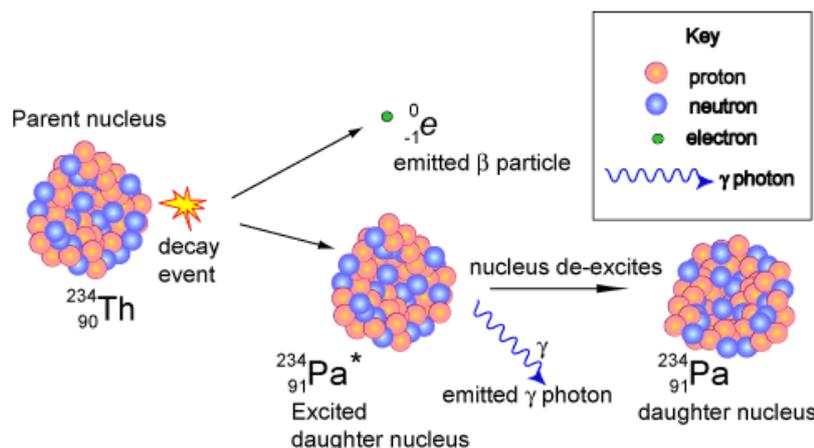
Par exemple, le carbone 12, contenant 6 protons et 6 neutrons est stable, tandis que le carbone 14 contenant 6 protons et 8 neutrons est radioactif.

De ce fait, le noyau d'un atome instable corrige naturellement ces anomalies en se désintégrant et en émettant des rayonnements afin de devenir stable. Voici l'exemple de l'uranium 238.



Radioactivité alpha

L'uranium 238 se transforme en thorium 234 en émettant un noyau d'Hélium (2 protons et 2 neutrons).



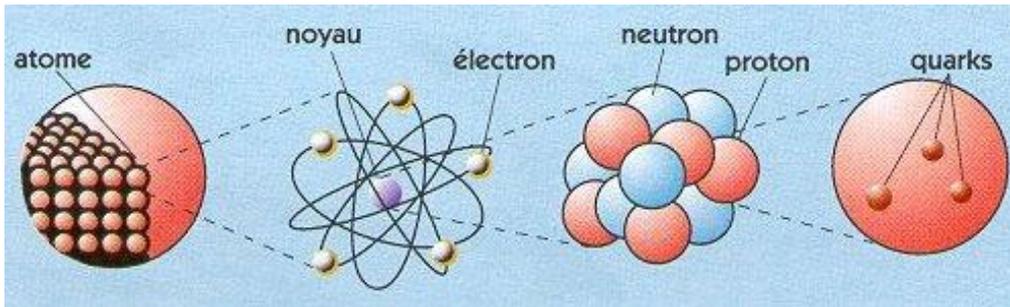
Radioactivité bêta

Au sein du noyau du thorium 234, un des neutrons se désintègre en un proton + un électron.

Ce dernier est éjecté et le thorium 234 se transforme en un atome de protactinium 234* encore instable.

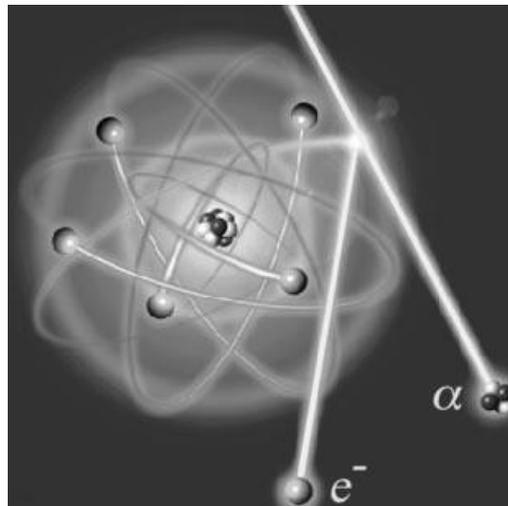
Radioactivité gamma

Le noyau du protactinium 234* est encore excité. Il se libère de son trop-plein d'énergie par émission d'un rayonnement gamma pour atteindre un état stable.



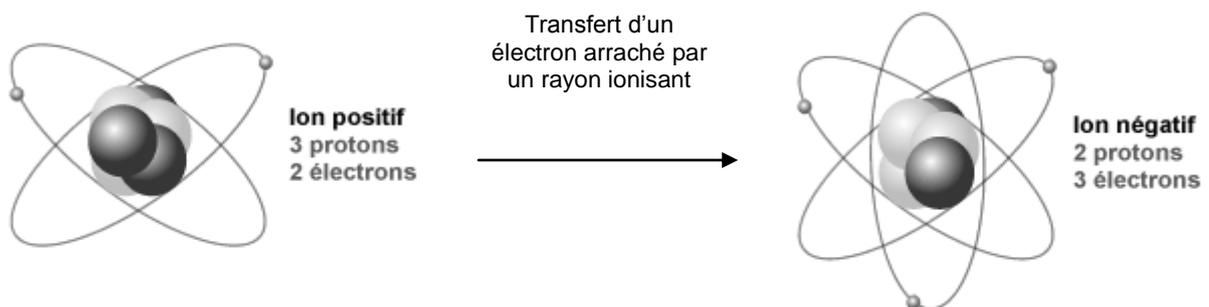
1.3. Et parmi tous ces rayons, il y a : les rayons ionisants

La Terre est donc continuellement plongée dans un bain de rayonnements naturels. Cependant, parmi ces rayons, certains, comme les rayons X, les rayons gamma et les rayons alpha et bêta, sont très énergétiques. Ils transfèrent assez d'énergie aux électrons de la matière qu'ils frappent pour les arracher de leur atome.



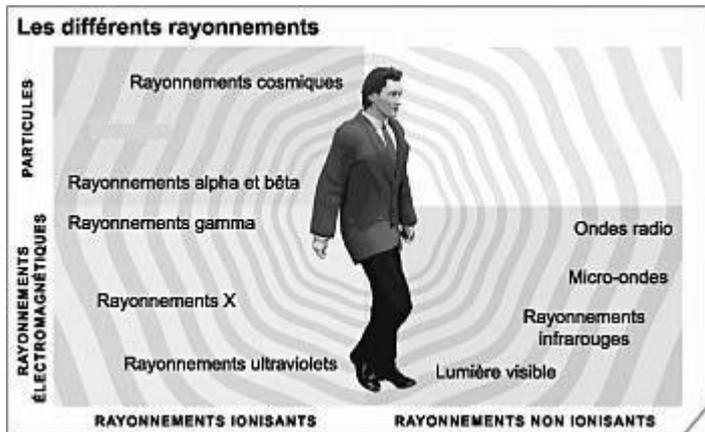
Particule alpha arrachant un électron à un atome

Ces atomes se retrouvent alors avec plus de protons que d'électrons et se chargent donc positivement. Les atomes voisins accueillant les électrons éjectés se chargent au contraire négativement. Les atomes chargés positivement ou négativement sont appelés ions et les rayonnements capables de provoquer de telles réactions sont dits ionisants.



Phénomène de ionisation

Quels sont les rayons ionisants ?



- Les plus énergétiques des rayonnements électromagnétiques : les rayons gamma, les rayons X et certains rayons ultraviolets.

- Des particules : les rayons alpha, les rayons bêta et les rayons cosmiques.

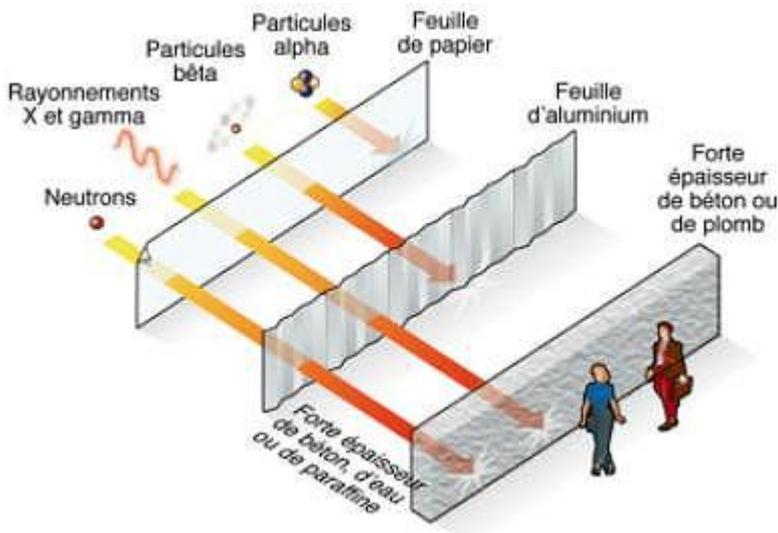
Que sont les rayons cosmiques ?

Les rayons cosmiques, qui bombardent continuellement la Terre, sont des particules très rapides, surtout des protons et des noyaux d'hélium, venues du milieu interstellaire. Ils sont très ionisants.

2. Rayons ionisants, à manier avec précaution !

Du fait de leurs propriétés, les rayons ionisants peuvent s'avérer utiles, notamment dans les domaines de la santé et de l'industrie. Mais ils sont également extrêmement dangereux.

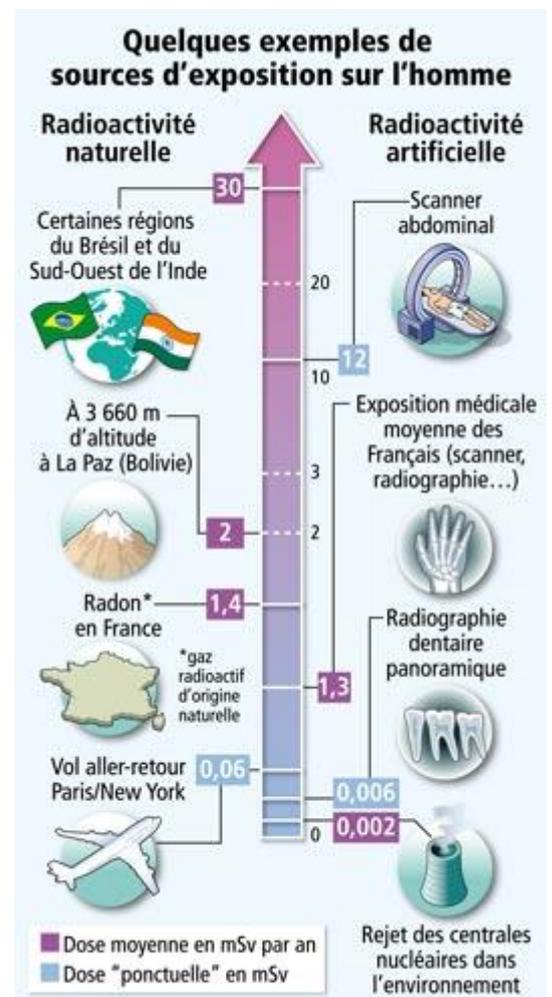
Du fait de leur énergie, les rayonnements ionisants sont pénétrants, c'est-à-dire qu'ils peuvent traverser la matière. Cependant, le pouvoir de pénétration est différent pour chacun d'entre eux.



Pouvoir de pénétration des rayonnements ionisants

Les rayons X et gamma, très pénétrants, ne peuvent être stoppés que par une forte épaisseur de béton ou de plomb.

Toute matière est constituée de molécules, c'est-à-dire d'assemblages d'atomes liés les uns aux autres. En ionisant les atomes, les rayons X, gamma, alpha et bêta brisent ces liaisons et cassent les molécules, ce qui n'est pas sans conséquence pour les êtres vivants.



Des rayons au service de la science

Maîtrisés, les rayons ionisants sont d'une très grande utilité dans plusieurs domaines.

a) Voir l'invisible

Depuis leur découverte, la médecine utilise la capacité qu'ont les rayons X de traverser le corps humain. Une radiographie permet de voir par contraste le squelette et, par exemple, d'observer une fracture pour mieux la soigner. Les tissus endommagés par une maladie sont également visibles : les radiographies des poumons, couramment pratiquées, donnent au médecin d'importantes informations sur l'état de santé du patient.



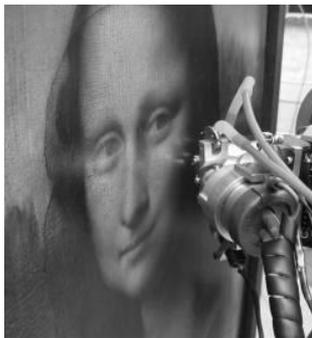
Obtenir des rayons X

Les rayons X produits par le Soleil sont stoppés par les hautes couches de l'atmosphère.

Mais l'Homme est capable d'en créer, grâce à des générateurs de rayons X reprenant le système du tube de Crookes, comme dans cet appareil de radiographie médicale.

Des électrons sont accélérés entre une cathode et une anode. Lorsqu'ils frappent l'anode, il se produit une émission de rayons X.

Mais la capacité de ces rayonnements à traverser la matière est également utilisée dans le milieu industriel. Ainsi, la radiographie industrielle, X ou gamma, est très fréquente en chaudronnerie, dans les constructions navales, dans l'aéronautique, dans le génie civil... Elle permet en effet de contrôler et de repérer les défauts d'un matériau sans le détruire. Les rayons X peuvent encore servir à visualiser les objets contenus à l'intérieur des bagages dans les aéroports, ou à mettre en évidence la structure interne d'une œuvre d'art.



Examen de la Joconde aux rayons X

Des chercheurs ont utilisé les rayons X pour déterminer la composition et l'épaisseur de chaque couche de matière au niveau du visage de Mona Lisa. Ils espèrent ainsi donner un nouvel éclairage sur le *sfumato*, cette technique picturale utilisée par Léonard de Vinci.



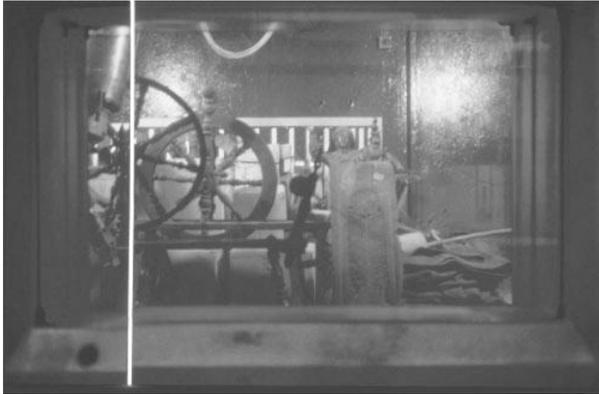
b) Ioniser pour stériliser et soigner

Les rayons ionisants pouvant détruire les cellules, ils sont un moyen efficace pour détruire les micro-organismes comme les champignons, les bactéries, les virus.

Ils sont donc couramment utilisés pour la stérilisation d'objets. Ainsi, la majorité du matériel médico-chirurgical, comme les seringues jetables, est aujourd'hui radiostérilisée par des industries spécialisées. De la même façon, certains aliments sont irradiés afin d'améliorer l'hygiène alimentaire : stérilisation des épices, élimination des salmonelles des aliments... Le traitement par des rayons gamma est également utilisé pour les œuvres d'art : il élimine les larves, insectes ou bactéries logés à l'intérieur des objets et les protège ainsi de la dégradation.

Logo figurant sur les aliments ionisés

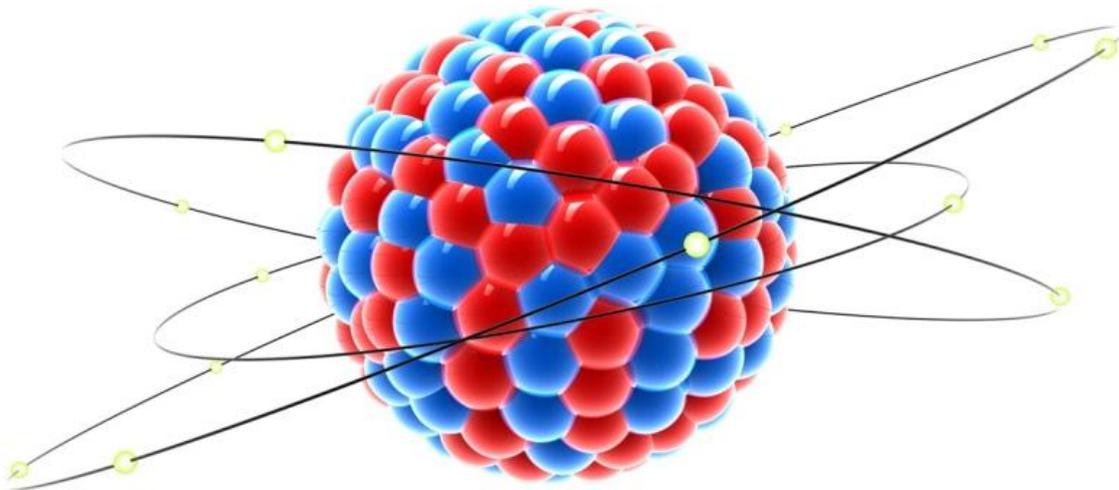
L'irradiation ou ionisation des aliments est un procédé de conservation et d'assainissement. Il fait cependant polémique.



Irradiation d'objets muséographiques

Vue d'une cellule d'irradiation à travers un hublot. Cette technique est applicable à différents types de matériaux : bois, pierre, cuir....

Une autre grande application des rayons ionisants est la radiothérapie pratiquée dans la lutte contre le cancer. En envoyant sur les cellules tumorales une certaine dose de rayonnements, il est possible de les tuer et d'éliminer la tumeur. Aujourd'hui, près de la moitié des personnes qui ont pu être guérie d'un cancer l'ont été grâce à la radiothérapie. Les rayons ionisants, bien que dangereux, existent donc naturellement et l'Homme est capable, dans une certaine mesure, d'en corriger les effets. Cependant, à la fin de la Seconde Guerre mondiale, l'Homme fait une nouvelle découverte : la radioactivité artificielle. Les applications militaires et civiles qui en découlent vont disperser beaucoup de radioactivité dans l'environnement et des populations entières vont être alors exposées à des doses de rayons ionisants beaucoup plus fortes.



Comment mesure-t-on la radioactivité ?

- Le becquerel (Bq)

Un échantillon radioactif se caractérise par son activité, c'est-à-dire le nombre de désintégrations de noyaux radioactifs par seconde qui se produit en son sein. 1 becquerel équivaut à une désintégration par seconde

- Le gray

Cette unité mesure la quantité de rayonnements absorbés par un organisme ou un objet exposé aux rayonnements. 1 gray équivaut à 1 joule par kilo de matière absorbée.

- Le sievert

Les effets biologiques des rayonnements sur un organisme exposé se mesurent en sievert.

Les unités de mesure de la radioactivité

Comparons un pommier à une source radioactive...

Le nombre de pommes qui tombent de l'arbre se mesure alors en Becquerel

En recevant des pommes sur son corps, une personne se trouvant sous l'arbre absorbe une dose. Celle-ci s'exprime en Gray

Bosses, bleus, blessures : la chute des pommes produit des effets sur le corps de la personne. Ceux-ci s'expriment en Sievert



Le becquerel (Bq) mesure en effet l'activité de la source radioactive, c'est-à-dire le nombre d'atomes (de pommes) qui, par unité de temps, se transforment et émettent un rayonnement
 $1 \text{ Bq} = 1 \text{ désintégration/seconde}$



Le gray (Gy) mesure la dose absorbée, c'est-à-dire l'énergie cédée à la matière par les rayonnements ionisants lorsqu'ils la traversent
 $1 \text{ Gy} = 1 \text{ joule/Kg}$



Le sievert (Sv) mesure les effets biologiques des rayonnements sur la matière vivante. Ces conséquences sont fonction de la nature de la radiation, de l'organe concerné et du temps d'exposition



La radioactivité a été découverte en 1896 par le physicien français **Henri Becquerel**

Le physicien britannique **Louis Harold Gray (1905-1965)** est le père de la radiobiologie (étude de l'action des rayons X sur les tissus vivants)

Rolf Sievert (1896-1966), physicien suédois, est célèbre pour ses recherches sur les effets biologiques des radiations

Source : Areva, CEA

L'épopée du rayon X et de la radioactivité

L'ionisation avec les tubes de Geissler Plücker : en 1854, Geissler, souffleur de verre spécialisé dans la verrerie de laboratoire et Plücker, professeur de mathématiques et sciences physiques, découvrent qu'après avoir enfermé un gaz sous faible pression lorsqu'une tension élevée est appliquée entre deux électrodes, une décharge s'effectue dans le tube et le gaz devient lumineux. Ils observent que la lumière émise est caractéristique du gaz enfermé ... la spectroscopie est née !



L'histoire des rayons X et de la radioactivité suit le même schéma que celle de nombreuses découvertes scientifiques.

Dans un premier temps, les scientifiques s'enthousiasment pour leur découverte. Ils en explorent toutes les possibilités et se lancent dans des applications tout azimut, en ignorant les risques potentiels. Puis vient le temps du doute, lorsque les premiers effets négatifs se manifestent.

Enfin, la dernière étape est celle de la prudence, avec la réglementation de l'usage et l'instauration de mesures de protection.

1. L'euphorie de la découverte

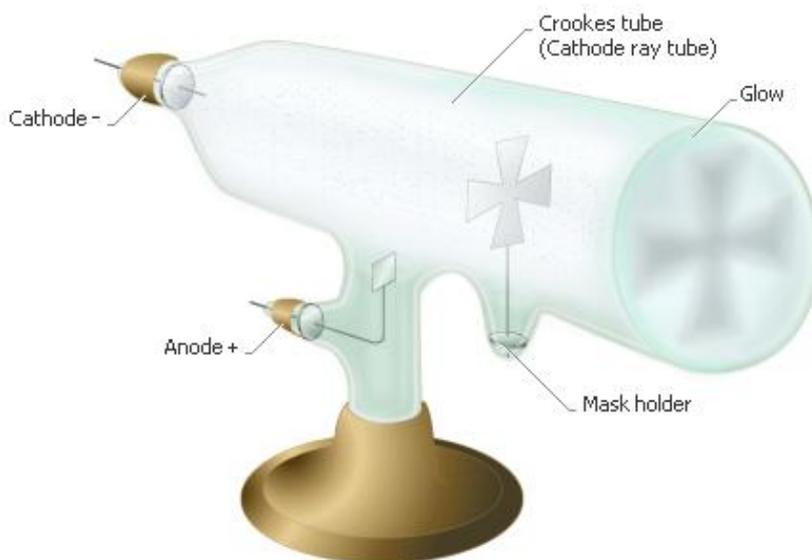
Les découvertes des rayons X et de la radioactivité, à trois mois d'écart, interviennent dans une époque de grande effervescence intellectuelle. Relayée par la presse avec une ampleur encore jamais égalée, elles vont provoquer un véritable engouement.

1.1. Et l'Homme devient transparent

a) Une découverte surprenante

À la fin du XIX^e siècle, tous les grands physiciens se passionnent pour les propriétés des « rayons cathodiques », c'est-à-dire des flux d'électrons que les scientifiques obtiennent dans les tubes de Crookes. Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923), un physicien allemand dont la carrière universitaire est déjà bien établie, ne fait pas exception.

Le fonctionnement d'un tube de Crookes à croix de Malte du nom de son inventeur Sir William Crookes (1832-1919)



Il s'agit d'un tube en verre sous vide avec deux électrodes en métal, une cathode et une anode.

Lorsqu'une tension électrique est appliquée entre les électrodes, des flux d'électrons émanant de la cathode, chauffée, se manifestent. Ce sont les rayons cathodiques.

Les électrons eux-mêmes sont invisibles, mais ils sont mis en évidence par la matière fluorescente dont est recouvert le fond du tube, qui se met à briller sous l'impact des électrons lorsque la tension est appliquée.

L'ombre de la croix de malte sur cette matière fluorescente prouve, quant à elle, que les électrons se déplacent en ligne droite.

Rayons X: Sir William Crookes abaisse la pression à l'intérieur des tubes et découvre en 1879 l'existence des "rayons cathodiques" (issus de la cathode (électrode négative)). Le 8 novembre 1895, Konrad Wilhelm Röntgen observe qu'un écran de platinocyanure de baryum devient lumineux alors qu'il se trouve pourtant trop loin du tube pour être atteint par les rayons cathodiques, de plus il avait enveloppé le tube de Crookes dans du papier noir. Aucun doute, quelque chose d'autre émane du tube, car cette fluorescence disparaît et apparaît à chaque fois que Röntgen l'éteint puis le réactive.

Wilhelm Conrad Röntgen

Lorsqu'il découvre les rayons X, le physicien à 50 ans et s'est déjà distingué par ses travaux de recherches et ses expérimentations brillantes.





Intrigué, il poursuit son expérience en interposant divers objets entre le tube de Crookes et le carton fluorescent : une feuille de papier, de carton, du bois, du verre... Il découvre que seule une mince feuille de plomb ou de platine fait disparaître la fluorescence. En intercalant cette fois sa main, il observe que le rayonnement traverse aussi la peau et la chair, mais est arrêté par les os. Après avoir constaté qu'il impressionne les plaques photographiques, il réalise le 20 novembre 1895 la première radiographie de l'histoire.

Radiographie de la main de Bertha Röntgen

Une des premières radiographies de Wilhelm Röntgen.

Définitivement convaincu que le tube produit des rayons invisibles d'un nouveau genre, il les baptise rayons X, du nom de l'inconnu algébrique. Puis le 28 décembre, il rend publics les résultats. Aussitôt, la nouvelle fait le tour de l'Allemagne, de l'Europe puis du monde entier. En quelques jours,

Röntgen acquiert une renommée mondiale.

b) Des rayons à sensations

Cette découverte suscite rapidement l'enthousiasme des chercheurs et notamment des médecins qui voient tout de suite l'intérêt des rayons X pour l'établissement des diagnostics. En quelques mois, dans les grandes villes, des laboratoires de radiologie se développent. À leur tête, des photographes intrigués par ces mystérieux rayons trouvent là la possibilité d'ouvrir leur métier sur une nouvelle dimension.

APPAREILS DE LA MAISON RADIGUET
13, BOULEVARD DES FILLES-DU-CALVAIRE, 13
RAYONS X

Un laboratoire spécial est mis gracieusement à la disposition de MM. les Docteurs qui voudraient, au moyen du Radioscope, examiner instantanément l'intérieur du corps humain.

La Maison RADIGUET exécute dans son laboratoire ou à domicile, à des prix modérés, les Radiographies nécessaires à la conduite et à la vérification des opérations chirurgicales.

INSTALLATION de RADIOSCOPIE MÉDICALE

**NOS APPAREILS SPÉCIAUX
POUR LES RAYONS X**

Ont obtenu une Médaille d'Or et un Diplôme d'Honneur à l'Exposition de Rouen 1896
Médaille d'Or à l'Exposition Universelle de Bruxelles

La Maison RADIGUET, 15, Boulevard des Filles-du-Calvaire, à Paris, près le Cirque d'Hiver, à l'honneur de vous prier de visiter ses

Nouveaux Magasins d'Exposition et d'Expériences
Ecrire : **15, Boulevard des Filles-du-Calvaire** Pas de Succursale.

Publicité pour l'ouverture d'un cabinet de radiologie

Nombreux sont ceux qui se disputent un marché prometteur.

Cependant l'engouement dépasse largement le cercle restreint de la médecine et gagne toute la société. En cette période foisonnante où le public se passionne autant pour les expériences occultes que pour la science, les rayons X fascinent. Ils font rapidement l'objet de démonstrations publiques, comme au Grand Café à Paris où les expériences avec un tube de Crookes s'enchaînent avec celles des frères Lumières venus présenter le premier film de l'histoire. Les rayons X deviennent également attraction dans les foires, les grands magasins, les salons mondains et les musées. Ils sont utilisés par les prestidigitateurs, par les médiums lors de séances d'occultisme, et par les metteurs en scène dans des spectacles impressionnants.



Affiche de spectacle du théâtre Robert-Houdin
Le pouvoir remarquable des rayons X attire les spectateurs.

Dans les mois et les années suivant cette découverte, Röntgen est quant à lui honoré de très nombreuses distinctions. Il reçoit en 1901 le 1er prix Nobel de physique. Cependant, il était loin de se douter que sa découverte allait engendrer des applications aussi fantasmagoriques. Fuyant les honneurs et la célébrité, il abandonne le sujet après une dernière publication au printemps 1897 pour se tourner vers d'autres domaines de la physique.

« Le 1er janvier 1896, j'ai envoyé les tirés à part et le diable fut lâché. »
Wilhelm Conrad Röntgen

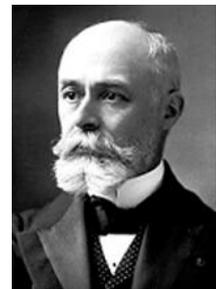
1.2. L'épopée de la radioactivité

a) La découverte inattendue d'Henri Becquerel

Le 20 janvier 1896, Henri Poincaré (1854-1912), mathématicien et physicien, présente les résultats de son ami Röntgen à l'Académie des Sciences de Paris. La lecture de la découverte des rayons X suscite l'enthousiasme, notamment chez l'un des académiciens présents, Henri Becquerel.

Henri Becquerel (1852-1908)

Henri Becquerel est issu d'une longue lignée de physiciens. Son grand-père, Antoine Becquerel, s'est illustré dans l'étude des phénomènes électriques. Son père, Edmond Becquerel, s'est intéressé à la phosphorescence, puis au magnétisme et à la conductibilité thermique des gaz. À sa suite, Henri Becquerel est devenu le spécialiste français des phénomènes de phosphorescence et est depuis 1892 professeur au Muséum d'histoire naturelle de Paris.



Ce dernier émet alors une hypothèse qui se révélera fautive : les rayons X ne seraient-ils pas émis par la matière fluorescente dont est recouvert le fond des tubes de Crookes ? Pour le vérifier, il décide d'exposer au soleil des sels d'uranium aux propriétés fluorescentes extraordinaires, tout en les posant sur une plaque photographique recouverte de carton noir chargée de capter d'éventuels rayons X.

Hélas ! Ce jour-là, Paris est recouvert de nuages. Becquerel abandonne donc ses échantillons dans un tiroir, remettant son expérience à plus tard. Mais le 1^{er} mars 1896, avant de reprendre ses travaux, il développe par acquis de conscience la plaque photographique, dont tout laisse à penser qu'elle est vierge puisque l'uranium était à l'abri du soleil. À sa grande stupéfaction, elle est, au contraire, fortement impressionnée. Becquerel est sous le choc de sa découverte : l'uranium émet donc spontanément des rayonnements, aussi invisibles et pénétrants que les rayons X ! Il conclut que le sel d'uranium émet des rayons et qu'il n'y a aucun lien avec ni avec la fluorescence, ni avec la phosphorescence, il les nomme "rayons uraniques". Ce phénomène sera connu par la suite sous le nom de radioactivité. Sans le savoir, le physicien a ouvert la porte d'un monde inconnu.

b) Les recherches de Pierre et Marie Curie

À la fin de l'année 1897, Marie Curie choisit de s'intéresser, pour sa thèse de doctorat en sciences physiques, aux fameux « rayons uraniques » découverts par Becquerel.

Marie Curie (1867 - 1934)

Née en Pologne en 1867, Marya Sklodowska est une excellente élève. Elle obtient ainsi son diplôme de fin d'études secondaires avec la médaille d'or en 1883.

L'accès à l'université étant interdit aux femmes, elle part pour Paris en 1891 où elle est acceptée pour suivre des études en sciences physiques et en mathématiques. Elle obtient ces deux licences avant d'être reçue première à l'agrégation de physique en 1896.

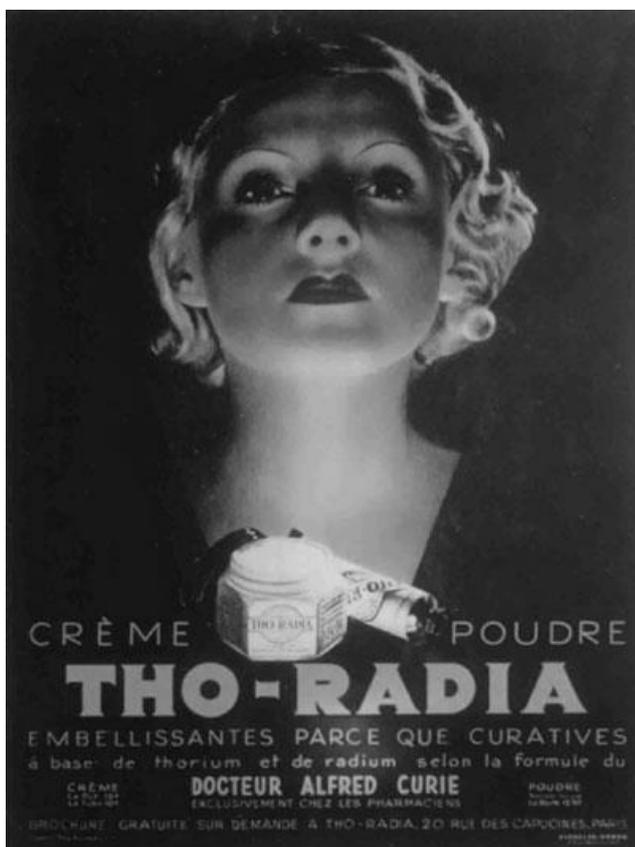
En décembre 1897, elle se lance, avec l'appui de son époux Pierre Curie (1859 - 1906), à l'assaut d'un autre diplôme : un doctorat de sciences. Aucune femme ne l'a encore jamais fait en Europe. Au cours de sa carrière, elle sera honorée de deux prix Nobel : le prix Nobel de physique en 1903 et celui de chimie en 1911.



D'abord seule, puis en collaboration avec son mari Pierre Curie, elle cherche si d'autres substances que l'uranium présentent cette propriété remarquable d'émettre spontanément des rayonnements, qu'elle baptise « radioactivité ». Ensemble, ils testent des centaines de matériaux différents. Ils découvrent ainsi qu'un minerai, la pechblende, semble contenir une substance beaucoup plus radioactive que l'uranium. À l'été 1898, ils réussissent à isoler un premier élément qu'ils baptisent « polonium » en souvenir des origines polonaises de Marie, puis en décembre un deuxième encore plus fortement radioactif, auquel ils donnent le nom de « radium ».

Henri Becquerel, Marie et Pierre Curie se verront décerner conjointement en 1903 le prix Nobel de la physique pour la découverte de la radioactivité. Marie recevra également le prix Nobel de chimie en 1911, pour ses travaux sur le polonium et le radium.

c) Le succès du radium



Comme pour les rayons X, l'épopée du radium démarre dans l'allégresse. Les savants pressentent que cette découverte va leur ouvrir d'immenses champs de recherche. Les médecins s'enthousiasment pour cette substance capable de détruire des cellules et s'approprient très rapidement la thérapie par le radium dans la lutte contre le cancer. La société entière se passionne pour cet élément mystérieux, qui semble guérir, dégage de la chaleur et brille tellement dans le noir qu'il est possible de lire à côté.

Le radium génère donc rapidement un secteur d'activité économique très florissant. Des lotions, des crèmes, des vêtements, des objets décoratifs contenant du radium sont bientôt vendus au public. Lors des soirées, les femmes se mettent du radium sur les ongles afin de les faire briller dans le noir. Parfois, elles le mélangent même aux boissons ! Cependant, pour les rayons X comme pour le radium, cette insouciance ne va pas durer car malheureusement, les premiers effets nocifs vont rapidement apparaître.

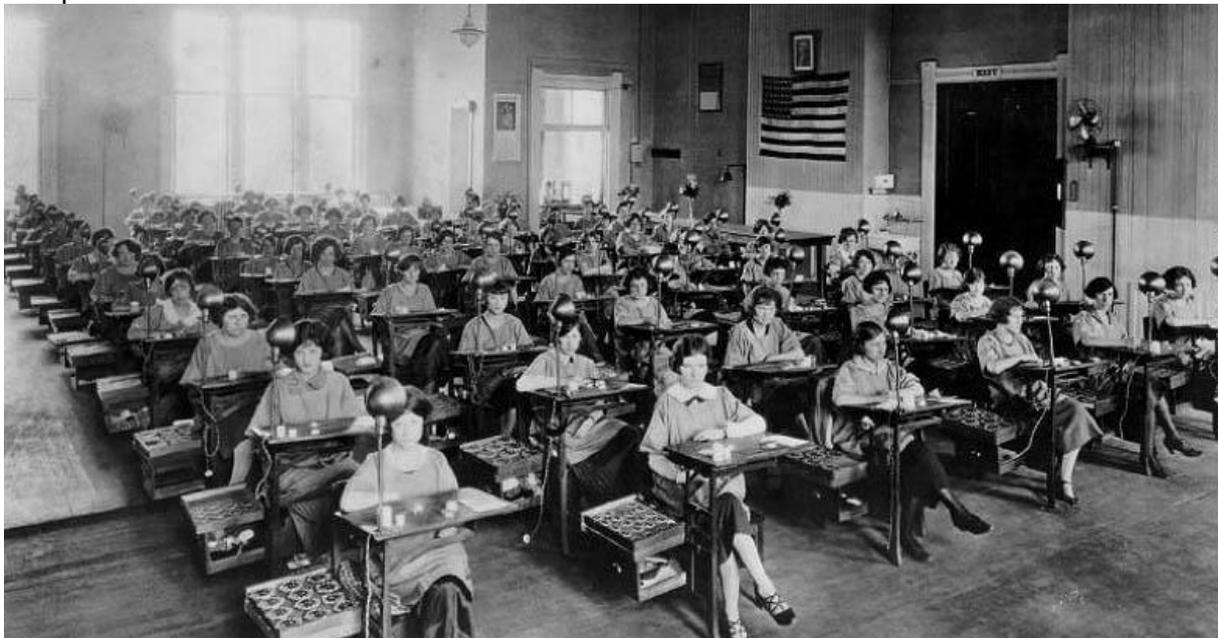
Un remède miracle

Paré de toutes les vertus, source de beauté et de santé, le radium est présenté comme un remède miracle.

Cependant, pour les rayons X comme pour le radium, cette insouciance ne va pas durer car malheureusement, les premiers effets nocifs vont rapidement apparaître.

Comme pour les rayons X, ce n'est que progressivement que prend corps la conscience des effets nocifs du radium. D'abord dans les milieux scientifiques et médicaux, où l'on constate très tôt que, parmi les chercheurs et le personnel médical manipulant le radium, nombre d'entre eux sont atteints de lésions cutanées. Des règles de protections sont donc rapidement mises en place. Mais c'est dans le monde industriel, quelques années plus tard, que se révèlent les cas les plus graves.

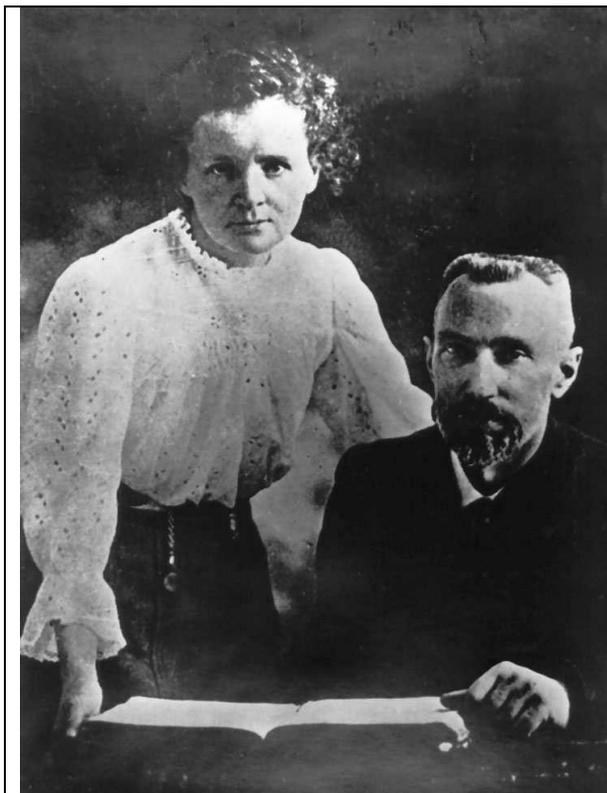
En effet, en 1923, un dentiste new-yorkais, Théodor Blum, s'alarme en constatant qu'un grand nombre de ses patientes sont atteintes d'un cancer de la mâchoire. Il découvre alors que ces jeunes femmes travaillent toutes dans des ateliers de pose de peinture luminescente au radium sur des cadrans et aiguilles de réveils et d'horloges. Ces ouvrières ont l'habitude d'affiner avec la bouche la pointe de leur pinceau après l'avoir trempé dans une peinture au radium.



Atelier de peinture au radium

C'est en 1915 que Sabin von Sochocky, un médecin américain peintre du dimanche, a mis au point cette peinture lumineuse. Il mourra en 1928 à l'âge de 45 ans d'un empoisonnement au radium.

Cette tragédie a un retentissement international. Elle conduit à la mise en place progressive de mesures de protection dans le monde industriel, en dépit de la réticence des patrons en contestant le bien-fondé et s'évertuant à minimiser les dangers induits par l'utilisation du radium.



Du fait des produits radioactifs qu'ils manipulent sans aucune protection, Pierre et Marie Curie tombent tout deux gravement malades.

Si Pierre voit ses souffrances abrégées par un accident de calèche en 1906, la santé de Marie se dégrade d'année en année : troubles de la circulation, fièvres, fatigue, problèmes de vue, brûlures sur les mains...

Elle meure en 1934 d'une leucémie, après 35 années à manipuler des matériaux radioactifs sans aucune protection.

Après l'affaire des ouvrières de l'industrie horlogère, la question de la radioprotection est mise sur la place publique. Ainsi, en 1928, un comité international de protection contre les rayons X et le radium est créé à l'occasion du deuxième congrès international de radiologie à Stockholm. Ce comité met en place, au niveau international, des mesures de protection basées sur les résultats des scientifiques. Ceux-ci ont approfondi leurs connaissances sur les effets provoqués par de fortes expositions et parviennent à établir des limites d'exposition, des « doses admissibles » par les différents organes.

Cependant, l'histoire de la radioprotection ne fait que commencer. Pour l'instant, elle limite encore son champ d'action au domaine des risques encourus par les professionnels et leurs patients. Mais bientôt, avec la découverte de la radioactivité artificielle et ses applications militaires et civiles, c'est la population dans son ensemble qui va se retrouver concernée par cette question.

Rayons X et radium : échecs et succès

La médecine actuelle utilise toujours les rayons X, qui constituent encore le meilleur outil d'investigation des poumons et des os. Les rayons X ont également de nombreuses autres utilisations scientifiques, par exemple en cristallographie.

Au contraire des rayons X, les mesures de radioprotection ont conduit à éliminer progressivement l'usage du radium jusqu'à l'interdire définitivement en 1976, après 70 ans d'exploitation industrielle et médicale. Cependant, l'échec du radium est à relativiser : sa découverte a ouvert la voie à des avancées considérables, notamment dans les techniques de lutte contre le cancer.

Mais avant d'aborder cette nouvelle étape de l'histoire de la radioprotection, il est nécessaire d'en apprendre un peu plus sur la nature exacte des rayons X et de la radioactivité, et de comprendre leurs effets sur les organismes vivants.

- *Hypothèse du neutrino* : En physique, il existe un principe immuable : "rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme", ce principe est aussi vrai pour l'énergie. Les mesures de l'énergie émise par la radioactivité Bêta montrent que l'énergie emportée par l'électron est variable. Cette observation fit vaciller la physique ...mais en 1930, Wolfgang Pauli proposa une hypothèse permettant d'expliquer les spectres bêta sans violer le principe de conservation de l'énergie. Cette hypothèse était l'existence d'une nouvelle particule : le neutrino. Cette particule devait avoir une masse très faible et interagir faiblement avec la matière, elle emporterait l'énergie manquante mais ne serait pas détectée.



La physique des particules

Qu'est-ce que la physique des particules ?

La physique des particules cherche à déterminer quels sont les constituants élémentaires de la matière ainsi que les forces qui s'exercent entre eux.

Qu'entendons-nous par matière ?

À l'échelle humaine, les trois états de la matière les plus connus sont :

- l'état solide
- l'état liquide
- l'état gazeux

Dès lors que deux objets de matière sont en présence, une force s'exerce entre eux. Ainsi, matière et force sont indissociables.

Une des propriétés fondamentales de la matière, quelque soit son état, est la masse. Elle représente approximativement la quantité de matière d'un corps et elle est responsable de la première force fondamentale de la nature : la gravitation ou force de gravitation. Celle-ci est le phénomène par lequel deux corps dotés de masse s'attirent. Cela induit sur Terre la chute des objets et explique dans l'espace le mouvement des planètes.

Qu'est-ce qu'un atome ?

Pour les Grecs de l'Antiquité, la matière n'était composée que de quatre éléments : l'eau, la terre, l'air et le feu. Nous savons aujourd'hui que la matière est composée de 92 éléments simples naturels tels que l'hydrogène, le fer, le mercure (...), lesquels peuvent s'assembler en éléments composés et former par exemple l'eau, le gaz carbonique ou le sel. La plus petite partie d'un élément simple s'appelle un atome : à chaque élément simple correspond "son" atome. Exemples : atomes de cuivre pour le cuivre, atomes de carbone pour le carbone, atomes d'or pour l'or...

L'atome est-il le constituant élémentaire de la matière ?

Du grec *atomos* qui signifie « indivisible », l'atome a longtemps été considéré comme le constituant ultime de la matière. Nous savons aujourd'hui que ce n'est pas le cas ! En effet, l'atome se décompose en objets plus élémentaires : le noyau central de l'atome est entouré d'électrons en mouvement. Ces derniers sont dotés d'une charge électrique négative. Le noyau de l'atome, quant à lui, est constitué de neutrons et de protons. Comme leur nom l'indique, les neutrons sont dépourvus de charge électrique, à l'inverse des protons qui sont dotés d'une charge électrique positive. Puisque l'on dénombre autant d'électrons que de protons, leurs charges électriques respectives s'annulent, conférant à l'atome sa neutralité électrique.

Qu'est-ce que l'électricité ?

Il s'agit d'un phénomène physique dû à la présence de charges électriques. Au XVIII^e siècle, Benjamin Franklin remarque que des corps électrisés peuvent s'attirer ou se repousser : il y a donc une force électrique ! Il suppose alors qu'il y a deux sortes d'électricité, qu'il baptise positive (+) et négative (-). Deux charges de même signe se repoussent et deux charges de

signes opposés s'attirent. Un corps qui contient autant de charges + que de charges - est électriquement neutre.

Et le magnétisme ?

C'est un phénomène physique dû à la présence de charges électriques en mouvement. Il peut aussi exister à l'état naturel dans les aimants. Il existe une force magnétique : des aimants s'attirent ou se repoussent. Par contre, il n'existe pas de charge magnétique : si vous coupez un aimant en deux, vous n'obtiendrez pas le + d'un côté et le - de l'autre, mais... deux aimants plus petits ! La Terre est un gigantesque aimant : elle attire, vers le Nord, l'aiguille aimantée d'une boussole. Nous savons depuis 150 ans qu'électricité et magnétisme ne provoquent qu'une seule et même force : la force électromagnétique, deuxième force fondamentale de la nature.

Mais comment les protons et les neutrons restent-ils soudés dans le noyau ?

Les protons du noyau atomique ont une charge positive : donc ils devraient se repousser et provoquer l'éclatement du noyau. Ce n'est pas le cas puisqu'un atome est (généralement) stable. On en déduit donc qu'il existe une nouvelle force, beaucoup plus « forte » que la force électromagnétique, permettant aux protons et aux neutrons d'être soudés dans le noyau. Cette force est la troisième force fondamentale connue, baptisée force forte !

Protons et neutrons sont-ils élémentaires, c'est-à-dire indivisibles ?

Au début des années soixante, un modèle théorique cherchant à classer les nombreuses particules récemment découvertes, imagine qu'un grand nombre d'entre elles, dont le proton et le neutron, sont composées de particules plus élémentaires : les quarks. Quelques années plus tard, une expérience confirme cette hypothèse. Il existe six sortes (ou « saveurs ») de quarks : up, down, strange, charm, bottom et top. Les quarks ont une masse, une charge électrique mais aussi une propriété spécifique appelée « couleur » qui les rend sensibles à la force forte. Celle-ci soude les quarks entre eux au sein des protons et des neutrons. Elle lie également protons et neutrons dans le noyau, conférant à celui-ci sa stabilité. L'une des caractéristiques de cette force implique qu'un quark isolé ne peut être observé.

Radioactivité

À la fin du XIX^e siècle, Henri Becquerel et Pierre et Marie Curie découvrent la radioactivité. Dans les années qui suivent, trois sortes de radioactivité naturelle sont mises en évidence : alpha, bêta et gamma.

La radioactivité bêta intervient entre autres, dans la combustion de l'hydrogène dans le soleil. La compréhension du mécanisme induisant cette radioactivité a conduit à la découverte :

- d'une nouvelle force, baptisée force faible en raison de sa faible intensité,
- d'une nouvelle particule, appelé neutrino.

Les neutrinos ne sont sensibles qu'à la force faible ; ainsi ils peuvent traverser la Terre de part en part sans subir aucune altération. La force faible est la quatrième et dernière des forces fondamentales connues.

Les particules élémentaires, enfin !

Nous venons de le voir : la notion d'élémentarité a évolué avec le temps. Sont appelés "particules élémentaires" les objets dont nous pensons aujourd'hui qu'ils sont les constituants fondamentaux de toute matière (particules « matière ») et les médiateurs des quatre forces fondamentales (particules « médiateur »). Les particules « matière » peuvent

se décomposer en deux familles : les quarks et les leptons. Ceux-ci constituent toute la matière connue de l'Univers.

Les particules « médiateur » sont :

- le graviton, qui n'a encore jamais été observé et qui transmettrait la gravitation,
- les bosons W_+ , W_- et Z_0 qui transmettent la force faible,
- le photon qui transmet la force électromagnétique,
- les gluons qui transmettent la force forte : ils engluent les quarks dans le proton et le neutron et confinent ces derniers dans le noyau.

Les particules « matière » sont des fermions et les particules « médiateur » sont des bosons.

Physiques des particules et physique nucléaire, quelle différence ?

Attention à la confusion !

Comme nous venons de le voir, la physique des particules cherche à déterminer quels sont les objets élémentaires qui composent la matière. La physique nucléaire, quant à elle, s'intéresse aux noyaux des atomes, c'est-à-dire à des objets beaucoup plus « gros ». Elle cherche à comprendre comment protons et neutrons s'assemblent pour former des noyaux. Il y a une soixantaine d'années, c'est en étudiant les noyaux que les chercheurs ont compris qu'ils pouvaient produire de l'énergie... nucléaire (en latin, *nucleus* signifie noyau). Cette énergie est aujourd'hui exploitée dans de nombreux domaines : production d'électricité, propulsion navale et spatiale, radiothérapie, armement...

Et l'antimatière ?

À chaque particule correspond son antiparticule. Depuis la découverte en 1932 de la première antiparticule (le positron, antiparticule de l'électron), les antiparticules de la plupart des particules connues ont été observées : proton / antiproton, neutrino / antineutrino, etc.

Une antiparticule a la même masse que la particule mais, entre autres, une charge électrique ou une couleur opposée.

Les particules élémentaires étant les constituants fondamentaux de la matière, les antiparticules forment l'antimatière. Toute particule possède son antiparticule !

Ainsi, chaque atome possède probablement son anti-atome.

Seul problème : quand une antiparticule rencontre une particule, elles s'annihilent pour produire de l'énergie. L'antimatière sera donc difficilement détectable sur Terre.

Mais alors, où sont les anti-atomes ? Constituent-ils un « anti-monde » quelque part dans l'Univers ? Telles sont quelques-unes des questions essentielles que les physiciens étudient actuellement.

A la conquête de l'infiniment petit

Peut-on voir des particules élémentaires avec un microscope ?

Pour observer un objet, il faut l'éclairer. Avec un microscope, les objets étudiés sont éclairés par de la « lumière ». Ce que nous appelons lumière désigne les « ondes électromagnétiques » visibles par l'oeil humain. Comme toute onde, une onde électromagnétique est caractérisée, entre autres, par sa longueur d'onde. Voici, à titre

d'exemple, les longueurs d'ondes des ondes électromagnétiques qui peuplent notre quotidien :

- > ondes radio : >100 millimètres,
- > micro-ondes ou radar : de 3 millimètres à 100 millimètres,
- > lumière visible : de 0,4 à 0,7 millièmes de millimètres,
- > rayons ultraviolets (UV) : de 0,01 à 0,4 millièmes de millimètres,
- > rayons X (en radiologie): de 5 à 10 000 millièmes de millimètres.

Pour « voir » un objet, la longueur d'onde de la lumière qui l'éclaire doit être plus petite que la taille de l'objet observé. Sachant qu'un atome mesure approximativement un dixième de millièème de millimètre et qu'une particule élémentaire est encore bien plus petite, les atomes ne peuvent pas être observés au microscope.

Comment procéder alors ?

La photoélectricité est le mécanisme par lequel la lumière peut produire de l'électricité, comme dans un panneau solaire. Einstein a montré en 1905 que cet effet pouvait s'expliquer en considérant la lumière non pas comme une onde mais comme une particule : le photon. La collision entre un photon et un électron peut éjecter l'électron de l'atome et provoquer un courant électrique. à l'inverse, il a été démontré en 1924 qu'une particule pouvait être considérée comme une onde. Une onde est caractérisée par sa longueur d'onde et une particule par son énergie. Or « petite longueur d'onde » équivaut à « grande énergie » et vice-versa. Ainsi, pour « voir » petit, il faut une petite longueur d'onde ou une grande énergie !

Il est facile de produire des particules chargées et de les accélérer à très haute énergie. C'est pourquoi les physiciens construisent des accélérateurs de particules. Ces instruments sont d'autant plus gigantesques que l'énergie des particules accélérées doit être élevée pour repousser toujours davantage les limites du « petit ».

Qu'est-ce qu'un accélérateur de particules ?

C'est un instrument dans lequel des particules chargées électriquement (électrons, protons, ...) sont accélérées à l'aide de champs électriques très intenses. Regroupées en faisceaux, les particules accélérées se déplacent à une vitesse proche de celle de la lumière et sont projetées sur une cible. Elles doivent circuler dans le vide afin de ne pas entrer en collision avec de l'air résiduel. C'est exactement le même dispositif, en beaucoup plus grand, que celui du tube cathodique d'un téléviseur ordinaire.

Pour augmenter l'énergie de la collision, des collisionneurs sont construits : deux faisceaux de particules accélérées circulent en sens inverse et sont amenés en collisions frontales en des endroits précis où sont installées les expériences qui observent les résultats des interactions produites par ces collisions.

Implantés au niveau du sol ou à plusieurs mètres de profondeur, les accélérateurs et collisionneurs sont soit linéaires, à l'image de celui de Stanford en Californie qui mesure trois kilomètres de long, soit circulaires comme le Large Hadron Collider (LHC) au CERN, près de Genève, d'une circonférence de vingt-sept kilomètres.

Qu'est-ce qu'une expérience de physique des particules ?

Une expérience scientifique a pour but de vérifier une hypothèse, de confirmer un résultat, d'explorer un nouveau domaine... Cela implique les étapes successives suivantes : conception, construction, mesure, analyse.

Une expérience de physique des particules installée auprès d'un accélérateur ou d'un collisionneur est un dispositif chargé de mesurer le résultat de collisions faisceau-cible (accélérateur) ou faisceau-faisceau (collisionneur) et d'en extraire les résultats.

Elle peut être assimilée au processus d'une radiographie médicale : comparons l'accélérateur de particules au canon à rayons X, la cible à une partie du corps humain et le dispositif de mesure à la plaque photographique qui, une fois développée, donnera lieu à l'image radio. Quand la mesure est effectuée, le médecin interprète la radio, tout comme le physicien analyse les résultats enregistrés par l'expérience.

Cependant, à l'inverse d'une radiographie médicale, une expérience exige la conception et la construction du dispositif de mesure. Seulement alors, viennent la prise de données (la radiographie) et l'analyse des résultats (l'interprétation du radiologue). De plus, là où le radiologue ne prend en général que quelques clichés, l'expérience de physique des particules enregistre les résultats de milliers, voire de millions de collisions !

Le Large Hadron Collider (LHC)

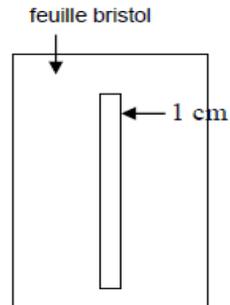
L'Organisation Européenne de Recherche Nucléaire (CERN) implantée depuis 1954 à la frontière franco-suisse rassemble près de 7 000 scientifiques de plus de 80 pays autour d'une seule et même vocation : étudier les constituants élémentaires de la matière ainsi que les forces qui s'exercent entre eux afin d'apporter des réponses aux mystères de l'Univers tout en repoussant les frontières de la technologie et de l'ingénierie. Exemple éclatant de collaboration internationale, le CERN est le plus grand laboratoire de physique des particules du monde. Il abrite le LHC, enfoui entre 50 et 150 mètres sous terre, entre les montagnes du Jura en France et le lac Léman en Suisse.

Quelques activités à réaliser

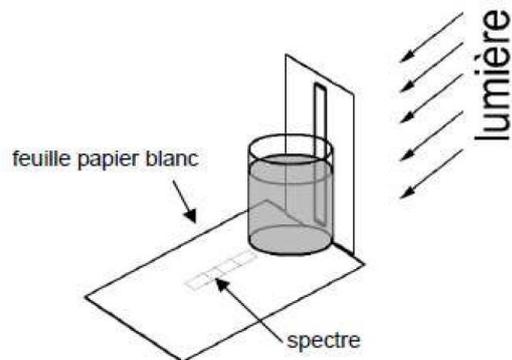
1. Ces ondes visibles qui nous entourent

Il faut :

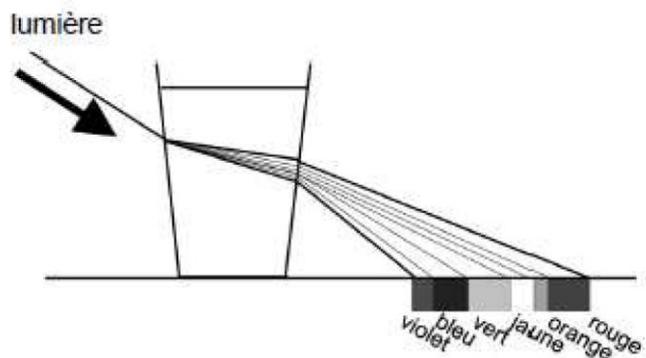
- 1 verre transparent droit ;
- de l'eau ;
- du bristol blanc épais ;
- du papier blanc ;
- un cutter ou une paire de ciseaux ;
- du ruban adhésif ;
- des crayons de couleur.



1. Découpez une fente de 1 cm de large dans le bristol.
2. Maintenez le bristol contre le verre avec le ruban adhésif.
3. Placez-vous près de la fenêtre par une journée ensoleillée et réalisez le montage ci-contre.
4. Observez sur la feuille de papier blanc la lumière du Soleil qui passe à travers la fente.
5. Avec les crayons de couleur ou les feutres, reproduisez, sur la feuille blanche, le spectre obtenu.



Eurêka ! La lumière peut être considérée comme une superposition d'un nombre infini d'ondes. Quand la lumière passe de l'air à l'eau puis de l'eau à l'air, elle subit une réfraction : elle est déviée. Or, chaque onde est déviée différemment en fonction de sa longueur d'onde et suit des trajectoires légèrement différentes. Ainsi, la lumière blanche est décomposée et révèle les couleurs portées par des longueurs d'ondes différentes. La lumière est la partie visible, à nos yeux, du rayonnement solaire qui arrive sur Terre. Une autre partie, invisible, est constituée des ultra-violetts et des infrarouges.



2. Un corps qui rayonne !

Il faut :
- du papier aluminium

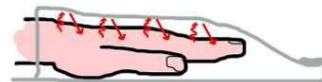
1. Découpez une feuille de papier aluminium suffisamment grande pour pouvoir entourer votre main.



2. Confectionnez-vous une espèce de moufle en aluminium.
3. Mettez une minute votre main dans la moufle. Que constatez-vous ?



Eurêka ! Une sensation de chaleur envahie la main. En effet, la température du corps humain, comme celles des autres mammifères, est de 37°C . Il perd donc de la chaleur dans un environnement plus froid. Cette perte de chaleur se fait sous forme de rayonnement invisible : les infrarouges. Or, une des particularités de l'aluminium est de renvoyer les infrarouges comme un miroir renvoie la lumière visible. Voilà pourquoi l'aluminium est souvent utilisé comme matériau isolant limitant les pertes de chaleur dans les vêtements et les isolants minces pour la construction.



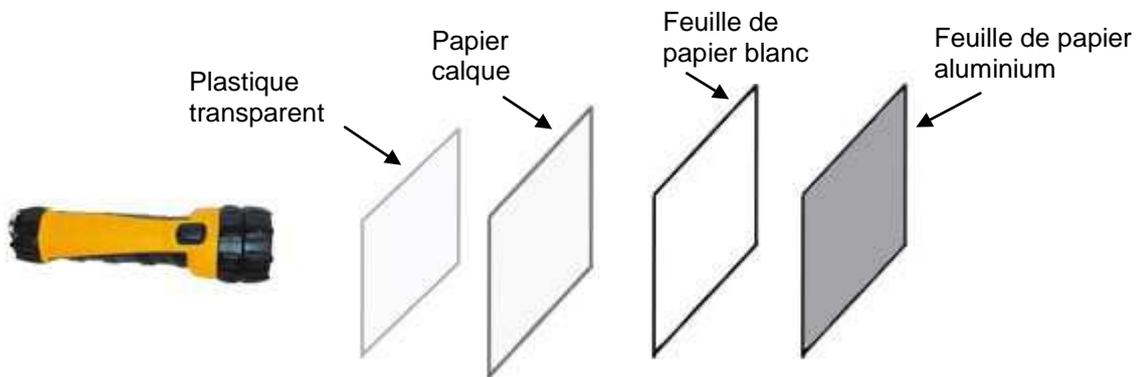
3. Ces ondes passe-murailles

Il faut :

- du plastique transparent ;
- du papier calque ;
- du papier aluminium ;
- une feuille de papier blanc ;
- une lampe torche ;
- une radiographie médicale quelconque.

1. Sur une table, posez la lampe torche allumée.

2. Posez successivement devant la lampe les matériaux suivants dans l'ordre : plastique transparent, papier calque, papier blanc puis papier aluminium. Observez comment se comportent ces matériaux avec la lumière.



3. Prenez la lampe torche et mettez-la derrière le doigt ou derrière l'oreille. Que constatez-vous ?



4. Observez la radiographie médicale. Comment peut-on obtenir un tel cliché ?

Eurêka ! Les matériaux laissent plus ou moins passer la lumière. Le verre est quasi-transparent à la lumière visible alors que le papier aluminium est complètement opaque. Entre les deux, le papier blanc et le papier calque sont translucides, c'est-à-dire qu'ils renvoient ou absorbent plus ou moins ces ondes. Même chose quand les doigts ou l'oreille sont éclairés par la lampe torche. On observe une faible lumière rougeâtre.

Les pigments des globules rouges n'ont laissé passer que la composante rouge de la lumière. Les ondes peuvent donc traverser la matière et même le corps humain. Des ondes invisibles de très petite longueur d'onde et de haute fréquence, comme les rayons X, peuvent traverser encore mieux le corps humain et ainsi révéler les différents organes (os, dent, parties molles) qui le composent.



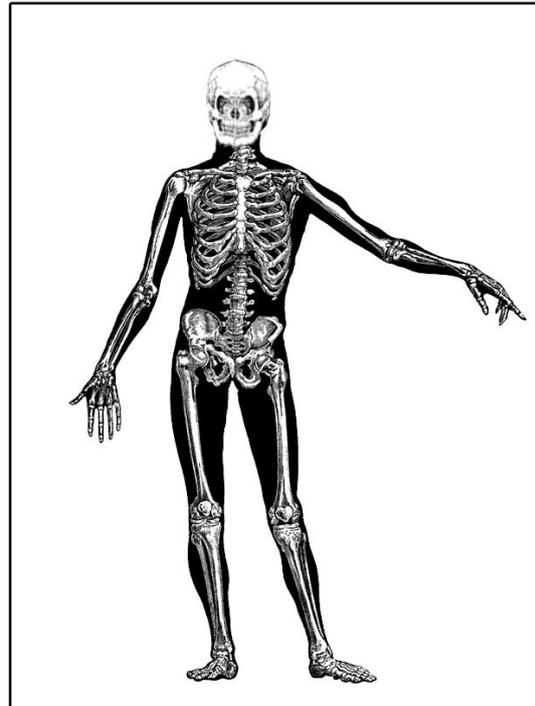
Les rayons X peuvent traverser la matière.

4. Réalisez une radiographie sans danger !

Il faut :

- une paire de ciseaux ;
- un tube de colle ;
- une lampe torche.

1. À l'aide de la paire de ciseaux, découpez les deux rectangles images ci-dessous.

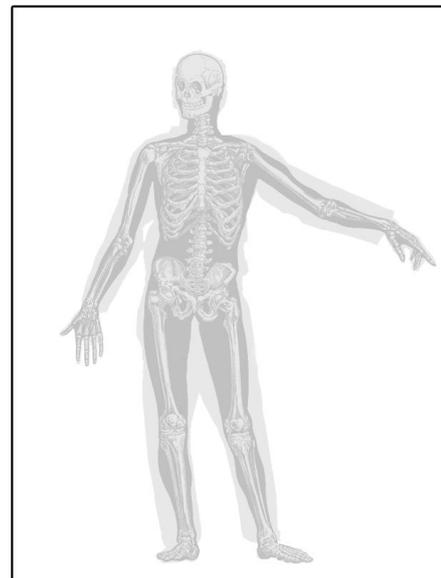


2. Collez les deux rectangles dans l'ordre

3. Vous pouvez maintenant vous amuser à radiographier le personnage en faisant apparaître le squelette par transparence à l'aide de la lampe torche.

Eurêka ! Un simple rayonnement compris entre des longueurs d'onde de 380 nm et 780 nm, c'est-à-dire la lumière visible, ne suffit pas dans la réalité à faire des radiographies. Pour cela, il faut utiliser des rayonnements plus énergétiques dont la longueur d'onde est comprise approximativement entre 5 picomètres et 10 nanomètres. Mais attention, ce rayonnement de haute fréquence est ionisant, c'est-à-dire qu'il est capable d'arracher des électrons à des atomes et donc de casser des molécules.

Ce n'est pas sans conséquence pour les êtres vivants constitués d'assemblage de molécules et en particulier pour l'ADN, le plan de construction des êtres vivants.



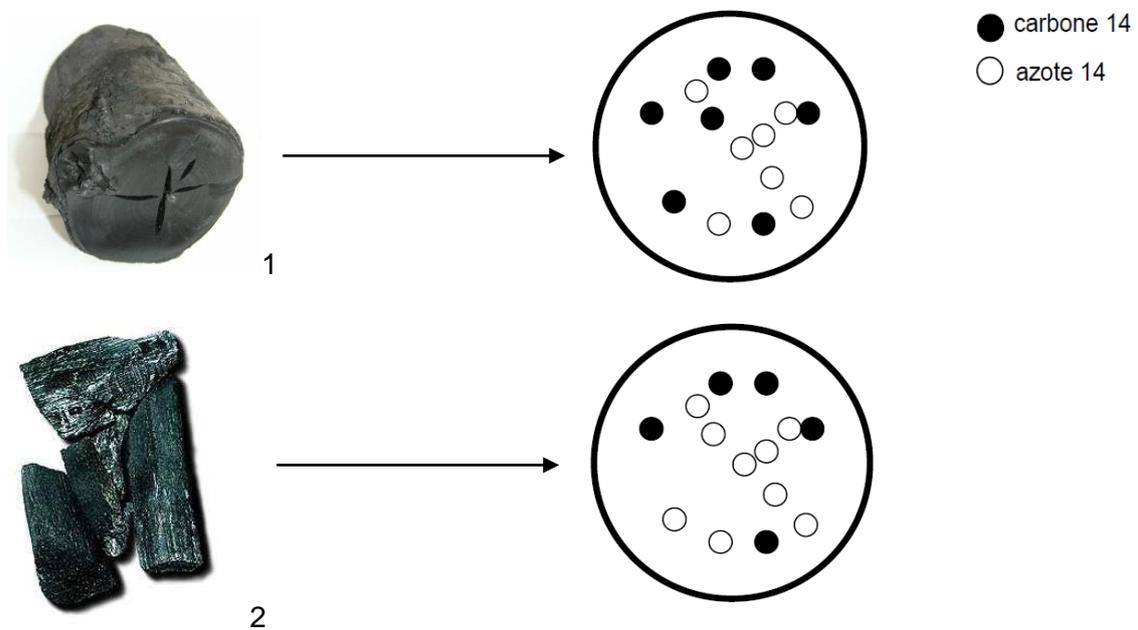
5. Même morts, les corps rayonnent !

Rappel :

Tout au long de sa vie, un organisme va emmagasiner du carbone 14 (C14), un atome radioactif présent dans l'atmosphère. Après la mort de l'organisme, le C14 va décroître progressivement. Lors de sa désintégration le C14 se transforme en azote 14 (N14).

En 5 730 ans la moitié des atomes de C14 aura disparu (demi-vie du C14), remplacée par des atomes de N14. Plus on avance dans le temps, plus la quantité de carbone 14 est faible et devient de moins en moins mesurable. Cette méthode permet donc de dater des objets jusqu'à 35 000 ans

Voici 2 échantillons de charbon. Ils ont été retrouvés près d'anciens foyers humains et les scientifiques veulent les dater. A vous de jouer !



Eurêka ! L'échantillon n°1 présente une proportion de 50% de carbone 14 et 50% d'azote 14. Cela signifie que la moitié du carbone 14 initial s'est désintégré en azote 14. L'échantillon de charbon date donc de 5370 ans. Pour l'échantillon n°2, il y a neuf azote 14 pour cinq carbone 14, soit 1,8 fois plus. L'échantillon est donc âgé de $1,8 * 5370 = 9666$ ans.

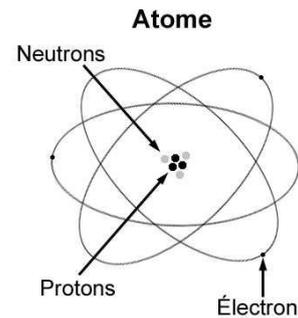
Questions - réponses

Science ?

Composition de l'atome ?

L'atome est composé :

- de protons et de neutrons, appelés également nucléons parce qu'ils s'assemblent pour constituer le noyau de l'atome ;
- d'électrons qui gravitent autour de ce noyau.

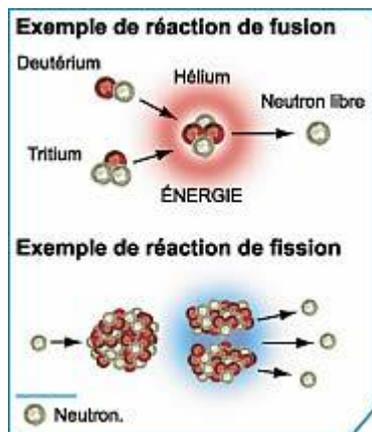


Énergie nucléaire ?

Dans le noyau, les protons et les neutrons sont liés les uns aux autres par une force baptisée « force nucléaire ». Cette force, naturelle, est présente dans chaque atome de l'univers.

Réactions nucléaires ?

Certaines transformations de noyaux, appelées réactions nucléaires, libèrent l'énergie de ces liaisons nucléaires. Elles sont de deux types : la fusion et la fission.



Fusion nucléaire ?

Deux atomes légers produisent un dégagement d'énergie en fusionnant en un atome de taille moyenne.

Fission nucléaire ?

Un noyau lourd produit un dégagement d'énergie en se cassant en deux sous l'impact d'un neutron. C'est cette réaction de fission qui est utilisée dans les réacteurs nucléaires.

Atomes fissiles ?

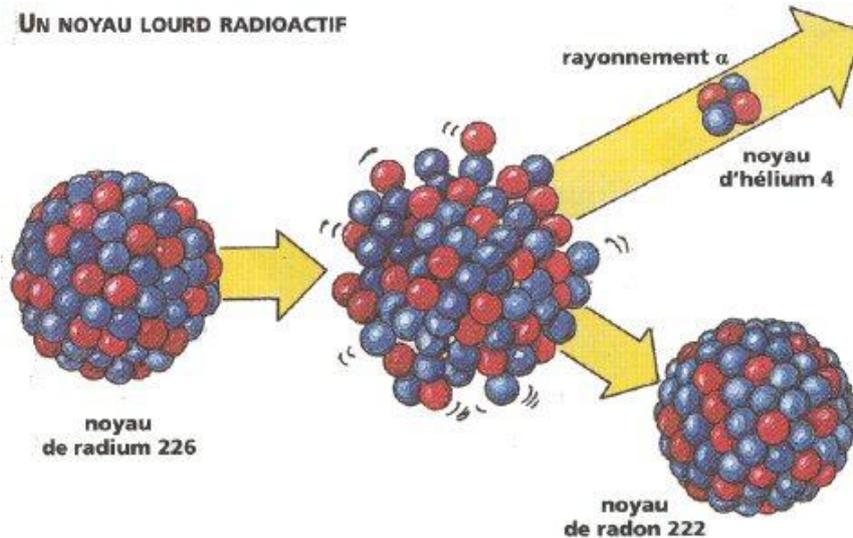
Les noyaux d'atomes pouvant se casser en deux sous l'impact d'un neutron sont dits fissiles. Les plus courants sont l'uranium 235 et le plutonium. Les noyaux fissiles sont des noyaux radioactifs.

Atomes radioactifs ?

Certains atomes ont des noyaux instables, c'est-à-dire des noyaux lourds possédant soit trop de protons, soit trop de neutrons, parfois une surabondance des deux. Ces noyaux sont dits radioactifs.

Désintégration ?

Un noyau radioactif se transforme spontanément en un noyau plus léger et plus stable en libérant de l'énergie, c'est-à-dire en éjectant des particules. Ce phénomène est appelé désintégration. Il faut parfois une cascade de désintégrations pour qu'un atome atteigne la stabilité. Certains noyaux radioactifs ont également la capacité de fissionner, c'est-à-dire de se casser en deux.



Rayons alpha, bêta et gamma ?

Lors d'une désintégration, un atome radioactif peut émettre plusieurs types de rayonnements :

- un rayonnement alpha, constitué d'un noyau d'hélium comprenant deux protons et deux neutrons ;
- un rayonnement bêta moins ou bêta plus, constitué d'un électron ou d'un positron ;
- un rayonnement gamma, constitué d'une onde électromagnétique.

Période ou demi-vie ?

La période ou demi-vie d'un atome radioactif est le temps nécessaire pour que, dans un échantillon donné, la moitié des atomes radioactifs initialement présents disparaissent par désintégration spontanée. Selon les noyaux radioactifs concernés, cette période est très variable : de quelques secondes à plusieurs milliards d'années !

Éléments radioactifs naturels ?

Depuis la formation de la Terre, la majorité des atomes instables se sont désintégrés par radioactivité. Aujourd'hui, seuls subsistent les atomes radioactifs caractérisés par une très longue période, comme l'uranium 238 (4,5 milliards d'années) et 235 (710 millions d'années), le thorium 232 (14 milliards d'années), le potassium 40 (1,3 milliard d'années) et leurs descendants radioactifs. Ainsi, le radium 226 est en permanence régénéré par la désintégration de l'uranium 238 et se transforme lentement en un gaz radioactif, le radon 222.



Carbone 14 ?



Le carbone 14 est un atome radioactif à la période relativement courte (5730 ans), mais qui se forme en permanence dans l'atmosphère par l'action des rayons cosmiques sur certains noyaux d'atomes.

En archéologie, la méthode de datation au carbone 14 a permis des progrès significatifs. Elle est basée sur l'activité radiologique du carbone 14 contenu dans la matière organique dont on souhaite connaître l'âge absolu, c'est-à-dire le temps écoulé depuis sa mort.

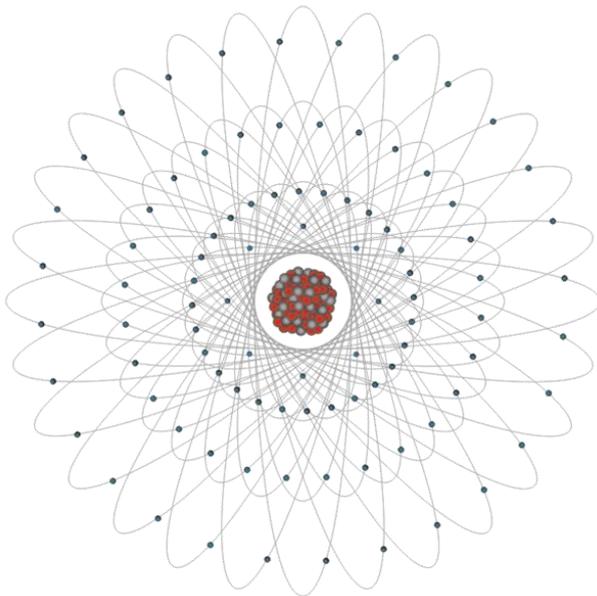
Radon ?

La désintégration de l'uranium et du thorium dans les roches terrestres produit un gaz radioactif : le radon, qui émet des particules dangereuses une fois inhalées. Plus lourd que l'air, ce gaz s'accumule dans les mines, les grottes et les sous-sols des bâtiments. Il est donc très important de ventiler les caves ou les pièces basses des maisons.



Dangerosité du radon ?

Le danger potentiel du radon dans les habitations a été mis en évidence en 1984, quand Stanley Watras, employé de la centrale nucléaire de Limerick en Pennsylvanie déclencha les détecteurs de radioactivité en se rendant à son travail. Les autorités cherchèrent pendant 2 semaines l'origine de cette contamination. Ils trouvèrent finalement que la source était un taux très élevé de radon dans la cave de son domicile, sans relation particulière avec la centrale nucléaire.



Uranium 235 ?

Sur la Terre, un seul noyau radioactif fissile existe de façon naturelle : l'uranium 235, présent en faible quantité dans le minerai d'uranium naturel.

Uranium enrichi ?

L'uranium naturel présent sur notre planète se compose à 99,3 % d'uranium 238 et à seulement 0,7 % d'uranium 235. Or seul l'uranium 235 est fissile, donc utilisable dans un réacteur nucléaire. Il faut donc enrichir l'uranium

extrait des mines, c'est-à-dire augmenter le pourcentage d'atomes d'uranium 235 jusqu'à des taux compris entre 3,5 et 5%.

Histoire(s) ?

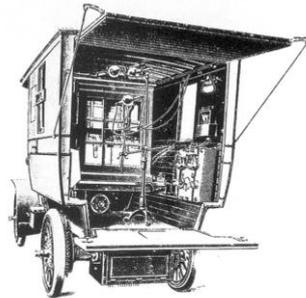


Sous-vêtements en plomb ?

À la fin du XIX^e s., quand le grand public entend parler des rayons X, des personnes craignent qu'ils ne soient utilisés pour voir à travers les vêtements. Du coup, certaines femmes se mettent à porter des sous-vêtements en plomb pour bloquer les rayons !

Petites Curie ?

Lorsque la Première Guerre mondiale éclate, Marie Curie est mobilisée. Elle participe alors à la conception de 18 camions équipés d'appareils à rayons X. Surnommés par les soldats français « les petites Curie », ces camions pouvaient se rendre près des champs de bataille et ainsi limiter les déplacements des blessés.



Crème Tho-Radia ?

Au début du XX^e s., personne n'imagine les dangers de la radioactivité. Lancée en 1933, la crème Tho-Radia, selon la publicité, « active la circulation, tonifie, raffermi les tissus, élimine la graisse, supprime les rides », grâce à sa composition à base de chlorure de thorium et de bromure de radium.

Affaire Litvinenko ?

En 2006, Alexandre Valtérovich Litvinenko, est empoisonné par du polonium 210. Quelques microgrammes de cette radioactive ont suffi à provoquer une mort



ancien agent du KGB, mélangé à du thé. substance hautement rapide.



Albert Einstein et la bombe atomique ?

Le 2 août 1939, Albert Einstein envoie une lettre au président Roosevelt contribuant à enclencher le projet Manhattan, afin d'élaborer la bombe atomique avant les nazis. Cependant, lui-même n'a pas collaboré à ce projet et il regrettera plus tard d'avoir écrit cette lettre.

Mother of bomb ?

Lise Meitner, considérée par la communauté scientifique comme la *mother of bomb*, la « mère de la bombe », pour sa découverte de la fission nucléaire, refusa pourtant de travailler au projet Manhattan.

Elle lui souhaita même d'échouer publiquement.

Expérience NEMO, étude du neutrino

Infiniment nombreux mais infiniment discrets, ainsi vont les neutrinos. Ils sont partout mais invisibles et, pour détecter leur présence, il faut le plus souvent surveiller en permanence des centaines de tonnes de matière bardée de détecteurs. Obtenir des informations sur les neutrinos relève donc de l'exploit et de nombreux prix Nobel ont ainsi récompensé ces recherches.

Le neutrino fut « inventé » par W. Pauli en 1930 et baptisé par E. Fermi en 1933. Pourtant ce n'est qu'en 1956 que le premier membre de la tribu fut détecté et il fallut attendre 1990 pour constater que celle-ci ne contenait que trois membres, dont le dernier fut observé en 2000.

C'est en 1998 qu'il fut établi que les neutrinos avaient une masse - jusqu'alors supposée nulle. Cette masse, bien qu'infime (inférieure au millionième de celle de l'électron), ouvrait aux physiciens une fenêtre vers de nouveaux horizons, de nouveaux cieux, bref, une physique nouvelle, et enfin, peut-être une explication à l'asymétrie entre la matière et l'anti-matière dans l'Univers.

Le neutrino est aussi le seul constituant fondamental de la matière qui ait une charge électrique nulle. Il pourrait être sa propre anti-particule et serait qualifié alors de « Majorana », du nom du physicien qui souligna cette possibilité dans les années 30. Si tel est le cas, il existe un mécanisme très rare, la double désintégration bêta sans neutrino, qui permettrait à la fois d'établir cette hypothèse et de mesurer la masse des neutrinos.

Ces masses sont très faibles mais la nature nous a fourni un moyen très sensible de mesurer leurs différences : il s'agit d'un phénomène désigné sous le terme « d'oscillations des neutrinos ». Nous expliquerons quel est ce mécanisme, où il a été découvert et ferons le point sur les résultats actuels. Les mesures permettent maintenant de définir les caractéristiques de futures expériences pour déterminer plus précisément les paramètres qui gouvernent le comportement des neutrinos.

Ils sont partout

Essayons de passer en revue les différentes sources de neutrinos qui nous entourent.

Nous baignons dans un océan de neutrinos issus du Big-Bang (336 neutrinos par cm^3) qui entrent et sortent de notre corps, le parcourant en tous sens à la vitesse de quelques 15 000 km/s. Nous recevons aussi du Soleil 700 mille milliards (7×10^{14}) de neutrinos par seconde, que le Soleil soit couché ou bien à son zénith. Les substances radioactives contenues dans la croûte et le manteau terrestre émettent également des (anti)-neutrinos en se désintégrant ; cela correspond en gros à 20 millions de neutrinos qui nous traversent par seconde. Nous émettons nous-mêmes des neutrinos (environ 4 000 par seconde pour une personne d'une soixantaine de kilos) qui viennent principalement de la désintégration du potassium 40 contenu dans nos os. Si l'on se met à un kilomètre du cœur d'une centrale nucléaire on sera aussi traversé par presque autant d'(anti)-neutrinos que ceux venant du Soleil.

Et tout cela sans danger puisque aucun neutrino, ou presque, n'aura interagi dans notre corps car les neutrinos dont nous venons de parler sont de faible énergie. Des neutrinos de plus haute énergie, et infiniment moins nombreux, sont issus des gerbes de particules créées par l'interaction des rayons cosmiques avec le gaz de la haute atmosphère terrestre. On parle dans ce cas de neutrinos atmosphériques.

Mentionnons enfin les neutrinos émis lors des explosions de supernovæ, que nous examinerons plus en détail dans les pages suivantes.

Neutrinos du Big-Bang

De même qu'il existe un rayonnement de photons fossile emplissant l'univers, on pense que nous sommes baignés par un gaz de neutrinos. Les caractéristiques du rayonnement des photons se sont établies au moment où l'univers leur est apparu transparent, environ 300 000 ans après le Big Bang. Elles correspondent maintenant à celle du rayonnement d'un corps noir dont la température est de 2,7°K. Comme les neutrinos interagissent moins que les photons, l'univers a été transparent plus tôt pour eux, quelques secondes après le Big Bang. La température du gaz de neutrinos doit donc être un peu plus basse, sans doute voisine de 2°K. Le nombre de ces neutrinos doit être égal, pour chaque saveur, à 3/11 de celui des photons.

Trois saveurs

Il existe trois types ou saveurs de neutrinos. En effet, on a remarqué qu'un électron, un muon ou un tau étaient associés, dans certaines réactions, à un neutrino particulier. On parle alors de neutrino-e, neutrino-mu ou de neutrino-tau.

Neutrinos et antineutrinos atmosphériques

Les rayons cosmiques de grande énergie vont interagir avec le gaz de la haute atmosphère et créer des gerbes de particules qui sont principalement des pions. Ces pions se désintègrent en émettant un muon et un neutrino-mu. À leur tour, les muons se désintègrent en électron et deux neutrinos (un neutrino-e et un neutrino-mu).

On s'attend donc à mesurer deux fois plus de neutrinos-mu que de neutrinos-e comme indiqué sur la page ci-contre. Sur cette page on a aussi illustré les émissions de neutrinos et d'antineutrinos.

Par exemple : $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ et $\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$.

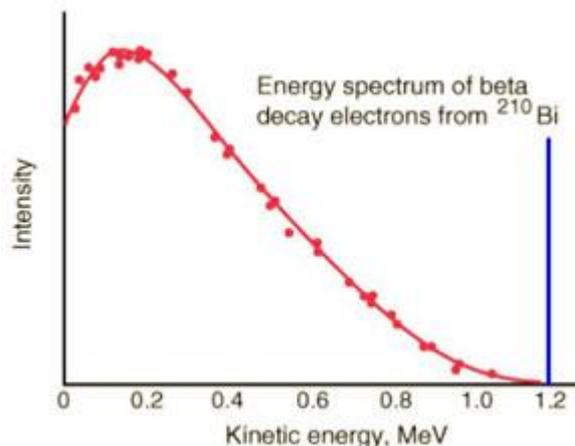


Supernovae

Les neutrinos issus de l'explosion de supernovæ méritent une mention particulière. Les étoiles dont la masse est supérieure à une dizaine de masses solaires terminent leur vie en une gigantesque explosion qui donne naissance à une étoile à neutrons ou à un trou noir. Dans une première phase, lorsque les réactions de fusion habituelles s'arrêtent, faute de combustible, l'étoile s'effondre sous l'effet de son propre poids et les protons s'associent aux électrons pour se transformer en neutrons en émettant des neutrinos-e. On pense que ceci se passe en quelques millisecondes. La densité de la matière est cependant telle que les neutrinos-e se trouvent piégés. Ils vont être libérés lors de l'explosion qui suit la phase précédente. Le flash de neutrinos issus de la supernova dure ainsi une dizaine de secondes et, à cause des interactions complexes qui ont eu lieu, on pense que toutes les saveurs de neutrinos et d'antineutrinos émergent de l'étoile. Pendant la durée du flash, la luminosité en neutrinos de l'étoile est environ 10^{20} fois celle du Soleil.

Naissance d'une nouvelle particule

En 1914, James Chadwick mesure la distribution en énergie – qu'on appelle aussi « spectre » – des électrons émis lors de la désintégration bêta de noyaux radioactifs. Il obtient un résultat contraire à toutes les attentes du moment : si, comme on le pensait à l'époque, seul un électron était produit lors de la désintégration bêta, la loi de conservation de l'énergie devrait imposer que l'énergie de ce dernier fut fixée à une valeur bien précise (E), égale à la différence entre les masses des noyaux initial et final. On s'attend alors à obtenir un spectre « discret », c'est-à-dire une simple raie à cette valeur de l'énergie. Surprise ! Chadwick obtient un spectre « continu », où l'énergie des électrons peut prendre toutes les valeurs possibles dans un intervalle allant de zéro à E . Les électrons ont systématiquement moins d'énergie qu'ils ne devraient. Où part l'énergie manquante ?



Allure d'un spectre (rouge) de rayonnement bêta obtenu par Chadwick alors qu'il attendait une raie comme celle représentée en bleu.

Après l'abandon de quelques hypothèses non confirmées par l'expérience, une possibilité diablement intéressante – défendue par Niels Bohr lui-même – subsiste pour expliquer ce phénomène. Le « sacro-saint » principe de conservation de l'énergie ne s'appliquerait pas rigoureusement pour chaque émission bêta, mais seulement en moyenne sur plusieurs désintégrations. Cette idée fait son chemin alors que vient de naître la toute nouvelle théorie de la mécanique quantique, qui révolutionne nombre d'idées et de concepts jusqu'alors acceptés.

Au début des années 30, le physicien autrichien Wolfgang Pauli tente de sauvegarder le principe de conservation de l'énergie. Il propose comme « remède du désespoir » qu'un autre rayonnement, très pénétrant (donc difficilement décelable), formé de nouvelles particules soit émis en même temps que l'électron lors d'une désintégration bêta. Ces particules hypothétiques emportant une partie de l'énergie disponible, ceci expliquerait le spectre continu des électrons. D'après les données expérimentales existantes, Pauli conclut que ces particules doivent être neutres (sans quoi elles auraient été facilement observées), de spin $1/2$ et de faible masse par rapport au proton. Il les nomme « neutrons » et suppose que, puisqu'elles sont produites lors de la désintégration de noyaux, elles font partie de leurs constituants. Le neutron est-il né ?

Mais Pauli ne croit guère à son hypothèse. En décembre 1930, il fait transmettre à un congrès de physique se tenant à Tübingen une lettre dont les termes montrent assez dans quelles dispositions il proposait cette idée qu'il nommait lui-même « expédient ». Il était si peu convaincu qu'il n'assista pas au congrès en question pour pouvoir honorer de sa présence un bal se tenant à Zurich. Voici des passages de cette lettre sur la page ci-contre.

Et le « neutron » devint « neutrino »...

Pauli expose à nouveau sa proposition dans une conférence à Pasadena (Californie) en 1931 mais abandonne l'idée que ces particules neutres soient des composants du noyau et, en conséquence, le nom de neutron. Il renonce toutefois à faire paraître le compte rendu de son intervention à cette conférence. Il faut noter que pendant ce temps-là Niels Bohr continuait à défendre l'idée d'une conservation de l'énergie non rigoureuse mais statistique.

En 1932, Chadwick met en évidence le « véritable » neutron, qui est bien une particule neutre et de spin $1/2$, mais dont la masse est voisine de celle du proton. Lors de séminaires tenus à Rome, Enrico Fermi attribue le nom de « neutrino » (petit neutre, s'opposant au « gros neutre », neutrone) à la particule proposée par Pauli. Une mise au point générale s'opère au congrès Solvay de Bruxelles en 1933. Les réticences de Pauli s'effacent et il signe l'acte de naissance du neutrino dans une communication officielle à ce même congrès. Fin 1933 Fermi écrit un article développant la théorie complète de la désintégration bêta et du neutrino. Il y introduit l'interaction faible. L'article est refusé par la revue Nature parce qu'il contient « des spéculations trop éloignées de la réalité physique » ; il sera d'abord publié en italien, puis finalement en allemand dans la revue Zeitschrift für Physik (1934). En 1936, Bohr accepte sans réserve la validité stricte de la conservation de l'énergie et l'existence du neutrino.

La véritable nature des neutrinos

La découverte de masses non nulles pour les neutrinos pose de nombreuses questions. L'une d'elles concerne la nature de ces particules élusives : les neutrinos ayant un spin $1/2$ doivent être décrits par la théorie de Dirac, tout comme les électrons. Mais dans ce cas, il doit exister des antineutrinos, tout comme le positron est associé à l'électron. Il est facile de distinguer un électron d'un positron, car ces particules sont de charges électriques opposées. Les choses ne sont pas aussi simples pour le neutrino, qui est électriquement neutre.

Dès 1937, un jeune physicien italien, Ettore Majorana, avait proposé une théorie décrivant des particules de spin $1/2$ identiques à leurs antiparticules (de manière analogue à d'autres particules comme le photon, de spin 1, ou encore le pion neutre, de spin 0). Ces « particules de Majorana » sont automatiquement neutres. Pour des particules de masse nulle, il n'existe aucune différence entre une particule de Dirac neutre, ou une particule de Majorana. Mais ce n'est pas le cas pour des particules massives... comme les neutrinos.

Diverses expériences tentent et tenteront de déterminer la nature des neutrinos dans les années à venir. La particule proposée par Pauli il y a près de 80 ans n'a pas fini de nous livrer tous ses secrets. L'histoire même de cette particule est marquée par le sceau du mystère. Par exemple, le jeune Majorana dont nous venons de parler... un caractère étrange, dont la disparition précoce reste aujourd'hui encore une énigme. Nous vous comptons cette histoire dans la suite de cet article.

La mystérieuse disparition d'Ettore Majorana

Le soir du 26 mars 1938, Mussolini régnant, le physicien sicilien Ettore Majorana, arrivé le matin même à Palerme, par le paquebot-poste, rembarque (du moins le

croit-on), pour un trajet de retour vers Naples. Depuis cette date, mis à part un ou deux témoignages aléatoires, plus personne ne l'a jamais revu : Majorana a disparu à 31 ans ! Suicide ? Probable, mais faut-il se contenter de cette hypothèse aussi simple ? En 1975 un écrivain, sicilien lui aussi, Leonardo Sciascia, posa la question et publia, en feuilleton dans *La stampa* un essai historique intitulé « La disparition de Majorana », d'où s'ensuivit dans la presse italienne une formidable polémique.

Sciascia fut pris à partie notamment par le physicien Edoardo Amaldi, premier biographe de Majorana. L'écrivain avait touché un sujet sensible. Ettore Majorana avait mis en scène son geste. Le 25 mars, il partait de Naples à 22h30 après avoir expédié une lettre à Antonio Carrelli, directeur de l'Institut de physique de Naples, où il travaillait : « Cher Carrelli, j'ai pris une décision qui est désormais inéluctable. Il n'y a pas en elle la moindre trace d'égoïsme, mais je me rends compte des ennuis que ma disparition soudaine pourra causer à toi et aux étudiants. Pour cela aussi, je te prie de m'excuser, mais surtout pour avoir déçu toute la confiance, la sincère amitié et la sympathie que tu m'a montrées au cours de ces mois. Je te prie aussi de me rappeler auprès de ceux que j'ai appris à connaître et à apprécier dans ton Institut (...) ; de tous je conserverai un affectueux souvenir au moins jusqu'à onze heures ce soir, et, si cela est possible, même après. ».

Mais, arrivé à Palerme le 26 mars au matin, Majorana envoya à Carrelli un télégramme lui demandant de ne pas tenir compte de la lettre qu'il recevrait. Carrelli reçut bien la lettre, mais aussi une autre, datée de Palerme (26 mars) ainsi libellée : « Cher Carrelli, j'espère que tu as reçu en même temps le télégramme et la lettre. La mer m'a refusé, et je reviendrai demain à l'Hôtel Bologna, en voyageant peut-être avec cette même feuille. Mais j'ai l'intention de renoncer à l'enseignement. Ne me prends pas pour une jeune fille d'Ibsen, parce que la situation est différente. Je suis à ta disposition pour des détails ultérieurs. ».



Après avoir reçu la lettre annonçant la « disparition », Carrelli téléphone à Luciano, frère d'Ettore, qui fait diligenter une enquête. Cette dernière établit, entre autres, que le billet de retour, retrouvé à la compagnie Tirrenia, a bien été utilisé. Un professeur de l'Université de Palerme, Vittorio Strazzeri, dit même l'avoir vu dormir dans sa cabine, alors même que le navire entrait dans la baie de Naples. Mais le professeur n'est pas vraiment certain qu'il s'agisse de Majorana : il sait avoir voyagé dans une cabine en compagnie de deux personnes, l'une étant, en principe Majorana et l'autre un Anglais, Charles Price (d'après les billets). L'Anglais n'a pas été retrouvé. Il parlait italien « comme nous, gens du sud », selon Strazzeri qui, par ailleurs, n'a échangé aucune parole avec Majorana! De là à suggérer, comme le fait Sciascia, qu'en fait l'Anglais devait être l'homme auquel Strazzeri ne parla pas... et que l'homme au verbe méridional était un Sicilien, négociant, à en croire son aspect, voyageant à la place de Majorana (lequel aurait cédé son billet au départ de Palerme)... Quoiqu'il en soit Strazzeri écrit à Luciano : « si la personne qui a voyagé avec moi était votre frère, il ne s'est pas supprimé, au moins jusqu'à son arrivée à Naples ». Les marins de la baie de Naples affirment que s'il s'était jeté à l'eau, la mer aurait tôt ou tard rendu son corps. Un témoin, une infirmière, qui connaissait bien Ettore (elle lui avait communiqué des adresses de bonnes pensions), dit l'avoir vu dans les rues de

Naples dans les premiers jours d'avril. D'autres témoignages l'ont même, par la suite, signalé en Argentine ...

Chi l'ha visto ?



Ettore Majorana, ordinario di fisica teorica all'Università di Napoli, è misteriosamente scomparso dagli ultimi di marzo. Di anni 31, alto metri 1,70, snello, con capelli neri, occhi scuri, una lunga cicatrice sul dorso di una mano. Chi ne sapesse qualcosa è pregato di scrivere al R. P. E. Maria-necci, Viale Regina Margherita 66 - Roma.

Ettore Majorana - Questo annuncio della famiglia Majorana apparve sulla «Domenica del Corriere» del 17 luglio 1938.

Mais on sait que Majorana aimait Pirandello et c'est peut-être à l'un de ses personnages, Mattia Pascal, qu'il faut laisser la parole pour entendre Ettore : « Qui peut dire le nombre de ceux qui sont comme moi, dans la même condition que moi, mes frères. On laisse son chapeau et sa veste, avec une lettre dans sa poche, sur le parapet d'un pont qui enjambe une rivière ; puis, au lieu de se jeter à l'eau, on s'en va tranquillement, en Amérique ou ailleurs. ».

Sources :

Leonardo Sciascia : La disparition de Majorana (Garnier-Flammarion) - Erasmo Recami : Il caso Majorana (Di Renzo Editore)

Le détecteur NEMO (Neutrino Ettore Majorana Observatory)

Le détecteur NEMO-3 a commencé à enregistrer ses premières données en 2003, après plus de dix ans de recherche, de développement et de construction. Installé au Laboratoire souterrain de Modane sous 1700 mètres de roche, ce détecteur cherche à observer un nouveau type de désintégration de la matière appelé « double désintégration bêta sans émission de neutrino ». Ce rayonnement montrerait que le neutrino est sa propre antiparticule. On parle alors d'une particule de Majorana.

Antiparticule

L'existence d'une antiparticule de l'électron a été postulée en 1931 par P. A. M. Dirac. Cette prédiction, purement théorique, fut rapidement confirmée en 1932 par la découverte de l'antiélectron ou positron, par C. Anderson. Toutes les particules élémentaires ont une antiparticule. On appelle particule de Dirac une particule de spin un demi qui est différente de son antiparticule. Ce n'est pas forcément le cas des particules de charge nulle telles que les neutrinos: il est a priori possible que les particules neutres soient leur propre antiparticule. C'est cette dernière possibilité qu'a proposée Majorana et qui pourrait s'appliquer aux neutrinos.

Le neutrino de Majorana et la double désintégration bêta

Comment savoir si le neutrino est de Majorana, c'est-à-dire identique à son antiparticule ? C'est là que l'expérience NEMO et la double désintégration bêta entrent en jeu ! Il s'agit de la seule réaction, actuellement connue, qui permet de trancher. Elle peut avoir lieu pour quelques noyaux comme le molybdène.

Molybdène

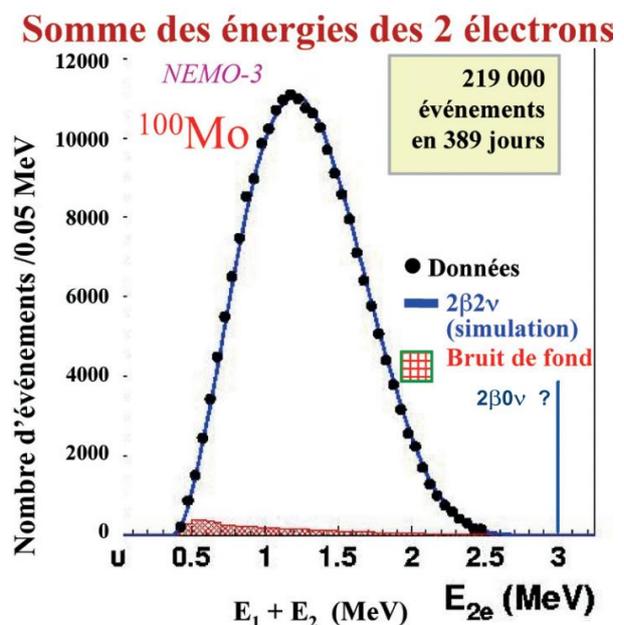
Le molybdène est un élément chimique, de symbole Mo et de nombre atomique 42. Son nom vient d'une expression grecque signifiant "semblable au plomb", en raison de son aspect. Isolé en 1781, il est fréquemment utilisé dans des alliages d'acier de haute résistance, en particulier à l'égard de la chaleur. Le molybdène est contenu dans certains enzymes. Dans la nature il se trouve sous forme de mélange de sept isotopes (dont le Mo^{100}) qui contribuent dans des proportions similaires.

En effet, la désintégration bêta simple est l'émission par un noyau instable d'un électron et d'un anti-neutrino, suite à la transformation d'un neutron en un proton. Or, pour quelques rares éléments, le noyau final aurait une masse plus élevée que celle du noyau initial. La désintégration bêta simple est alors impossible et on peut envisager le cas, beaucoup plus rare, où deux neutrons se transforment simultanément en deux protons et émettent ainsi deux électrons et deux anti-neutrinos. Ce processus, noté $2\beta 2\nu$, est appelé la double désintégration bêta avec émission de deux neutrinos. Il s'agit du rayonnement le plus rare jamais observé dans la nature. Par exemple la demi-vie de la désintégration $2\beta 2\nu$ du molybdène (c'est-à-dire la durée nécessaire pour que, sur 1 kg de molybdène, 500 g se soient désintégrés) est de 10^{19} années, soit 10 milliards de milliards d'années ! La désintégration $2\beta 2\nu$ a déjà été observée pour quelques noyaux. Une telle mesure est très difficile étant donnée la rareté du processus. La première observation directe, correspondant à une dizaine de désintégrations, a été faite dans les années 1980 par M. K. Moe. En 1994 NEMO-2, prototype de NEMO-3, détecta environ 1000 désintégrations après deux ans d'observations. Maintenant NEMO-3 observe environ

250 000 désintégrations $2\beta 2\nu$ par an !

Cela donne une idée des progrès considérables qui ont été faits dans la conception des détecteurs.

Si le neutrino est massif et est, en outre, une particule de Majorana, c'est-à-dire identique à son antiparticule, un nouveau processus encore plus rare que la double désintégration bêta permise, pourrait apparaître : la double désintégration bêta sans émission de neutrino, notée $2\beta 0\nu$. Dans cette réaction, tout se passe comme si un premier neutron se désintégrait en proton, émettant un électron et un anti-neutrino. Mais, si l'anti-neutrino est de Majorana, il peut être réabsorbé, en tant que neutrino,

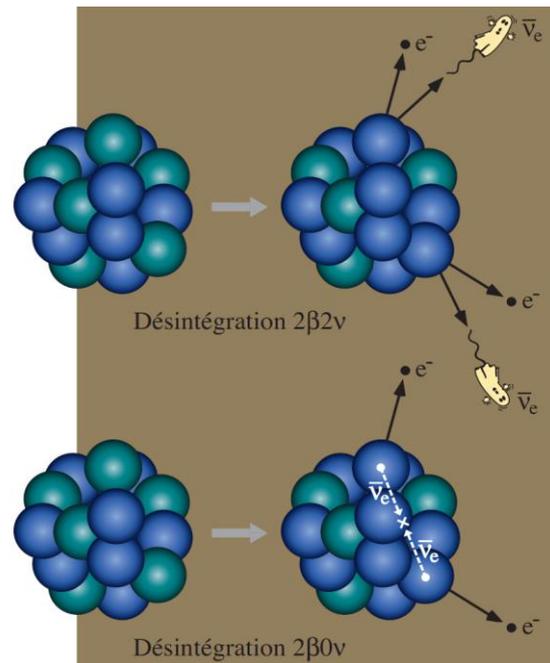


Spectre de la somme des énergies des deux électrons. Il est continu dans le cas de la désintégration $2\beta 2\nu$ et ce devrait être une raie, située en fin de spectre, dans le cas de la désintégration $2\beta 0\nu$.

par un second neutron qui va alors se transformer en proton et émettre un électron. Seuls, deux électrons sont émis par le noyau. Cette désintégration ne peut se produire que si le neutrino est de Majorana et, même dans ce cas, elle sera plus rare que le processus habituel car, outre qu'il s'agisse d'un processus double bêta, la chance qu'il se produise est proportionnelle au carré de la masse du neutrino, qui est très faible.

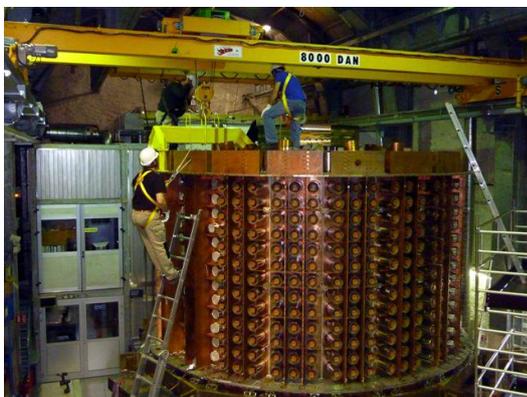
Comment distinguer $2\beta 2\nu$ et $2\beta 0\nu$?

Expérimentalement, dans les désintégrations double bêta, seuls les électrons sont détectés. Dans le processus standard $2\beta 2\nu$, les deux électrons prennent seulement une partie de l'énergie libérée dans la désintégration, l'autre partie étant emportée par les deux anti-neutrinos, non détectés. Si on mesure la somme des énergies des deux électrons, on obtient un spectre continu. En revanche, pour la désintégration $2\beta 0\nu$, puisque aucun neutrino n'est émis, les deux électrons emportent la totalité de l'énergie disponible. Cette valeur est donc plus élevée que dans le cas précédent et est constante. Elle est égale à la différence entre les masses du noyau de départ et du noyau final. Elle vaut 3 MeV dans le cas du molybdène. On va donc rechercher deux électrons émis depuis un même point dans le détecteur et dont la somme des énergies correspond à une raie située à l'extrémité du spectre continu de la désintégration $2\beta 2\nu$. C'est le but du détecteur NEMO-3.



Le détecteur NEMO-3

Le détecteur NEMO-3 est une grande chambre à fils (voir «Détection») de 3 mètres de haut et de 6 mètres de diamètre, constituée de 20 secteurs. Au centre de chaque secteur sont tendues, verticalement, des feuilles métalliques constituées d'un métal émetteur pour la double désintégration bêta. Au total le détecteur peut contenir environ 10 kg de sources qui sont essentiellement du molybdène. Ces feuilles sont minces pour que les électrons issus des désintégrations bêta ne perdent que peu d'énergie à l'intérieur de celles-ci. De part et d'autre de ces sources sont tendus verticalement 40 000 fils métalliques qui forment une très grande chambre à fils de 30 m³ remplie d'un mélange d'hélium gazeux, de 4% de vapeur d'alcool et de 1% d'argon. Grâce à l'information recueillie sur les fils on peut reconstruire la trajectoire de l'électron en trois dimensions. La chambre est entourée de blocs de plastique scintillant. Lorsqu'un électron termine sa trajectoire dans un de ces blocs, il y dépose toute son énergie et provoque une



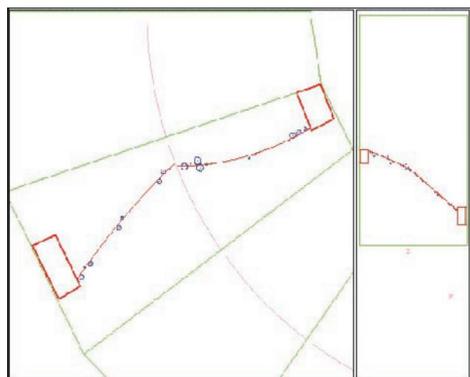
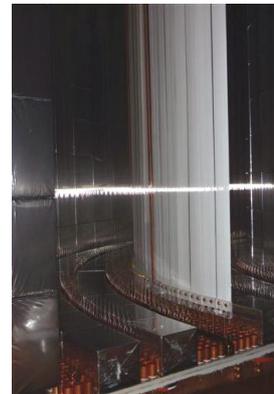
émission de lumière par scintillation. L'intensité de cette lumière est proportionnelle à l'énergie de l'électron. Cette lumière a une très faible intensité ; infiniment plus faible que celle qui peut être observée par nos yeux. Elle est détectée par un photomultiplicateur qui la transforme en signal électrique. Ce dispositif, constitué d'un bloc de scintillateur plastique couplé à un photomultiplicateur permet de mesurer l'énergie des électrons. La précision est d'environ dix pour cent et on mesure aussi le temps d'arrivée des signaux avec une résolution d'environ un quart de milliardième de seconde.



Mesurer plusieurs noyaux émetteur double bêta

Un atout important du détecteur NEMO-3 est qu'il contient différents types de sources, c'est-à-dire différents noyaux isotopes émetteurs double bêta susceptibles de produire une désintégration $2\beta 0\nu$. Ont été installés 7 kg de molybdène 100, 1 kg de sélénium 82, environ 1 kg de tellure 130, 400 g de cadmium 116, 50 g de néodyme 150 et 10 g de calcium 48. À l'exception du tellure, cela correspond aux ressources mondiales !

Pourquoi tant de sources différentes ? Cela est dû au fait que, pour un isotope donné, la probabilité que la désintégration $2\beta 0\nu$ se produise est très difficile à calculer et donc assez mal estimée. Certains modèles montrent qu'il y a autant de chance de découvrir le neutrino de Majorana avec 50 g de néodyme qu'avec 7 kg de molybdène ! La mesure de la demi-vie de la désintégration double bêta standard $2\beta 2\nu$ pour ces éléments permettra de contraindre et donc de rendre plus précises les estimations théoriques.



Désintégration $2\beta 2\nu$

Les origines des bruits de fond

Grâce à la reconstruction de la trajectoire et à la mesure des temps d'arrivée des particules, le détecteur doit être capable de reconnaître un événement correspondant à une double désintégration bêta et de le distinguer du bruit de fond. C'est le défi d'une telle expérience : le détecteur NEMO-3 cherche à détecter un signal qui, pour un noyau, se produit une fois toutes les 10^{25} années soit 1 million de fois plus rare encore que la désintégration double bêta permise $2\beta 2\nu$. Ce niveau de sensibilité

correspond à un bruit de fond maximum de 1 coup par an dans la fenêtre en énergie autour de 3 MeV (correspondant à l'énergie du signal $2\beta_0\nu$ recherché).

Si l'on montait ce type d'expérience à la surface du sol, on serait noyé par le bruit de fond car on verrait une multitude de signaux dus aux muons produits dans l'atmosphère par le rayonnement cosmique. Il a donc fallu installer le détecteur au Laboratoire Souterrain de Modane, sous plus de 1700 mètres de roche. Dans ce laboratoire il ne reste plus que 4 muons par mètre carré et par jour à comparer aux 10 millions de muons de haute énergie (>200 MeV) par mètre carré et par jour au niveau du sol. Mais cela ne suffit pas pour avoir un bruit de fond quasi nul.

Le second ennemi de NEMO est la radioactivité naturelle provenant des chaînes de décroissance de l'uranium 238 et du thorium 232. Ces survivants de la formation du système solaire ont des durées de vie très grandes, de l'ordre de l'âge de la Terre, et sont donc présents partout. Malheureusement lorsqu'ils se désintègrent, ils se transforment en un autre noyau qui se désintègre à son tour et ainsi de suite, jusqu'à donner, dans le cas de l'uranium 238, du bismuth 214 et, pour le thorium, du thallium 218. Ces deux noyaux se désintègrent rapidement (quelques minutes) mais à l'inverse d'autres noyaux contribuant à la radioactivité naturelle, ils délivrent une énergie suffisamment grande pour pouvoir simuler un événement qui ressemble au



signal $2\beta_0\nu$ recherché. Il faut donc impérativement construire un détecteur avec des matériaux de très bas niveau de radioactivité en bismuth 214 et en thallium 218. À commencer par les sources de molybdène qui doit être ultra pur puisque c'est le cœur de l'expérience ! Cela a nécessité des recherches et développements très poussés en collaboration avec la Russie et les États-Unis. D'autre part, tous les matériaux du détecteur ont été soigneusement sélectionnés et des échantillons ont été systématiquement mesurés à Modane. Ceci concernait les gros matériaux tels que les structures mécaniques en cuivre et en fer mais également les fils de la chambre, les colles, les vis et même les câbles reliant les modules d'électronique. Au total, l'activité mesurée en uranium et en thorium des 200 tonnes que constitue le détecteur NEMO-3 est de l'ordre de 300 becquerels (300 désintégrations par seconde) ce qui est inférieur aux 4000 becquerels du corps humain (dus au potassium) !

Construire un détecteur avec un niveau de radioactivité extrêmement faible et l'installer sous la roche ne suffit toujours pas pour avoir un bruit de fond quasi-nul ! Finalement les neutrons produits de façon naturelle par la fission de la roche du laboratoire peuvent perturber les mesures. Le détecteur est donc entouré d'un blindage de fer et d'un blindage spécifique aux neutrons (de l'eau et du bois, ce n'est pas cher). Enfin, une bobine en cuivre crée un champ magnétique relativement faible (100 fois le champ magnétique terrestre) mais suffisant pour distinguer un positron issu du bruit de fond, d'un électron de signal.

Ce détecteur fonctionne avec un seuil en énergie très bas (150 keV) et enregistre environ sept événements par seconde ce qui est très faible vu sa taille. Cela correspond à 200 millions d'événements collectés par an dont environ 250 000 provenant de la double désintégration bêta permise du Mo^{100} . La première phase a consisté à étudier attentivement ce processus, avant de passer à une étude de la double désintégration sans neutrino. Les premiers résultats de NEMO3 ne font pas état d'événements provenant d'un tel mécanisme, ce qui impose des contraintes

fortes sur notre «petit neutre» : si le neutrino électronique est une particule de Majorana, sa masse doit être plus petite que 2,4 eV.

Les physiciens préparent d'ores et déjà une nouvelle version de leur détecteur, appelée SuperNEMO. Un détecteur amélioré, qui étudiera une source à base de sélénium ou de néodyme, afin d'atteindre une sensibilité dix fois plus fine... et peut-être enfin dévoiler la nature du neutrino électronique et prouver qu'il est bien sa propre antiparticule !

Détecteur à fils

Le travail d'un physicien des particules s'apparente à celui d'un détective – à la différence, de taille, que le scientifique utilise le plus souvent un accélérateur pour créer sans cesse de nouveaux «faits divers» sur lesquels il enquête dès qu'ils se produisent. Le cœur de la matière est sondé au moyen de collisions violentes entre particules (électrons, protons ou leurs anti-particules par exemple) dont les produits sont suivis à la trace dans des détecteurs volumineux. De même qu'on peut observer le trajet d'un avion haut dans le ciel grâce à la traînée de condensation qu'il laisse dans l'atmosphère, la trajectoire des particules chargées est reconstruite indirectement en mesurant l'effet de leur passage dans des instruments spécialement mis au point.



Depuis près de cent ans, de nombreux modèles de trajectomètres, toujours plus efficaces, précis et rapides, ont été construits. Les premiers instruments, chambres à brouillard puis à bulles, permettaient d'enregistrer les traces laissées par les particules lorsqu'elles traversent un fluide placé dans les conditions appropriées de température et de pression. Chaque événement était photographié puis analysé manuellement et un «temps mort» d'au moins une seconde suivait chaque cliché afin de laisser le mélange revenir dans son état optimal. Pour étudier des événements rares ou améliorer la précision des mesures (c'est-à-dire augmenter le nombre d'événements disponibles pour l'analyse), des détecteurs plus rapides et automatisés se sont avérés nécessaires.

Les chambres à étincelles ont constitué une première avancée mais la vraie révolution a lieu en 1968, au CERN, avec l'invention par Georges Charpak de la chambre proportionnelle multi-fils. Beaucoup plus rapide que ses prédécesseurs, ce détecteur permet d'analyser des dizaines voire des centaines de milliers de collisions par seconde. De plus, il inclut un traitement électronique et numérique des signaux enregistrés.

parcouru par les ions positifs (en sens « inverse » sous l'effet du même champ électrique) est beaucoup plus court car ces derniers sont bien plus lourds.

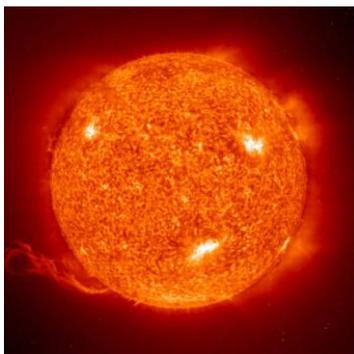
Au voisinage du fil, les électrons sont accélérés par le champ électrique (de plus en plus intense à mesure qu'ils s'en rapprochent) et peuvent à leur tour ioniser le gaz : chaque électron « primaire » crée environ 10 000 paires électron-ion positif « secondaires ». Les deux nuages de particules, de charges opposées, se séparent. Les électrons sont rapidement collectés sur le fil proche, et bien que nombreux, leur trajet est très court et ils ne créent pas de signal électrique fort. Les ions, eux, se dirigent vers la cathode, et le long de leur parcours beaucoup plus long, produisent, par induction, un signal électrique bien plus intense sur le fil. Il faut quelques millisecondes pour que l'ensemble des ions positifs atteigne la cathode, après quoi le compteur est prêt pour détecter le passage d'une nouvelle particule chargée.

Une chambre à fils peut être considérée comme une juxtaposition de tels compteurs à fil simples. La cathode n'est alors plus un cylindre mais une surface plane conductrice disposée parallèlement à un plan de fils. La différence de potentiel entre les fils formant l'anode et la cathode ainsi que la composition du gaz sont choisies afin que le signal recueilli soit proportionnel à la charge déposée par la particule dans le détecteur.

En dépit de leur côté quelque peu fantomatique, on peut trouver des applications liées aux neutrinos jusque dans notre vie quotidienne ! Ces retombées proviennent des propriétés particulières de ces particules et des méthodes qu'il a fallu mettre au point pour les étudier.

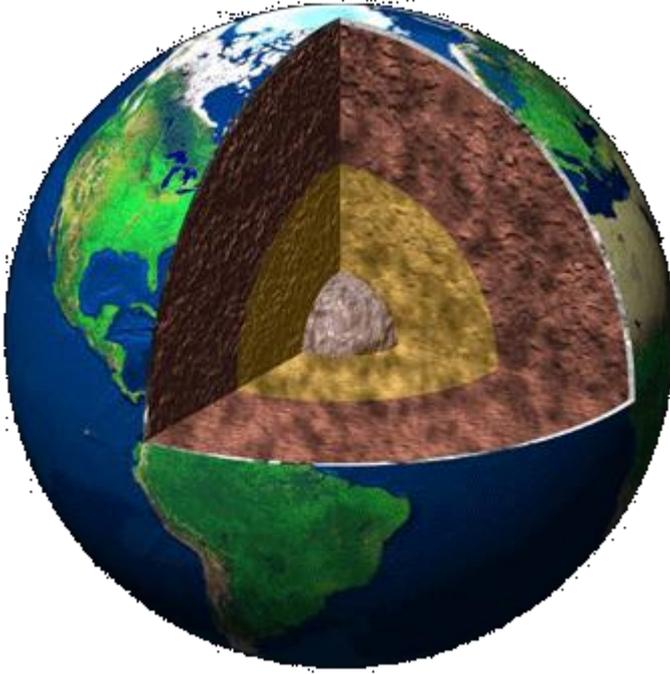
Un espion de l'intérieur

Puisqu'ils interagissent très peu avec la matière, les neutrinos peuvent nous transmettre des informations de première main sur le lieu et la manière dont ils sont produits.



Pour étudier les neutrinos solaires et conclure avec certitude à l'existence d'un déficit, il a fallu aboutir à une compréhension détaillée du fonctionnement du Soleil. Contrairement à la lumière qui ne nous renseigne que sur les couches superficielles, les neutrinos, issus du cœur de la chaudière nucléaire, traversent le Soleil sans problème. L'expérience de R. Davis Jr., qui a détecté pour la première fois, les neutrinos solaires a démontré que la source d'énergie de notre étoile était bien d'origine nucléaire. Après une trentaine d'années d'efforts, les physiciens sont maintenant convaincus que l'on peut prédire de façon précise le nombre de neutrinos issus du Soleil et leur répartition en énergie (ce que l'on appelle « le spectre »). L'héliosismologie, qui s'intéresse aux « tremblements de Soleil » qui secouent notre étoile en permanence, joue un rôle primordial dans ces études. La mesure de ces modes de vibration permet en effet de vérifier si le modèle est correct et reproduit bien les conditions de température, de pression ainsi que les mouvements qui règnent au sein de l'étoile.

Par ailleurs la détection des neutrinos terrestres pourrait permettre d'étudier la répartition des substances radioactives (uranium, thorium et potassium) dans



l'intérieur du globe. Faute d'une source de chaleur interne, qui doit être alimentée majoritairement par la désintégration des éléments radioactifs précédents, ce dernier se serait refroidi depuis longtemps. Cette désintégration fournirait l'équivalent de 20 à 40 térawatts soit la puissance de cinq à dix mille réacteurs nucléaires. Selon divers modèles géologiques, les deux couches les plus externes du globe terrestre (la croûte sur laquelle nous vivons, épaisse en moyenne d'une quarantaine de kilomètres, et le manteau qui descend jusqu'à 2900 kilomètres de profondeur) contribuent de manière similaire à la production d'énergie. En effet l'uranium et le thorium sont concentrés surtout dans

la croûte, mais celle-ci est beaucoup plus mince que le manteau. Le noyau terrestre, principalement constitué de fer, ne devrait pas contribuer à ce phénomène... sauf s'il contenait du potassium. Cette dernière possibilité constitue une inconnue dans les modèles actuels. En 2005 l'expérience KamLAND a observé, pour la première fois, un signal d'anti-neutrinos issus de la Terre. Reste à voir si de telles mesures pourront affiner notre perception de la dynamique interne du globe.

Expérience EDELWEISS, à la recherche de la matière noire ?

Si on cherche dans le dictionnaire français la définition du mot WIMP on ne la trouvera pas. Par contre si on regarde dans un dictionnaire anglais on trouve les définitions suivantes :

« A subatomic particle that has a large mass and interacts with other matter primarily through gravitation » (Particule subatomique interagissant gravitationnellement avec la matière)



Supernova 1994D de type Ia à la périphérie de la galaxie NGC 4526 dans l'amas de la Vierge. © Nasa

Mais pourquoi cette particule s'appelle-t-elle WIMP ?

La raison de son patronyme vient des termes anglais qui caractérisent les propriétés physiques qu'elle doit avoir : W(eakly) I(nteracting) M(assive) P(article) ; ce qui signifie qu'elle doit être massive et doit interagir de manière très faible

On doit néanmoins avouer que c'est un nom qui lui va bien ; car en effet cette particule qui est tant recherchée n'a pas encore donné la preuve de son existence.

C'est une véritable traque à laquelle s'est voué un grand nombre de chercheurs de par le monde en développant des outils de capture rivalisant d'imagination !

Mais pourquoi traque-t-on les WIMPs ?

La recherche de WIMPs est motivée par la dimension astronomique de la prime à empocher ! Imaginez donc ! Cette particule, si elle existe, pourrait valoir jusqu'à 23% de la densité totale de l'Univers !

Néanmoins pour se lancer dans une telle aventure il faut avoir quelques pistes.

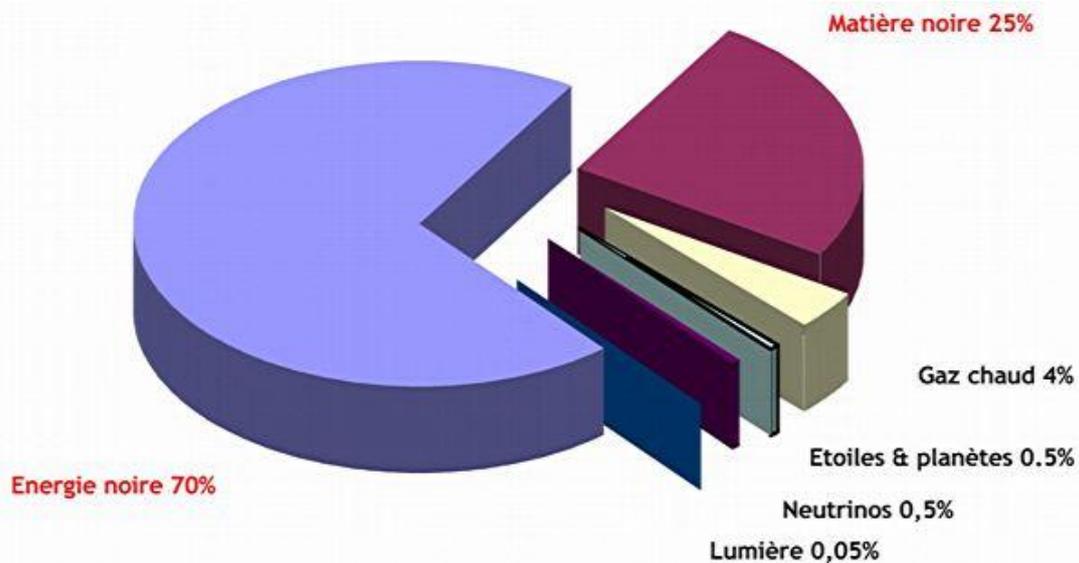
C'est là une question à laquelle tente de répondre un grand nombre de chercheurs depuis plusieurs dizaines d'années.

En effet d'après de nombreuses observations astrophysiques il semblerait que notre univers nous cacherait beaucoup plus de choses qu'on ne le pense.

Connaître précisément le contenu de l'univers permettrait non seulement de comprendre son passé, mais il permettrait également de prévoir son futur. L'Univers est caractérisé par sa densité qui décrit son contenu en matière et en énergie. Si la densité actuelle de l'Univers est supérieure à une certaine valeur appelée densité critique celui-ci arrêtera son expansion et entamera un mouvement d'effondrement sur lui-même qu'on appelle Big Crunch par opposition au Big Bang. Par contre si la densité est inférieure à la densité critique, l'Univers continuera son expansion.

Les observations cosmologiques récentes suggèrent non seulement que la densité de l'univers est égale à la densité critique, mais elles révèlent également que cette densité comporte une très forte composante énergie ~73% qu'on ne connaissait pas il y a encore une dizaine d'années. Cette énergie appelée énergie noire ou encore énergie sombre est de nature et de composition inconnues. Contrairement à la gravitation, cette énergie repousse la matière, causant ainsi l'accélération de l'expansion de l'Univers.

Le reste de la densité ~27% serait de la matière, dont 23% serait également totalement inconnue. En réalité tout ce que nous sommes arrivés à identifier jusqu'à présent dans notre Univers ne constituerait que 4% de son énergie totale!



Répartition du contenu énergétique de l'univers

Dans ce dossier nous allons nous intéresser à la manière dont on pourrait étudier la composante de matière de l'univers qu'on ne voit pas avec les instruments classiques de l'astronomie. Cette matière invisible également appelée matière sombre ou encore matière noire n'est pas composée de protons et de neutrons, comme tout ce qu'on peut voir dans notre environnement (matière dite baryonique ~ 4% de la densité totale de l'Univers). Parmi les différentes hypothèses avancées par les théoriciens il y en a une qui plaide en faveur de l'existence d'une nouvelle

particule qui serait tellement discrète dans ces relations avec les protons et les neutrons qu'on ne l'aurait pas encore détectée, c'est notre fameux WIMP !

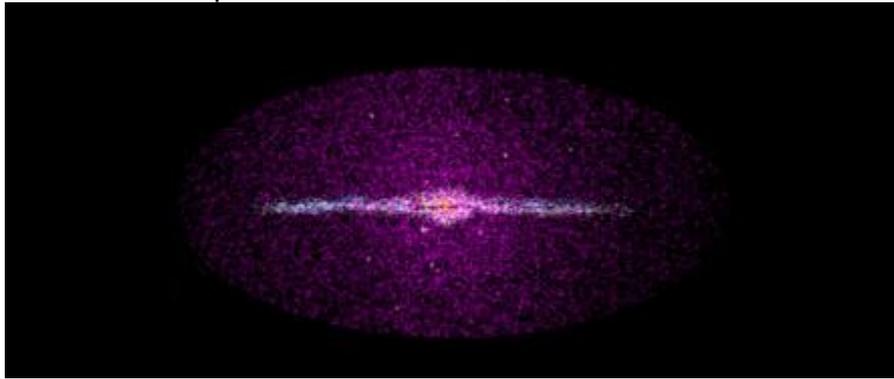


Illustration d'une [galaxie](#) entourée de son halo de WIMPs
(inspirée de zebu.uoregon.edu/~soper/Mass/WIMPS.html)

Au niveau de notre galaxie et dans notre environnement on suppose qu'on baigne dans un halo de WIMPs qui nous traversent constamment. Avec les caractéristiques qu'on lui attribue une personne serait continuellement traversée par des milliards de WIMPs par seconde !

Pour pouvoir expliquer certaines observations astrophysiques, le WIMP devrait avoir une masse assez importante à l'échelle de l'atome, allant de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de fois la masse d'un proton.

Quand il a l'audace de bousculer un noyau composé de protons et de neutrons (qu'on appelle indifféremment nucléon) celui-ci va trébucher et provoquer de l'agitation autour de lui. Suivant la nature du milieu auquel appartient le noyau (solide, liquide ou gaz) on va avoir différents phénomènes physiques qui vont se produire :

- émission de lumière due à l'excitation des atomes voisins,
- migration de charges électriques arrachées aux atomes voisins dans sa course
- élévation de température induite par les vibrations des atomes du milieu

L'importance de ces phénomènes physiques va dépendre de l'énergie à laquelle le WIMP va faire reculer le noyau bousculé. En étudiant ces phénomènes physiques il sera possible de remonter à ce qui les a provoqués c'est à dire au WIMP. On va pouvoir en particulier estimer sa masse.

Pour donner un ordre d'idée, prenons un WIMP qui aurait une masse équivalente à ~70 protons c'est à dire équivalent à la masse d'un noyau de germanium, animé d'une vitesse d'environ 230 km/s. Supposons que dans sa course le WIMP rencontre dans un cristal de germanium un noyau ; l'énergie moyenne transmise à ce noyau fera augmenter la température du cristal d'un millionième de degré Celsius !

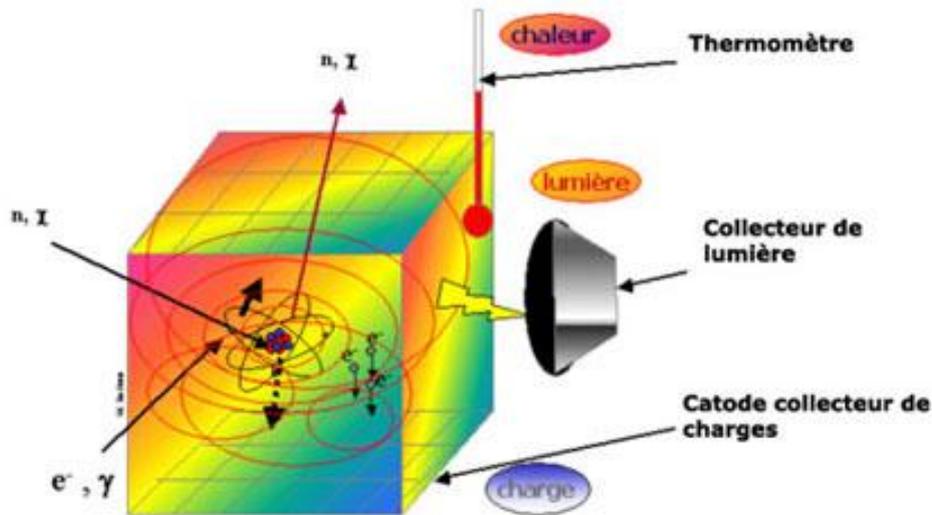


Schéma des processus physiques dus à un recul de noyau induit par un WIMP dans un milieu solide, liquide ou gazeux. Les particules sont symbolisées par des lettres : γ photon, e^- électron, n neutron, χ WIMP.

Les physiciens doivent donc construire des détecteurs capables de mesurer d'aussi petites quantités de chaleur, de lumière ou de charges ; mais en plus ils doivent être sûrs que ce n'est pas une particule connue qui passait par-là et qui a produit cette perturbation. Car malheureusement si le WIMP est très discret, les autres particules de notre environnement quotidien, telles que les photons, les électrons ou les neutrons, elles ne se gênent pas pour mettre la pagaille dans un détecteur ! C'est ce qu'on appelle le bruit de fond. Il faut donc arriver à protéger le détecteur de ce bruit de fond pour pouvoir observer le passage d'un WIMP dans le détecteur.

Le bruit de fond a différentes origines :

- les rayons cosmiques : ce sont des particules qui proviennent de l'espace et essentiellement produites par le Soleil. Quand elles arrivent dans l'atmosphère elles en produisent un très grand nombre en cascade !



Mostly photons, electrons and muons at Earth's surface

Schéma des réactions induites dans l'atmosphère par des rayons cosmiques (http://crop.unl.edu/claes/CROP_Spectrum2005.ppt)

- la radioactivité naturelle : elle est présente dans tous les matériaux à plus ou moins grande dose.
- la radioactivité artificielle : elle est due à l'activité humaine par exemple les essais nucléaires ; ou bien encore les incidents survenant dans des centrales nucléaires comme cela fut le cas de Tchernobyl en 1986.

La première étape dans le long processus d'élimination du bruit de fond est celle qui consiste à protéger le détecteur de toutes les particules qui arrivent en permanence de l'espace. Or comme il faut des épaisseurs très importantes de matériau pour arrêter la majorité de ces particules, quoi de plus naturel que de se terrer sous plusieurs centaines de mètres de roche ! C'est ce qu'ont choisi de faire plusieurs expériences, de par le monde, qui cherchent à détecter les WIMPs.

Plusieurs laboratoires ont été construits sous des montagnes :



Quelques laboratoires souterrains dans le Monde

- le laboratoire souterrain de Modane est situé dans le tunnel du Fréjus à la frontière entre la France et l'Italie
- le laboratoire souterrain du Gran Sasso est situé sous la chaîne montagneuse de l'Aquila en Italie
- le laboratoire souterrain du Canfranc dans les Pyrénées espagnoles

Il arrive aussi que les chercheurs profitent des galeries creusées très profondément sous terre par les compagnies minières pour installer leurs expériences :

- Sudbury au Canada est une mine de métaux
- Boulby au Royaume-Uni est une mine de sel
- Kamioka au Japon est une mine de métaux

Dans la plupart de ces laboratoires le taux de particules cosmiques est réduit de plusieurs millions par rapport à un laboratoire installé en plein centre d'une ville côtière ! Par exemple dans le laboratoire souterrain de Modane une surface horizontale de 1m^2 sera traversée en moyenne en une journée par 4 muons qui auront été produits dans la haute atmosphère au-dessus de la montagne. Nous verrons plus loin que ces muons sont encore nocifs, mais déjà beaucoup moins que s'ils étaient plusieurs millions !

A ce niveau là, la partie est encore loin d'être gagnée ! La roche constituant les murs du laboratoire souterrain est naturellement radioactive. Dans cette roche on trouve les éléments uranium et thorium qui sont des noyaux radioactifs naturels qui vont émettre des particules telles que les photons mais aussi des neutrons. Ces derniers sont les ennemis les plus intimes des WIMPs. En effet ils ont la capacité de parfaitement mimer l'interaction d'un WIMP ; de par leur neutralité, les neutrons n'interagissent qu'avec les noyaux des atomes tout comme les WIMPs. La seule façon de s'affranchir des signaux dus aux neutrons est de s'en protéger au maximum avec des boucliers spécifiques.



Pour protéger le détecteur de ces photons et neutrons on l'entoure de boucliers. La protection la plus proche du détecteur est un bouclier ou blindage en plomb qui permet d'arrêter les photons. Les neutrons, eux, vont être absorbés par du polyéthylène enveloppant l'ensemble détecteur et bouclier en plomb. Le polyéthylène est un matériau qui ressemble à la cire pour fabriquer des bougies.

Une fois le détecteur protégé des attaques extérieures, il faut quand même rester vigilant car il y a aussi des ennemis à l'intérieur !



Blindages en polyéthylène (en blanc ~ 30 tonnes) et en plomb (en gris au centre ~ 35 tonnes) de l'expérience EDELWEISS installée dans le laboratoire souterrain de Modane

En effet comme déjà mentionné précédemment la radioactivité naturelle est présente dans tous les matériaux et en particulier dans tout ce qui va servir à construire le détecteur lui-même, et tout ce qui se trouve dans son environnement très proche. Il faut donc opérer une sélection très minutieuse de tous les éléments entrants dans la fabrication du détecteur. Par exemple toutes les vis, les câbles, les colles, ... vont être testés du point de vue radioactif. Et si ces éléments présentent un taux de radioactivité trop important on va choisir un autre lot ; cette sélection peut même aller jusqu'à changer de fabricants.

Une autre source de bruit de fond dont l'origine est à l'intérieur des boucliers est la production de neutrons par les muons cosmiques résiduels lorsqu'ils vont traverser le bouclier en plomb. En effet un muon cosmique qui arrive à interagir avec un noyau de plomb va casser celui-ci, et un grand nombre de neutrons va être libéré. Or le bouclier anti neutron est à l'extérieur et n'est donc d'aucune utilité dans ce cas précis. Dans la plupart des expériences dédiées à la détection des WIMPs on va ajouter une dernière couche externe d'un matériau scintillant capable de signaler le passage d'un muon, c'est ce qu'on appelle un veto muons.

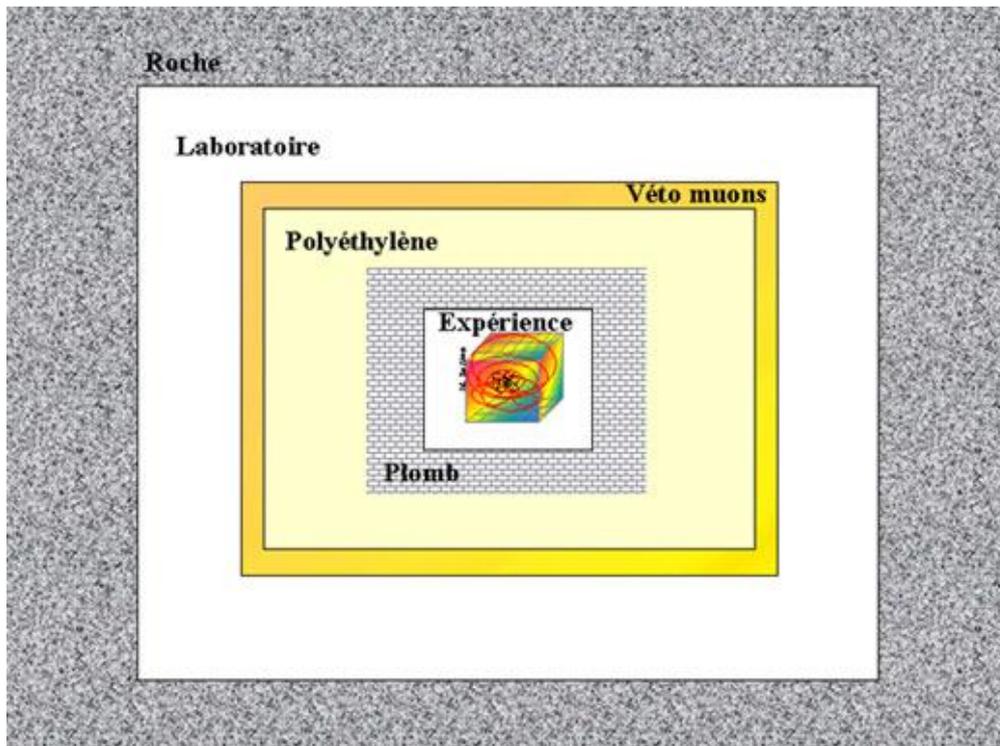


Schéma général d'une expérience de détection directe de WIMPs

Ainsi le veto va pouvoir signaler le passage d'un muon ; ce signalement va permettre de dire que les particules vues par le détecteur à ce moment là sont certainement des neutrons ou des photons créés par le passage d'un muon, et non pas un WIMP.

Il existe dans le monde une vingtaine d'expériences dédiées à la détection des WIMPs construites sur le même schéma. Seul le détecteur va être différent suivant le matériau qu'on va utiliser.

Actuellement les détecteurs les plus performants utilisent des cristaux fonctionnant à très basse température, ce sont les détecteurs cryogéniques également appelés bolomètres.



Un détecteur cryogénique est composé d'un cristal (germanium Ge, saphir Al_2O_3 , tungstate de calcium CaWO_4 ,...) refroidi à très basse température (20 mK = -273.13 °C) à l'aide d'une machine qu'on appelle cryostat.



Différentes vues du cryostat de l'expérience EDELWEISS. Sur le plateau en plomb de la 1ère photo seront installés jusqu'à 110 détecteurs en germanium. Le cryostat est ensuite fermé avec différentes cloches en cuivre qui vont permettre d'atteindre des températures de l'ordre de 20mK

A d'aussi basses températures il est possible de mesurer des élévations de température du cristal de l'ordre de un milliardième de degré Kelvin ! Par ailleurs ces cristaux possèdent également la propriété de produire des charges ou d'émettre de la lumière lors de l'interaction d'une particule. Or il a été montré qu'un noyau qui recule dans le cristal va arracher moins d'électrons ou produire moins de lumière qu'un électron ayant la même énergie cinétique. On a donc à notre disposition deux rapports de signaux ($R = \text{charges}/\text{chaleur}$ ou $R = \text{lumière}/\text{chaleur}$) qui suivant la nature de la particule vont être différents. Un photon ou un électron qui interagit dans le cristal va bousculer les électrons des atomes du cristal. Par contre un neutron va bousculer les noyaux et ne va pas voir les électrons.

Donc le rapport R sera plus faible pour les interactions dues à un neutron puisque que le noyau qui recule arrache moins de charges ou produit moins de lumière qu'un électron ou un photon. Dans le cas du WIMP on a la même situation que pour le neutron. On sait donc reconnaître une interaction d'un photon ou d'un électron de celle d'un neutron ; par contre on n'est pas capable de distinguer un rapport R du à un WIMP de celui du à un neutron, c'est pourquoi il est crucial de protéger au maximum le détecteur de tous les neutrons comme nous venons de le voir dans la section précédente.



Détecteurs cryogéniques des expériences CRESST, EDELWEISS et CDMS

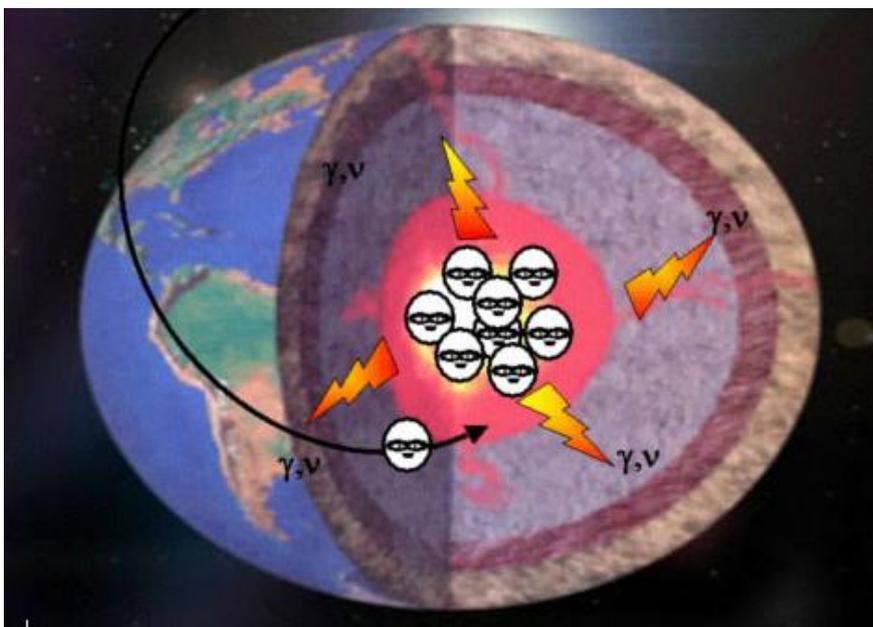
Les trois principales expériences au monde utilisant cette technique sont les 2 expériences européennes CRESST et EDELWEISS et l'expérience américaine CDMS. L'expérience CRESST, installée dans le laboratoire souterrain du Gran Sasso, utilise des détecteurs cryogéniques de cristaux de tungstate de calcium (CaWO_4) qui émettent de la lumière.

Les expériences EDELWEISS (installée dans le laboratoire souterrain de Modane) et CDMS (installée dans la mine Soudan au nord des Etats Unis) utilisent des cristaux de germanium (Ge) qui donnent un signal charge en plus de l'élévation de température.

Ces trois expériences sont actuellement les plus sensibles à la présence éventuelle de WIMPs. Elles travaillent à l'augmentation de la masse du détecteur pour permettre d'améliorer cette sensibilité.

Si les WIMPs existent, ils devraient avoir la particularité soit d'être leur propre antiparticule soit de coexister avec leur antiparticule, ce qui les condamne à disparaître quand ils viennent à se croiser ; c'est le phénomène d'annihilation. L'énergie produite dans cette annihilation va se matérialiser par l'apparition de particules très énergétiques telles que les photons ou les neutrinos.

Néanmoins pour que les WIMPs arrivent à se rencontrer, il faut que cela se passe en des endroits de la galaxie ou ils sont attirés, voire piégés. Cela est possible en des lieux où la gravitation est très forte par exemple au centre des astres tels que le Soleil ou la Terre, ou bien encore au centre de la galaxie.



*Illustration de l'accumulation de WIMPs au centre de la Terre
(γ photon, ν neutrino)*

Une fois piégés les WIMPs vont donc s'annihiler en des photons ou des neutrinos qui auront la particularité d'avoir des énergies plus élevées qu'à la normale. En pointant des télescopes vers le centre du Soleil, de la galaxie ou de la Terre on devrait avoir des signaux signant ce phénomène d'annihilation, c'est ce qu'on appelle la détection indirecte des WIMPs. Ces méthodes indirectes sont également très riches en développements, que ce soit les très grands télescopes à la surface terrestre (HESS,...),



Photographie des 4 télescopes de l'expérience HESS en Namibie

sous les océans (ANTARES),

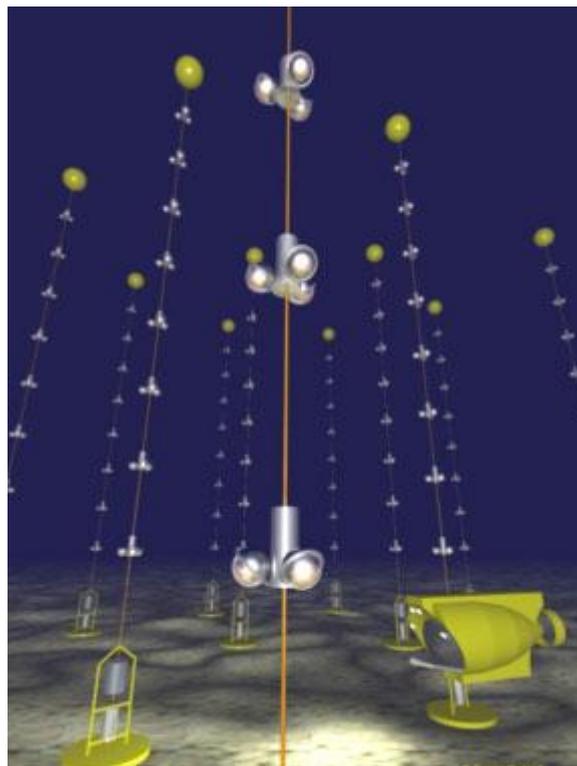


Illustration de l'expérience Antares installée sous l'eau en méditerranée au large de Toulon
sous la banquise (AMANDA)

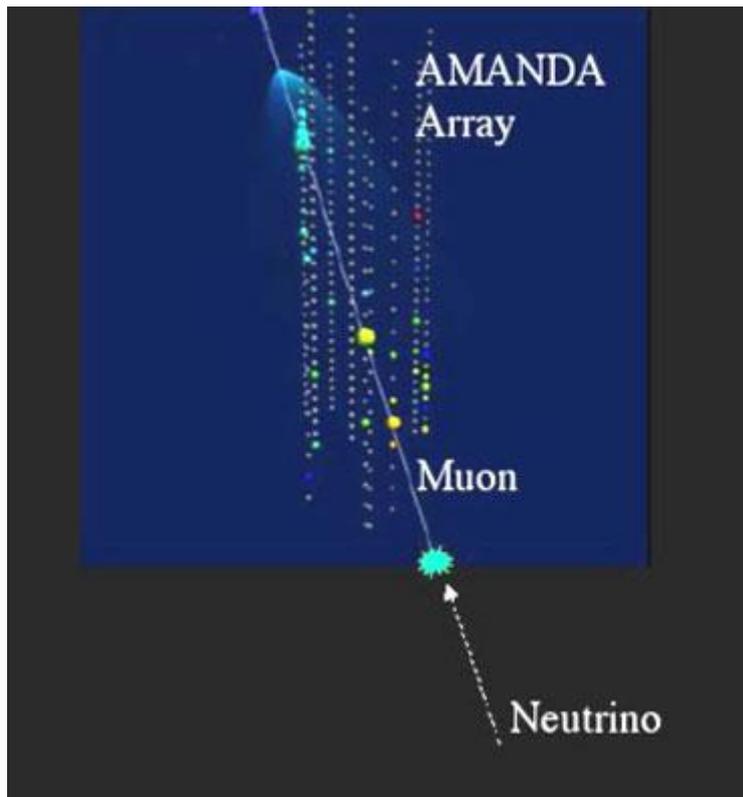


Illustration de l'expérience AMANDA installée sous la glace en antarctique ou bien encore des télescopes embarqués sur des satellites (GLAST, ...).

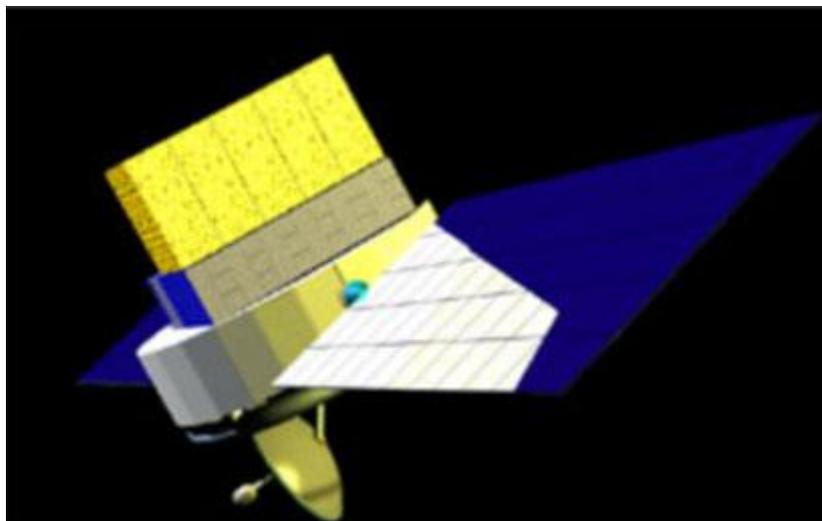


Illustration de l'expérience satellite GLAST

Mais ce sujet mérite un autre dossier ...

Le rêve ultime du physicien est d'unifier toutes les forces qui régissent notre Univers dans son ensemble en une théorie unique qui rendrait compte de l'infiniment petit à l'infiniment grand. L'univers est actuellement décrit par la mécanique quantique pour les échelles de l'infiniment petit, et par la relativité générale pour les échelles cosmologiques. Dans la tentative d'unification de toutes les lois qui gouvernent notre Univers les physiciens ont développé des outils qu'on appelle accélérateurs de particules et qui permettent de produire en laboratoire des minis Big-Bang.

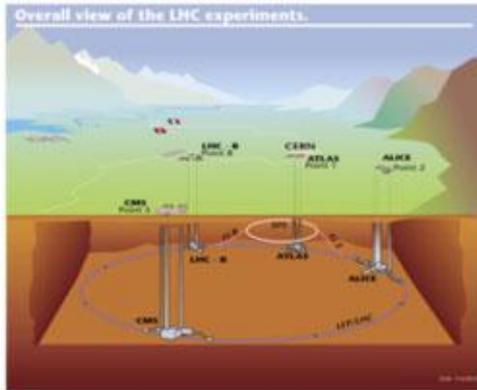
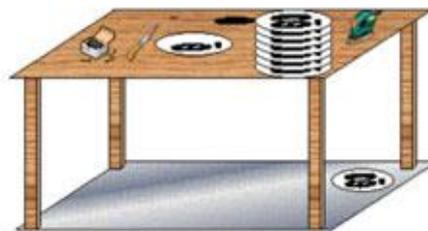


Schéma et photo de l'accélérateur de particule du CERN à Genève : le LHC

Cet accélérateur a été construit pour vérifier des prédictions théoriques sur l'existence de nouvelles particules, parmi lesquelles une qui nous intéresse plus particulièrement : le neutralino. Le neutralino est la plus légère des particules prédites par la supersymétrie ; théorie qui pourrait permettre d'unifier toutes les forces de la nature. La particularité du neutralino est d'avoir des propriétés qui ressemblent très fortement à celles d'un WIMP. Il faudra donc attendre les premiers résultats des expériences LHC pour vérifier les prédictions de la supersymétrie, dont l'existence du neutralino comme candidat à la masse cachée de l'univers.



On peut donc dire que dans la quête aux WIMPs il y a, en gros, deux catégories de chercheurs ; ceux qui attendent que les WIMPs tombent sur leur détecteur, et il y a ceux qui préfèrent les fabriquer eux-mêmes.

Source : Carte blanche à Maryvonne DEJESUS, dossier Futura Sciences