

# I Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare



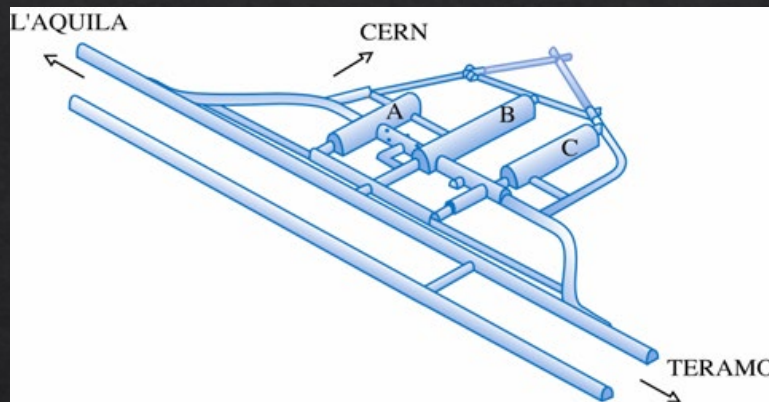
# Laboratori Nazionali Gran Sasso

1979 → proposta al Parlamento italiano del progetto di un grande laboratorio sotterraneo all'interno del tunnel autostradale del Gran Sasso (allora in costruzione).

1982 → approvazione da parte del Parlamento.

1987 → la costruzione è completata.

1989 → il 1° esperimento sotterraneo, MACRO, inizia la presa dati.

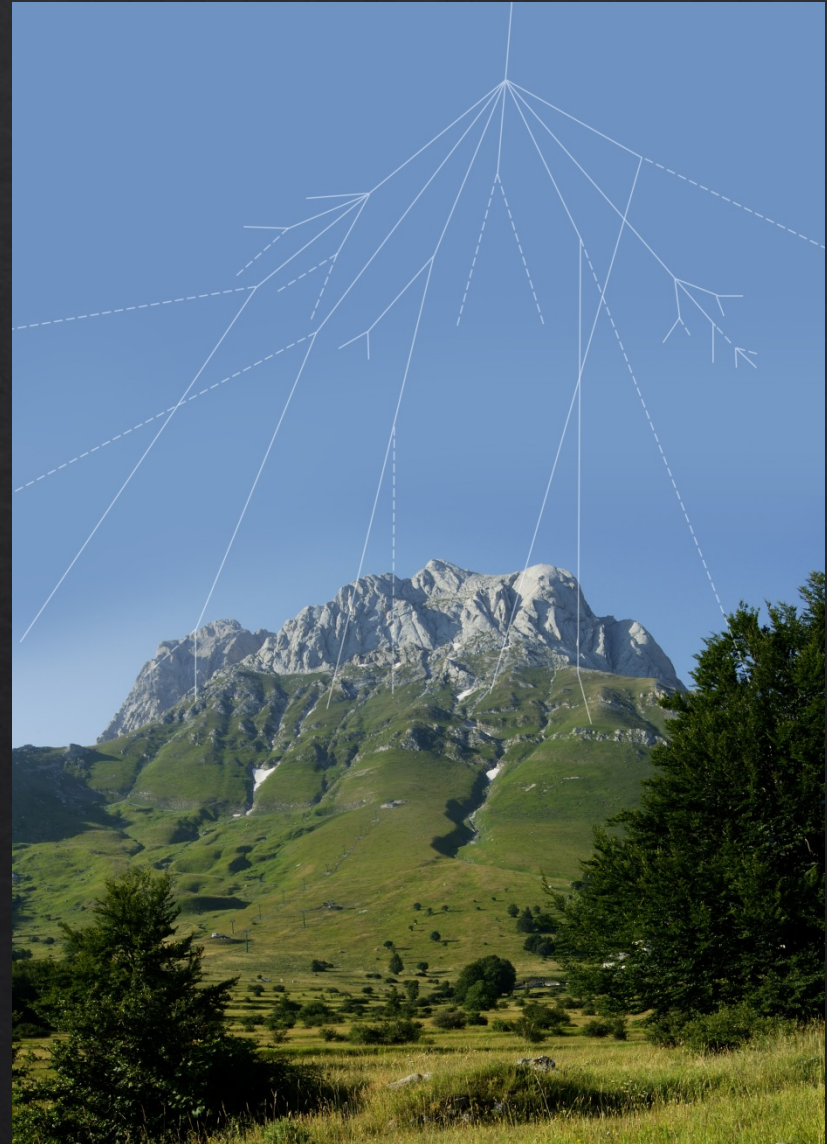


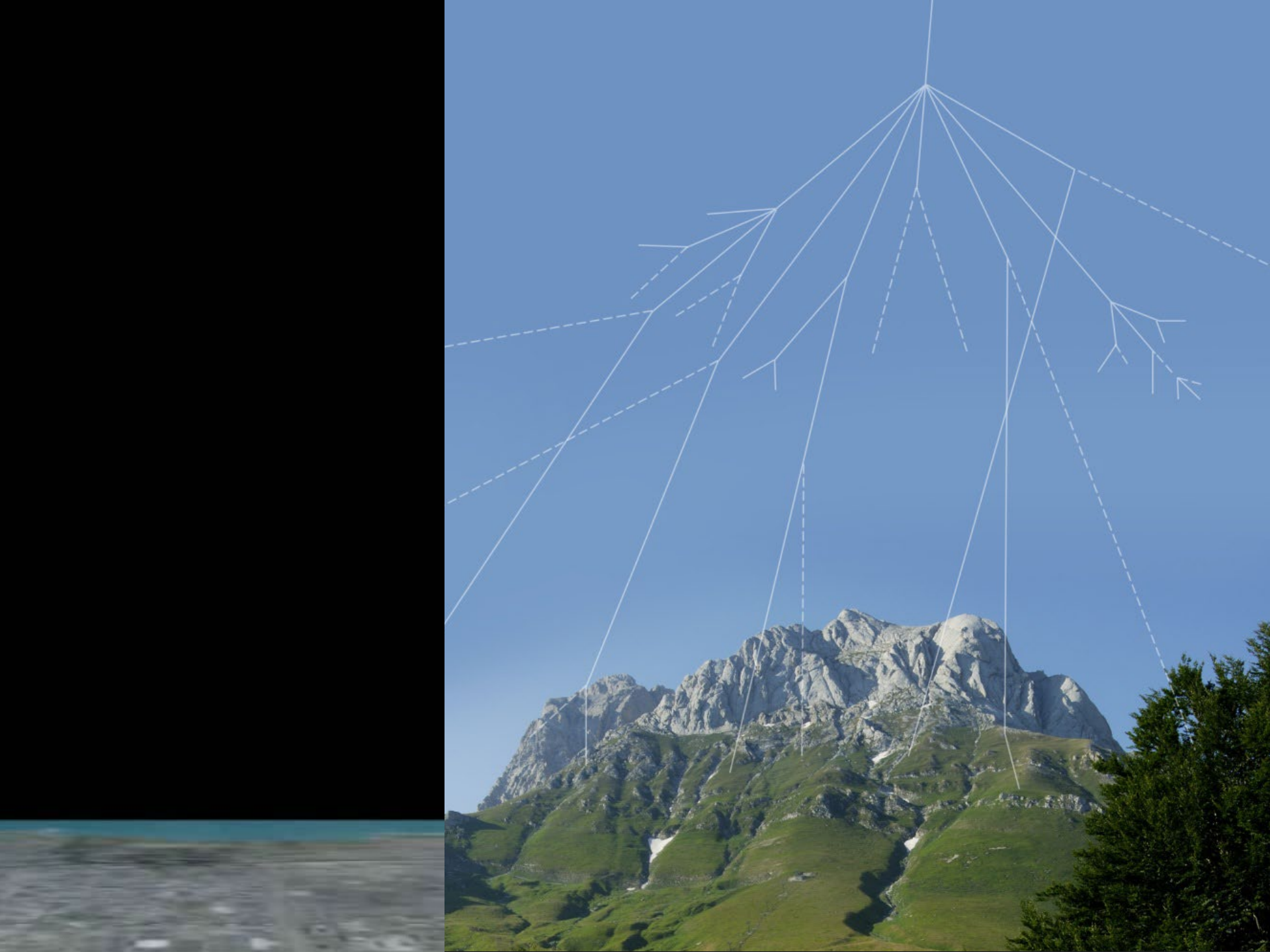
# Il più vasto ed avanzato laboratorio sotterraneo del pianeta: perché?

La Terra è soggetta a un flusso di "raggi cosmici" che interagendo con l'atmosfera causano una pioggia ("shower") di altre particelle.

Il flusso di particelle cariche misurato a terra è di circa 100-200 Hz/m<sup>2</sup> (in realtà dipende dalla quota).

Il flusso di raggi cosmici è un fondo  
ineliminabile per un esperimento in  
superficie in cerca di eventi rari.

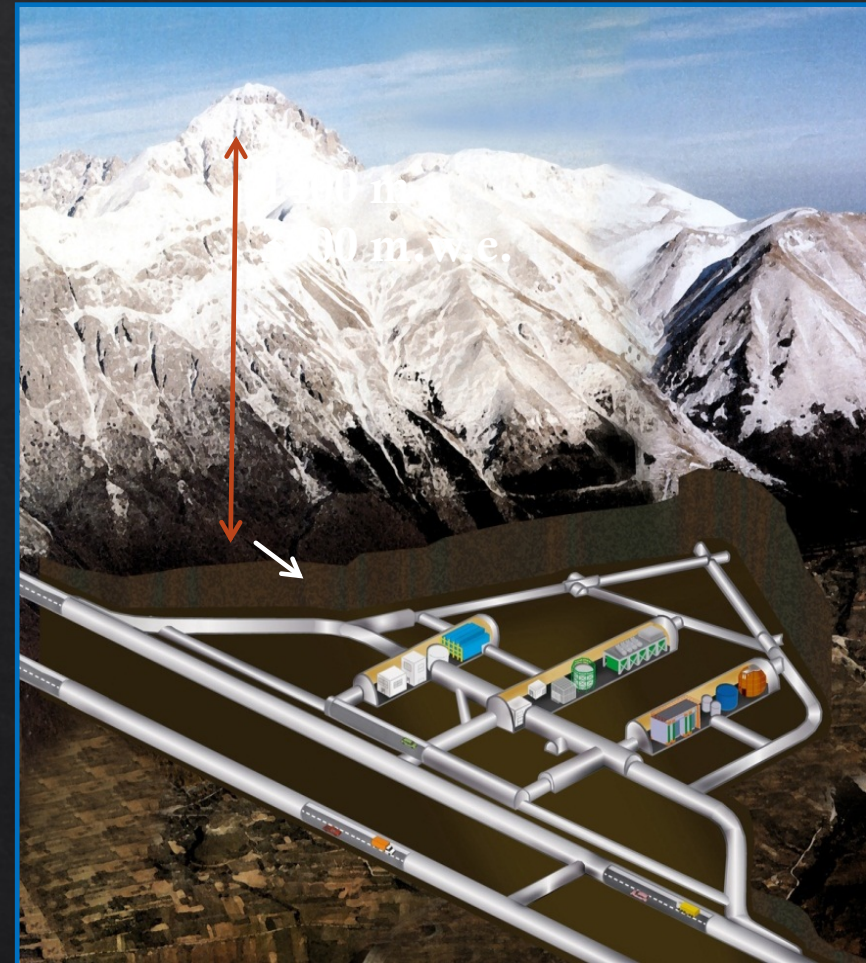




# Il più vasto ed avanzato laboratorio sotterraneo del pianeta: perché?

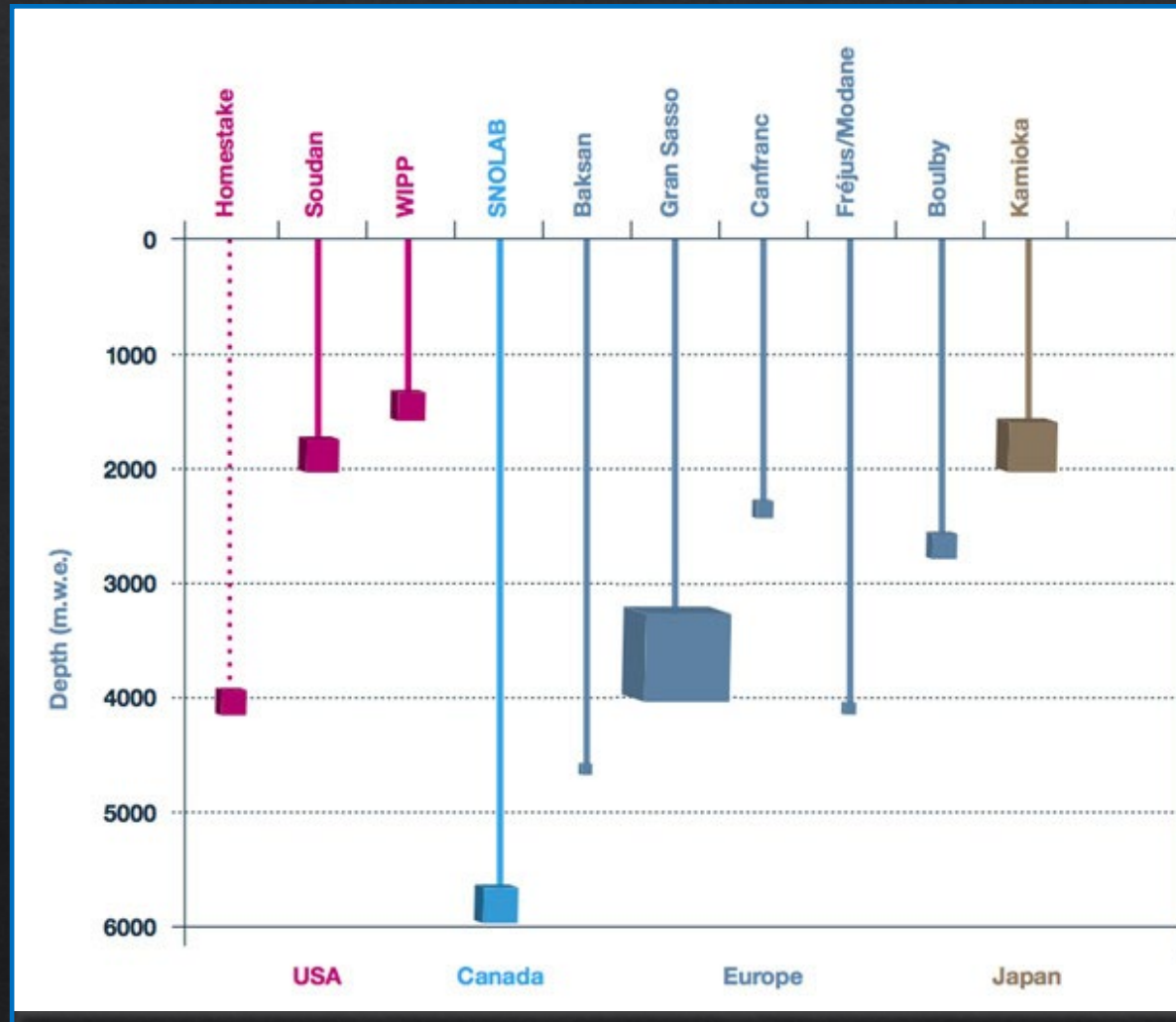
**NECESSARIO UN AMBIENTE SOTTERRANEO IN GRADO DI ATTENUARE  
IL FLUSSO CHE ARRIVA A TERRA: I LABORATORI NAZIONALI DEL GRAN  
SASSO**

- 1400 m di roccia sovrastante
- Riduzione del flusso di  $\mu$ :  $10^6$
- Flusso di  $\mu \sim 1 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$
- Superficie:  $17\,800 \text{ m}^2$
- Volume:  $180\,000 \text{ m}^3$

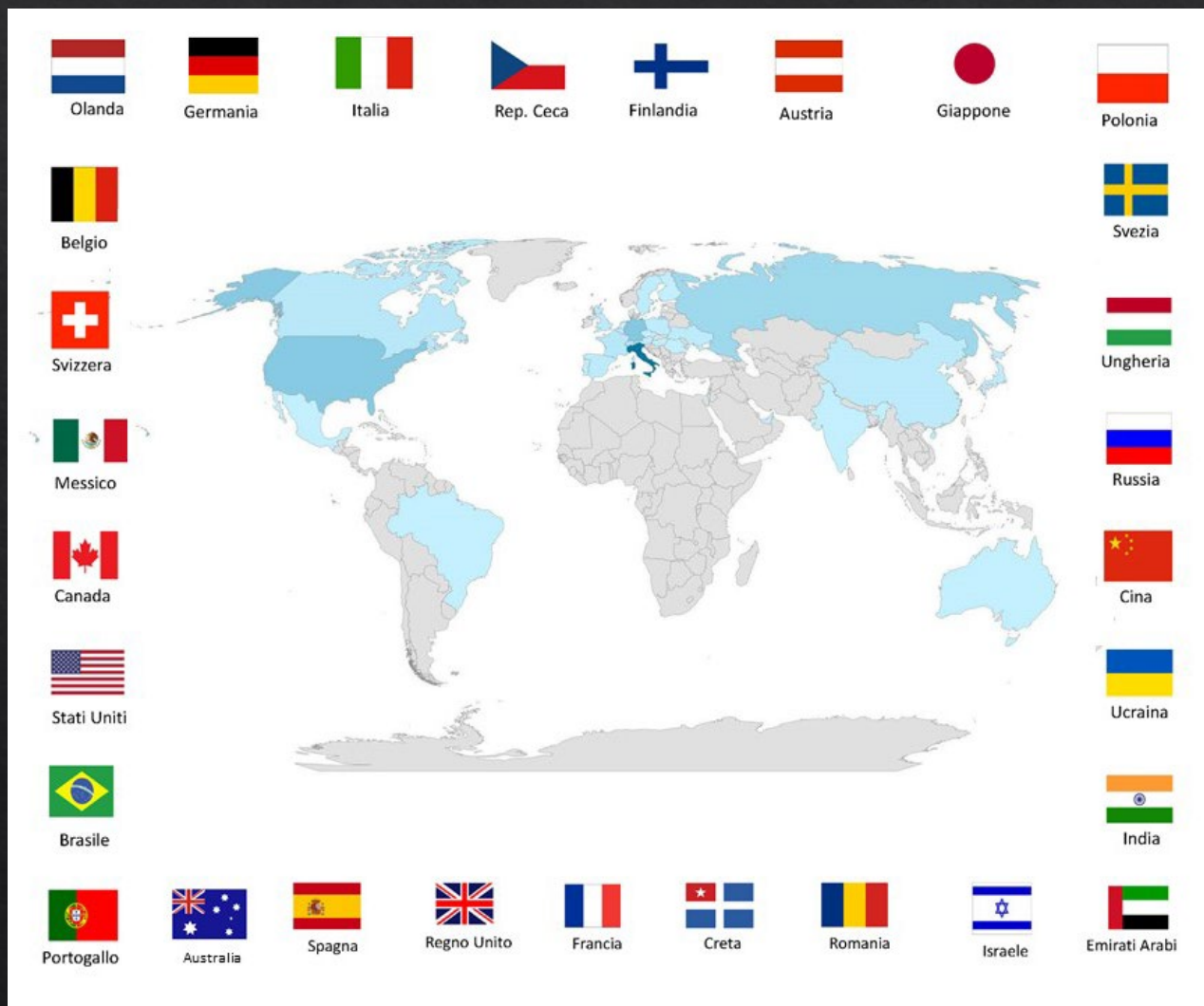


# Laboratori Nazionali del Gran Sasso VS altri laboratori sotterranei

- I più grandi al mondo:  
capacità di ospitare numerosi  
esperimenti in contemporanea
- Di facile accesso con  
ingresso a livello  
autostradale, anche per  
mezzi di grandi dimensioni.
- Distanti solo 120 km  
dall'aeroporto internazionale  
di Roma



# Internazionalità dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso

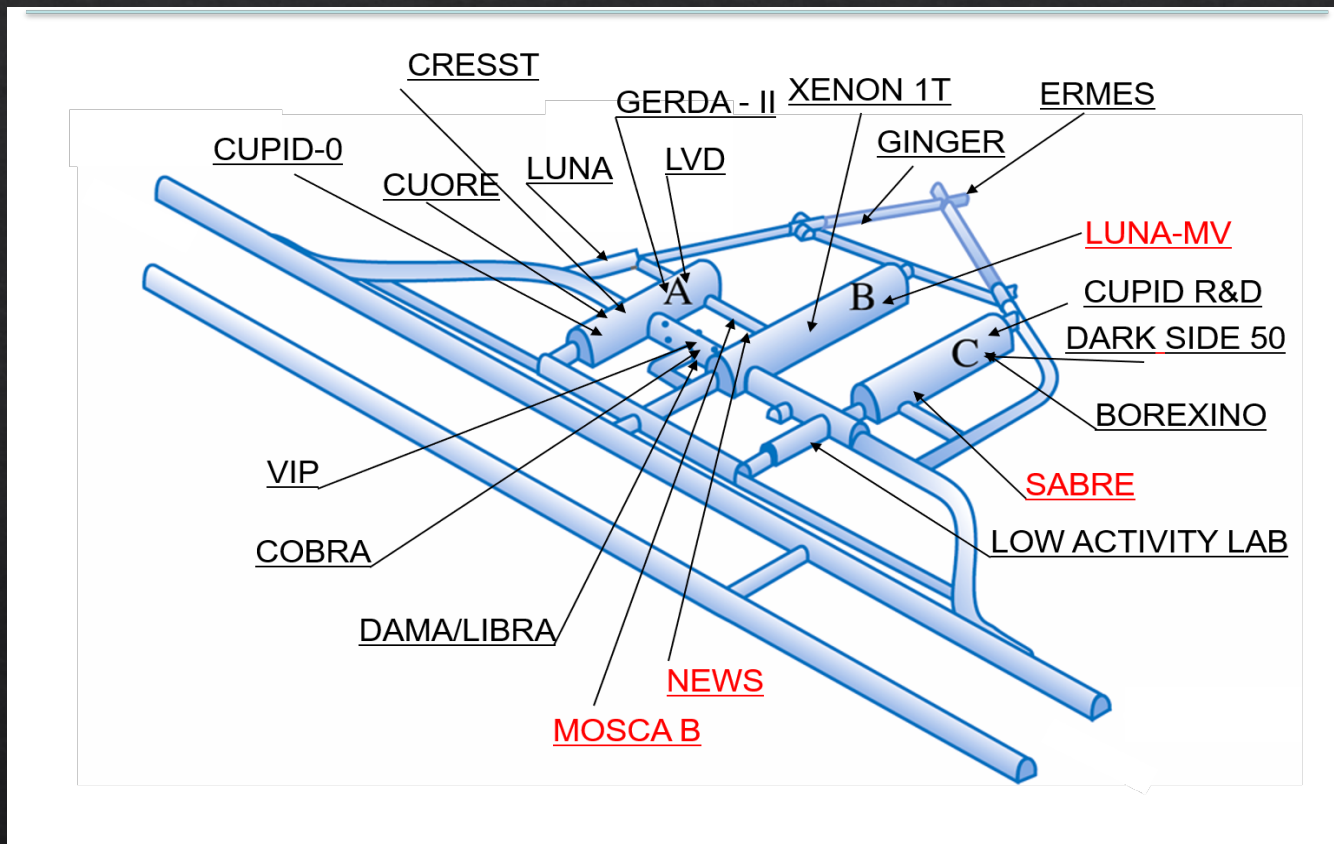


**UTENTI 2018 = 1029**  
**UTENTI ITALIANI = 442**  
**UTENTI STRANIERI = 587**

Esperimenti condotti da circa 1000 ricercatori provenienti da 29 paesi del mondo.

# Fisica Sotterranea ai LNGS

- ✓ **Neutrini** (BOREXINO, LVD, GERDA, CUORE, COBRA)
- ✓ **Materia Oscura** (DAMA/LIBRA, DARKSIDE-50, XENON, CRESST, SABRE)
- ✓ **Astrofisica Nucleare** (LUNA)
- ✓ **Fisica fondamentale** (VIP)
- ✓ **Attività multidisciplinari** (GINGER, Cosmic Silence, ERMES-W)



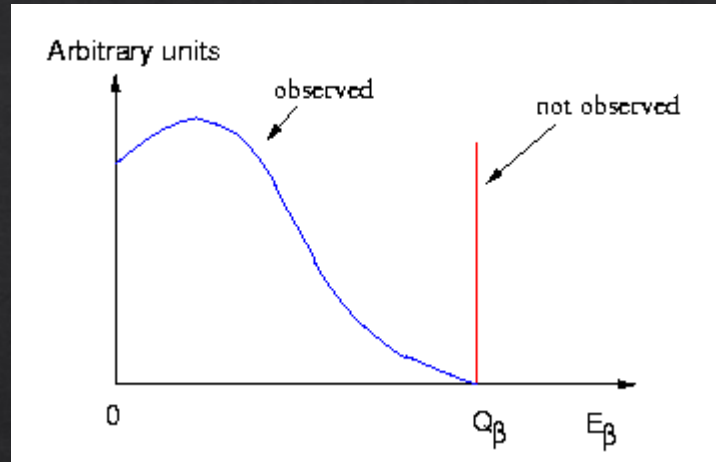
Le tre Sale sperimentali (A, B, C) misurano circa 100 m di lunghezza, 20 m di larghezza e 18 m di altezza



# Anni '30: Qualcosa non torna...

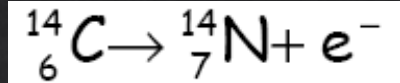
## Il problema "terribile" del decadimento beta

Un decadimento a 2 corpi dovrebbe produrre elettroni monoenergetici di energia pari alla differenza di massa dei nuclei moltiplicata per la velocità della luce al quadrato: **ma quello che si osservava era uno spettro continuo!!!**



Non conservazione dell'energia nei decadimenti Beta?

Non conservazione del momento angolare totale?



Care signore e signori radioattivi,

Vi prego di ascoltare con molta benevolenza il messaggero di questa lettera. Vi dirò che, come palliativo alla «cattiva» statistica dei nuclei N e  $\text{Li}^6$  e lo spettro  $\beta$  continuo, io ho scoperto un rimedio inaspettato per salvare le leggi di conservazione dell'energia e la statistica.

Si tratta della possibilità di esistenza nei nuclei di particelle neutre di spin  $1/2$  che obbediscano al principio di esclusione, ma differenti dai fotoni perché non si muovono alla velocità della luce, e che io chiamo **neutroni**. La massa dei neutroni dovrebbe essere dello stesso ordine di grandezza di quella degli elettroni e non deve in ogni caso superare 0.01 della massa del protone, in modo che la somma delle energie del neutrone e dell'elettrone sia costante.

Ammetto che il mio rimedio può sembrare inverosimile, perché si sarebbero dovuti vedere questi neutroni ben prima, se veramente esistono. Ma solo chi osa vince, e la gravità della situazione, dovuta alla natura continua dello spettro  $\beta$ , è chiarita da una osservazione del mio onorato predecessore Signor Debye, che mi diceva recentemente a Bruxelles: «Oh. È meglio non pensarci del tutto, come per le nuove tasse». D'ora in avanti occorre discutere seriamente tutti i lati del problema. Quindi, cara gente radioattiva, esaminate e giudicate.

Sfortunatamente non posso essere di persona a Tubingen, dato che **la mia presenza è indispensabile qui per un ballo** che avrà luogo nella notte dal 6 al 7 dicembre.

Il vostro devoto servitore

Wolfgang Pauli

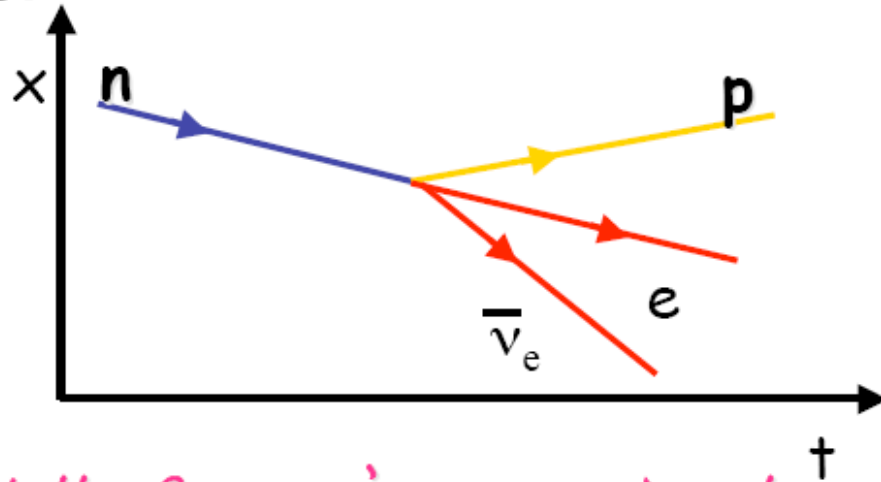
Pauli, 1931: "Ho fatto una cosa terribile, ho postulato l'esistenza di una particella che non può essere rivelata"

Bethe e Peierls, 1934: "Praticamente non c'è nessuna via possibile per osservare il neutrino."

1956 Savannah River (South Carolina)

F. Reines & C. Cowan

Fermi costruisce una teoria semplice basata sull'esistenza di una *interazione puntiforme* tra 4 fermioni, caratterizzata da un'unica costante di accoppiamento:



L'intensità della forza è proporzionale ad una quantità:

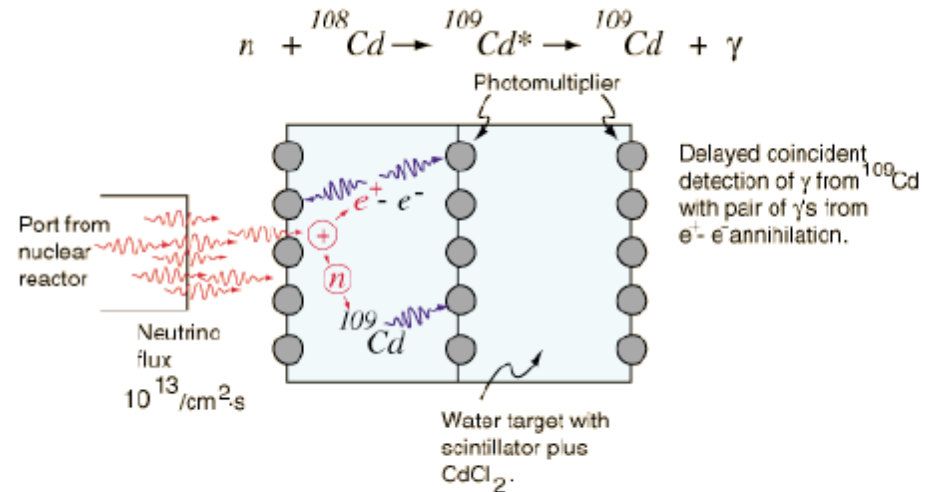
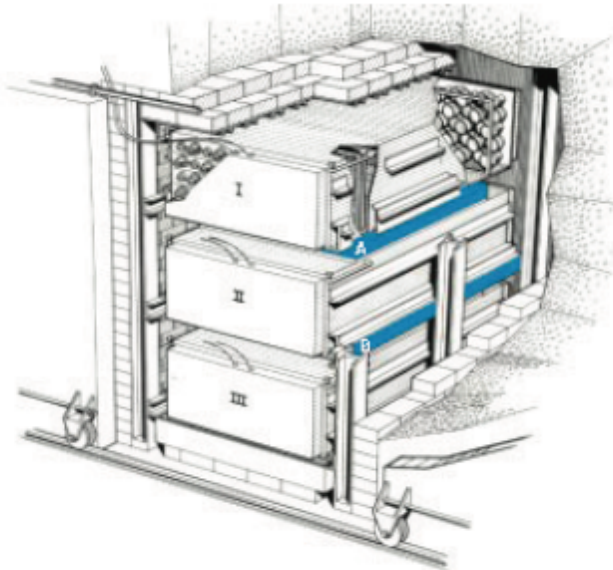
$$\text{Costante di Fermi: } G_f = 1.166 \cdot 10^{-5} \text{ GeV}^{-2} (\text{hc})^3$$

La teoria di Fermi convinse tutti i fisici dell'epoca, ma qualcuno doveva provare l'esistenza di quella particella. Per questo bisognava aspettare ancora circa 20 anni!

# L'esperimento decisivo...

1956 Savannah River (South Carolina)

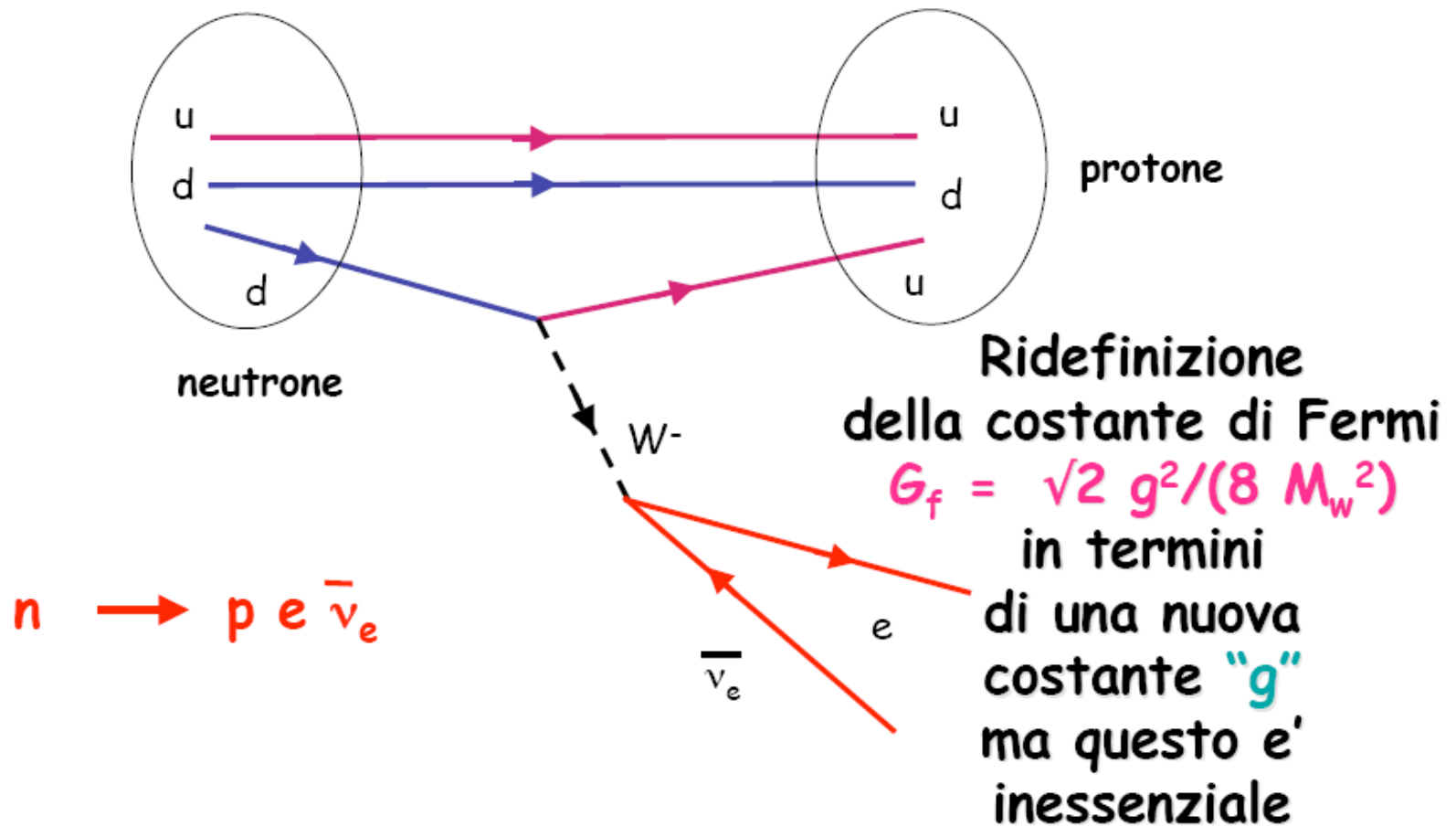
F. Reines & C. Cowan



- 2 bidoni (A, B) con ~ 200 l di acqua con ~40 kg di  $\text{CdCl}_2$  disciolto.:
- 3 contenitori di scintillatore organico liquido equipaggiati con 110 PMT
- 3 v/h<sup>-1</sup>;
- Avevano previsto una sezione d'urto di  $6 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$  e la loro misura fu  $6.3 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$ .

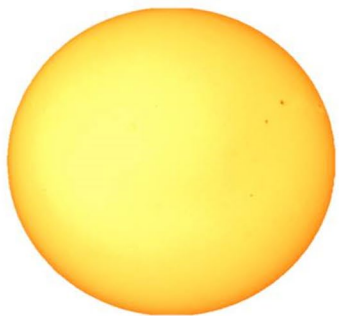
"Detection of the Free Neutrino: A Confirmation", C. L. Cowan, Jr., F. Reines, F. B. Harrison, H. W. Kruse and A. D. McGuire, Science 124, 103 (1956).

# La QED nel decadimento beta...



# Cosa sono i neutrini...

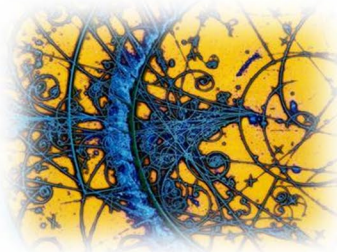
- Esistono 3 diversi tipi di neutrino:  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  e  $\nu_\tau$
- Hanno carica elettrica nulla e una massa "piccolissima". Riescono ad attraversare la materia senza interagire o essere assorbiti: la loro rivelazione è perciò estremamente difficile.
- Considerate particelle prive di massa fino alla scoperta delle cosiddette "oscillazioni di neutrini".
- Sono tra le particelle più presenti in natura.
- Vengono prodotti in molti meccanismi con energie che spaziano su parecchi ordini di grandezza.



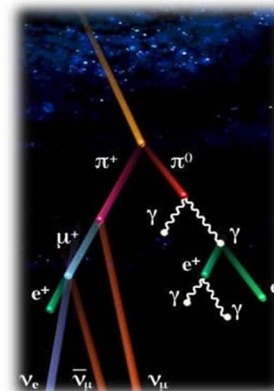
Neutrini Solari



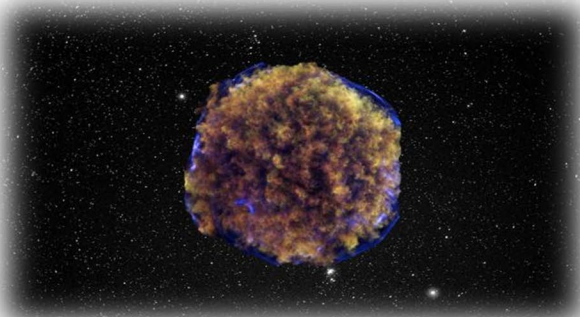
Neutrini Fossili  
dal Big Bang



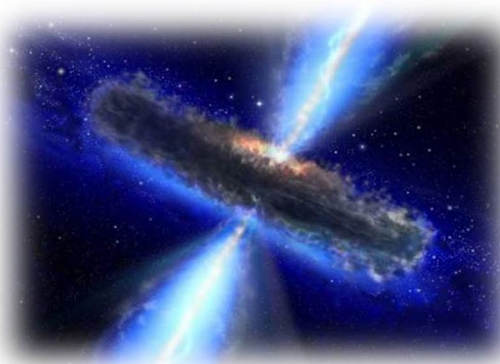
Neutrini Artificiali  
da acceleratori



Neutrini da interazione di raggi  
cosmici in atmosfera



Neutrini da esplosioni di SuperNova



Neutrini Astrofisici  
(Active Galactic Nucleus, Gamma Ray Bursts, etc...)

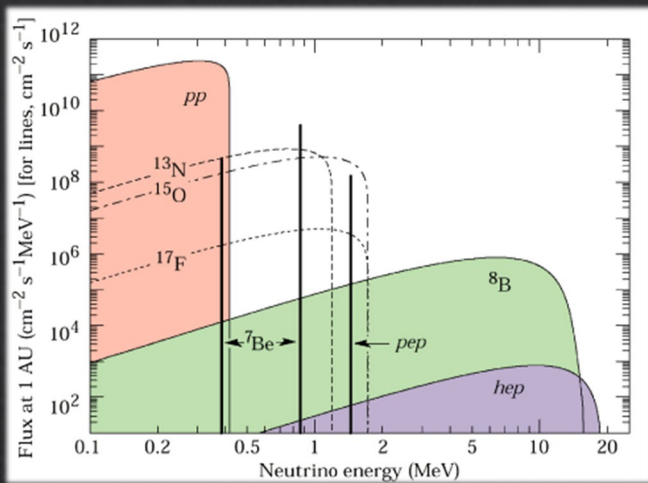


Neutrini prodotti dal  
nostro pianeta

# BOREXINO: tanti occhi per neutrini solari (e non solo...)



BOREXINO è in grado di rivelare in tempo reale neutrini di bassa energia (ad esempio prodotti dal Sole e dal nostro pianeta) attraverso le loro interazioni in un "liquido scintillatore".



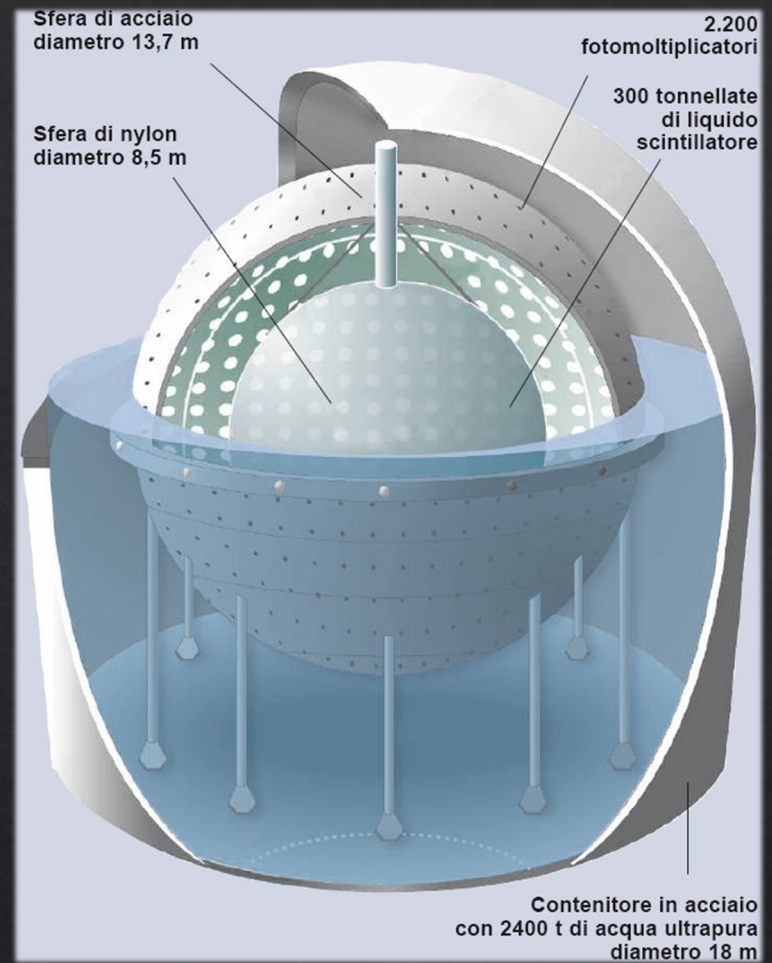
**I neutrini solari di più bassa energia sono quelli più numerosi!!!**

Un fotone prodotto nel centro del Sole impiega centinaia di migliaia di anni per raggiungere la sua superficie.

I neutrini invece, data la loro scarsa attitudine ad interagire, impiegano meno di due secondi per uscire dal Sole.

Borexino ha studiato in dettaglio il meccanismo principale di produzione di energia nel Sole, la catena protone-protone, tramite la rivelazione individuale di tutti i flussi di neutrini che da essa si originano.

Borexino, grazie alla sua "iperpurezza" e all'assenza di centrali nucleari nelle vicinanze, è anche in grado di studiare neutrini emessi nei processi radioattivi che avvengono all'interno della crosta terrestre (Geoneutrini).



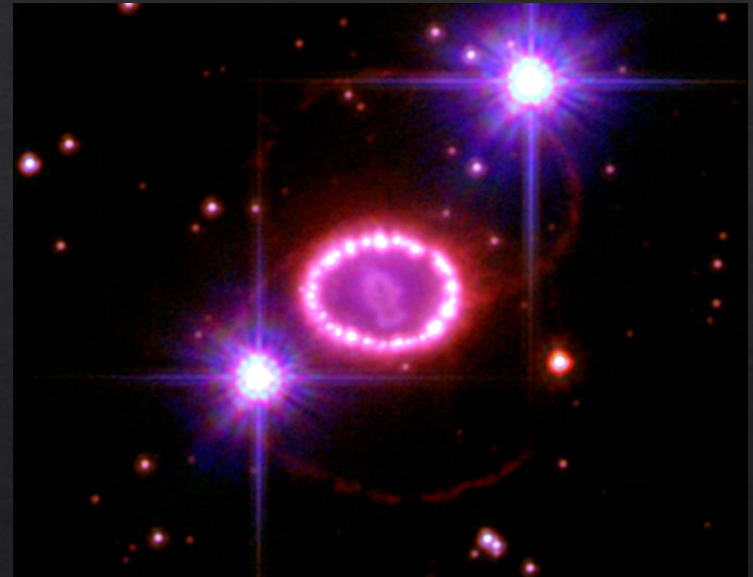
Misurando i neutrini prodotti dal ciclo CNO, che è presente nel Sole per l'1%, Borexino fornisce la prima prova sperimentale dell'esistenza di questo ulteriore meccanismo di generazione di energia.

# Neutrini dalle stelle: Large Volume Detector



LVD contiene 1000 t di liquido scintillatore, se una Supernova esplodesse nel centro della nostra Galassia (8.5 kpc), sarebbe in grado di rivelare centinaia di neutrini. Il rivelatore è in funzione dal 1992.

Scopo principale è rivelare i neutrini emessi da Supernova nella nostra Galassia o in una delle Galassie vicine (Nubi di Magellano). Ogni esplosione produce sulla Terra circa 1000 miliardi di neutrini al metro quadro in un tempo pari a circa 10-20 s.



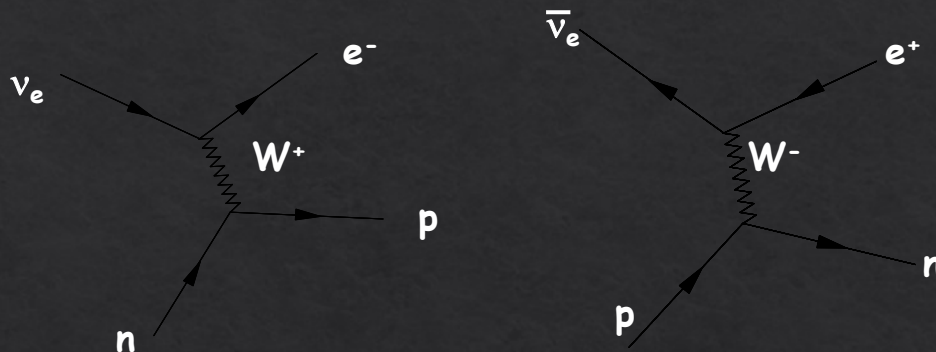
L'ultima Supernova esplosa nella Grande Nube di Magellano risale al 1987.

**La frequenza attesa di esplosioni di Supernovae nella nostra Galassia è di 2-4 per secolo: per questo motivo l'apparato è in continua presa dati!**



# Eventi Rari: Il doppio decadimento beta senza neutrini

Domanda: qual' è la differenza tra un neutrino  $\nu$  e un antineutrino  $\bar{\nu}$  ?



due modi per spiegare questo comportamento

numero leptonico differente

$$L(\nu_e, e^-) = -1$$

$$L(\bar{\nu}_e, e^+) = +1$$

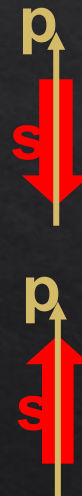
Il **numero leptonico** è strettamente conservata

differente elicità

$$H(\nu_e) = -1$$

$$H(\bar{\nu}_e) = +1$$

Il comportamento del  $\nu$  è determinato solo dalla **elicità**



**Dirac**  $\nu_e \neq \bar{\nu}_e$

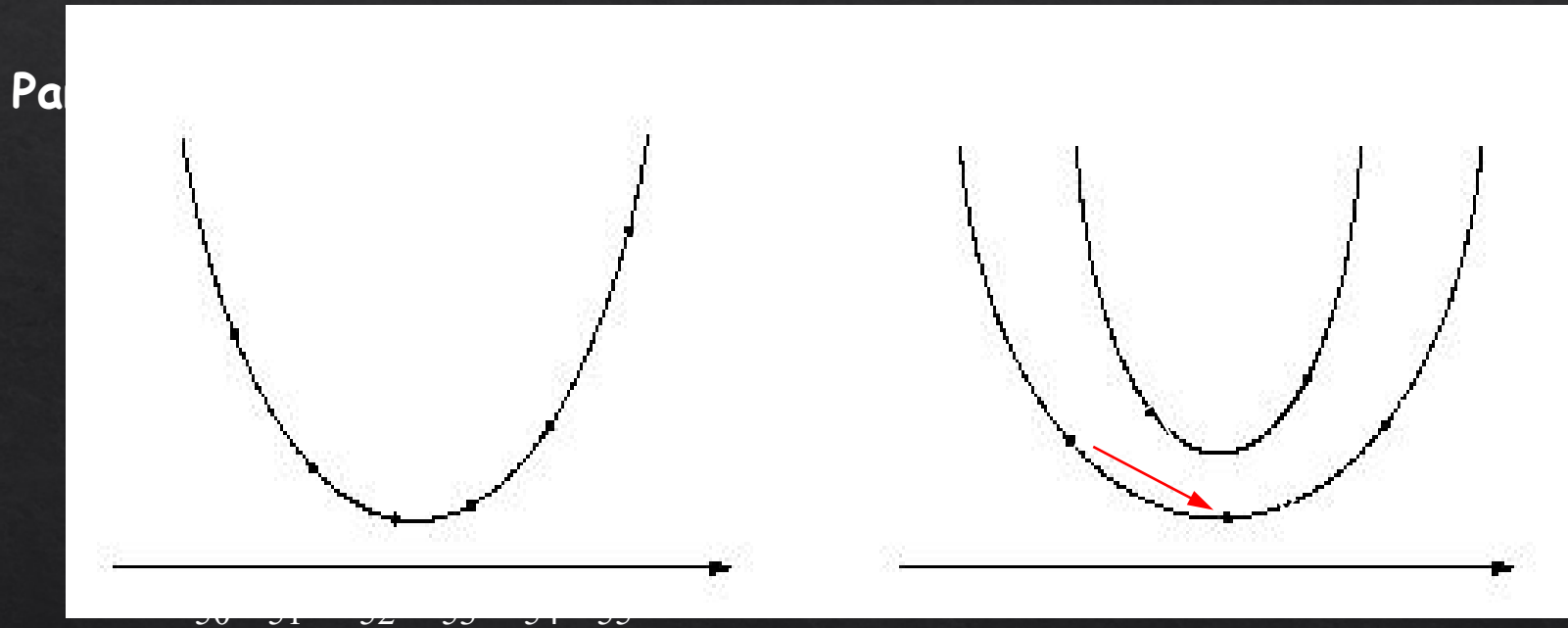
**Majorana**  $\nu_e = \bar{\nu}_e$

Se  $m_\nu = 0 \longrightarrow \boxed{L = H}$

Ma noi sappiamo che il  $\nu$  ha massa  $\longrightarrow \boxed{L \neq H}$

# Neutrino di Dirac e di Majorana

L'**unico** esperimento che può testare la natura del neutrino è un decadimento nucleare **raro**, chiamato Doppio Decadimento Beta senza emissione di neutrini.



E' possibile osservare il  $2\beta$  per quei nuclei con A pari per i quali il decadimento beta singolo e' fortemente soppresso.

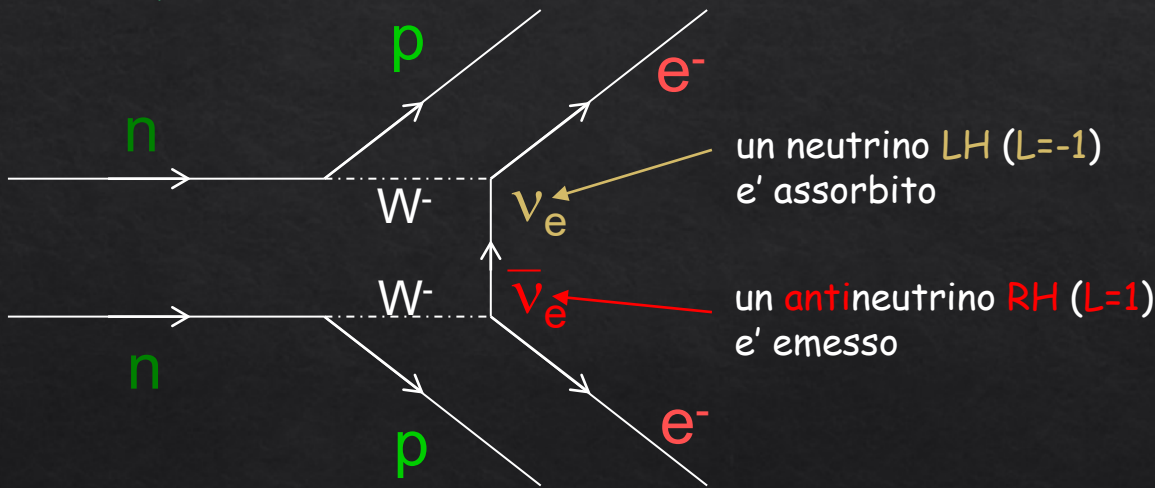
Per esempio il  $^{130}\text{Te}$  non può fare un decadimento beta singolo perché energeticamente proibito ma e' possibile solo il DDB sullo  $^{130}\text{Xe}$

# Natura del Neutrino e $2\beta 0\nu$

Normalmente si discutono **due canali** di  $2\beta$ :

①  $2\beta 2\nu$ :  $(A, Z) \rightarrow (A, Z+2) + 2e^- + 2\bar{\nu}_e \rightarrow$  Permessato dal SM

②  $2\beta 0\nu$ :  $(A, Z) \rightarrow (A, Z+2) + 2e^- \rightarrow$  Implica una fisica "OLTRE SM"

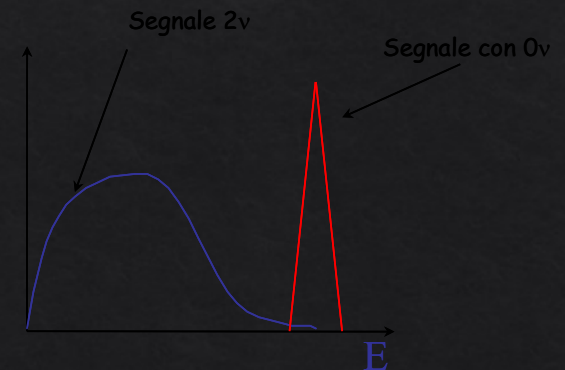


- Se  $m_\nu \neq 0$  e natura  $\nu$  è di Dirac allora  $2\beta 0\nu$  è proibito
- Se  $m_\nu \neq 0$  e natura  $\nu$  Majorana allora  $2\beta 0\nu$  è permesso

Osservazione di  $2\beta 0\nu$

$$m_\nu \neq 0$$

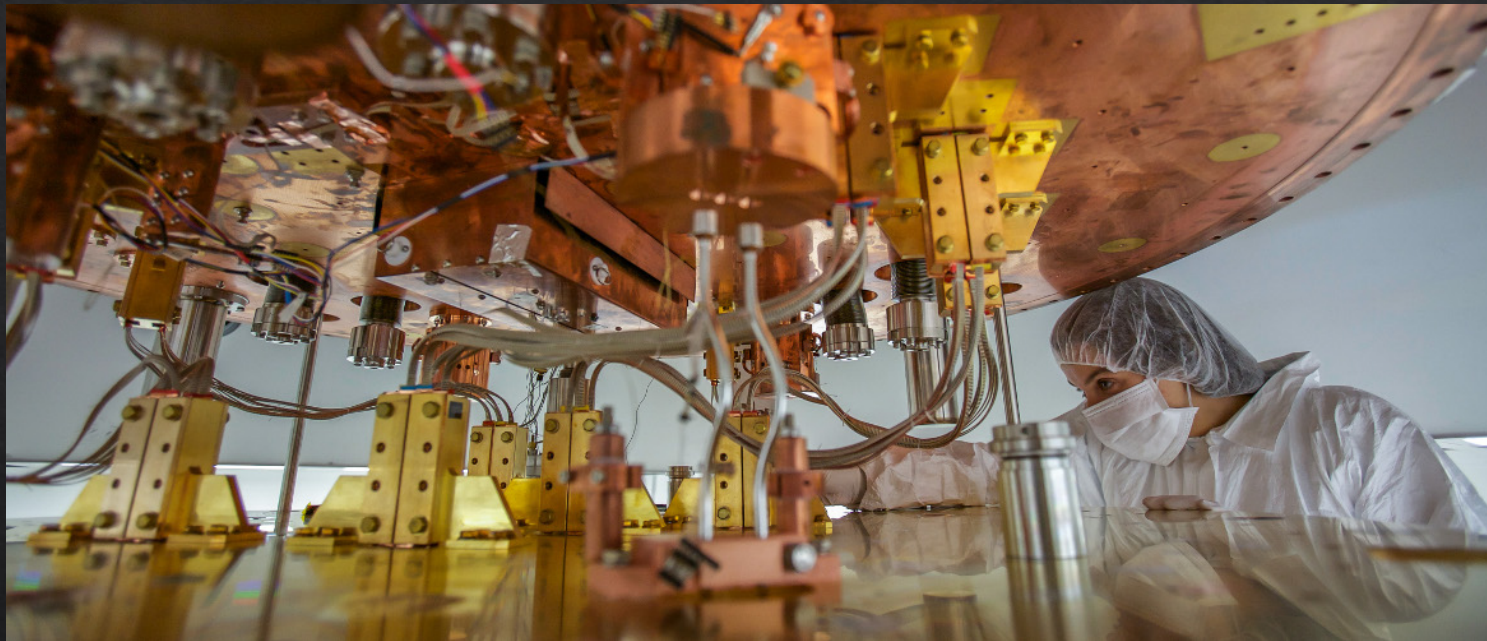
$$\nu \equiv \bar{\nu}$$



# CUORE

## (Cryogenic Underground Observatory for Rare Events)

Scopo è la scoperta del decadimento  $0\nu\beta\beta$  del  $^{130}\text{Te}$  utilizzando circa 1000 rivelatori criogenici di  $\text{TeO}_2$ , per un totale di circa 750 kg. Il suo prototipo CUORICINO, è stato in funzione presso i laboratori sotterranei.



CUORE è progettato per lavorare in condizioni di ultrafreddo, a temperature di circa 10 dieci millesimi di grado sopra lo zero assoluto: il metro cubo più freddo dell'Universo !

Data la necessità di avere un ambiente completamente privo di radiazione naturale, l'apparato sperimentale viene schermato con uno strato di piombo estremamente "radiopuro" e risalente all'età di Roma.

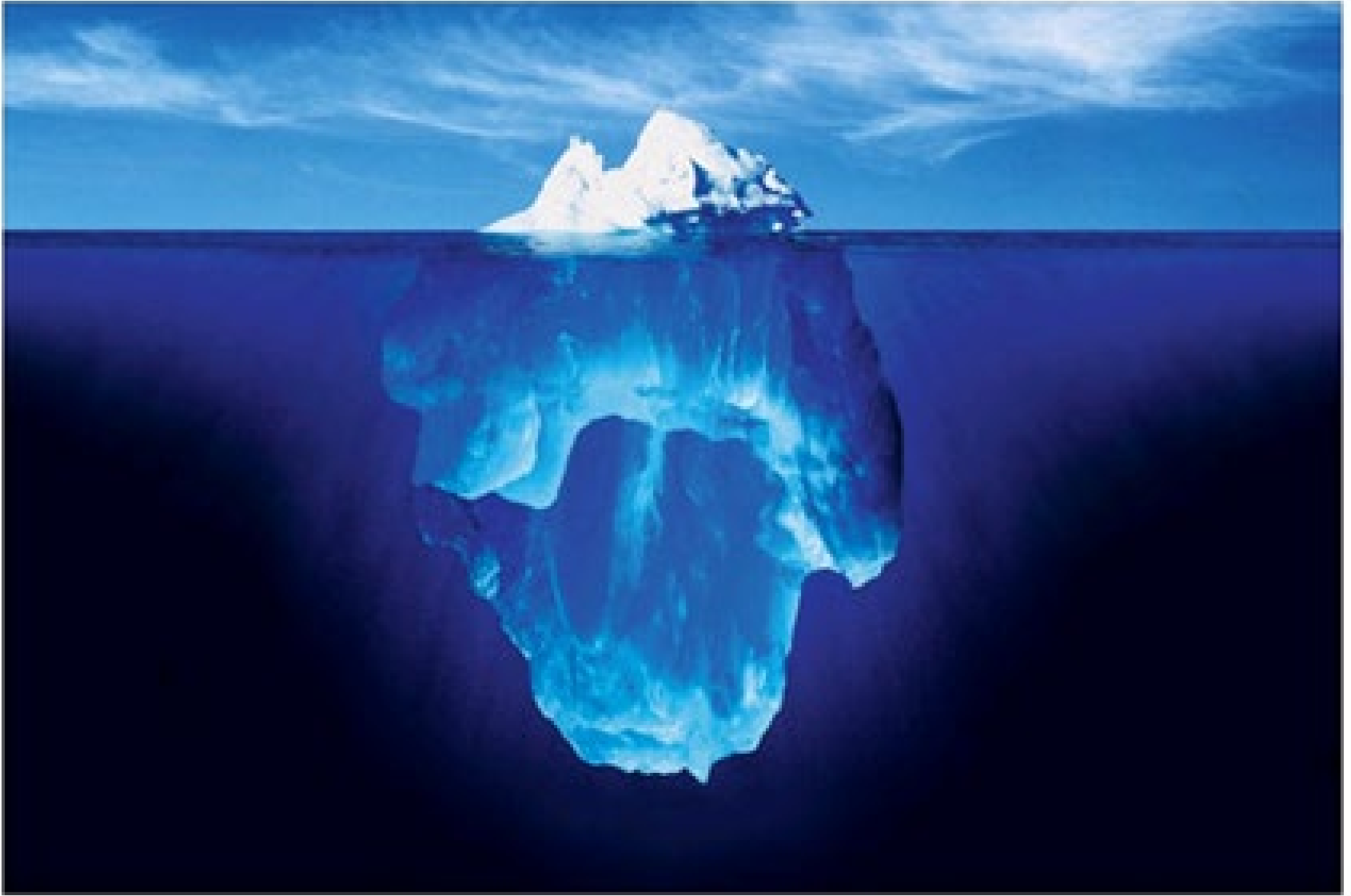


# GERmanium Detector Array



Lo scopo è scoprire il decadimento  $0\nu\beta\beta$  dell'isotopo  $^{76}\text{Ge}$ . GERDA utilizza rivelatori a semiconduttore arricchiti nell'isotopo  $^{76}\text{Ge}$  che funzionano immersi in una schermatura criogenica.

Nonostante queste ricerche conosciamo ancora molto poco  
del nostro Universo...

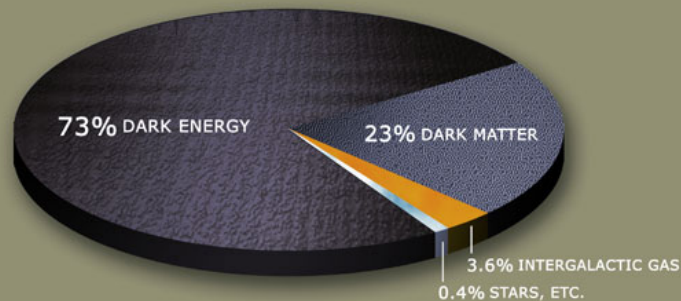


# Di cosa è fatto l'Universo?

Le osservazioni sperimentali ci dicono che la materia di cui siamo fatti noi è meno del **5%**.

Circa il **23%** è **materia oscura**

il restante, più del **73%**, è **energia oscura**



La **materia oscura** (fagioli neri) è circa **5 volte** più abbondante della **materia visibile** (fagioli colorati)

# Materia oscura nell'Universo e Fisica delle particelle

## *Curve di rotazione delle Galassie a spirale*

Per una stella in un'orbita circolare:

$$\frac{G m M_r}{r^2} = \frac{m v(r)^2}{r} \Rightarrow v(r) = \sqrt{\frac{G M_r}{r}}$$

(dove  $M_r$  = massa entro il raggio  $r$ )

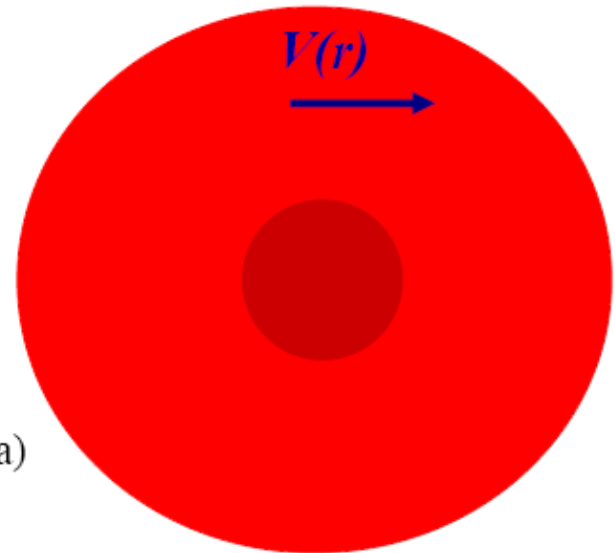
All'interno del bulge (simmetria sferica):

$$M_r = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho \Rightarrow v(r) \propto r$$

Fuori della Galassia :  $M_r = M$  (massa totale della Galassia)

↓

$$v(r) \propto r^{-1/2}$$





# Tutto quello che non si vede... La Materia Oscura

$v$  (km/s)

100

50

observed

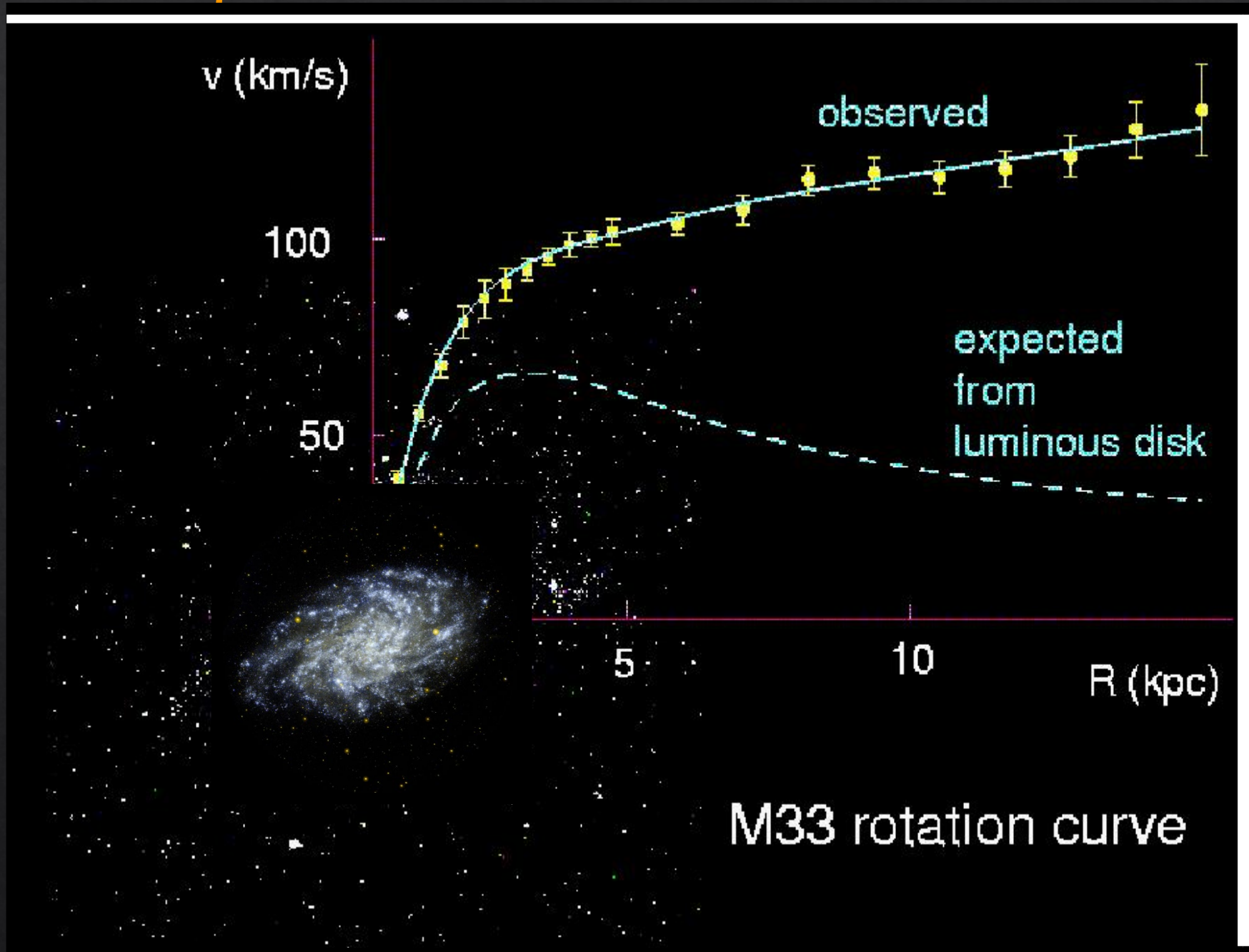
expected  
from  
luminous disk

5

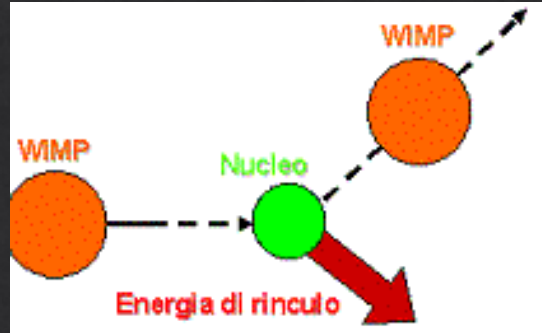
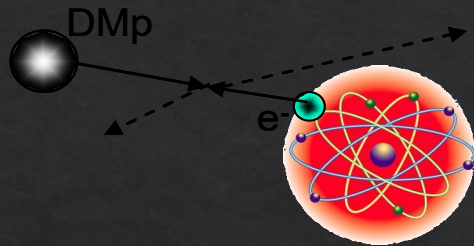
10

$R$  (kpc)

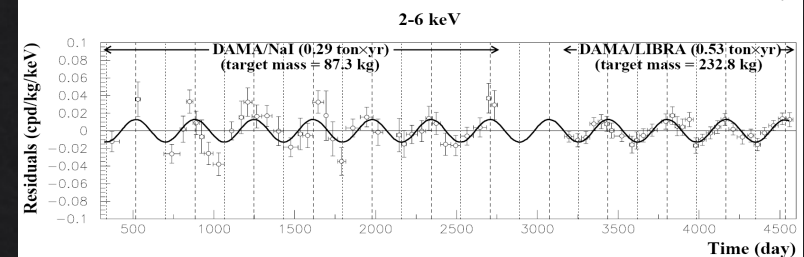
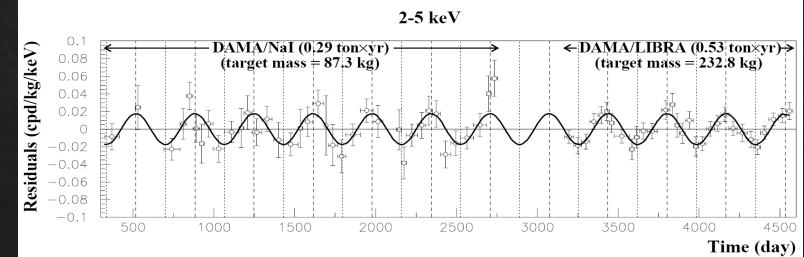
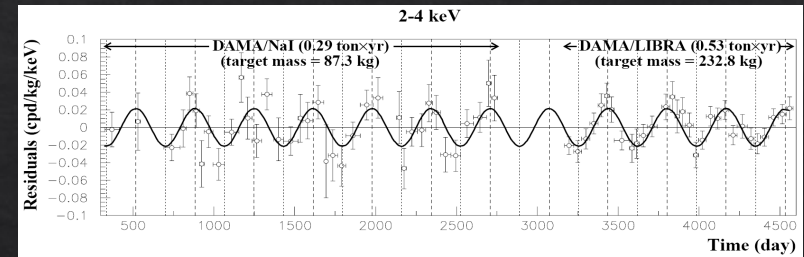
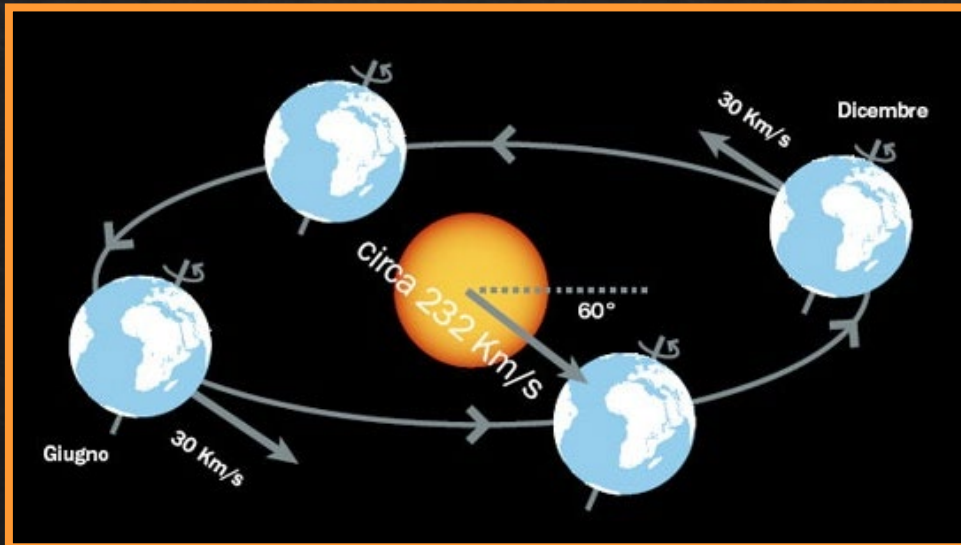
M33 rotation curve



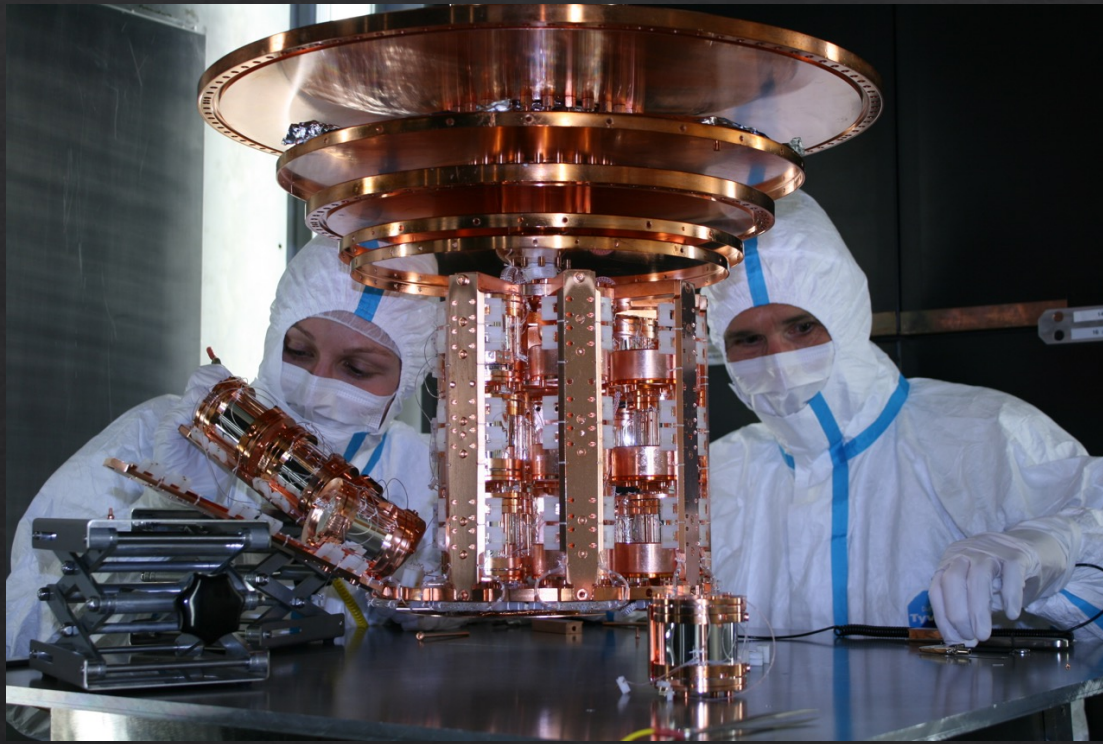
# DAMA/LIBRA



DAMA studia la componente di particelle di Materia Oscura nell'alone galattico per mezzo di una segnatura indipendente da modello detta modulazione annuale.



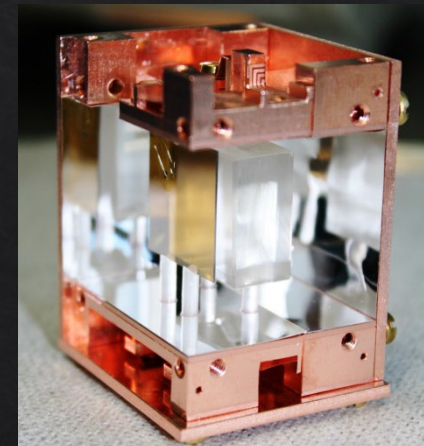
# CRESST



CRESST (Cryogenic Rare Event Search using Superconducting Thermometers) è un esperimento per la ricerca di WIMPs attraverso la loro interazione (scattering) su un nucleo atomico.

CRESST utilizza rivelatori calorimetrici costituiti da un cristallo assorbitore, che contiene i nuclei con cui la WIMP interagisce, e da un sensore che misura l'energia rilasciata nell'interazione.

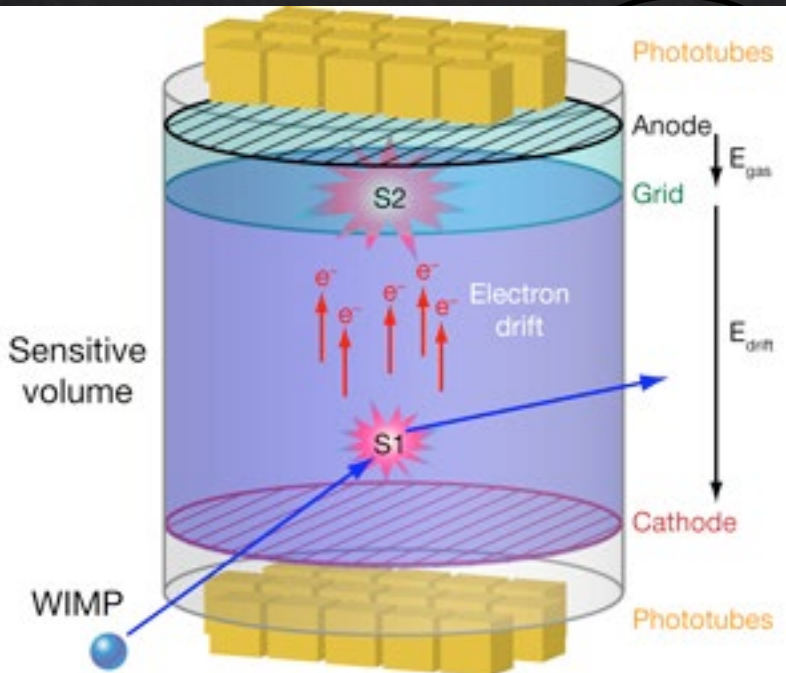
I rivelatori di CRESST sono in grado di osservare particelle la cui massa sia ben più leggera di quelle osservabili nelle attuali misure, aumentando la possibilità di osservare la materia oscura.



# XENON1T

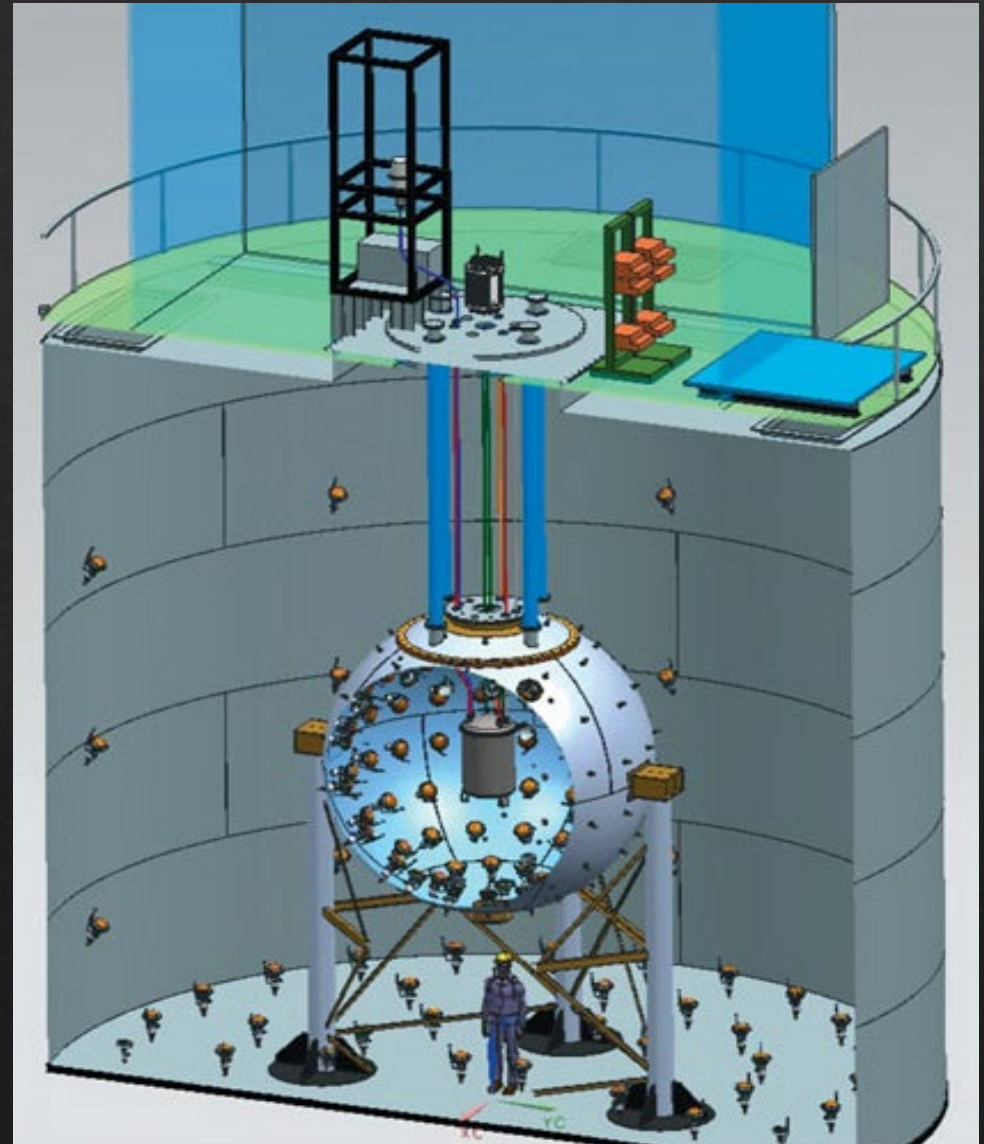
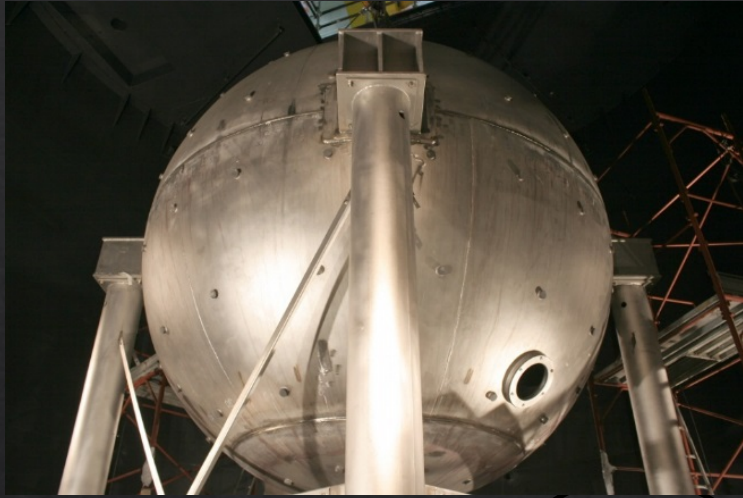
Lo scopo del progetto XENON è quello di rivelare le interazioni tra le particelle di Materia Oscura con i nuclei dello Xeno utilizzato come massa bersaglio nell'esperimento.

Xenon è una camera TPC a doppia fase (liquida e gassosa). I fotomoltiplicatori sono utilizzati per rivelare il lampo di luce prodotto nell'interazione.

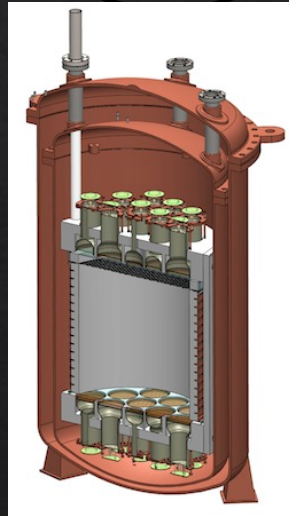


# DarkSide50

Scopo dell'esperimento DarkSide50 è di osservare interazioni di Materia Oscura con quella ordinaria.



Il cuore dell'apparato è costituito da una camera TPC contenente Argon in fase sia liquida che gassosa.

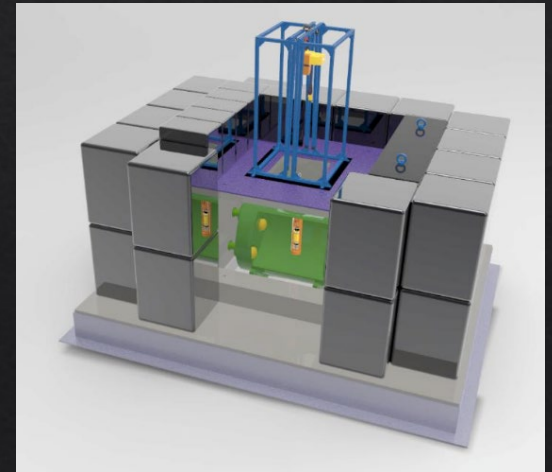


# SABRE R&D



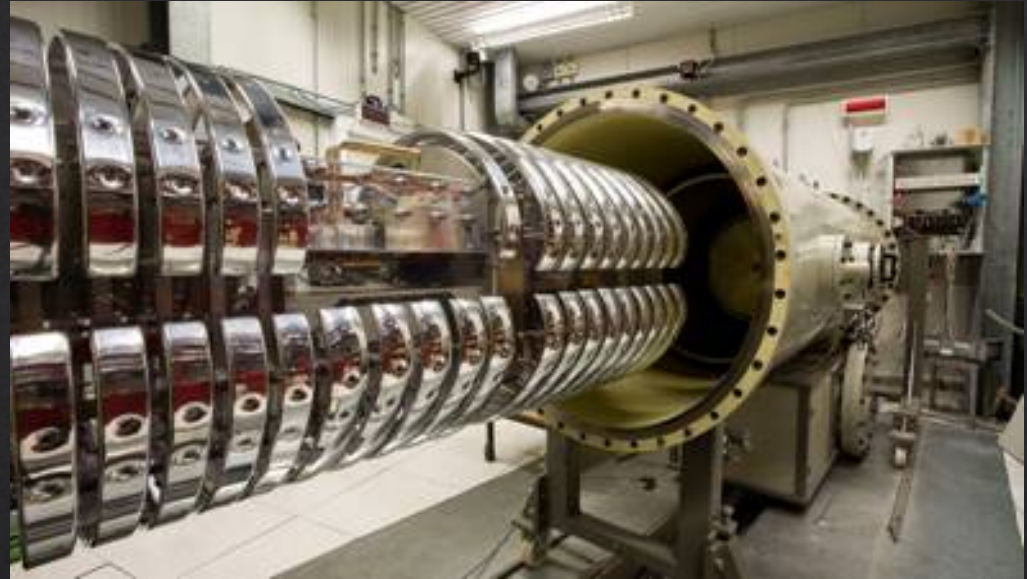
Due rivelatori  
(Italia & Australia)  
per studiare la materia  
oscura

SABRE utilizzerà cristalli di ioduro di sodio di altissima purezza per la rivelazione diretta di materia oscura. Ogni cristallo sarà accoppiato a due fotomoltiplicatori per la lettura della luce di scintillazione.

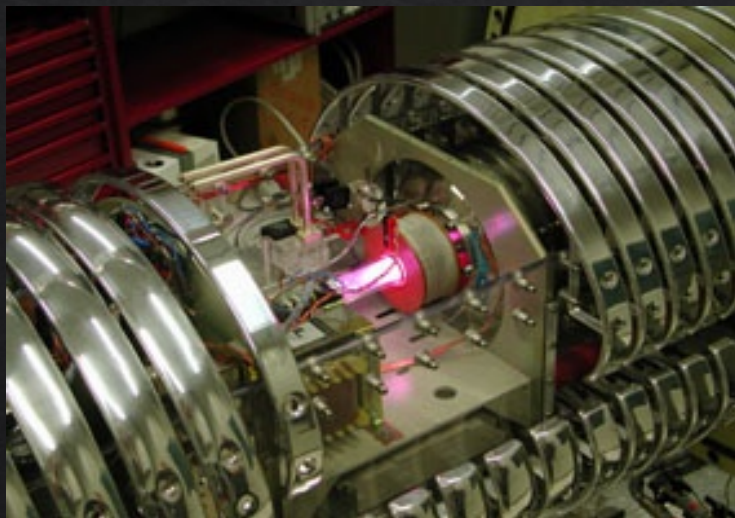


# LUNA: Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics riprodurre in un laboratorio il cuore delle stelle

- Utilizza un acceleratore di protoni e particelle alfa che funziona a 400 kV.
- Unico acceleratore al mondo in funzione in un centro di ricerca sotterraneo
- Ha misurato alcune reazioni chiave del ciclo di combustione dell'idrogeno e della nucleosintesi primordiale

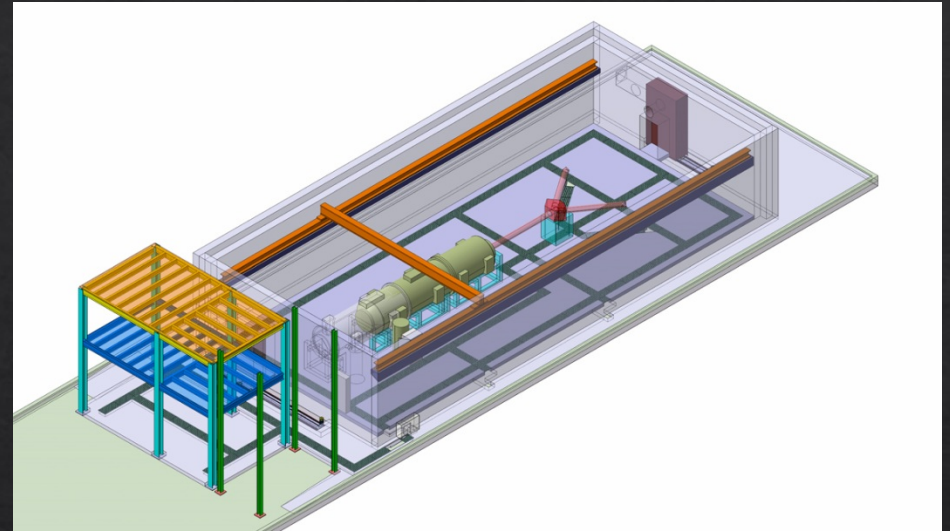
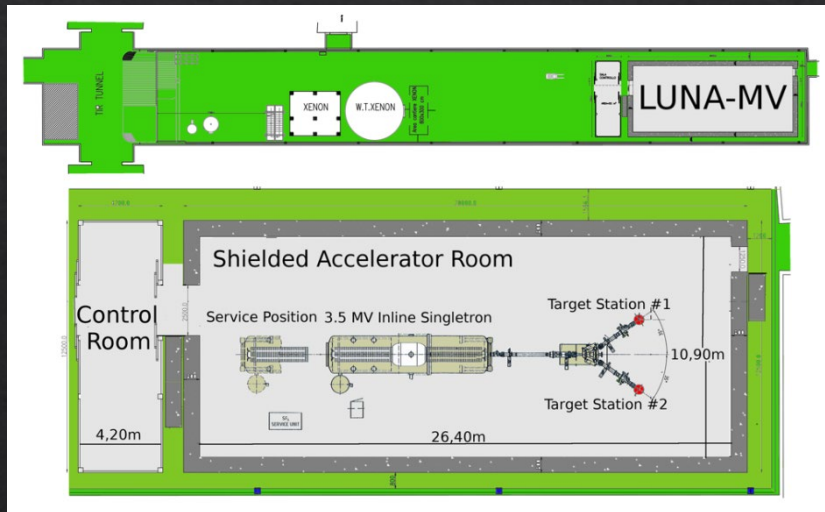


- Ha dimostrato che l'Universo è più vecchio di quanto ci si aspettava in passato
- Ha osservato per la prima volta una rara reazione nucleare che avviene nelle stelle giganti rosse. Si tratta della prima osservazione diretta di una delle reazioni nucleari fondamentali per la costruzione degli elementi che costituiscono l'Universo



# LUNA → LUNA MV

LUNA studia in laboratorio i processi di nucleosintesi primordiali e stellari



- Linea di ricerca aperta nel 1992 con lo studio di processi solari: LUNA-50
- Proseguita con LUNA-400
- Nuovo acceleratore 3.5 MV con fasci p, He, C finanziato con progetti premiali MIUR
- Installazione del nuovo acceleratore a LNGS: a partire da 2018