

40 ans de physique au LSM

- Les atouts uniques LSM pour la capture des phénomènes physiques les plus rares
- Les réalisations de ces 40 dernières années

*Jules Gascon
Directeur Scientifique du LSM*



Où sommes-nous?

- Modane (145 km de Grenoble)
- Site expérimental à mi-chemin dans le tunnel routier du Fréjus (12 km), entre la France et l'Italie
- Site en surface (construit en 2009): bureaux, garage, musée...




Qui sommes nous?

- Plateforme nationale de l'Institut National de la Physique Nucléaire et de la Physique des Particules (IN2P3) du CNRS
- Depuis 2019, rattachée au Laboratoire de Physique Subatomique et Cosmologie (LSPC, unité mixte CNRS + Université Grenoble-Alpes)
- Direction scientifique
 - Nomination par IN2P3
 - Comité Stratégique composé d'experts internationaux
- Direction opérationnelle
 - Direction opérationnelle pleinement intégré au LPSC
 - Equipe technique resserrée (~8 personnes) entièrement spécialisée pour le support à des expériences dans les conditions exceptionnelles du LSM (isolement, sécurité associée au travail en tunnel, basse radioactivité), avec le support technique et administratif du LPSC.

Infrastructure de recherche nationale depuis 2022


**MINISTÈRE
DE L'ENSEIGNEMENT
SUPÉRIEUR,
DE LA RECHERCHE
ET DE L'INNOVATION**
*Liberté
Égalité
Fraternité*






LSM

Laboratoire Souterrain de Modane

Le LSM (Laboratoire Souterrain de Modane) est une plateforme nationale de recherche du CNRS-IN2P3 dédiée aux projets de recherche fondamentale et aux développements instrumentaux requérant un environnement radioactif exceptionnellement bas. Installé au milieu du tunnel autoroutier du Fréjus, avec une couverture de roche de 1 700 m, le laboratoire dispose d'une cavité de 3 500 m³ à l'abri du rayonnement cosmique. Une surface d'environ 300 m² est dédiée aux installations expérimentales de collaborations scientifiques nationales et internationales à la recherche d'événements rares. Ce site, le plus profond en Europe à offrir la flexibilité d'un accès routier, accueille actuellement les expériences de recherche de matière noire EDELWEISS, DAMIC-M, NEWS-G et MIMAC, ainsi que les recherches de la double désintégration radioactive sans neutrino SuperNEMO, CUPID-Mo et TGV. Le LSM héberge également un plateau technique de spectrométrie Gamma, constitué de 18 détecteurs Germanium



haute pureté. Cette installation, qui permet la mesure précise de très faibles niveaux de radioactivité, est destinée à la sélection et à la validation des matériaux utilisés pour l'élaboration des ensembles de détecteurs des expériences de physique fondamentale mais est également largement ouverte à des équipes scientifiques impliquées sur des thématiques de géosciences et des sciences de l'environnement (radioprotection, datation..).

Relations avec les acteurs économiques et/ou impact socio-économique

Le plateau de spectrométrie gamma héberge des instruments de l'IRSN et du CEA dédiés à la sûreté nucléaire et offre des prestations de mesure d'ultra basses radioactivité aux industriels. Les possibilités offertes par l'infrastructure ont mené au dépôt d'un brevet avec l'Institut Pasteur et à la création d'une start-up, Proceltech, qui propose des solutions de protection des cellules souches aux rayonnements ionisants lors de leur stockage.

Science ouverte et données

- La totalité des publications issues de projets utilisant l'infrastructure sont en accès ouvert
- Production annuelle de données : 1 To

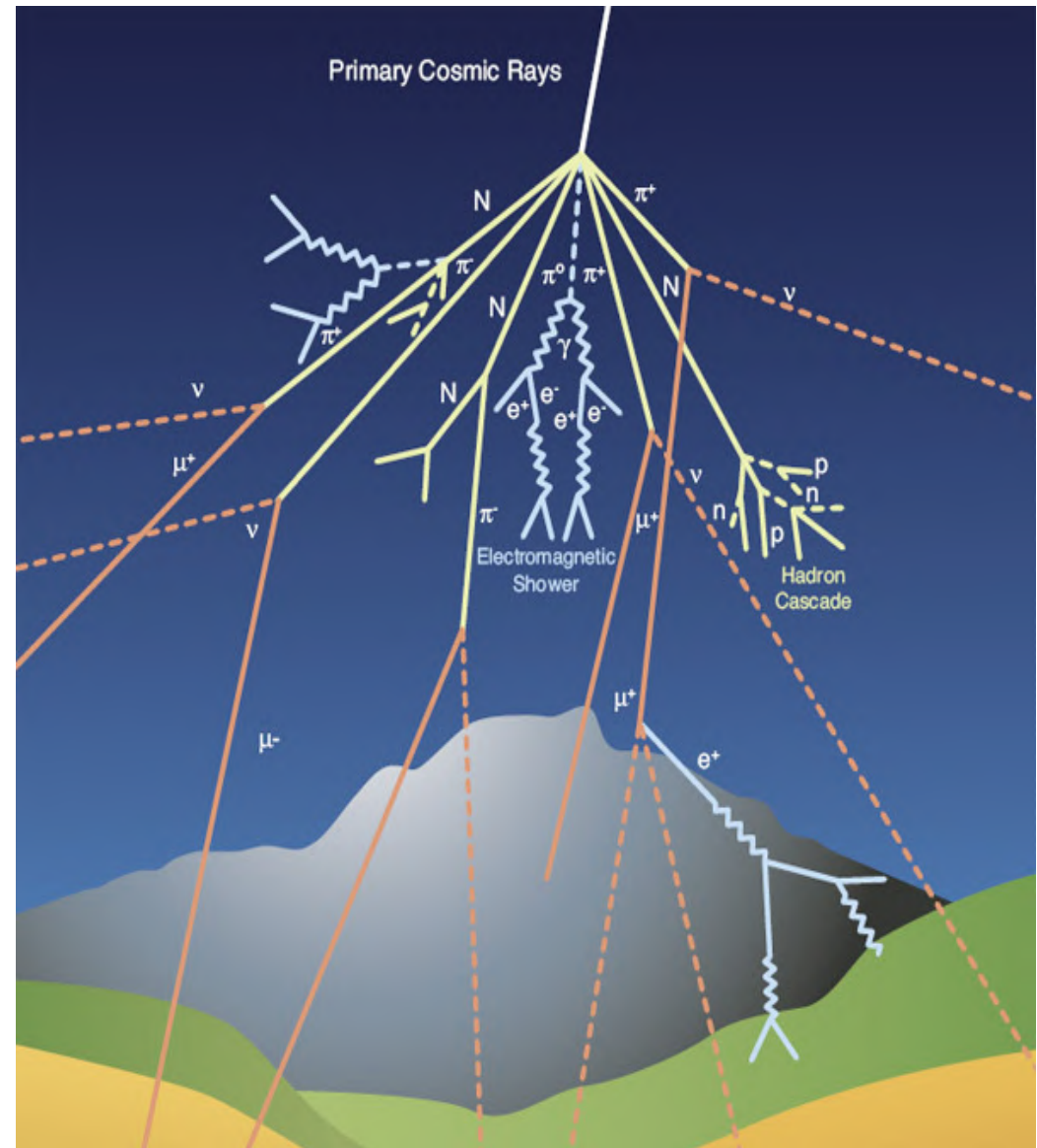
Catégorie : IR
Type d'infrastructure : monosite
Localisation du siège de l'infrastructure (en France) : Modane
Établissement(s) français porteur(s) : CNRS-IN2P3

Directeur de l'infrastructure ou représentant(s) en France : Jules Gascon
Année de création : 1980
Année d'exploitation : 1983
Tutelles/Partenaires : Université Grenoble Alpes
Contact en France : j.gascon@ipnl.in2p3.fr
Site web : <http://ipsc.in2p3.fr/index.php/fr/lang-fr-plateforme-nationale-lsm-lang-lang-en-lsm-national-facility-lang>

Stratégie nationale des infrastructures de recherche | 125

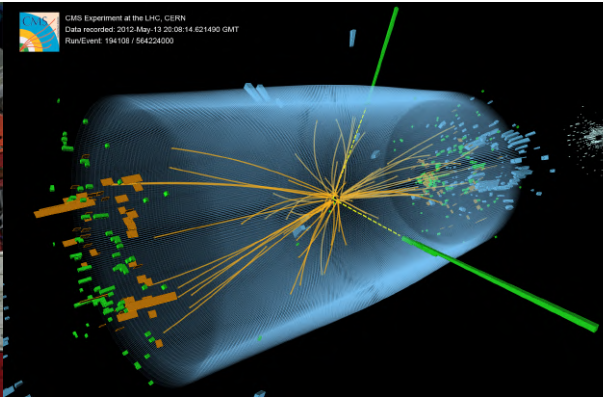
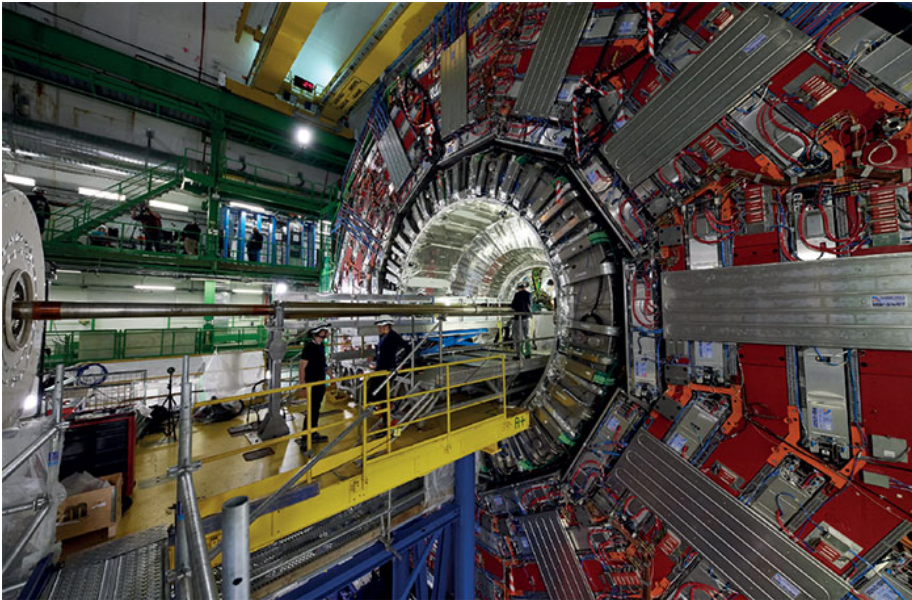
Pourquoi un laboratoire souterrain ?

- A chaque seconde, nous sommes traversés par des centaines de rayons cosmiques, détruisant des milliers d'atomes
- Impossible d'observer la matière en réel état de repos sans s'affranchir de ce problème
- *Au LSM, la couverture rocheuse de 1600 m réduit ce flux par un million*



Pourquoi un laboratoire souterrain profond ?

Troisième fenêtre sur la nature fondamentale de la matière



L'infiniment petit

Accélérateurs et collisionneurs

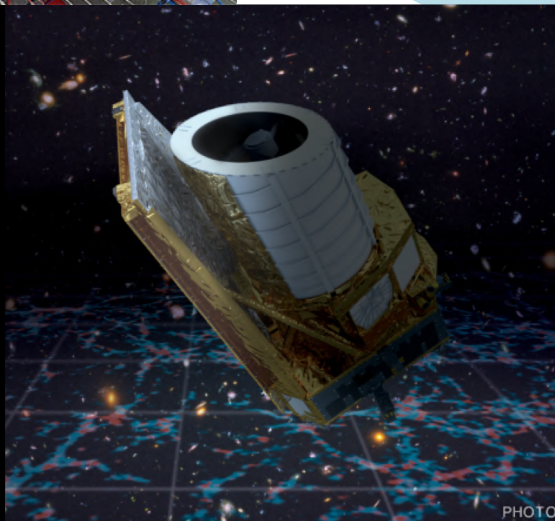
L'infiniment rare :

**Evènements rares
périodes de plus d'un milliard
de fois l'âge de l'Univers**

**Laboratoires
profonds**

Fond diffus cosmologique
Formation des galaxies,
étoiles, planètes...

Expansion de l'Univers
13,8 milliards d'années



L'infiniment grand

Satellites et grands observatoires

Les très basses radioactivités

- En absence de rayons cosmiques, seule reste la radioactivité naturelle

Mesurée en Becquerel (Bq) :

1 Bq = désintégration par seconde

- *La physique des événements rares demande des niveaux exceptionnels de basse-radioactivité*

- Sélection stricte de matériaux.
Exemple: plomb archéologique,

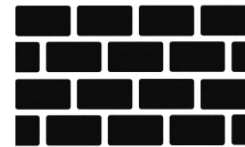
- Environnement également idéal pour autres applications requérant les plus faibles radioactivités possibles



Air (radon):
10 Bq/m³

Corps humain
(⁴⁰K, ¹⁴C, ...)
8000 Bq

Béton (40K, U/Th):
200-500 Bq/kg



Bois (¹⁴C):
120 Bq/kg

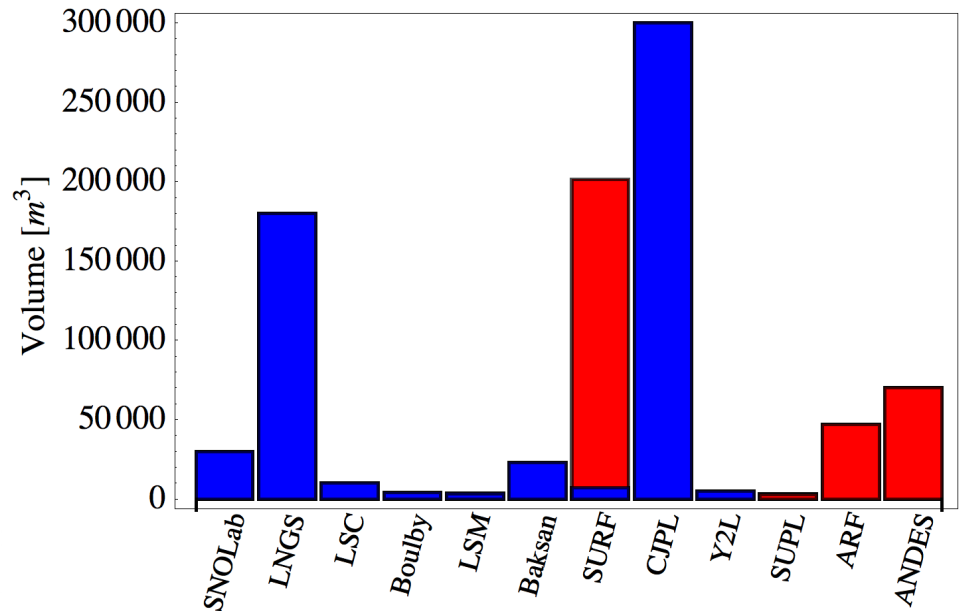
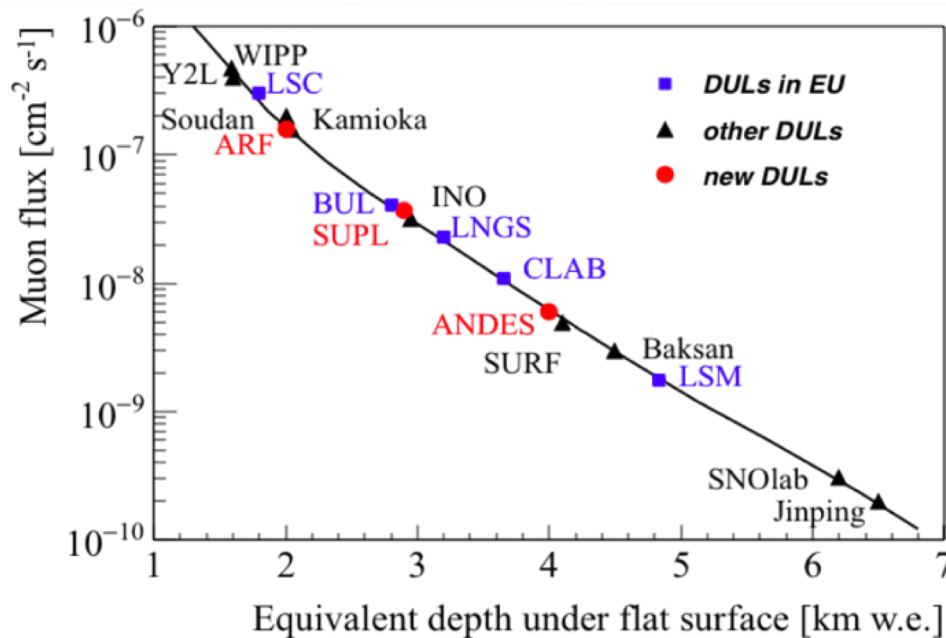


Plomb
gallo-romain :
< 0.01 Bq/kg

Epave de
Ploumanach,
IV^e siècle

La place du LSM dans le monde

- **Site dédié aux basse-radioactivités le plus profond en Europe**
- Accès routier (plus accessible que les sites dans des mines)
- Flux de rayon cosmiques plus de 5 fois inférieur à tout autre site européen
- Surface expérimentale : 400 m²
cf: Canfranc 600 m², Boulby 1700 m², SNOLAB 5350 m², Gran Sasso 180000 m²



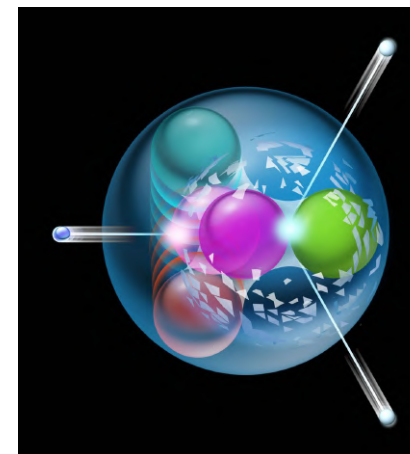
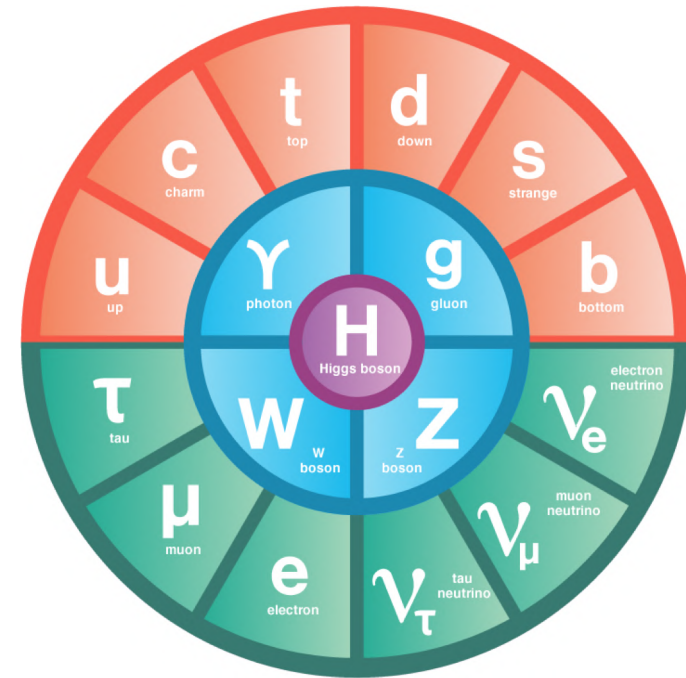
Le LSM dans le monde

- 358 expérimentateurs impliqués dans les expériences au LSM (2020)
- Plus de la moitié (192) de l'étranger



La première expérience : temps de vie du proton

- 1979: Prix Nobel pour l'unification de la force faible nucléaire avec la force électromagnétique.
- *Avancée majeure pour la compréhension des règles fondamentales régissant la matière*
- Unification avec la force forte?
... Plusieurs théories permettant cette « grande unification » ont comme conséquence de prédire que le proton peut se désintégrer en particules plus légères
- Pour un temps de vie du proton de 10^{32} ans, il y a une telle désintégration par an dans 900 tonnes de fer (10^{32} protons)



Proton \Rightarrow
1 positron +
2 photon

Energie produite
x100 réaction
nucléaire
classique

?

Creusement du tunnel : 1979-1982



- Création d'une Unité Mixte de Recherche entre le CNRS et le CEA
- Creusement de la cavité, lors de la construction du Tunnel du Fréjus

Creusement du tunnel : 1979-1982



- Revêtement de la cavité

Creusement du tunnel : 1979-1982



- Aménagement interne : plateforme à l'entrée, structure pour le pont roulant

Première expérience : DVP (1983-1989)

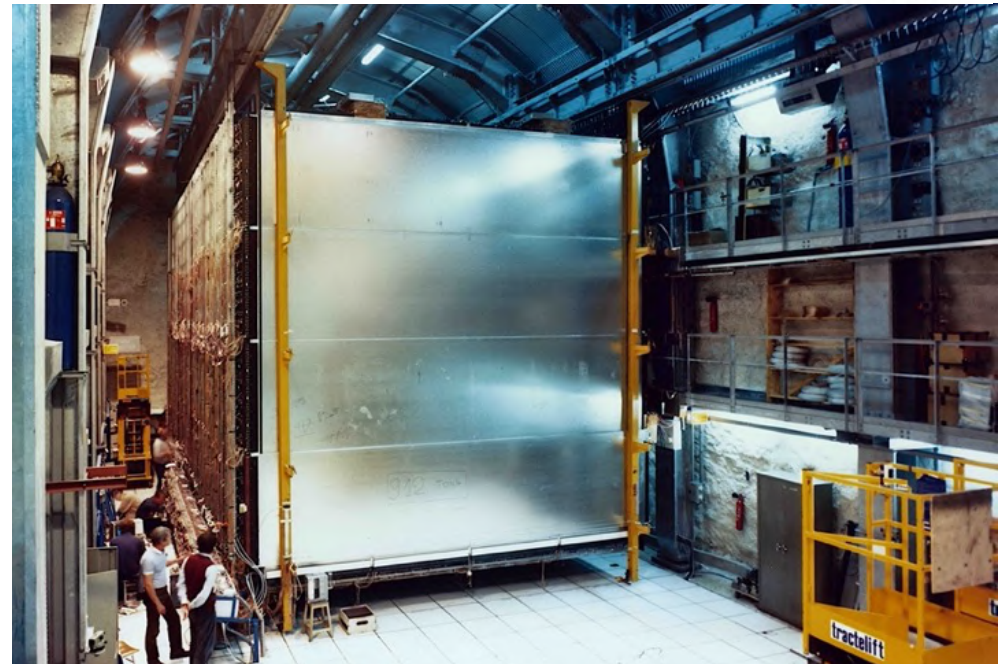
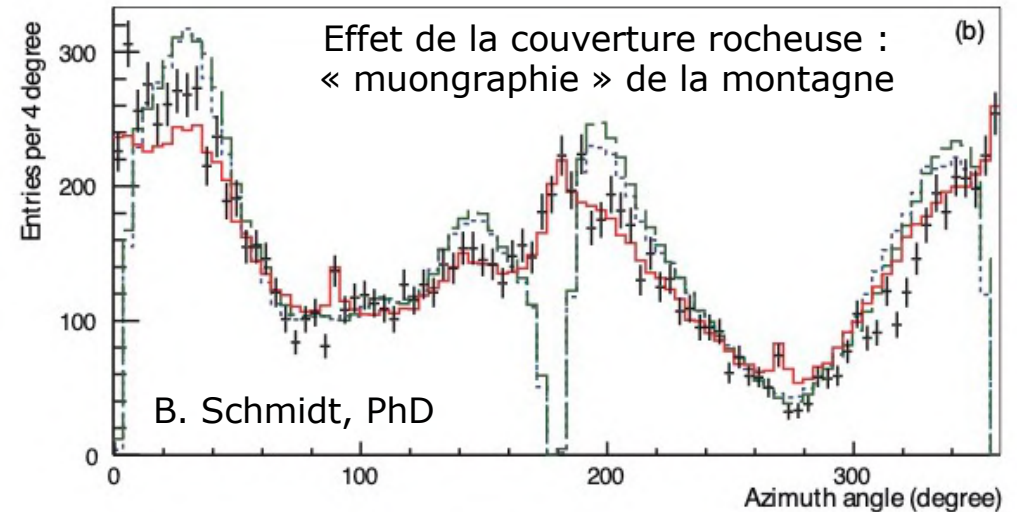
- Collaboration CNRS, CEA, Aachen et Wuppertal
- Un million de tube Geiger et de chambres à étincelles, scrutant de rares « flashes » individuels produits par une éventuelle désintégration du proton
- Les longues traces dues aux muons cosmiques sont facilement repérables



Assemblage du détecteur
Cible = 200, puis 900 tonnes de fer

Première expérience : DVP (1983-1989)

- Mesure précise du fond muon (5 muon/m²/jour): distribution en énergie et en angle
- *Exclusion d'un temps de vie du proton inférieur à 10³¹ années (un milliard de milliard de millier de fois l'âge de l'Univers)*
- Une des contraintes les plus fortes à l'époque, forçant les théoriciens à repenser leurs modèles de grande réunification et guidant toutes les recherches de nouvelle physique
- Depuis 1989, des contraintes de plus de 10³⁴ ans ont été obtenues sur des détecteurs plus grands



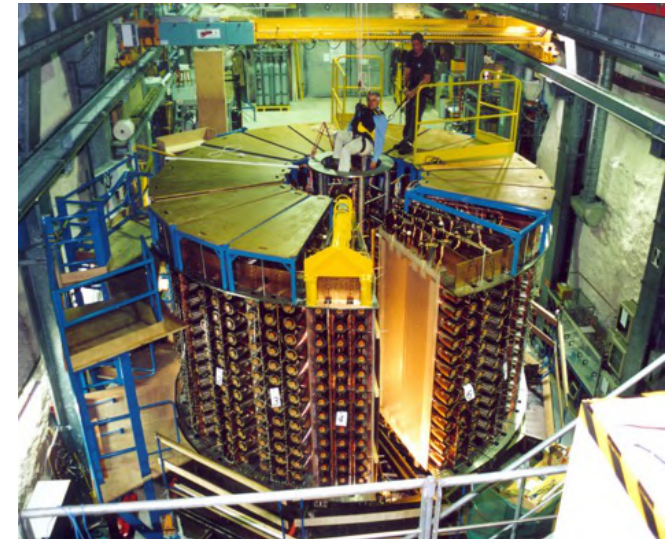
Diversification des expériences (1990-...)

- Installation d'un nombre croissant de détecteurs gamma Ge pour mesures d'échantillons à très basse radioactivité
- Installation dans le hall principal de prototypes, puis d'expériences, pour
 - la détection de la désintégration double bêta sans émission de neutrinos
 - la recherche de matière noire



Salle Ge, ca. 1990

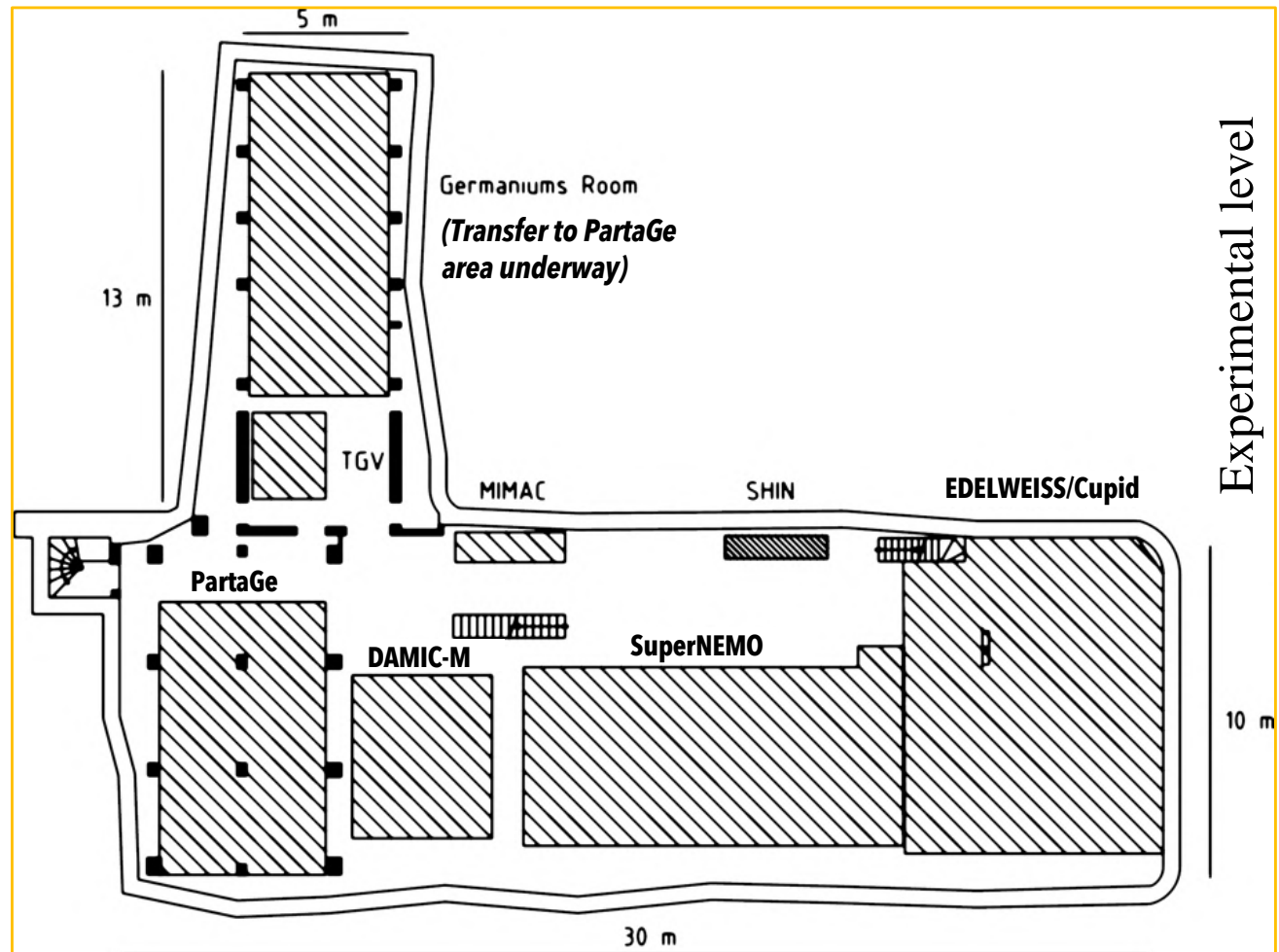
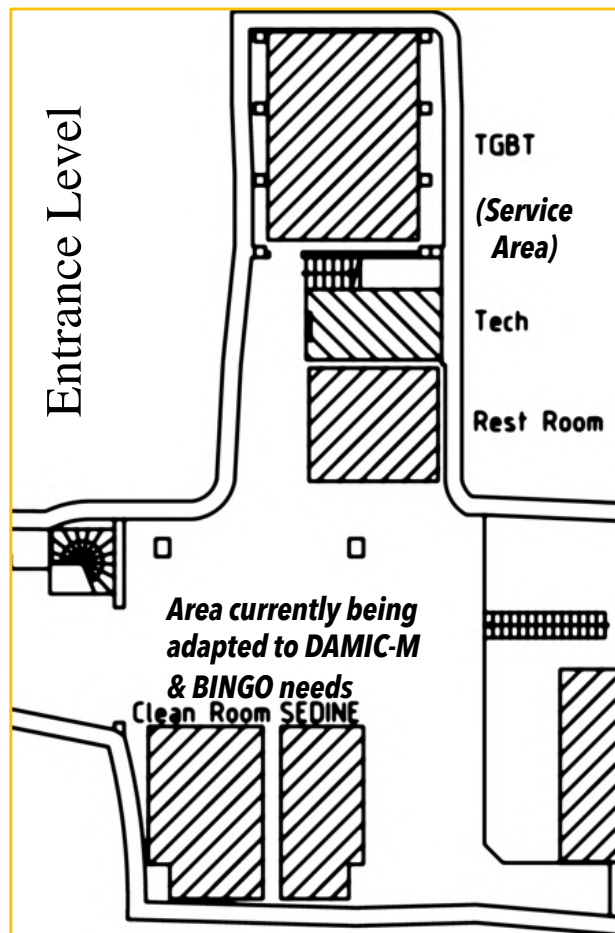
Hall principal, 1990



Hall principal, 2000

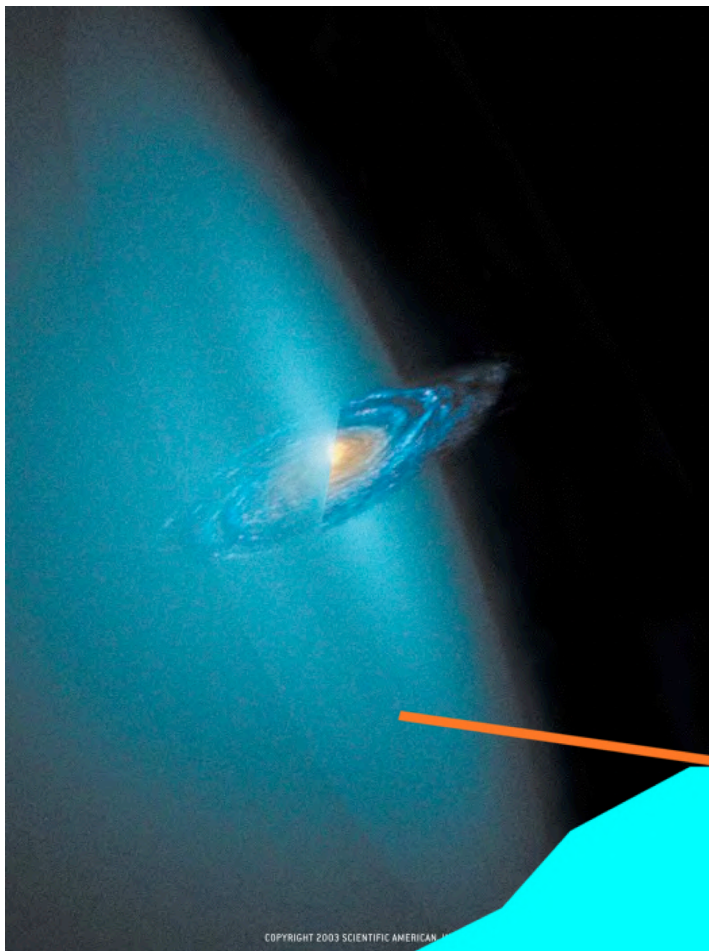
Surface expérimentale

- Surface disponible : 400 m²
- Projet de mezzanine de 180 m² au-dessus de l'aire expérimentale

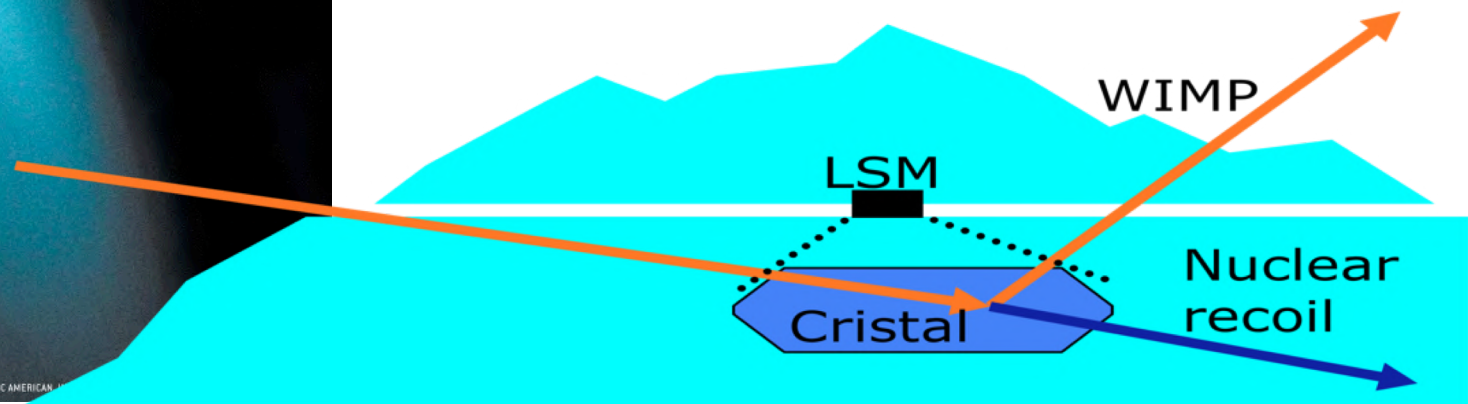


Recherche de la matière noire

- 1980-2010 : les observations à grande échelle montrent que près des 4/5 de la matière de notre Univers doit être sous une nouvelle forme inconnue, dite « matière noire ».



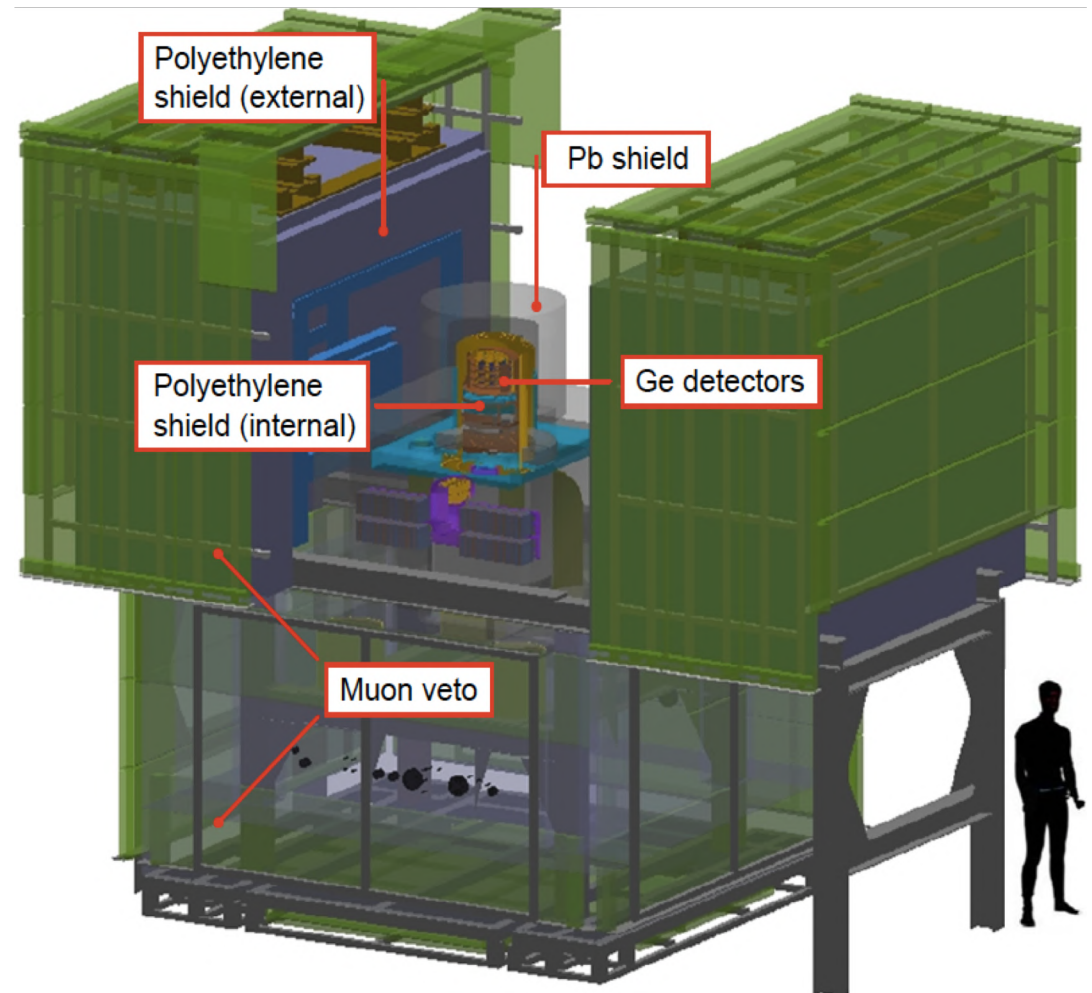
- Le choc d'une particule de matière noire sur un noyau en laboratoire produirait une énergie détectable par les méthodes les plus sensibles de la physique subatomique.
- Événement rare : pas plus qu'un choc par an par kg de cible



Réduction du fond radioactif

Exemple d'écrans contre la radioactivité naturelle: écrans de 40 t nécessaires à la protection des 20 kg de détecteurs EDELWEISS-III

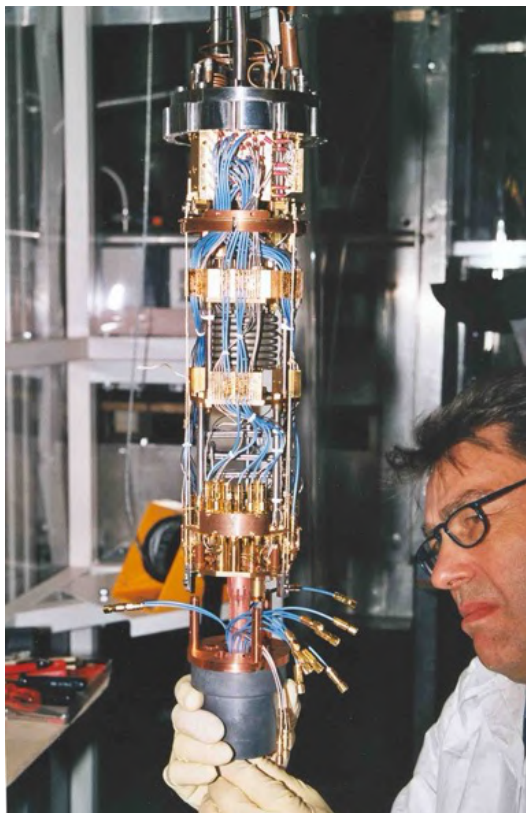
- Choix rigoureux et tests de tous les matériaux (sur banc Ge)
- Veto actif (plastique) >98%
- 60 cm de polyéthylène contre le fond neutron
- 15 cm de plomb (dont quelques cm de plomb gallo-romain) contre le fond gamma
- 10 cm de polyéthylène interne pour les neutrons créés dans le plomb par les centaines de cosmiques quotidiens
- Balayage avec air déradonisé ($15 \text{ Bq/m}^3 \rightarrow \sim 10 \mu\text{Bq/m}^3$)



EDELWEISS (1990-...)

- Cristaux germanium (de 33 à 870 g) refroidis à 20 milli-Kelvin
- Signaux = élévation de température (μK) et production de charge ($\sim\text{nanoVolt}$)

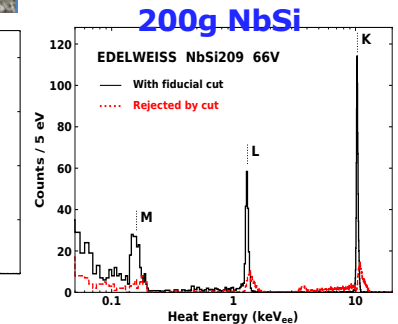
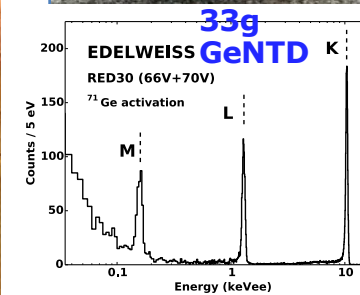
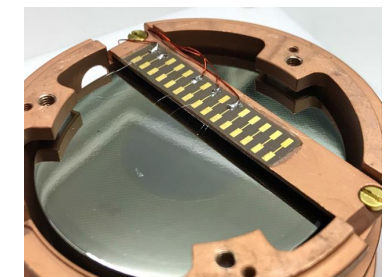
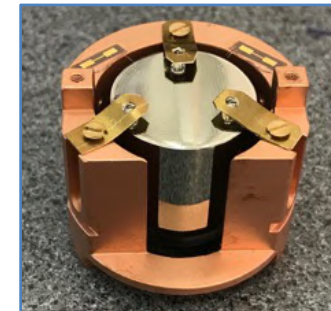
EDELWEISS-I 1998
3x300g
Meilleure limite 50 GeV (2001)



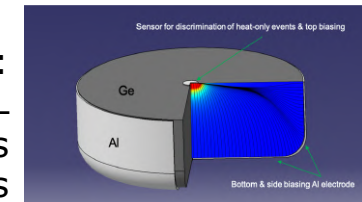
EDELWEISS-II-III 2005-2017
10x300g \rightarrow 24x870g
Meilleure limite 50 GeV (2009)
& axions au keV (2017)



EDELWEISS-SubGeV (2018-2023)
Réduction 870g \rightarrow 33 g, seuil keV \rightarrow eV
Meilleures limites Dark Photons 6 eV (2019)
& premières limites Ge $<$ 35 MeV/c²



A venir:
ANR CRYOSEL
40 g, tag des paires
électron-trou uniques



2015-... Matière noire légère avec des sphères

- NEWS-G (2015-2020): charge produite dans grand volume gazeux lue avec une seule anode.
- Sphère de cuivre de grande pureté radioactive
- Test d'une petite sphère (SEDINE, 2015)
- Sphère plus grande, d'abord testée au LSM en 2021, puis envoyée à SNOLAB, au Canada

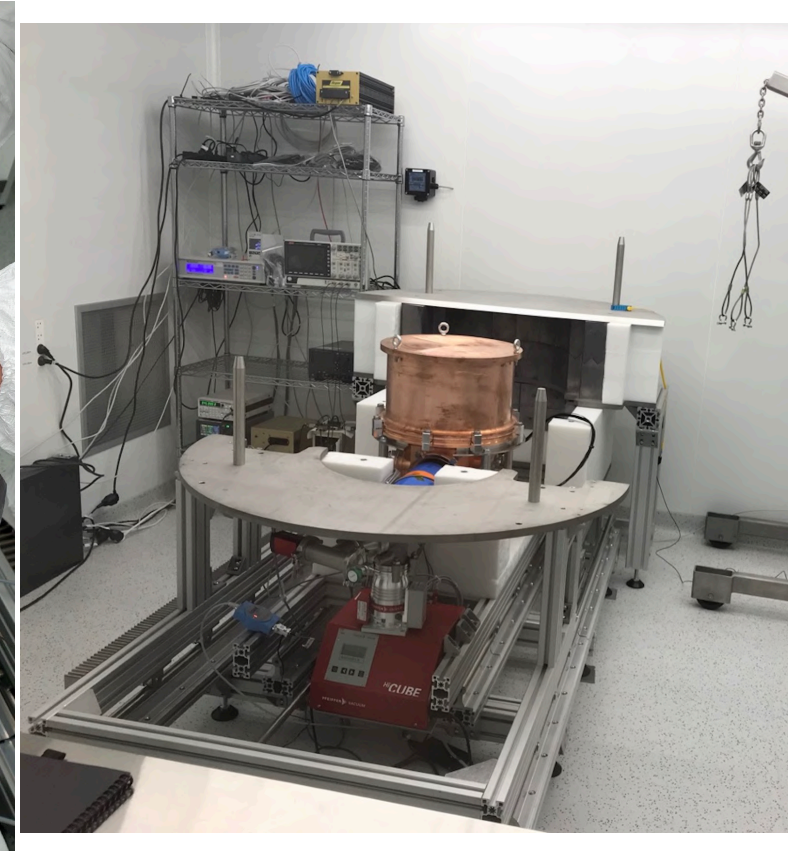
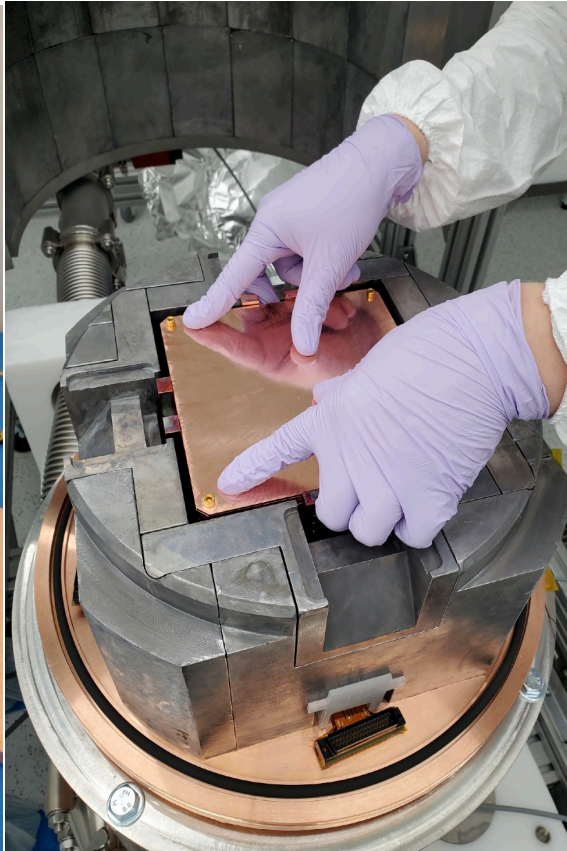
Sphère SNOglobe en assemblage au LSM (2019)



2018-... Matière noire légère avec des CCDs

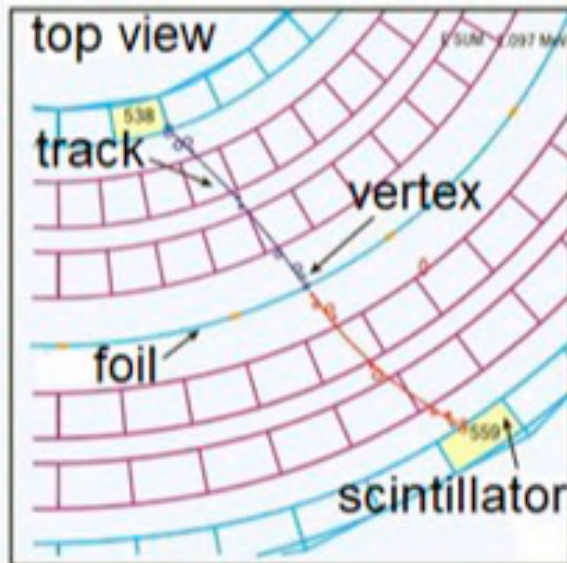
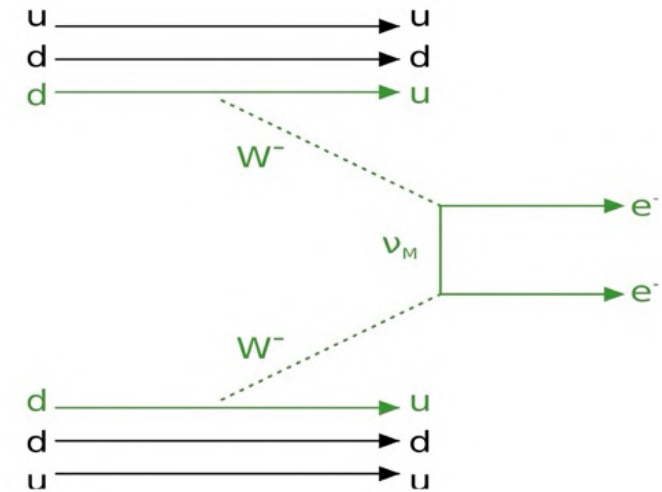
- DAMIC-M (ERC): détecteur CCD (*charge-coupled device*) en silicium
- Relecture multiple pour atteindre une résolution de moins de 0.1 paire électron-trou. Cible de 1 kg (50 CCDs) en préparation.
- LBC (2023) 2 CCDs : *Record de sensibilité mondial entre 1 MeV et 1 GeV*

Installation de deux CCDs dans la chambre basse-radioactivité LBC de DAMIC-M (2021)



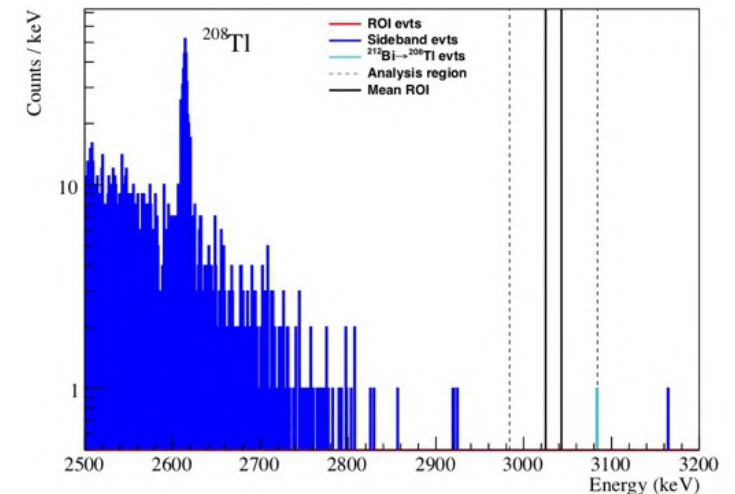
Recherche de la désintégration $\beta\beta 0\nu$

- Rare (période $> 10^{26}$ ans), pas encore observé
- Preuve intensément recherchée que le neutrino est sa propre anti-particule (Majorana).
- Rare méthode possible pour mesurer la masse (absolues) des neutrinos.
- Meilleures contraintes actuelles obtenues avec détecteurs \sim tonne, mais limité par le fond radioactif autour de 2-4 MeV
- Recherche d'une technologie repoussant cette contrainte!

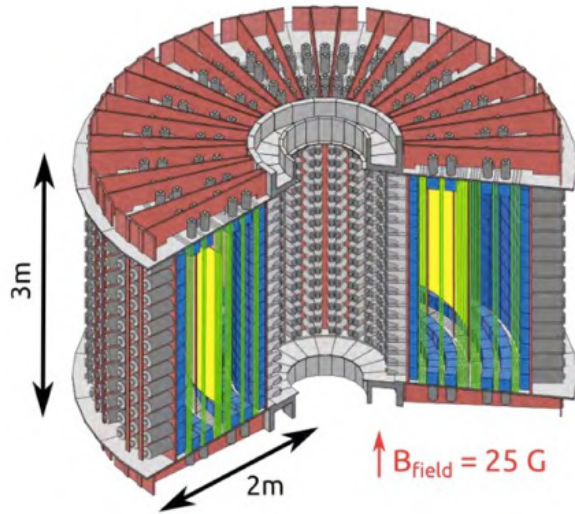


Tracko-calor (NEMO):
identification des traces des
deux électrons, sources en
forme de feuilles minces

Calorimétrie (CUPID-Mo) : la
source est le détecteur,
recherche d'un pic
monoénergétique

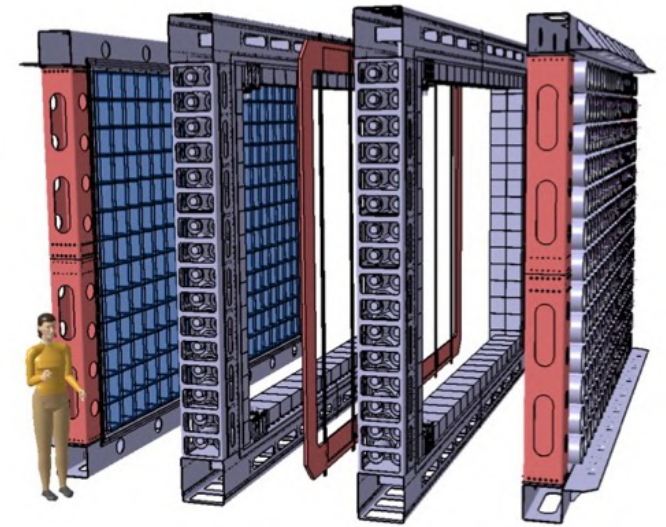


NEMO et SuperNEMO (2000-...)



NEMO-3 : 2000-2011

NEMO-1 : 1989



2015-... : Démonstrateur SuperNEMO



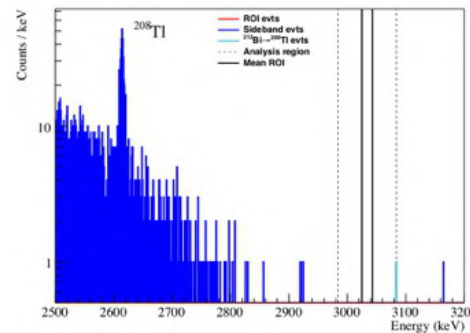
CUPID-Mo (2018-2020)

- 20 cristaux scintillants Li_2MoO_4
- 4 kg total
- Refroidis à 20 mK dans le réfrigérateur à dilution EDELWEISS (mise en froid commune des deux expériences) pendant 19 mois
- Exposition totale 1.47 kg.y
- Meilleure limite avec ^{100}Mo depuis NEMO-3

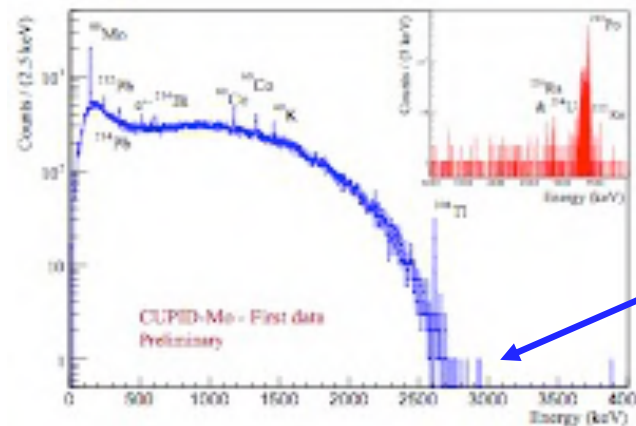
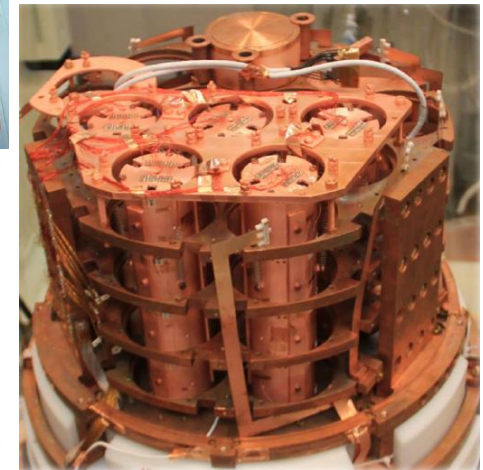
$$T_{1/2} > 1.8 \times 10^{24} \text{y}$$

$$\langle m\beta\beta \rangle < (0.28-0.49) \text{ eV}$$

- *Résultat clé pour le design de l'expérience de 200 kg CUPID au Gran Sasso, porte d'entrée pour la participation française*
- R&D pour prochaine génération : ERC BINGO (CEA-Irfu)



CUPID-Mo (devant)
EDELWEISS



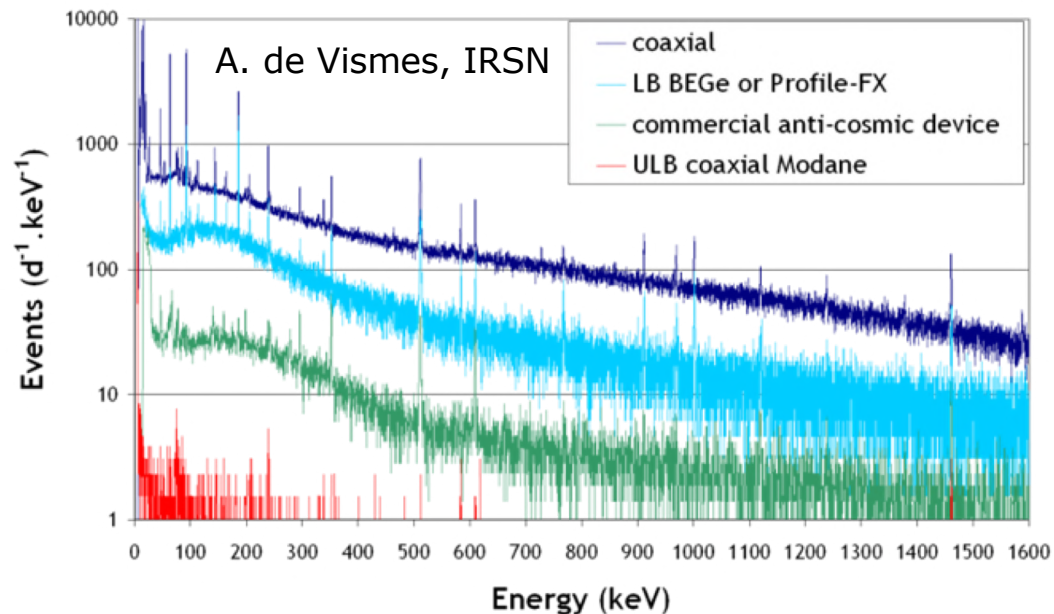
Fond rejeté par les détecteurs de lumière

Région d'intérêt : 3034 keV

Spectroscopie γ avec détecteurs germanium

- Essentiel pour choix de matériaux des grandes expériences (au LSM et ailleurs)!
- 16 détecteurs appartenant à : IRSN, CEA, CENBG, IP2I, LSCE (Université Paris-Saclay, CEA, CNRS), EDYTEM (CNRS, Université Savoie Mont-Blanc), JINR Dubna (Russie), UTEF Prague et SURO (Rép. Tchèque)
- PartaGe: Nouvelle géométrie plus compacte

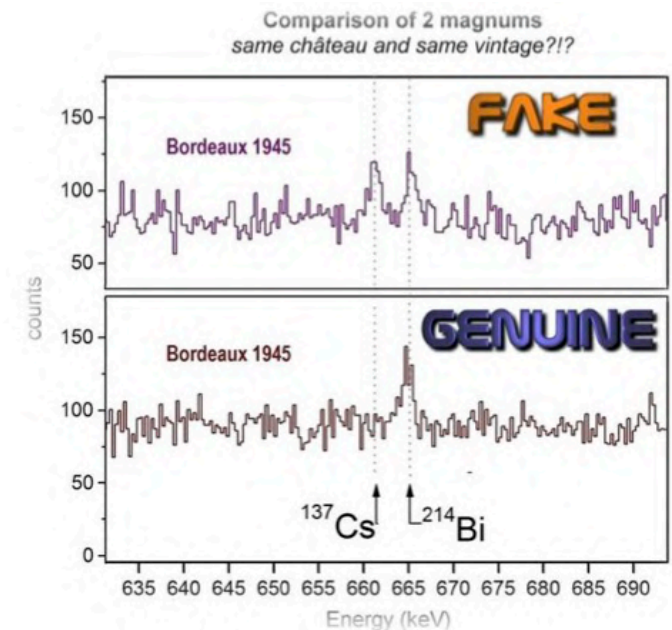
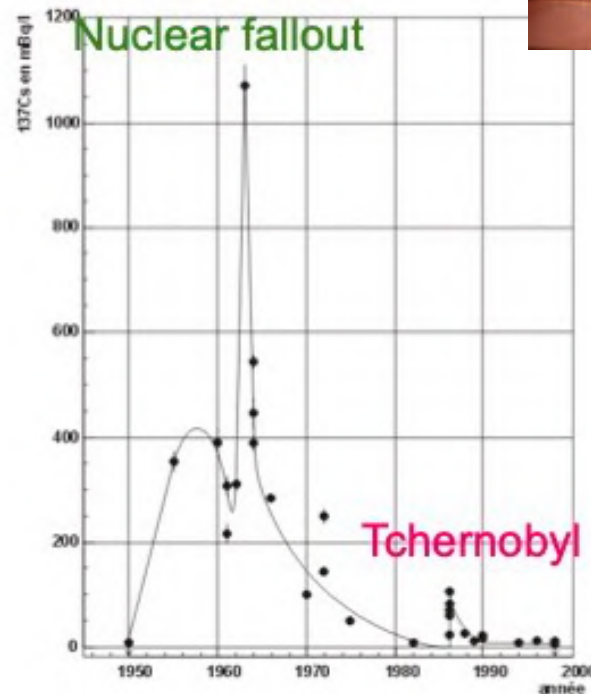
Gros détecteur Obélix (600 cc)



Début de l'installation de PartaGe

Exemple d'application : datation du vin

- Méthode développée par Ph. Hubert, CENBG Bordeaux
- Augmentation de la concentration de ^{137}Cs dans l'air suivant les tests nucléaires en surface des années 50 à 70



Basses radioactivités pour l'environnement

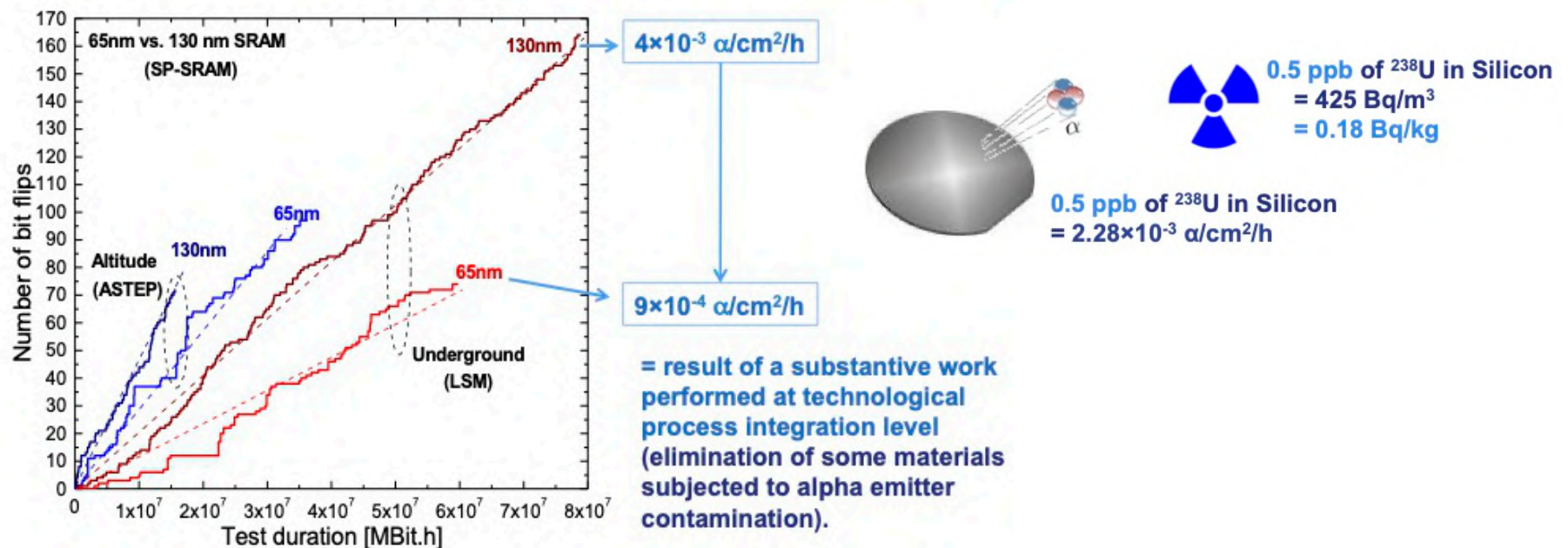
- Mesures germanium menées entre autres par le Laboratoire des Sciences du Climat et de l'environnement (Gif-sur-Yvette)
- Radionucléides : traceurs des érosions et des mouvements des sols
- Exemple: Analyses de sédiments suite à une tempête
- Exemple: étude de la concentration ^{137}Cs des poussières du Sahara tombées sur les massifs neigeux des Pyrénées : détection possible dans une fraction de gramme de poussière



Basses radioactivités: pluridisciplinaire

- Etude du IM2NP-CNRS: Taux d'erreurs dans les circuits électroniques dans différentes conditions de radioactivité
- Présence naturelle de ~ 0.5 ppb d'U/Th dans le Silicium : 2.28×10^{-3} alpha/cm²/h.
- LSM: suppression de la composante cosmique, pour mieux isoler cette composante interne.

Underground results for 130nm and 65nm SRAM technologies



Diversification des missions du LSM

- **Plate-forme de physique des particules fondamentale**
 - Accueil aux expériences fondamentales, avec en priorité celles où sont impliquées des équipes de l'IN2P3 (*matière noire, nature et masse du neutrino*)
 - Support technique aux expériences (expertise locale reconnue)
 - Physique et R&D détecteurs de future génération
 - Mise à jour des installations communes (ex: usine anti-radon (2019), projet de mezzanine)

- **Plate-forme de mesure bas-bruit radioactif**
 - Site exceptionnel pour les échantillons les moins radioactifs
 - Développements technologiques

- **Ouverture aux applications à d'autres disciplines**
 - Petites expériences pouvant prendre avantage d'un niveau de radiation exceptionnellement bas: biologie et sciences de l'environnement, électronique, ...

Le LSM est prêt pour la visite après le buffet

