

UN LABORATOIRE AU COEUR DE LA MONTAGNE



Des particules provenant du cosmos bombardent en permanence la surface de la Terre.

En se réfugiant dans les entrailles de la montagne pour se protéger de ce rayonnement parasite, les physiciens ont trouvé une solution pour observer des phénomènes extrêmement rares.

Un bombardement constant du cosmos

Ces particules provenant du cosmos, ou **rayons cosmiques**, sont produites lors de l'explosion de certaines étoiles, en fin de vie. Il s'agit pour la plupart de protons.

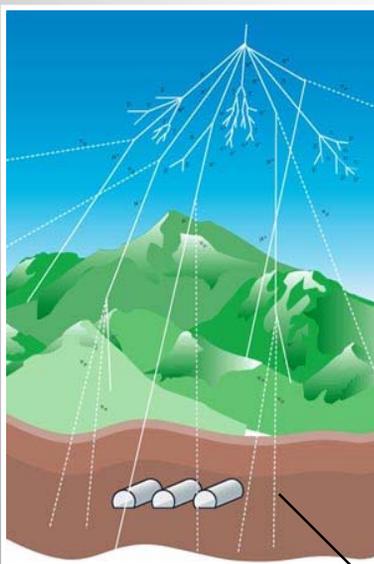
Elles voyagent dans la **galaxie**, frappent les atomes de la haute atmosphère terrestre et produisent des gerbes de particules secondaires. Une petite fraction des plus pénétrantes, les muons, parvient au LSM.

Une muraille de 1700 mètres d'épaisseur !

Le Laboratoire Souterrain de Modane est situé au milieu du tunnel routier du Fréjus, qui relie la France à l'Italie.

Les 1700 mètres de roche du Pic du Fréjus réduisent **d'un million** de fois le rayonnement cosmique.

En effet, pour les scientifiques de ce laboratoire, les rayons cosmiques sont des parasites pour la recherche de signaux très rares, comme la désintégration du proton, la matière noire ou les neutrinos.



La montagne un énorme filtre !

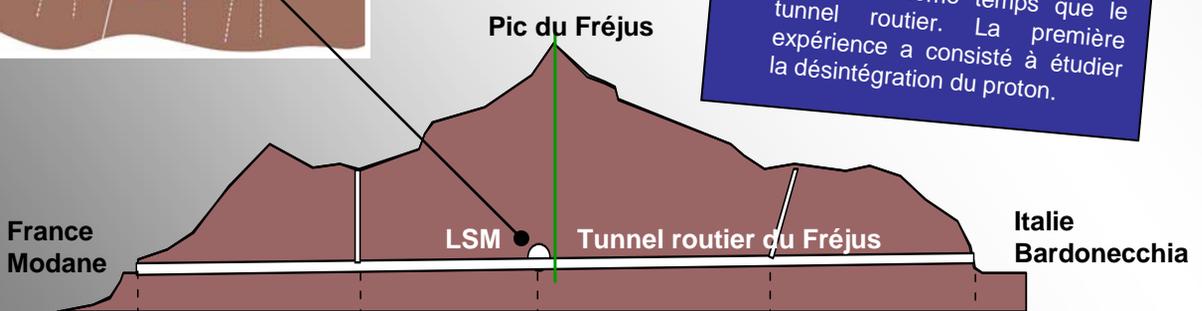
Les 1700 mètres de roche sont utilisées pour "arrêter" les rayons cosmiques.



1983 – 1988
Le proton est-il stable ?

Plus de 20 ans d'expériences !

Le laboratoire a été creusé en 1982, en même temps que le tunnel routier. La première expérience a consisté à étudier la désintégration du proton.



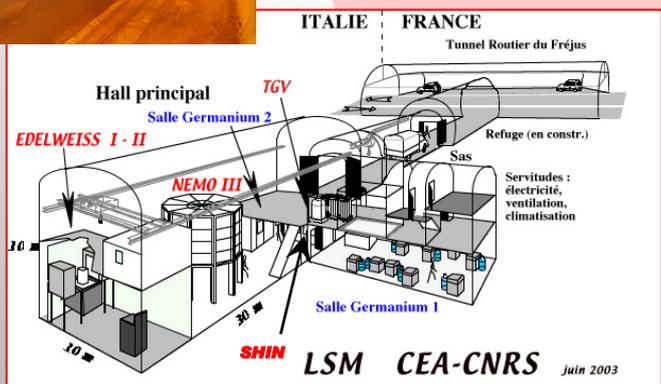
LE LSM, présent et futur

Le Laboratoire Souterrain de Modane, laboratoire mixte CEA/CNRS, c'est :

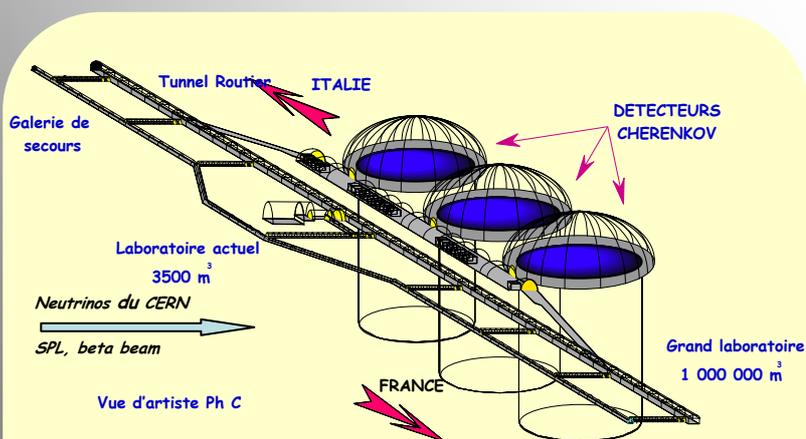
- un lieu d'accueil pour des expériences de recherche fondamentales et des activités de mesure de très faibles activités, conçues et réalisées dans les laboratoires du CNRS, du CEA et des laboratoires européens,
- une équipe de 10 personnes, dont 7 sur place, pour le faire fonctionner,
- environ 100 chercheurs, ingénieurs, techniciens qui fréquentent le laboratoire,
- des installations annexes dans la ville de Modane : des bureaux, un hébergement pour les équipes de passage, un garage avec ateliers et stockage,
- une collaboration étroite avec la SFTRF (Société Française du Tunnel Routier du Fréjus)
- la participation au réseau ILIAS de laboratoires souterrains européens,
- un projet d'association avec le centre scientifique de Dubna,
- un projet de nouveau bâtiment regroupant les fonctions de support et de communication,
- un projet à long terme de nouveau grand laboratoire...



Participent aussi à NEMO des collaborateurs des Etats-Unis et du Japon



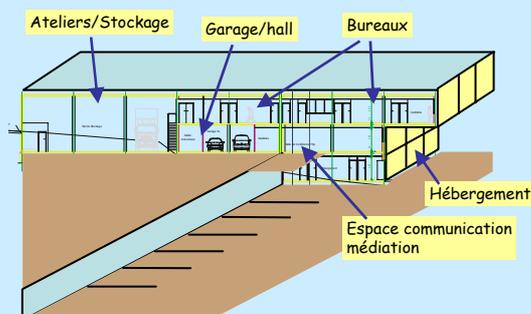
L'équipe du LSM sur place à Modane



Un projet d'envergure mondiale, en liaison avec le CERN !

Une illustration pour un projet de très grand laboratoire abritant un détecteur Cherenkov à eau pour l'étude des neutrinos, la désintégration du proton, l'observation des supernovae.

Le projet de nouveau bâtiment aux « Terres Blanches » à Modane, en lien avec le SICM



UN LABORATOIRE AU COEUR DES ECHANGES EUROPEENS



Le Laboratoire Souterrain de Modane fait partie d'un réseau de la Communauté Européenne de 4 laboratoires souterrains, le réseau ILIAS. Ses objectifs sont le partage du savoir faire, la coordination des développements techniques, la circulation des chercheurs en Europe.

Ces laboratoires abritent différentes expériences pour mener des objectifs communs : une meilleure connaissance de notre Univers, le développement d'applications tirant bénéfice des environnements souterrains.

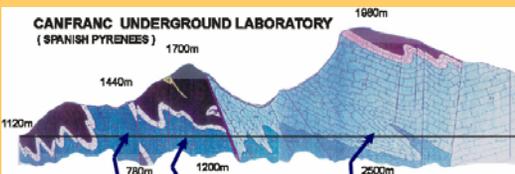
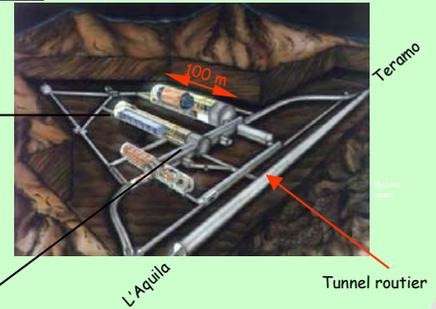
Sous la montagne du Gran Sasso, le laboratoire LNGS est le plus vaste



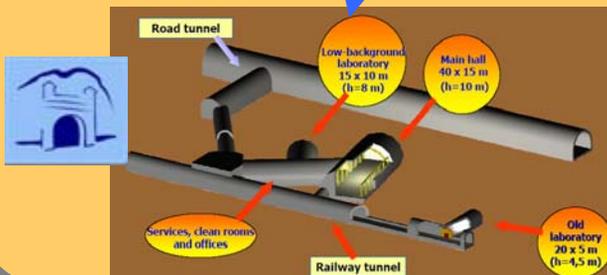
Les Abruzzes à 120 km de Rome

Creusé en 1988, ce laboratoire dispose d'une surface disponible de 6000 m² et peut ainsi abriter les immenses détecteurs capables de "voir" les neutrinos.

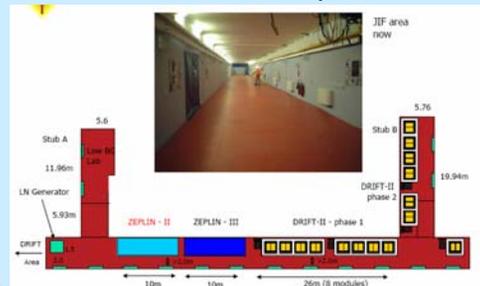
Il reçoit la visite de 700 chercheurs, ingénieurs, techniciens par an, participant à 15 expériences.



Sous les Pyrénées espagnoles, le nouveau labo de Canfranc va être creusé courant 2005.



Au fond de la mine de potasse de Boulby, à l'IUS, dans le nord de l'Angleterre, des chercheurs étudient les mêmes phénomènes qu'au LSM.





Le défi des expériences au Laboratoire Souterrain de Modane est de chercher des signaux extrêmement rares.

En plus de protéger leur site du rayonnement cosmique, les physiciens doivent aussi protéger les détecteurs du rayonnement issu de la radioactivité naturelle, parasite potentiel.

L'enjeu est de taille : tous les composants des détecteurs doivent donc être sélectionnés et, les détecteurs une fois montés, être mis à l'abri de la radioactivité de l'environnement.

Se protéger du radon

L'expérience NEMO enfermée dans sa « tente » va être balayée par de l'air ultra propre.

La chasse au Radon

Le radon est un gaz radioactif qui se forme dans le sol, s'échappe par les porosités et se disperse dans l'air. Dans 1 m³ d'air du laboratoire, il y a une moyenne de 10 désintégrations de radon par seconde.

Au Laboratoire Souterrain, un **système de purification de l'air** est mis en place pour réduire de 50 fois le taux de radon dans l'air de la « tente » installée autour de l'expérience NEMO.

L'essentiel est caché

La roche du laboratoire est radioactive, les matériaux de construction, même les physiciens (!) sont trop radioactifs pour les instruments ultra sensibles au LSM.

Seule solution : une fois les matériaux constituant les détecteurs soigneusement sélectionnés, construire des **blindages épais** et étanches aux gammas, neutrons...

Les Romains à la rescousse des Gaulois

Le plomb utilisé comme blindage ne doit pas lui-même être radioactif !! Or le plomb moderne a une faible radioactivité résiduelle. **Ce n'est pas le cas du plomb ancien.**

L'expérience EDELWEISS utilise un plomb récupéré d'un ancien navire celtique coulé au large de la Bretagne. Le navire, en provenance de Grande Bretagne est venu faire naufrage, vers 400 après JC sur le site des Sept Îles. La coque a entièrement disparu, laissant apparaître la cargaison de plomb (270 lingots, 22 tonnes).



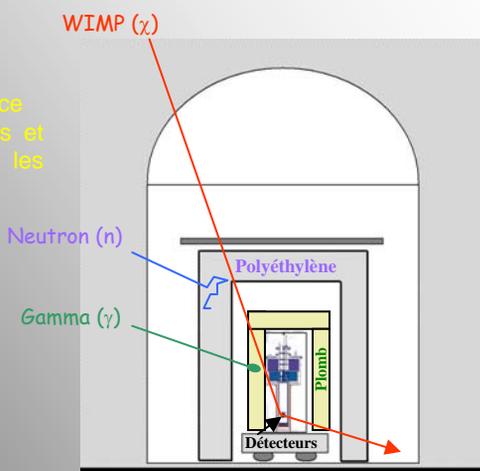
Un plomb de 1600 ans
L'épave lors de la campagne de fouilles.



La première brique !
Purifié et fondu, le plomb romain protège maintenant les détecteurs ultra sensibles d' EDELWEISS.

Stop aux intrus

Ci contre, le blindage de l'expérience EDELWEISS I arrête les gammas et les neutrons mais laisse passer les particules à détecter : les WIMPs.



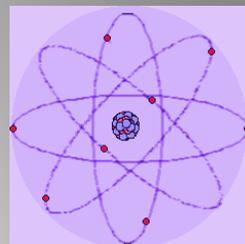
Le saviez vous ?

Vous êtes vous-même radioactif !! Vous êtes le siège d'environ 8000 désintégrations bêta par seconde de noyaux de Potassium 40 et de Carbone 14. En conséquence vous êtes aussi des émetteurs de neutrinos...

LES PARTICULES AU CŒUR DE LA MATIÈRE... OU QUI REMPLISSENT L'ESPACE

La matière est faite d'atomes. Ces atomes sont faits de particules :

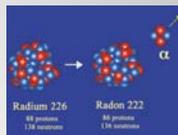
- les protons et neutrons, collés ensemble, composent le noyau
- les électrons tournent autour de chaque noyau à des vitesses prodigieuses.



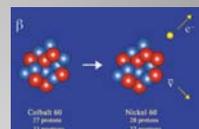
Des particules venant des noyaux ?

Certains noyaux ont une "bonne" répartition entre protons et neutrons : ils sont stables. D'autres au contraire ont une "mauvaise" répartition, ils sont instables, on dit **radioactifs**.

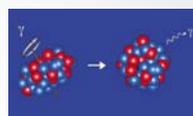
La radioactivité est la **transformation d'un noyau instable** en un autre noyau plus stable. Elle s'accompagne de l'émission de particules ou rayonnements, α β γ ...



Rayonnement α : Le noyau recherche la stabilité en émettant un noyau d'hélium ou particule **alpha**. La particule alpha est arrêtée par une simple feuille de papier.



Rayonnement β : Le noyau émet un **électron** et un **antineutrino**. L'électron, ou « **bêta** », est arrêté par une feuille d'aluminium.



Rayonnement γ : Le rayonnement **gamma** (γ) est une onde électromagnétique comme la lumière visible ou les rayons X mais plus énergétique. Il faut une forte épaisseur de plomb ou de béton pour atténuer le rayonnement gamma.



**Cette carafe contient-elle des éléments radioactifs ?
Comment le savoir ?**

Le verre contient du Potassium, donc du Potassium 40, une variété (on dit un isotope) du Potassium qui est radioactif. Le Potassium 40 émet un gamma à une énergie fixée qui n'appartient qu'à lui, une sorte de signature qui permet de l'identifier.

Les détecteurs Germanium utilisés au LSM permettent la mesure de l'énergie des gammas et ainsi d'identifier les composants radioactifs de tout échantillon.



Le saviez vous ?
Les éléments radioactifs naturels présents dans la terre se désintègrent en émettant des rayonnements dont l'énergie est dissipée sous forme de chaleur. Sans cette chaleur, il y a longtemps que notre planète serait devenue un astre froid et sans vie.

Font aussi partie des particules stables de notre univers :

- les photons et leur multiples manifestations : la lumière visible, mais aussi une large gamme de radiation, des ondes radio aux gammas très énergétiques,
- les neutrinos, les particules les plus insaisissables.

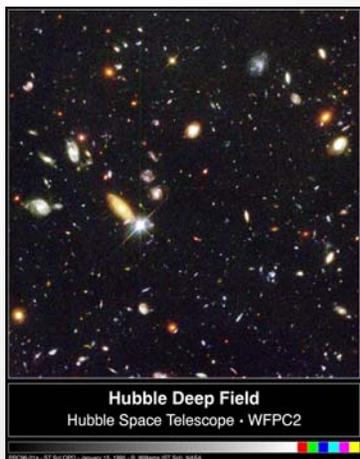
Des particules venant du soleil ?

Le soleil nous éclaire abondamment ... par temps clair ! Si la lumière visible est sa manifestation la plus évidente, il émet aussi des rayonnements invisibles, ultra violets –responsables des coups de soleil-, infrarouges –la chaleur-, des rayons X (absorbés par la haute atmosphère)...

Il est aussi un émetteur particulièrement prolifique de neutrinos, particules très discrètes, provenant des réactions de fusion nucléaire.

Mais les neutrinos peuvent aussi provenir de notre environnement immédiat...

AU COEUR DE LA GALAXIE, UNE MATIERE INVISIBLE, LA MATIERE NOIRE



Par une nuit claire, tout le monde peut observer les étoiles.

Avec des télescopes, les astronomes observent des étoiles invisibles à l'oeil nu, des galaxies, beaucoup d'autres objets célestes.

Avec des détecteurs plus complexes, les astrophysiciens ont pu faire un inventaire complet de la matière « visible » du cosmos.

Pourtant, depuis 70 ans, de nombreux indices montrent que cette matière visible par nos instruments ne représente que 5% de la masse totale dans l'Univers.

Cette matière manquante, invisible, "noire" fait l'objet de nombreuses investigations de par le monde.

Qu'est-ce que la matière noire ? Une énigme non résolue...

Les chercheurs ne connaissent pas encore la nature de la matière noire.

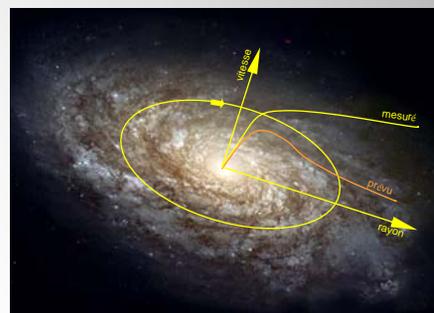
Ils pensaient qu'il s'agissait d'étoiles trop petites pour être lumineuses. Mais les dernières mesures sont décevantes puisque ce type de matière ne peut représenter au plus que 10% du total de la matière noire.

Des particules encore inconnues, présentes depuis le Big Bang, pourraient constituer la masse manquante. Les **WIMPs** sont des particules prévues par des modèles théoriques. Mais ils n'ont pas été encore détectés. Une expérience au sein du LSM, **EDELWEISS**, est consacrée à leur recherche



Fred Zwicky

Un astronome précurseur des années 1930



Des étoiles qui tournent trop vite

Les 100 milliards d'étoiles de notre galaxie dansent un fantastique ballet cosmique en tournant autour du centre galactique.

Depuis 30 ans, les chercheurs ont constaté des comportements inattendus des vitesses de ces étoiles et aussi dans bien d'autres galaxies.

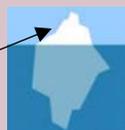
En prenant comme masse de la galaxie la somme des masses des étoiles visibles, ils sont capables de calculer la vitesse que devrait avoir une étoile.

Surprise ! Les mesures montrent que les étoiles à la périphérie tournent beaucoup plus vite que prévu !!! Il y a donc une masse cachée à trouver...



Des neutralinos (χ) tout autour de nous ?

Les WIMPs (ou χ) formeraient un halo sphérique autour de la galaxie et baigneraient notre environnement terrestre.



Presque tout l'Univers est invisible

L'Univers est pire qu'un iceberg. La matière visible constitue moins de 5 % de tout ce qu'il contient.

Le saviez vous ?

Notre Terre se déplace à 30 km/s autour du soleil tandis que notre système solaire voyage lui-même au sein de la Voie Lactée à la vitesse respectable de 220 km/sec.

EDELWEISS OU LES EXTREMES SE RENCONTRENT...

Des mesures nous indiquent que de la matière existe sous une forme inconnue (matière noire). Celle-ci pourrait représenter environ 10 fois la masse de la matière visible.

L'expérience EDELWEISS la recherche sous forme de particules : les WIMPs.

Cette collaboration a la spécificité de regrouper des chercheurs de compétences très différentes : des physiciens des particules, des astrophysiciens, des spécialistes de cryogénie, de physique du solide.



Expérience pour **DE**tecter Les **W**imps En Site Souterrain

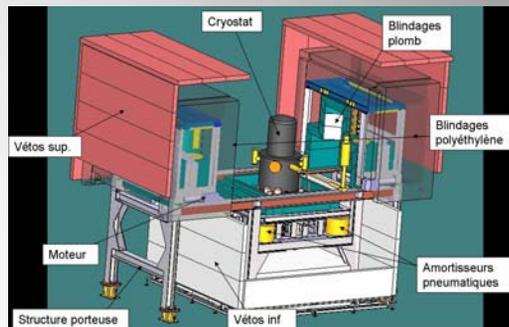
Des détecteurs ultra-sensible !

Les signaux induits par les WIMPs sont de très faible énergie (quelques dizaines de keV) et sont très rares.

Pour atteindre la sensibilité requise, les chercheurs d'EDELWEISS ont choisi des détecteurs fonctionnant à une température extrêmement faible : 20mK (-273,13°C).

Ainsi, ces détecteurs ultra sensibles et ultra purs mesurent en même temps la variation de température produite par l'énergie déposée – **quelques millièmes de degré** – et le **nombre d'électrons** produits. Ce sont des bolomètres ionisation-chauffeur.

Cette double mesure permet d'atteindre une efficacité pour distinguer les WIMPs des parasites résiduels radioactifs meilleure que 99,98 %.



Une compétition mondiale : sur la ligne de départ

Les chercheurs d'EDELWEISS n'ont pas encore observé de WIMPs mais ont pu obtenir d'excellentes sensibilités avec la **version I (1 kg de détecteurs)**. Ces résultats ont placé cette expérience dans le peloton de tête au niveau mondial.

Les équipes préparent l'installation de la **version II plus sensible (30 kg de détecteurs à terme)** à partir de novembre 2004.



Détecteur de 320g en Germanium d'ultra-haute pureté

Ces bolomètres, fabriqués à Saclay sont les plus massifs de leur catégorie en service dans le monde.

Le petit carré de 4x4mm² est le thermomètre ultra-sensible. Les fils de contacts ont un diamètre de 25 microns !

D'autres détecteurs aux performances améliorées sont aussi fabriqués à Orsay.



A l'intérieur de ce gros capot en cuivre : les détecteurs.

Le cryostat utilisé pour obtenir la température de 20 mK, mis au point par l'équipe de Grenoble, est opérationnel.

Bien sûr, tous les matériaux le constituant ont été soigneusement sélectionnés.

Le saviez vous ?

La température mesure l'agitation des atomes. Si des températures extrêmement élevées peuvent être atteintes dans les étoiles par exemple ou sur terre, on ne peut par contre descendre en dessous de -273,15° C. C'est le "zéro absolu" (0 K), où tous les atomes sont immobiles.



Prémontage à Lyon et Saclay

Ce dispositif capable de soutenir le blindage de 100 tonnes -en partie mobile- doit être testé avant assemblage au LSM pour minimiser les mauvaises surprises...

NEMO : QUELLES PROPRIETES, QUELLE MASSE, POUR LE NEUTRINO ?



Le détecteur NEMO en cours de montage
Neutrino Ettore Majorana Observatory

Le neutrino peut théoriquement être identique à son antiparticule, a proposé Ettore Majorana, physicien des années 30. Matière et antimatière seraient similaires pour le neutrino !

Le but des expériences NEMO 3 et TGV est de dévoiler la nature du neutrino grâce à l'étude de la double désintégration bêta, ainsi que de mesurer le cas échéant sa masse.

NEMO 3, qui fonctionne depuis un an, voit sa sensibilité limitée par des parasites provenant du radon.

Grâce au système de purification de l'air installé récemment, NEMO 3 va pouvoir accumuler des données dans les meilleures conditions.

Cependant, ce n'est que dans 5 ans que l'on saura le dernier mot...

Double désintégration bêta

La « simple » désintégration bêta est bien connue. La double désintégration bêta est plus rare et la seule méthode expérimentale connue pour savoir si le neutrino est sa propre antiparticule. Ce type de radioactivité est le rayonnement le plus rare jamais observé dans la nature. Deux types existent, une classique, l'autre « interdite ».

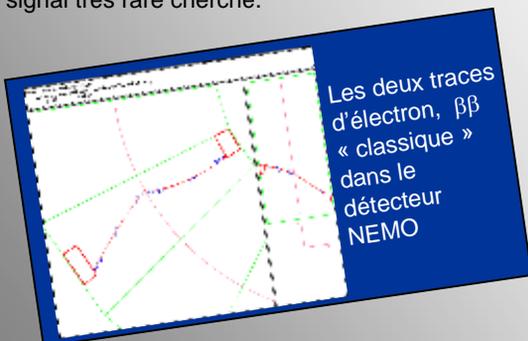
Le temps nécessaire pour que, à partir de 1 kg de Molybdène 100, la moitié se soit désintégrée par la « voie classique », est de 8 milliards de milliards d'années. A titre de comparaison, on estime que l'âge de l'Univers est de 15 milliards d'années « seulement » !

Pourtant le processus recherché, une double désintégration bêta « sans neutrino » est au moins 10000 fois plus rare.

Comment fait on ?

Recette :

- accumuler suffisamment de noyaux susceptibles d'être le siège de cette désintégration particulière : 10 kg de Molybdène 100 en feuille très mince, obtenus grâce à la participation du centre de Dubna,
- construire un détecteur capable de repérer les 2 électrons émis et mesurer leur énergie,
- éliminer toute trace de parasite susceptible de simuler le signal très rare cherché.

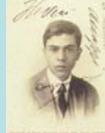


Neutrino de Dirac
 $\nu \neq \bar{\nu}$



Conservateur anglais !

Neutrino de Majorana
 $\nu = \bar{\nu}$

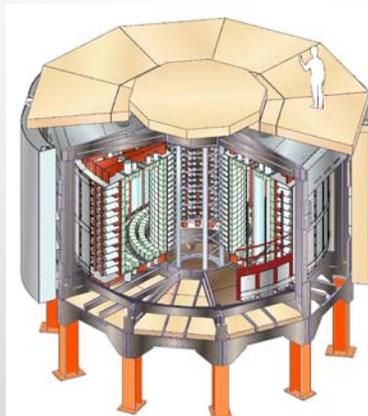


Jeune idéaliste !

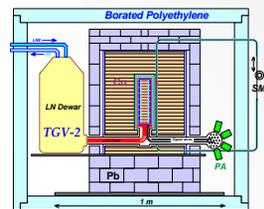
L'expérience les départagera ...

Un défi scientifique et technologique

NEMO est recouvert de plus de 200 tonnes de blindages de fer, d'eau et de bois. Tous les matériaux du détecteur, des structures métalliques jusqu'aux vis ont été sélectionnés pour leur très bas niveaux de radioactivité. Au final, l'activité en Uranium 238 et Thorium 232 des 200 tonnes de NEMO est inférieure à l'activité d'un corps humain !



Le cœur ouvert de NEMO



L'expérience TGV
Télescope à Germanium Vertical cherche aussi la désintégration $\beta\beta$ avec 32 détecteurs Germanium

LA RADIOACTIVITE REND SERVICE

Au Laboratoire Souterrain de Modane, les chercheurs ont mis au point des systèmes pour mesurer des niveaux très faibles de radioactivité.

Outre la sélection des matériaux des détecteurs utilisés dans les expériences de physique, les **13 détecteurs de rayonnement gamma en service au LSM** sont utilisés pour des études environnementales, des études océanographiques, géologiques et pour la datation, y compris des grands crus bordelais !



Mesure des sédiments de lac alpins (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, LSCE)

L'identification des éléments radioactifs permet de lire les 150 dernières années de l'histoire des lacs. Cette méthode a été appliquée aux sédiments du lac d'Annecy : les 30 cm de carottes révèlent les tremblements de terre ou la modification de modes d'exploitation des sols. Ces études vont faire l'objet d'une collaboration LSM-Université de Chambéry.

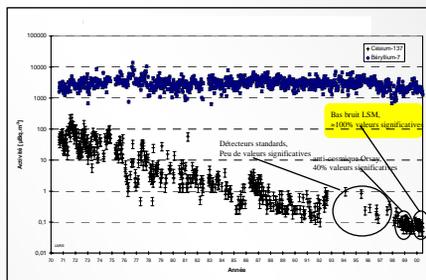
Autres applications : contrôle de l'activité des eaux de boissons, mesure de l'âge de crustacés...

Mesure de pollution radioactive de l'air (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, IRSN)

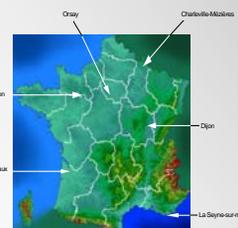
L'air constitue un vecteur important de la pollution, qu'elle soit radioactive ou non.

L'arrêt des expérimentations nucléaires dans l'atmosphère et la baisse des rejets chroniques industriels dans l'environnement s'est traduit par une décroissance régulière au cours du temps des niveaux de radioactivité artificielle au sein de l'environnement.

Le LSM s'est révélé adapté à cette évolution et à la mesure de taux très faibles.

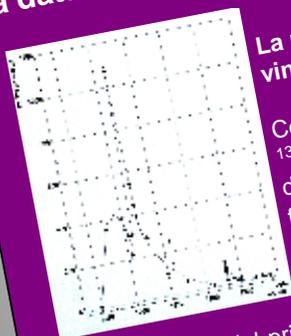


Taux de ^7Be et ^{137}Cs en fonction de l'année



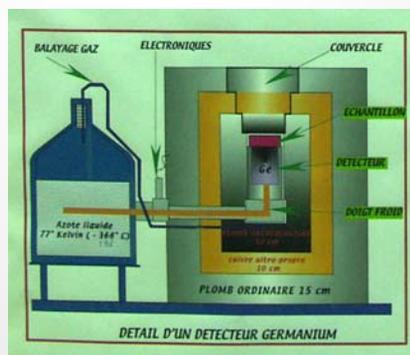
Localisation des 6 stations métropole de prélèvement atmosphérique de l'IRSN

Des retombées inattendues : la datation des grands crus



La mémoire des vins
Concentration de ^{137}Cs dans les vins de Bordeaux en fonction de l'année.

Cet isotope artificiel principalement produit lors des essais nucléaires des années 1960 est très utile : un moyen simple de datation des vins, sans même ouvrir la bouteille!

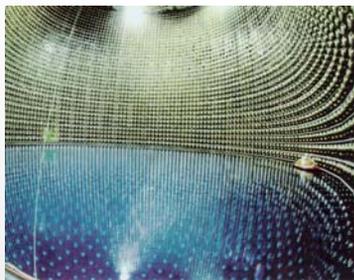


Les différents éléments d'un détecteur "gamma" en Germanium.

LE NEUTRINO, PARTICULE INSAISSISSABLE ET OMNIPRESENTE

Postulé en 1930 par Pauli pour expliquer une anomalie expérimentale et découvert seulement en 1956 par Reines et Cowan, le neutrino est l'une des particules élémentaires les plus mystérieuses.

Le neutrino, ou plutôt les 3 neutrinos, n'ont pas encore dévoilé toutes leurs propriétés : si l'on a des preuves qu'il ont une masse, depuis seulement les années 80, on ne connaît pas encore les valeurs exactes, et leurs étranges propriétés en particulier « d'oscillation » sont l'objet d'investigations croissantes. NEMO3 au LSM apporte sa contribution à cette quête.



Une piscine de 50 000 tonnes d'eau sous terre au Japon

Depuis 1980, est née une « astronomie neutrino » mettant en jeu des détecteurs de plus en plus massifs. L'expérience SuperKamioka, au Japon, a observé les neutrinos solaires, atmosphériques et, fortuitement, ceux de la supernova SN1987A.

L'imperturbable neutrino

Chaque particule « voit » les atomes de la matière d'un manière différente.

Un neutrino a la propriété de voir le monde comme si tout était presque vide. Pour les neutrinos, la matière est transparente, ils traversent le plomb, les montagnes et même la Terre en étant extrêmement peu perturbés. D'où la nécessité de construire des détecteurs de plus en plus volumineux pour en arrêter – en "voir" – quelques uns.

Le projet de grand détecteur au Fréjus fait partie de cette dynamique.

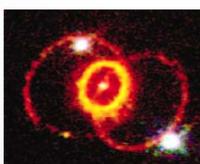


Wolfgang Pauli
L' "inventeur"
du neutrino.

Il pleut des neutrinos de toute part...



Le soleil (fusion):
64 milliards
par cm^2 par seconde



Une Super Nova de notre
Voie Lactée (fusion)
5 milliards par cm^2 par
seconde pendant 10 s



Le Big-Bang : chaque cm^3
d'espace est occupé par
300 neutrinos « reliques »



Les réacteurs nucléaires
(bêta) 100 000 par cm^2
par seconde à 200 km



Vous-mêmes, monsieur,
en émettez
8000 par seconde (bêta) !



Origine géophysique et
atmosphérique (bêta) :
6 millions par cm^2 par seconde

Vous ne le saviez sans
doute pas !
Non prolifération et
neutrinos !

L'AIEA (Agence
Internationale de l'Energie
Atomique) s'intéresse aux
détecteurs neutrino utilisés
par les physiciens, pour
contrôler les isotopes
produits dans les coeurs de
centrales nucléaires, le
plutonium en particulier.

Légende

neutrinos déjà détectés = en vert
production = par désintégration bêta (bêta), par
fusion de noyaux légers (fusion)

Autres sources de neutrinos :

les accélérateurs de particules (bêta)
les bombes thermonucléaires