

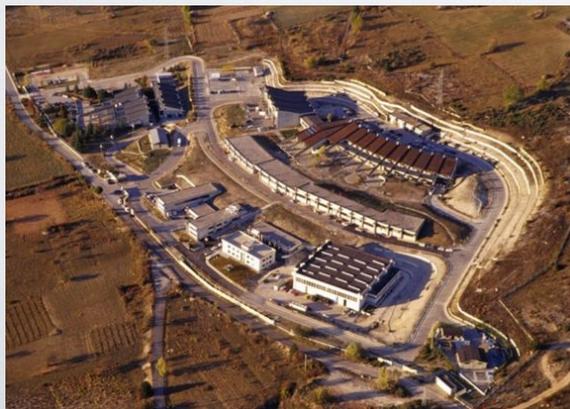
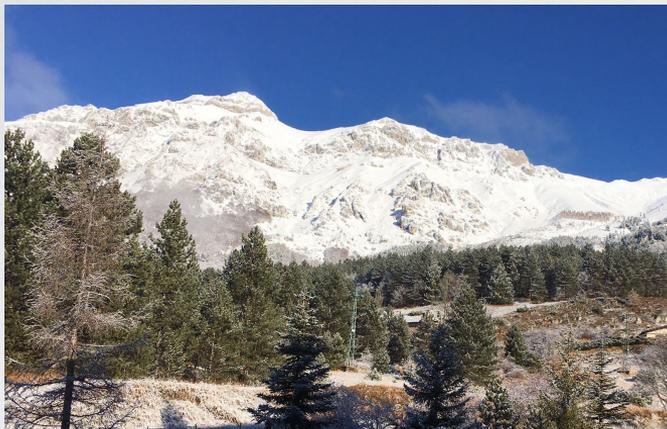
FISICA UNDERGROUND: I LABORATORI NAZIONALI DEL GRAN SASSO

I. Nutini, INFN Milano Bicocca

Presentazione delle Visite Didattiche ai Laboratori di Ricerca, UniMiB Laurea Triennale in Fisica, 15/02/2023

I Laboratori Nazionali del Gran Sasso

Laboratori di ricerca d'eccellenza in Italia



← Struttura
esterna

Struttura
sotterranea →

[Link tour virtuale dei LNGS](#)



I Laboratori Nazionali del Gran Sasso

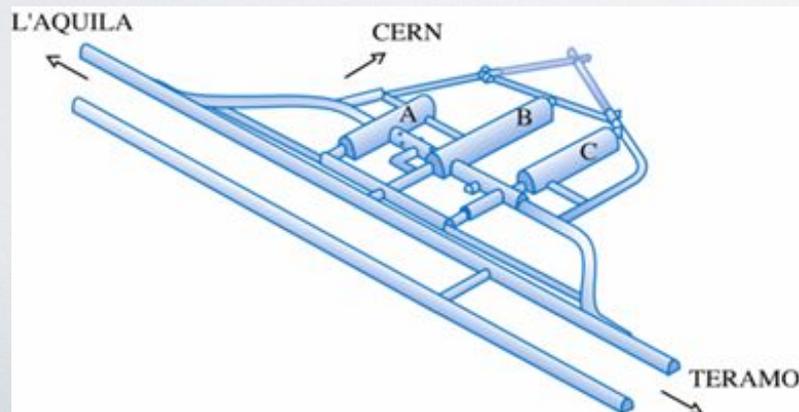
Un laboratorio di ricerca sotto una montagna: cenni storici

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.



Laboratori
sotterranei

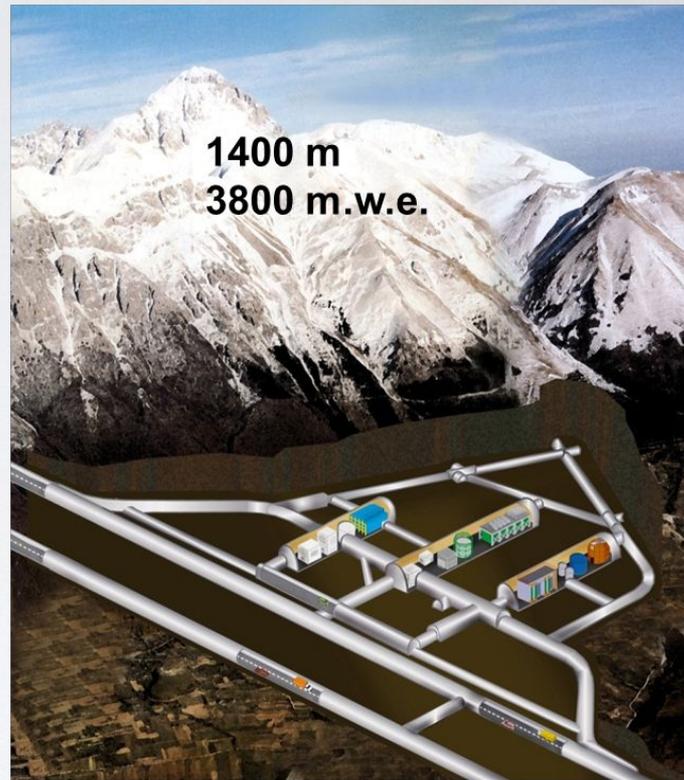


I Laboratori Nazionali del Gran Sasso

Un laboratorio di ricerca sotto una montagna

Tra i più vasti ed avanzati laboratori sotterranei del pianeta:

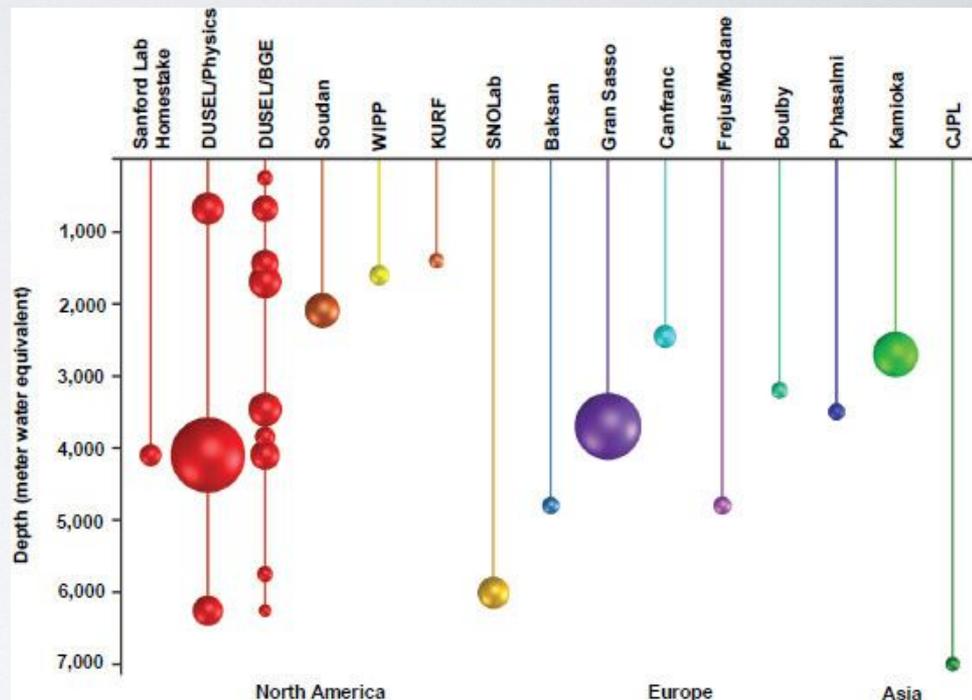
- 1400 m di roccia sovrastante (3800 m.w.e.)
- Riduzione del flusso di muoni (μ): 10^6
 - Flusso di $\mu \sim 1 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$
- Superficie: 17 800 m².
- Volume: 180 000 m³
- Tre sale sperimentali. Ognuna misura circa 100 m di lunghezza, 20 m di larghezza e 18 m di altezza



I Laboratori Nazionali del Gran Sasso

Nel panorama internazionale

- 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

Internazionalità dei LNGS



Esperimenti condotti da circa 1000 ricercatori provenienti da 25 paesi del mondo.

I Laboratori Nazionali del Gran Sasso

Perché un laboratorio di fisica sottoterra?



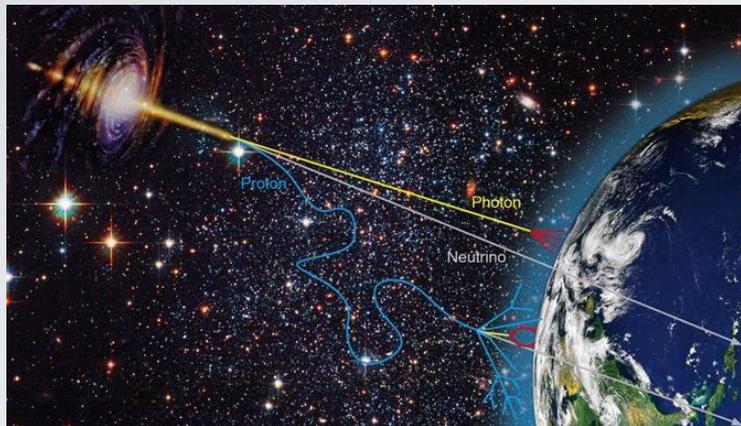
Fisica degli eventi rari (neutrini, materia oscura, ..): ascoltare un lieve sussurro sotto la pioggia battente

La pioggia battente sono i raggi cosmici. Per ripararsi dalla pioggia, gli esperimenti si trovano sotto una montagna.

E' preferibile anche non stare in una strada affollata, la radioattività ambientale, per sentire il sussurro del proprio vicino...

I Laboratori Nazionali del Gran Sasso

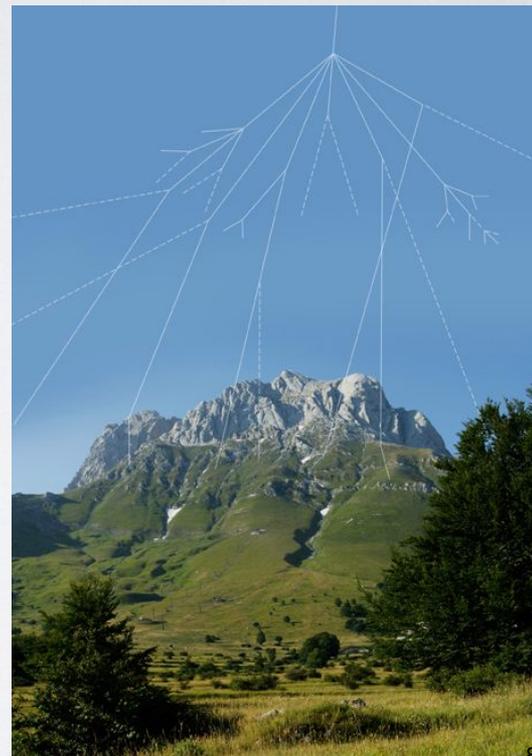
I raggi cosmici: cosa sono



Particelle e nuclei atomici di alta energia provengono dal Cosmo.

Energie: $\sim 0.1 \text{ GeV} - 10^{11} \text{ GeV}$.

Raggi Cosmici in atmosfera terrestre \rightarrow Collisione con i nuclei \rightarrow Prodotte particelle che a loro volta interagiscono o decadono creandone delle altre ('shower'). Elettroni, muoni, fotoni e neutrini, raggiungono la superficie terrestre. Tra queste, i muoni (μ) sono le particelle più penetranti (solo interazione debole e bassa probabilità di decadimento in volo)



I Laboratori Nazionali del Gran Sasso

I raggi cosmici e la radioattività ambientale: perchè dobbiamo schermarli

Esperimenti che ricercano **eventi rari**.

Un esempio: misurare un processo con $T_{1/2} > 10^{26}$ anni

Se abbiamo 1 solo nucleo sotto osservazione....

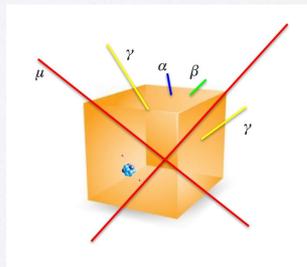
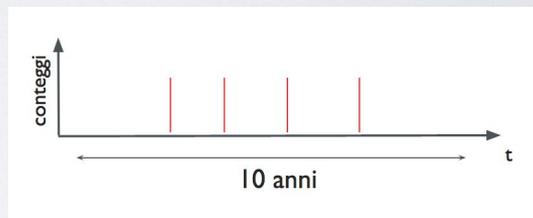
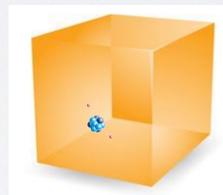
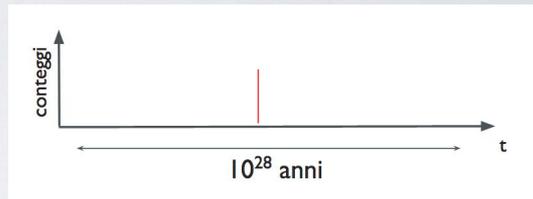
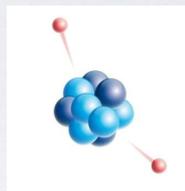
Se abbiamo 10^{27} nuclei sotto osservazione
(esperimenti su scala 1 ton)

MA

Radioattività ambientale e raggi cosmici ('fondo')

→ eventi spuri che possono simulare l'evento cercato

$$(N_{\text{ev.spuri}} \propto M_{\text{rivelatore}} \times T_{\text{misura}})$$



I Laboratori Nazionali del Gran Sasso

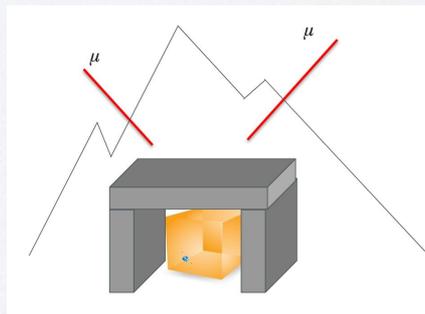
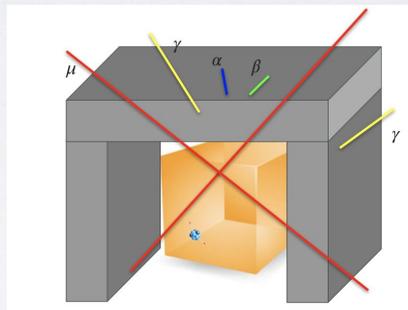
I raggi cosmici e la radioattività ambientale: perchè dobbiamo schermarli

Esperimenti che ricercano eventi rari.

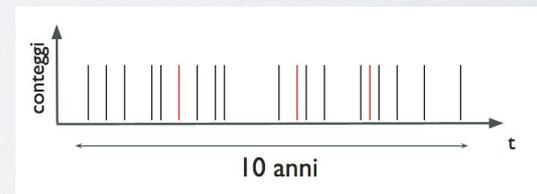
Un esempio: misurare un processo con $T_{1/2} > 10^{26}$ anni

Riduzione del fondo:

- Schermature e selezione dei materiali per ridurre il numero di eventi che possono 'simulare' l'evento cercato
- Laboratori sotterranei →
es. Laboratori Nazionali del Gran Sasso:
riduzione di flusso μ cosmici di fattore 10^6



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

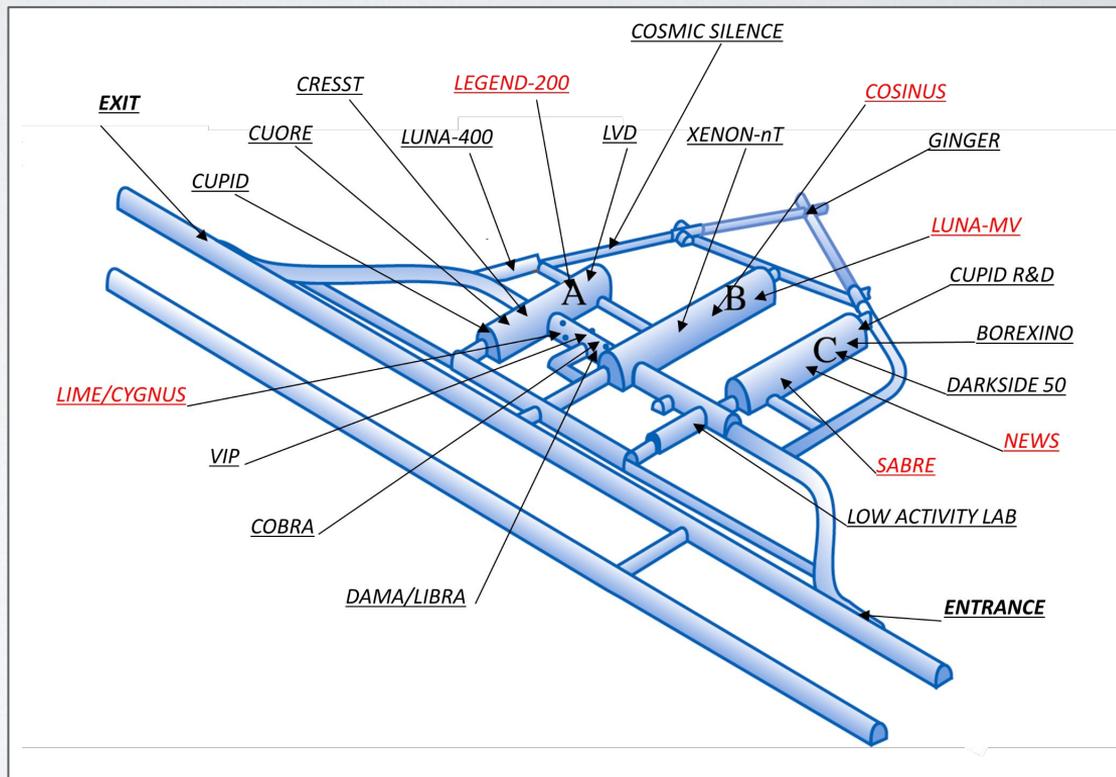


@LNGS
 $\sim 10^{-8} \mu/\text{cm}^2/\text{s} \rightarrow 0.5 \mu/\text{cm}^2/\text{y}$

I Laboratori Nazionali del Gran Sasso

Fisica underground: linee di ricerca

- ✓ **Neutrini:** BOREXINO, LVD, GERDA/LEGEND, CUORE/CUPID, COBRA
- ✓ **Materia Oscura:** DAMA/LIBRA, DARKSIDE, XENON, CRESST, COSINUS, SABRE, CYGNUS
- ✓ **Astrofisica Nucleare:** LUNA
- ✓ Fisica fondamentale: VIP
- ✓ Attività multidisciplinari: GINGER, Cosmic Silence



I Laboratori Nazionali del Gran Sasso

Fisica underground: neutrini

- Esistono 3 diversi tipi/flavor di neutrino: ν_e, ν_μ e ν_τ
- 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 “oscillazioni di flavor”.
- Vengono prodotti in molti meccanismi con energie che spaziano su parecchi ordini di grandezza (da qualche eV a $>10^{15}$ eV).



Neutrini Solari



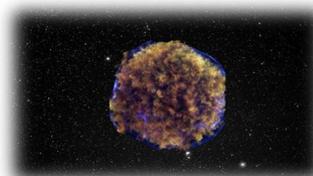
Neutrini Fossili
dal Big Bang



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

I Laboratori Nazionali del Gran Sasso

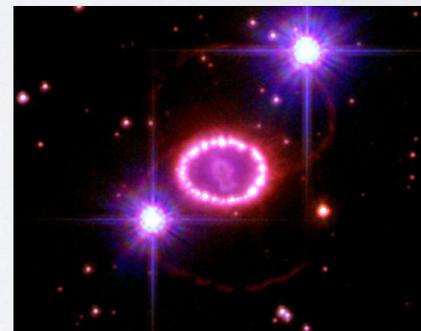
Fisica underground: neutrini

LVD

Large Volume Detector

(verso la conclusione dell'attività sperimentale)

- LVD contiene 1000 t di liquido scintillatore
- Scopo principale è rivelare i neutrini emessi da una Supernova nella nostra Galassia o in una delle Galassie vicine.
- Centinaia di neutrini rivelati se una Supernova al centro della nostra Galassia
- La frequenza attesa di esplosioni di Supernovae nella nostra Galassia è di 2-4 per secolo!
- Il rivelatore è in funzione dal 1992, in continua presa dati



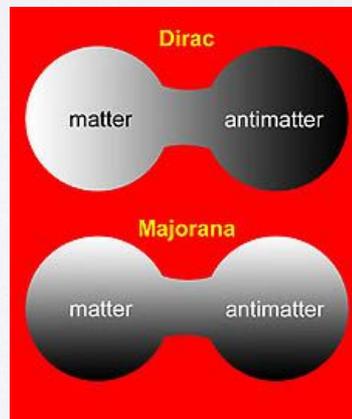
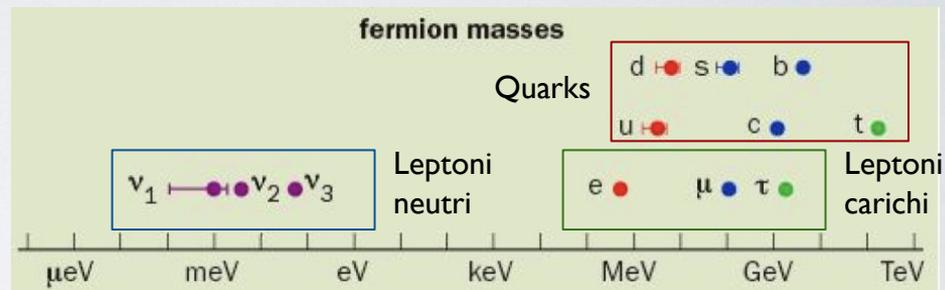
L'ultima Supernova esplosa nella Grande Nube di Magellano risale al 1987

I Laboratori Nazionali del Gran Sasso

Fisica underground: neutrini

Domande aperte:

- Qual è il valore assoluto della massa dei neutrini?
- Perché i neutrini hanno masse così piccole rispetto alle altre particelle del Modello Standard (quarks, leptoni)?
- I neutrini ν - leptoni neutri - sono particelle di Dirac o di Majorana?



$$\nu \neq \bar{\nu}$$

(come le altre particelle di SM,
es. $e^- \neq e^+, \dots$)



$$\nu = \bar{\nu}$$

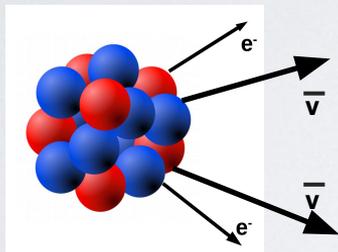
I Laboratori Nazionali del Gran Sasso

Fisica underground: neutrini

Indagare la natura del neutrino attraverso il decadimento doppio beta

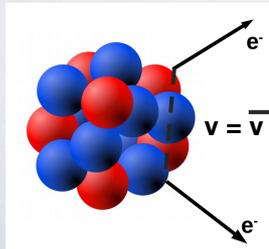
Si possono studiare particolari processi nucleari, in cui appaiono nuove transizioni permesse in estensioni del modello standard in cui si considera il neutrino come particella di Majorana.

Un esempio è il decadimento doppio beta, processo nucleare molto raro: $(A, Z) \rightarrow (A, Z+2)$



2νββ - Decadimento doppio beta con emissione di neutrini

- Processo del 2° ordine consentito dal Modello Standard
- Osservato in vari nuclei: $T_{0\nu\beta\beta}^{1/2} \sim 10^{18-24} \text{ yr}$



0νββ - Decadimento doppio beta senza emissione di neutrini

- Processo che viola il numero leptonico - ‘creazione di elettroni’
- Non ancora osservato $T_{0\nu\beta\beta}^{1/2} > 10^{24-26} \text{ yr}$
- Se osservato: indicazione di natura di Majorana del neutrino, $(T_{1/2})^{-1} \propto m_{\beta\beta}^2$

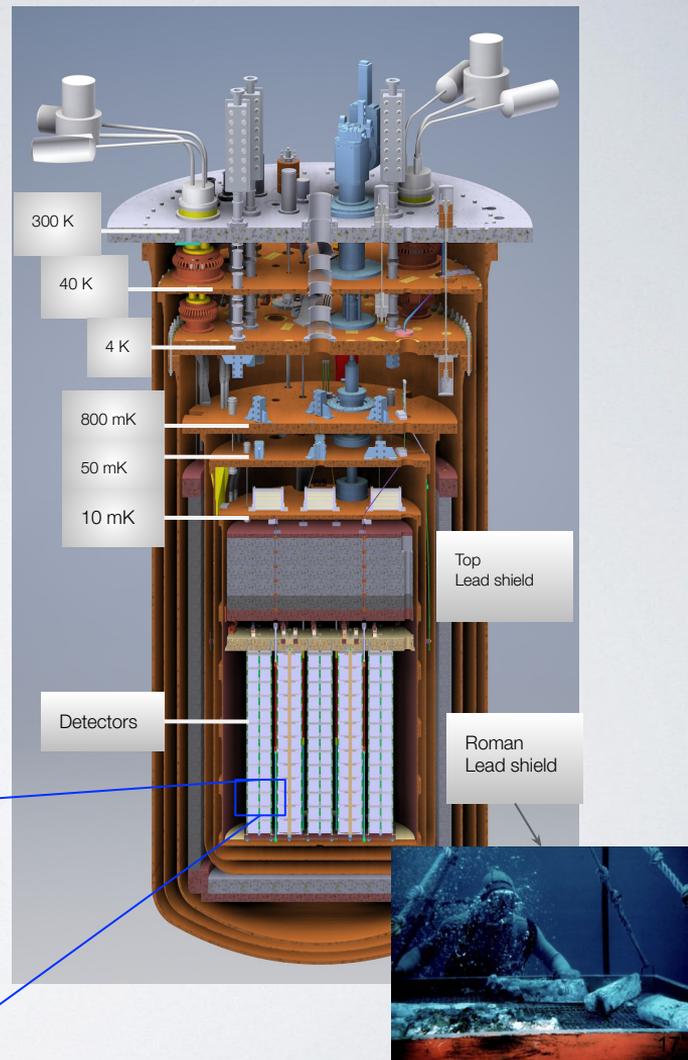
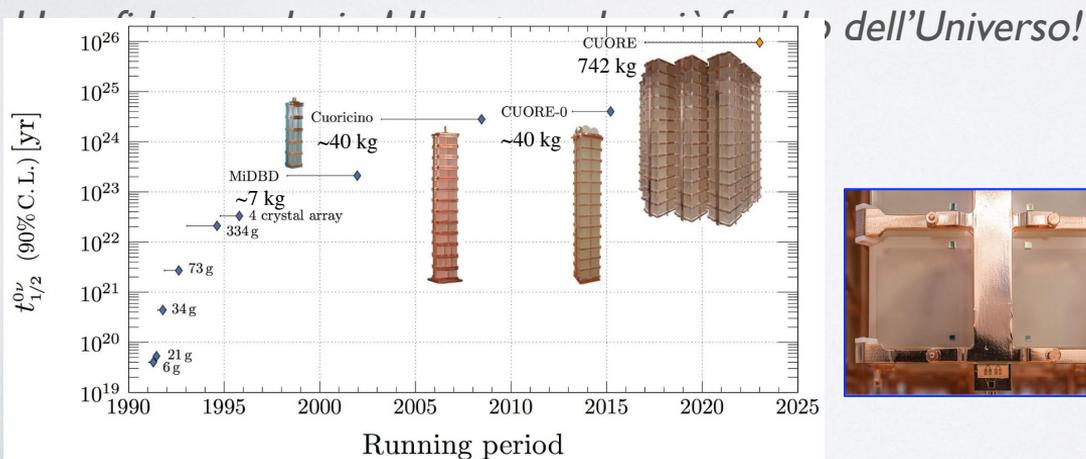
I Laboratori Nazionali del Gran Sasso

Fisica underground: neutrini

CUORE (dal 2017)

(Cryogenic Underground Observatory for Rare Events)

- Ricerca del decadimento $0\nu\beta\beta$ di isotopo ^{130}Te ($Q_{\beta\beta}=2527$ keV)
- Esperimento criogenico con rivelatore a stato solido di scala ~1 ton: 988 cristalli in $(\text{nat})\text{TeO}_2$ operati come calorimetri criogenici a **10 mK**



I Laboratori Nazionali del Gran Sasso

Fisica underground: neutrini

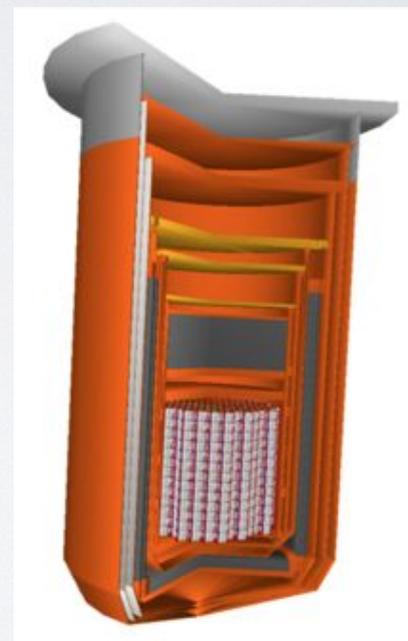
Ricerca del decadimento $0\nu\beta\beta$ con calorimetri criogenici a **10 mK**: da CUORE a CUPID

CUPID

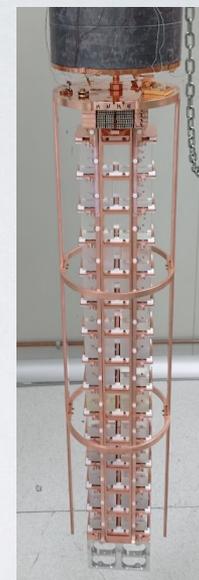
(CUORE Upgrade with Particle IDentification)

Utilizzerà cristalli di molibdato di litio (Li_2MoO_4) ~500kg per cercare il doppio decadimento beta del ^{100}Mo ($Q_{\beta\beta}=3034$ keV), con sensibilità a vite medie $T\sim 10^{27}$ yr

SFIDE	STRATEGIE
Aumentare il num. di isotopi $N > 10^{27}$ ($A=N/\tau$)	Utilizzo di cristalli arricchiti (in ^{100}Mo)
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



Rivelatore CUPID
in criostato di CUORE



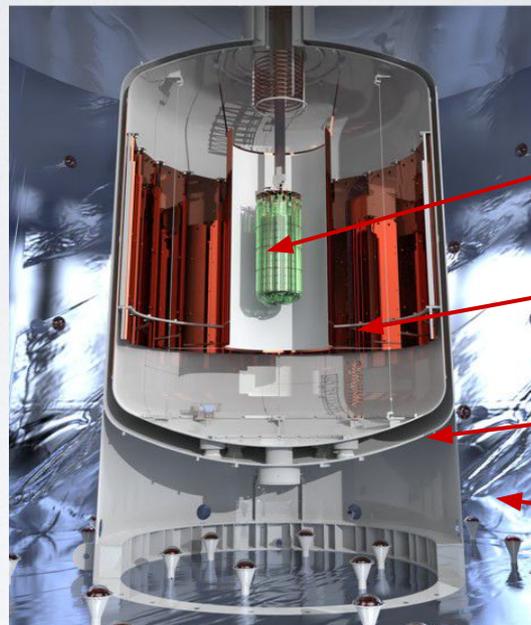
LNGS 2022/2023
CUPID prototype tower

I Laboratori Nazionali del Gran Sasso

Fisica underground: neutrini

LEGEND-200 (dal 2020)

- Ricerca del decadimento $0\nu\beta\beta$ di isotopo ^{76}Ge ($Q_{\beta\beta} = 2038 \text{ keV}$)
- Utilizza rivelatori a semiconduttore (Ge) ultrapuri arricchiti nell'isotopo ^{76}Ge che funzionano immersi in una schermatura criogenica (LAr a 90K).



Rivelatori germanio e Liquid Argon Veto

Piastre in rame per schermare la radioattività dell'acciaio del criostato

Criostato per Argon liquido (LAr)

Tank esterna: acqua, come moderatore di neutroni e muon veto

Precedente esperimento:

GERDA (2011-2019, due fasi)

Next generation:

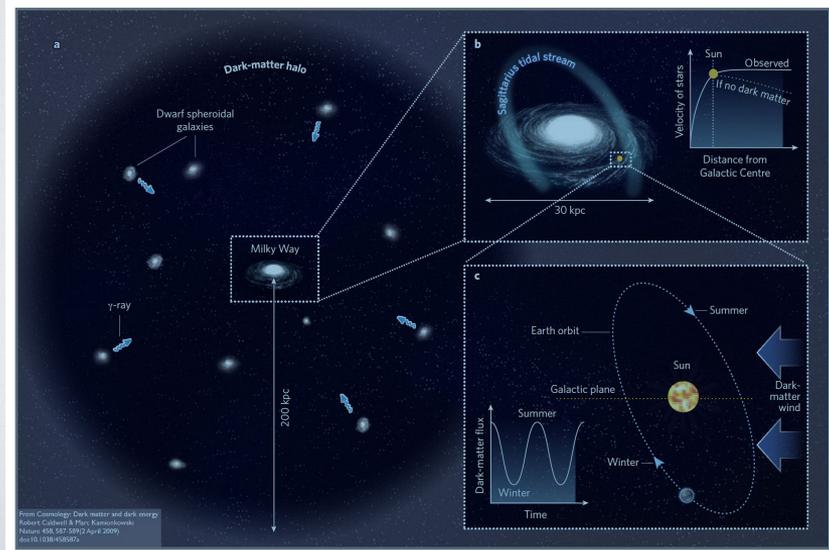
LEGEND-1000

I Laboratori Nazionali del Gran Sasso

Fisica underground: materia oscura

Le osservazioni sperimentali dell'Universo e della sua evoluzione ci dicono che la materia visibile corrisponde a meno del 5% del totale. Circa il 25% è materia oscura. Il restante, più del 70%, è energia oscura.

Nella nostra Galassia, viviamo in un alone di Materia Oscura (DM)



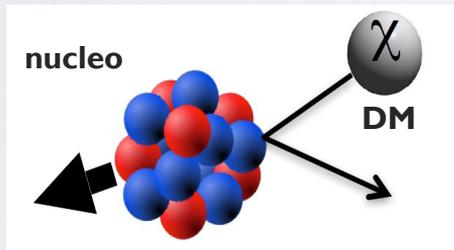
Assunzioni standard sulla DM nell'alone galattico:

- 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)

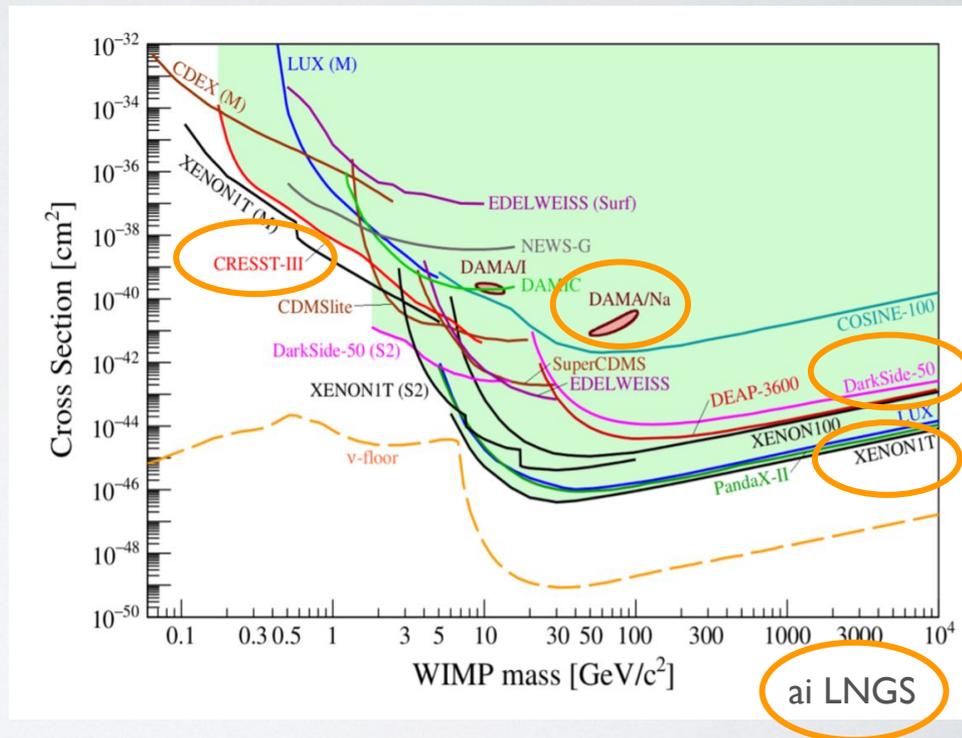
I Laboratori Nazionali del Gran Sasso

Fisica underground: materia oscura

L'obiettivo delle **ricerche dirette** è quello di osservare in laboratorio l'interazione (scattering) di una particella di DM (es. WIMP, Weakly Interacting Massive Particle) su un nucleo bersaglio (o su un elettrone).



Sezione d'urto di interazione della DM →

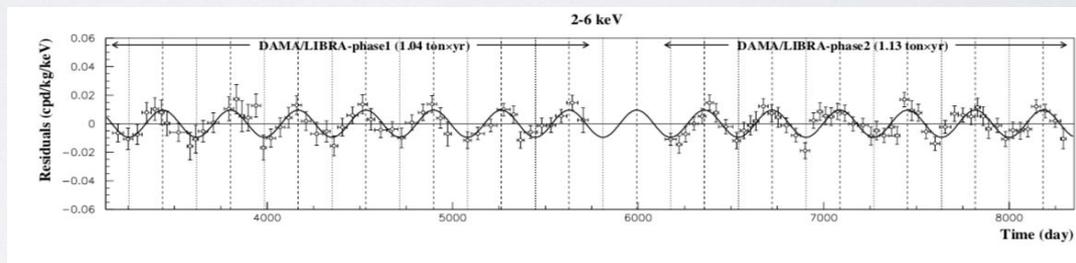
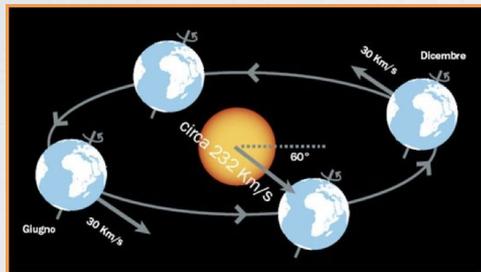


I Laboratori Nazionali del Gran Sasso

Fisica underground: materia oscura

DAMA/LIBRA (dal 2008)

- 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 standard 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



Verificare il segnale di DAMA
con rilevatori di base NaI

I Laboratori Nazionali del Gran Sasso

Fisica underground: materia oscura

COSINUS

(under construction)

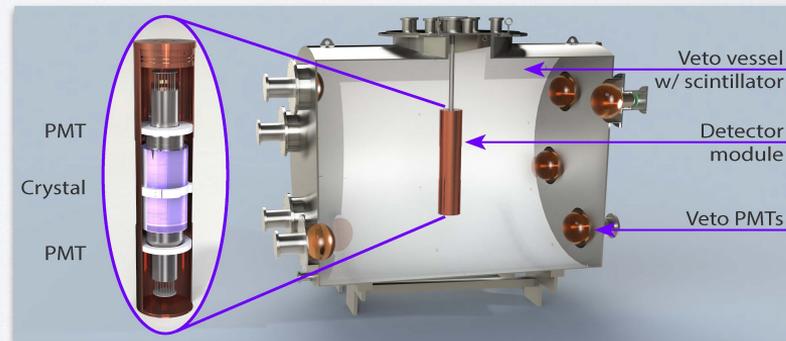
- Rivelatore: bolometri scintillanti NaI
- Scattering di WIMPs su un nucleo atomico
- La doppia lettura permette di identificare la particella incidente ma modulazione annuale complicata



SABRE

Sodium-iodide with Active Background REjection (under construction)

- 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



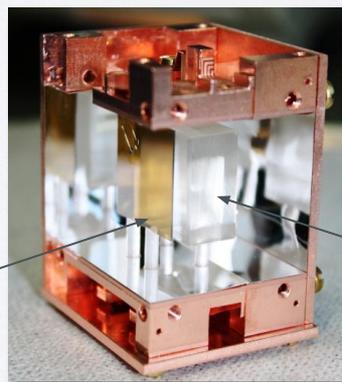
I Laboratori Nazionali del Gran Sasso

Fisica underground: materia oscura

CRESST (dal 2009, varie fasi)

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)

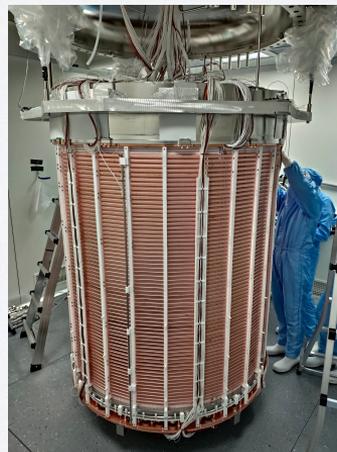
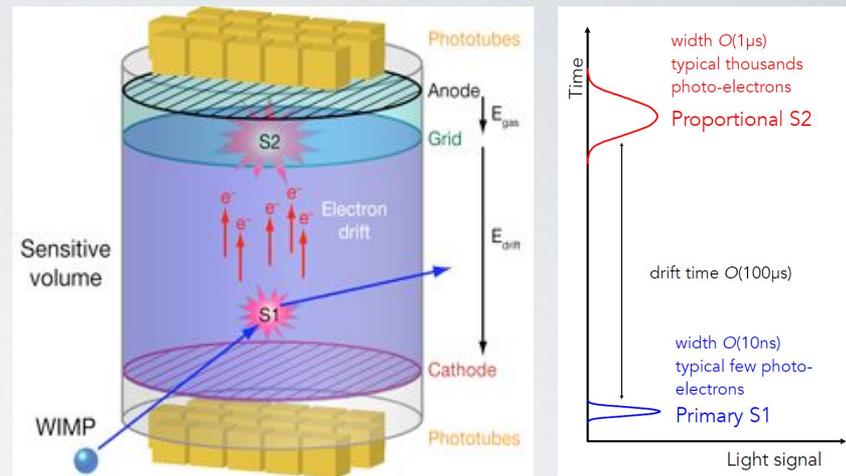
Assorbitore CaWO_4

I Laboratori Nazionali del Gran Sasso

Fisica underground: materia oscura

XENON - nT (dal 2020)

- Rivelatore: camera TPC a doppia fase (liquida e gassosa), 5.9 ton volume attivo
- Scattering di WIMPs su un nucleo Xenon
- I fotomoltiplicatori sono utilizzati per rivelare la luce di scintillazione prodotta 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

Precedente esperimento:
XENON-IT (2015-2018)

I Laboratori Nazionali del Gran Sasso

Fisica underground: materia oscura

Dark Side-50 (dal 2013)

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

Pros:

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

Cons:

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

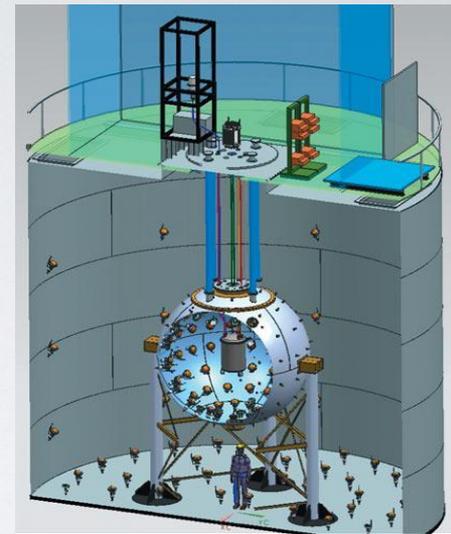
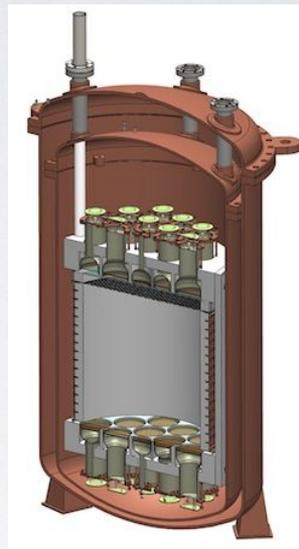
Xe vs Ar

Pros:

- Discr. in forma più efficiente

Cons:

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



Next generation:

DarkSide-20k (under construction)

I Laboratori Nazionali del Gran Sasso

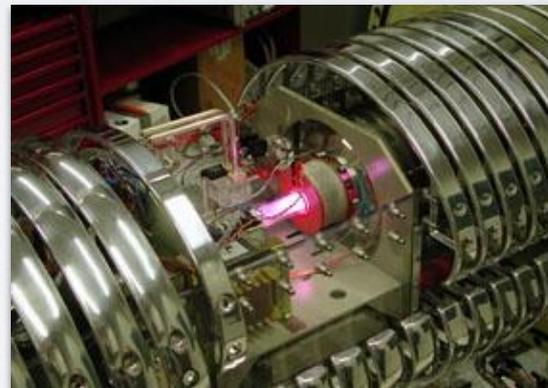
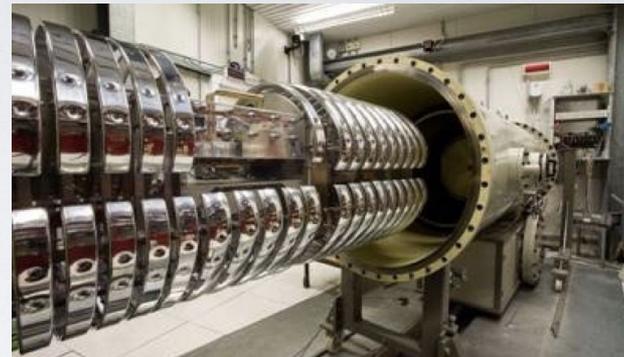
Fisica underground: astrofisica nucleare

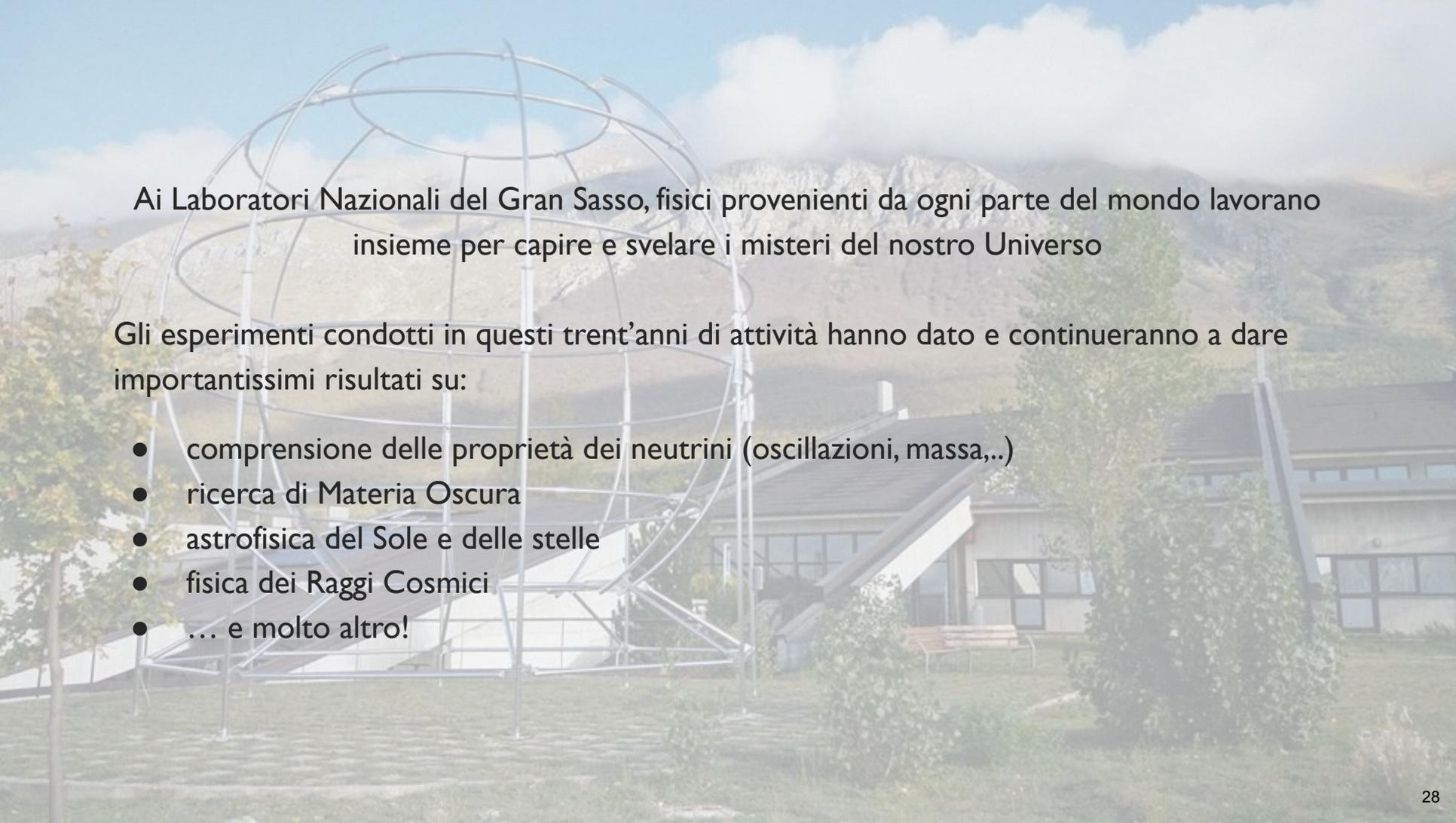
LUNA

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 (LUNA-400) → a 3 MV (LUNA-MV, dal 2020)
- 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.





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 trent'anni di attività hanno dato e continueranno a dare importantissimi risultati su:

- comprensione delle proprietà dei neutrini (oscillazioni, massa,..)
- ricerca di Materia Oscura
- astrofisica del Sole e delle stelle
- fisica dei Raggi Cosmici
- ... e molto altro!

Backup

I Laboratori Nazionali del Gran Sasso

Programma della visite 2023:

- 1° giorno
 - ore 13:00 partenza da Milano (Piazza della Scienza)
 - ore 19:00 arrivo a Fonte Cerreto, Assergi (L'Aquila) presso Hotel Fiordigigli, cena e pernottamento in Hotel
- 2° giorno
 - ore 9:30 spostamento ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso e sosta ai Laboratori esterni per circa 1 ora
 - ore 10:30 visita ai Laboratori sotterranei
 - ore 14:00 partenza per Milano

Prima visita: 23-24 febbraio