

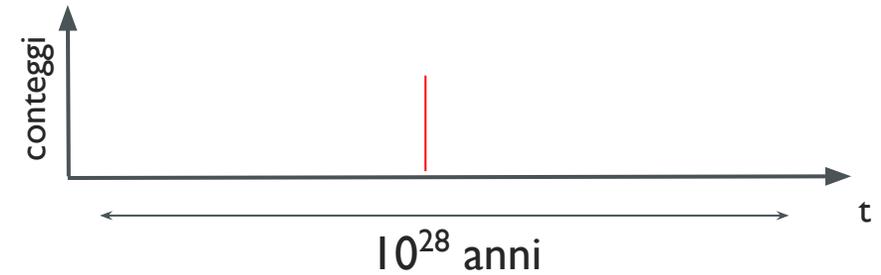
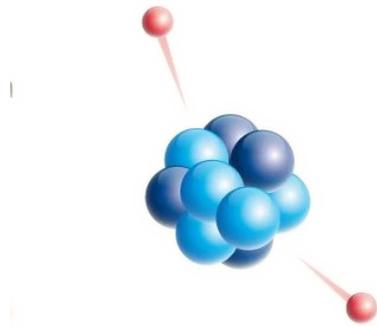


**FISICA UNDERGROUND, I LABORATORI
DEL GRAN SASSO E LA SFIDA DI CUPID**

LA FISICA UNDERGROUND E DEGLI EVENTI RARI

Misura di un processo con $T_{1/2} > 10^{27}$ anni

Se abbiamo 1 solo nucleo sotto osservazione....

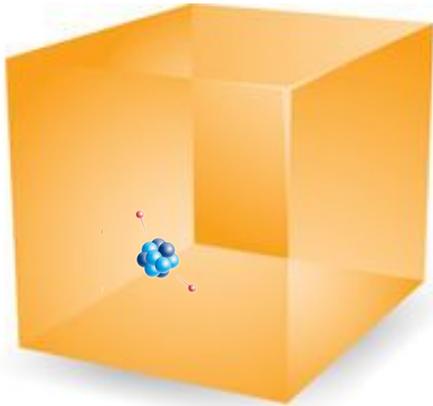


Un po' scomodo....
E non restituisce informazioni su $T_{1/2}$
(decadimento processo stocastico)

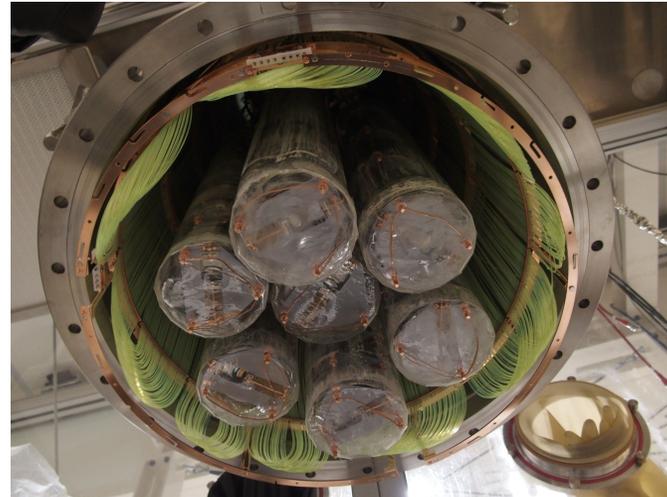
LA FISICA UNDERGROUND E DEGLI EVENTI RARI

Misura di un processo con $T_{1/2} > 10^{27}$ anni

Se abbiamo $\sim 10^{27}$ nuclei sotto osservazione....



100 kg (^{100}Mo) = $6 \cdot 10^{26}$ nuclei
Massa rivelatore $\gg 100$ kg

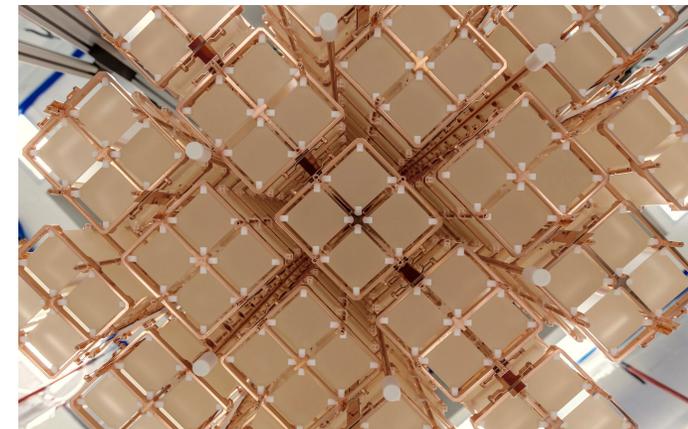


GERDA

35.6 kg di Ge
(arricchimento in ^{76}Ge a 86%)
64 m³ di Ar liquido
590 m³ di acqua ultrapura

CUORE

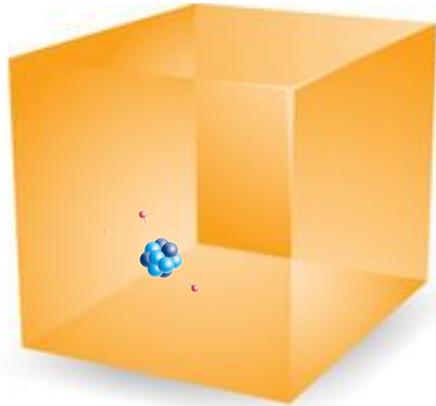
741 kg di TeO_2 = 206 kg di ^{130}Te
Massa a $T < 4\text{K}$ = 16000 kg



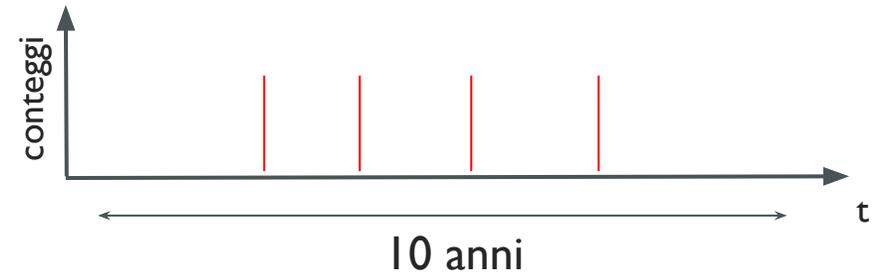
LA FISICA UNDERGROUND E DEGLI EVENTI RARI

Misura di un processo con $T_{1/2} > 10^{27}$ anni

Se abbiamo $\sim 10^{27}$ nuclei sotto osservazione....



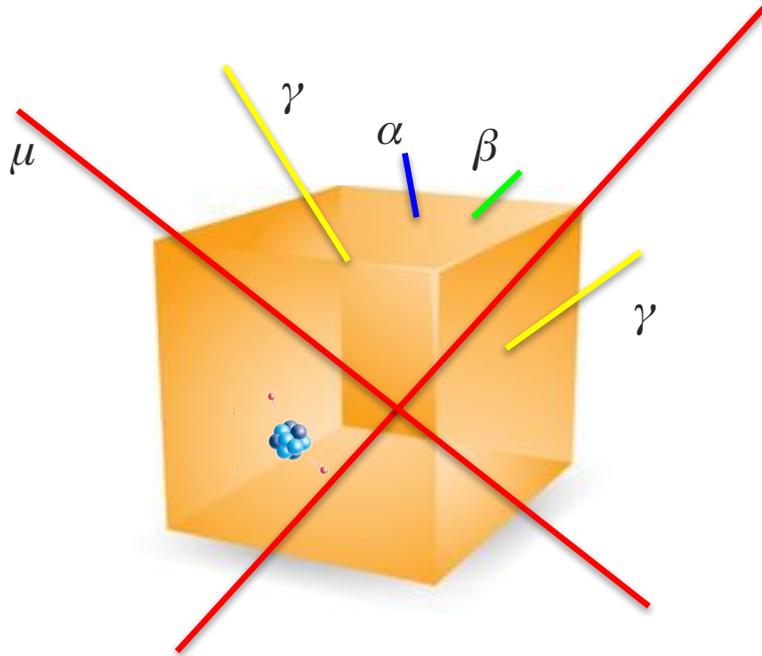
100 kg (^{100}Mo) = $6 \cdot 10^{26}$ nuclei
Massa rivelatore \gg 100 kg



Molto meglio, ma ...

LA FISICA UNDERGROUND E DEGLI EVENTI RARI

Misura di un processo con $T_{1/2} > 10^{27}$ anni



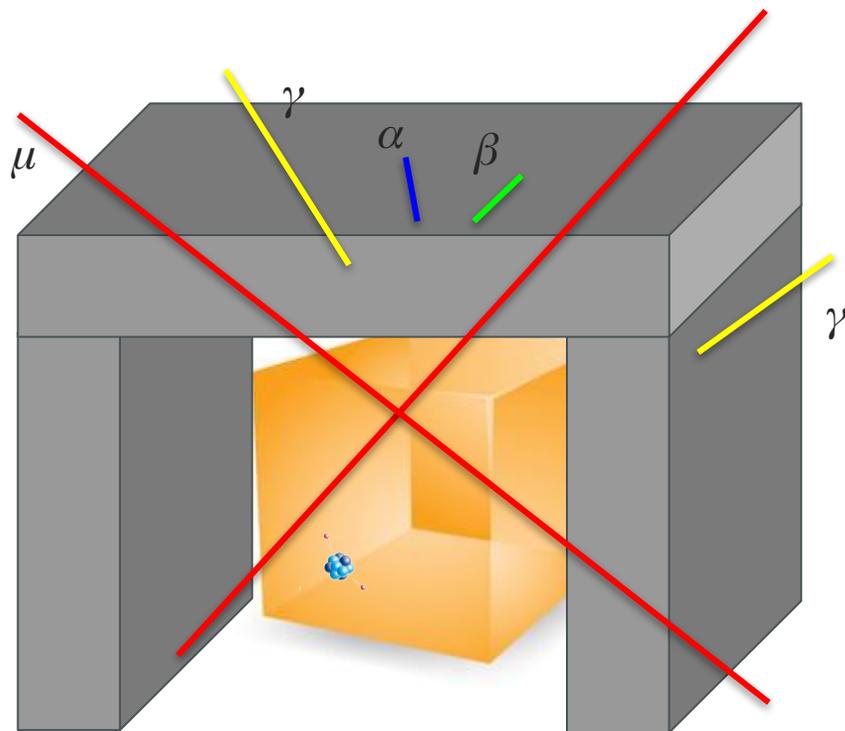
Molto meglio, ma ...
RADIOATTIVITA' AMBIENTALE

Numero eventi spuri \propto M rivelatore

LA FISICA UNDERGROUND E DEGLI EVENTI RARI

Misura di un processo con $T_{1/2} > 10^{27}$ anni

Schermature e selezione dei materiali per ridurre il numero di eventi che possono 'simulare' l'evento cercato



LA FISICA UNDERGROUND E DEGLI EVENTI RARI

Schermature

Pb, H₂O, attive, ...



Pb
romano

Selezione materiali

Rivelatori
HpGE



NAA

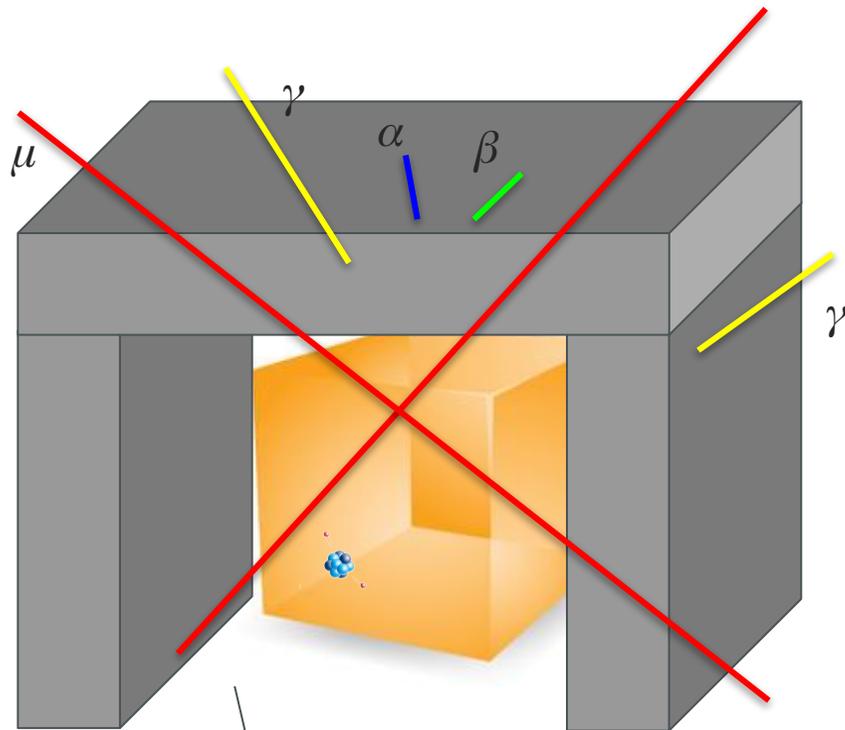
Costruzione in camera pulita



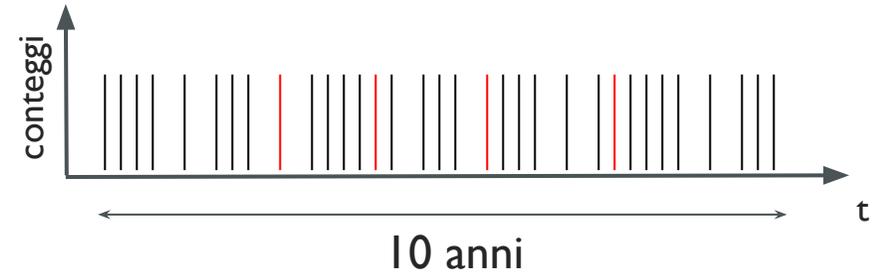
LA FISICA UNDERGROUND E DEGLI EVENTI RARI

Misura di un processo con $T_{1/2} > 10^{27}$ anni

Schermature e selezione dei materiali per ridurre il numero di eventi che possono 'simulare' l'evento cercato



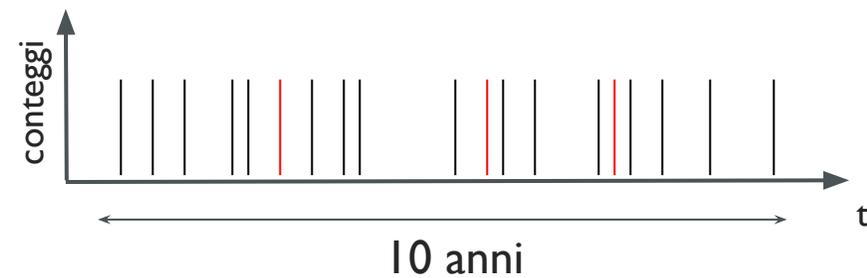
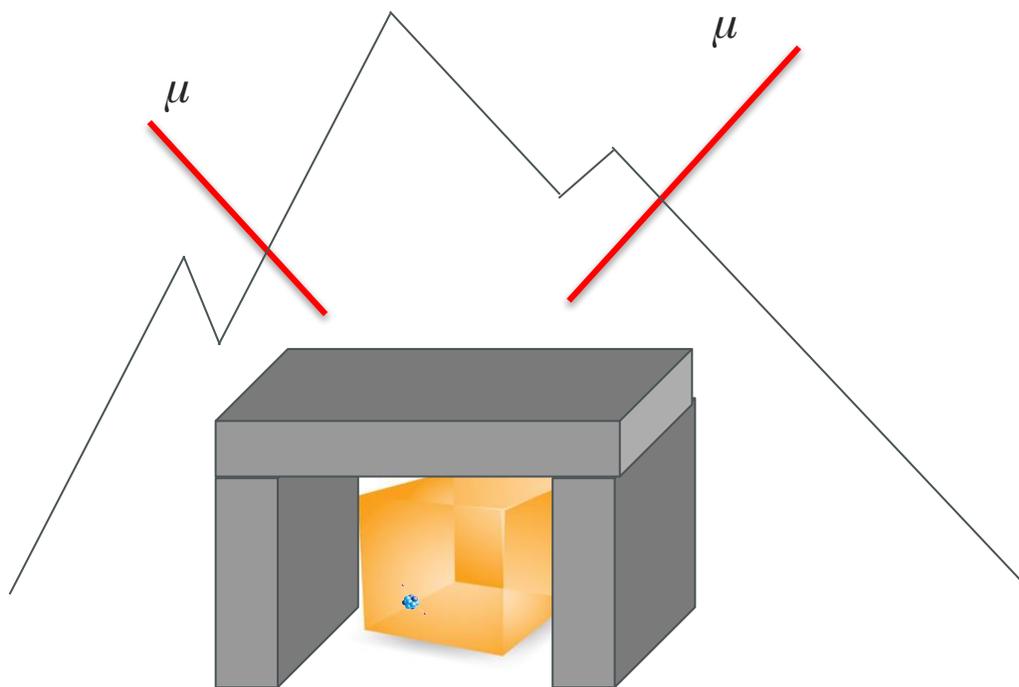
a livello del mare
 $\sim 10^{-2} \mu/\text{cm}^2/\text{s} \rightarrow 5 \cdot 10^5 \mu/\text{cm}^2/\text{y}$



Molto meglio, ma non sufficiente ...
richiesto $B < 10^{-3} \text{ c/keV/kg/y}$

LA FISICA UNDERGROUND E DEGLI EVENTI RARI

Misura di un processo con $T_{1/2} > 10^{27}$ anni

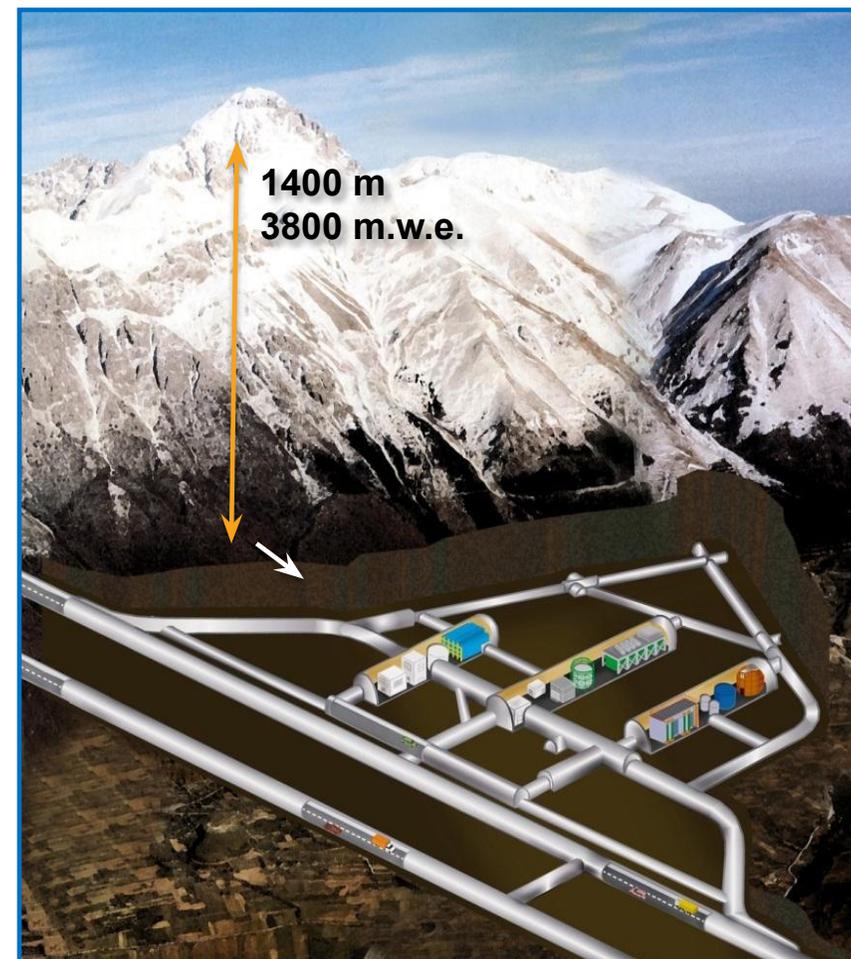


Molto molto meglio ...

I LABORATORI NAZIONALI DEL GRAN SASSO

Tra i più vasti ed avanzati laboratori sotterranei del pianeta:

- 1400 m di roccia sovrastante (3.8 Km.w.e.)
- Riduzione del flusso di μ : 10^6
 - Flusso di $\mu \sim 1 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$
- Superficie: $17\,800 \text{ m}^2$
- Volume: $180\,000 \text{ m}^3$
 - Le **tre sale sperimentali** misurano circa 100 m di lunghezza, 20 m di larghezza e 18 m di altezza



I LABORATORI NAZIONALI DEL GRAN SASSO

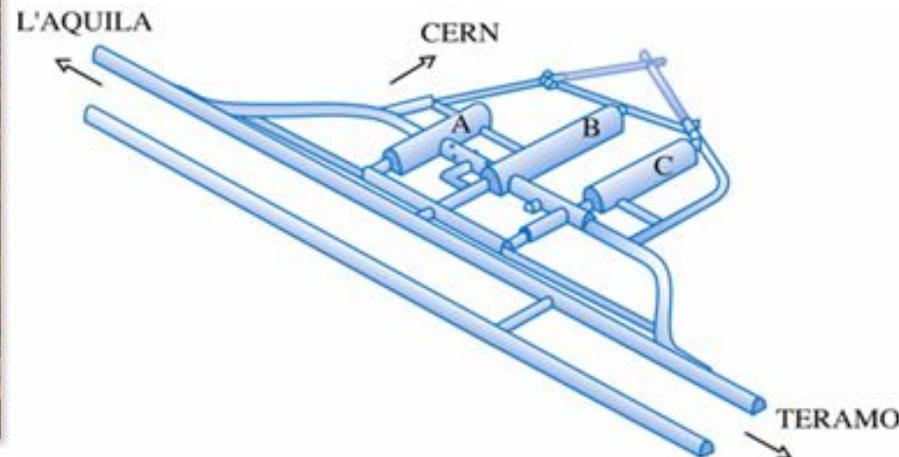
- 1979 → proposta al Parlamento italiano del progetto di un grande laboratorio sotterraneo all'interno del tunnel autostradale del Gran Sasso (allora in costruzione).
- 1982 → approvazione da parte del Parlamento.
- 1987 → la costruzione è completata.
- 1989 → il 1° esperimento sotterraneo inizia la presa dati.



Laboratori esterni



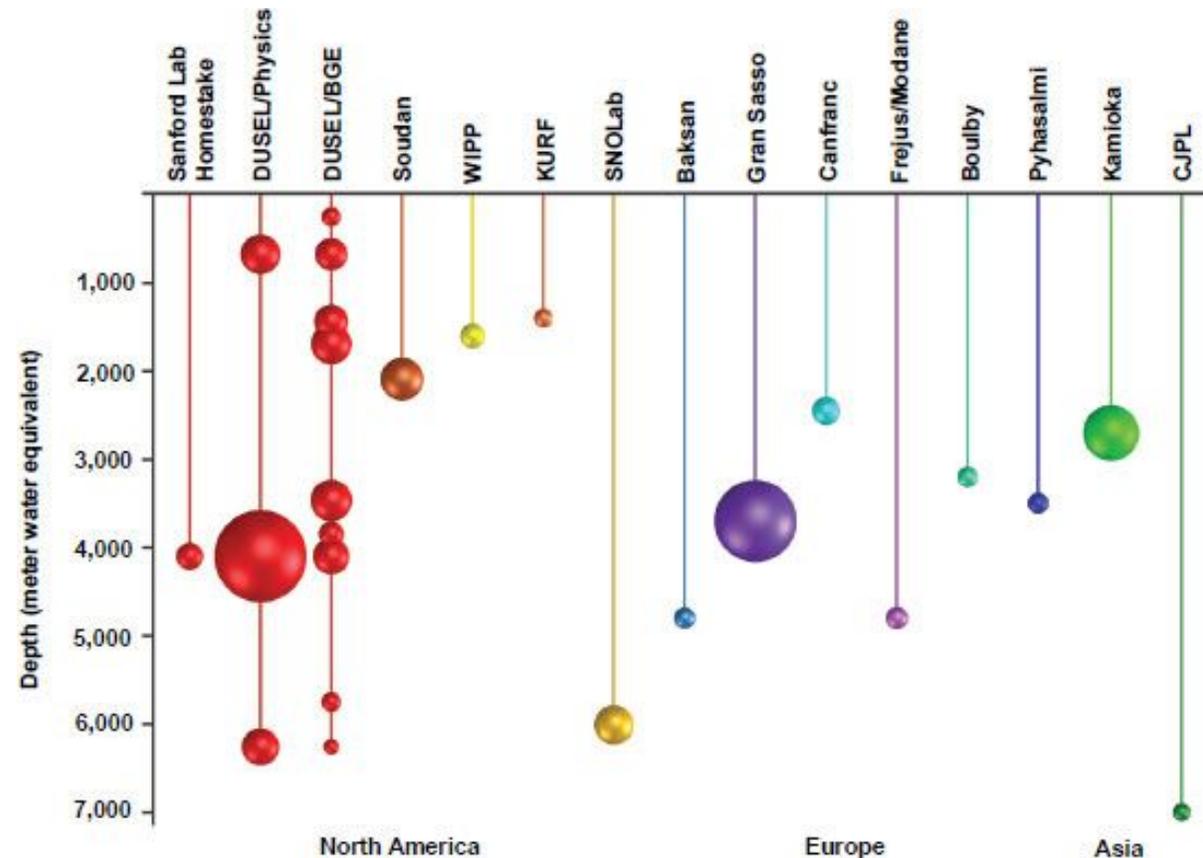
Laboratori sotterranei



I LABORATORI NAZIONALI DEL GRAN SASSO

Tra i più vasti ed avanzati laboratori sotterranei del pianeta:

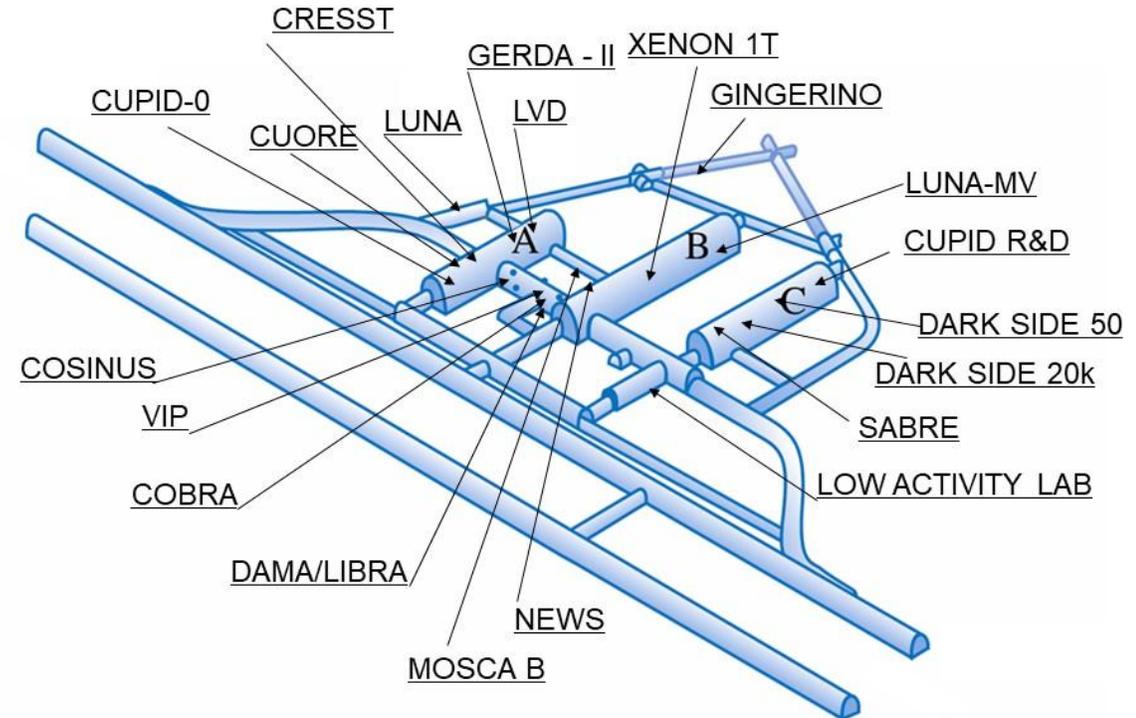
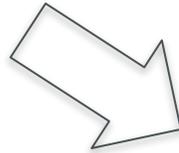
- Tra i più grandi al mondo
 - capacità di ospitare numerosi esperimenti in contemporanea
- Di facile accesso
 - ingresso a livello autostradale, anche per mezzi di grandi dimensioni.



I LABORATORI NAZIONALI DEL GRAN SASSO

Fisica Sotterranea ai LNGS

- Neutrini
 - BOREXINO, LVD, **GERDA-II**, **CUORE**, **CUPID**, COBRA, ...
- Materia Oscura
 - DAMA/LIBRA, DARKSIDE-50, XENONIT, CRESST, SABRE, COSINUS, MOSCA-b
- Astrofisica Nucleare
 - LUNA
- Fisica fondamentale
 - VIP
- Attività multidisciplinari
 - Ginger, Cosmic Silence, Ermes

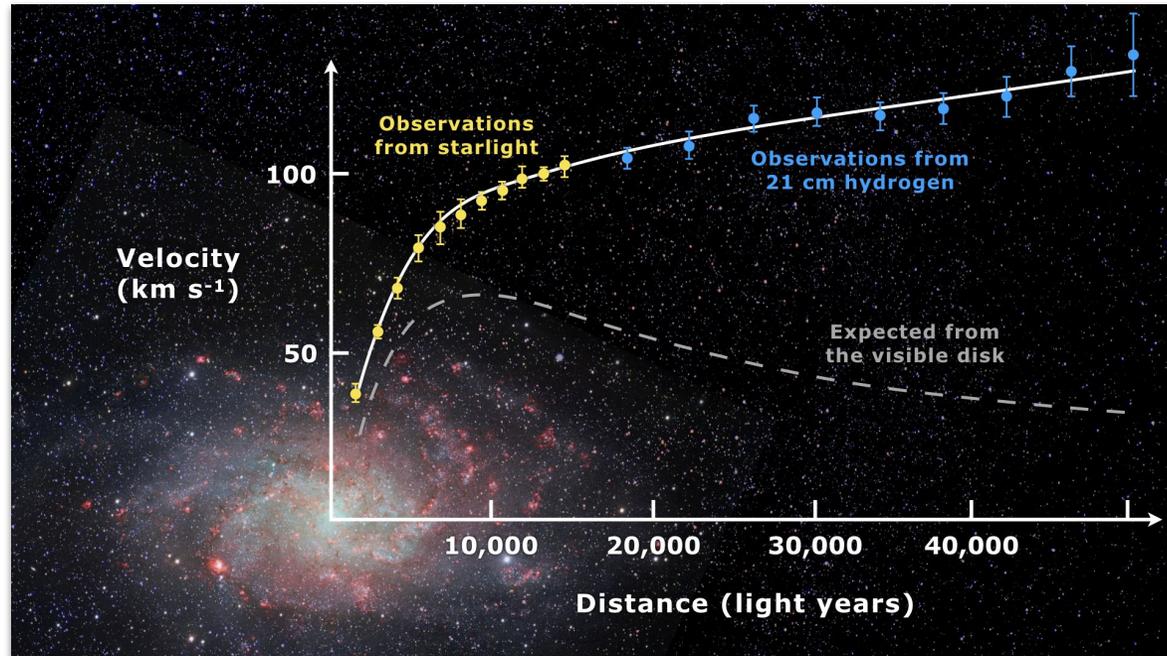
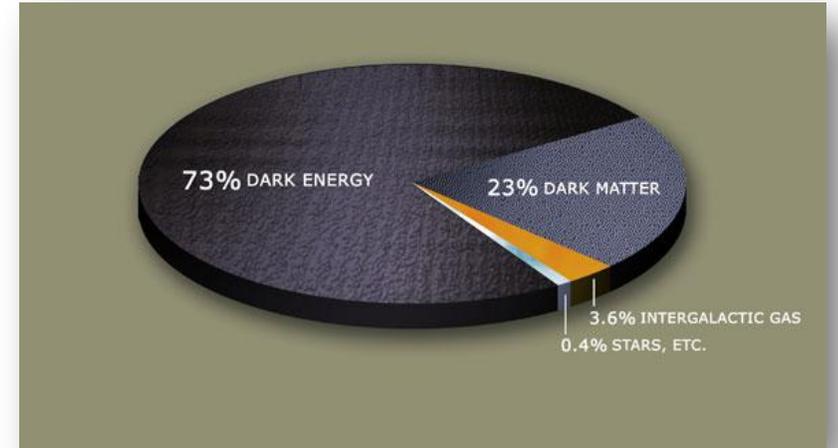


Molti degli enigmi dell'Universo vengono studiati in una grotta sottoterra!!!

I LABORATORI NAZIONALI DEL GRAN SASSO

Fisica Sotterranea ai LNGS: Materia Oscura

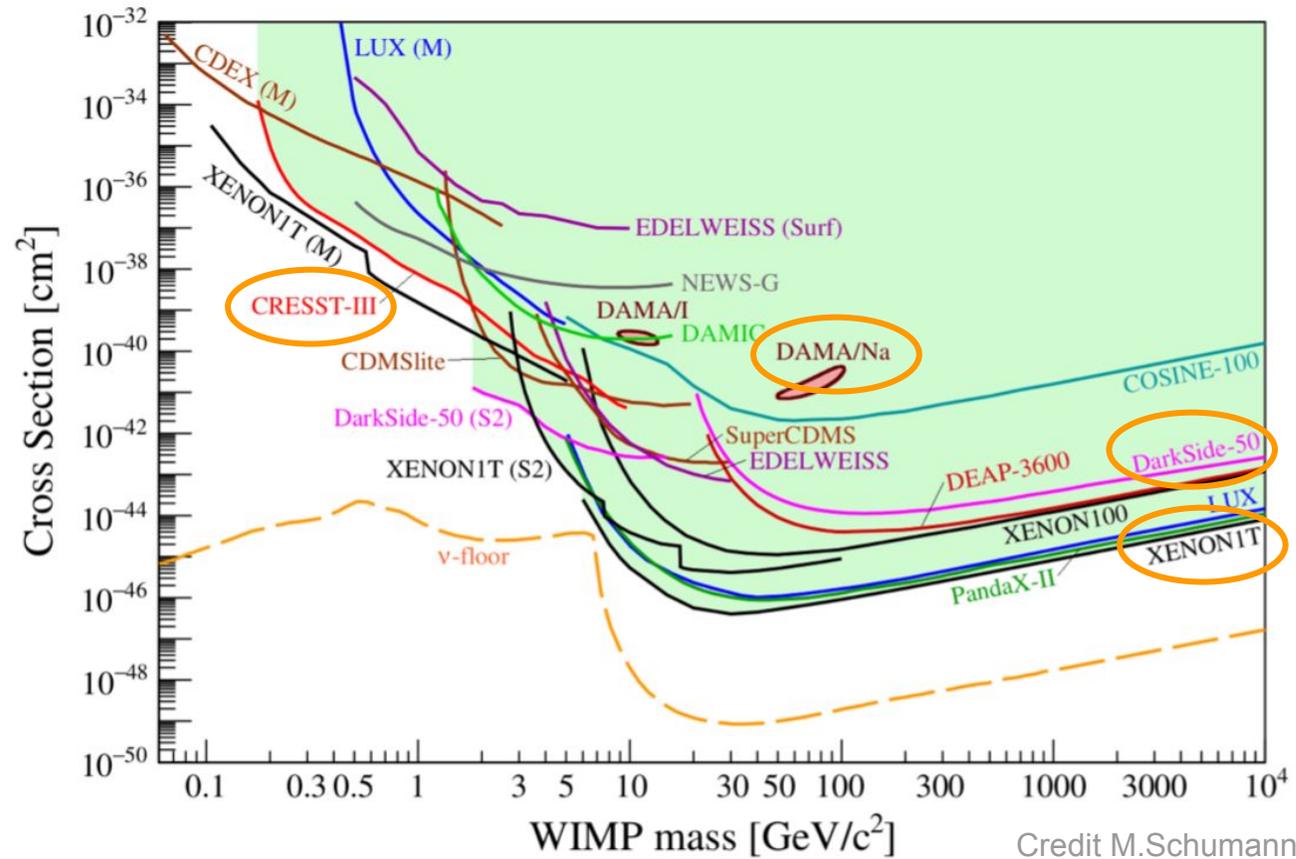
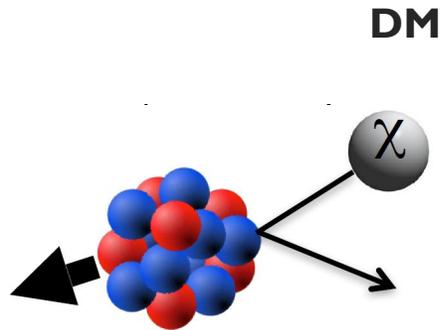
- Le osservazioni sperimentali ci dicono che la materia 'ordinaria' è $< 5\%$
- Circa il 25% è Materia Oscura, il restante 70%, è energia oscura



- Materia Oscura ai LNGS
 - DAMA/LIBRA, DARKSIDE-50, XENONIT, CRESST, SABRE, COSINUS

I LABORATORI NAZIONALI DEL GRAN SASSO - Materia Oscura

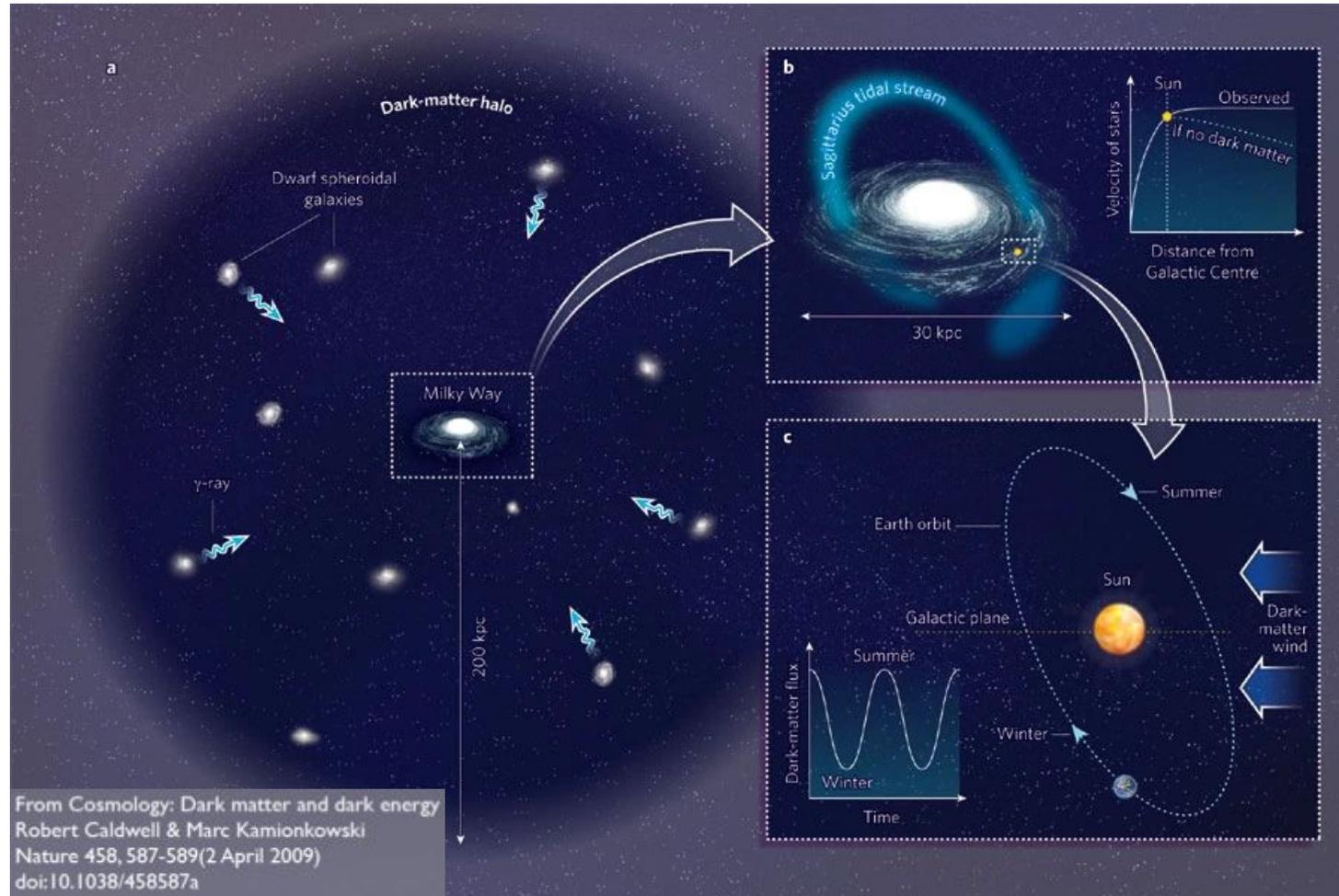
- L'obiettivo delle **ricerche dirette** è quello di osservare il laboratorio l'interazione (scattering) di una particella di Materia Oscura su un nucleo bersaglio (o su un elettrone).



ai LNGS

I LABORATORI NAZIONALI DEL GRAN SASSO - Materia Oscura

- L'obiettivo delle **ricerche dirette** è quello di osservare l'interazione (scattering) di una particella di Materia Oscura su un nucleo bersaglio (o su un elettrone).



Viviamo in un alone di materia oscura

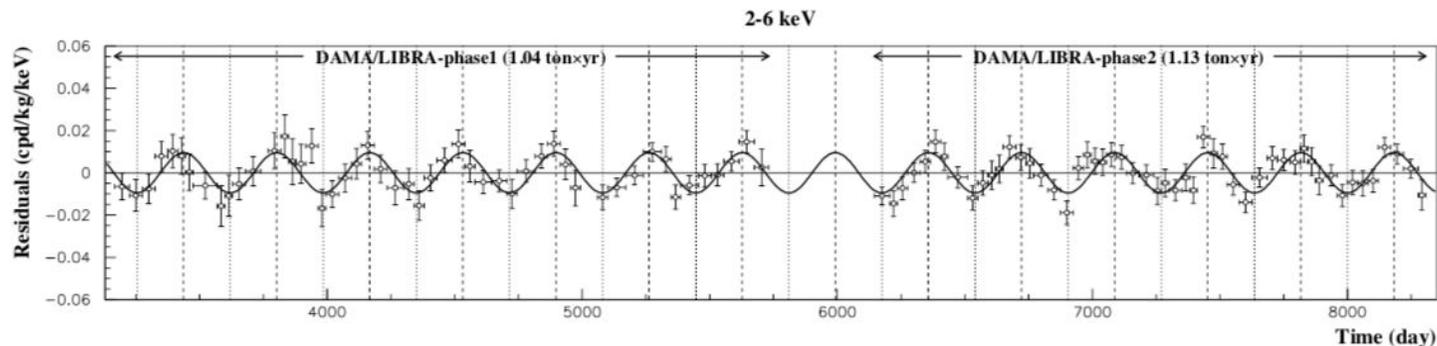
Assunzioni standard:

- distribuzione maxwelliana della velocità
- velocità asintotica: 220 km/s
- densità locale di materia oscura: $0,3 \text{ GeV/cm}^3$
- Le particelle di materia oscura fanno scattering con i nuclei:
 - elasticamente
 - coerentemente: $\sim A^2$
 - (indipendente dallo spin)

I LABORATORI NAZIONALI DEL GRAN SASSO - Materia Oscura

DAMA/LIBRA

- Rivelatore: scintillatori NaI(Tl) con PMT (250 kg, 13 y)
- Scattering di WIMPs su un nucleo atomico - **Modulazione annuale**



Il segnale di DAMA è DM?

- Se consideriamo lo scenario più semplice (scattering elastico + alone standard + interazione sub-debole) il segnale di DAMA è incompatibile con XENONIT a più di 5 ordini di grandezza
- C'è tuttavia un segnale inspiegabile (nuova fisica? background sconosciuto? ...)
- ... dal momento che non sappiamo molto della parte oscura del nostro universo c'è ancora spazio per scenari in cui sia DAMA che XENONIT siano compatibili con un segnale DM

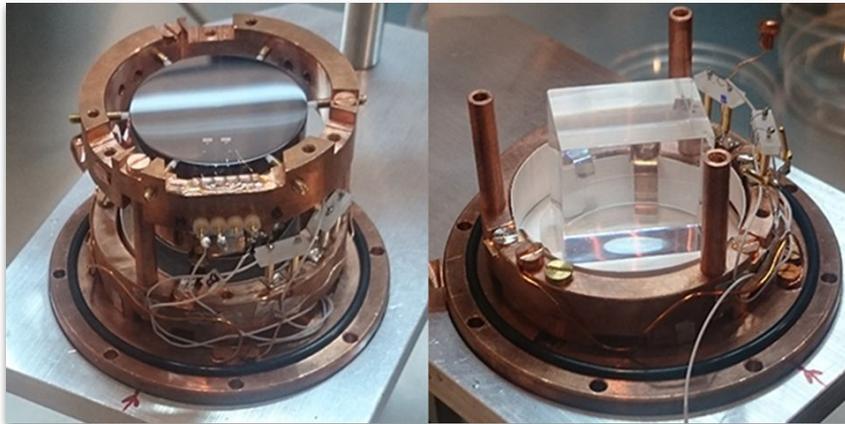


Dobbiamo verificare il segnale di DAMA con rivelatori di base NaI

I LABORATORI NAZIONALI DEL GRAN SASSO - Materia Oscura

COSINUS

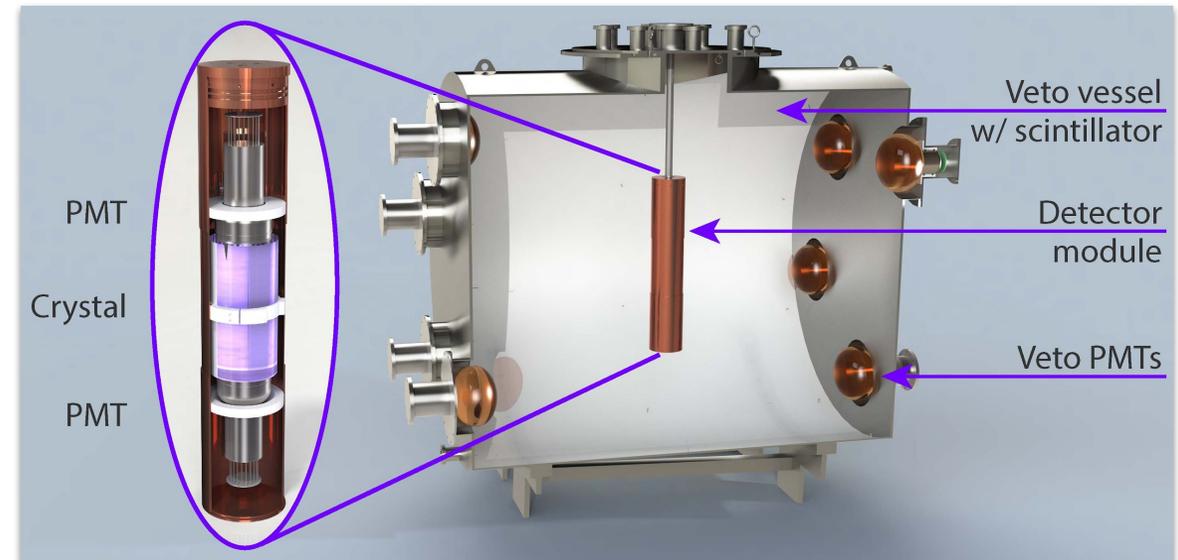
- *Rivelatore: bolometri scintillanti NaI*
- Scattering di WIMPs su un nucleo atomico
- La **doppia lettura** permette di identificare la particella incidente ma modulazione annuale complicata



SABRE

Sodium-iodide with Active Background REjection

- *Rivelatore: scintillatori NaI(Tl) (5-50 kg)*
- Scattering di WIMPs su un nucleo atomico
- R&D molto promettente sulla **riduzione della contaminazione** da cristalli
- Cristalli circondati da scintillatore liquido come veto

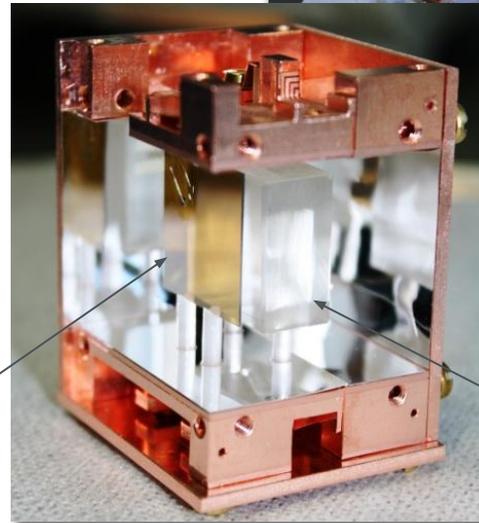
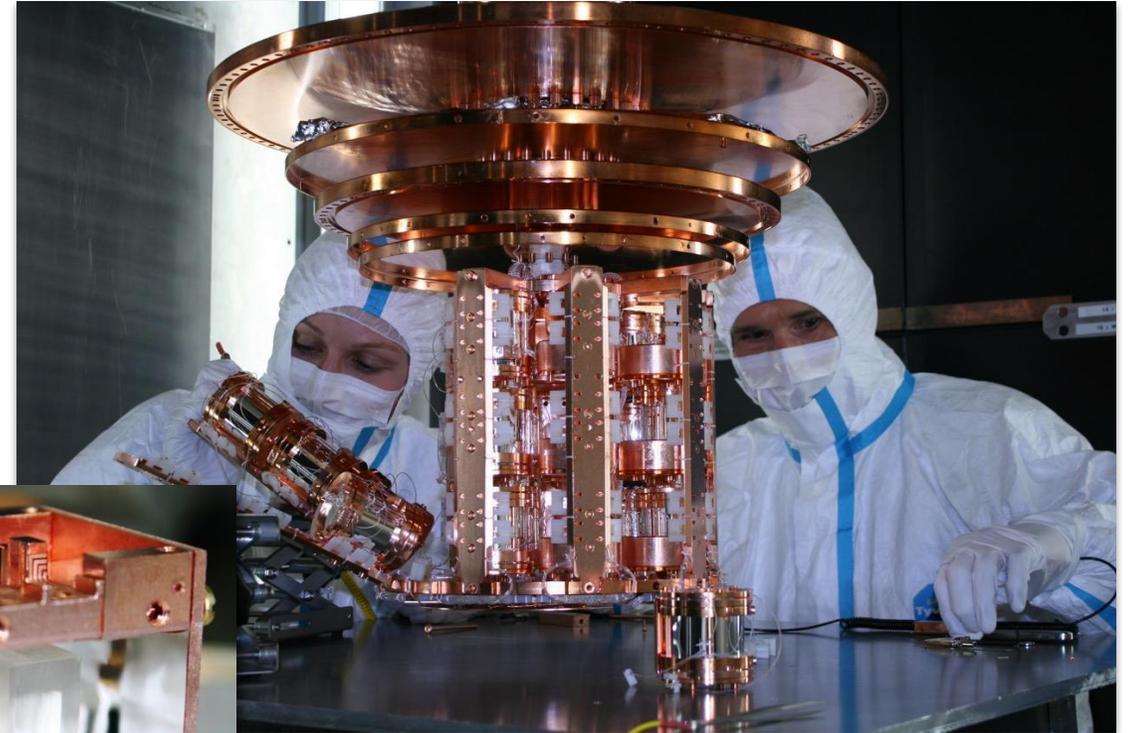


I LABORATORI NAZIONALI DEL GRAN SASSO - Materia Oscura

CRESST

Cryogenic Rare Event Search using Superconducting Thermometers

- *Rivelatore: bolometri scintillanti CaWO_4*
- Scattering di WIMPs su un nucleo atomico
- Materia Oscura 'leggera' grazie a rivelatori innovativi (24 g) in grado di **abbassare la soglia** di rivelazione dei rinculi nucleari a ~ 30 eV



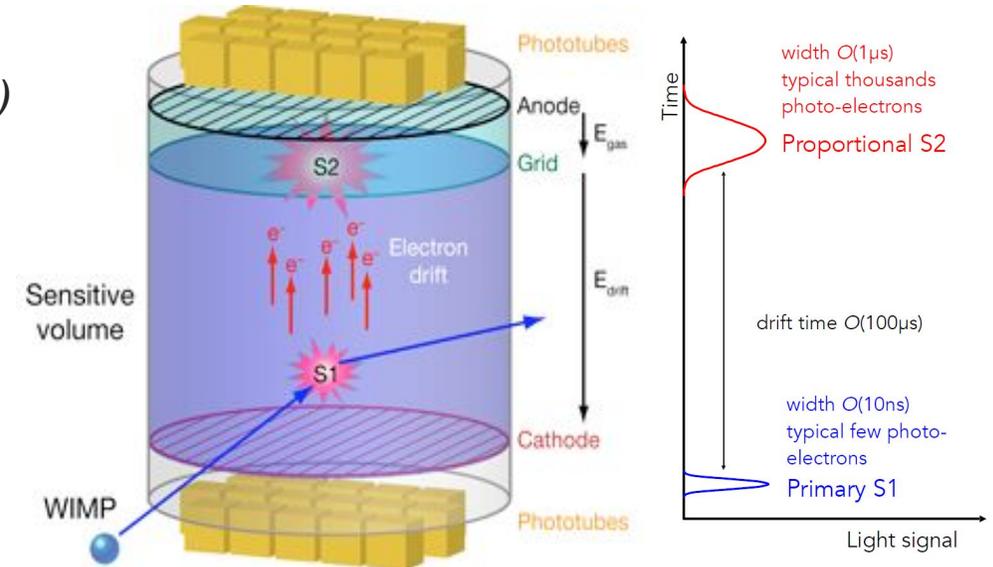
Rivelatore di luce SOS
(silicon-on-sapphire)

Assorbitore CaWO_4

I LABORATORI NAZIONALI DEL GRAN SASSO - Materia Oscura

XENON - IT

- Rivelatore: camera TPC a doppia fase (liquida e gassosa) (2 ton volume fiduciale)
- Scattering di WIMPs su un nucleo Xenon
- I fotomoltiplicatori sono utilizzati per rivelare il lampo di luce prodotto nell'interazione.



- XY dall'array di PMT superiori (alcuni mm)
- Z dalla differenza di tempo (frazione del mm)
- $S2/S1$ differente per rinculi nucleari e di elettroni

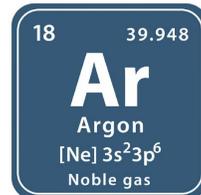
- **Next generation: XENONnT**

I LABORATORI NAZIONALI DEL GRAN SASSO - Materia Oscura

Dark Side-50

- Rivelatore: camera TPC a doppia fase (liquida e gassosa) (50 kg)
- Scattering di WIMPs su un nucleo Argon
- I fotomoltiplicatori sono utilizzati per rivelare il lampo di luce prodotto nell'interazione.

Xe vs Ar



Pros:

- Pesante (A^2)
- Alta densità
- Radio-puro

Cons:

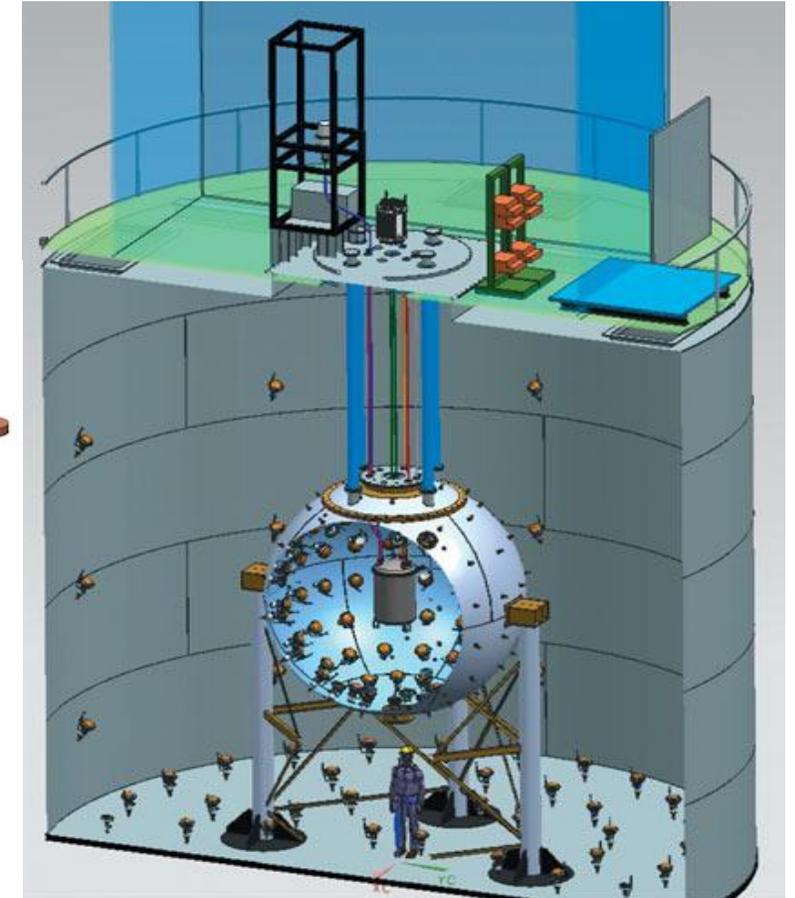
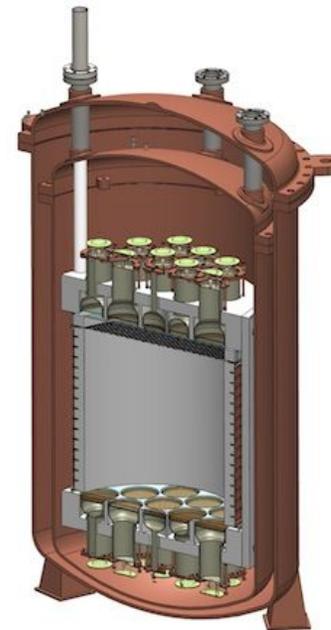
- Bassa percentuale in atmosfera
 - Più costoso di Ar nat.
- Discr. in forma meno efficiente

Pros:

- Discr. in forma più efficiente

Cons:

- ^{39}Ar in Ar atmosferico
 - Separazione isotopica
 - Ar underground



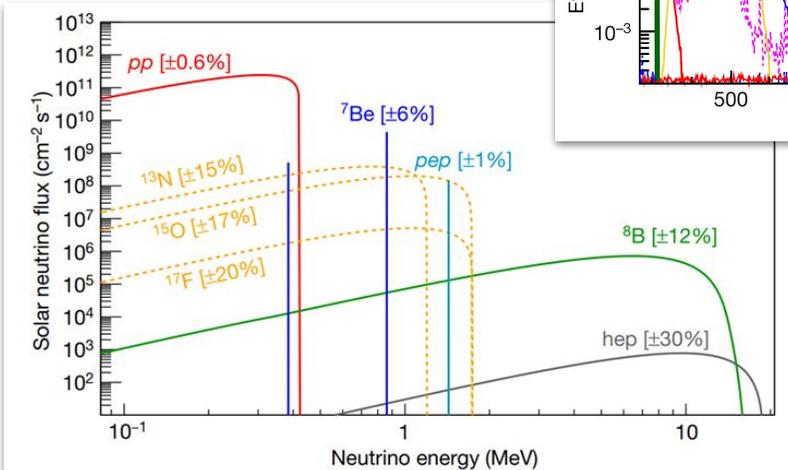
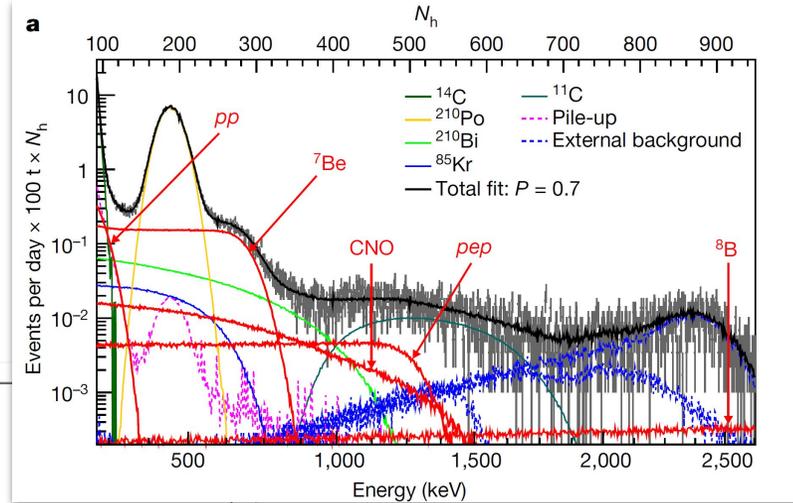
• **Next generation: DarkSide-20k**

I LABORATORI NAZIONALI DEL GRAN SASSO - NEUTRINI

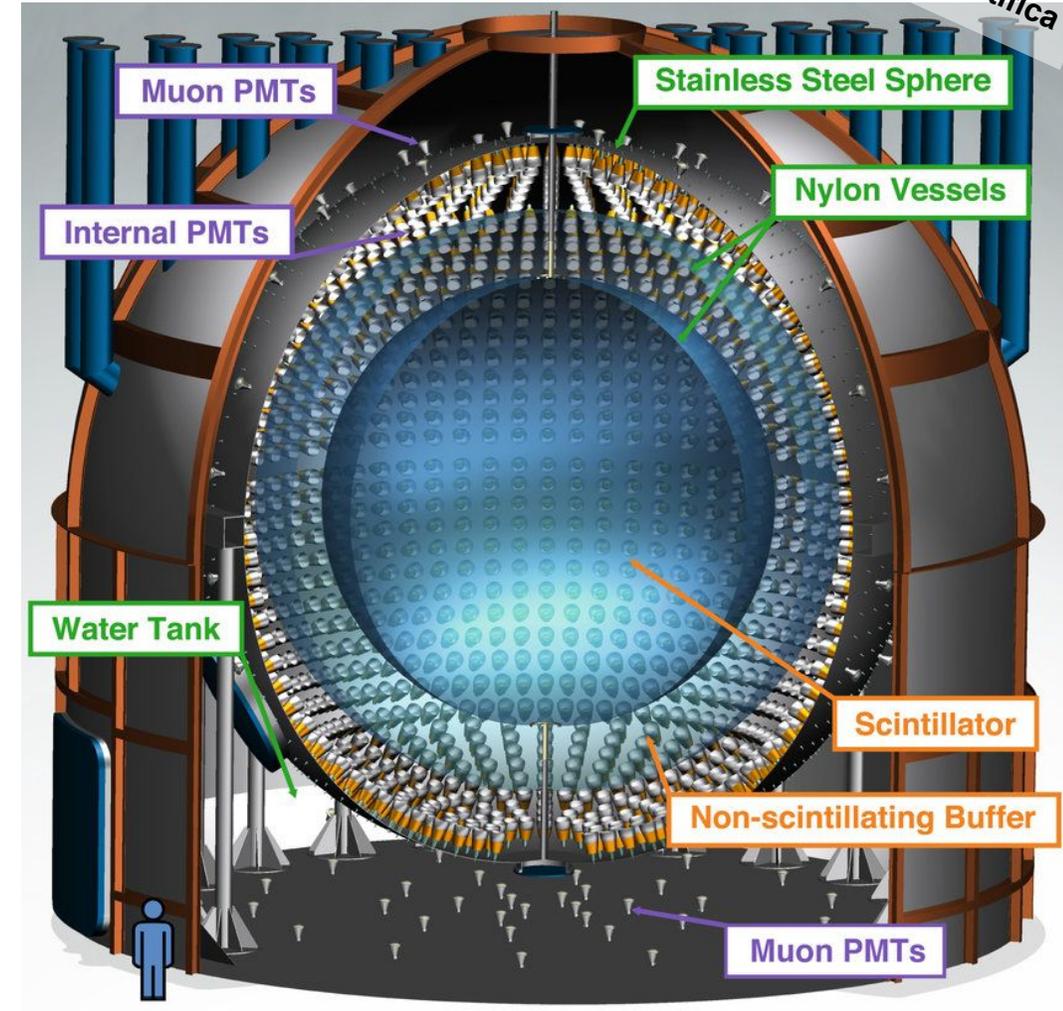
30 Aprile 2020
Borexino e LVD verso la
conclusione dell'attività scientifica

Borexino

- In grado di misurare in tempo reale neutrini di bassa energia prodotti dal Sole e dal nostro pianeta (geoneutrini) attraverso le loro interazioni in un "liquido scintillatore".



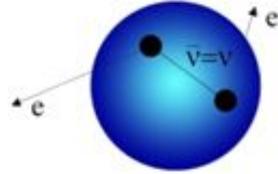
**I neutrini solari di più
bassa energia
sono quelli più numerosi!!!**



I LABORATORI NAZIONALI DEL GRAN SASSO - NEUTRINI

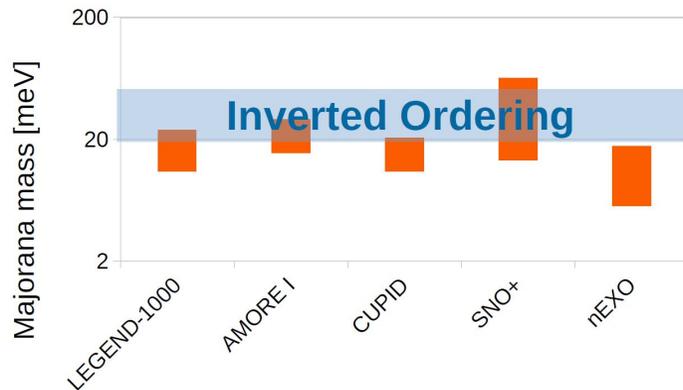
Il Doppio Decadimento Beta

$0\nu\text{DBD}$



- Non permesso dal MS ($\Delta L=2$)
- Solo se ν è Majorana
- Neutrino massivo

$$(T_{1/2})^{-1} \propto m_{\beta\beta}^2$$



ai LNGS
in 10 anni

Isotopo	Esperimento	limite $T_{1/2}$ [10^{25} y]
^{76}Ge	GERDA	9
	MAJORANA	2.7
	LEGEND-1000	$[10^{28}$ y]
^{82}Se	CUPID-0	0.35
^{100}Mo	NEMO	0.11
	CUPID-Mo	0.03
	AMORE II	$[5 \cdot 10^{26}$ y]
	CUPID	$[10^{27}$ y]
^{130}Te	CUORE	3.2
	SNO+ II	$[10^{27}$ y]
^{136}Xe	EXO-200	3.5
	KAMLAND-ZEN 400	10.7
	nEXO	$[10^{28}$ y]

I LABORATORI NAZIONALI DEL GRAN SASSO - NEUTRINI



GERDA

GERmanium Detector Array



CUORE

Cryogenic Underground Observatory for Rare Events

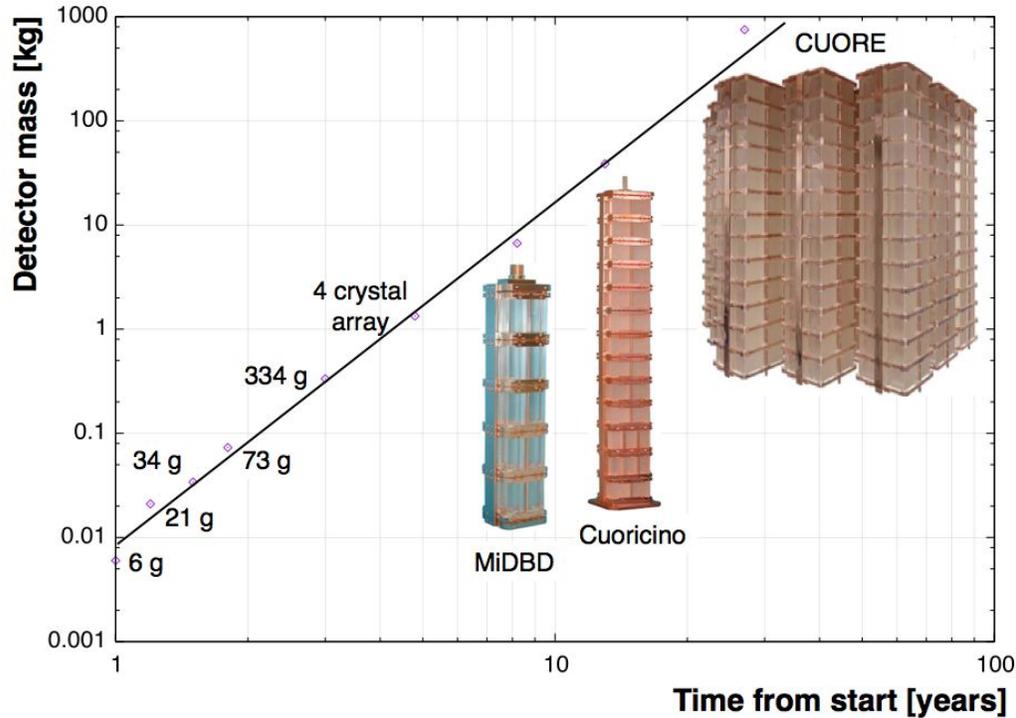
CUPID

CUORE Upgrade with Particle IDentification

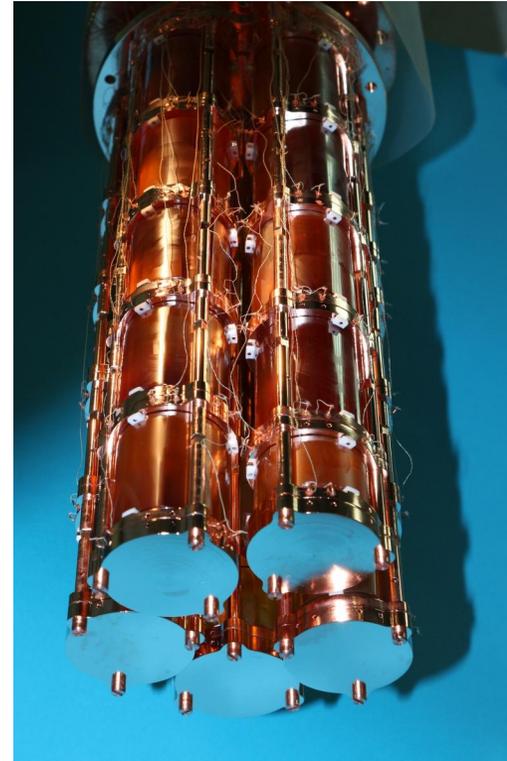
...

CUORE e CUPID, una storia che parla italiano...

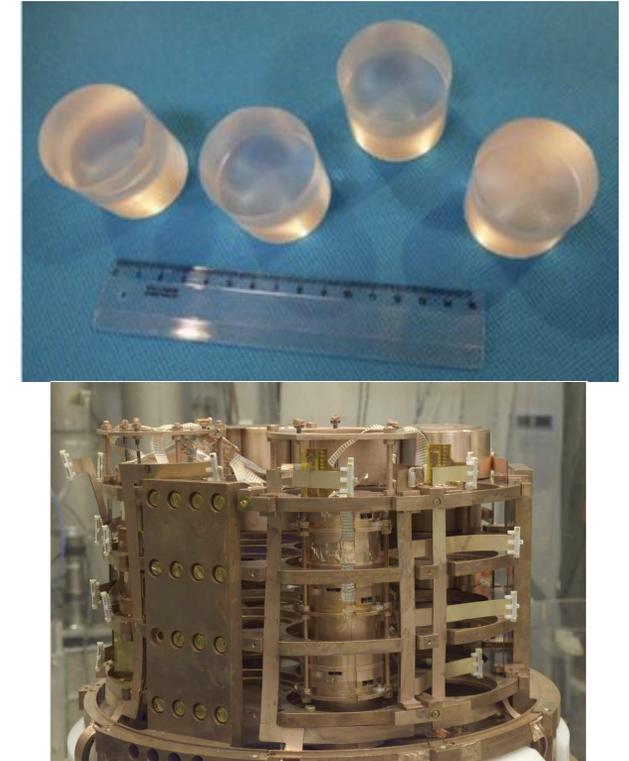
40 anni di ricerca...da 6 g ad 1 tonnellata!



Dimostratore CUPID-0
(LNGS)



Dimostratore CUPID-Mo
(LSM - Francia)



CUPID

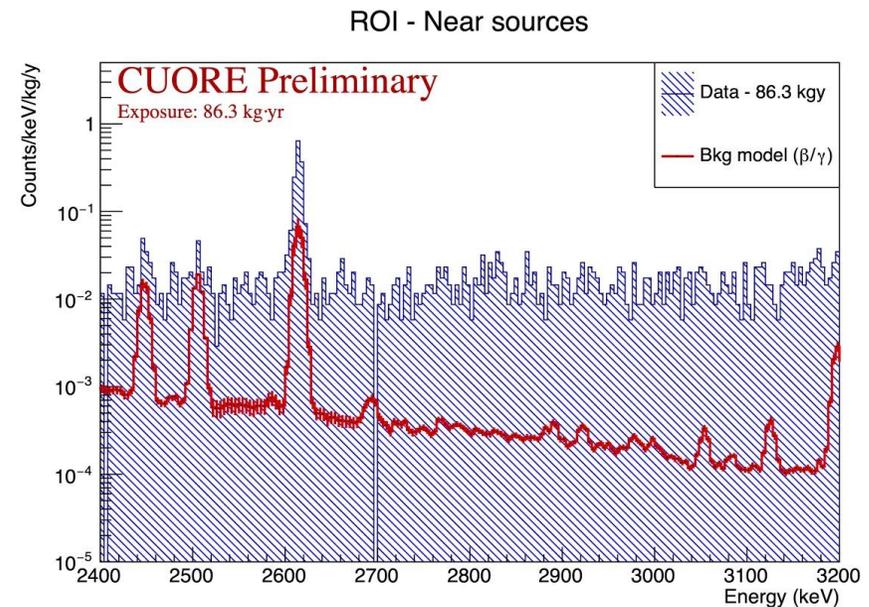
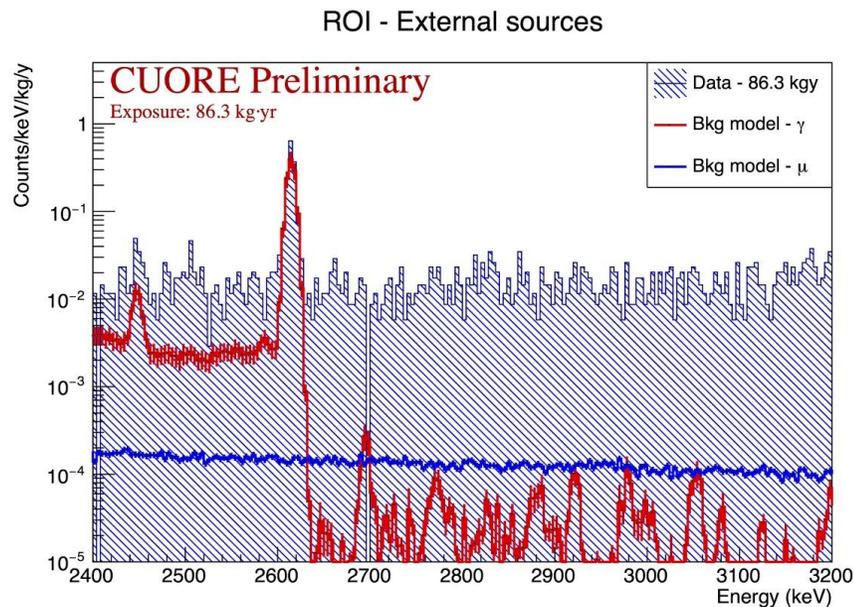
CUPID (CUORE Upgrade with Particle IDentification) cercherà il doppio decadimento beta senza neutrini con vite medie dell'ordine $T \sim 10^{27}$ yr per il Mo-100 ($Q_{\beta\beta} = 3034$ keV)

SFIDE	STRATEGIE
Aumentare il numero di isotopi $N > 10^{27}$ ($A = N/\tau$)	
Ridurre il fondo misurato da CUORE di due ordini di grandezza	

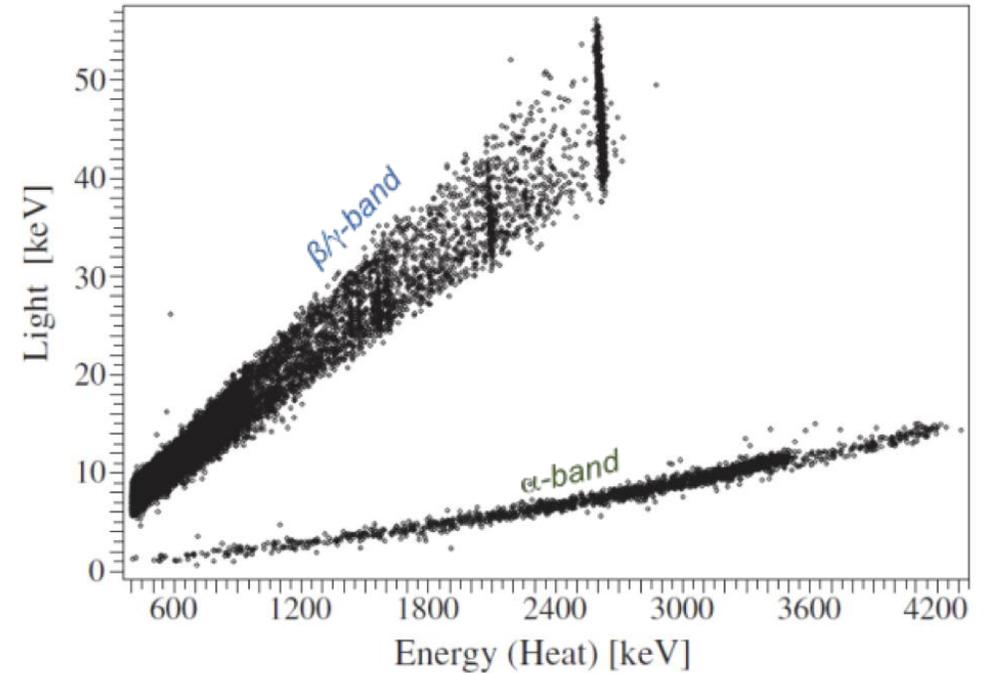
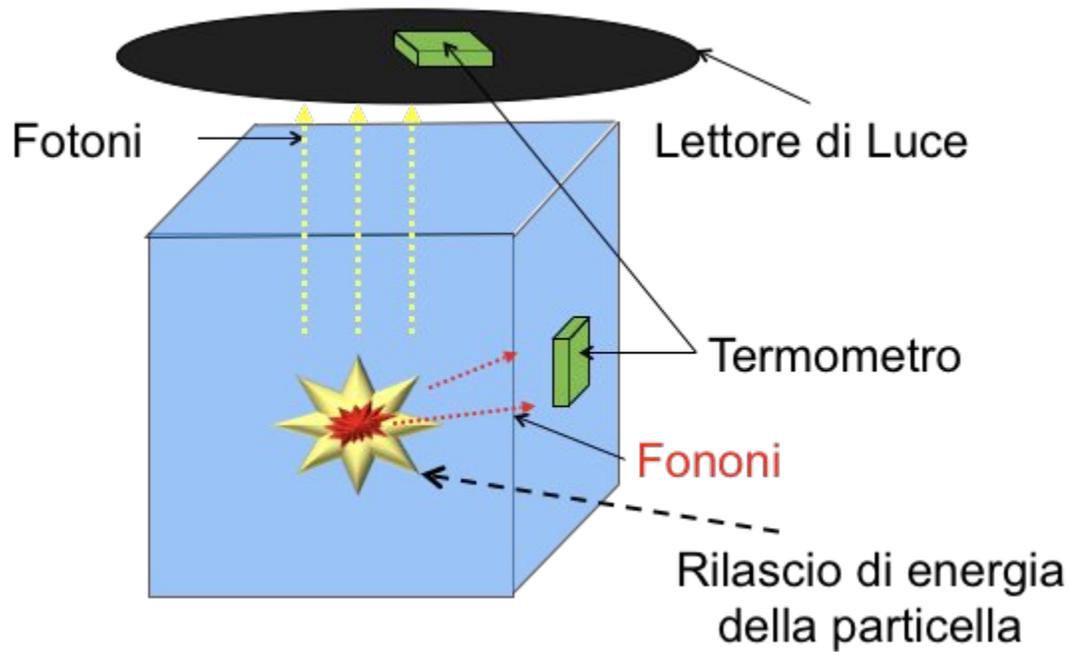
CUPID

CUPID (CUORE Upgrade with Particle IDentification) cercherà il doppio decadimento beta senza neutrini con vite medie dell'ordine $T \sim 10^{27}$ yr per il Mo-100 ($Q_{\beta\beta} = 3034$ keV)

SFIDE	STRATEGIE
Aumentare il numero di isotopi $N > 10^{27}$ ($A = N/T$)	Utilizzo di cristalli arricchiti (in Mo-100)
Ridurre il fondo misurato da CUORE di due ordini di grandezza	<ol style="list-style-type: none">1) Identificazione del fondo alfa con cristalli scintillanti2) Muon Veto3) Nuovo design del rivelatore4) Nuove tecniche di analisi



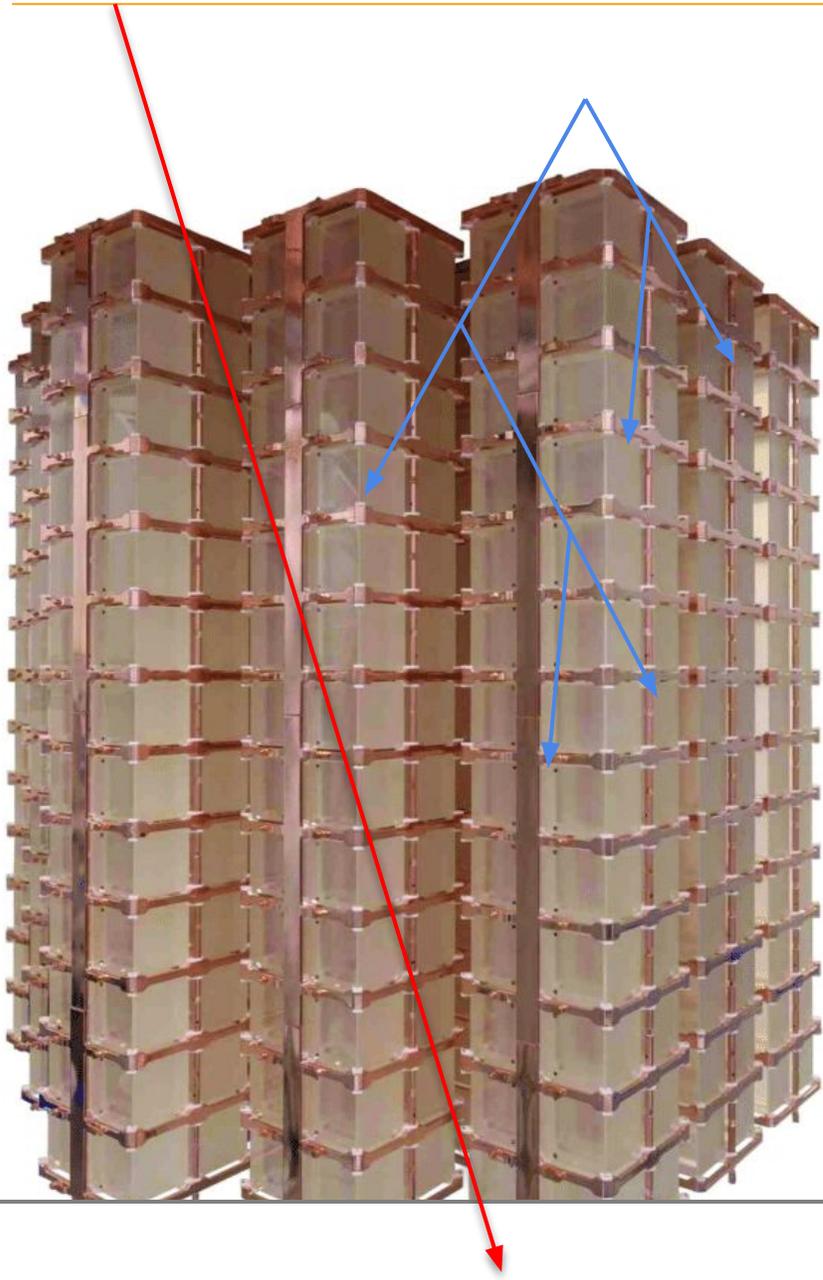
Identificazione di particelle



Se l'assorbitore è un **cristallo scintillante**, il rilascio di energia produce anche **luce**.
Il segnale di luce può essere misurato con un apposito lettore, anch'esso di tipo calorimetrico.
A parità di energia, **le particelle alfa emettono meno luce dei β/γ**, quindi possono essere identificate.

CUPID utilizzerà cristalli di **molibdato di litio** (Li_2MoO_4) per cercare il doppio decadimento beta del ^{100}Mo .
I lettori di luce saranno wafer di germanio ultra puro.

Veto per i muoni

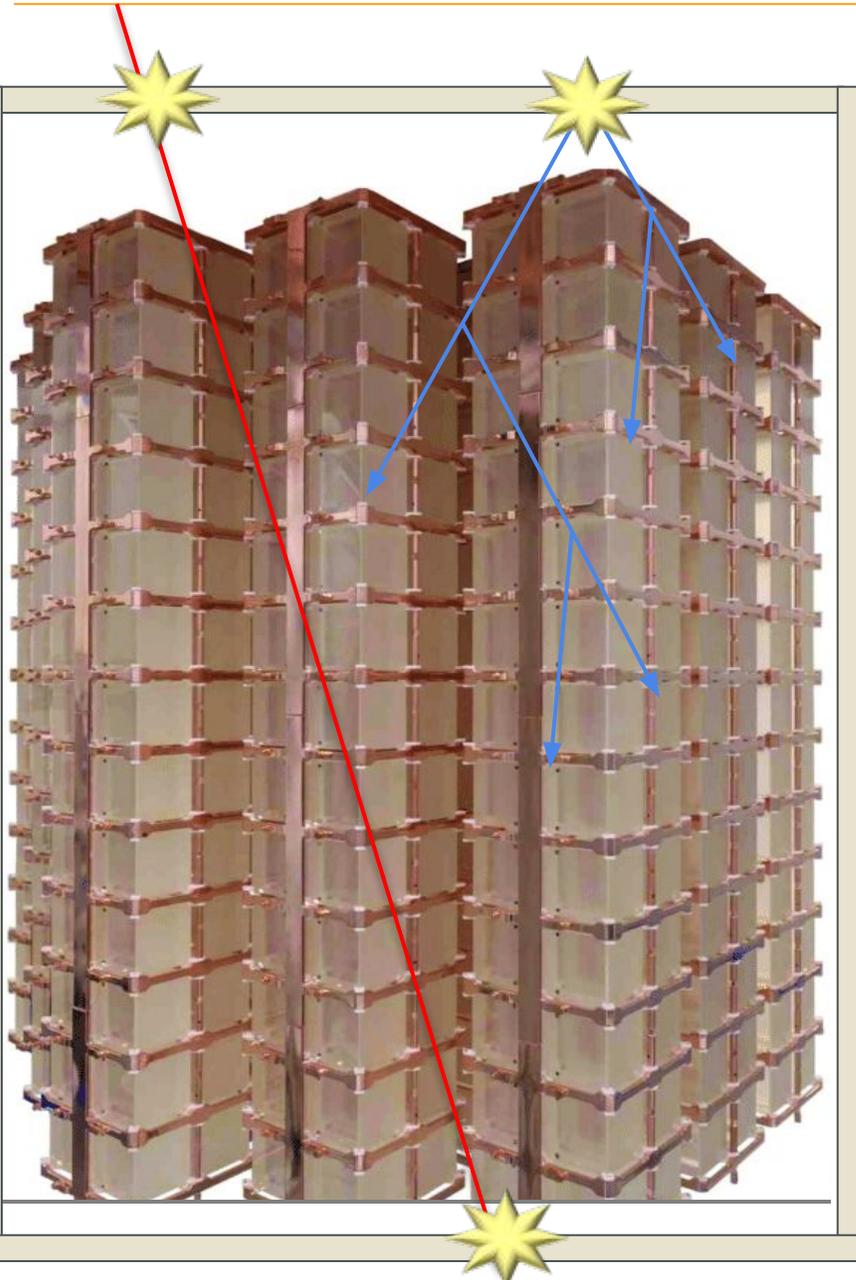


I muoni che arrivano al rivelatore spesso producono **tracce** o **cascate elettromagnetiche**, misurate da più cristalli.

Questi eventi vengono eliminati utilizzando l'**anti-coincidenza fra cristalli**.

CUORE osserva un fondo residuo da muoni di $\sim 2 \times 10^{-4}$ counts/(keV kg y), ora trascurabile ma da eliminare in CUPID!

Veto per i muoni



I muoni che arrivano al rivelatore spesso producono **tracce** o **cascate elettromagnetiche**, misurate da più cristalli.

Questi eventi vengono eliminati utilizzando l'**anti-coincidenza fra cristalli**.

CUORE osserva un fondo residuo da muoni di $\sim 2 \times 10^{-4}$ counts/(keV kg y), ora trascurabile ma da eliminare in CUPID!

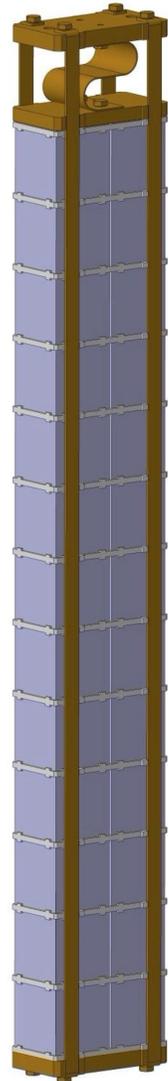
Un sistema di veto attivo per muoni, costituito da pannelli scintillanti orizzontali e verticali, ridurrà tale fondo di un ordine di grandezza.

Nuovo design del rivelatore

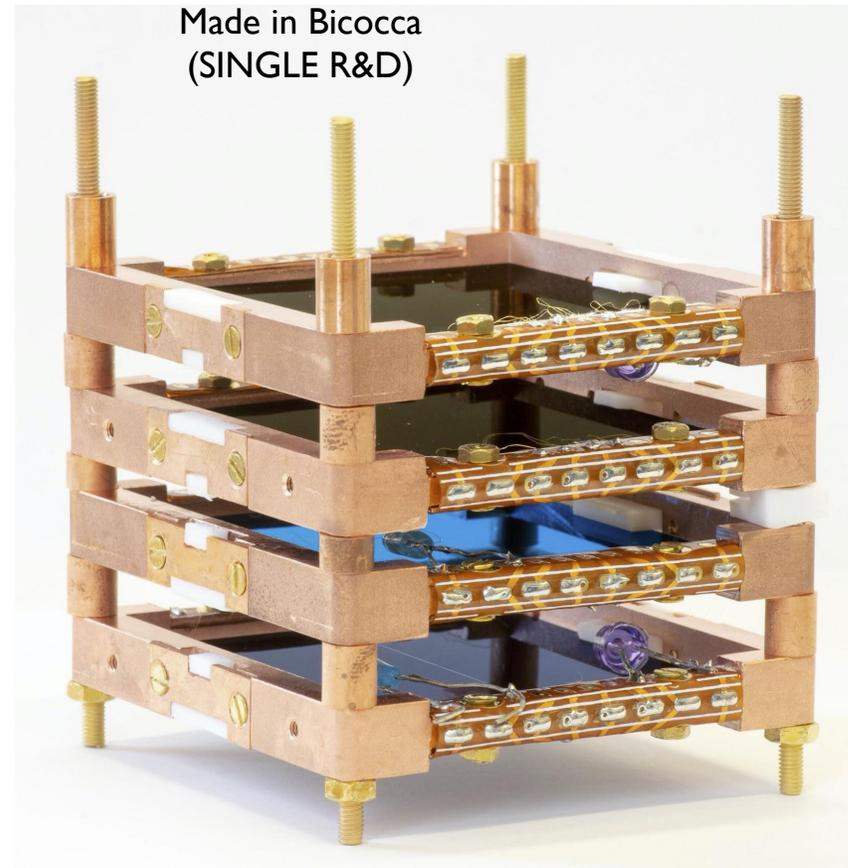
Torre di CUORE



Torre di CUPID

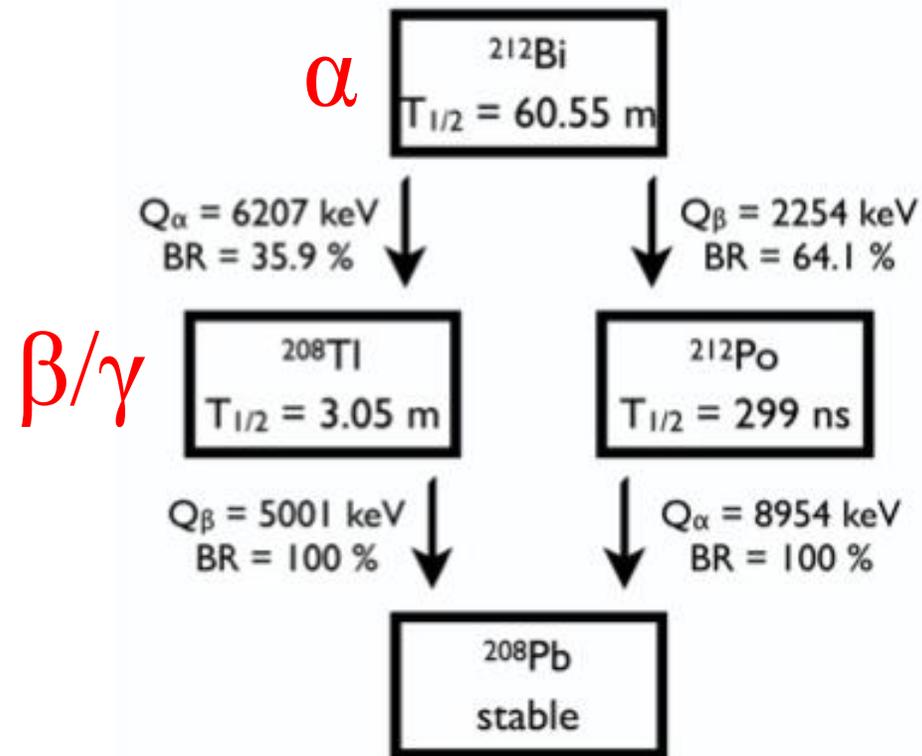
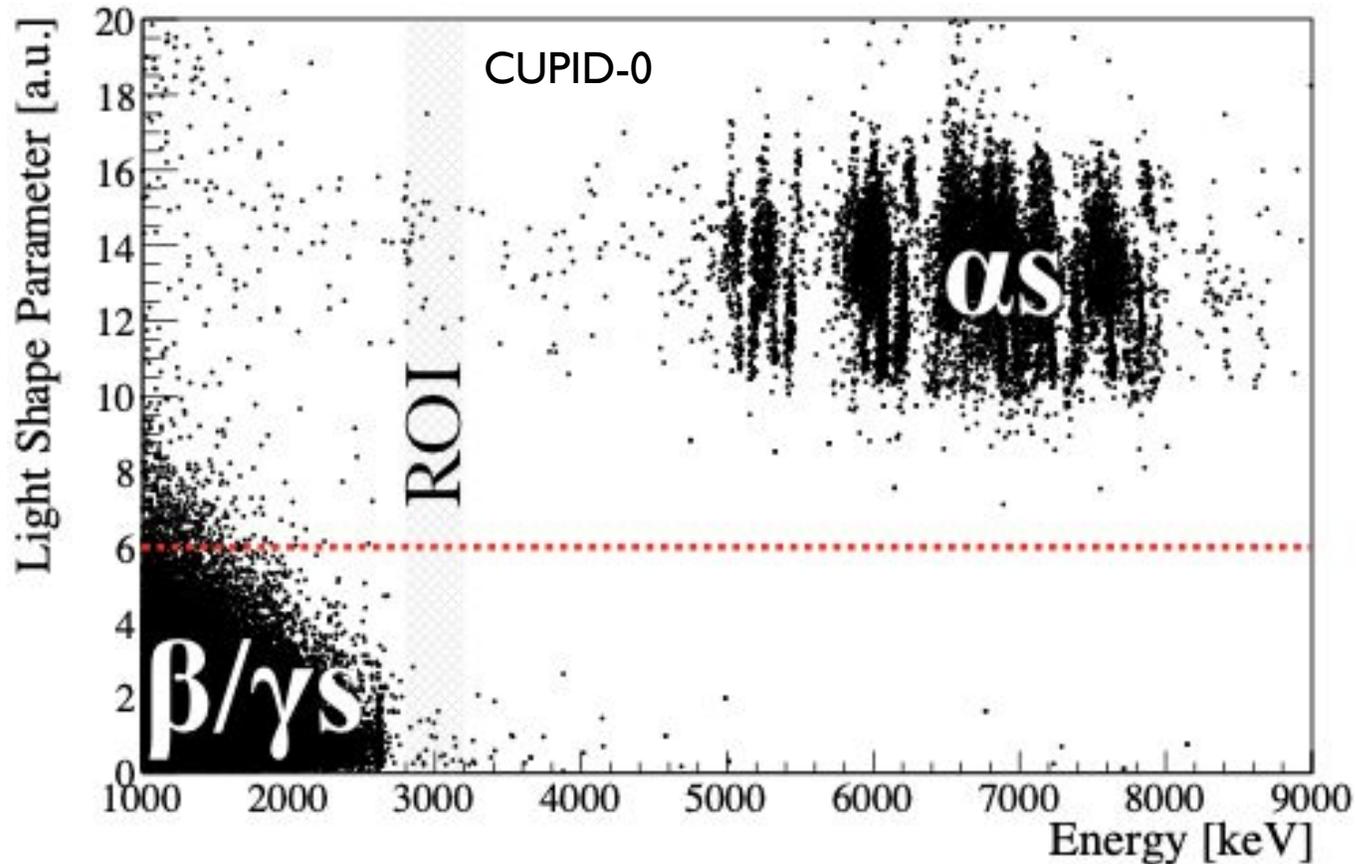


Stiamo studiando un nuovo design del rivelatore che consenta di **introdurre i lettori di luce** minimizzando la quantità di **rame** e semplificando la lavorazione (che può **introdurre contaminazioni**).



Nuove tecniche di analisi

Sfrutteremo la **sequenza temporale** caratteristica delle catene radioattive per eliminare il fondo nella regione di interesse.



CUPID-0 ha ampiamente testato l'efficacia di questa tecnica, **anche con eventi superficiali!**

Per ogni particella alfa con $E < 6.2$ MeV, eliminiamo tutti i β/γ nello stesso cristallo entro 5 vite-medie dall'alfa! 32

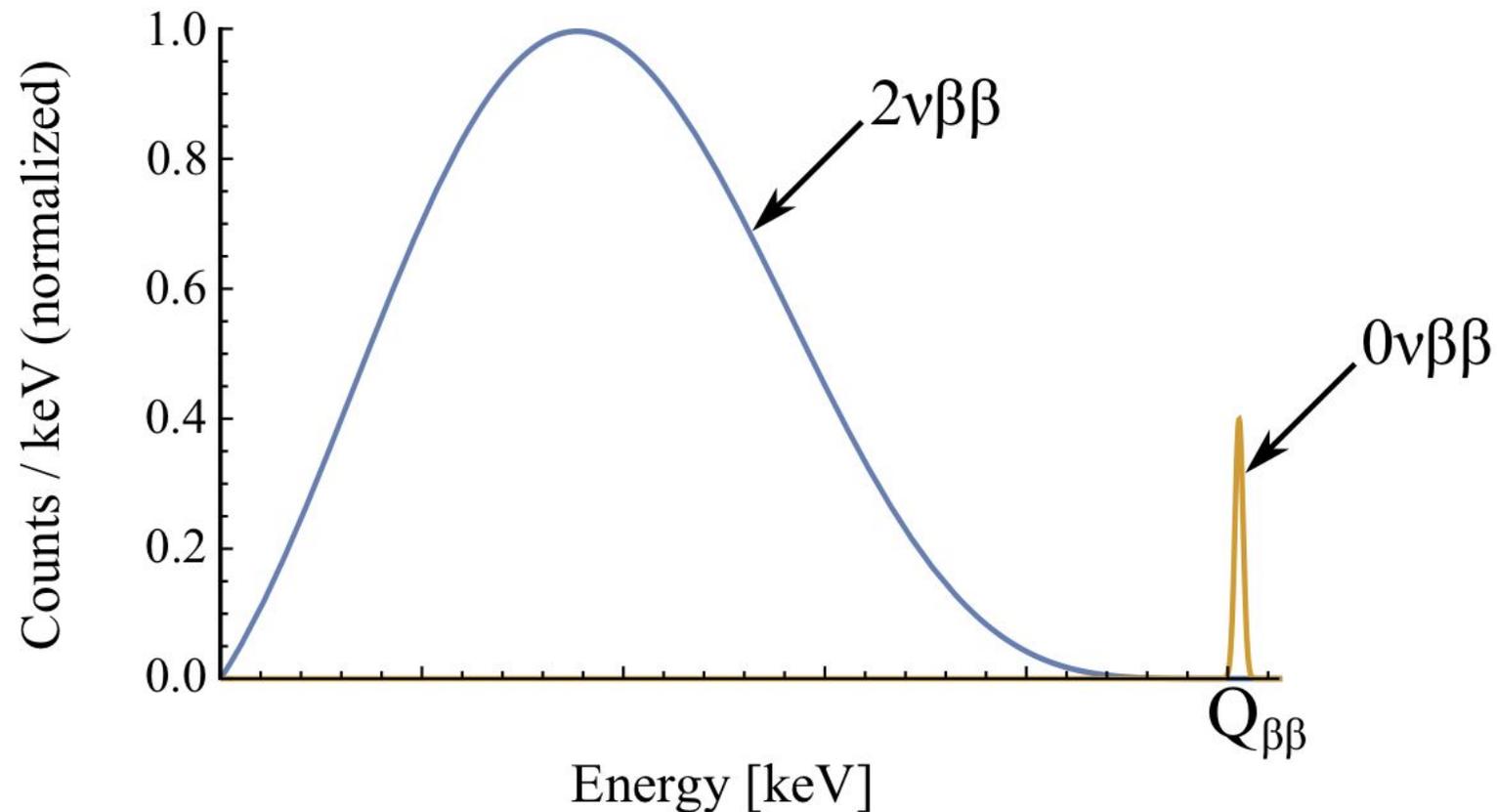
CUPID: the billionaire

L'esperimento CUPID conterrà $\sim 10^{27}$ nuclei di Mo-100, che decade doppio beta con $T_{2\nu} \sim 7 \times 10^{18}$ yr.

In 5 anni collezioneremo quasi un miliardo di eventi di $2\nu\beta\beta$.

PRO: effettueremo ricerche di nuova fisica molto sensibili cercando deformazioni del $2\nu\beta\beta$!

CONTRO: dovremo contrastare il pile-up in modo efficace!

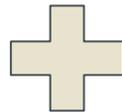
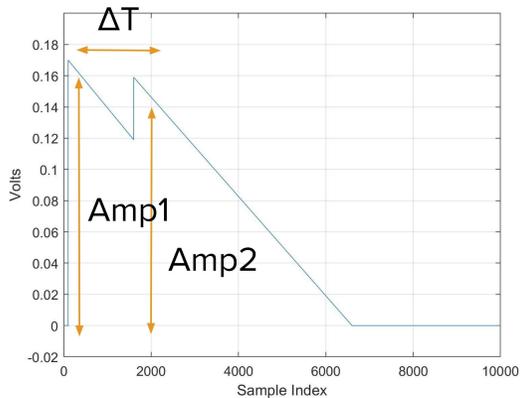
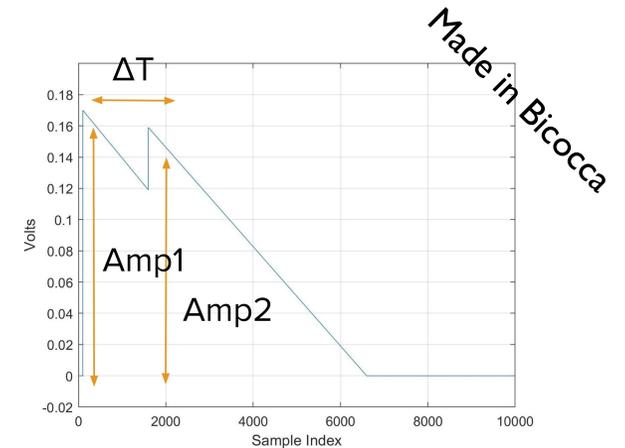
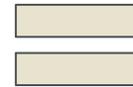


Riduzione del pileup

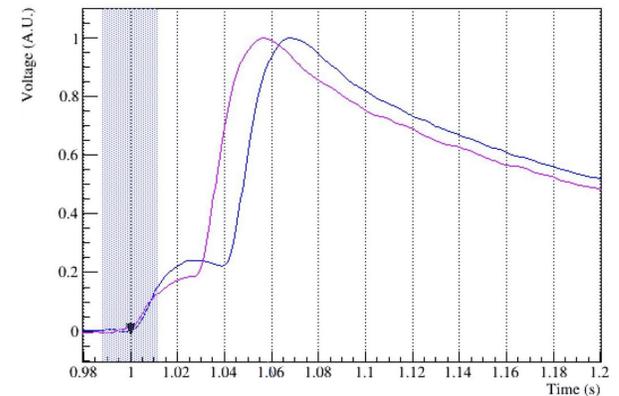
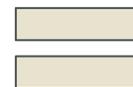
Primo test per studiare la discriminazione del pile-up ai LNGS.

Abbiamo sviluppato un sistema molto semplice per iniettare segnali controllati nel rivelatore.

Lo sviluppo dei tools per la discriminazione del pile-up (**filtraggio**, **pulse shape**, **neural network**).

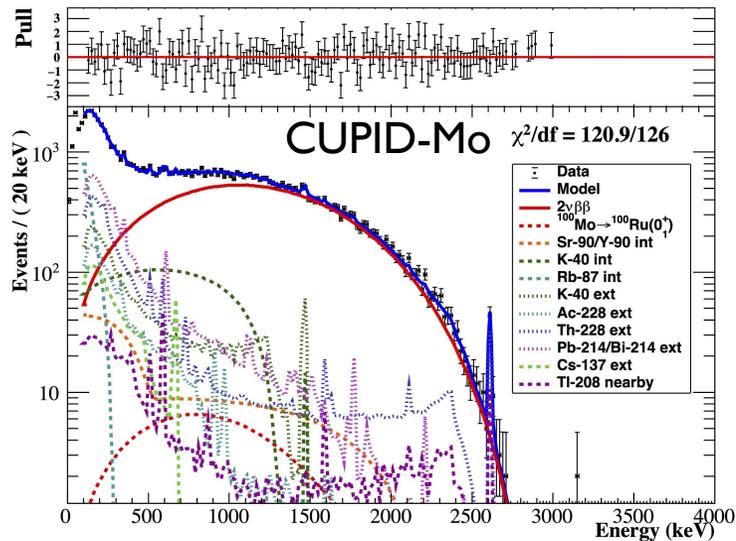


Made at LNGS

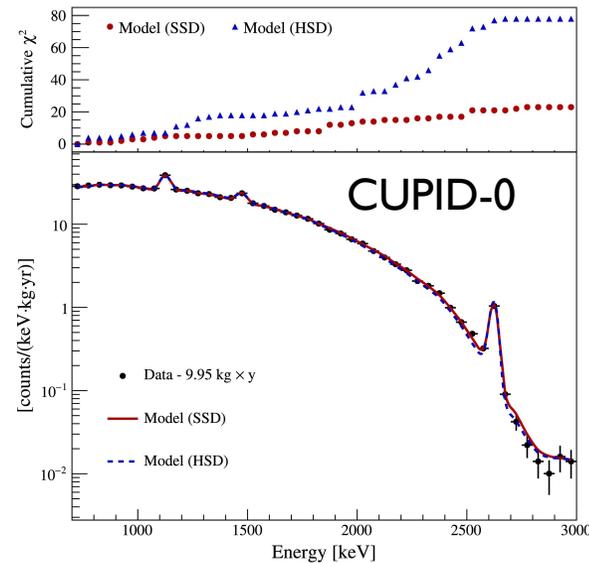


La fisica di CUPID

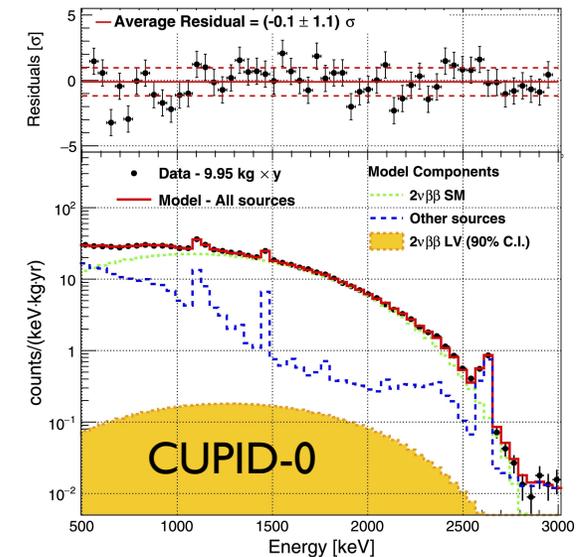
Oltre alla ricerca del doppio decadimento beta senza neutrini, CUPID



Misura di precisione dello spettro e della vita media del $2\nu\beta\beta$



Test della dinamica nucleare del $2\nu\beta\beta$



Ricerca di violazione di CPT ed altri fenomeni esotici.

Un rivelatore di grande dimensioni come CUORE/CUPID consente di effettuare la ricerca di assioni, materia oscura e neutrini da supernova.

Backup Slides

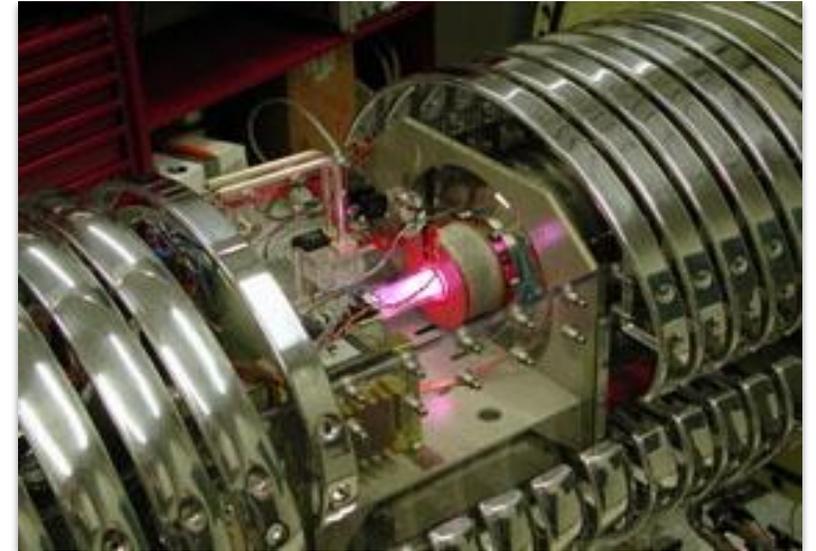
I LABORATORI NAZIONALI DEL GRAN SASSO - ASTROFISICA NUCLEARE

LUNA

Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics

Riprodurre in un laboratorio il cuore delle stelle studiando le sezioni d'urto delle reazioni nucleari fondamentali per la nucleosintesi stellare

- 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 osservato per la prima volta una rara reazione nucleare che avviene nelle stelle giganti rosse.



LUNA MV - Acceleratore fino a 3 MeV

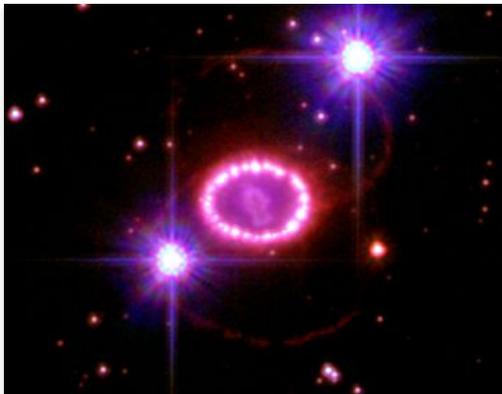
I LABORATORI NAZIONALI DEL GRAN SASSO - NEUTRINI

30 Aprile 2020
Borexino e LVD verso la
conclusione dell'attività scientifica

LVD

Large Volume Detector

- LVD contiene 1000 t di liquido scintillatore
- Centinaia di neutrini rivelati se una Supernova al centro della nostra Galassia
- Il rivelatore è in funzione dal 1992
- La frequenza attesa di esplosioni di Supernovae nella nostra Galassia è di 2-4 per secolo!
- Misura dei neutrini in CERN Neutrinos to Gran Sasso (CNGS)



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