

LNGS

Laboratori Nazionali del Gran Sasso



Introduzione ai LNGS

Un'idea del Prof. A. Zichichi: un laboratorio nelle viscere del 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).

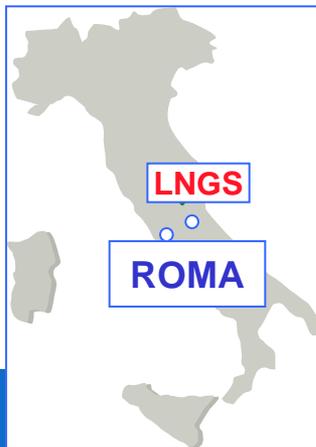
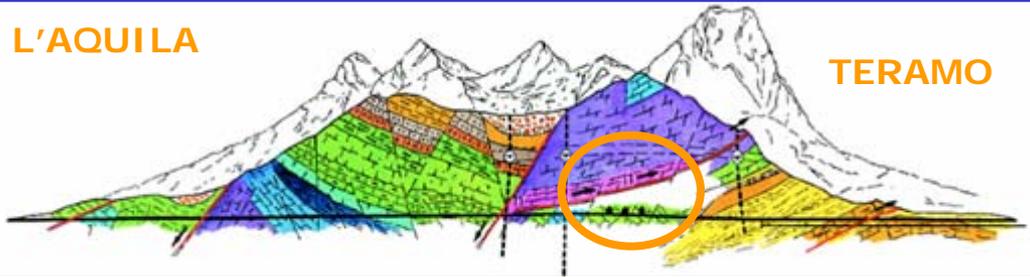
1982 --> approvazione da parte del Parlamento.

1987 --> la costruzione è completata.

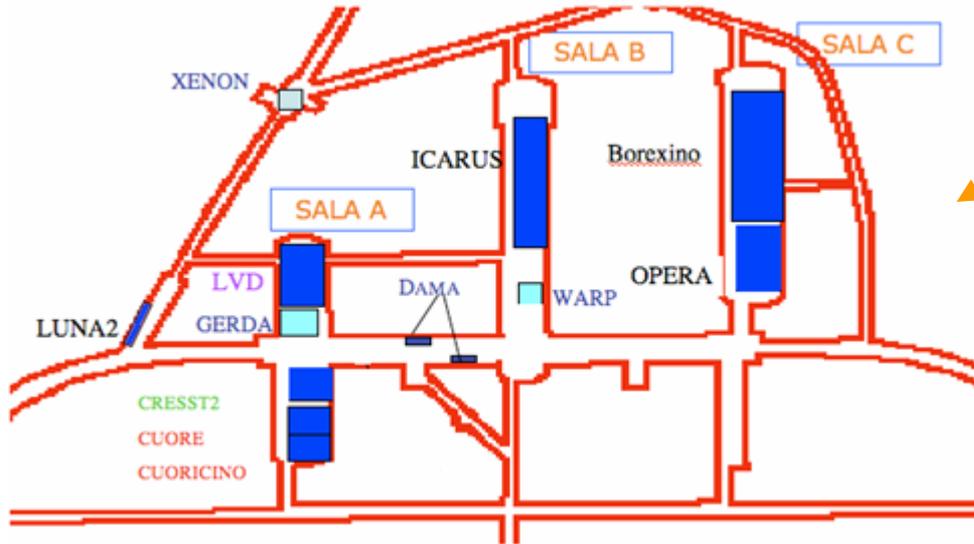
1989 --> il 1° esperimento sotterraneo, MACRO, inizia la presa dati.

L'AQUILA

TERAMO



I Laboratori Nazionali del Gran Sasso



Laboratori Sotterranei

Laboratori Esterni

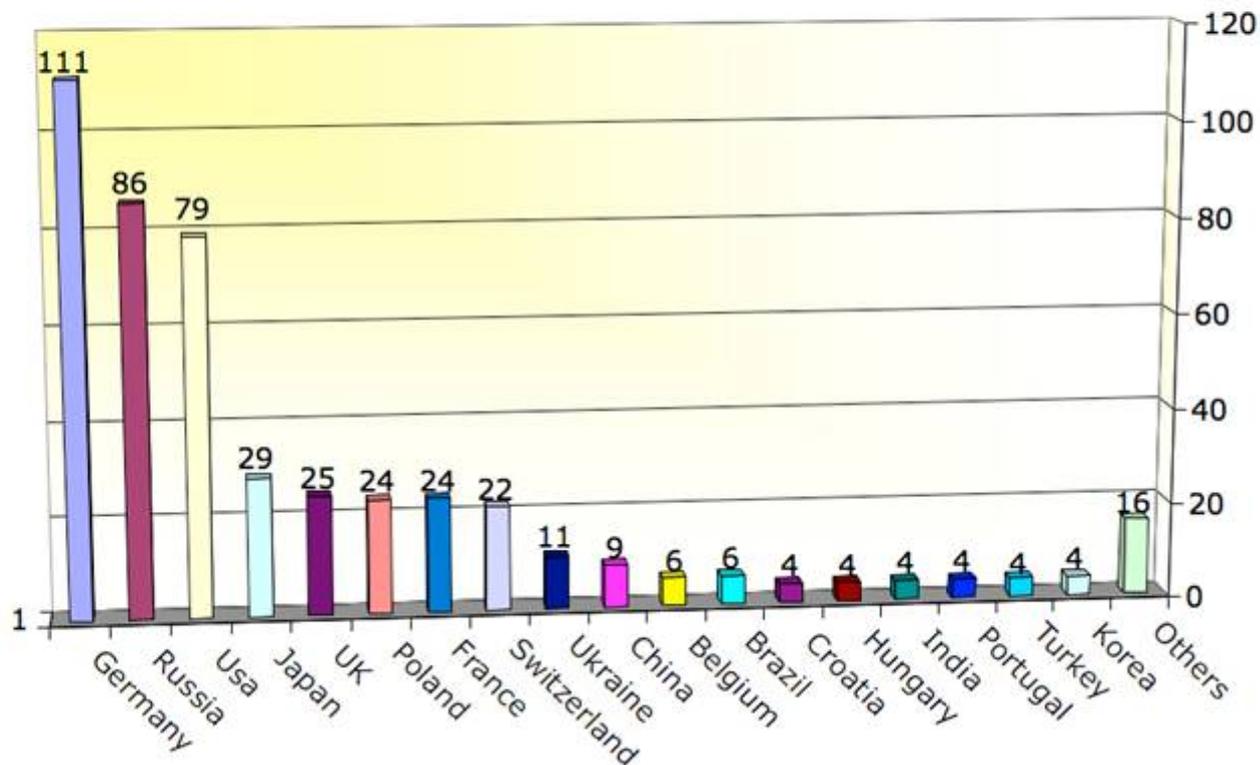


- ❑ 1400 m di roccia sovrastante
- ❑ Volume: 180.000 m³ *il più grande laboratorio sotterraneo al mondo!*
- ❑ **Riduzione del flusso di muoni di un fattore 1 milione**

LNGS foreign users in 2007

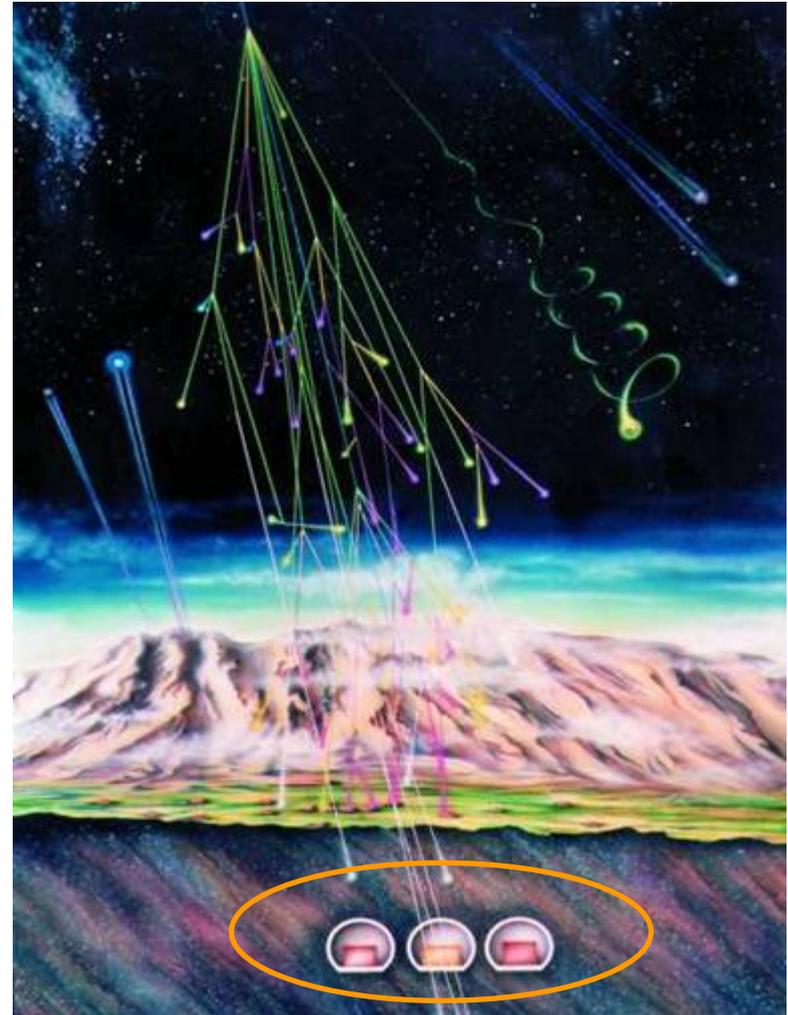


472 from 28 countries +
279 from Italy
Tot: **751**



Perché un laboratorio di fisica sotterraneo?

La Terra è costantemente bombardata dai *raggi cosmici*: nuclei di H, He o più pesanti che colpiscono l'atmosfera causando una *pioggia di particelle secondarie* (circa 100 particelle cariche per metro quadro al secondo!) In superficie queste costituiscono un rumore di fondo che oscura i rivelatori, tuttavia la roccia può assorbirne molte realizzando una condizione di "*silenzio cosmico*" che permette di studiare particelle elementari, difficilissime da catturare, che attraversano indisturbate la roccia, ed eventi molto rari.



T. Gaisser 2005

I RAGGI COSMICI

Raggi cosmici (CR) di energia maggiore di 10^{20} eV sono stati osservati.

I CR di "bassa" energia (fino a 10^{15} eV) sono probabilmente di origine galattica.

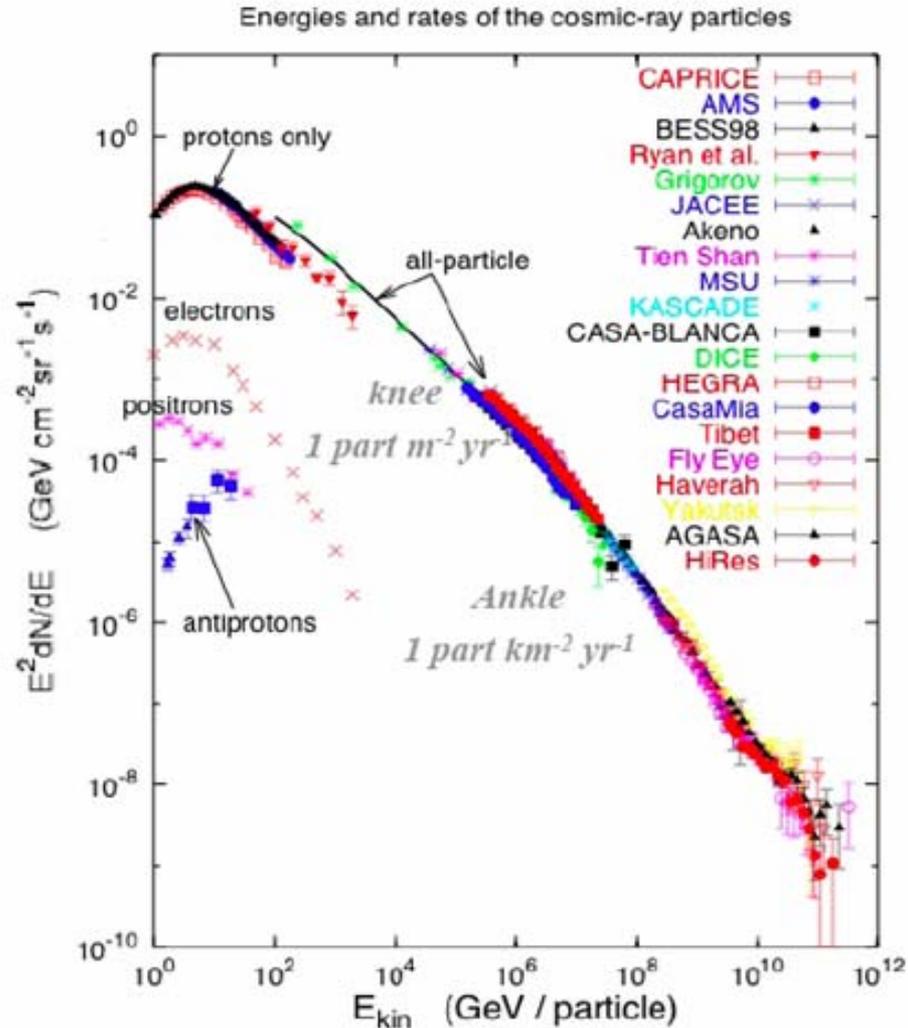
Alle più "alte" energie potrebbero essere di natura extra galattica.

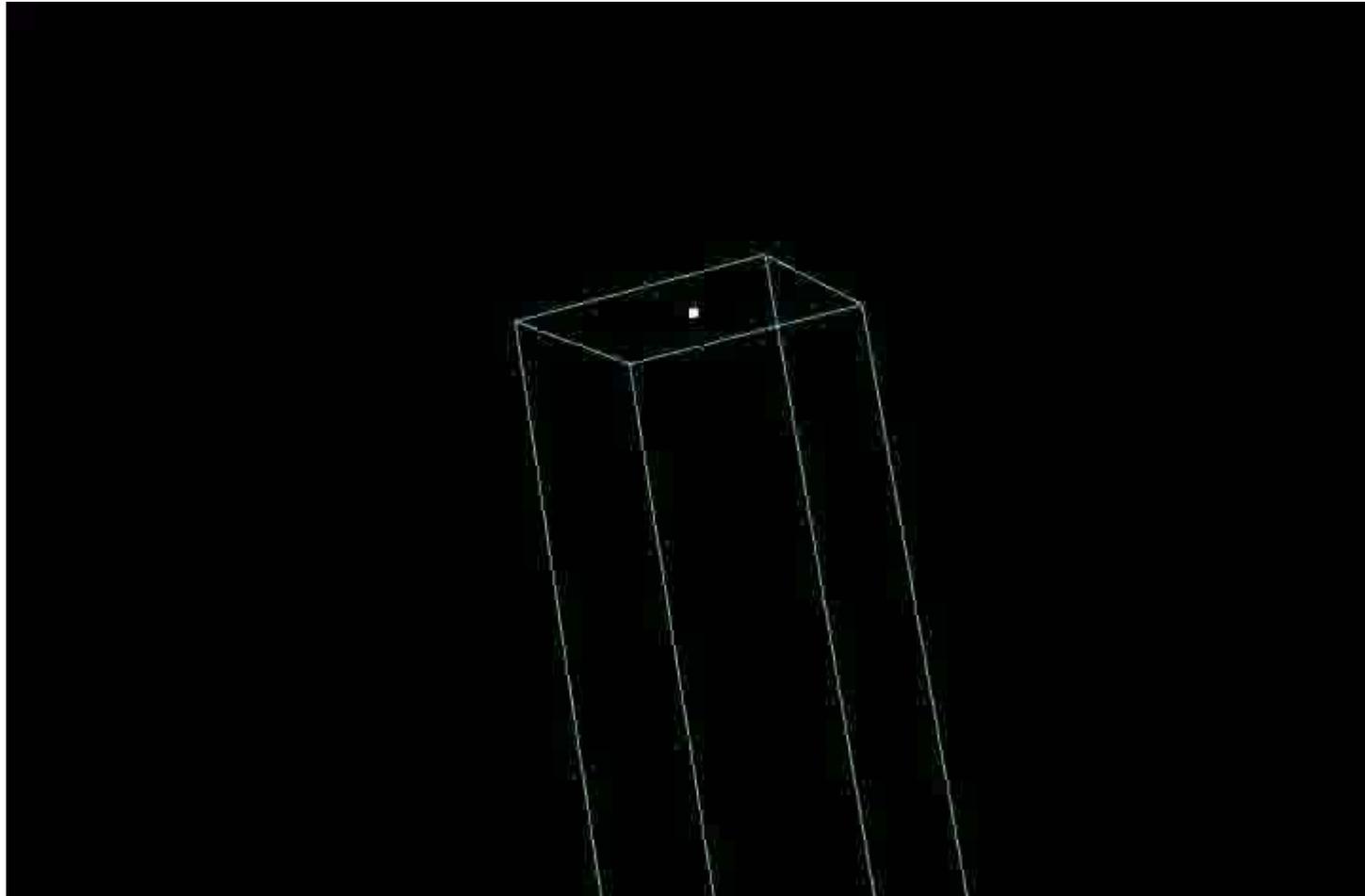
Problemi aperti:

Meccanismi di accelerazione per CR di alta energia

Identificazione delle sorgenti

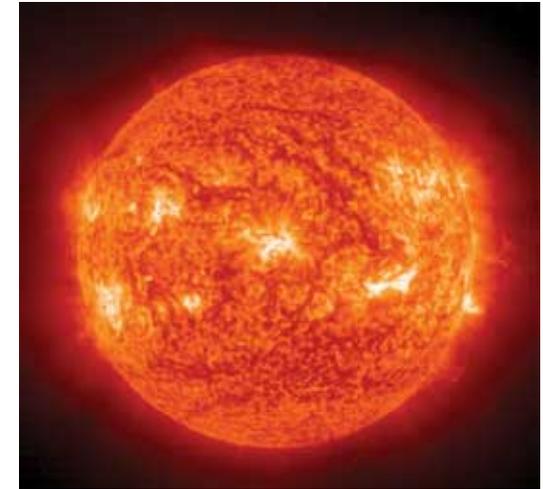
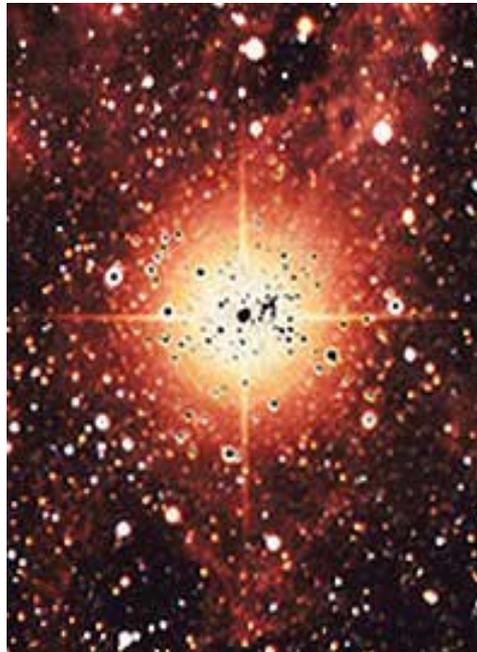
Altissime energie





Fisica Sotterranea ai LNGS

- ❑ **Neutrini**
- ❑ **Materia Oscura**
- ❑ **Astrofisica Nucleare**
- ❑ **Decadimenti Rari**
- ❑ **Raggi Cosmici**
- ❑ **Geologia, Biologia**

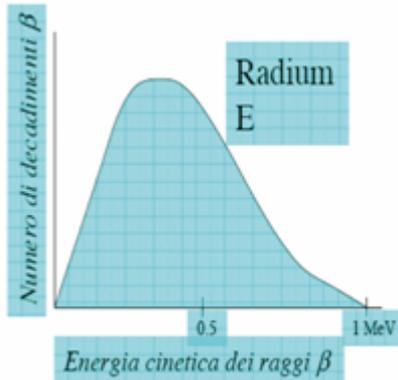


**Circa 15 esperimenti
condotti da più di 750
ricercatori provenienti
da 24 paesi del mondo.**

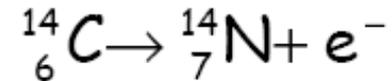


Il problema terribile del decadimento beta...

Un decadimento a 2 corpi dovrebbe produrre elettroni monoenergetici di energia pari a $\Delta m_{\text{nuclei}} c^2$, ma quello che si osservava era uno spettro continuo:



1. Non conservazione dell'energia nei decadimenti Beta?
2. Non conservazione del momento angolare totale?



Care signore e signori radioattivi,

Vi prego di ascoltare con molta benevolenza il messaggio di questa lettera. Vi dirò che, come palliativo alla «cattiva» statistica dei nuclei N e Li^6 e lo spettro β 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 β , 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

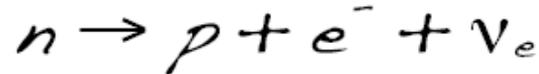
Pauli, 1931: "Ho fatto una cosa terribile, ho postulato l'esistenza di una particella che non può essere rivelata"

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

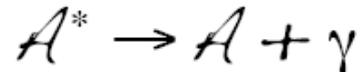
1956 Savannah River (South Carolina)
F. Reines & C. Cowan

(slide Assunta Di Vacri)

Allora era chiaro che il processo che dava luogo ai neutrini era:



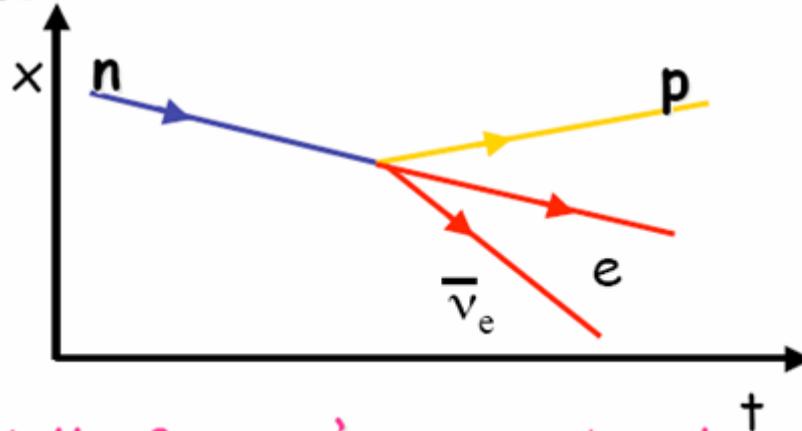
Si basa sul parallelo con un processo di carattere elettromagnetico in cui da un atomo eccitato



viene emessa radiazione elettromagnetica, cioè il fotone emesso nella diseccitazione.

Fermi ha l'intuizione di trasferire al nucleo atomico i concetti della fisica quantistica elaborati per spiegare le emissioni di quanti in conseguenza dei salti di e^{-} atomici tra un orbitale e l'altro. Il p e il n sono i "due stati quantici" di una stessa particella, il nucleone. Negli elementi radioattivi un nucleone si trasforma spontaneamente dallo stato di n a quello di p emettendo una coppia elettrone-neutrino.

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



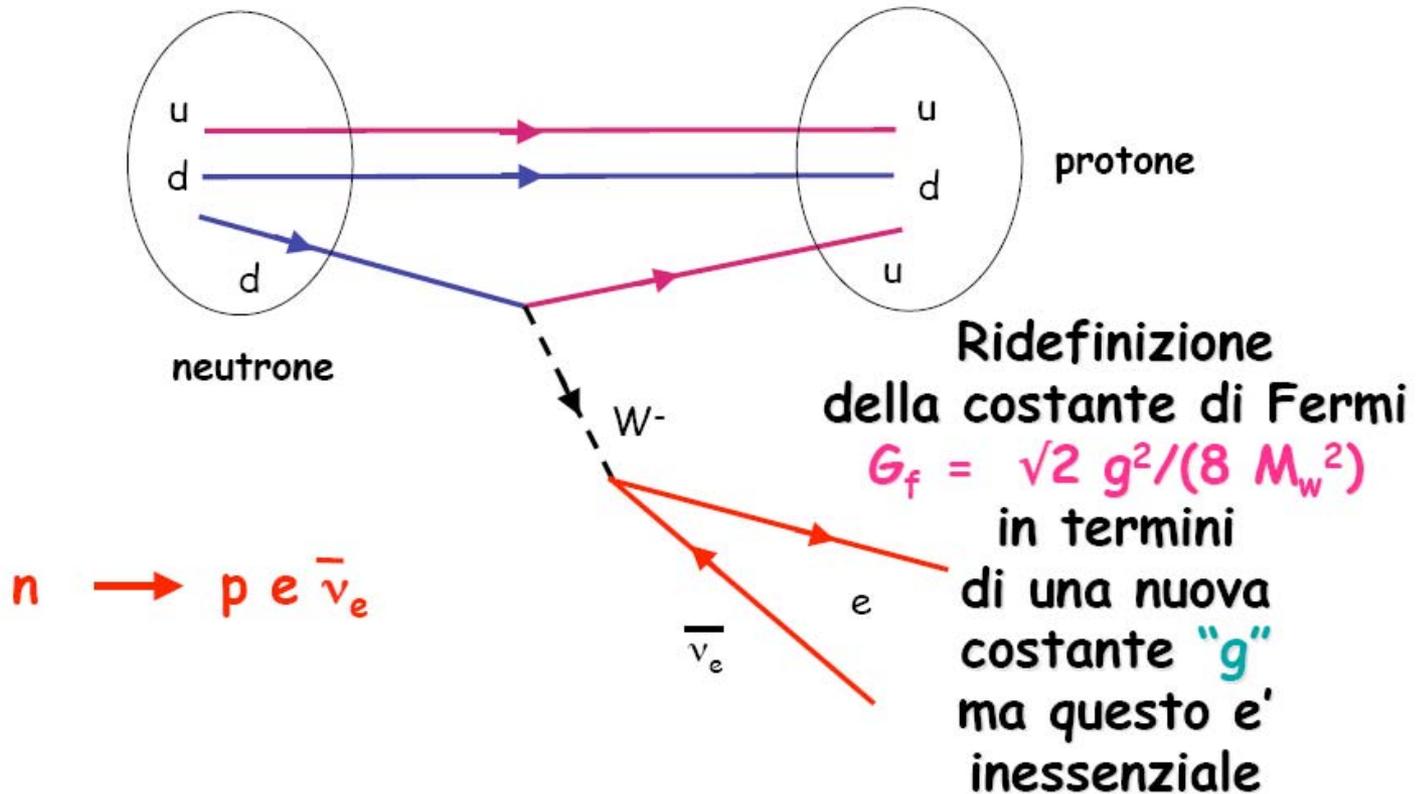
L'intensità della forza è proporzionale ad una quantità:

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

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!

(slide Assunta Di Vacri)

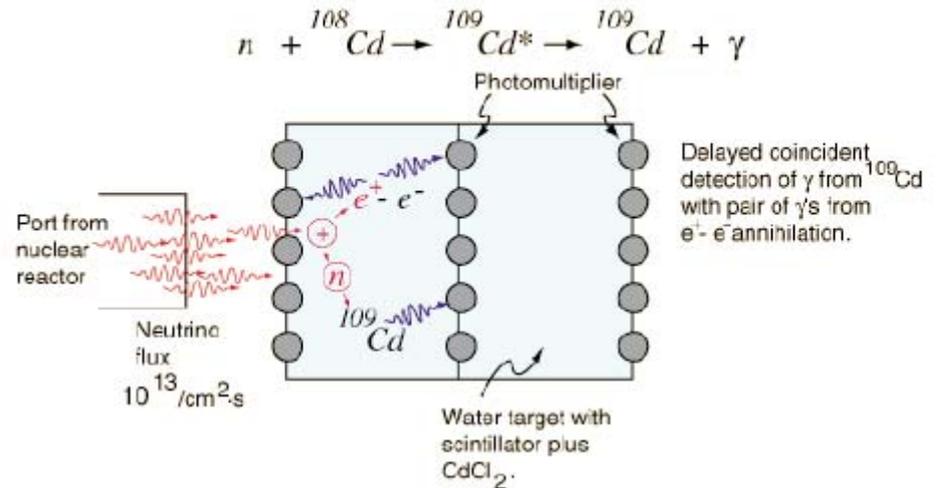
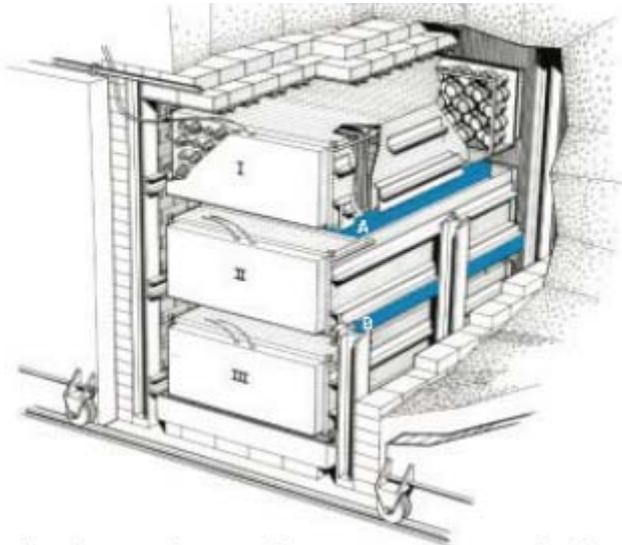
La QED nel decadimento beta...



(slide Assunta Di Vacri)

L'esperimento decisivo...

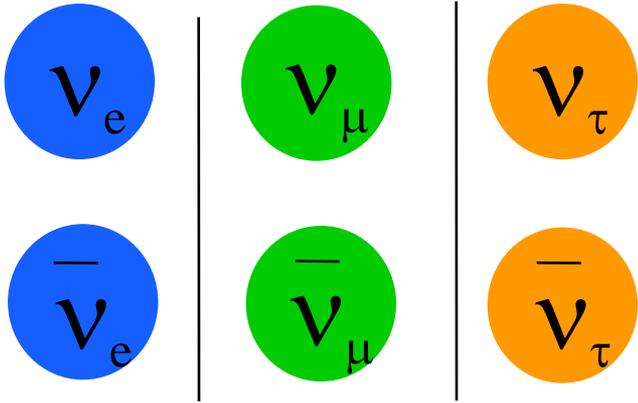
1956 Savannah River (South Carolina) F. Reines & C. Cowan



- 2 bidoni (A, B) con ~ 200 l di acqua con ~40 kg di CdCl₂ disciolto.:
- 3 contenitori di scintillatore organico liquido equipaggiati con 110 PMT
- 3 ν/h⁻¹;
- 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).

(slide Assunta Di Vacri)

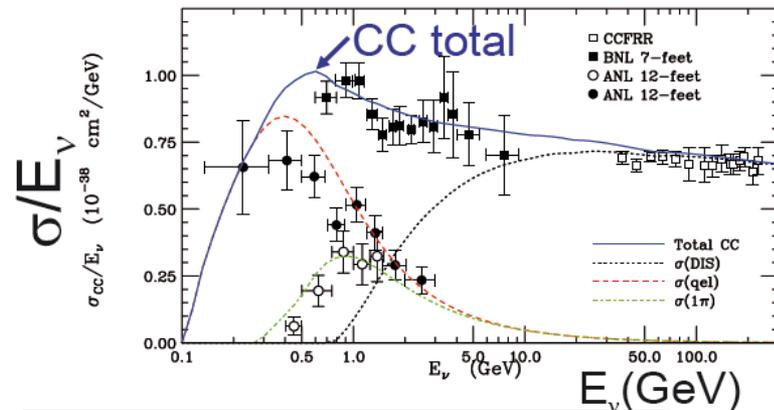


I Neutrini

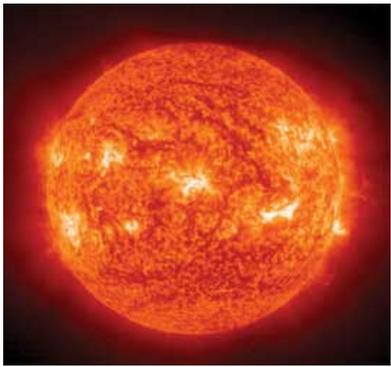
I neutrini esistono in 3 diversi tipi

I neutrini hanno carica elettrica nulla e una massa vicina allo zero. Sono state considerate particelle prive di massa fino alla scoperta delle cosiddette "oscillazioni di neutrini".

I neutrini sono tra le particelle più elusive. Essi possono passare attraverso la materia senza interagire o essere assorbiti. Questo rende la loro rivelazione estremamente difficile.



Neutrini di diversi tipi oscillano l'uno nell'altro mentre si propagano.
Neutrini e Antineutrini, sono la stessa particella ???

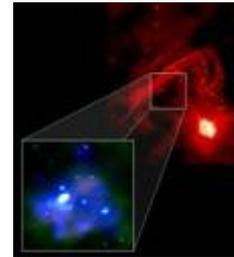


Neutrini Solari
Produzione: reazioni termonucleari
Energia: 0.1 - 18.8 MeV
 (Borexino-Icarus-GNO)



Neutrini Fossili
Produzione: Big Bang
Energia: < 1 miliardesimo dell'energia dei neutrini solari

Neutrini Atmosferici
Produzione: interazioni di raggi cosmici in atmosfera
Energia: 100 MeV - 10^6 GeV
 (MACRO- ~ OPERA-ICARUS)



Neutrini Astrofisici
Produzione: AGN, SN remnants, GRB, ...
Energia: 10^6 - 10^{11} GeV

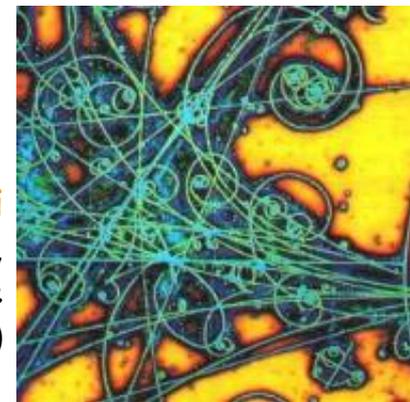


Neutrini da Supernova
Produzione: collasso del nucleo
Energia: diverse decine di MeV
 (~ Borexino-LVD-ICARUS)



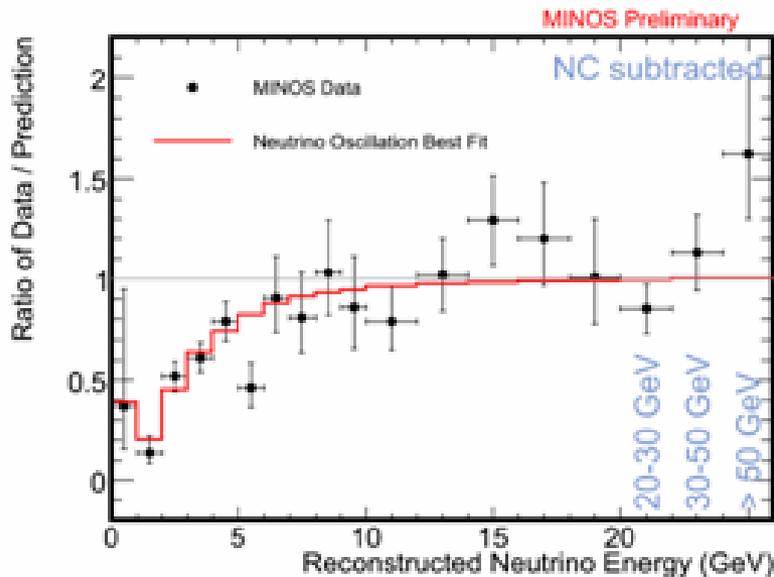
Neutrini Terrestri
Produzione: decadimenti radioattivi
Energia: MeV
 (Borexino)

Neutrini Artificiali
Produzione: reattori nucleari, acceleratori di particelle
 (Icarus-OPERA)

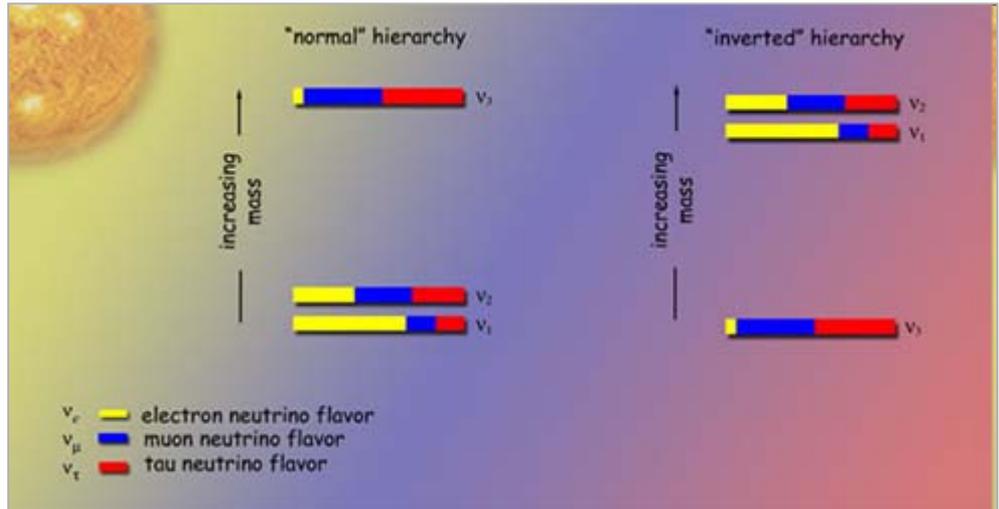


Il fenomeno delle oscillazioni dei neutrini

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta \sin^2(1.27 \delta M^2(\text{eV}^2) \frac{L(\text{km})}{E(\text{GeV})})$$

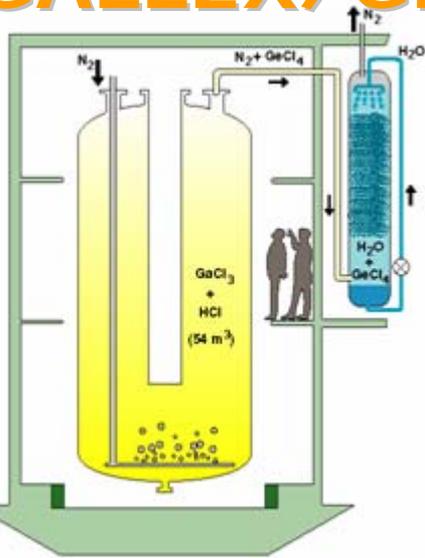


MINOS, esperimento LBL
(L=735km, <E> fino a 10 GeV),
conferma la "disappearance" dei
neutrini muonici.



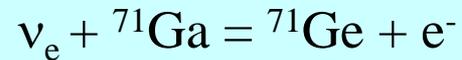
I neutrini si propagano in autostati di massa e si rivelano in autostati di sapore.

GALLEX/GNO: un risultato importante sui ν solari



SCOPO:

GALLEX è stato uno dei primi esperimenti a misurare il flusso di neutrini dal Sole dal 1991 al 1997, per poi diventare **GNO** con lo scopo di monitorare il flusso dei neutrini per un intero ciclo solare (11 anni). Concluso nel 2002.



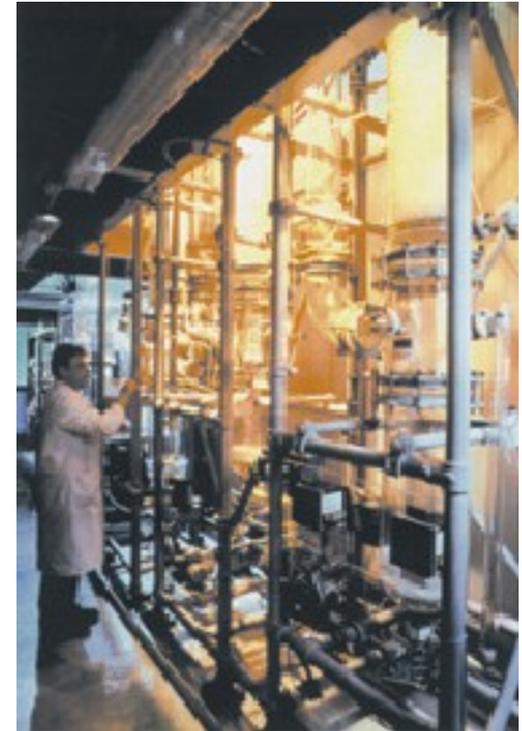
Dei 60 miliardi per cm^2 per secondo meno di un neutrino al giorno interagiva in GNO.

RIVELATORE:

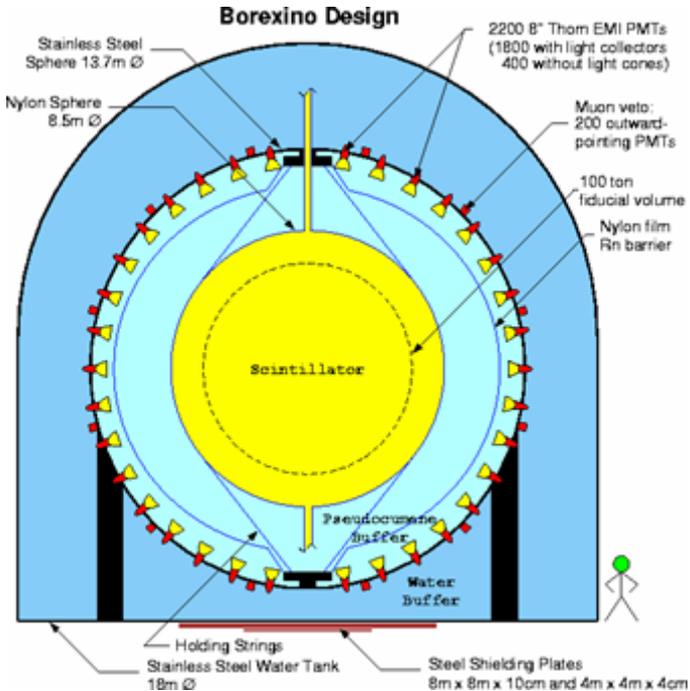
101 t di soluzione di GaCl_3 (30 t di Gallio) da cui ogni 28 gg venivano estratti gli atomi di Germanio formati per l'interazione dei ν solari con il Ga.

RISULTATO:

I ν solari rivelati sono circa il 55% del valore previsto dai modelli solari. Questo **deficit di neutrini solari** è stato spiegato con l'esistenza delle **oscillazioni** ($\nu_e \rightarrow \nu_\mu$) per cui i ν , che nascono di tipo elettronico nel Sole, cambiano tipo durante il percorso Sole-Terra, diventando non più rivelabili da GNO.



BOREXINO: un rivelatore per ν solari e non solo...



SCOPO:

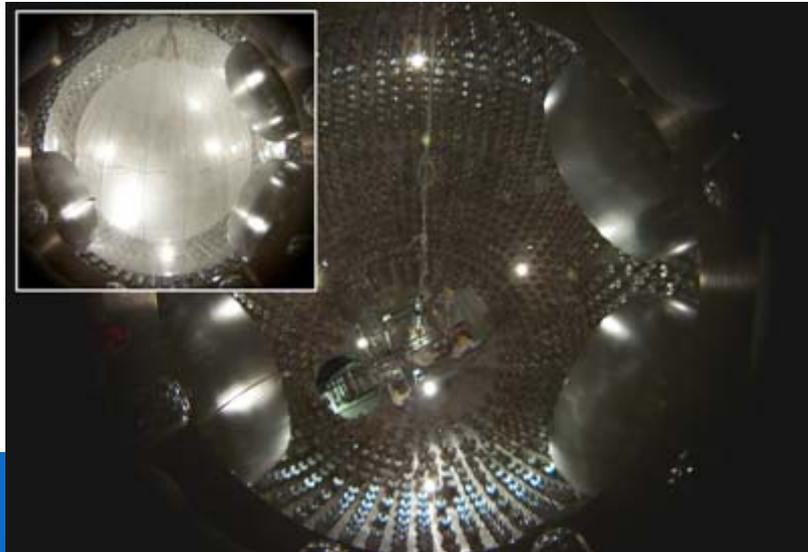
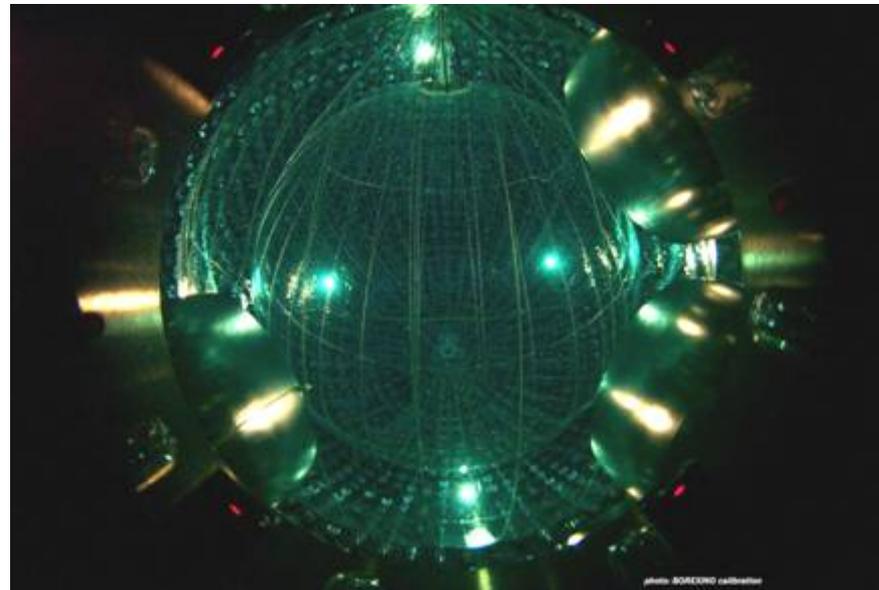
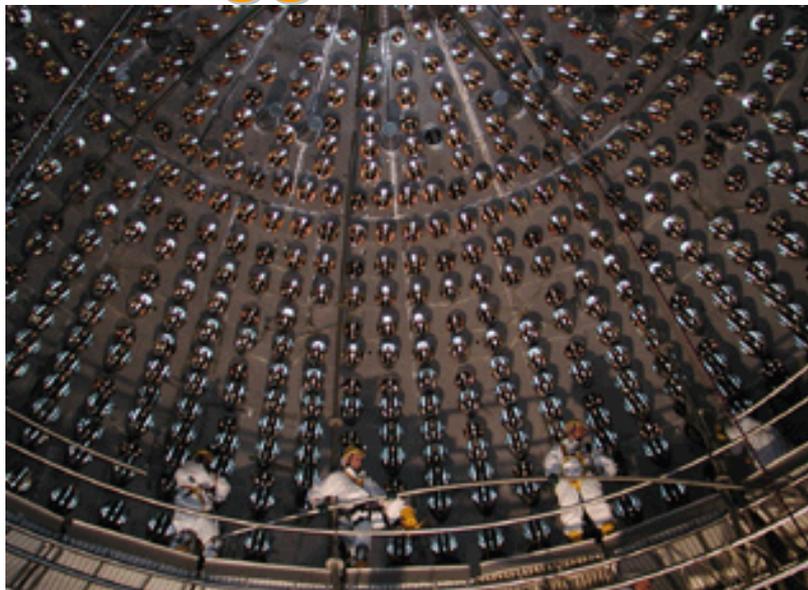
rivelazione in tempo-reale ν solari attraverso l'interazione in un liquido scintillatore ($\nu_e + e^- \rightarrow e^- + \nu_e$). In particolare questo rivelatore permette di studiare i neutrini detti del ${}^7\text{Be}$, ($e^- + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$). Borexino rivela circa **30 neutrini al giorno**. E' inoltre capace di rivelare i ν emessi nell'esplosione di una supernova e i ν emessi dalla Terra.

RIVELATORE:

Il cuore del rivelatore è un pallone di nylon, di diametro 8.5 m, contenente **300 t** di liquido scintillatore capace di emettere luce se attraversato da particelle cariche. Questo pallone è contenuto in una sfera interna di acciaio, di diametro 13.7 m, che fa da supporto ai **2200 fotomoltiplicatori** che guardano la luce emessa dallo scintillatore.

All'esterno della sfera, **2400 t** di acqua ultrapura costituiscono uno schermo contro la radioattività esterna. **Il rivelatore è stato completato il 15 Maggio 2007.**

Un viaggio all'interno della sfera di BOREXINO



Large Volume Detector



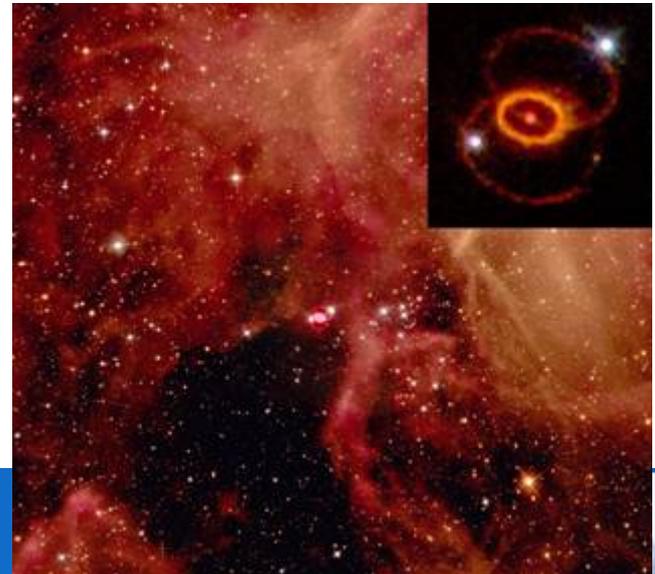
SCOPO:

L'esperimento LVD ha come scopo principale di rivelare il segnale di neutrini emesso da un'esplosione di **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**.

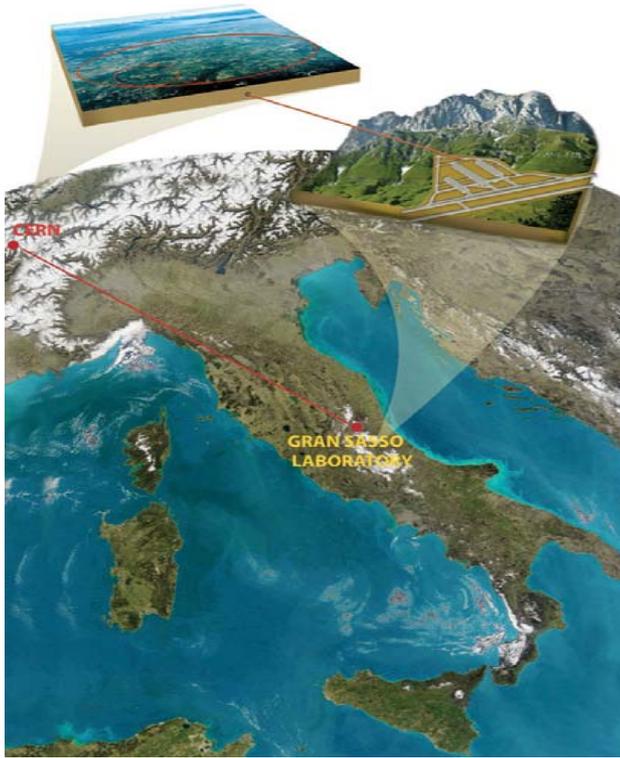
RIVELATORE:

Il rivelatore contiene **1000 t** di scintillatore liquido contenuto in 840 contatori, ciascuno da 1.5 t. Nel caso in cui una Supernova esplodesse nel centro della nostra Galassia (8.5 kpc), LVD sarebbe in grado di rivelare 300-400 v. Il rivelatore è in funzione dal **1992**.

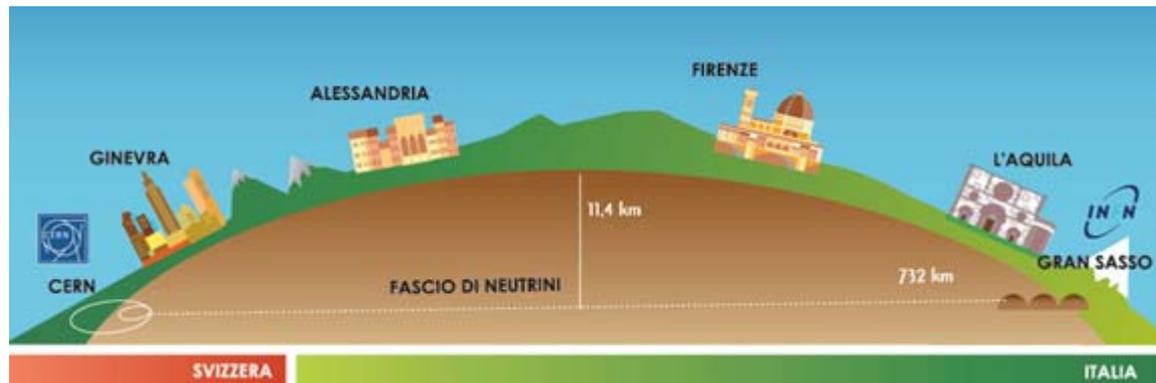
La frequenza attesa di esplosioni di Supernova nella nostra Galassia è di 2-4 per secolo. L'ultima osservazione di una Supernova risale al 1987 (in realtà avvenuta in una Galassia vicina, Grande Nube di Magellano).



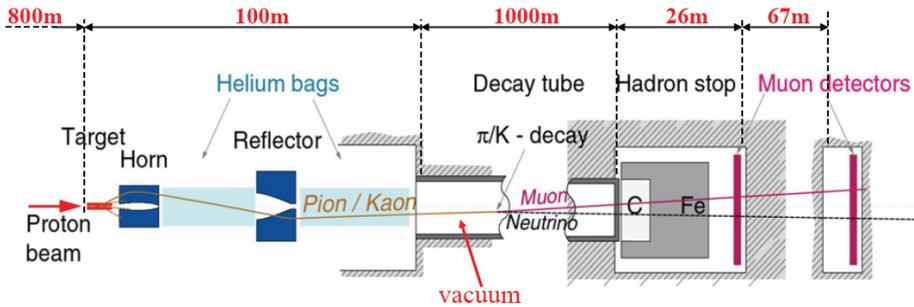
CNGS: CERN Neutrino to Gran Sasso



Scopo: conoscere la natura dei neutrini attraverso l'osservazione ai LNGS dell'apparizione dei neutrini tau in un fascio di neutrini muonici. Questi ultimi, infatti, inviati da un acceleratore distante 732 km al CERN, durante il loro percorso fino ai LNGS oscillano e si trasformano in neutrini di tipo tau.



verso i rivelatori
OPERA e ICARUS



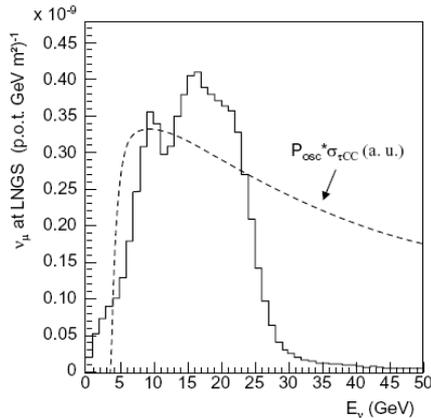
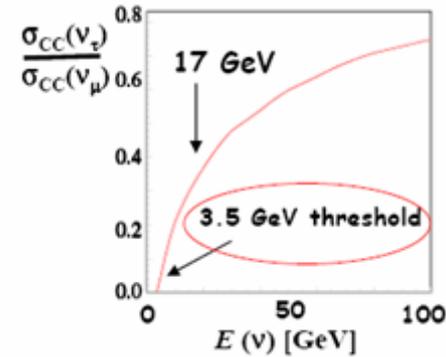
Principali caratteristiche del CNGS:

1. Distanza dal rivelatore: $L=730$ km
2. 4.5×10^{19} protoni da 400 GeV su bersaglio per anno (duty cycle 200 giorni)
3. $\langle E_{\nu_\mu} \rangle = 17$ GeV
4. $(\nu_e + \bar{\nu}_e) / \nu_\mu = 0.87\%$; contaminazione di ν_τ trascurabile
5. $L/E = 43$ Km/GeV

$$N_\tau = N_A M_D \int \phi_{\nu_\mu}(E) P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau}(E) \sigma_{\nu_\tau}^{CC}(E) \varepsilon(E) dE$$

(NB: M_D è la massa del rivelatore normalizzata al numero di massa)

$$P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau} = \sin^2(2\theta) \sin^2(1.27 \Delta m^2 \frac{L}{E}) \approx 1.7 \times 10^{-2} \quad \begin{array}{l} \bullet \langle E_{\nu_\mu} \rangle = 17 \text{ GeV} \\ \bullet \text{full mixing} \end{array}$$



Interazioni di CNGS ν_μ

	OPERA
	1.35 kton
$\nu_\mu CC$	19572
$\nu_\mu NC$	5880
$\bar{\nu}_\mu CC$	411
$\nu_e CC$	156
$\bar{\nu}_e CC$	13
Total	26032

Interazioni di ν_τ oscillati

Δm^2	OPERA
$1 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$	20
$2 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$	80
$3 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$	180

Il fascio di ν_μ è ottimizzato per studiare la “ ν_τ appearance” attraverso la rivelazione del τ nella regione dei parametri: $\Delta m^2 \approx 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ e $\sin^2 2\theta \approx 1.0$. La soglia di produzione del τ $E_\tau = 3.5$ GeV

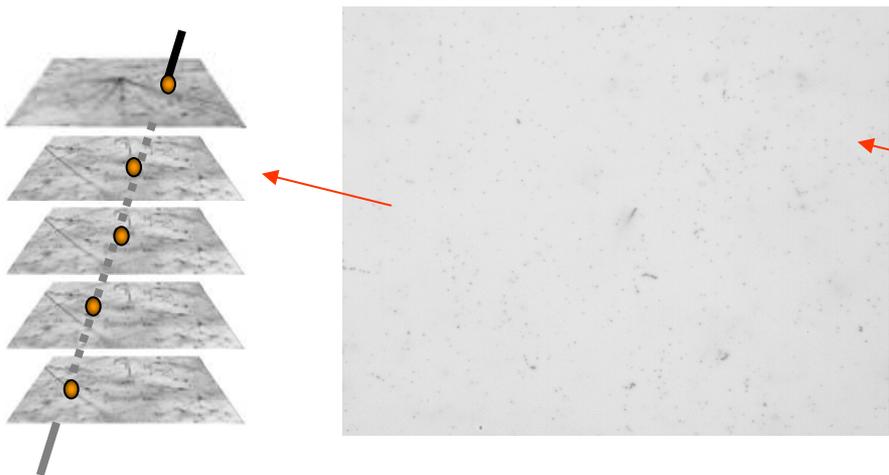
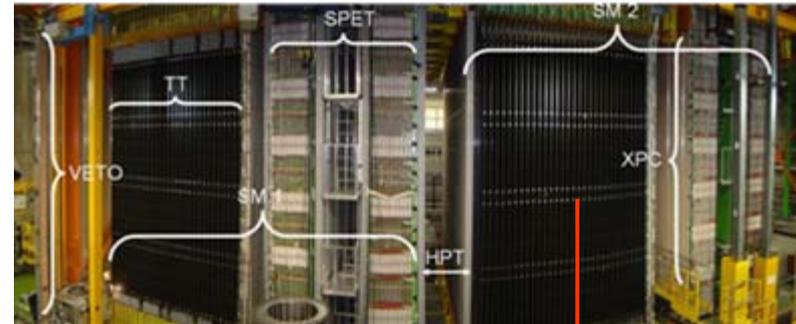
Ulteriori 10k eventi nei magneti

Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus

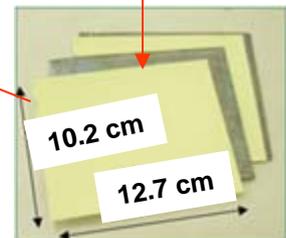
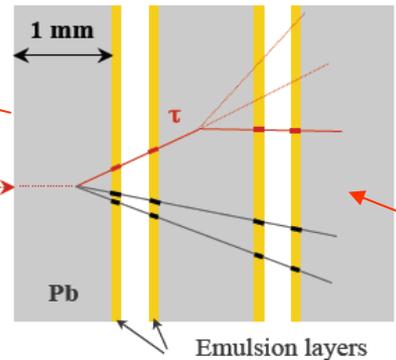
RIVELATORE

Il rivelatore OPERA cercherà le oscillazioni $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ nel fascio di neutrini provenienti dal CERN, "fotografando" la particella τ "emulsioni nucleari".

2 super-moduli per un totale di 1300 t di massa (circa 160000 mattoni): ciascun SuperModulo è costituito da 31 piani di rivelatori a scintillatore plastico e da uno spettrometro di muoni costruito mediante lastre di ferro magnetizzate intervallate differenti tipi di rivelatori.



Interazione nel brick

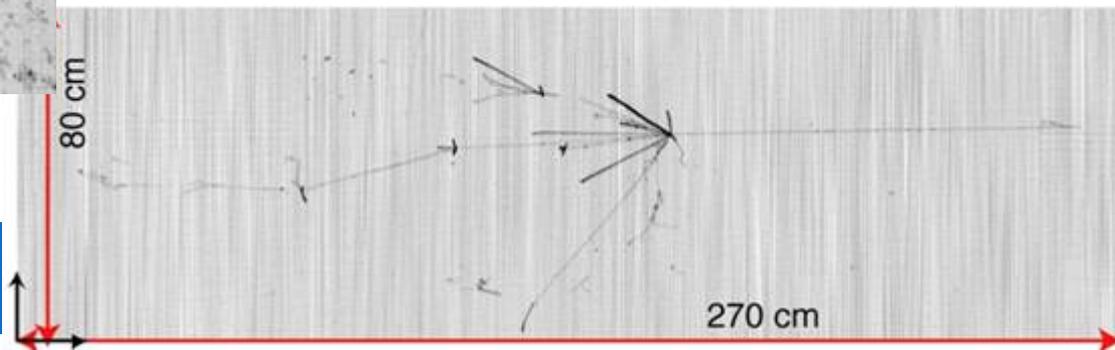
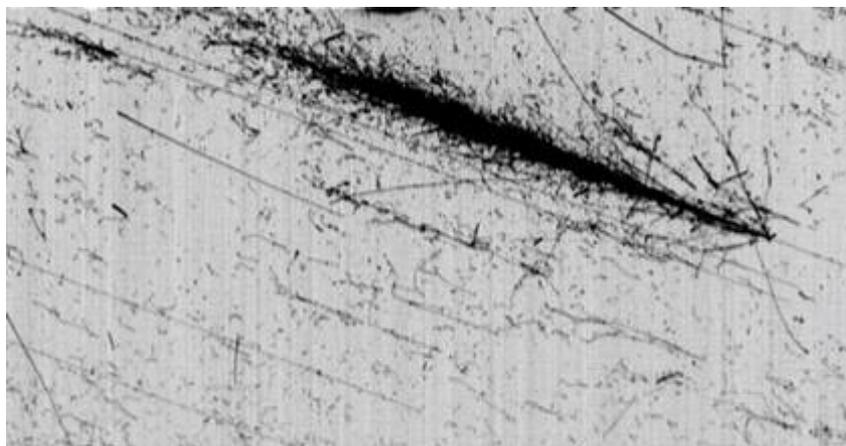


57 fogli di emulsioni nucleari intervallate con 56 fogli di piombo.

Imaging Cosmic And Rare Underground Signals

RIVELATORE:

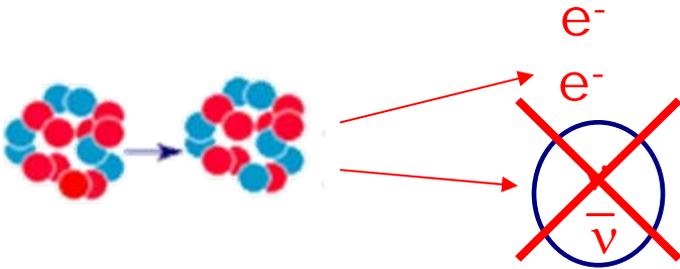
E' un esperimento che usa argon liquido. Si può considerare una camera a bolle elettronica ed è stato progettato per fornire il maggior numero di informazioni (risoluzione spaziale, identificazione del tipo di particella e ricostruzione 3D dell'evento) con la possibilità di avere contemporaneamente una lettura elettronica dell'evento.



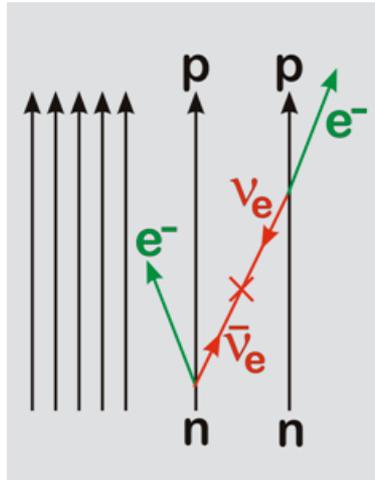
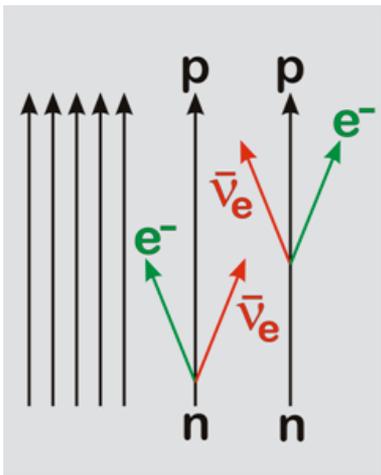
Decadimenti rari - Decadimento $\beta\beta$

La condizione di "silenzio cosmico" permette di studiare decadimenti estremamente rari tra cui il $\beta\beta$: un processo rarissimo (vita media fino a 10^{21} anni!) che può avvenire in un nucleo.

2 neutroni si trasformano simultaneamente in 2 protoni, emettendo 2 elettroni e 2 antineutrini.



Ancora più raro ed interessante per i fisici è il decadimento doppio beta senza emissione di neutrini perché permette di avere informazioni **ancora sconosciute** sulla natura del neutrino.



RIVELAZIONE SPERIMENTALE: questo genere di evento può essere osservato solo se il singolo decadimento beta è energeticamente proibito o enormemente soppresso.

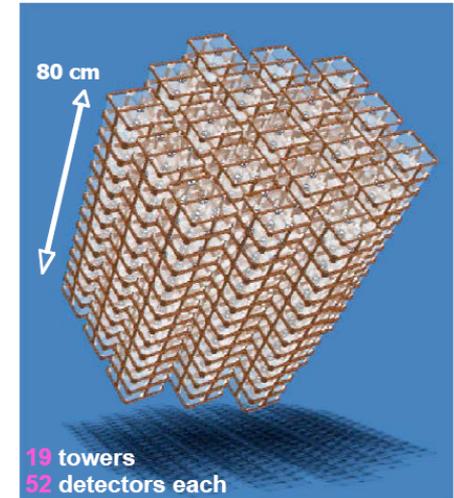
CUORE

SCOPO:

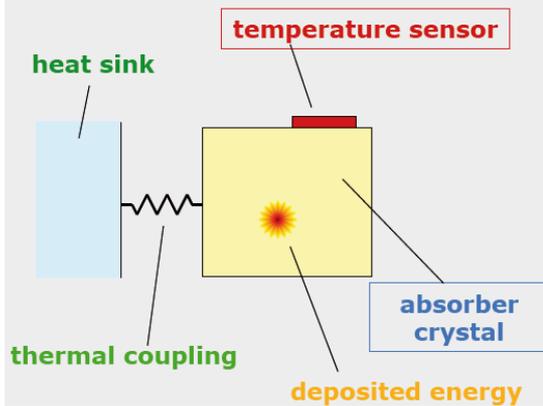
Rivelare il decadimento $\beta\beta$ del ^{130}Te utilizzando 1000 rivelatori criogenici di TeO_2 , per un totale di 760 kg. Un prototipo dell'esperimento CUORE, detto CUORICINO, è già in funzione presso i laboratori sotterranei.



988 detectors (cylindrically shaped)
 $M = 741 \text{ kg TeO}_2 \rightarrow 204 \text{ kg Te}$

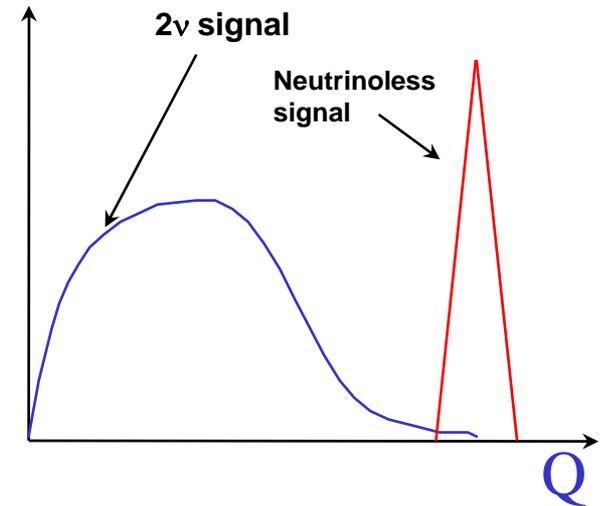


Bolometric technique:

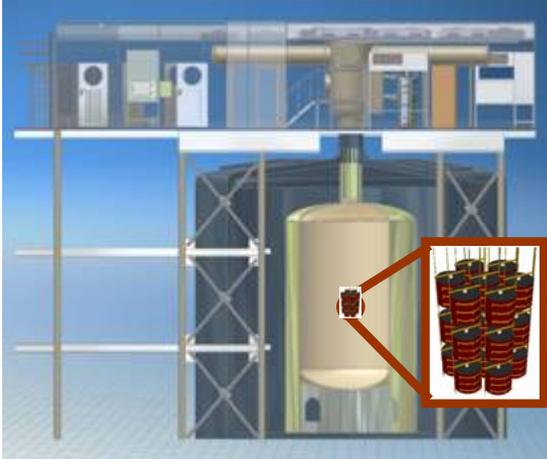


$$\Delta T(t) = \frac{\Delta E}{C} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

$$C(T) = \beta \frac{m}{M} \left(\frac{T}{\Theta_D}\right)^3$$



GERmanium Detector Array



SCOPO:

Studiare il decadimento $\beta\beta$ senza neutrini dell'isotopo ^{76}Ge approfondendo lo studio fatto dall'esperimento Heidelberg-Moscow, che è stato in funzione in questi laboratori per più di 10 anni e che fino ad ora rimane il più sensibile al mondo in questo campo di ricerca.

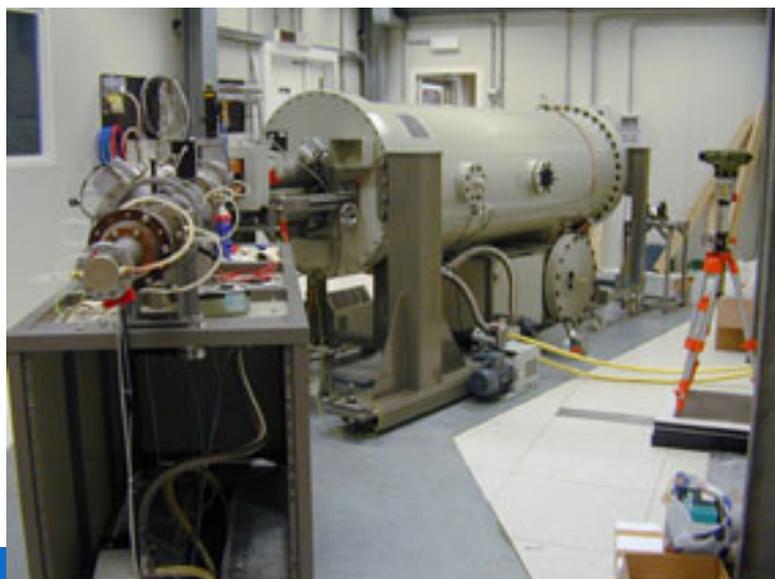
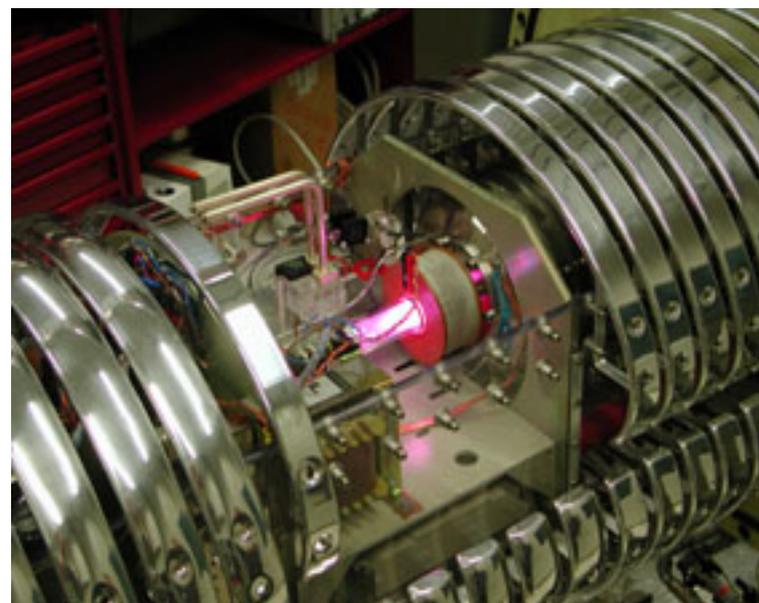
GERDA, utilizzerà rivelatori a semiconduttore arricchiti nell'isotopo ^{76}Ge (in parte quelli già usati da HdM) che funzioneranno immersi in una schermatura criogenica. Dovrebbe iniziare a funzionare entro il 2009.



LUNA: come riprodurre in un laboratorio ciò che avviene nelle stelle

SCOPO:

Riprodurre in un laboratorio sotterraneo le reazioni nucleari che avvengono nelle stelle e studiarle ad energie il più possibile simili a quelle reali. Sono state studiate reazioni, con risultati unici al mondo, che hanno permesso di dimostrare che l'Universo è più vecchio di quanto finora conosciuto.



RIVELATORE:

L'esperimento LUNA utilizza un acceleratore che funziona a 400 kV. Per studiare i prodotti delle reazioni si usano rivelatori a germanio e silicio.

La Materia Oscura

Ciò che vediamo con i telescopi tradizionali (le stelle, i pianeti, le galassie, i gas intergalattici ...) rappresenta solo una piccola parte (~ 5%) della materia che compone l'Universo. La gran parte di essa non emette luce e per questo viene detta oscura. Non sappiamo ancora in cosa consista questa **materia oscura**: potrebbe essere costituita di particelle **esotiche** che non abbiamo ancora scoperto.



WIMP (Weakly Interacting massive Particles)
ovvero **Particelle massive debolmente interagenti**
che costituirebbero un alone oscuro intorno alla
nostra e ad altre Galassie

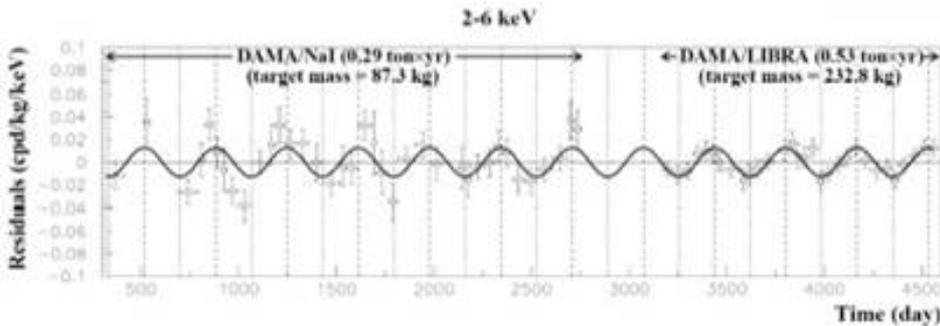
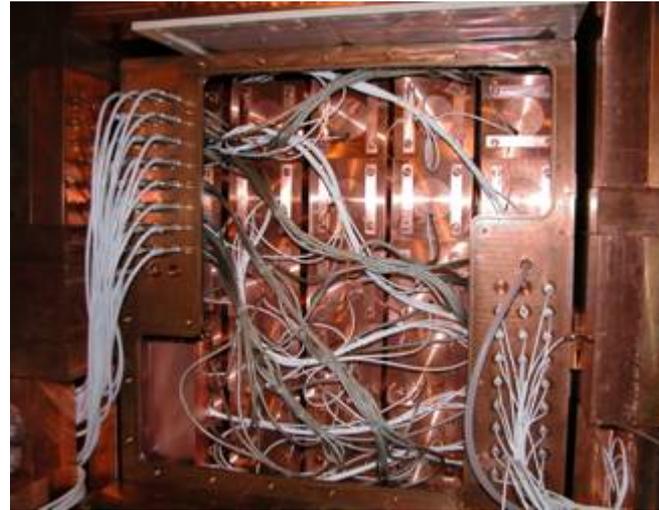
Queste particelle, nate in seguito al Big Bang, avrebbero una massa elevata (50, 100 o più volte la massa del protone) ma carica elettrica nulla. La loro capacità di interazione con la materia è molto piccola e questo le rende difficili da rivelare. Nonostante questo molti esperimenti in tutto il mondo sono alla ricerca dei WIMP.

Dark MATter search

SCOPO:

L'esperimento DAMA si propone di rivelare l'esistenza delle particelle WIMP nel nostro alone galattico, tramite l'osservazione dell'effetto chiamato **modulazione annuale**.

DAMA/NaI ha completato la presa dati nel luglio 2002. A partire da marzo 2003 è in funzione il nuovo apparato DAMA/LIBRA.



RIVELATORE:

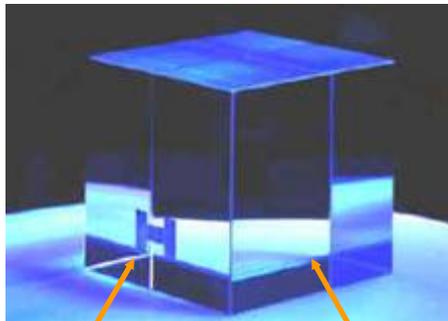
Il rivelatore DAMA consisteva inizialmente di **100 kg** di cristalli di ioduro di sodio NaI(Tl), dal 2003 funziona con **250 kg di NaI**.

E' l'unico esperimento al mondo ad essere sensibile all'effetto di **modulazione annuale**.

Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers

SCOPO:

L'esperimento CRESST è in grado di rivelare le interazioni delle particelle WIMP misurando il piccolo aumento di temperatura che l'energia del WIMP fa avvenire in un cristallo. Per fare questo, il cristallo deve trovarsi ad una temperatura di solo 15 millesimi di grado superiore allo zero assoluto ($- 273 \text{ }^\circ\text{C}$).



Termometro applicato sulla superficie

Cristallo di zaffiro

RIVELATORE:

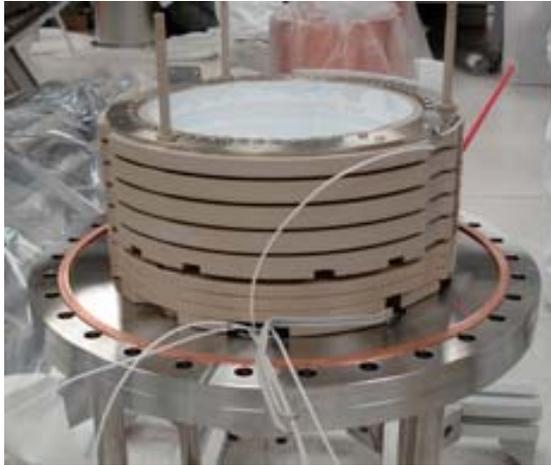
Nella prima fase di CRESST sono stati utilizzati come rivelatori dei cristalli di zaffiro di circa 260 g. In seguito sono stati sviluppati nuovi tipi di cristalli, fatti di tungsteno e calcio, che hanno la proprietà di emettere luce se una particella WIMP interagisce al loro interno.



Wimp ARgon Programme

SCOPO:

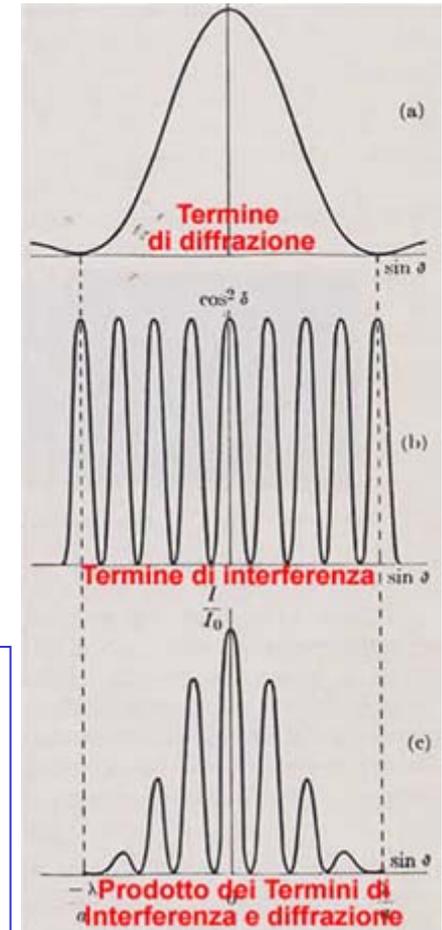
Rivelare la materia oscura studiando la luce prodotta dall'impatto delle particelle WIMP in un volume di Argon mantenuto nella fase liquida a $-186\text{ }^{\circ}\text{C}$. Il montaggio del rivelatore sta per iniziare nella sala B. Un prototipo da 2.3 litri sta funzionando dal 2004.

**RIVELATORE:**

Un criostato da 100 litri di Argon liquido in cui l'interazione della WIMP produce l'emissione di luce e la produzione di coppie ione-elettrone.



Non solo particelle, ma anche geofisica...



Osservando la deformazione della crosta terrestre è possibile studiare i terremoti.

Lo spostamento relativo delle due braccia dell'interferometro (alla Michelson) dovuto a movimenti tellurici può essere misurato osservando la figura di interferenza prodotta sullo schermo rivelatore dai due fasci di luce laser coerente.

Ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso, fisici provenienti da ogni parte del mondo lavorano insieme per capire e svelare i misteri del nostro Universo!

Gli esperimenti condotti in questi vent'anni di attività hanno dato e continueranno a dare importantissimi risultati su:

- comprensione del fenomeno delle "oscillazioni dei neutrini"
- ricerca di Materia Oscura
- astrofisica del Sole e delle stelle
- fisica dei Raggi Cosmici



***Grazie per l'attenzione e
buona visita a tutti!***

Eravamo giovani ed
eravamo precari...

Adriano Di Giovanni
Francesco Di Pompeo
Assunta Di Vacri
Nicola Rossi