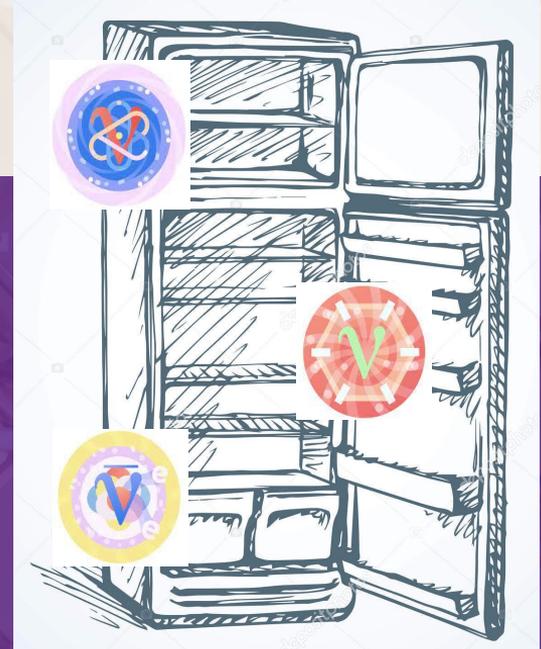


Frigoriferi per neutrini: il metro cubo più freddo dell'universo

Irene Nutini
INFN Milano Bicocca

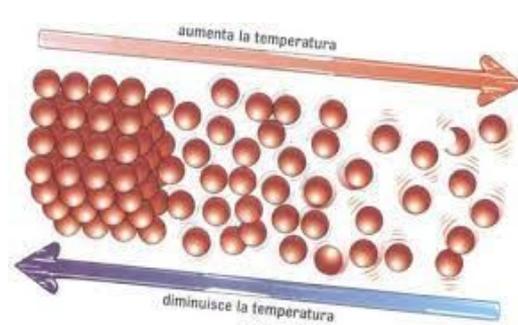
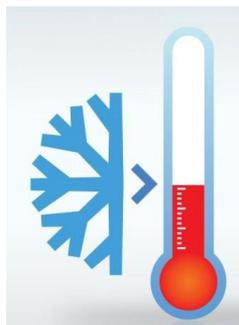
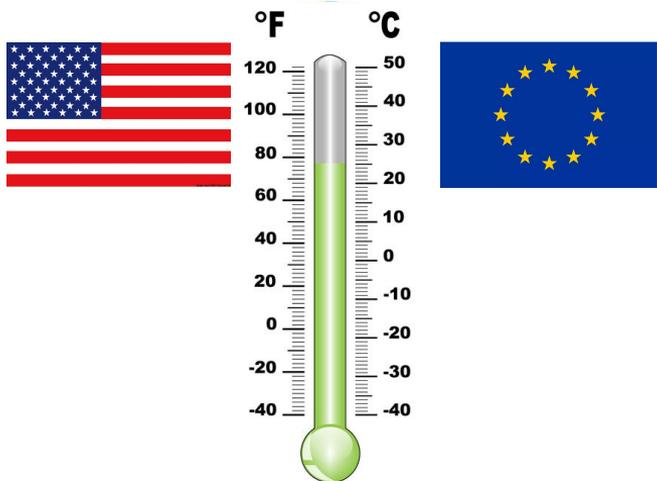
Seminario Art & Science 2022-2024



La temperatura.

Grado di agitazione termica di un sistema (un corpo, un ambiente)

Scale di temperatura



Calore e energia



La temperatura. Caldo e freddo.

Ambienti e temperature agli estremi sulla Terra



Riusciamo facilmente a immaginare che gli oggetti più caldi nel cosmo siano le stelle.
Ma quali sono i più freddi?

La temperatura. Lo zero assoluto.

Qual è la temperatura più fredda in assoluto che si può raggiungere?

Il concetto dello 'zero assoluto' (gli 0 K o -273.15°C) di temperatura, come assenza di calore, spesso non è facile da digerire.

Ci arriveremo a piccoli passi, esplorando il mondo della bassa temperatura.



Il mondo della bassa temperatura

0 °C = 273.15 K

-15 °C

-25 °C



Partiamo da 0°C,
quando l'acqua ghiaccia



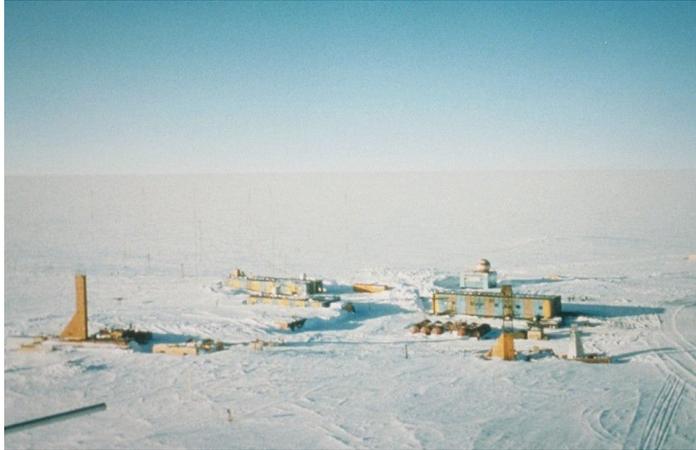
Un buon gelato in estate



Che freddo a Chicago in Inverno!

Il mondo della bassa temperatura

-90 °C



Stazione Vostok, Antartide (1983),
la temperatura ambientale più
fredda della storia

-180°C



Liquidi criogenici (LAr, LXe)
per dare la caccia ai neutrini

-196°C



Azoto liquido e cucina molecolare

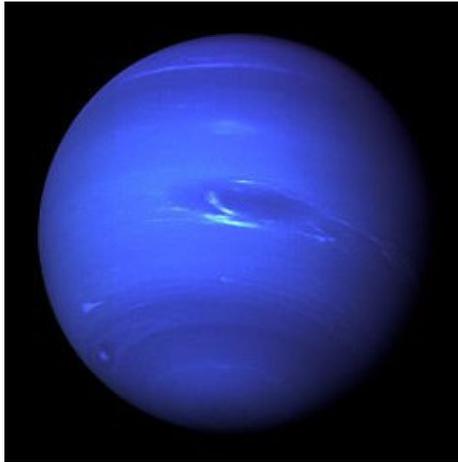
Il mondo della bassa temperatura

-220 °C

-270 °C

-272.65 °C

-273.15 °C = 0 K



Il pianeta più freddo del sistema solare, Nettuno



La temperatura del 'vuoto cosmico' e la CMB



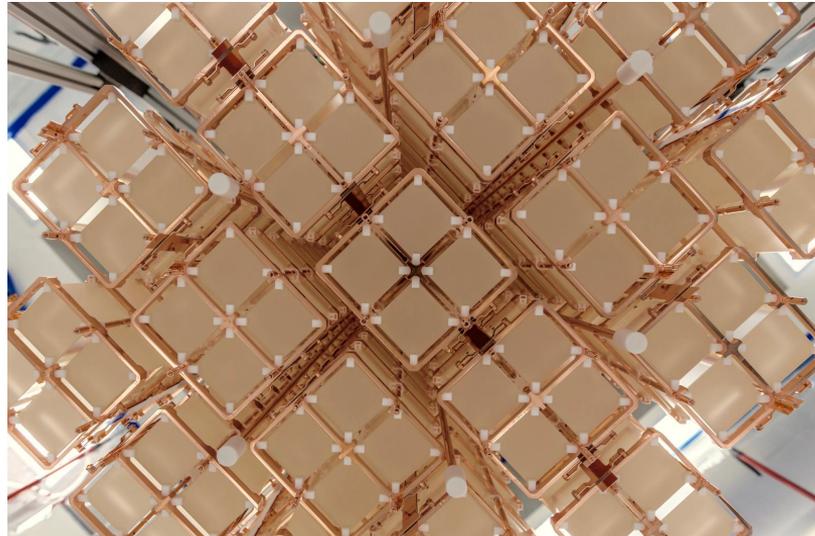
L'ambiente più freddo del cosmo, la Nebulosa Boomerang

Il metro cubo più freddo dell'universo

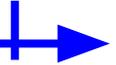
Si può scendere ancora più vicini allo zero assoluto? Sì!

Esiste il **metro cubo più freddo dell'universo**, a ben $-273,14^{\circ}\text{C} = 10 \text{ mK}$!

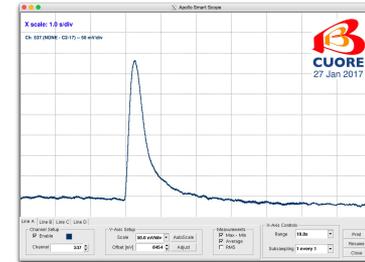
Questo è l'esperimento CUORE che si trova in Italia ai **Laboratori del Gran Sasso!**



$-273.15^{\circ}\text{C} = 0 \text{ K}$



-273.14°C

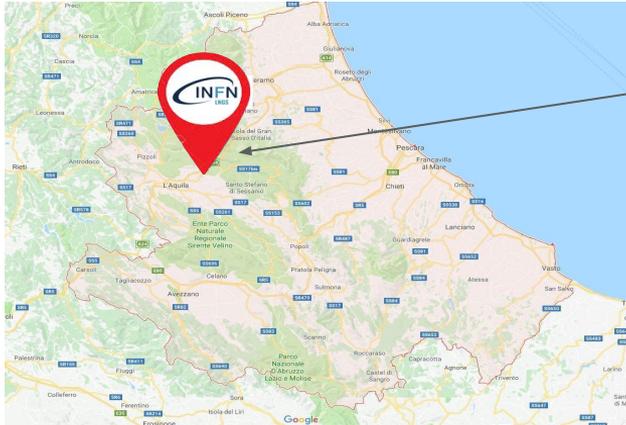


Il primo segnale a 10mK



I Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS)

Laboratori di ricerca d'eccellenza in Italia



Assergi (AQ), Abruzzo



[Link tour virtuale dei LNGS](#)

Laboratori sotterranei.
Al centro del traforo del
Gran Sasso, sull'autostrada che
collega Roma a Teramo →

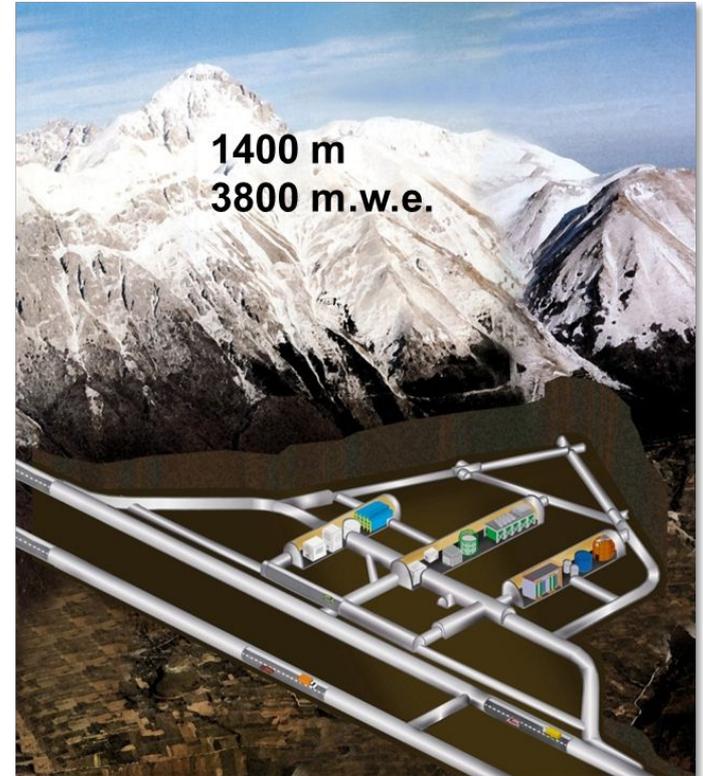


I Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS)

Un laboratorio di ricerca sotto una montagna

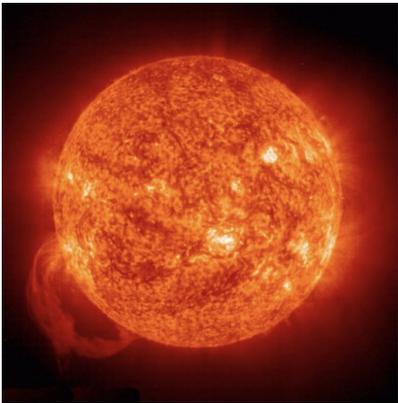
Tra i più vasti ed avanzati laboratori sotterranei del pianeta:

- 1400 m di roccia sovrastante
- Tre sale sperimentali. Ognuna misura circa 100 m di lunghezza, 20 m di larghezza e 18 m di altezza



Cosa si studia ai LNGS?

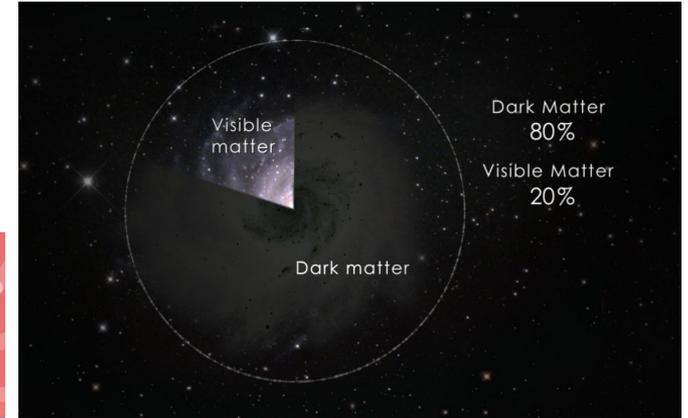
Fisica degli eventi rari



Astrofisica



Fisica del neutrino



Materia oscura

Perché un laboratorio di fisica sottoterra?

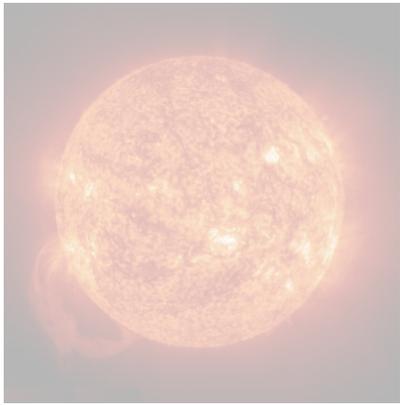
Fisica degli eventi rari: ascoltare un lieve sussurro sotto la pioggia battente

La pioggia battente sono i raggi cosmici. Per ripararsi dalla pioggia, gli esperimenti si trovano sotto una montagna. La roccia infatti è un'ottima schermatura naturale dai raggi cosmici.



Cosa si studia ai LNGS? Cosa studia CUORE?

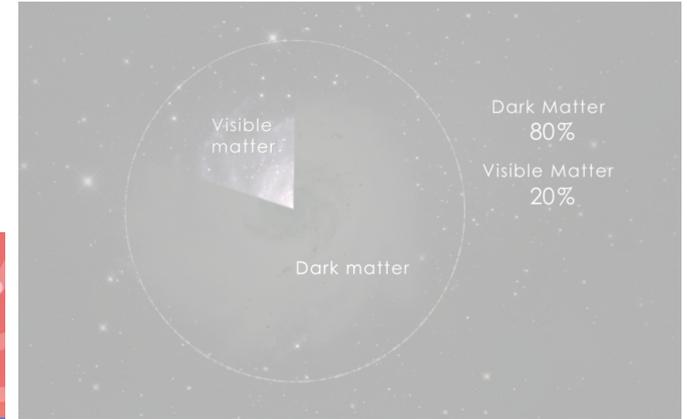
Fisica degli eventi rari



Astrofisica



Fisica del neutrino



Materia oscura

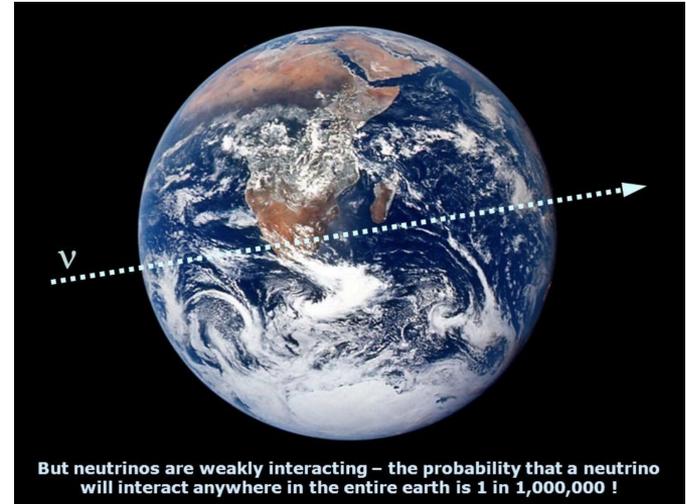
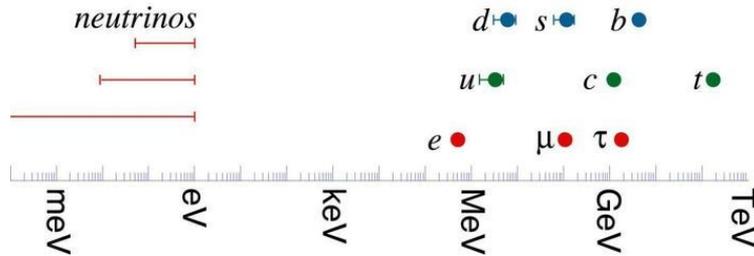
I Neutrini

Particelle elementari con massa piccolissima
(1 milione di volte meno di un elettrone)

Interagiscono pochissimo con la materia

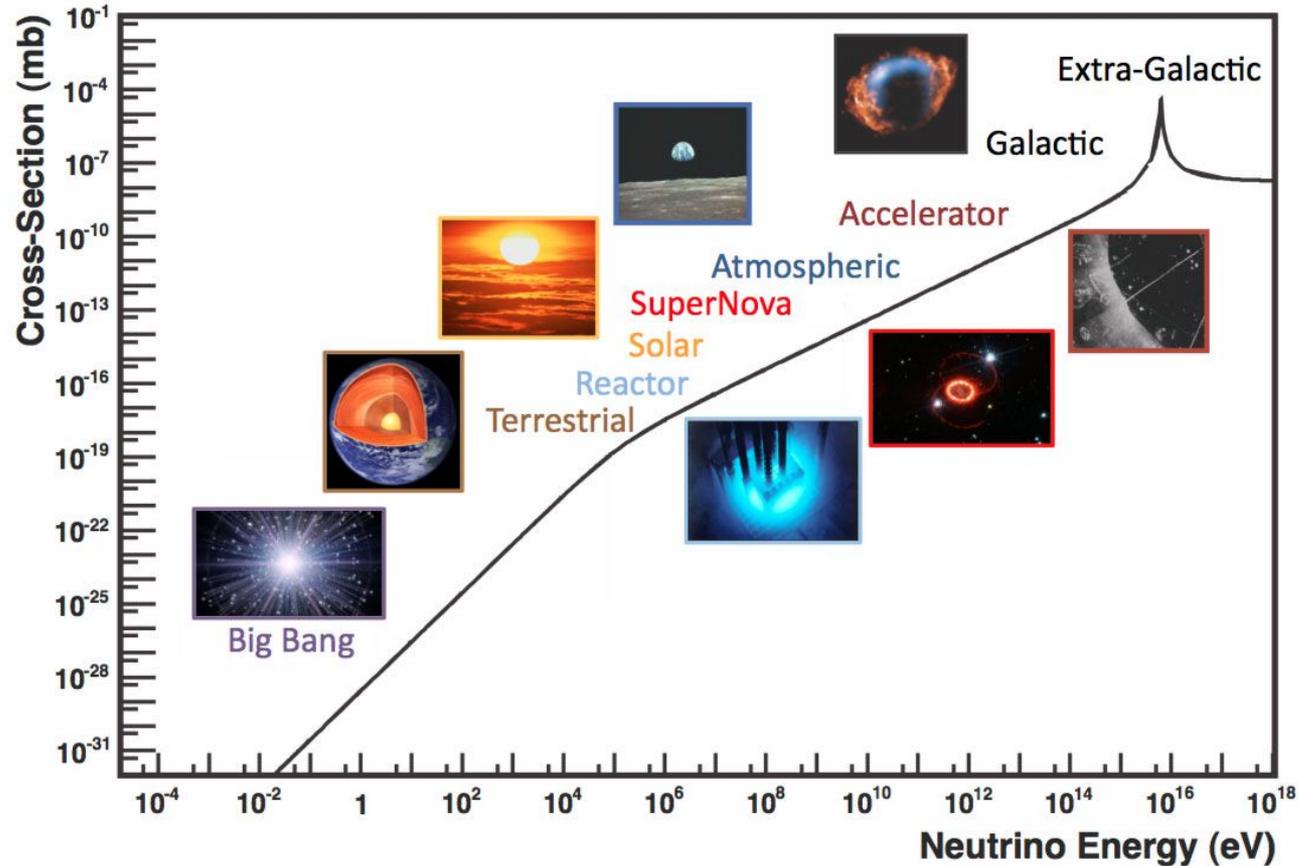
Ipotizzati da Pauli nel 1930.

Osservati per la prima volta soltanto nel 1956



But neutrinos are weakly interacting – the probability that a neutrino will interact anywhere in the entire earth is 1 in 1,000,000 !

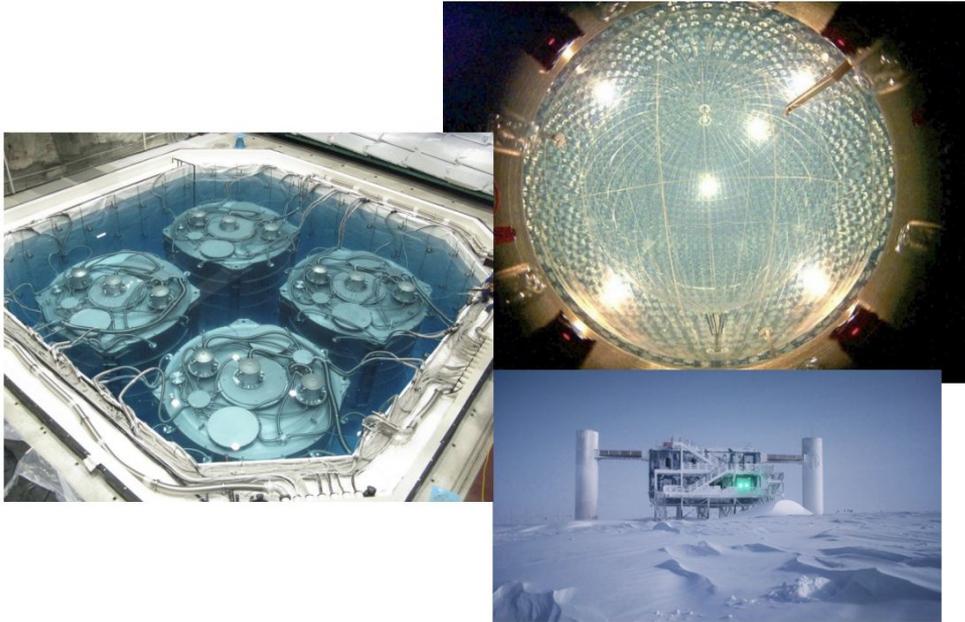
Sorgenti di neutrini



Come si osservano i neutrini

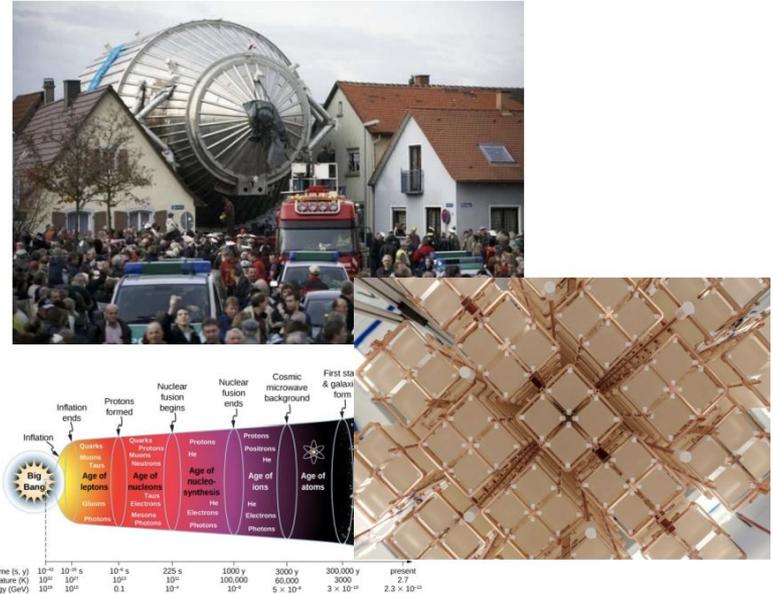
Misure dirette:

Rivelatori enormi per intercettare una piccola frazione



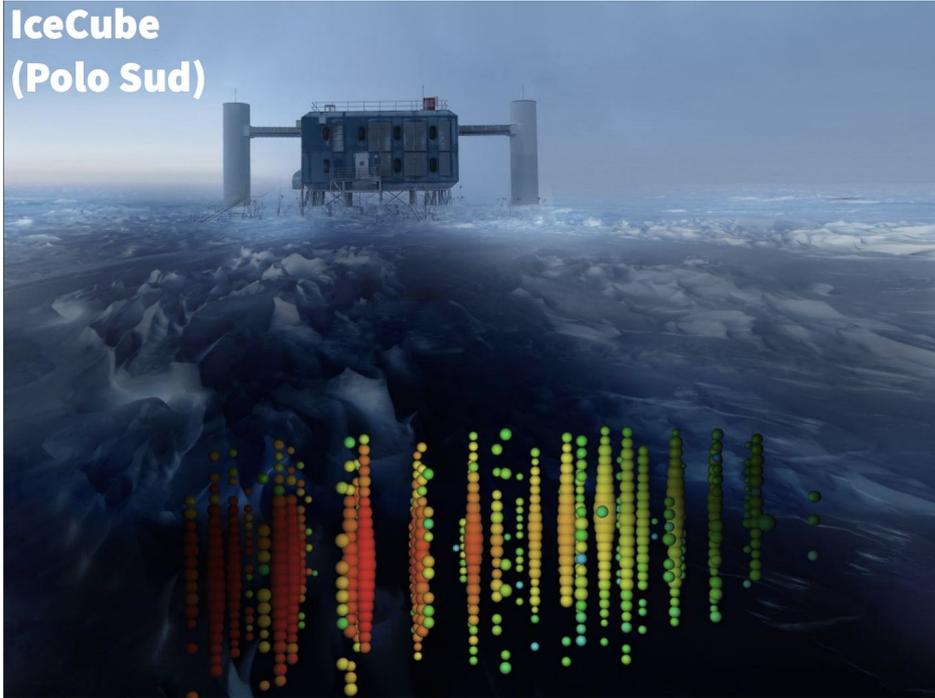
Misure indirette:

Studio di processi correlati ai neutrini, ma senza osservarli direttamente

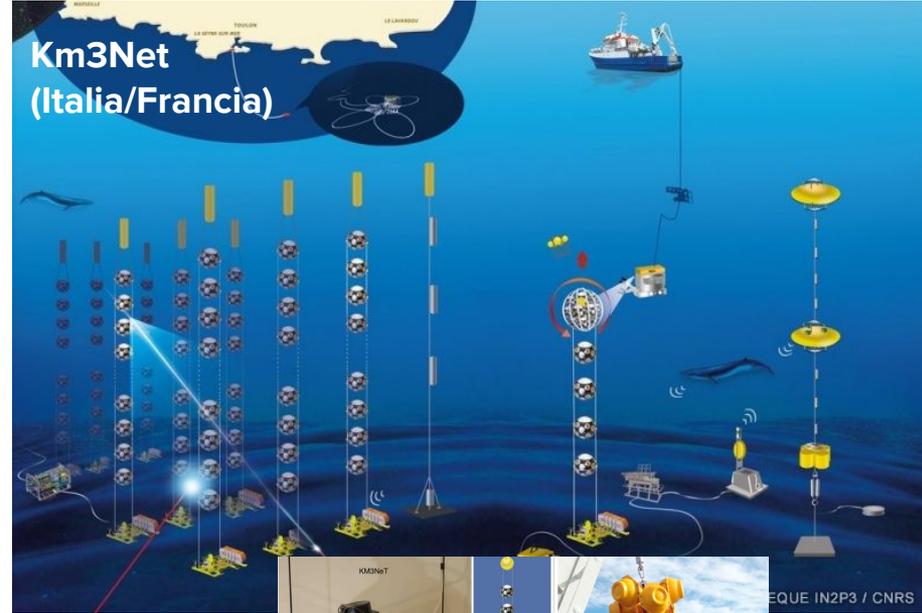


Esperimenti di fisica del neutrino

IceCube
(Polo Sud)

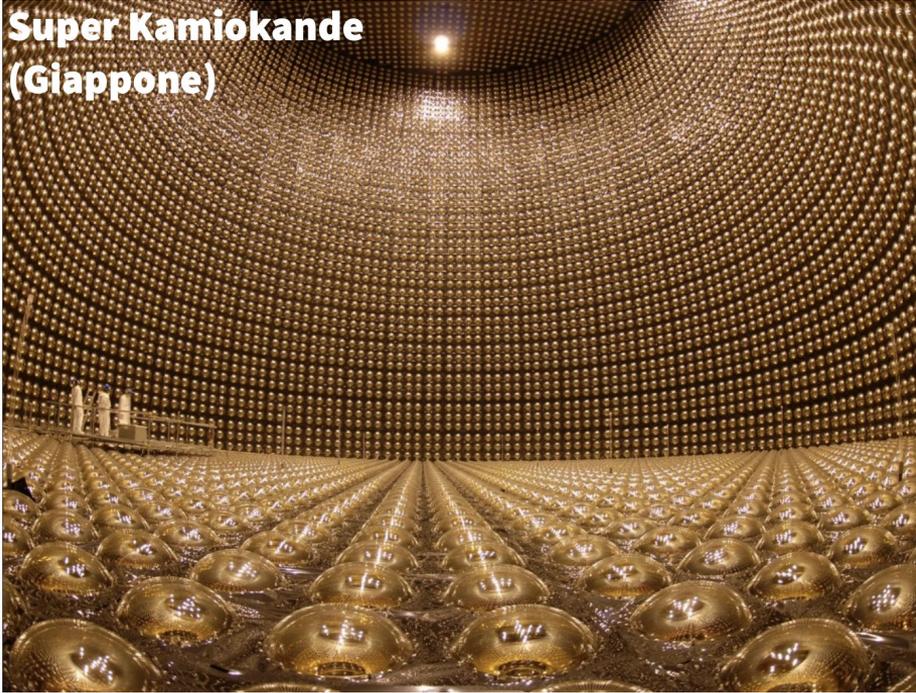


Km3Net
(Italia/Francia)

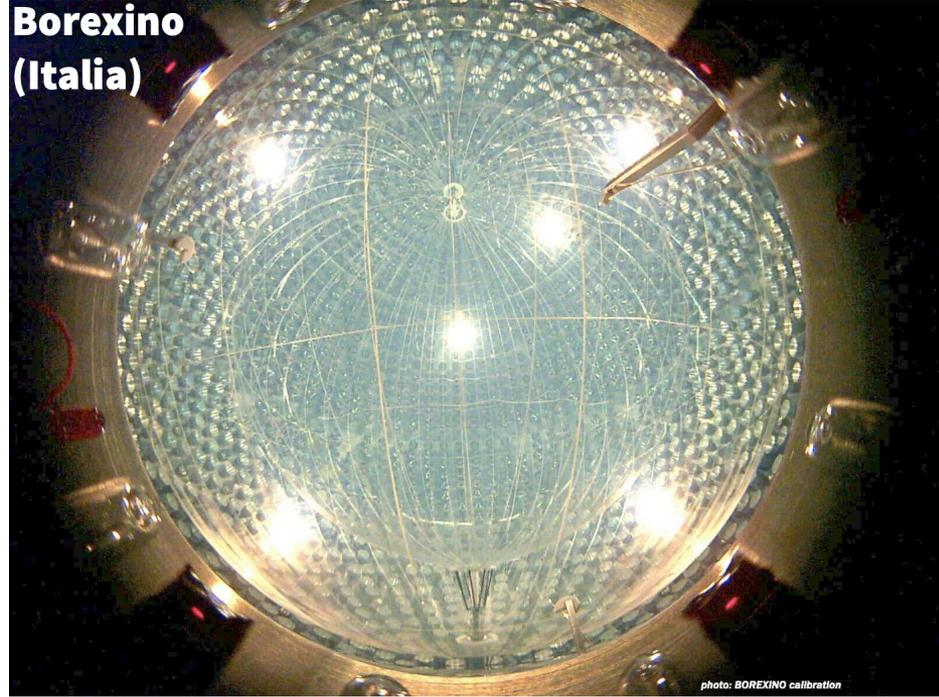


Esperimenti di fisica del neutrino

**Super Kamiokande
(Giappone)**



**Borexino
(Italia)**



Esperimenti di fisica del neutrino

Icarus (Italia → USA)



**Katrin
(Germania)**

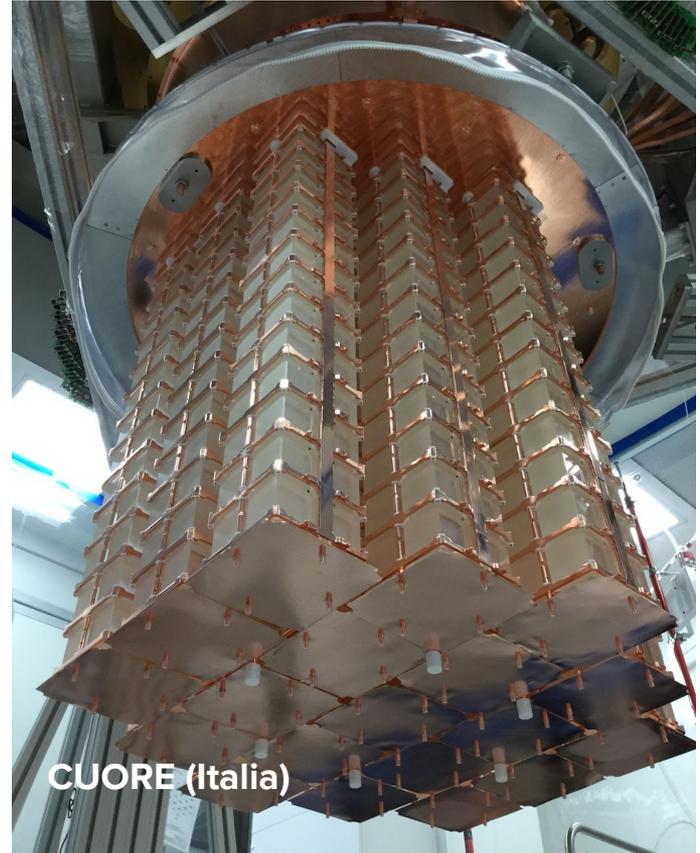


Esperimenti di fisica del neutrino

L'esperimento CUORE



Cryogenic
Underground
Observatory for
Rare
Events

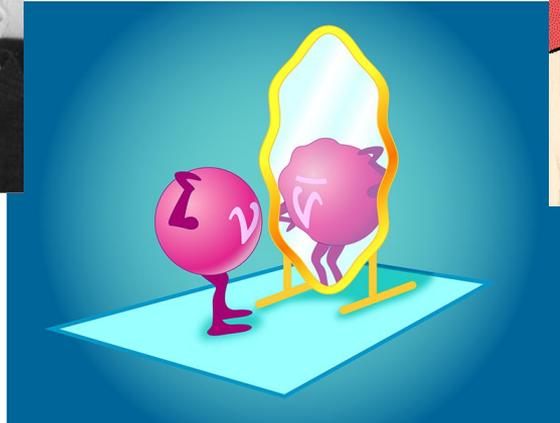


Cosa cerca CUORE?

Decadimento doppio beta senza emissione di neutrini

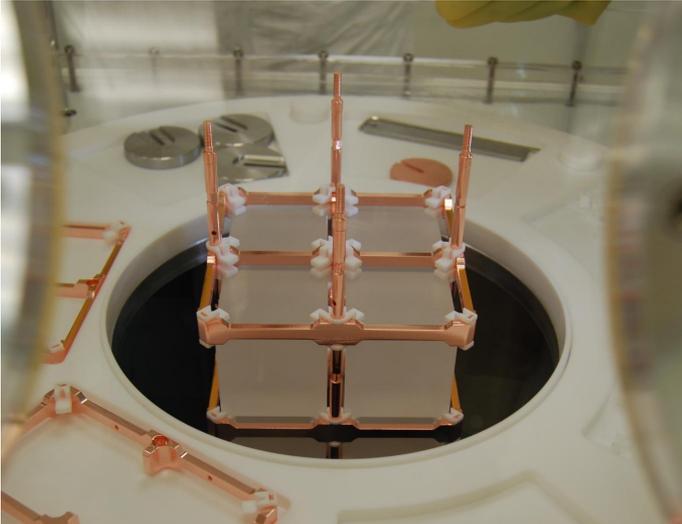
Misura indiretta delle proprietà dei neutrini

Cosa ci può aiutare a spiegare:



Il rivelatore di CUORE

988 cristalli di ossido di tellurio (TeO_2)
in 19 torri, circa 1 ton di massa totale



Rivelatori termici

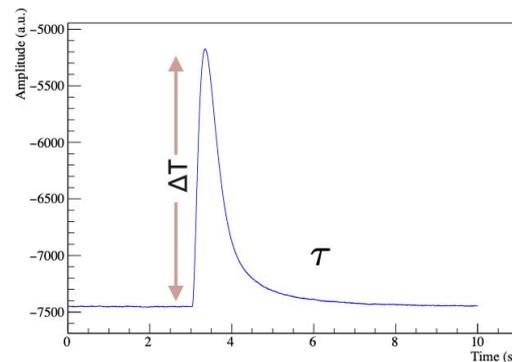
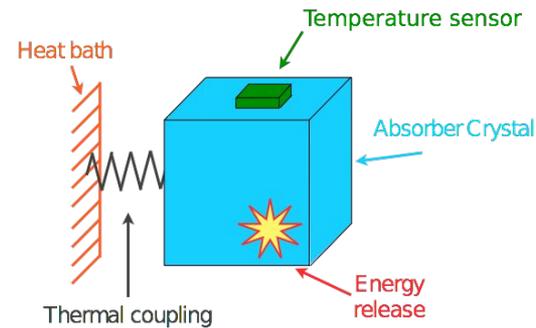
‘Congelare’ gli atomi del cristallo per sentire un sussurro al suo interno



Le particelle che interagiscono con i cristalli li scaldano.

A temperatura ambiente, questo riscaldamento è infinitesimo!

Per questo è necessario raffreddarli a 10 mK, affinché il riscaldamento sia misurabile



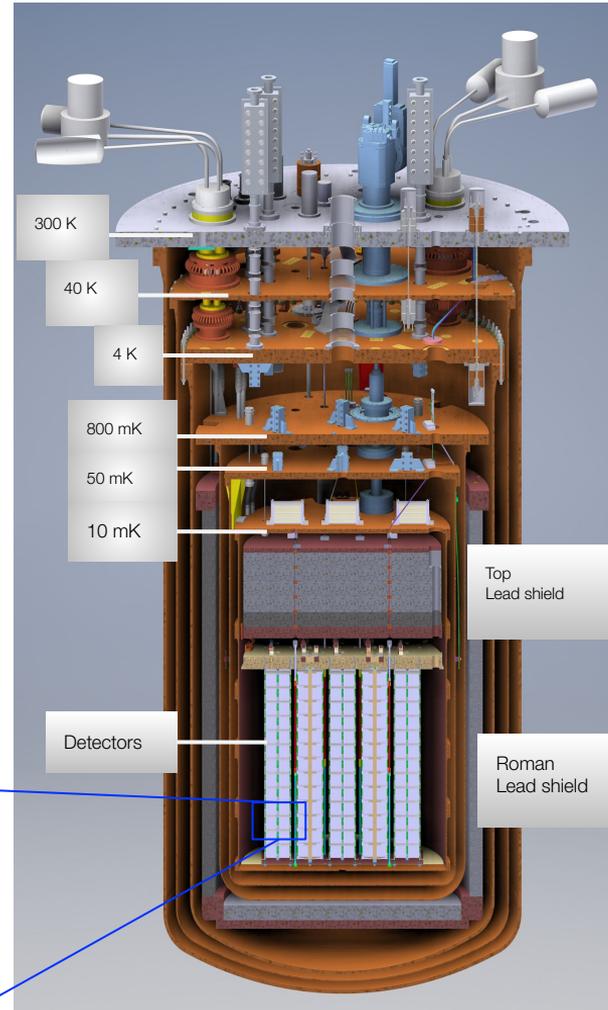
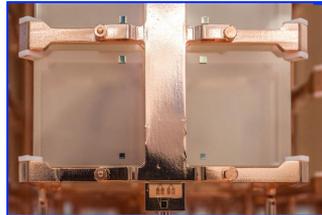
Il criostato di CUORE

Raffreddare ~1 ton di cristalli TeO_2 a 10 mK

Una sfida tecnologica!
Infrastruttura criogenica in grado di raffreddare tonnellate di materiale, attraverso più stadi di temperatura.



I cristalli si trovano al centro, nella parte più fredda
Il metro cubo più freddo dell'Universo!

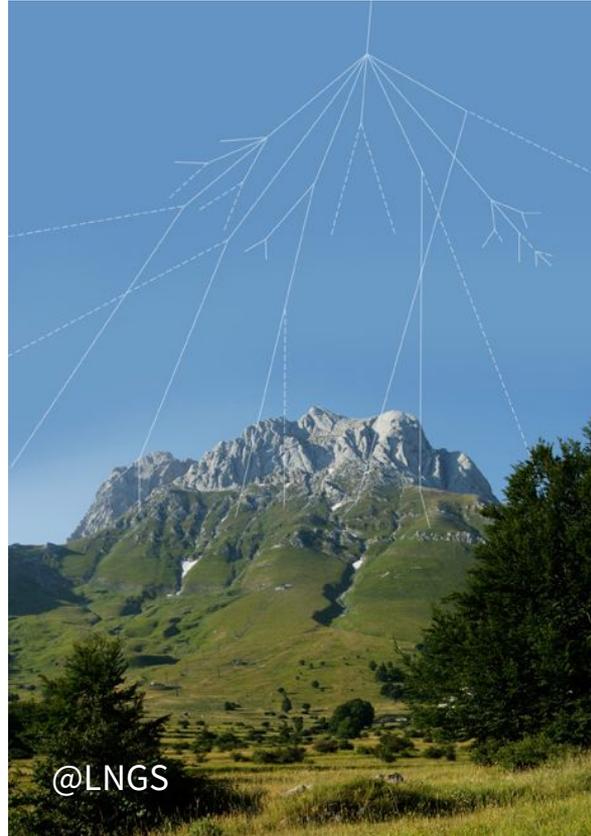


Di cosa ha bisogno CUORE

- ✓ Temperatura bassissima
- ✓ Schermatura dai raggi cosmici
- ✓ Riduzione della radioattività



@10 mK

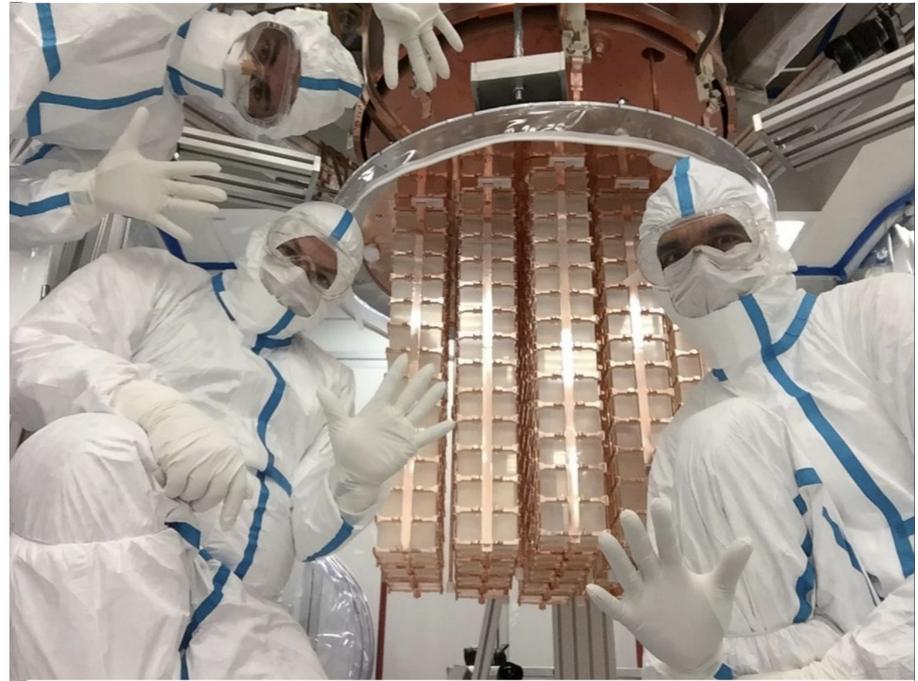


@LNGS



Riduzione della radioattività

✓ Neanche un capello!



Riduzione della radioattività

✓ Schermature: in rame e in piombo



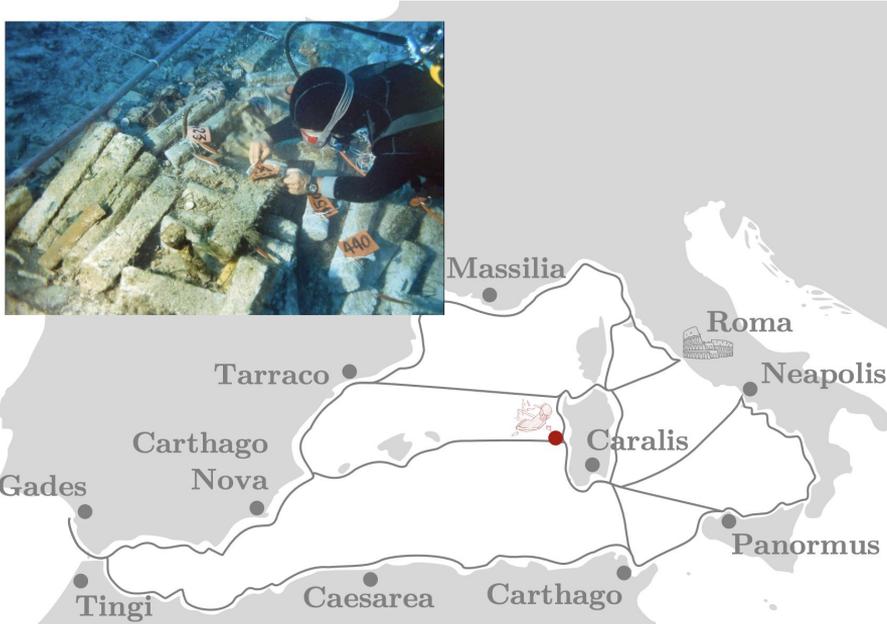
Rame
Schermo termico



Piombo
Anti-radiazioni

Piombo archeologico per CUORE

Piombo romano (I secolo a.C.):
Estratto in Spagna, affondato in Sardegna



Accordo tra
Soprintendenza
Archeologica di
Cagliari (Ministero dei
Beni Culturali) e INFN



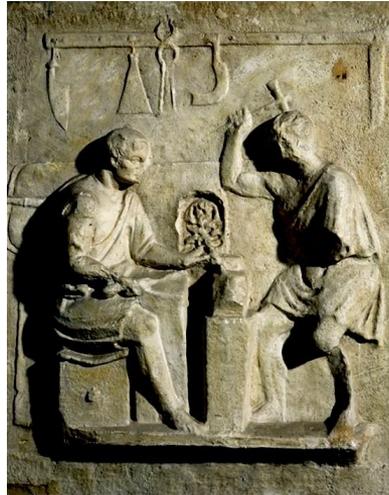
Piombo archeologico per CUORE: perchè?

Piombo romano a bassa radioattività, depleto in ^{210}Pb

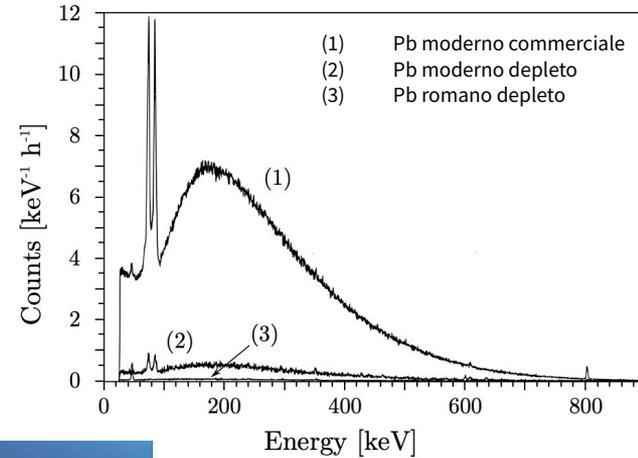
^{210}Pb (emivita 22.3 yr) rappresenta un'importante contributo della radioattività ambientale per esperimenti di eventi rari che operano su scale di ~10-20 anni



Roccia di galena (PbS) → estratto l'argento



Lingotti di piombo
2000 anni a 30 m
sott'acqua



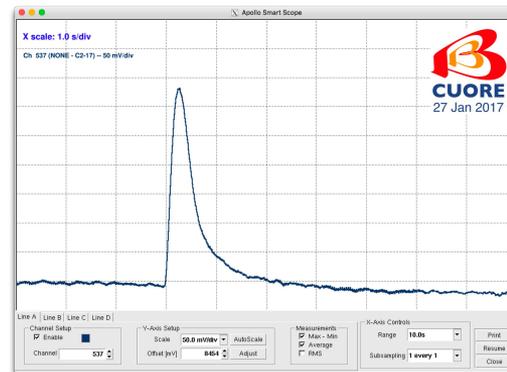
CUORE: freddo da record



Nel 2017, il criostato viene chiuso e raffreddato.

Più di una tonnellata tra rame e cristalli viene raffreddata a 10 mK

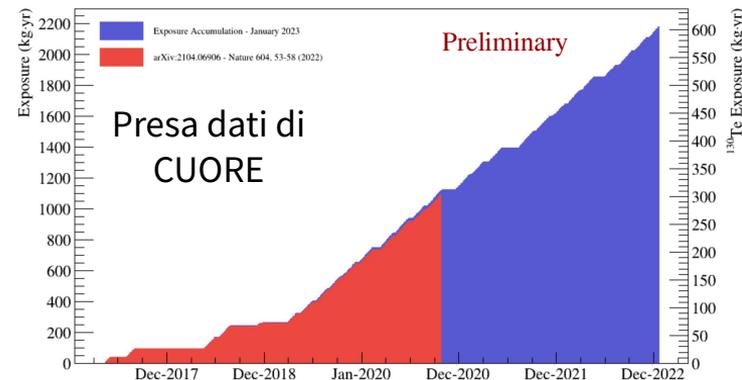
10 millesimi di grado sopra lo zero assoluto!



Il primo segnale a 10mK

L'esperimento è tuttora in presa dati e freddo a 10 mK!

Il metro cubo più freddo dell'universo dal 2017!



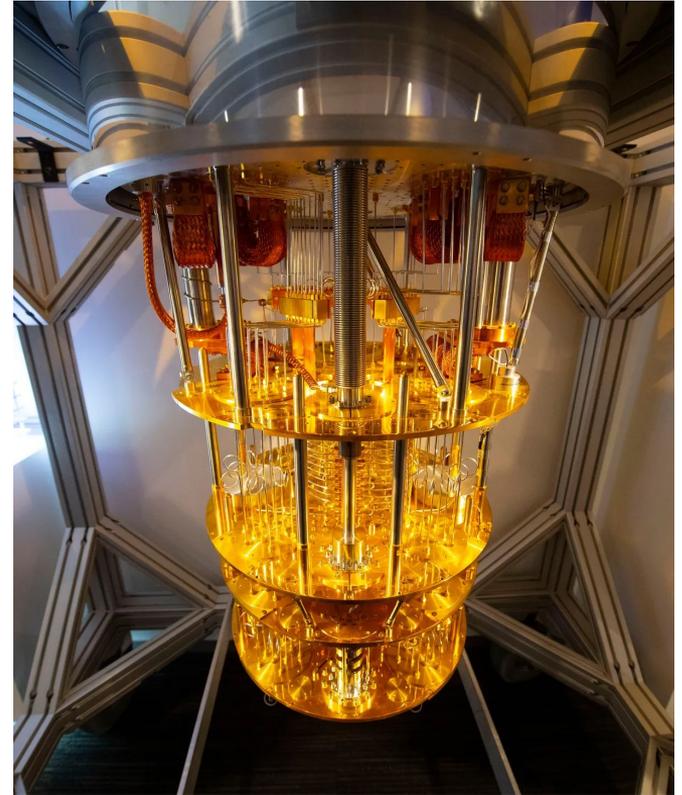
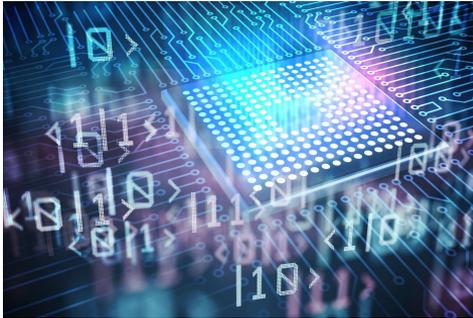
Criostati e computer quantistici

Si utilizzano criostati con tecnologie come quello di CUORE anche per i *Computer quantistici*.

Utilizzare le proprietà quantistiche della materia per fare operazioni sui dati complesse per i computer classici

I computer quantistici utilizzano bit quantistici, *qubit*.

Necessario operare i qubit a $T \sim 10\text{-}100\text{ mK}$

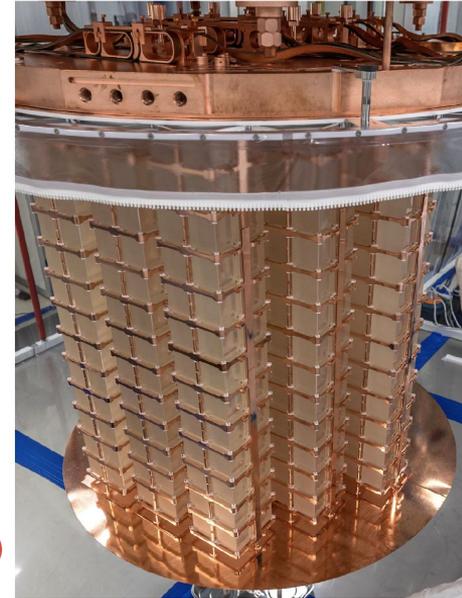


A conclusione del viaggio verso lo zero assoluto

Esistono esperimenti di fisica delle particelle che indagano le proprietà dei neutrini raffreddando i rivelatori fino a pochi millesimi di grado sopra lo zero assoluto.

CUORE è il metro cubo più freddo dell'universo!

La tecnologia e le infrastrutture criogeniche per raffreddare i sensori e i materiali fino a $\sim 10\text{-}100$ mK sono complesse e avanzate, applicate sia nella ricerca in fisica che per il quantum computing!



**Grazie per la vostra attenzione,
adesso spazio a domande e curiosità**

