

## CARRÉ SCIENCES

Exposition permanente : « Petits secrets de l'Univers »  
Venez découvrir les activités du laboratoire et l'infiniment petit au travers d'expériences interactives et ludiques.

Plus d'informations sur [www.lsm.fr](http://www.lsm.fr) / groupes sur réservation.



PARIS

Lyon • Chambéry  
**Modane** •  
Grenoble

[www.lsm.fr](http://www.lsm.fr)

Laboratoire Souterrain de Modane  
Carré Sciences  
1125 route de Bardonnèche  
73500 Modane

Tel +33 4 79 05 22 57  
Fax +33 4 79 05 24 74

[contact@lsm.fr](mailto:contact@lsm.fr)

# Laboratoire Souterrain de Modane

Sous la protection du massif alpin, des scientifiques  
cherchent à percer les mystères de l'Univers ...

[www.lsm.fr](http://www.lsm.fr)

conception : service communication - CNRS Alpes - LRF | © : LSM /  
Credit: X-ray: NASA/CXC/ASU/J.Hester et al.; Optical: NASA/ESA/ASU/J.Hester & A.Lohf; Infrared: NASA/JPL-Caltech/Univ. Minn./R.Gehrz



Le LSM est une Unité Mixte de Recherche du CNRS et du CEA  
Centre National de la Recherche Scientifique  
Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules

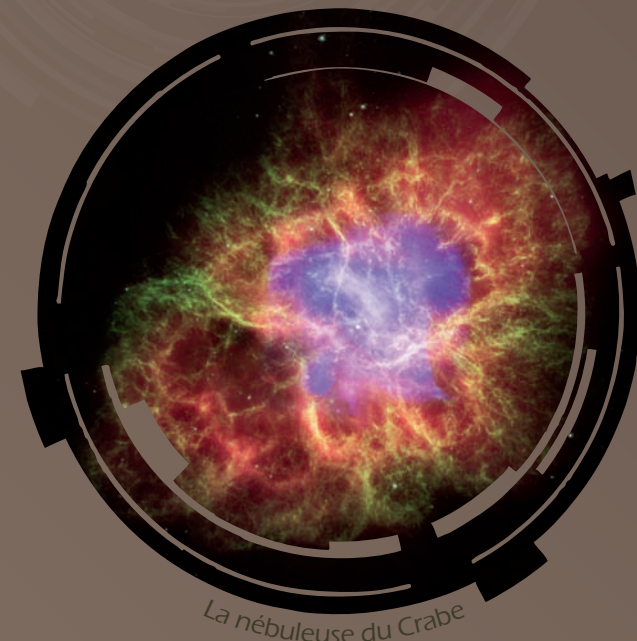
Institut de Recherche sur les lois Fondamentales de l'Univers



## AU CŒUR DE LA MONTAGNE : un laboratoire unique en France

Le LSM est situé au milieu du tunnel routier du Fréjus. Il accueille depuis 1982 des expériences internationales de physique fondamentale (stabilité de la matière, neutrino, matière noire, ...) et des bancs de mesure de très faible radioactivité pour la sélection des matériaux et l'environnement (datation, sédimentologie ou expertises).

Ce site souterrain est protégé des rayons cosmiques par 1700 mètres de roche sous la pointe du Fréjus. Il permet de rechercher des phénomènes physiques extrêmement rares impossibles à observer en surface à cause des parasites induits par ces rayonnements.



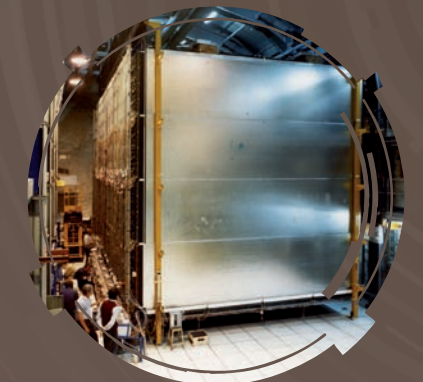
La nébuleuse du Crabe

## DE L'INSTABILITÉ DU PROTON À L'ORIGINE DE L'UNIVERS

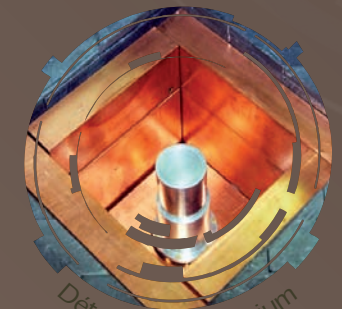
Le laboratoire a été construit pour recevoir une expérience franco-allemande,  $\tau p$ . L'objectif était de mesurer une éventuelle instabilité du proton, un constituant élémentaire du noyau atomique.

Depuis 1988, les activités du laboratoire se sont diversifiées : le domaine principal de recherche reste toujours la compréhension de notre Univers (origine, évolution, composition) au travers de collaboration internationales étudiant le neutrino (NEMO et TGV), la matière noire (EDELWEISS), la recherche d'éléments super lourds (SHIN), etc.

Le site du LSM a également permis l'émergence d'un pôle de mesures d'ultra faible radioactivité pour la sélection des matériaux et les recherches environnementales. Il participe aussi aux campagnes de mesure pour les composants de microélectronique (laboratoire de référence pour la norme JEDEC).



Expérience  $\tau p$



Détecteur Germanium

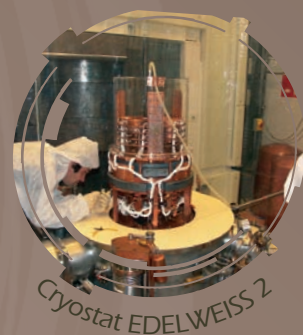


Vue générale du laboratoire

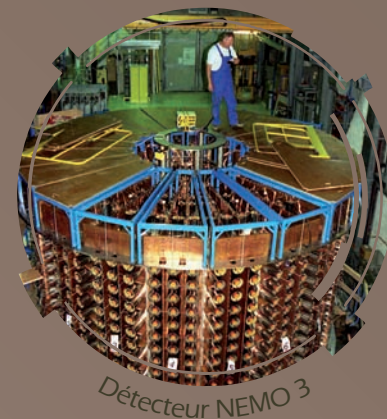
## LE RAYONNEMENT COSMIQUE

La Terre est bombardée en permanence par des particules arrivant du cosmos. Elles interagissent avec les atomes de la haute atmosphère et produisent une pluie de particules secondaires appelée rayonnement cosmique.

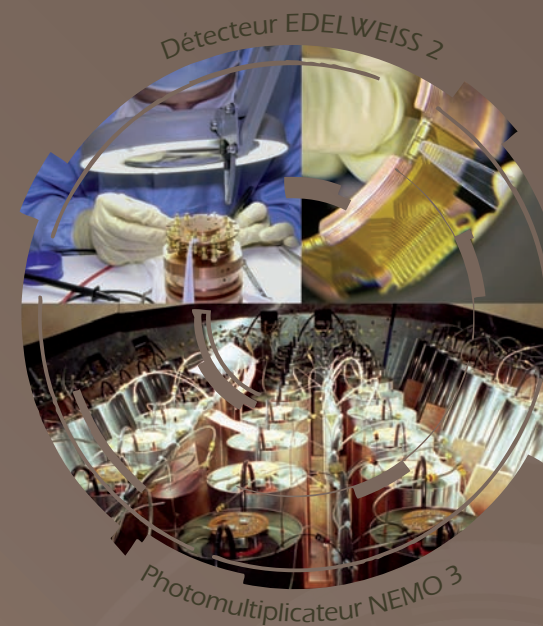
Au niveau du sol, le flux de rayons cosmiques est de 8 millions par  $m^2$  et par jour. La couverture rocheuse du laboratoire atténue ce flux d'un facteur 2 millions, il ne reste donc plus que 4 rayons cosmiques par  $m^2$  et par jour au niveau du laboratoire.



Cryostat EDELWEISS 2

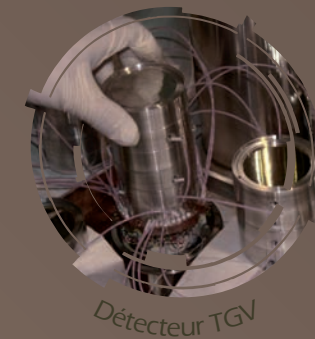


Détecteur NEMO 3



Détecteur EDELWEISS 2

Photomultiplicateur NEMO 3



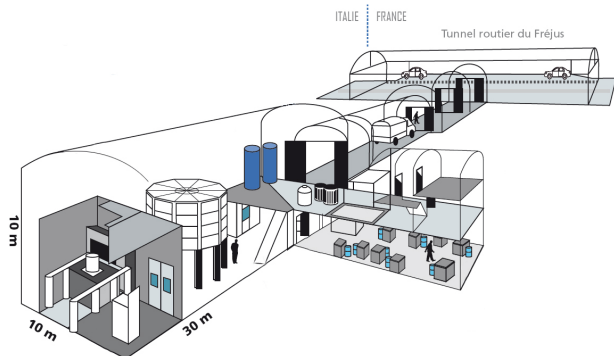
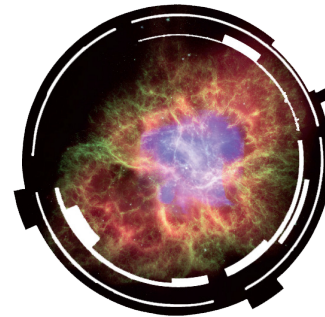
Détecteur TGV



Détecteur SHIN

# Le Laboratoire Souterrain de Modane

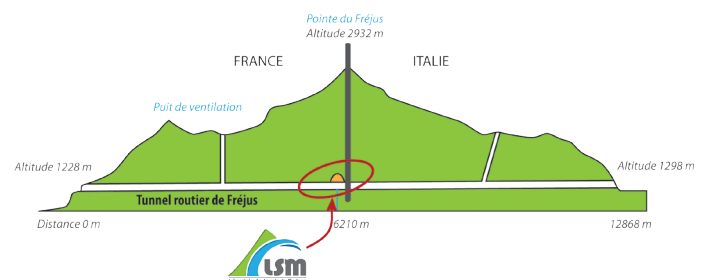
Le laboratoire souterrain de Modane est une Unité mixte de recherche qui dépend de l'IN2P3 du CNRS (Institut national de physique nucléaire et de physique des particules du Centre national de la recherche scientifique) et de l'UGA (Université Grenoble Alpes).



Le LSM accueille des expériences de recherche fondamentale en physique des particules, astroparticules et physique nucléaire mais aussi des détecteurs d'ultra-faible radioactivité permettant des mesures environnementales, des applications dans le domaine de la datation, la détermination de l'origine géographique de produits, ... ou encore des bancs de tests en microélectronique.

Créé en 1982, Il se situe au km 6,5 du tunnel routier du Fréjus à 1700 mètres sous la pointe du Fréjus (4800 mètres équivalent eau).

Il s'agit du laboratoire le plus profond en Europe, son volume disponible est de 3500 m<sup>3</sup>.



Une équipe d'une douzaine de permanents (physiciens, ingénieurs, techniciens) assure le fonctionnement et la sécurité du laboratoire ainsi que l'accueil de plus de cent chercheurs et ingénieurs du monde entier (France, Russie, République Tchèque, Royaume-Uni, Allemagne, Espagne, Japon, USA, ....) qui participent aux expériences installées sur le site.

Sur le plan international, le LSM a un accord de coopération scientifique avec le Joint Institute for Nuclear Research de Dubna (Russie) et la Czech Technical University in Prague (République Tchèque) dans le cadre du laboratoire international associé JOULE.

Il fait partie du réseau des laboratoires souterrains européens regroupant le LSM, le LNGS (Gran Sasso, Italie), le LSC (Canfranc, Espagne) et BUL (Boulby, R-U).

# Le rayonnement cosmique

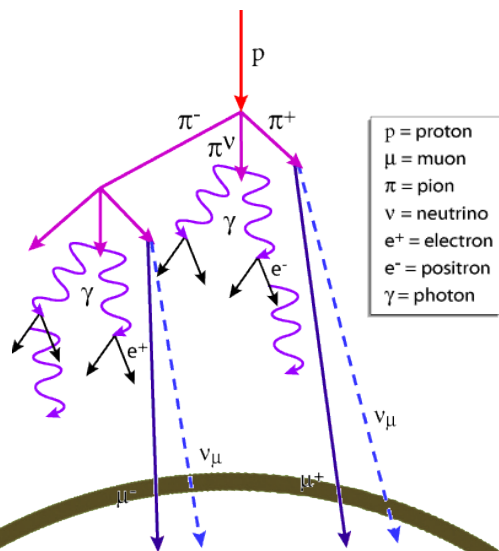
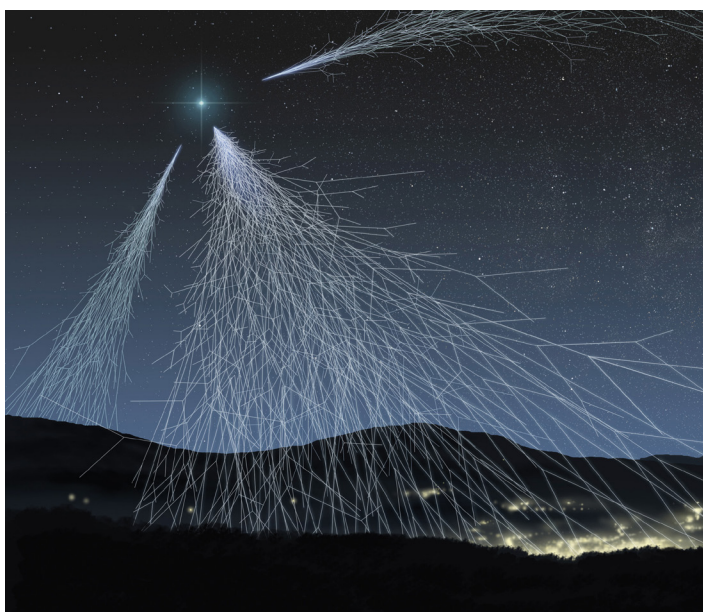
Le flux de rayons cosmiques «primaires» de très haute énergie est constitué :

- de protons (entre 85 et 90 %),
- de noyaux d'hélium (de 9 à 14 %),
- de noyaux atomiques plus lourds,
- de quantités infimes d'antimatière (et positrons),
- de rayons gamma et de neutrinos.

Pénétrant dans l'atmosphère, ces rayons cosmiques interagissent avec les noyaux atomiques de l'air (azote, oxygène, ...) en produisant en cascade d'autres particules (pions, kaons, muons, électrons, neutrinos, ...) constituant le rayonnement cosmique «secondaire».

Les rayons cosmiques de basse énergie viennent du Soleil et ceux d'énergie intermédiaire viennent d'autres sources plus éloignées, telles que les supernovae et les pulsars.

Enfin, une expérience récente (Auger, installée en Argentine) a montré que les rayons cosmiques les plus énergétiques proviennent des noyaux galactiques où se trouvent notamment des trous noirs, stade ultime de l'évolution des supernovae super-massives : c'est là que se produisent les événements les plus violents de notre Univers.

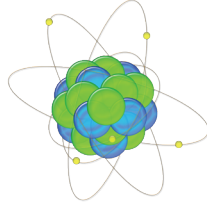


Au LSM, l'épaisse couche de roche (1700 m ou 4800 m équivalent eau) est une protection presque totale contre la composante chargée des rayons cosmiques qui bombardent la Terre. Ils passent de 8 000 000 par m<sup>2</sup> et par jour à la surface du sol à 4 par m<sup>2</sup> et par jour dans le laboratoire. La recherche de phénomènes rares devient alors possible.

# La Radioactivité

La matière est faite d'atomes, eux-mêmes composés :

- d'un noyau atomique (protons et neutrons)
- d'électrons orbitant autour du noyau.



## Des particules venant des noyaux ?

Certains noyaux sont stables. D'autres au contraire sont instables car ils ont un surplus d'énergie à évacuer. Ils émettent alors des rayonnements, c'est la radioactivité.

- Rayonnement  $\alpha$  : Le noyau recherche la stabilité en émettant un noyau d'hélium (2 protons et 2 neutrons) ou particule alpha.

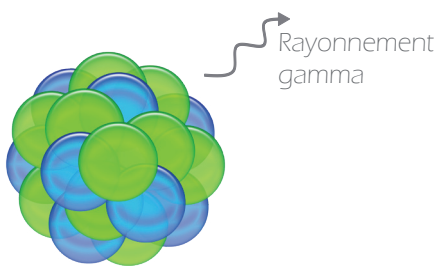
La particule alpha est arrêtée par une simple feuille de papier.

- Rayonnement  $\beta$  : Le noyau émet un électron et un antineutrino.

L'électron, ou particule bêta ( $\beta$ ), est arrêté par quelques millimètres d'aluminium

- Rayonnement  $\gamma$  : Le rayonnement gamma ( $\gamma$ ) est une onde électromagnétique comme la lumière visible ou les rayons X mais plus énergétique.

Il faut plusieurs centimètres de plomb ou de béton pour atténuer le rayonnement gamma.



## Activité

L'activité d'un corps radioactif est le nombre de désintégrations de ses atomes en une seconde. Elle se mesure en becquerels (Bq).

Quelques exemples :

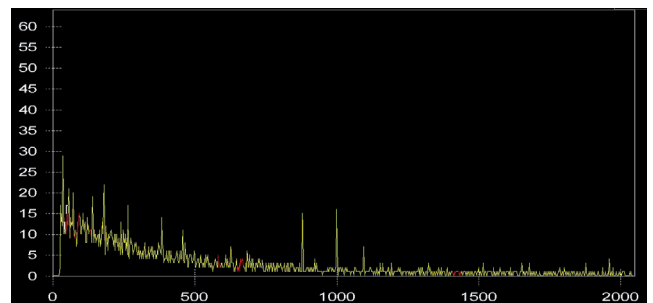
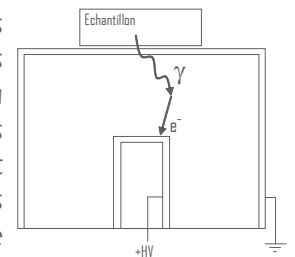
1 litre d'eau de mer : 15 Bq

1 adulte de 70 kg : ~7000 Bq

1 gramme de radium : 37 milliards de Bq

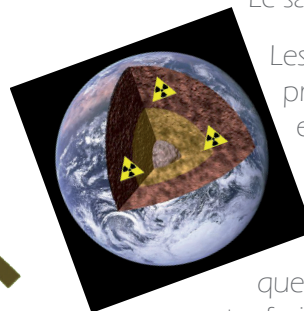
## Le détecteur Germanium

L'énergie du ou des rayonnement(s) gamma émis est caractéristique du noyau émetteur. Les détecteurs Germanium permettent de mesurer avec une très grande précision l'énergie des rayonnements gamma



Les différents pics du spectre permettent d'identifier les noyaux radioactifs présents dans l'échantillon mesuré.

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.

# Mesures de très faible radioactivité

Au Laboratoire Souterrain de Modane, des détecteurs ont été mis au point pour mesurer des niveaux très faibles de radioactivité. Un parc unique au monde de 14 détecteurs ultra bas bruit de fond est installé. Ils sont utilisés pour la sélection de matériaux ultra-purs, pour des mesures environnementales, pour des expertises et des datations.

Quelques exemples :

## Mesure des sédiments de lac

LSM (CNRS-CEA), LSCE (CNRS-CEA), EDYTEM (Université de Savoie-CNRS), CARRTEL (INRA-Université de Savoie)



L'identification des éléments radioactifs dans les carottes sédimentaires permet de lire les 150 dernières années de l'histoire des lacs.

(Séismes, pollution, changements climatiques, activités humaines)

## Datation des vins : valider l'authenticité d'un millésime

CENBG (Université Bordeaux 1 - CNRS), LSM



Les essais nucléaires atmosphériques et l'accident de Tchernobyl ont produit du Césium 137. Le vin garde en mémoire ces événements, ainsi, en mesurant l'activité infinitésimale de  $^{137}\text{Cs}$  contenu dans chaque bouteille, le millésime d'un vin peut être vérifié.

## Mesure de radioactivité dans l'environnement

IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire)



La radioactivité dans l'environnement est surveillée au travers de mesures d'échantillons prélevés dans les sédiments, les rivières, les lacs, les nuages, ...

# Le Laboratoire Souterrain de Modane

## Mesures d'ultra faible radioactivité en souterrain

30 ans d'expertise reconnue en ultra faible radioactivité.



Plus de 1500 échantillons mesurés par an.

17 détecteurs Germanium hyper-pur,  
1 spectromètre alpha, 4 détecteurs radon,  
un laboratoire de radiochimie,

Une équipe chercheurs et de techniciens pour répondre aux besoins et développer des méthodes, des détecteurs et des logiciels dédiés.

Membre du Réseau Becquerel (CNRS/IN2P3) : répondre aux préoccupations sociétales légitimes sur l'impact de la radioactivité naturelle et artificielle sur l'homme et l'environnement.

## Services, études de faisabilité, méthodologie, conseil, modélisation

Système de management de la qualité conforme à la norme NF EN ISO 17025  
Agrément de l'Autorité de Sûreté Nucléaire.



- Protocoles de mesure améliorés : temps de mesure réduit, sensibilité augmentée.
- Traçabilité produit, contrôle de matériaux non destructif, caractérisation de matériaux.
- Contrôle de l'environnement : datation de carottes de sédiments, taux de sédimentation, carottes de glace, mesures anti-fraude, mesures de retombées de Fukushima.



## Nos partenaires

La plupart des opérations conduites par le laboratoire sont couvertes par un engagement de confidentialité. Parmi les partenaires industriels, on peut citer notamment STMicroelectronics, IROC Technologies, Canberra Eurysis, Air Liquide.

Mise en relation avec des experts du CNRS, du CEA et des Universités (Nationales et Internationales).

Participation aux rendez-vous CARNOT.

Echanges avec le réseau entrepreneurial de Rhône-Alpes : Maurienne Expansion, CRITT Savoie, ARDI Rhône-Alpes.

# Sedine

## Compteur Proportionnel Sphérique

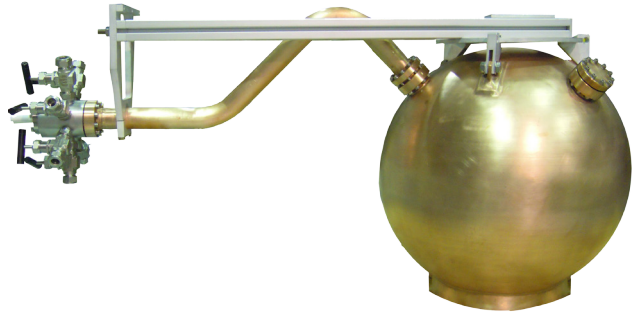
### Détecteur sphérique gazeux

SEDINE, un détecteur bas bruit de fond, destiné à la recherche de matière noire légère (light WIMP), a été fabriqué et installé au Laboratoire Souterrain de Modane. Il est actuellement opérationnel et vise à mesurer les événements rares à bas seuil en énergie  $\approx 40$  eV.

Principales caractéristiques : un seuil très bas en énergie indépendamment du volume (faible capacité électronique), une bonne résolution en énergie, une grande robustesse et une seule voie de lecture.

Un détecteur innovant : géométrie sphérique, simplicité de conception, performance, une seule voie de détection.

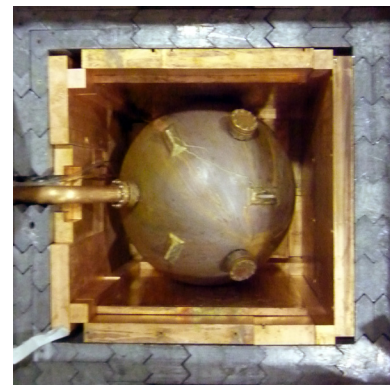
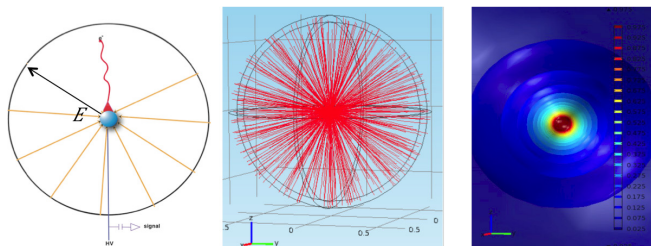
Détection des particules : le détecteur est rempli d'un gaz rare. Une haute tension appliquée à l'électrode centrale crée un champ électrique radial dans le volume sphérique. Lorsqu'une particule entre dans la sphère, elle ionise le gaz créant ainsi des électrons qui vont dériver vers le centre. Proche de l'électrode centrale, les électrons sont multipliés par effet d'avalanche et induisent un signal électrique.



### Un nouveau concept, une nouvelle voie dans la détection des particules

Ce nouveau concept, inventé à l'IRFU (CEA), est une nouvelle voie dans la détection des particules et pourrait avoir différentes applications. On peut en citer quelques-unes dans le domaine de la recherche pour la physique : mesure du spectre des neutrons de basse énergie, recherche de la matière noire, mesure de la diffusion cohérente des neutrinos de réacteur nucléaire.

Dans le cadre du labex Enigmass, un développement est en cours, en partenariat avec le CEA, le CPPM et Carmelec\*, dans le domaine industriel, la métrologie nucléaire, la sûreté nucléaire, mesure du taux de radon ...



SEDINE dans son blindage plomb et cuivre



\* Carmelec, concepteur de solutions de mesures non destructives dans le domaine du nucléaire





# Nemo 3

## Neutrino Ettore Majorana Observatory

### La nature et la masse du neutrino

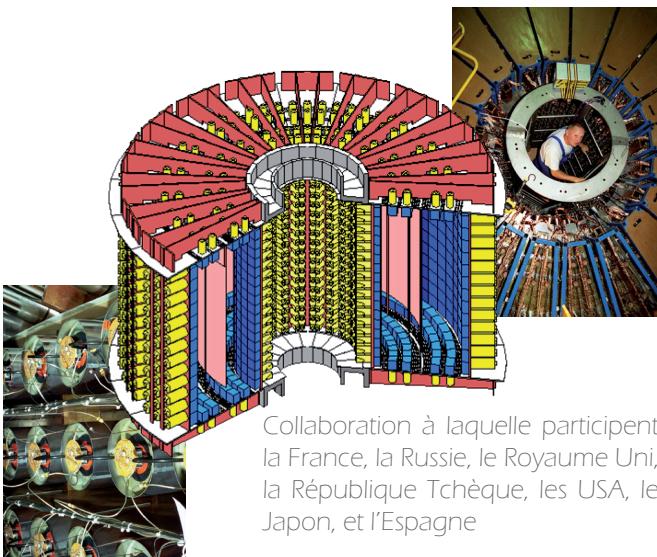


Le neutrino est la particule élémentaire de matière la plus abondante dans l'Univers et la plus mystérieuse.

Cette particule neutre électriquement n'interagit quasiment pas avec la matière, elle est donc très difficile à étudier.

### Le neutrino est partout :

Des centaines de milliards de neutrinos nous traversent chaque seconde, venant principalement du soleil mais aussi de la Terre, des centrales nucléaires, ... De temps en temps, on reçoit des bouffées de neutrinos produits par des cataclysmes cosmiques lointains et extrêmement violents tels que les supernovae, les quasars, les blazars, ...



Collaboration à laquelle participent la France, la Russie, le Royaume Uni, la République Tchèque, les USA, le Japon, et l'Espagne

Physicien italien de premier plan, **Ettore Majorana** a disparu mystérieusement à l'âge de 31 ans. Il nous a laissé une théorie toujours d'actualité : certaines particules, les neutrinos, pourraient être leurs propres anti-particules.

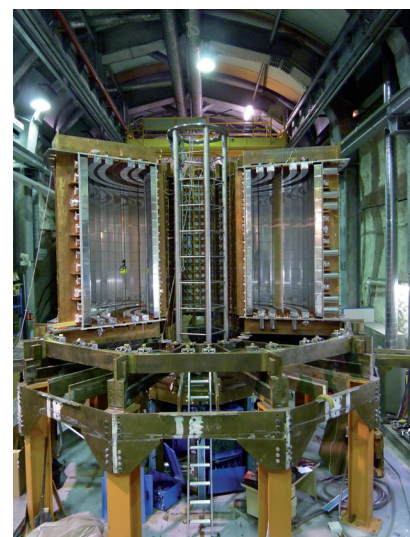
Le neutrino joue un rôle prépondérant en cosmologie et astrophysique.

Le neutrino pourrait être sa propre anti-particule (neutrino de Majorana), cette propriété pourrait expliquer comment la matière qui compose notre Univers a été créée.

La masse du neutrino a directement influé sur la répartition de la matière dans l'Univers. Il a été prouvé que le neutrino avait une masse mais sans que l'on puisse la mesurer exactement.

Le but de l'expérience NEMO3 est de mesurer la masse du neutrino et de déterminer si le neutrino est sa propre anti-particule en recherchant une radioactivité hypothétique : la double désintégration bêta sans émission de neutrino. Cette radioactivité consisterait en l'émission de 2 électrons dont la somme des énergies serait égale à 3.012 MeV.

Le principe de l'expérience est d'utiliser une source de 7 kg de  $^{100}\text{Mo}$  placée entre 2 volumes gazeux comprenant des chambres à fils de type Charpak pour identifier les électrons. L'ensemble est entouré d'un dispositif permettant de mesurer l'énergie de chacun des électrons.



# Edelweiss

à la recherche de la matière noire

## Expérience pour Détecter Les WIMPs En Site Souterrain

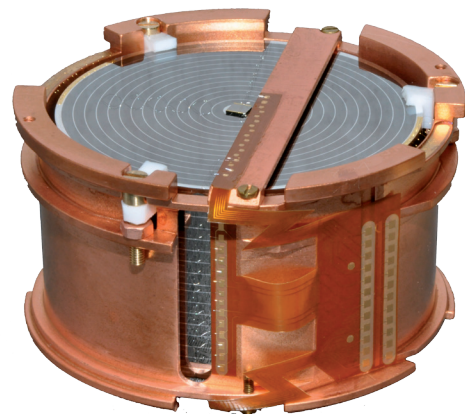
Par une nuit claire tout le monde peut observer les étoiles de notre galaxie, la Voie Lactée. Avec des télescopes, les astronomes observent des étoiles invisibles à l'œil nu, d'autres galaxies et beaucoup d'autres objets célestes.

Pourtant, tout ce que l'on voit ne représente que 5% de ce que contient l'Univers.



La matière manquante, invisible, "noire" fait l'objet de nombreuses investigations de par le monde. L'expérience EDELWEISS, cherche un type de particule (les WIMPs) constituant de la matière noire.

Ces WIMPs, particules élémentaires très massives, pourraient former comme des nuages de gaz autour de chaque galaxie.



EDELWEISS utilise des détecteurs germanium fonctionnant à une température très proche du zéro absolu ( $-273,15^{\circ}\text{C}$ ) appelés bolomètres. Les détecteurs germanium ultra sensibles et ultra purs mesurent en même temps la chaleur (un millionième de  $^{\circ}\text{C}$ ) et les électrons produits par le recul d'un atome de germanium suite à la collision avec un WIMP.

Tous les matériaux constituant le détecteur ont été rigoureusement sélectionnés pour leur très faible radioactivité.

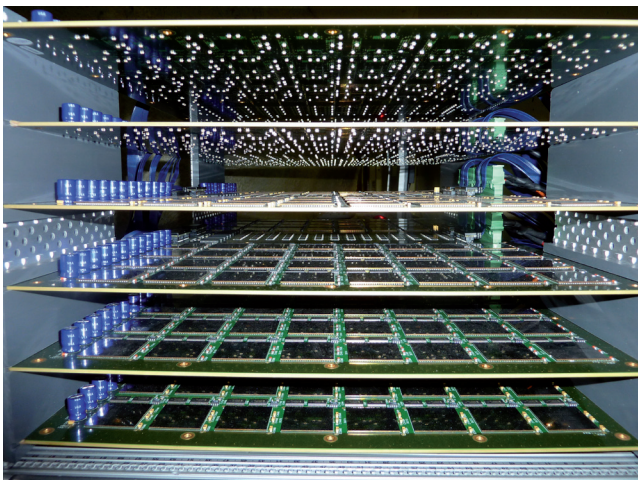
Avec 30 kg de bolomètres germanium refroidis à  $-273,13^{\circ}\text{C}$ , EDELWEISS est actuellement une des expériences les plus sensibles au monde pour la recherche de la matière noire.



# Aléas logiques

## Les puces électroniques sont-elles sensibles au rayonnement cosmique ?

La largeur des pistes des circuits électroniques gravés dans le silicium est passée de 130 nm (soit 0,00013 mm) à 65 nm et bientôt 45 nm, 32 nm, 22 nm,....



Les charges électriques qui portent l'information peuvent être perturbées par :

- les neutrons créés par les rayonnements cosmiques,
- les particules alpha issues de la désintégration radioactive d'impuretés du composant.

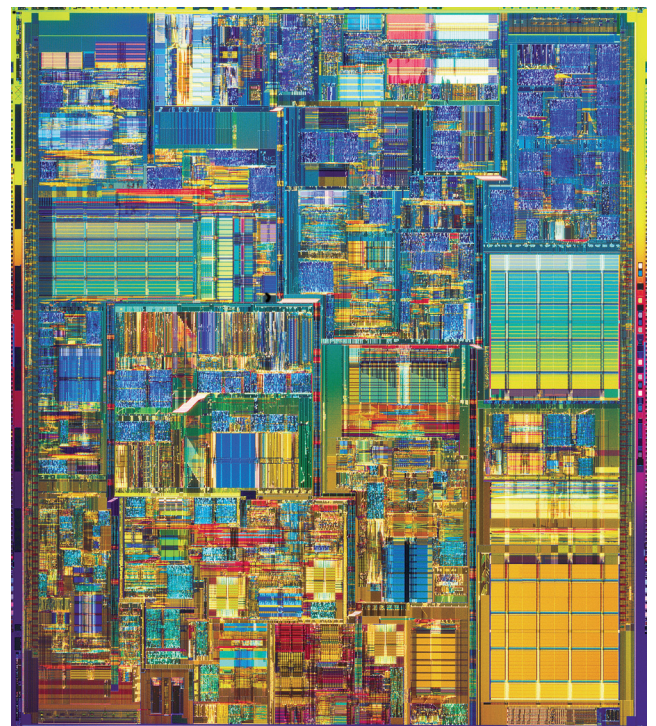
La connaissance de la sensibilité des puces aux radiations est indispensable pour développer une nanoélectronique plus résistante.

Il s'agit de mettre en évidence l'importance de la radioactivité interne des composants puisque l'autre source de perturbation, les neutrons des rayons cosmiques, sont pratiquement inexistantes au LSM.

Des tests de longue durée (2 ou 3 ans) sont réalisés sur plus de 1500 composants.

La méthode consiste à écrire initialement des séquences de 0 et de 1, correspondant à l'absence ou la présence d'une charge électrique dans un point mémoire, puis à vérifier si les particules alpha modifient l'information binaire contenue dans l'ensemble des circuits mémoire.

La vérification est continue, l'ensemble des circuits est scruté plusieurs fois par heure.

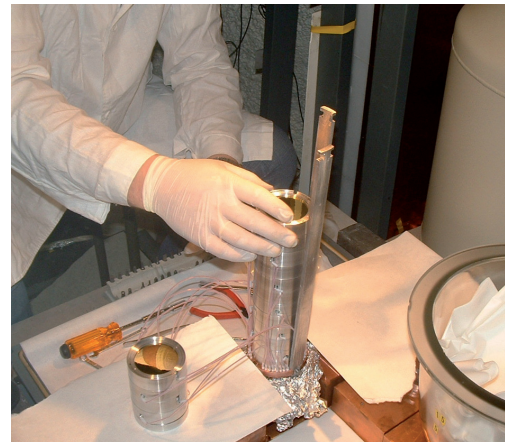
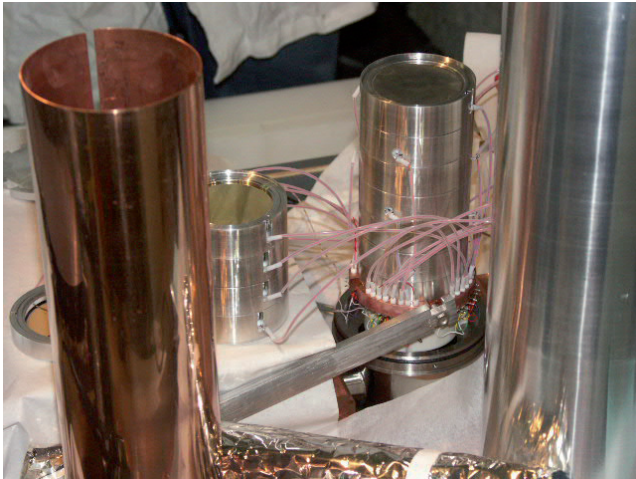


IM2NP Marseille - STI Electronics

# Telescope Germanium Vertical

## TGV

L'expérience franco-russe TGV (Telescope Germanium Vertical) recherche une nouvelle radioactivité : la capture simultanée de 2 électrons du cortège électronique par le noyau atomique.



Le principe est de placer une très fine source (en l'occurrence du cadmium 106) entre de fines plaques de cristaux de germanium refroidis à la température de l'azote liquide.

CSNSM Orsay - JINR Dubna - CTU Prague

# Super Heavy Elements In Nature

## SHIN

Dans la nature certains noyaux plus lourds que l'uranium (98 protons) auraient pu être synthétisés.

L'expérience SHIN (Super Heavy element in Nature, Éléments Superlourds dans la Nature) recherche des éléments potentiels superlourds (108 ou 114 protons). Ces éléments auraient la même nature chimique que l'osmium ou le xénon placés au milieu de détecteurs de neutrons.

Si ces éléments se désintègrent, il y aurait alors émission simultanée de plusieurs neutrons.



CSNSM Orsay - JINR Dubna

# Plomb archéologique

du fond de la mer au coeur de la montagne

## Un blindage de plomb

Qu'il s'agisse de bancs de mesure équipés avec un cristal de germanium ou d'une expérience de détection de la matière noire dans la galaxie, le blindage proche du détecteur est l'élément ultime qui permet de se protéger du fond radioactif. Comme un nombre atomique élevé et une activité intrinsèque très faible constituent les critères de sélection pour ce blindage, le plomb, et tout particulièrement le plomb ancien, est très adapté.

Le minerai de plomb (Pb) contient un peu d'uranium (période de 4,5 milliards d'années) dont la désintégration conduit au Pb 210 radioactif. En effet, lorsque le plomb est extrait des mines il est contaminé par les éléments radioactifs naturels tels que l'uranium et le thorium qui en se désintégrant vont donner entre autre du plomb 210 dont la période est de 22 ans. Lors de la purification du plomb par écrémages successifs, l'uranium est séparé du plomb et ne le contamine plus. L'avantage du plomb dit «archéologique» est d'avoir été extrait des mines il y a plusieurs siècles, donc le plomb 210 a eu le temps de disparaître.

C'est pourquoi des archéologues se trouvent à leur tour entraînés dans la recherche interdisciplinaire de plomb non radioactif !

La quête fut fructueuse : un navire, en provenance de Grande Bretagne est venu faire naufrage, vers 400 après JC, sur le site des Sept Iles (Ploumanach, Côtes d'Armor). La coque a entièrement disparu, laissant apparaître une cargaison de plomb antique (270 lingots, 22 tonnes).



En septembre 1992, la Direction du Patrimoine du Ministère de la Culture autorise le responsable des fouilles à mettre à la disposition des physiciens les lingots présentant le plus faible intérêt archéologique. Après purification et moulage de blindages adaptés, les résultats des mesures effectuées au LSM sur ce plomb indiquent un niveau très faible de radioactivité. On constate une diminution d'un facteur 2 du taux de comptage et aucune radioactivité résiduelle n'a pu être décelée.

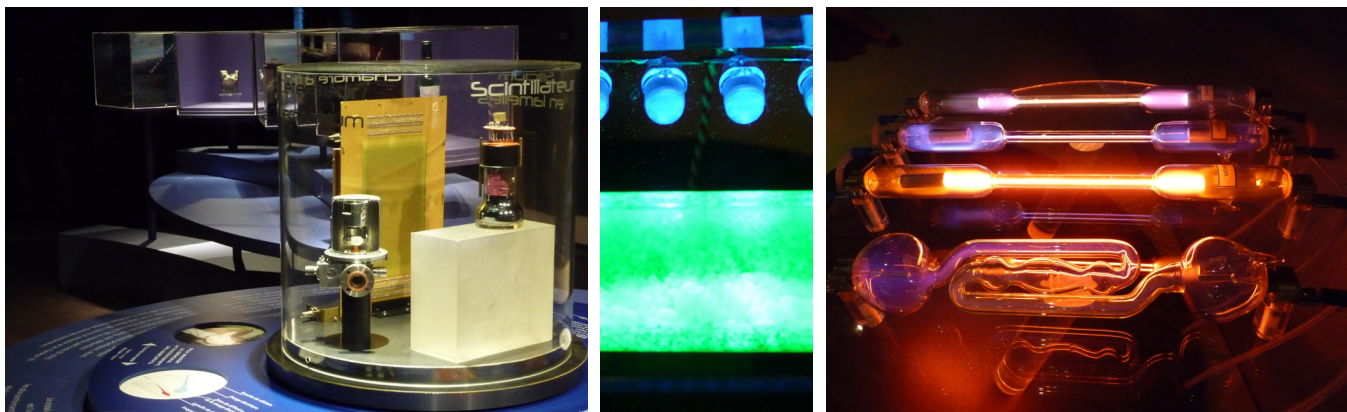
Compte tenu de ces résultats, des écrans rapprochés en plomb archéologique sont installés sur la plupart des dispositifs expérimentaux du LSM (Spectromètres germanium, scintillateurs, bolomètres,...)

DRASSM : Département de la recherche archéologique subaquatique et sous-marine

# 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

Entrée gratuite

Ouvert au public du lundi au vendredi de 14h à 17h

Groupes sur réservation (10 personnes & +)

A partir de 10 ans

Accès PMR



[www.lsm.fr](http://www.lsm.fr)  
[contact@lsm.fr](mailto:contact@lsm.fr)

Laboratoire Souterrain de Modane  
Carré Sciences  
1125 route de Bardonnèche  
73500 MODANE

04 79 05 22 57

