

Alla ricerca dei neutrini di Majorana
con tecnologie criogeniche in CUORE

Alice Campani, Università di Genova - INFN Sezione di Genova
Dipartimento di fisica, Università di Genova, 19/05/2022



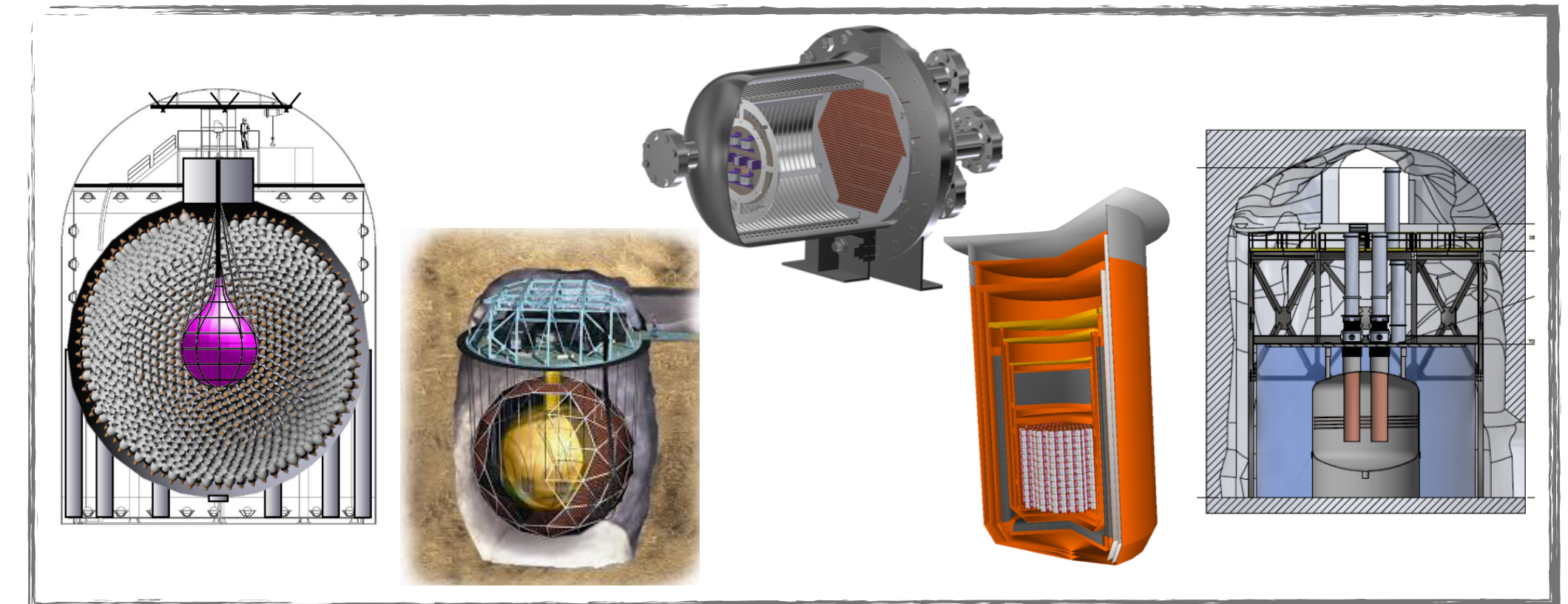
Università
di Genova



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare 1

Indice della presentazione

- La fisica del neutrino e la ricerca del doppio decadimento senza neutrini ($0\nu\beta\beta$)
storia, connessioni e implicazioni
- La ricerca del $0\nu\beta\beta$
sfide e prospettive degli esperimenti attuali
- CUORE per la ricerca del $0\nu\beta\beta$
sfida tecnologica, stato attuale e risultati
- Il futuro della tecnologia di CUORE: CUPID
cristalli scintillanti per abbattere il fondo

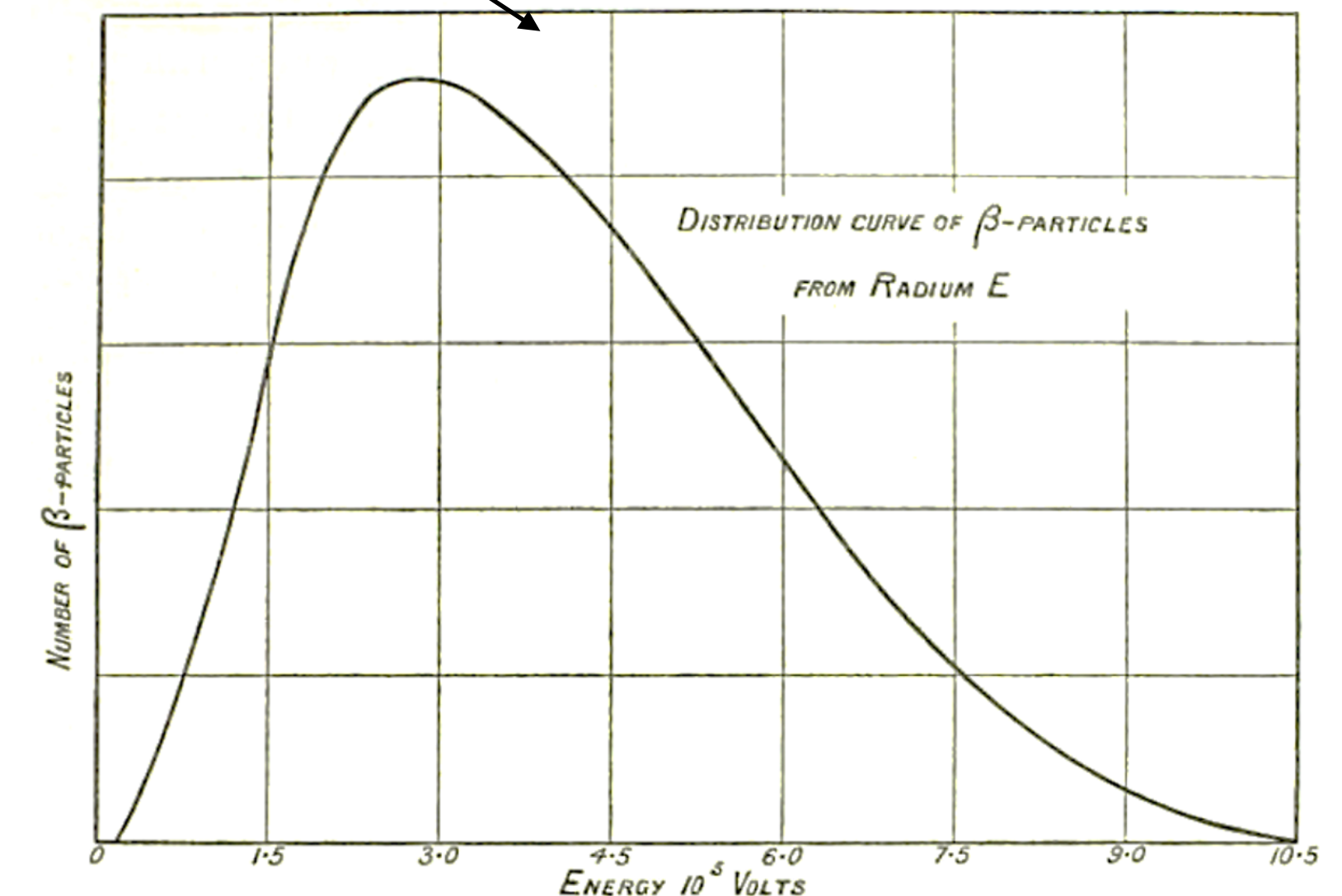
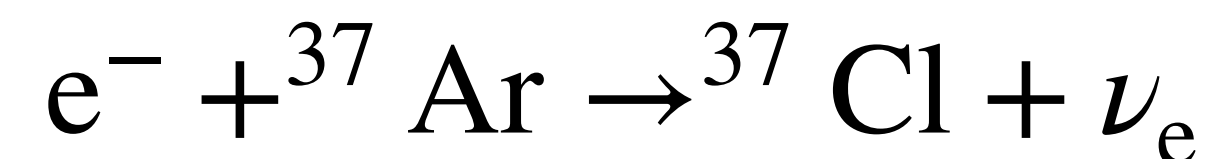


La fisica del neutrino e il doppio decadimento beta senza neutrini

Il doppio decadimento beta: origine dell'idea del neutrino

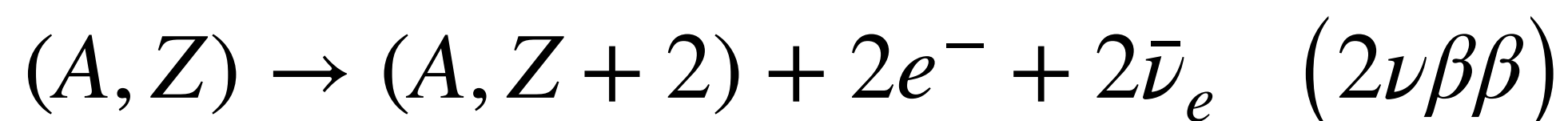
- **1914:** Mentre il decadimento α e γ producono uno spettro discreto, **J. Chadwick** scopre che lo spettro degli elettroni nel decadimento β è **continuo**
Di questo fatto vengono date inizialmente due spiegazioni diverse:
 - **L. Meitner** sostiene si tratti di un effetto di processi secondari
 - **C. D. Ellis** ipotizza che sia lo spettro degli elettroni ad essere continuoUna misura calorimetrica (^{210}Bi) chiarisce che è vera la 2° ipotesi

- **1930:** **W. Pauli** nel suo tentativo di salvare la conservazione dell'energia postula l'esistenza di una nuova particella neutra di spin 1/2 che **E. Fermi** chiamerà in seguito "neutrino" e verrà osservata per la prima volta **soltanto 20 anni dopo** nella cattura elettronica dell' ^{37}Ar (1952)

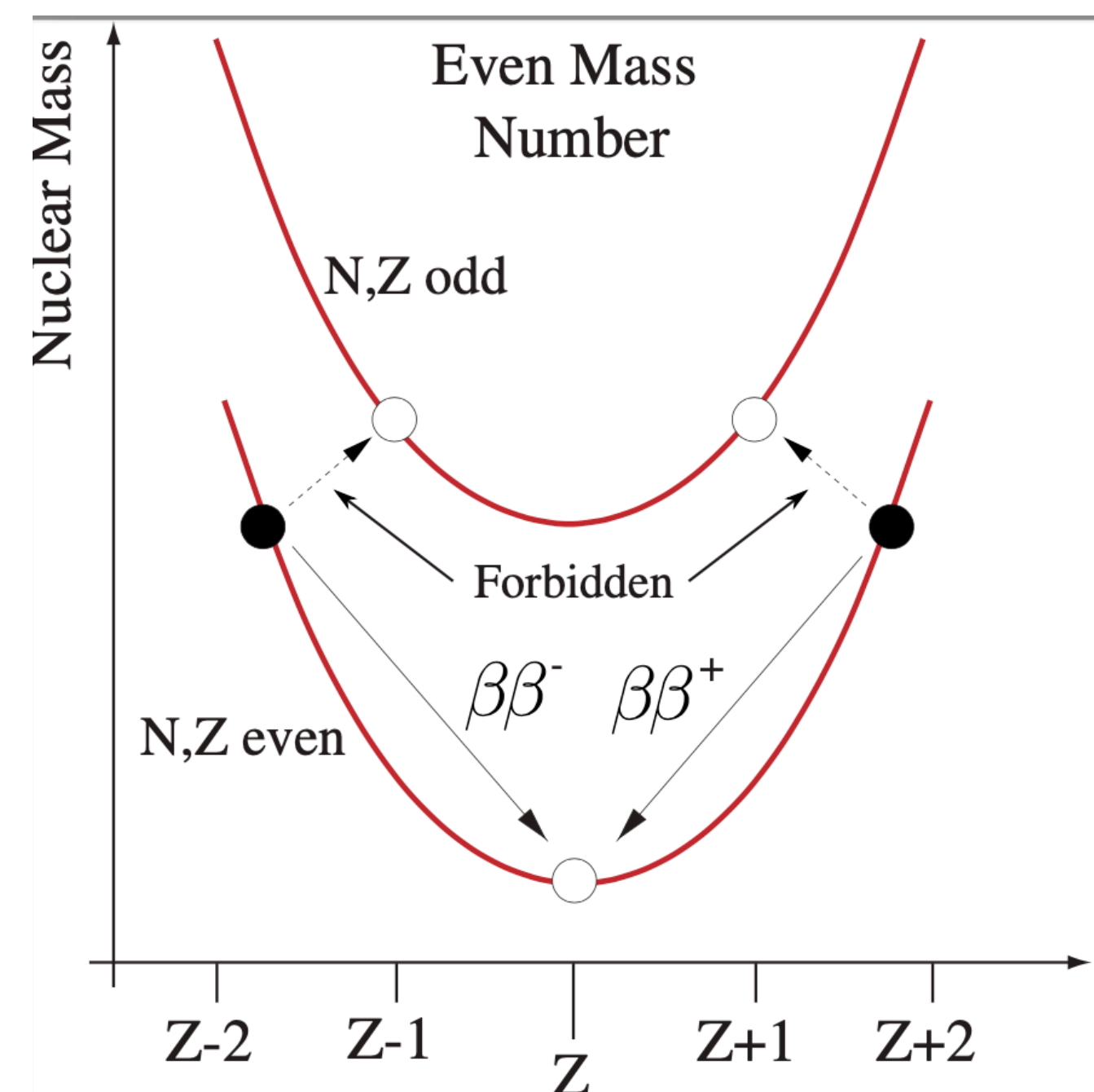


Il doppio decadimento beta: origine dell'idea del neutrino

- **1934:** Dopo la scoperta del neutrone (1932) , **E. Fermi** formula una teoria convincente del decadimento β e del μ e stimola la ricerca sperimentale del neutrino - il neutrino elettronico verrà scoperto nel 1956 (Cowan e Reines) nel decadimento β inverso in una misura al reattore
- **1935:** In questo contesto, **M. Goeppert-Mayer** - da un'idea di Wigner - mette in evidenza la possibilità che un nucleo pari-pari (parabola inferiore) per il quale il decadimento β è proibito transisca ($\beta\beta$) a un nucleo stabile con l'emissione simultanea di due elettroni



sulla base della teoria di Fermi include due neutrini nello stato finale e trova che la vita media supera $T_{1/2} > 10^{17}$ yr per processi di questo tipo



Il doppio decadimento beta: la teoria di Majorana e Racah

- **1937**: **E. Majorana** formula una teoria alternativa alla teoria dell'elettrone e del positrone di P. Dirac per la quale le **particelle neutre** tra cui neutroni e ipotetici neutrini possono **coincidere con le proprie anti-particelle**
- **1937**: **G. Racah** (da discussioni con W. Pauli) mette in evidenza tre elementi:
 - 1) la simmetria tra particelle e antiparticelle implica una modifica nella teoria di Fermi
 - 2) $\nu \equiv \bar{\nu} \Rightarrow$ vale la teoria di Majorana
 - 3) l'identificazione particella-antiparticella non può valere per i neutroni per due ragioni il decadimento β e il momento magnetico $\vec{\mu}_n$ distinguono neutrone e anti-neutrone

TEORIA SIMMETRICA DELL'ELETTRONE E DEL POSITRONE

Nota di ETTORE MAJORANA

Sunto. - *Si dimostra la possibilità di pervenire a una piena simmetrizzazione formale della teoria quantistica dell'elettrone e del positrone facendo uso di un nuovo processo di quantizzazione. Il significato delle equazioni di DIRAC ne risulta alquanto modificato e non vi è più luogo a parlare di stati di energia negativa; nè a presumere per ogni altro tipo di particelle, particolarmente neutre, l'esistenza di « antiparticelle » corrispondenti ai « vuoti » di energia negativa.*

Il doppio decadimento beta senza neutrini e l'idea di Majorana

- **1939:** **W. H. Furry** combina la teoria di E. Majorana con la proposta del decadimento $\beta\beta$ di M. Goeppert-Mayer e ipotizza il doppio decadimento beta senza neutrini

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z \pm 2) + 2e^{\mp} \quad (0\nu\beta\beta)$$

possibile con l'emissione e il ri-assorbimento di neutrini virtuali di Majorana in due stadi:

i) il nucleo (A, Z) emette un elettrone e transisce a uno stato intermedio virtuale con un $\bar{\nu}$

ii) l'anti-neutrino virtuale viene assorbito dal nucleo intermedio e produce il 2° elettrone

A seconda del tipo di interazione, secondo Furry si può avere anche $T_{1/2} \simeq 10^{15}$ yr

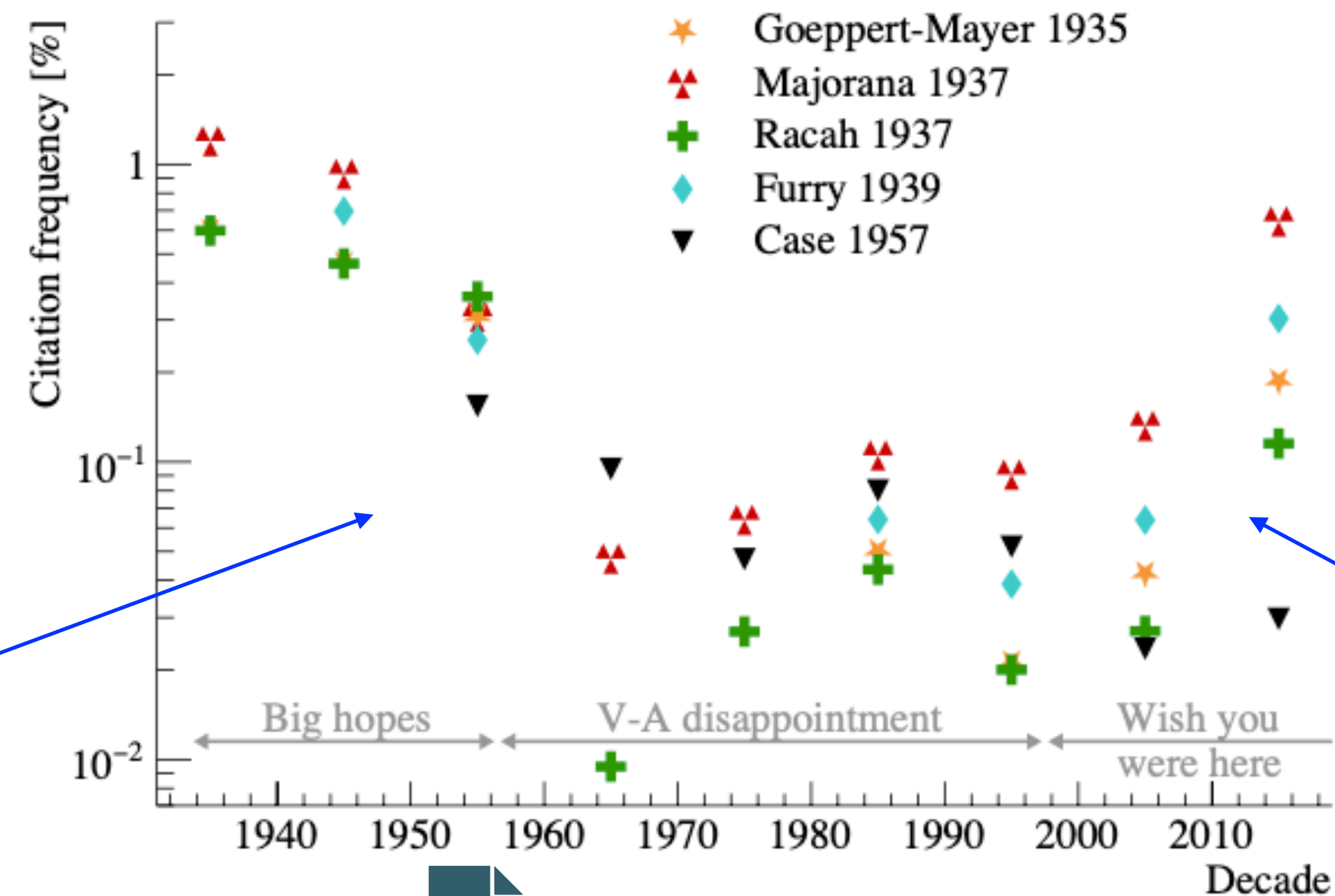
La sua proposta motiva le prime ricerche sperimentali con esperimenti geochimici


Dal 1940 inizia la ricerca sperimentale del decadimento $\beta\beta$ con le due possibilità:

canale 2ν con vite medie di $O(10^{21}-10^{22})$ yr e canale 0ν con vite medie di $O(10^{15}-10^{16})$ yr

La ricerca sperimentale del doppio decadimento beta: primi esperimenti, "medioevo" e "rinascimento"

Primi esperimenti di $\beta\beta$:
 Il primo limite è del 1948
 sul ^{124}Sn $T_{1/2} > 3 \cdot 10^{15}$ yr
 in contatori Geiger,
 nel 1950 osservato il $2\nu\beta\beta$
 del ^{130}Te con
 $T_{1/2} = 1.4 \cdot 10^{21}$ yr
Primi calcoli di elementi di
matrice nucleari




[arxiv:2202.01787](https://arxiv.org/abs/2202.01787)

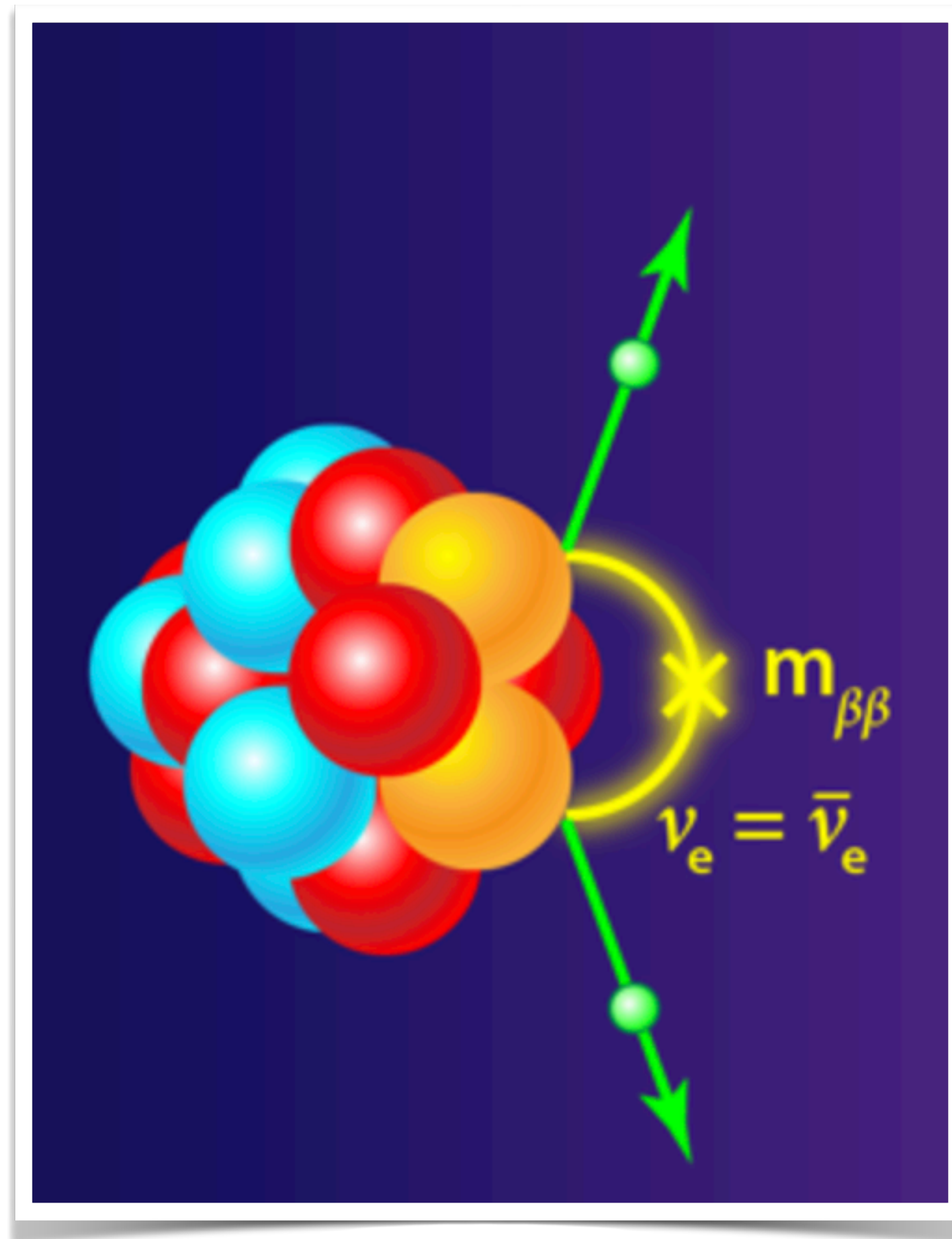
"Rinascimento"
 Prima osservazione diretta
 (1987) del $2\nu\beta\beta$ nel ^{82}Se con
 una TPC, nel 1991 osservato
 per la prima volta il
 decadimento su uno stato
 eccitato nel ^{100}Mo . L'evidenza
 delle oscillazioni di sapore
 (1998) dei neutrini motiva
 l'interesse per il $0\nu\beta\beta$

Davis (1955) non osserva il processo
 di Racah $^{37}\text{Cl} (\bar{\nu}_e, e^-) ^{37}\text{Ar}$
 e dalla natura V-A delle interazioni
 deboli il $0\nu\beta\beta$ è molto più raro

"Medioevo"
 Il neutrino deve avere una massa per il $0\nu\beta\beta$,
 sviluppo teorico notevole e nuove tecniche
 sperimentali: Ge(Li), rivelatori HPGe e TPC

Il doppio decadimento beta senza neutrini

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z \pm 2) + 2e^{\mp} \quad (0\nu\beta\beta)$$

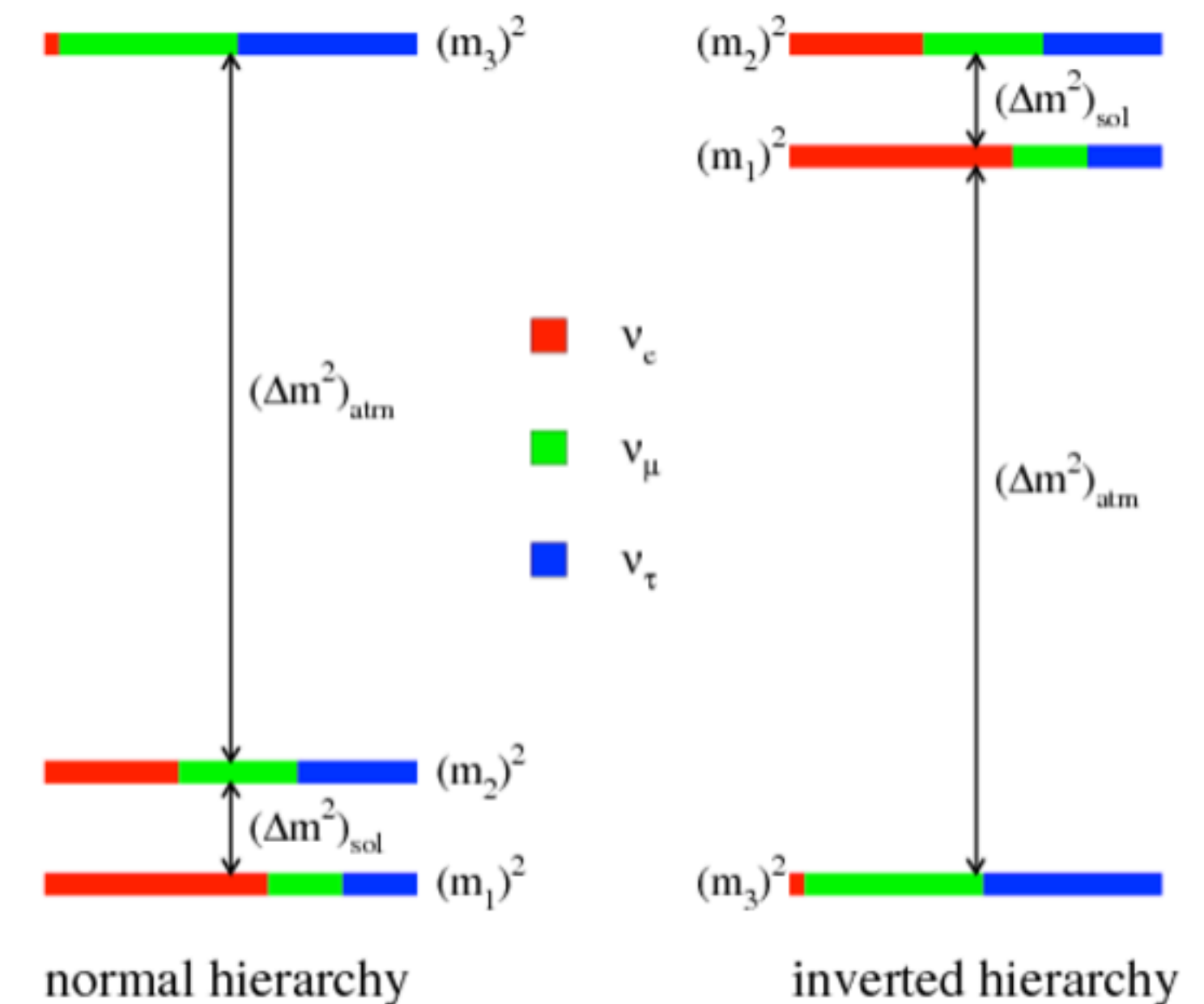
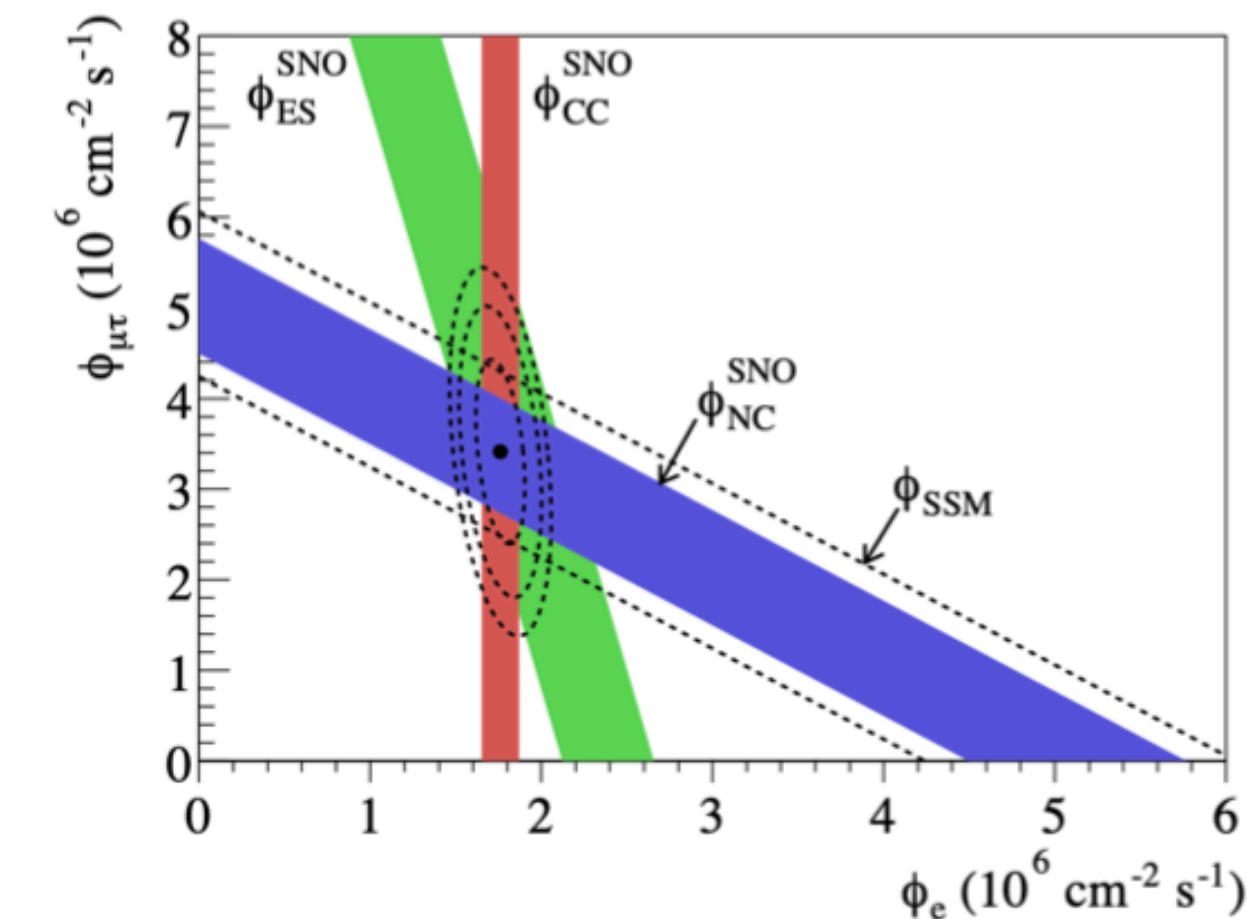


- Processo che viola la conservazione del numero leptonico di due unità $\Delta L = 2$: la sua osservazione implica evidenza di fisica oltre il Modello Standard della fisica delle particelle
- Il meccanismo più semplice prevede lo scambio di neutrini leggeri dotati di massa di Majorana
- È un processo di **creazione di materia** che potrebbe avere implicazioni notevoli per le teorie che cercano di spiegare l'asimmetria tra materia e anti-materia dell'Universo

- Ad oggi nessuna evidenza di $0\nu\beta\beta$, limiti su $T_{1/2} \sim 10^{24} - 10^{26}$ yr

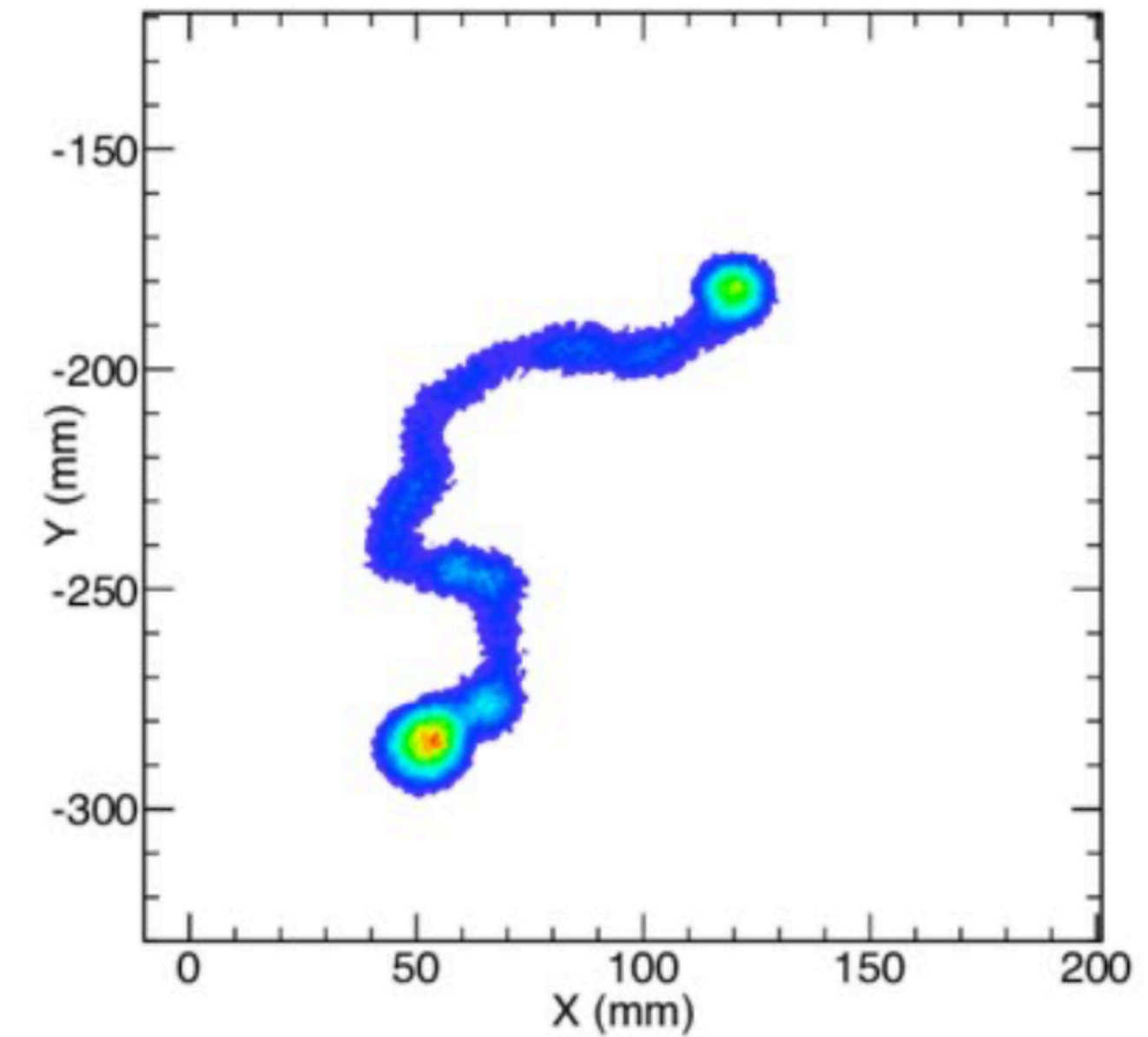
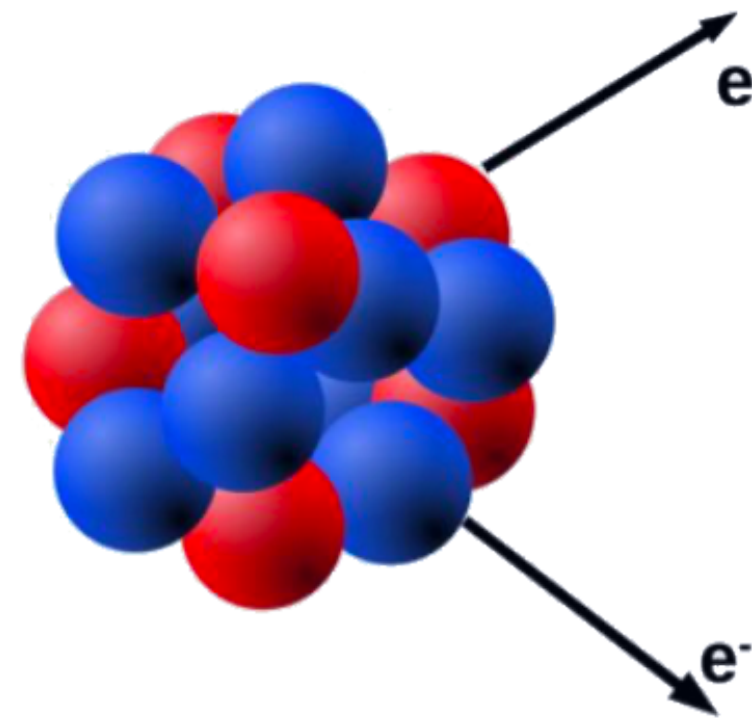
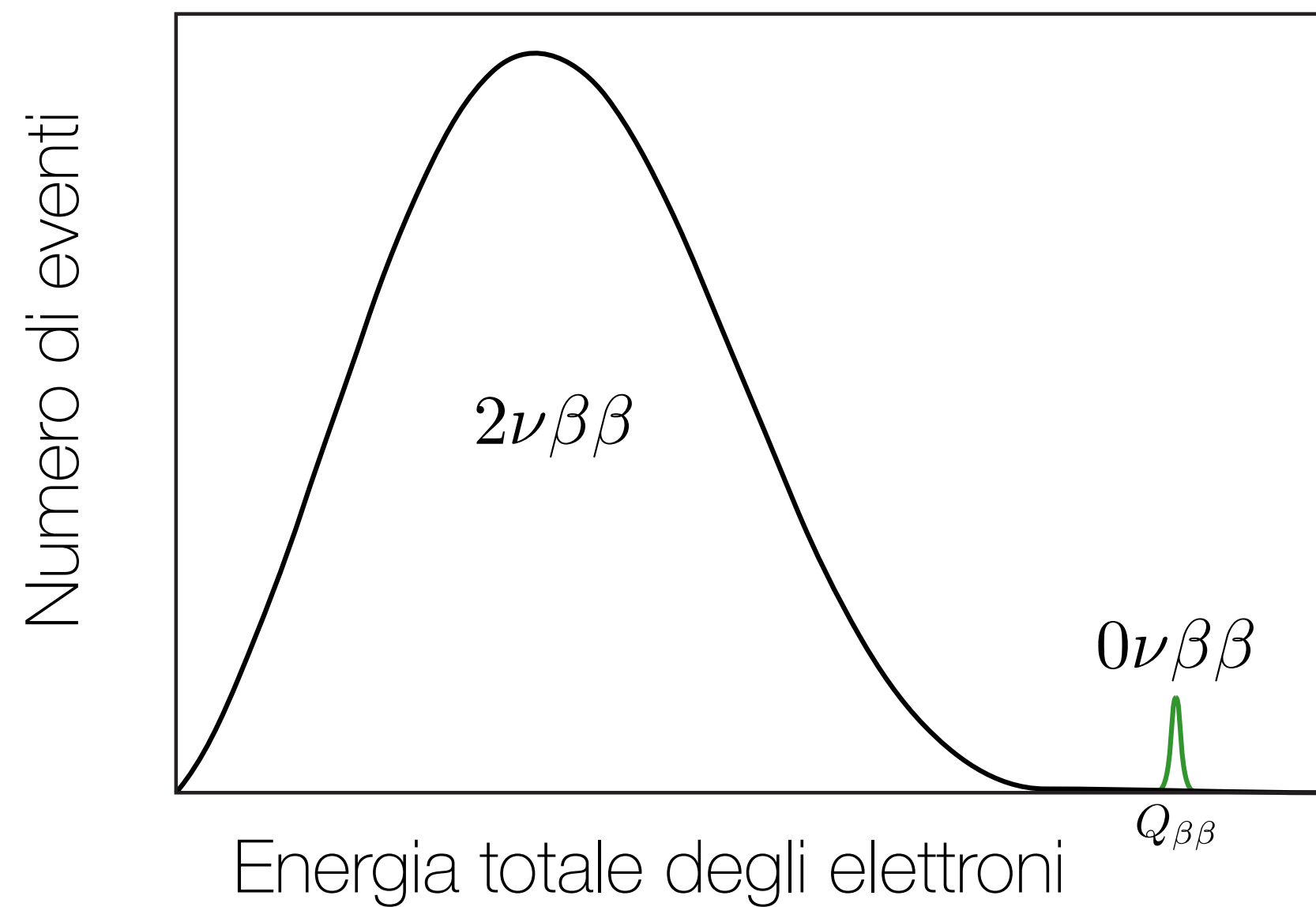
Lo studio del $0\nu\beta\beta$ per la fisica del neutrino e interplay con altre misure

- Sappiamo che esistono almeno 3 famiglie di neutrini e che devono avere una massa dall'evidenza di oscillazioni di sapore
- Non sappiamo qual è la natura della massa dei neutrini, qual è la scala di masse dei neutrini e neppure il loro ordinamento
- Limiti stringenti da misure cosmologiche (CMB) sulla somma delle masse $\Sigma \equiv m_1 + m_2 + m_3$: $\Sigma \lesssim 0.1$ eV
- Informazioni utili dallo studio dell'end-point dello spettro del decadimento β singolo: limite su $m_\beta < 0.8$ eV (KATRIN)
- Debole preferenza per l'ordinamento normale dalle oscillazioni



Esperimenti per la ricerca del doppio decadimento beta senza neutrini

La ricerca del doppio decadimento beta senza neutrini: il segnale



- La segnatura sperimentale del $0\nu\beta\beta$ è un picco monocromatico all'energia $Q_{\beta\beta} = m_{\text{nucleo},i} - m_{\text{nucleo},f} - 2m_e$ nell'energia totale della coppia di elettroni emessi
- Alcuni esperimenti hanno l'obiettivo di ricostruire completamente la topologia degli eventi identificando la traccia dei singoli elettroni prodotti nel decadimento

La ricerca del doppio decadimento senza neutrini: dalla vita media alla stima del termine di massa del neutrino

Nell'ipotesi che il decadimento sia mediato dallo scambio di neutrini leggeri di Majorana

$$\Gamma_{0\nu\beta\beta} = \frac{1}{T_{0\nu\beta\beta}} = G_{0\nu}(Q, Z) \left| M_{0\nu} \right|^2 \frac{\left| \langle m_{\beta\beta} \rangle \right|^2}{m_e^2}$$

Spazio delle fasi
(cinematica)

✓ Noto con una
precisione del 7%

Probabilità della transizione
(dipende dal nucleo)

✗ Non è nota e dipende
dal modello considerato:
differenze di un fattore $\sim 2/3$
per un dato nucleo

Massa del neutrino
che regola il decadimento
massa efficace di Majorana

$$\left| \langle m_{\beta\beta} \rangle \right| = \sum_{i=1,2,3} U_{ei}^2 m_i$$

U_{ei} dipende dagli angoli di mixing, da
 δ_{CP} e dalle fasi di Majorana

La ricerca del doppio decadimento senza neutrini: massa efficace di Majorana

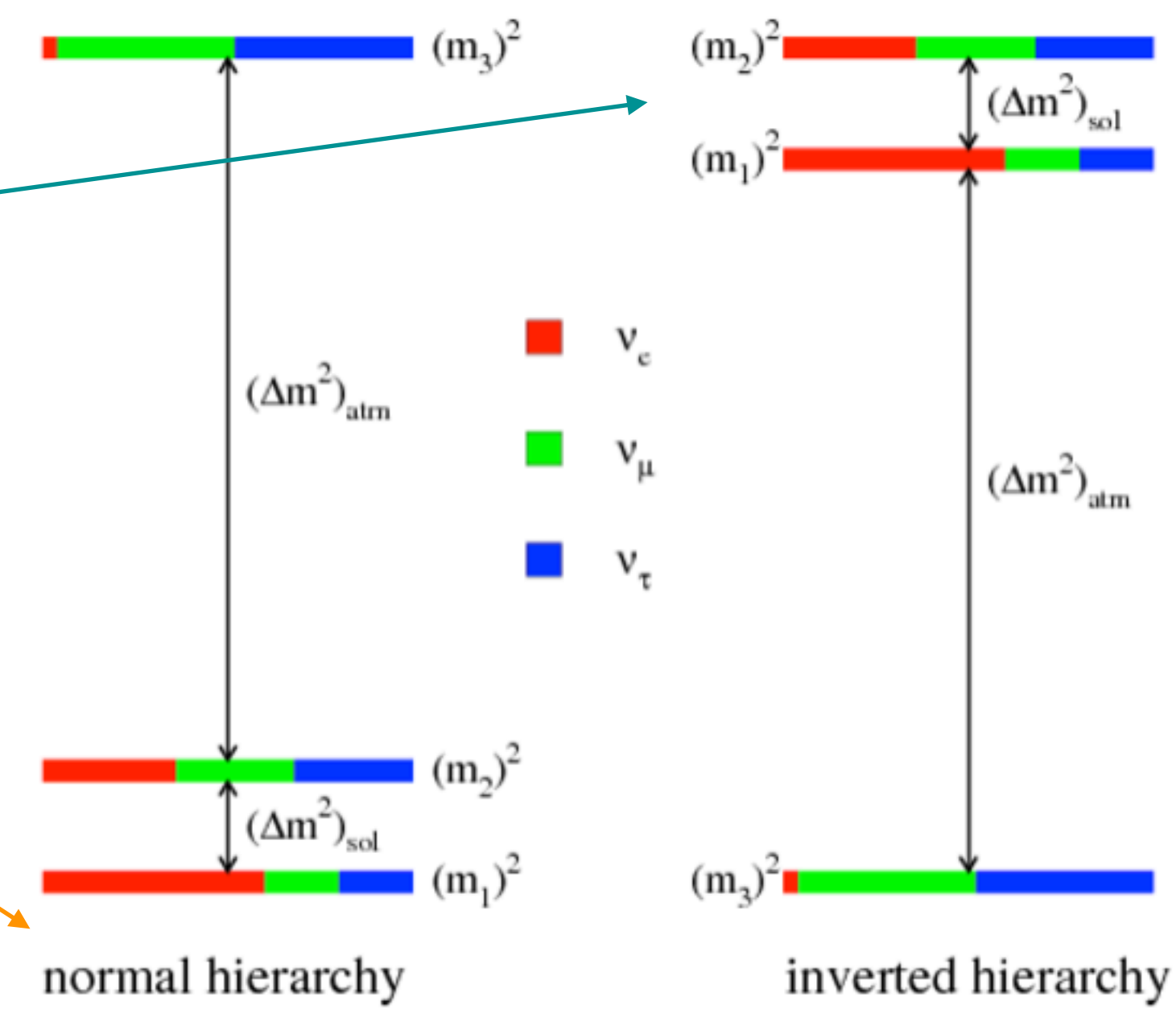
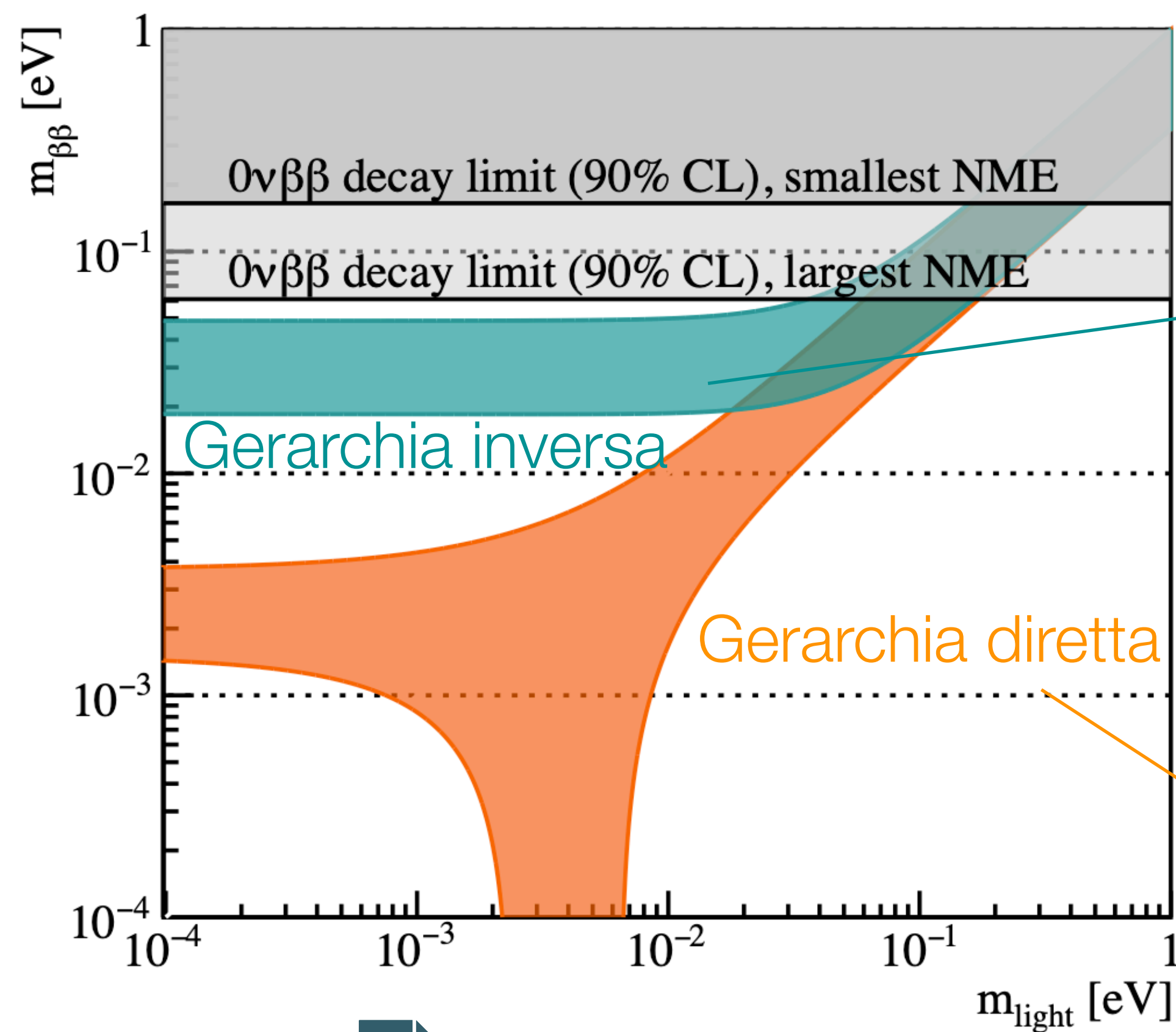
Nell'ipotesi che il decadimento sia mediato dallo scambio di neutrini leggeri di Majorana

Lobster plot [Vissani, F. JHEP06\(1999\)022](#)

Spazio dei parametri
disponibile per $m_{\beta\beta}$

- angoli di mixing fissati
ai dati delle oscillazioni
- fasi di Majorana libere

in funzione della massa
del neutrino più leggero



La ricerca del doppio decadimento beta senza neutrini: sensibilità

Sensibilità sperimentale al decadimento $0\nu\beta\beta$

Scelta di una tecnica scalabile a masse elevate

Fondo minimo nella regione di interesse (ROI)

Se il fondo è trascurabile (condizione di zero fondo)

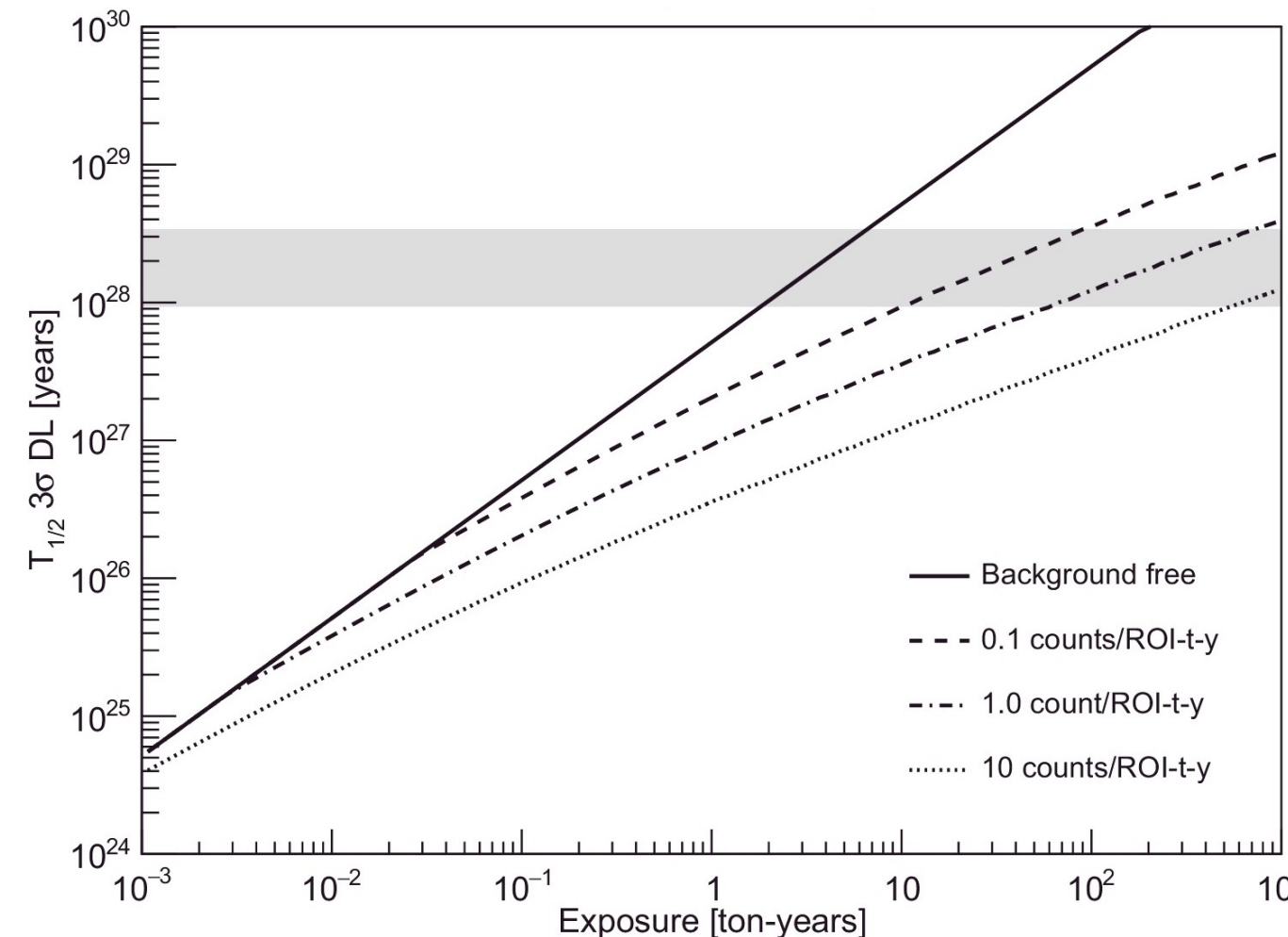
$$S^{0\nu} \propto M \cdot T$$

dipende linearmente da massa e live-time

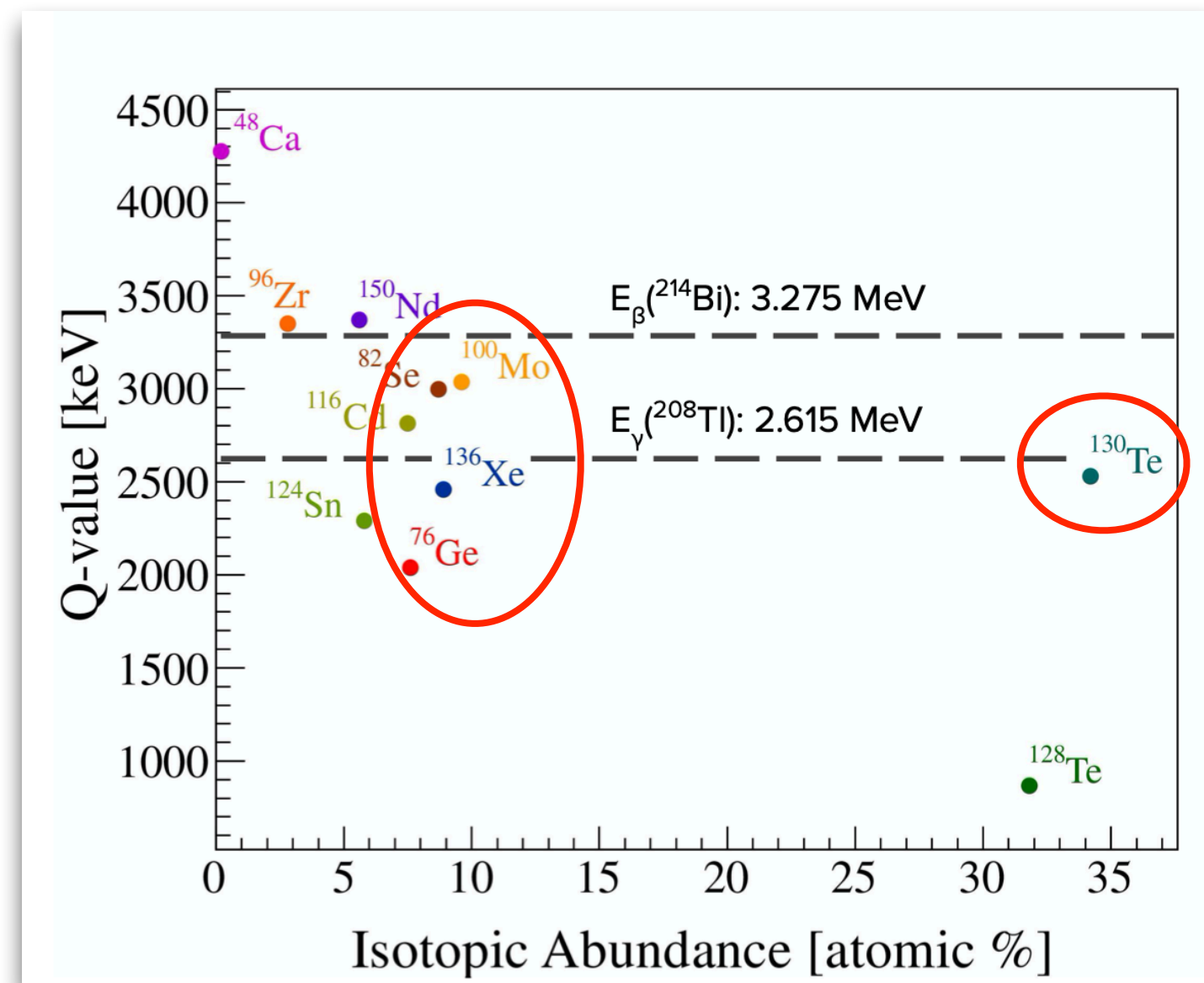
$$S^{0\nu} \propto \sqrt{\frac{M \cdot T}{b \cdot \Delta E}}$$

Tempi di acquisizione di anni (per il futuro decenni) rivelatori stabili

Elevata risoluzione energetica



La ricerca del doppio decadimento beta senza neutrini: parametri critici



La scelta dell'isotopo

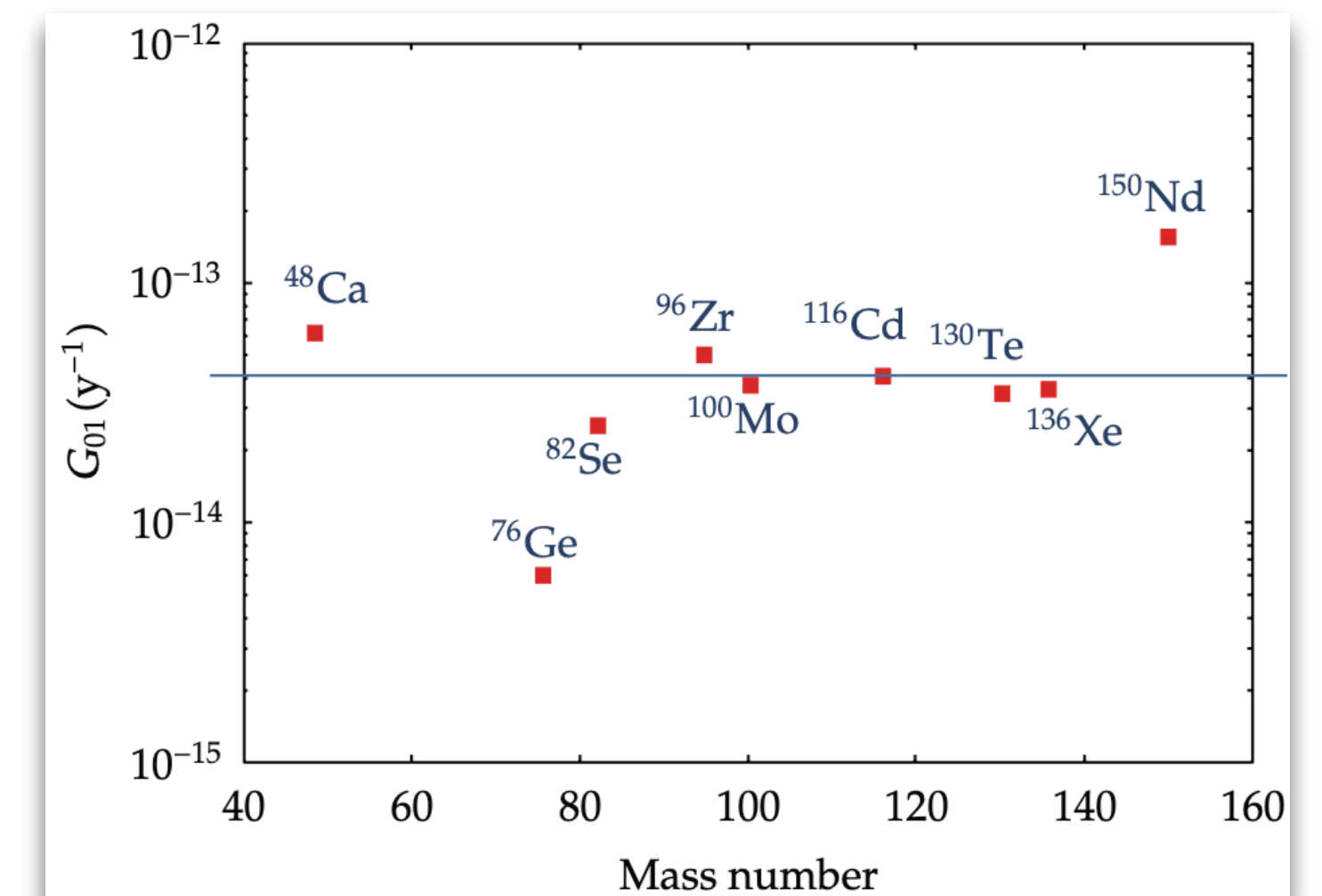
- Q-valore
 1. la radioattività naturale diminuisce con l'energia
 2. lo spazio delle fasi $G_{0\nu}(Q, Z)$ scala come $Q_{\beta\beta}^5$
il ^{150}Nd è il favorito, il "peggiore" è il ^{76}Ge
 3. la frazione di eventi di $2\nu\beta\beta$ (fondo) è $\sim 1/Q_{\beta\beta}^5$

- Disponibilità in grandi quantità (\sim tonnellate)
- Compatibilità con una tecnica di rivelazione
- Abbondanza isotopica

la necessità di arricchimento implica

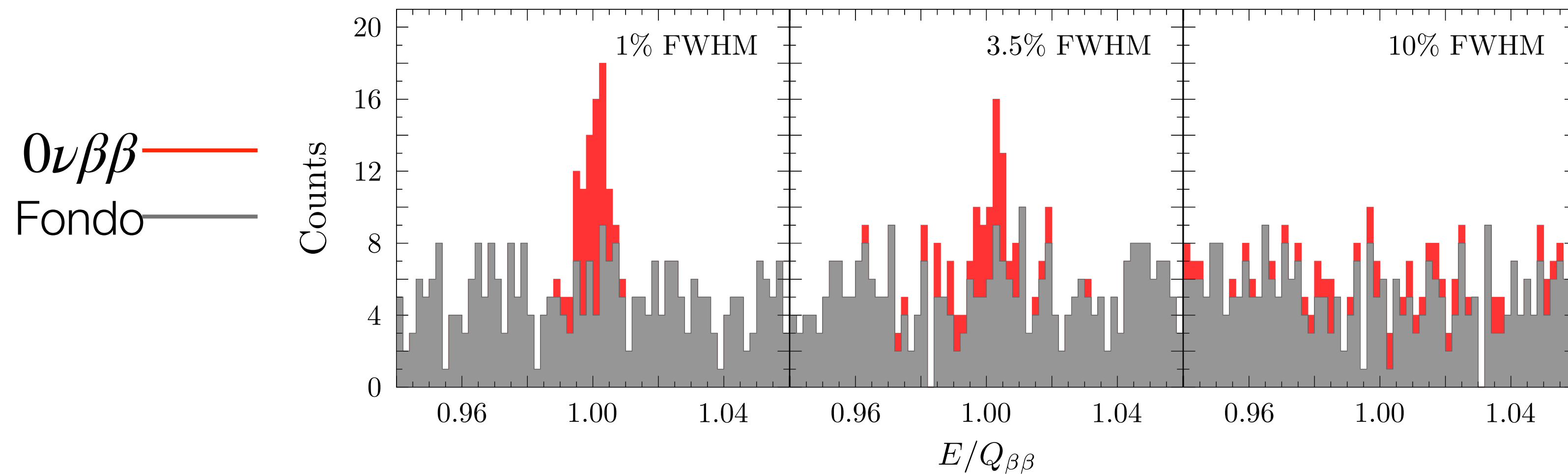
1. valutazione dei costi
2. sviluppo tecnologico

Non esiste il candidato
ideale!
indispensabile
un compromesso



La ricerca del doppio decadimento beta senza neutrini: parametri critici

Fondo e risoluzione



- Termine imprescindibile del decadimento $2\nu\beta\beta$, il cui impatto dipende da

1) Vita media

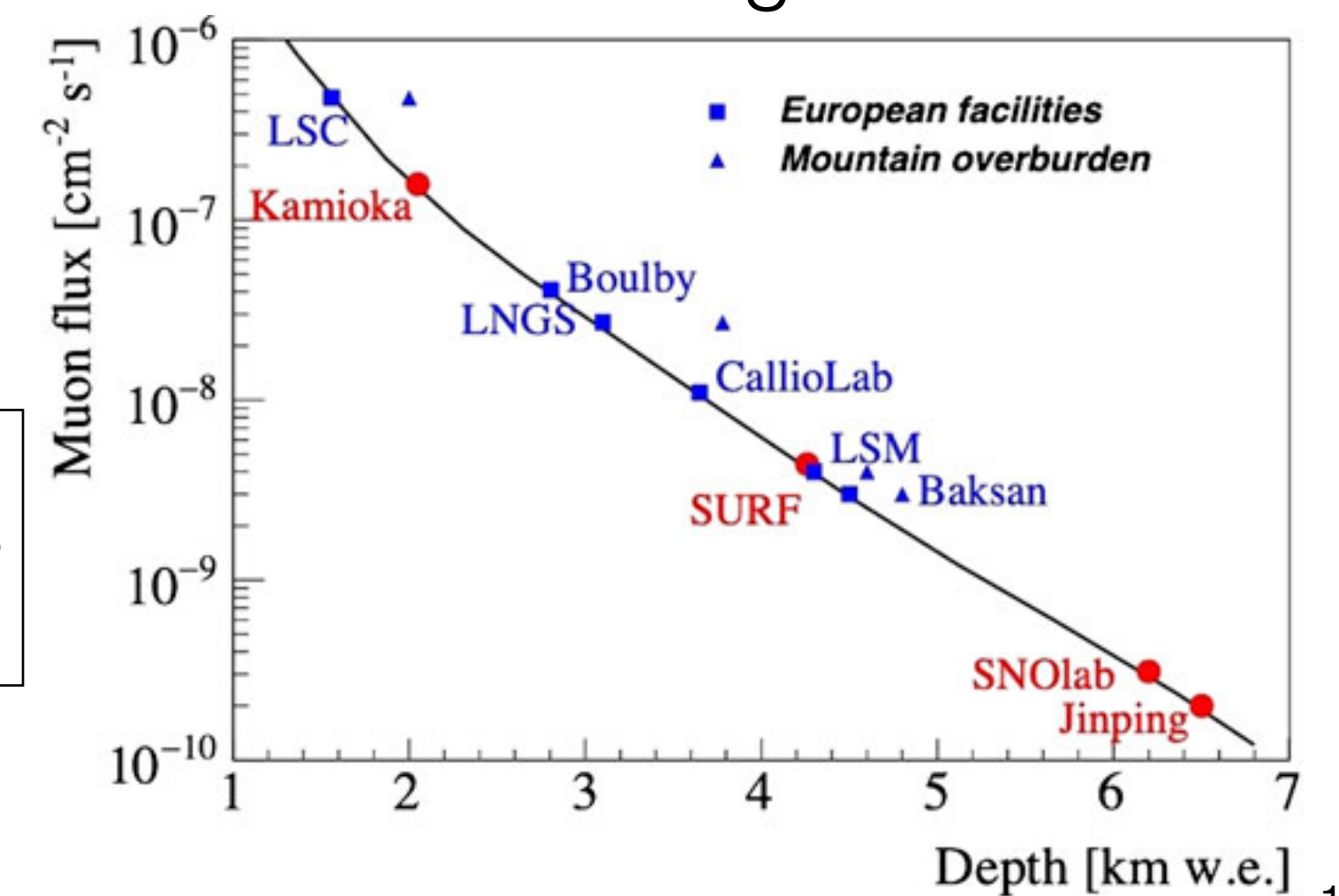
2) Risoluzione energetica (Δ) e Q-valore

$$R_{0\nu/2\nu} \propto \left(\frac{Q_{\beta\beta}}{\Delta} \right)^6 \frac{t_{1/2}^{2\nu}}{t_{1/2}^{0\nu}}$$

- Radioattività naturale: ^{232}Th , ^{238}U , ^{40}K

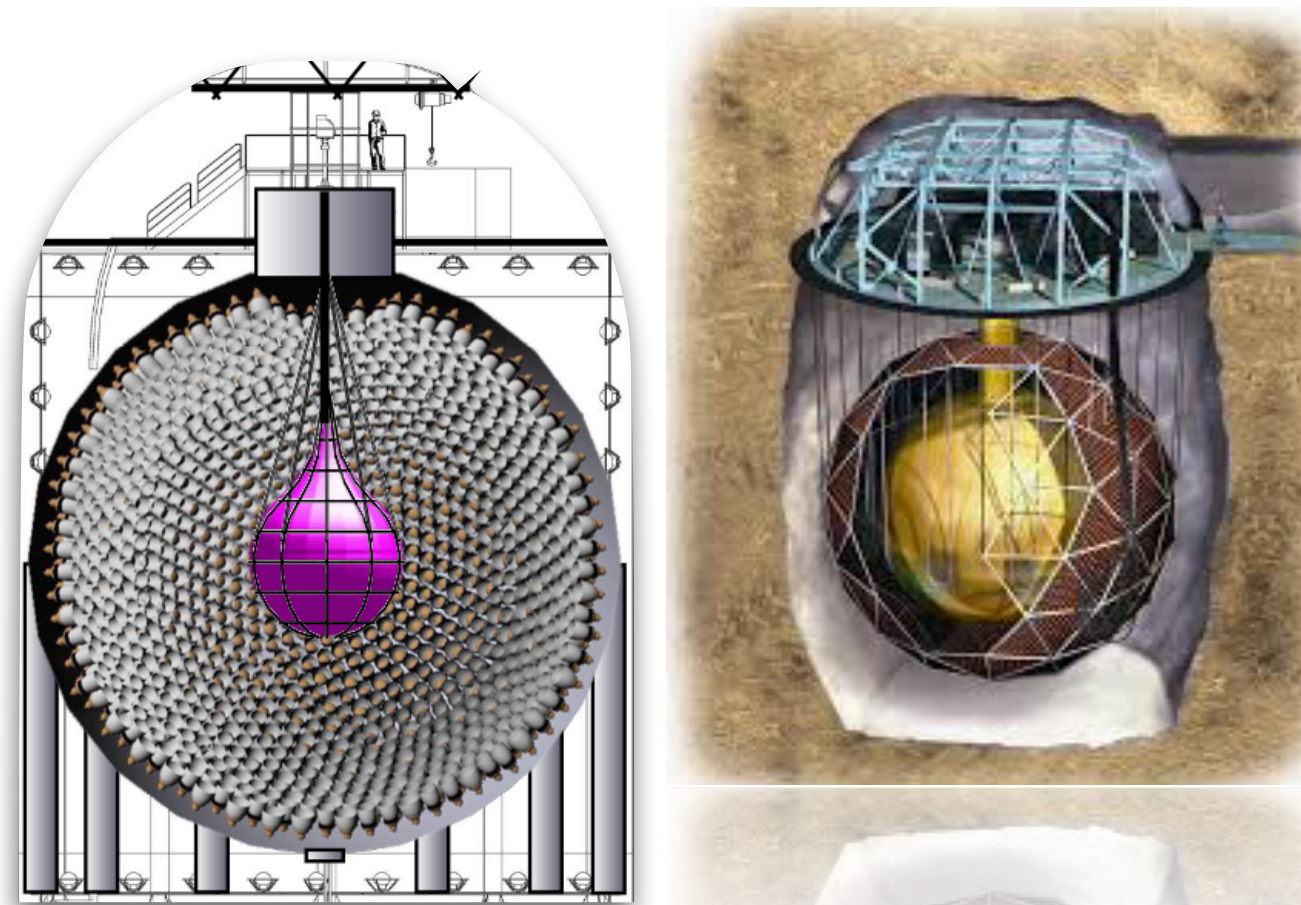
- Contributi di fondo specifici in base a tecnologia/materiali impiegati

Esperimenti in laboratori underground



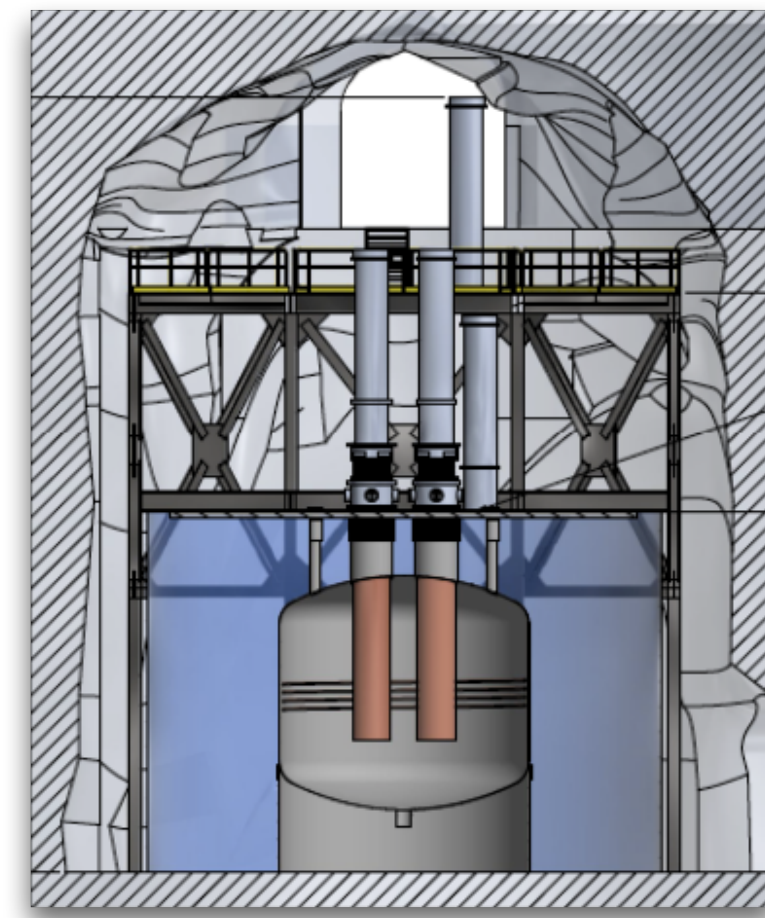
La ricerca del doppio decadimento beta senza neutrini: le principali tecniche sperimentali

Scintillatori liquidi



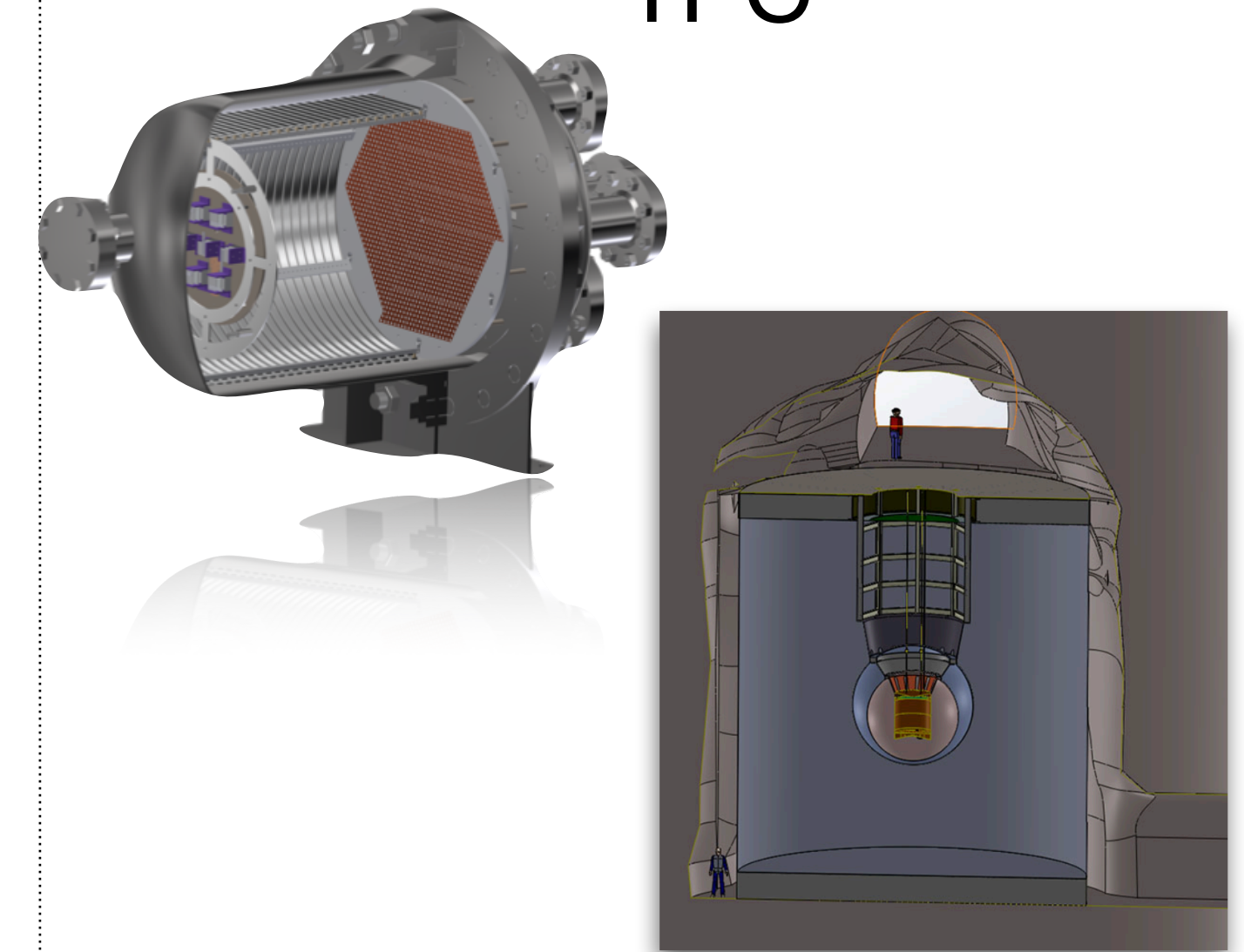
- KamLAND-Zen
 ^{136}Xe arricchito al 90%,
 $m \sim 745 \text{ kg}$, $Q = 2458 \text{ keV}$
 $T_{1/2}^{0\nu} > 1.8 \cdot 10^{26} \text{ yr}$
- SNO+ ^{130}Te
- Scalabilità a tonnellate ✓
- Bassa risoluzione ✗

Semiconduttori



- GERDA, Majorana, LEGEND
- Diodi al germanio ad alta purezza (^{76}Ge , $Q = 2039 \text{ keV}$)
- Risoluzione elevata ✓
0.13% a 2 MeV (GERDA)
- Costi e scalabilità ✗
- $T_{1/2}^{0\nu} > 1.8 \cdot 10^{26} \text{ yr}$ (GERDA)

TPC



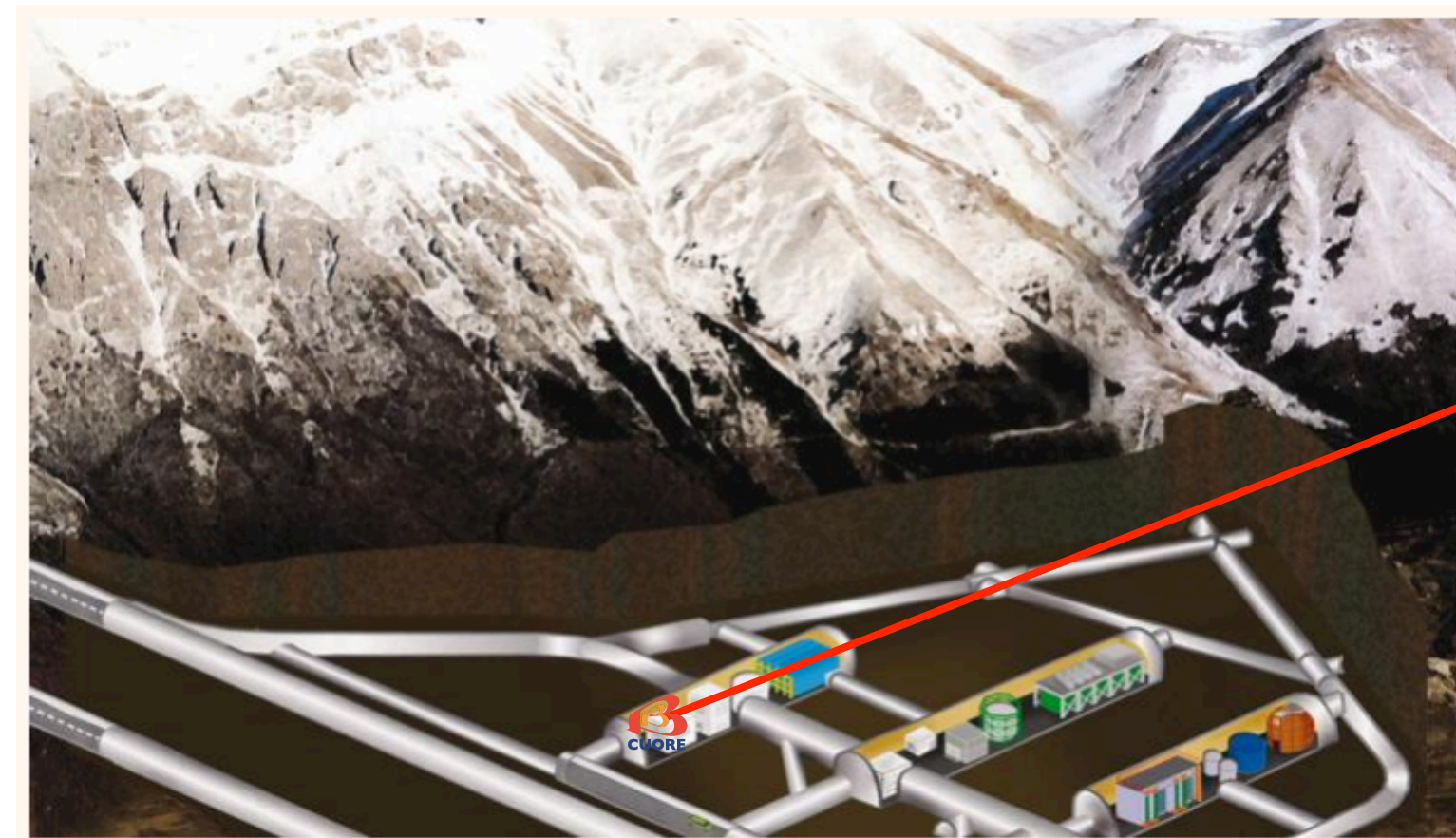
- EXO-200, nEXO
TPC a xenon liquido
- NEXT-100, NEXT-BOLD
TPC a xenon gassoso
- Ricostruzione topologica delle tracce ✓
- Bassa risoluzione ✗
- Efficienza bassa (NEXT) ✗

L'esperimento CUORE per la ricerca del $0\nu\beta\beta$

L'esperimento CUORE

Cryogenic **U**nderground **O**bservatory for **R**are **E**vents

- Obiettivo scientifico principale: la ricerca del $0\nu\beta\beta$ del ^{130}Te
- Matrice di calorimetri criogenici: 988 cristalli di $(\text{nat})\text{TeO}_2$
19 torri per 742 kg di TeO_2 e circa 206 kg di ^{130}Te
- Underground nella sala A dei
Laboratori Nazionali del Gran Sasso



Risoluzione a $Q_{\beta\beta} \simeq 2528$ keV
7.8(5) keV FWHM
Fondo nella regione di interesse
 $1.49(4) \cdot 10^{-2}$ conteggi/keV/kg/yr

Sensibilità target
(lifetime di 5 anni)

$$T_{0\nu\beta\beta}^{1/2} = 9 \cdot 10^{25} \text{ yr}$$



Adv. in High En. Phys. 2015, 879871
Eur. Phys. J. C77 (2017), 532

La collaborazione CUORE



27 Istituzioni di 4 Paesi: Cina, Francia, Italia e Stati Uniti - <https://cuore.ings.infn.it>

La collaborazione CUORE

Staff di Genova:

- Andrea Bersani (INFN)
- Alessio Caminata (INFN)
- Alice Campani (Unige-INFN)

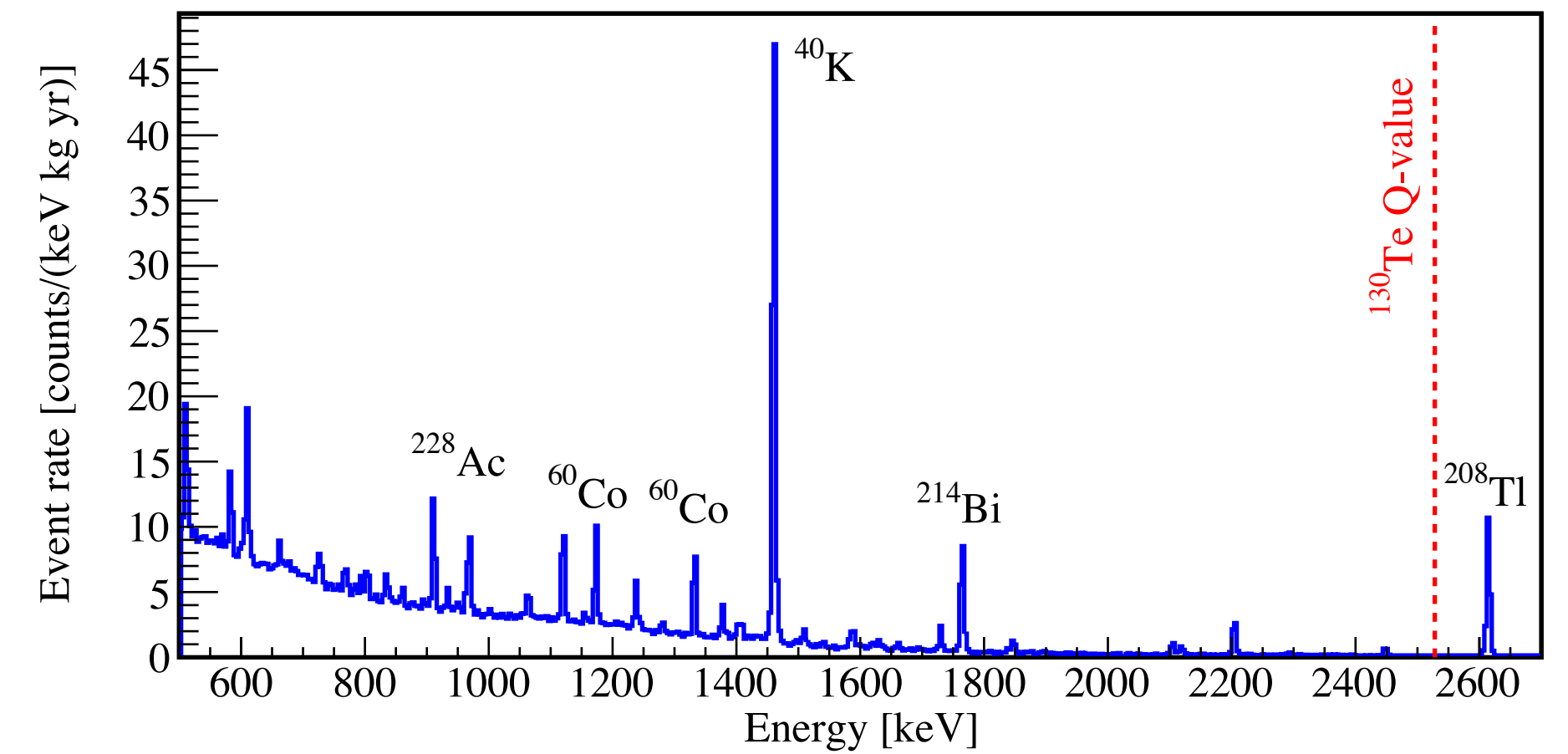
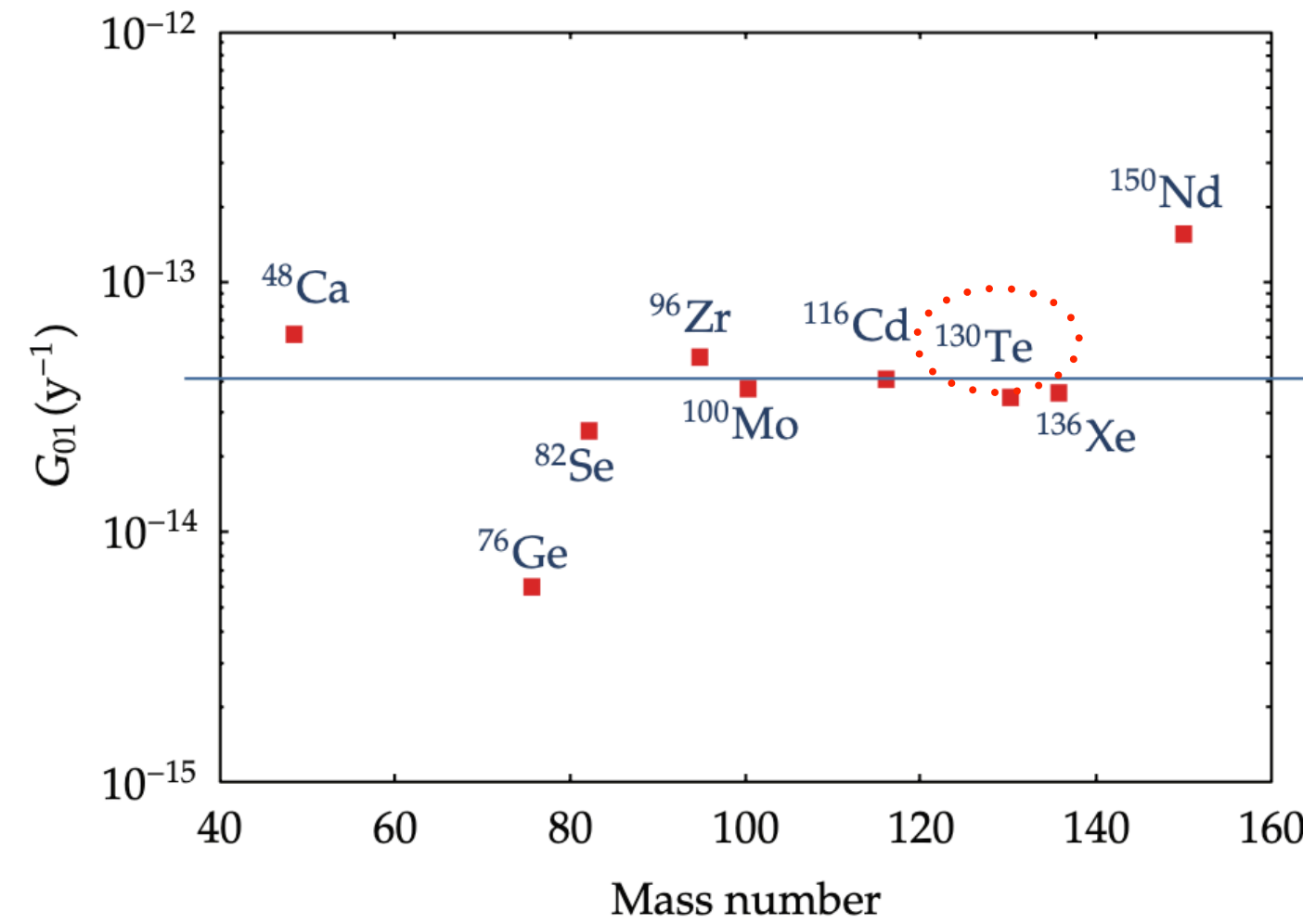
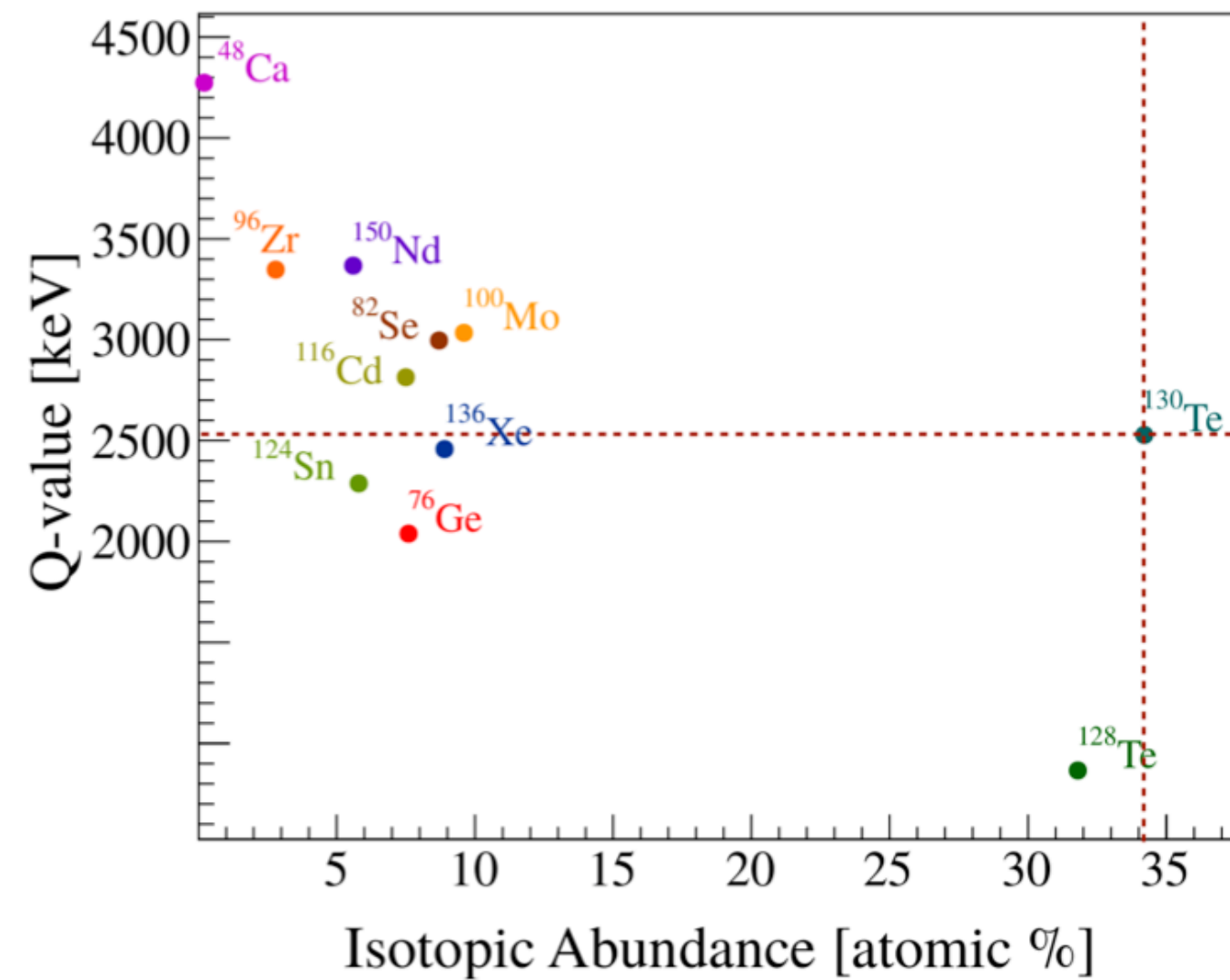
alice.campani@ge.infn.it

outreach board di CUORE

Staff di Genova:

- Massimo Cariello (INFN)
- Roberto Cereseto (INFN)
- Simone Copello (Unige-INFN)
- Sergio Di Domizio (Unige-INFN)
executive board di CUORE
- Marco Pallavicini (Unige-INFN)

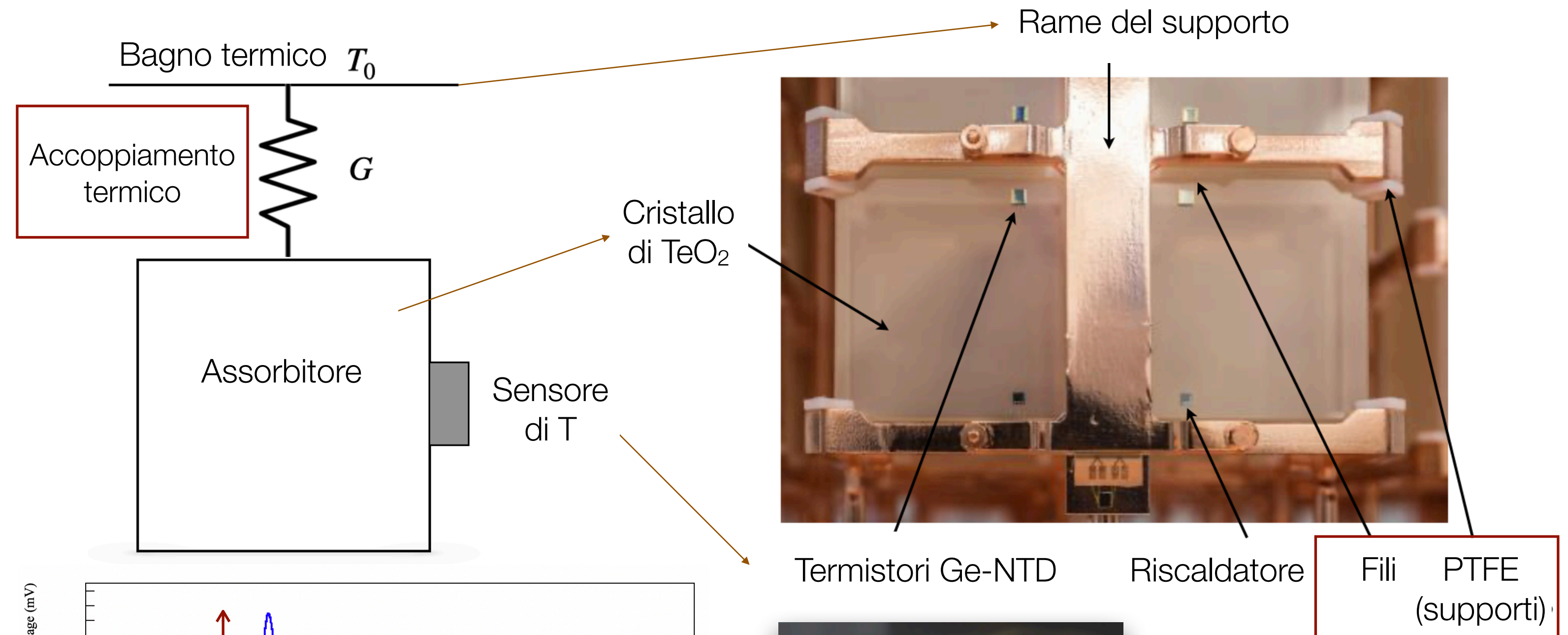
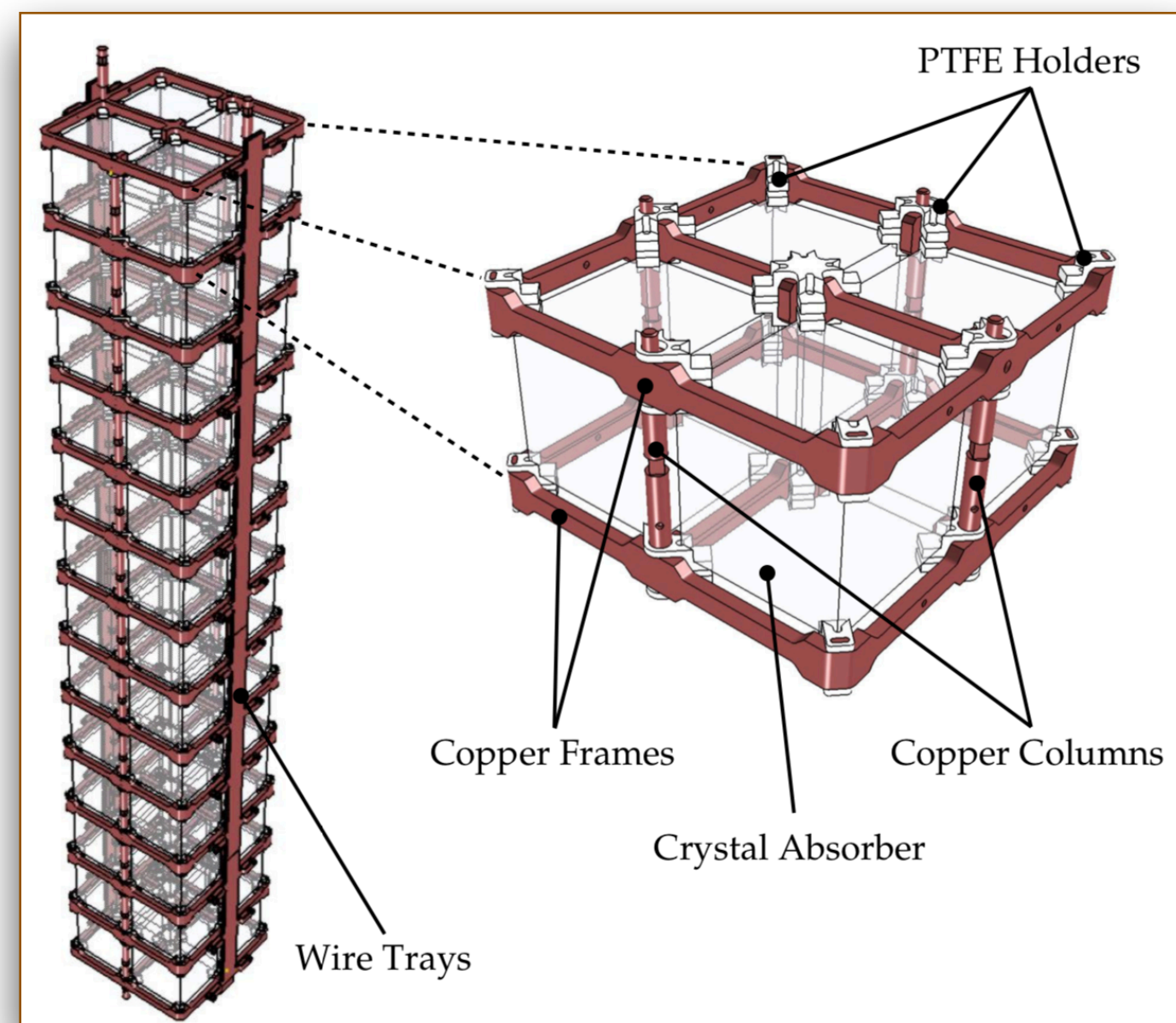
La scelta del tellurio



- Abbondanza isotopica ($\sim 34.17\%$) tale da usare il tellurio naturale
- Termine cinematico grande poiché $G(0\nu) \propto Q_{\beta\beta}^5$ e $Q = 2528$ keV
- $Q_{\beta\beta}$ sopra la radioattività β/γ (solo la riga a 2615 keV del ^{208}Tl)
- Vita media per il $2\nu\beta\beta$ relativamente lunga ($T_{1/2}^{2\nu} \simeq 7.7 \cdot 10^{20}$ yr)

La tecnica bolometrica: calorimetri criogenici

Bolometro: l'energia rilasciata in processi β , γ , α viene misurata con le eccitazioni termiche (i fononi)



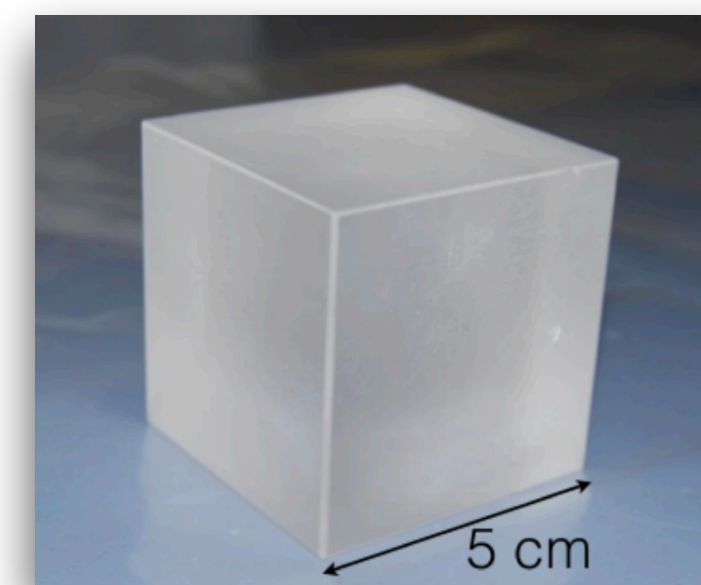
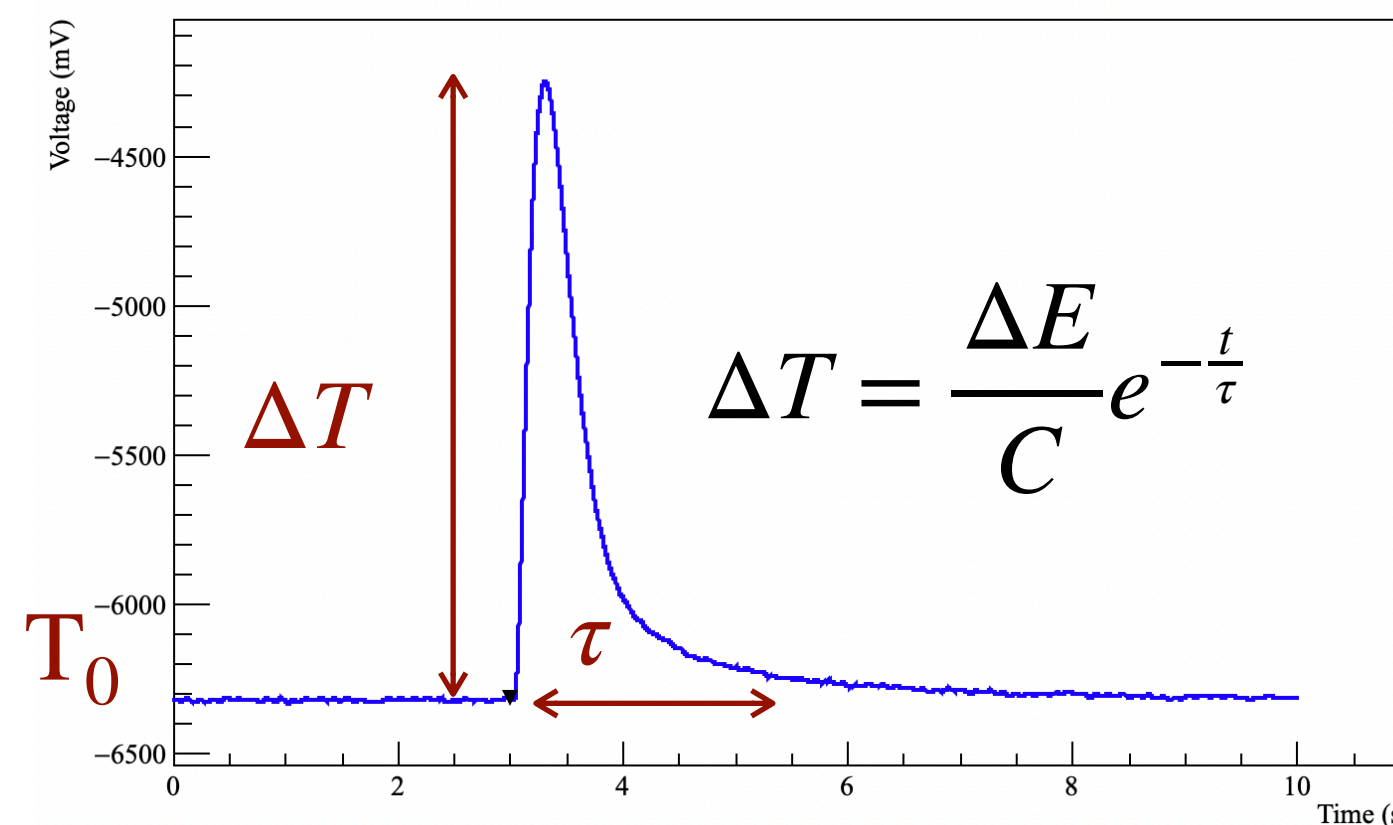
Funziona a T criogeniche ~ 10 mK:

$$C \propto T^3 \text{ (per } T < T_{\text{Debye}})$$

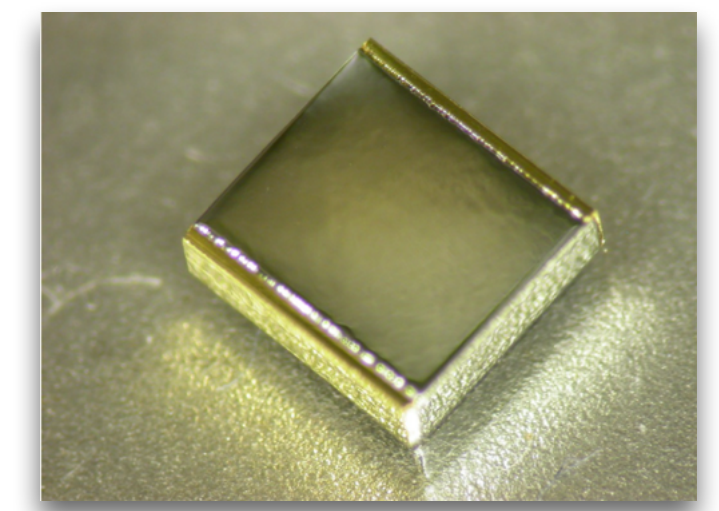
Per 1 MeV di energia rilasciata

$$\Delta T \sim 100 \mu\text{K}$$

Termometri: termistori NTD (Ge)



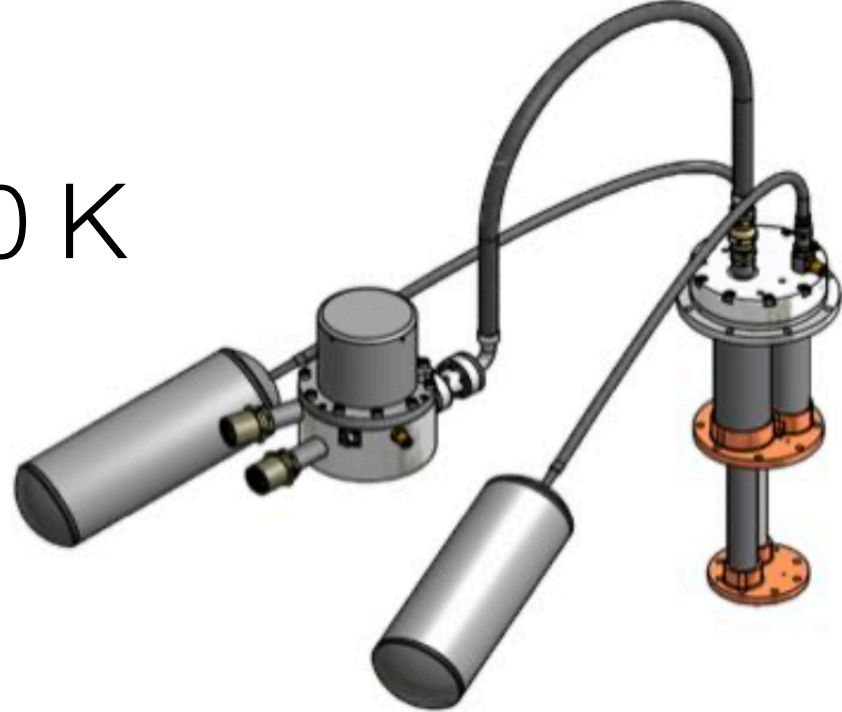
cristallo di TeO_2
 $C \approx \text{nJ/K}$



Ge-NTD $\Delta R \sim 3\text{M}\Omega/\text{MeV}$

Il criostato di CUORE


Criostato a diluizione a diversi stadi

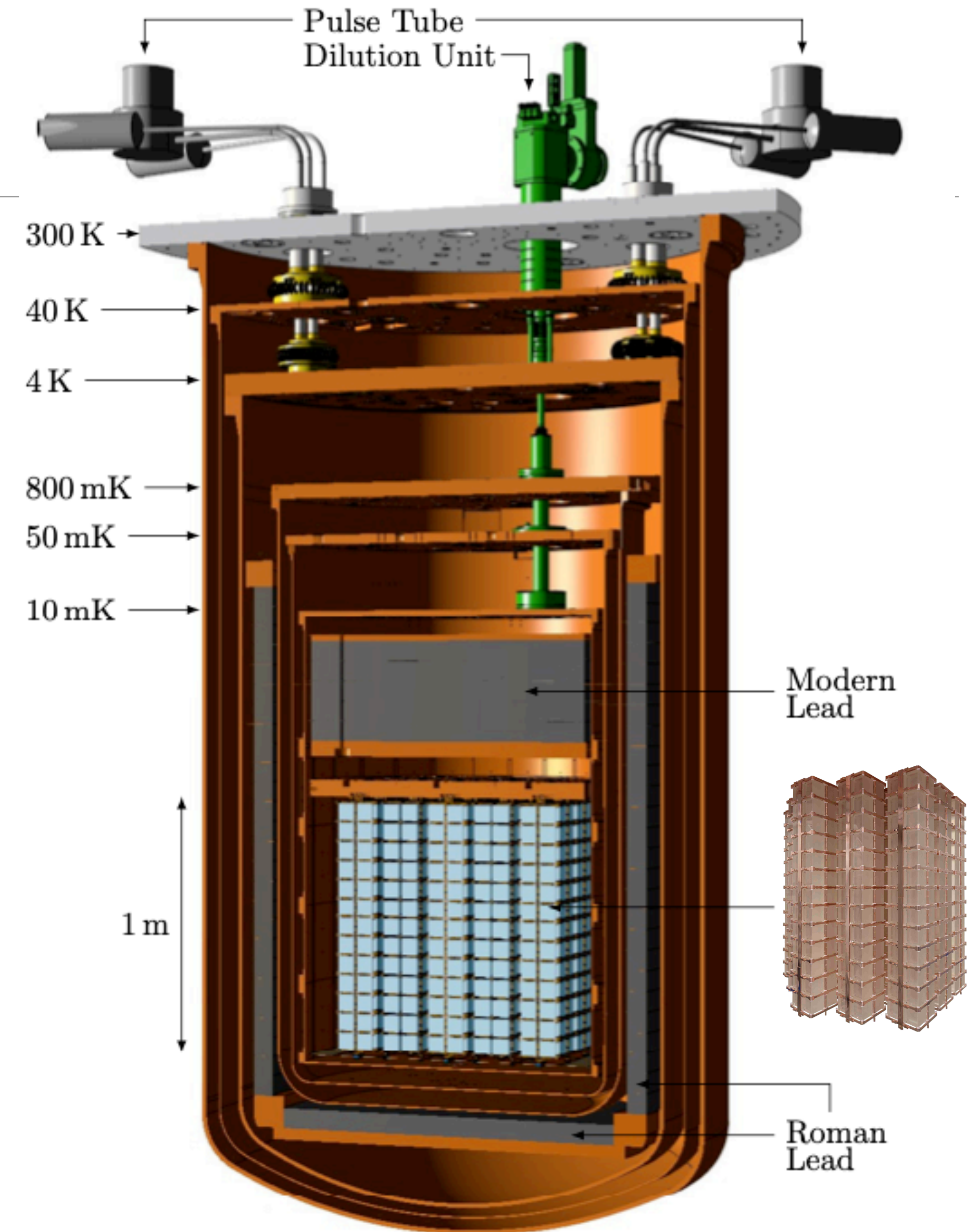
- Fast cooling system per raggiungere ~ 50 K
- 5 Pulse Tubes per scendere a 4 K \longrightarrow 
- Unità a diluizione (^3He - ^4He) mantiene le torri a 10 mK

Il criostato più grande e più potente in operazione oggi:
potenza di raffreddamento superiore a $3\mu\text{W}$ a 10 mK
mantiene ~ 17 tonnellate di materiale sotto a 4 K!

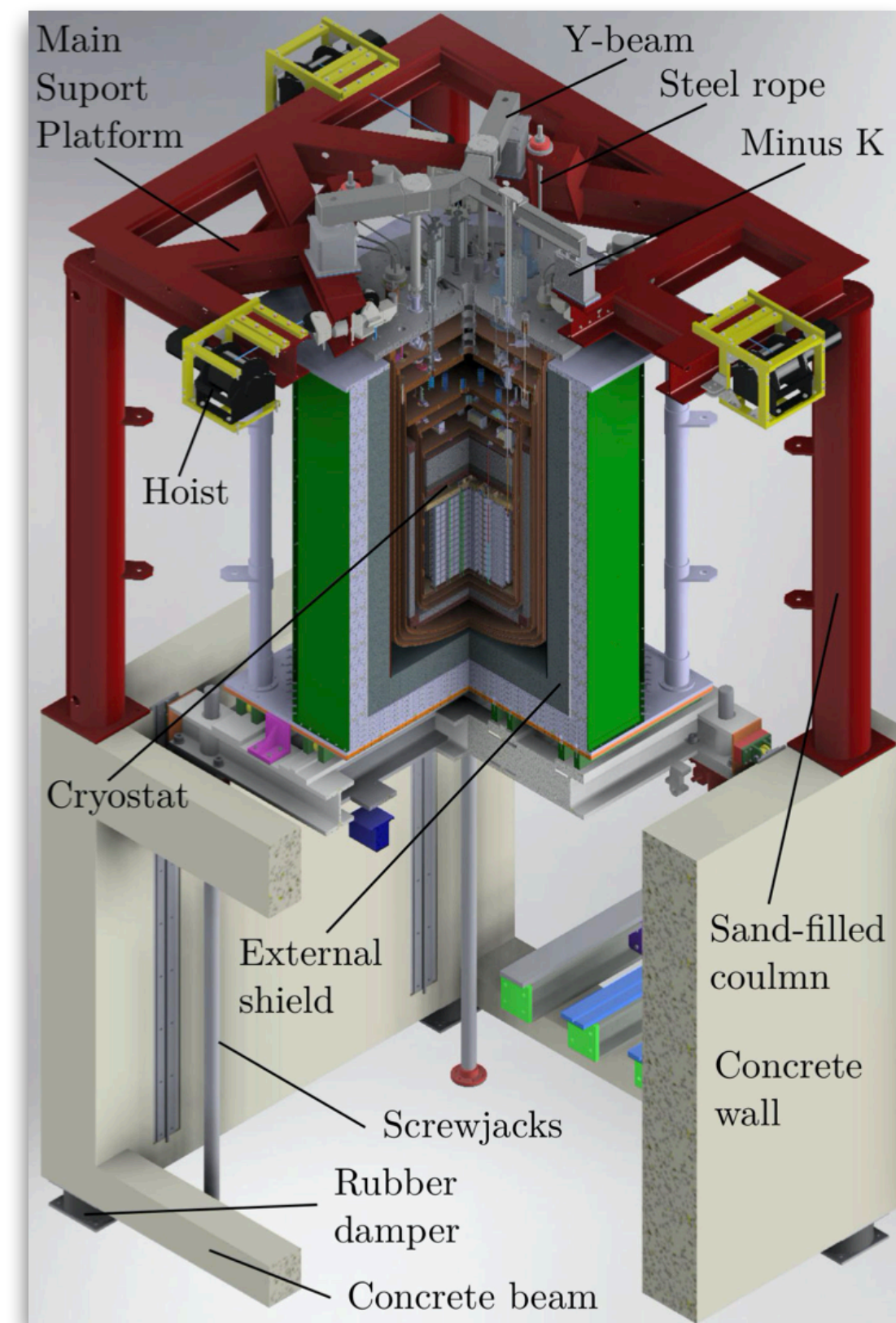
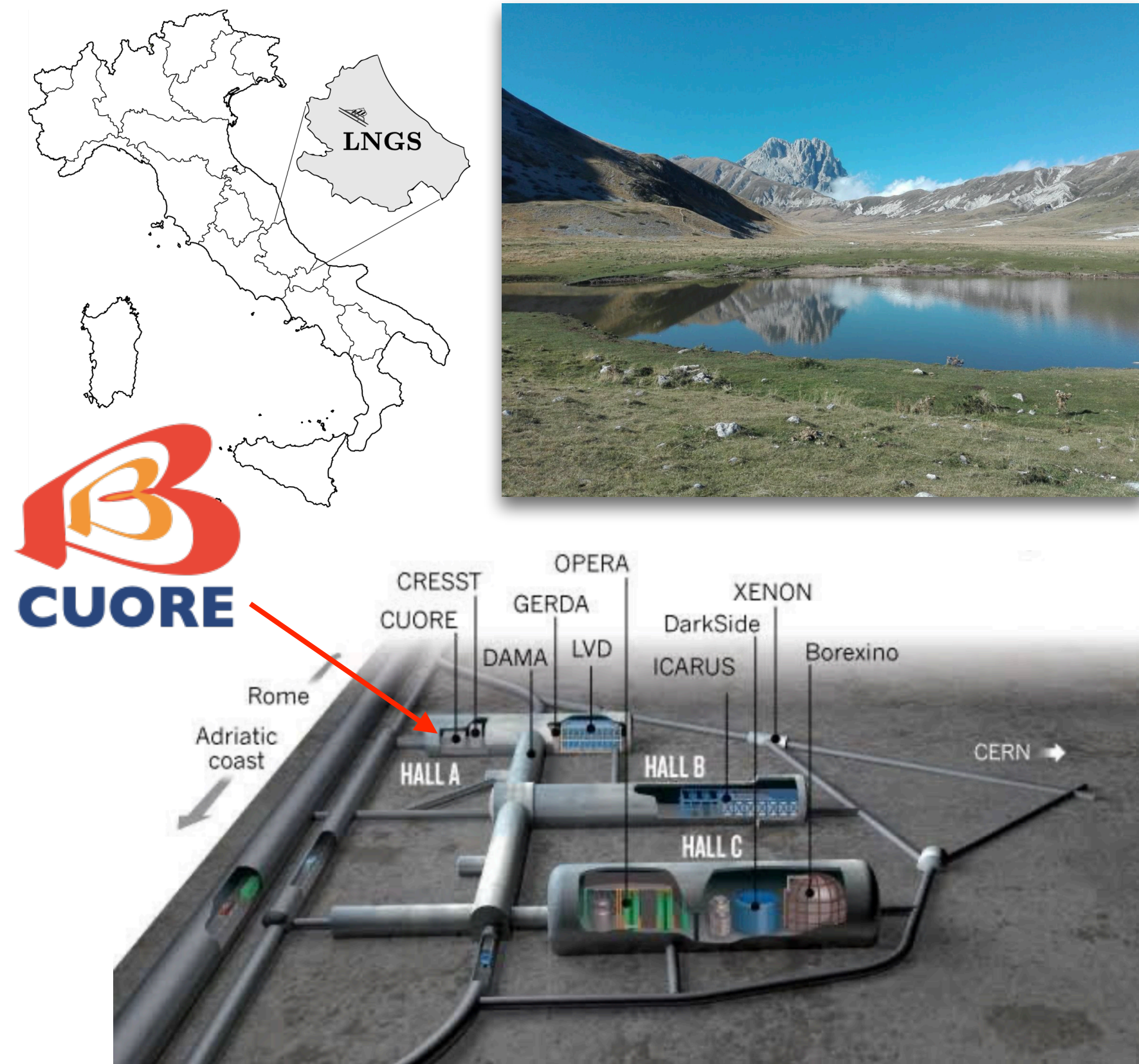
Requisiti stringenti in termini di stabilità termica e meccanica e di radiopurezza dei materiali impiegati

Il metro cubo più freddo dell'Universo!

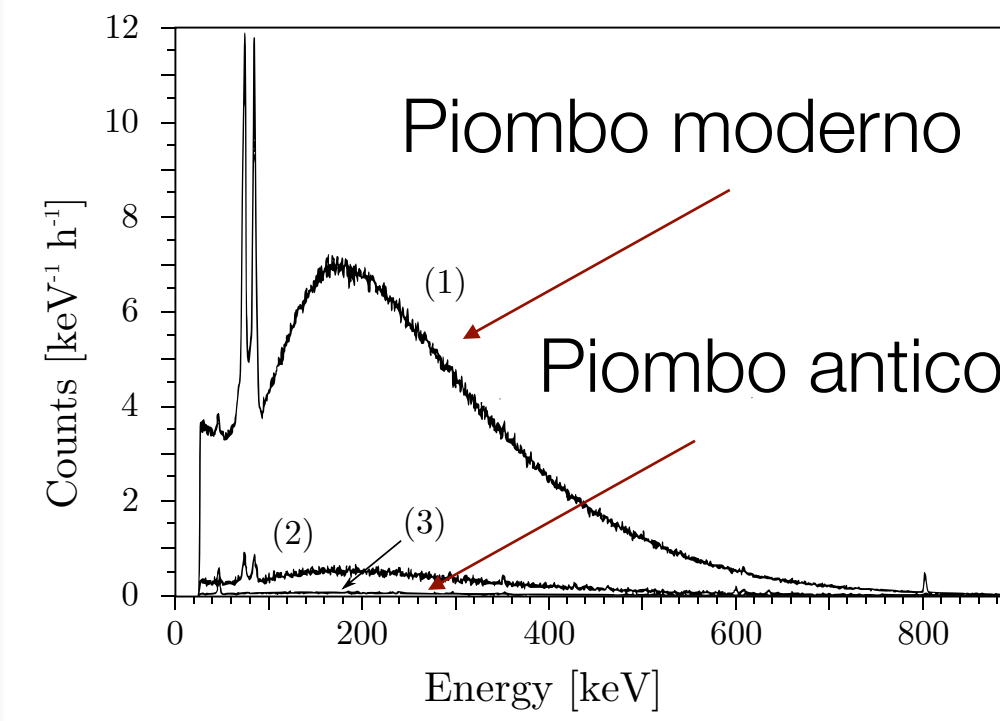
 [Cryogenics 102 \(2019\) 9-21](#)



Schermare il rivelatore dalla radioattività naturale e dai raggi cosmici



Schermi interni
In alto: 30 cm di piombo moderno
Ai lati e sotto: Piombo romano di 6 cm da una nave affondata ($^{210}\text{Po} < 4 \text{ mBq/kg}$)

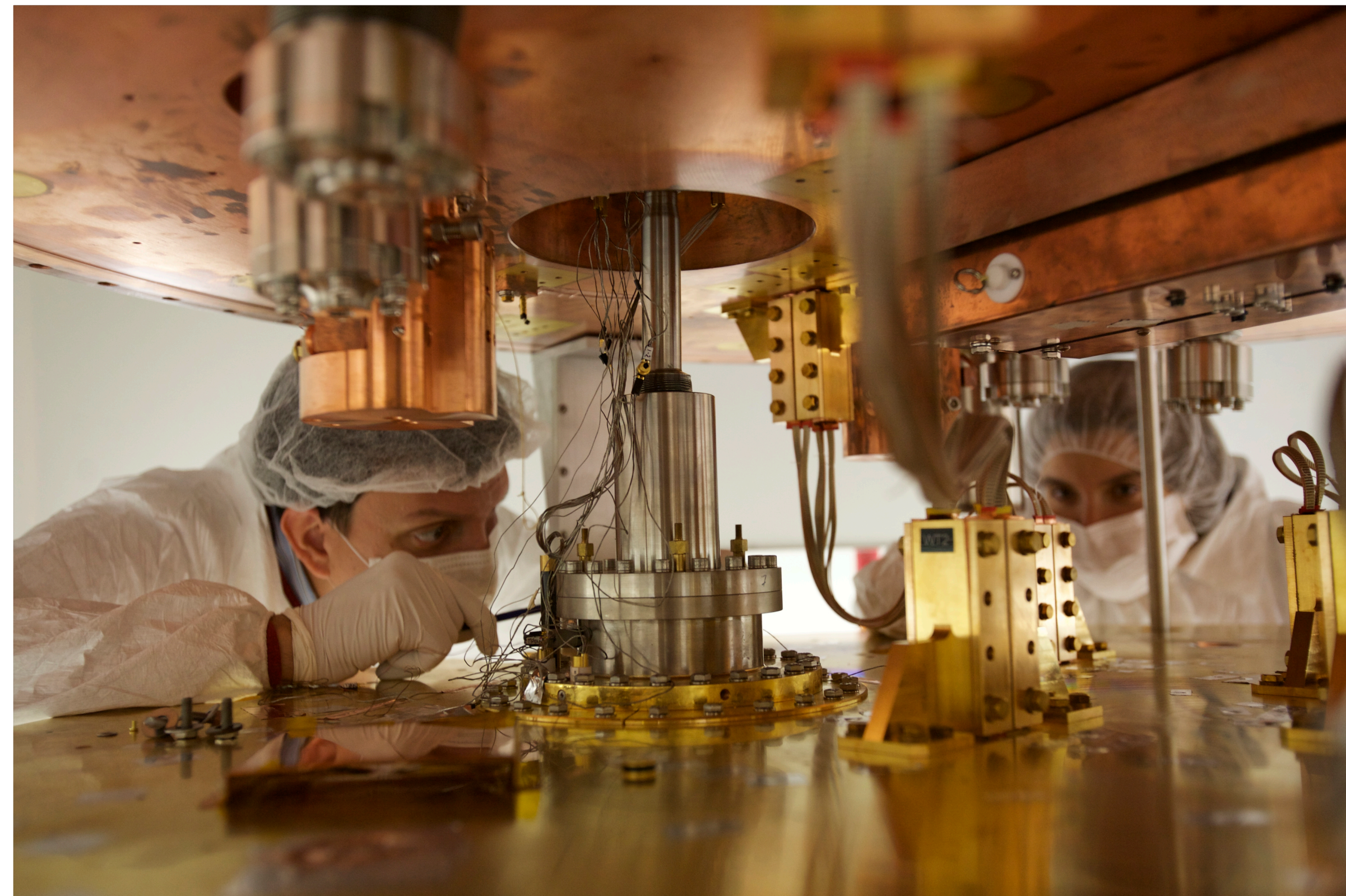


Schermatura naturale @ LNGS
 3600 m w.e. di roccia
 Flusso dei raggi cosmici
 $\sim 10^{-6}$ volte il flusso in superficie

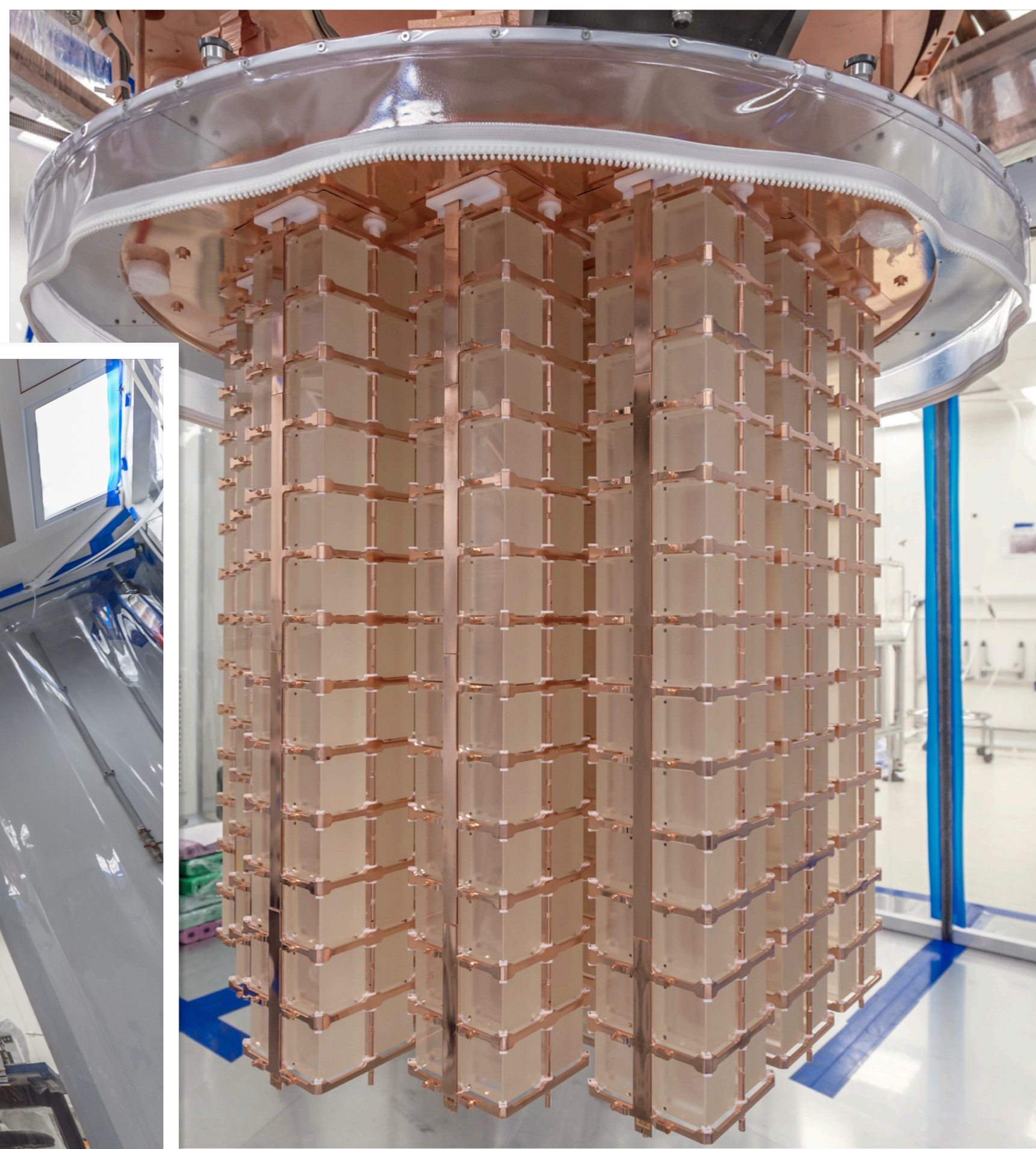
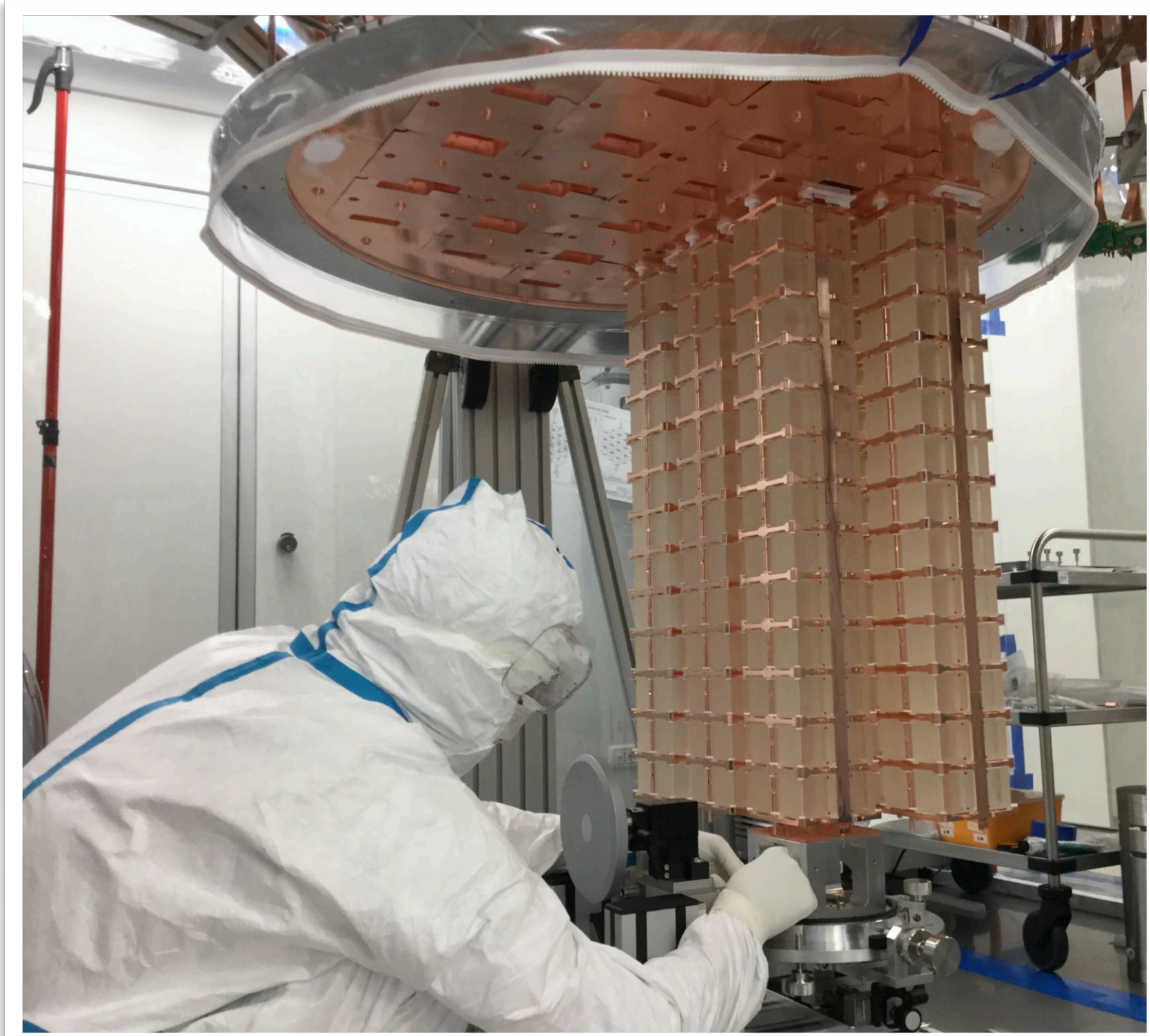
Schermi esterni

- per γ : strato di 25 cm di Pb
- per neutroni: strato di 20 cm polyethylene + pannelli H_3BO_3

La realizzazione di CUORE

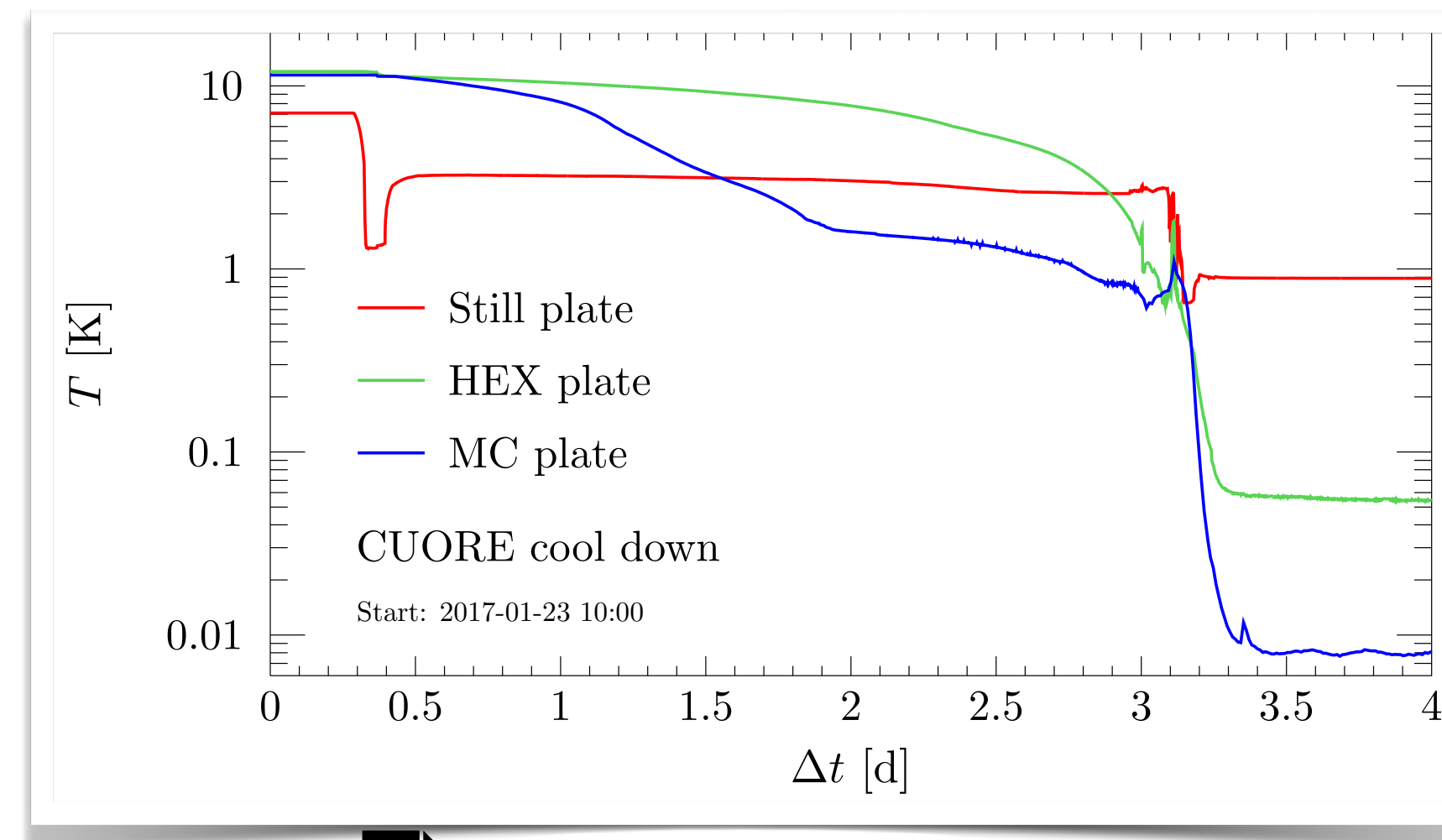
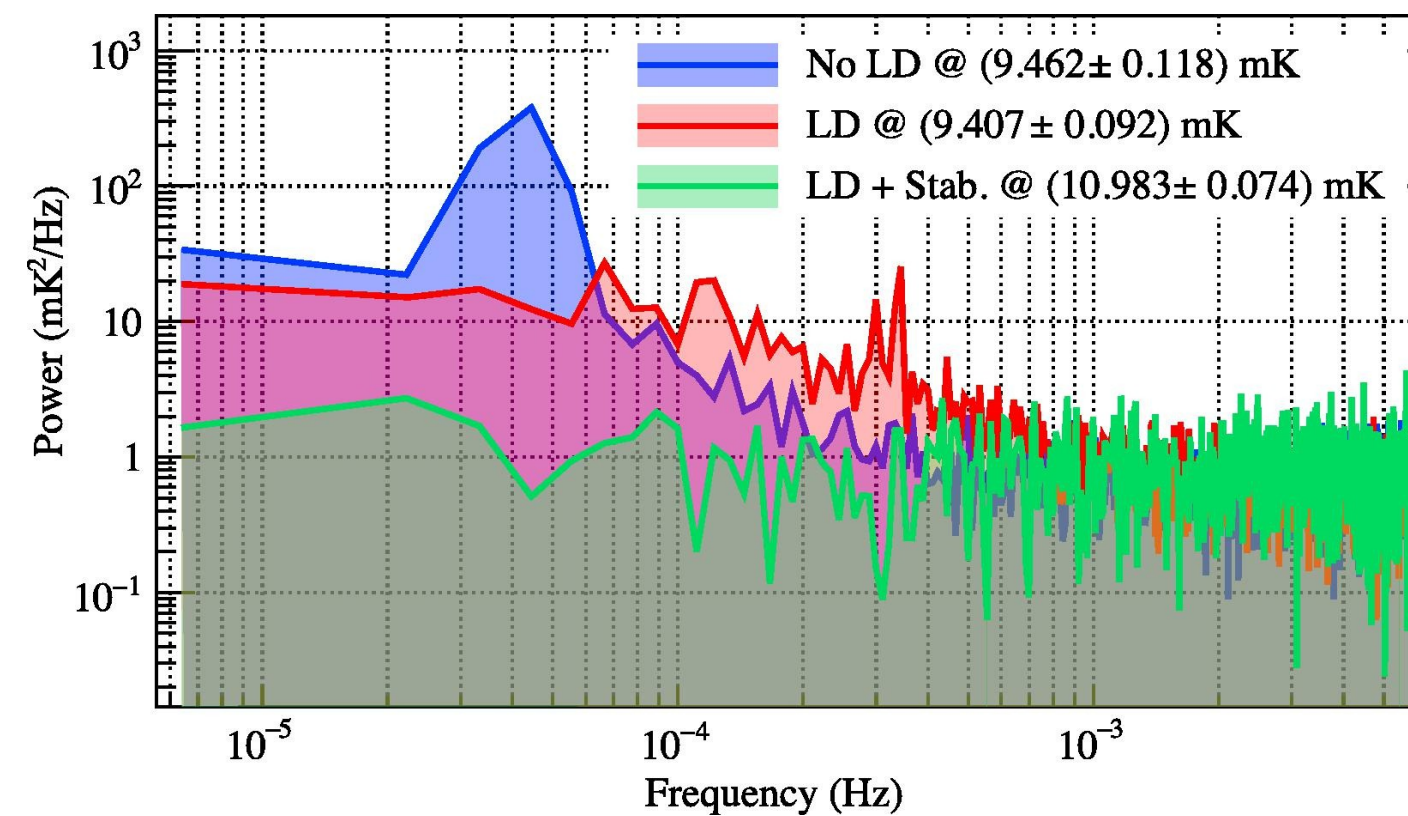



La realizzazione di CUORE

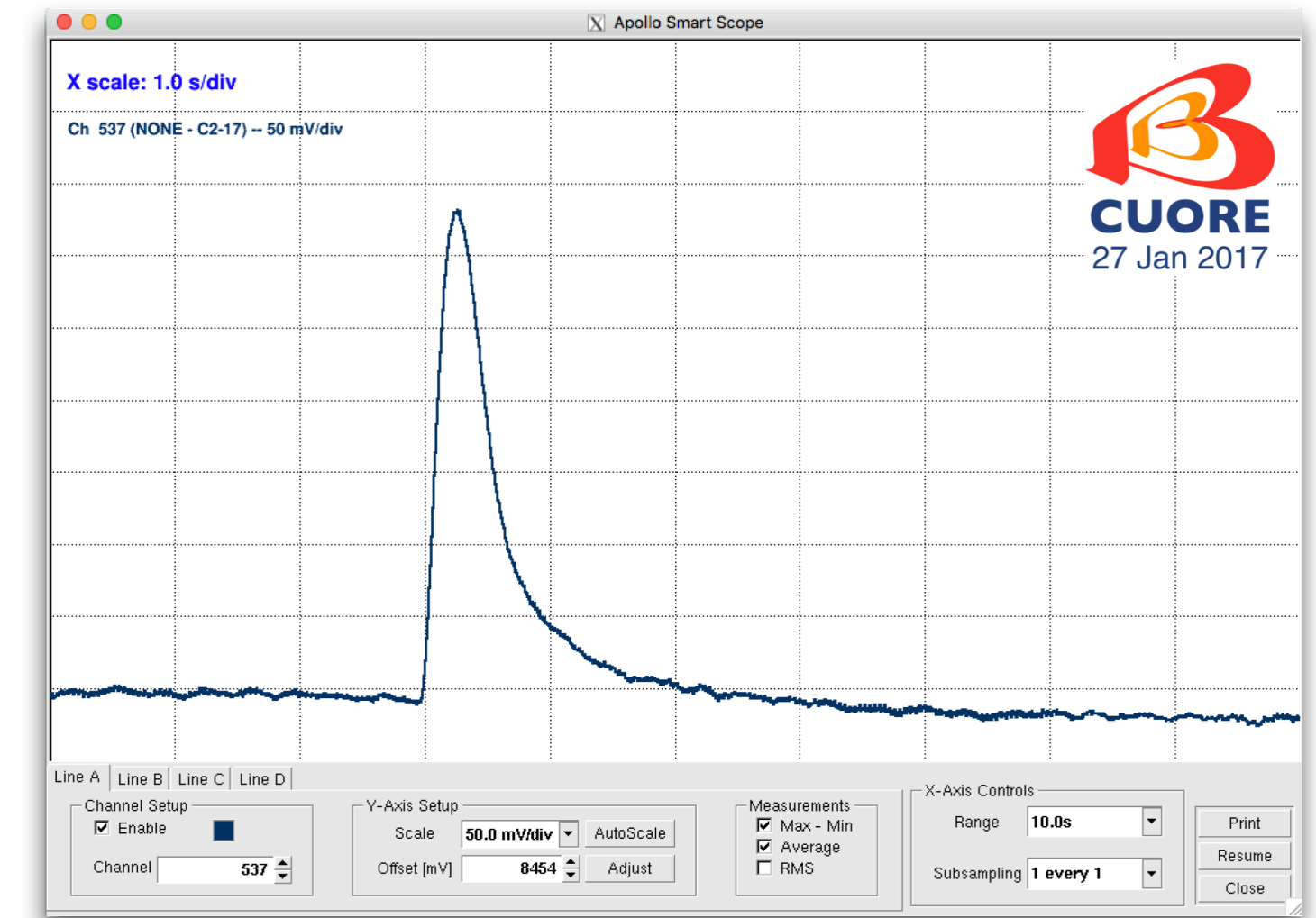


Commissioning del rivelatore

- Rivelatore assemblato nel 2012 - il primo raffreddamento a fine 2016 e la presa dati è iniziata nel 2017
- Diversi sforzi per minimizzare il rumore indotto dalle vibrazioni dei pulse tubes



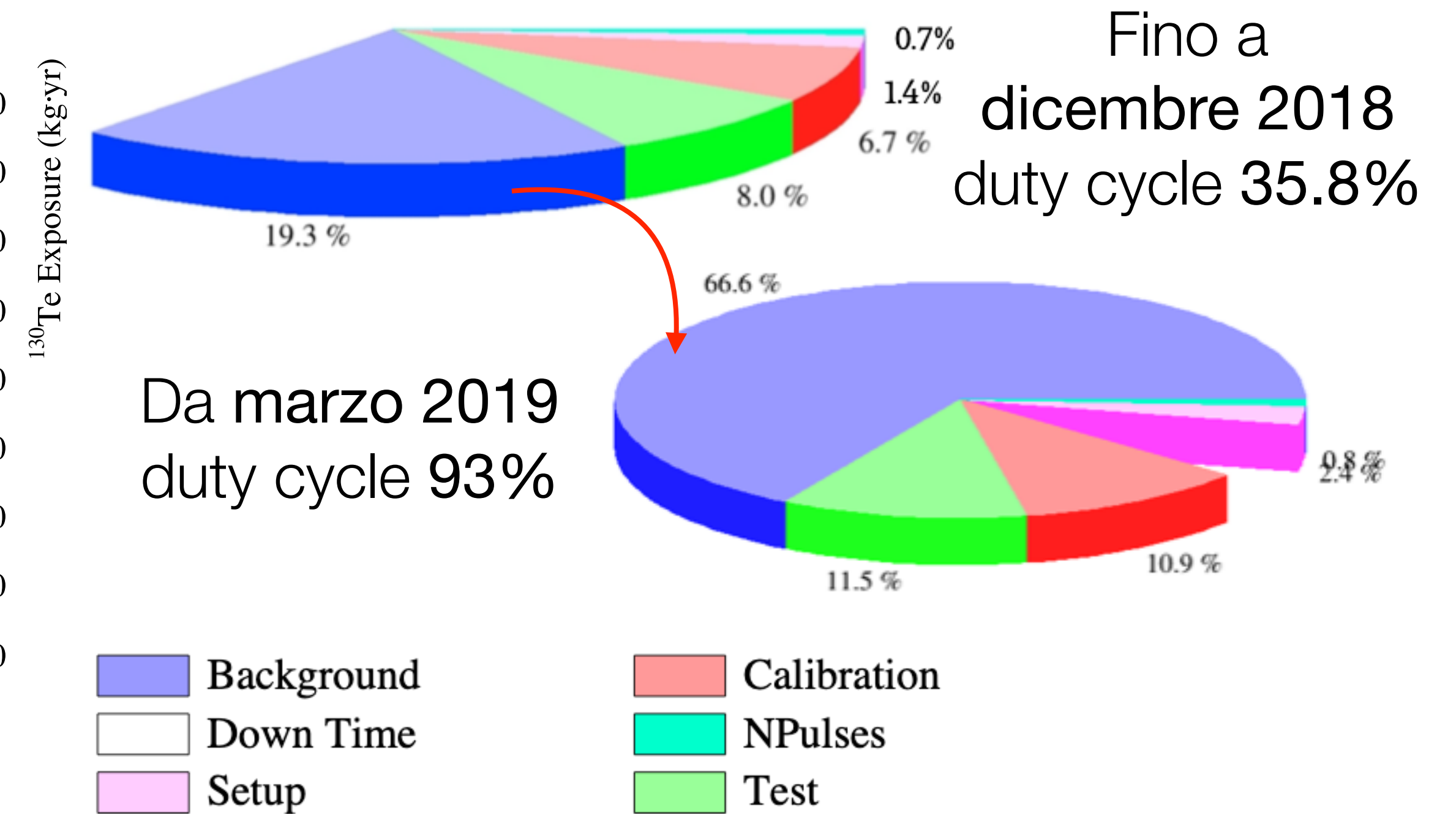
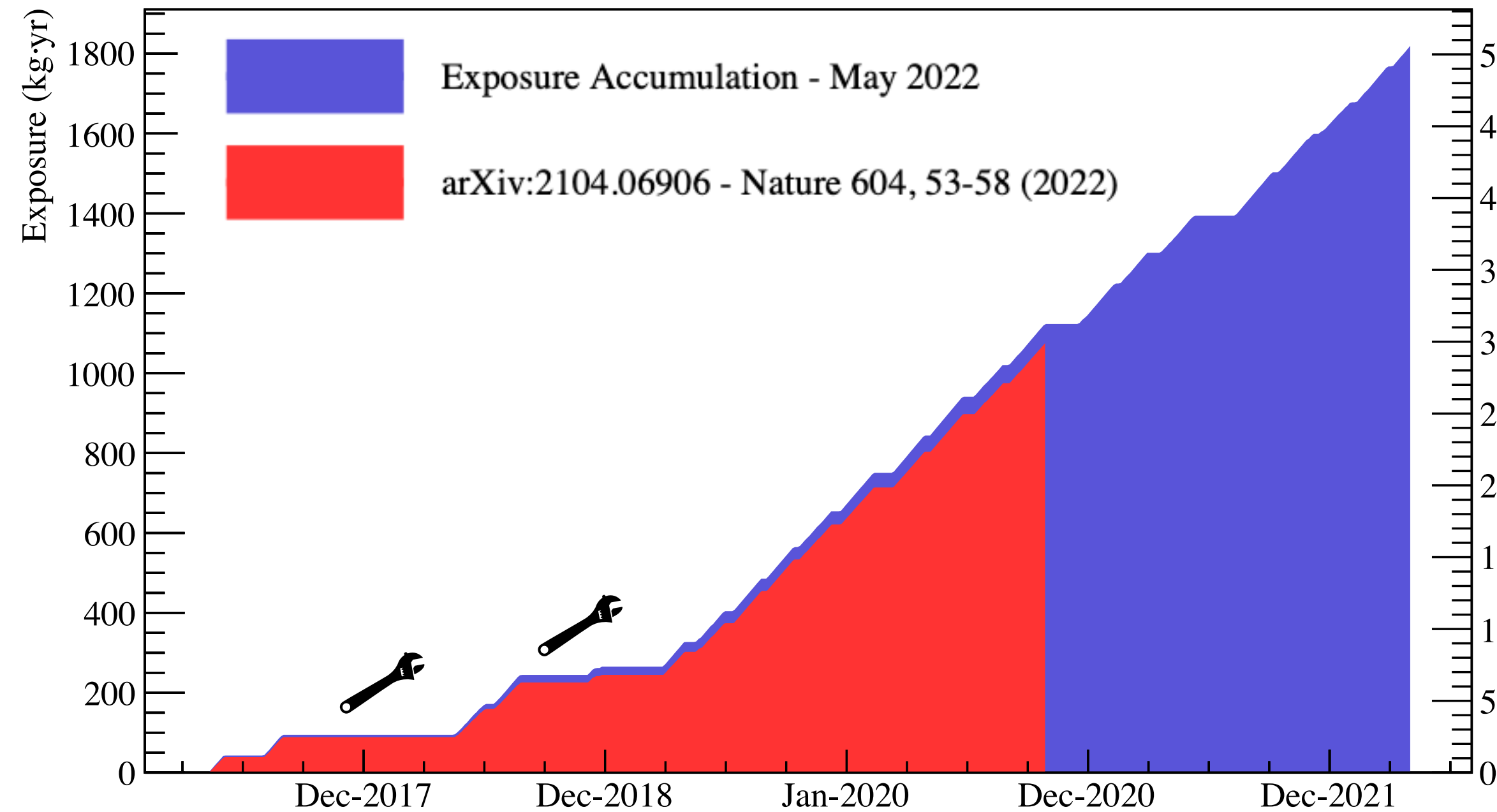
 [Cryogenics 93, 55-56 \(2018\)](#)



27/01/2017
Il primo segnale di CUORE!

- Scansione delle temperature per cercare la condizione ottimale (ora @15 mK)
- Upgrade del sistema di calibrazione nel 2018: introdotto un setup meno invasivo rispetto al sistema criogenico
- Diversi interventi sul sistema criogenico nel 2019, da allora l'esperimento è in fase di presa dati stabile

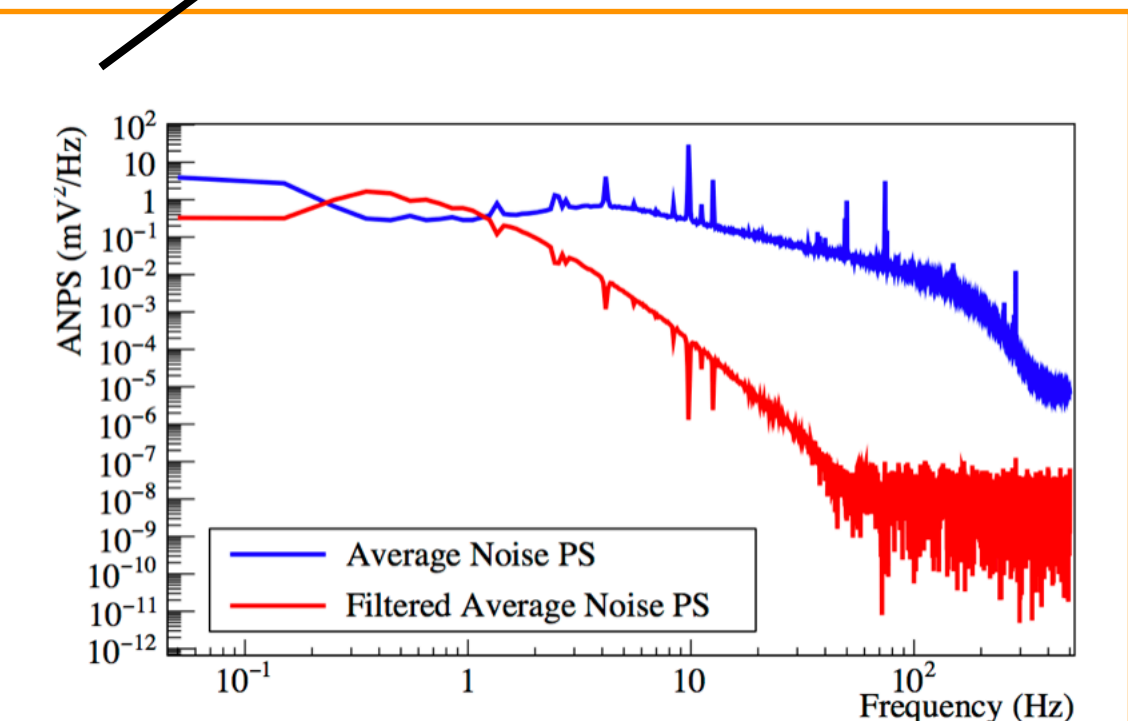
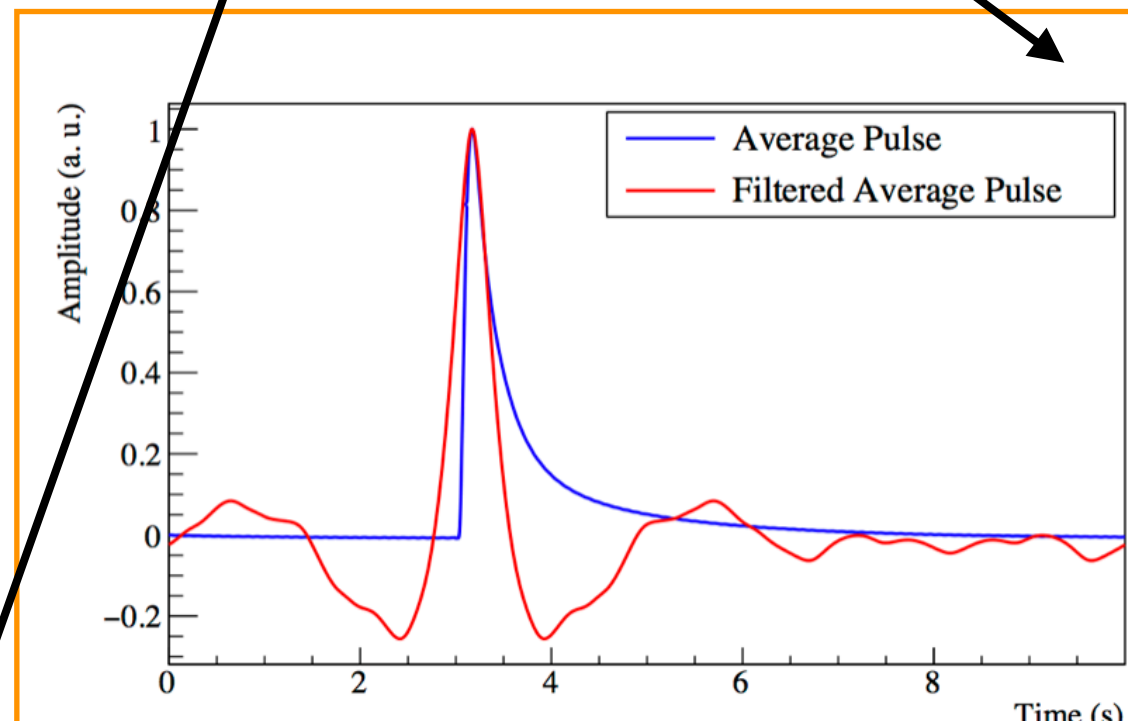
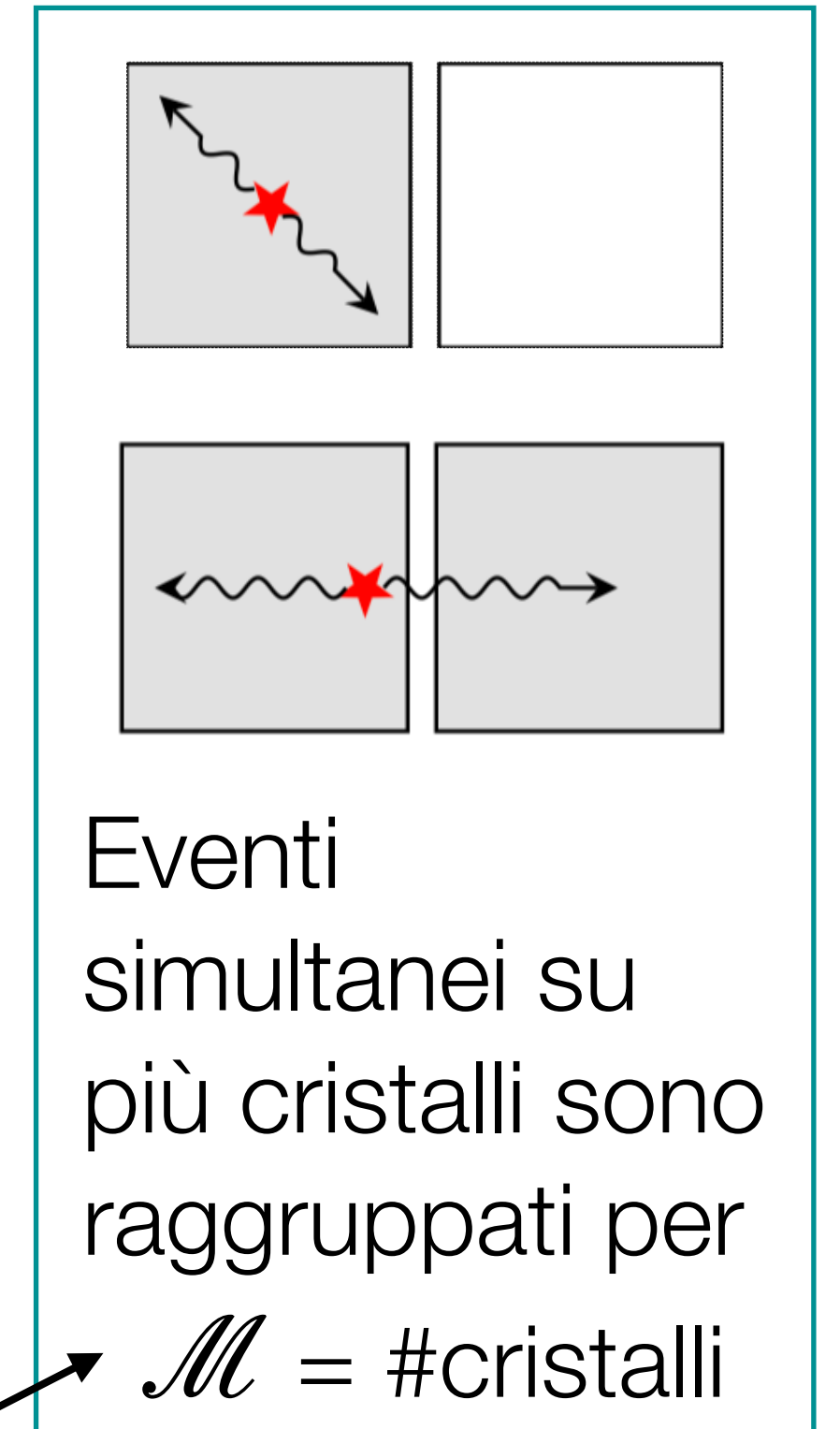
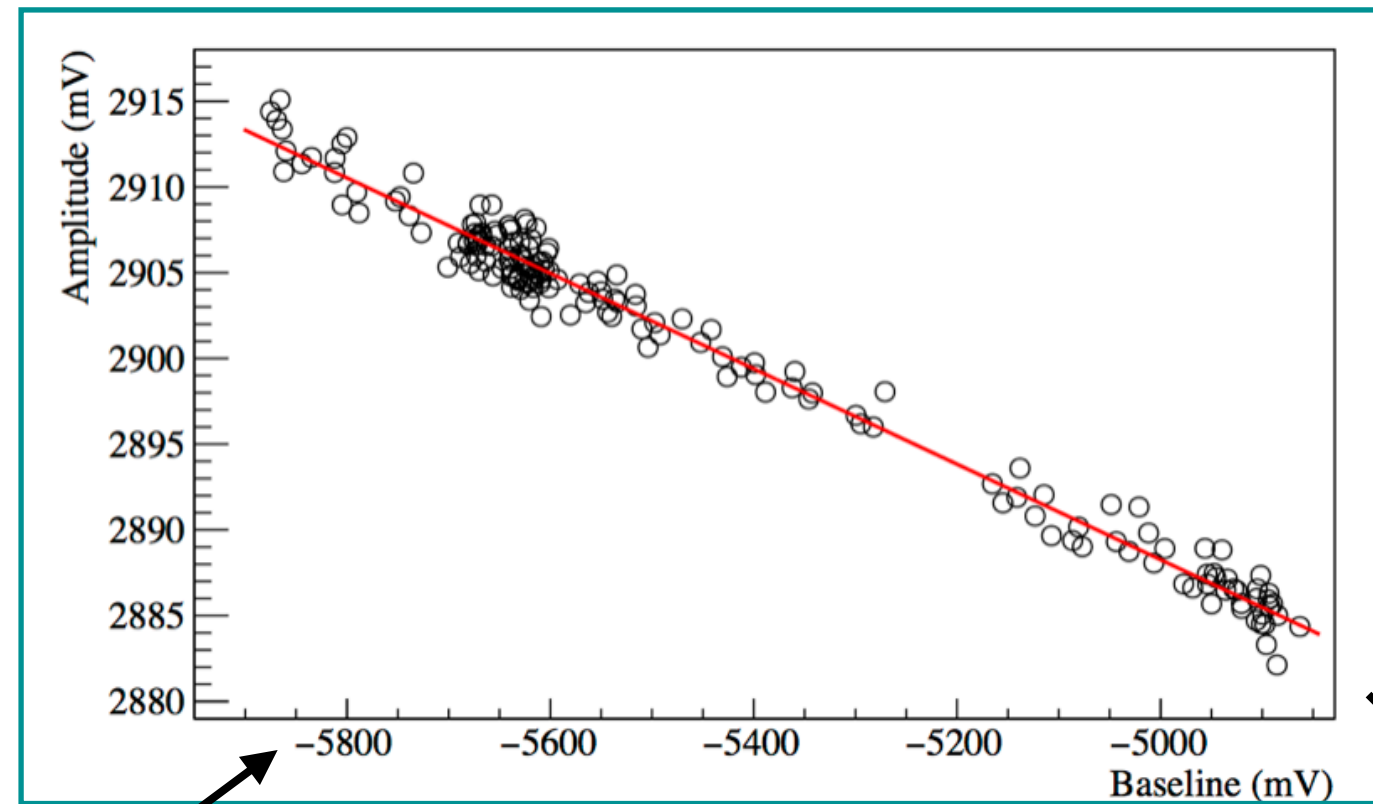
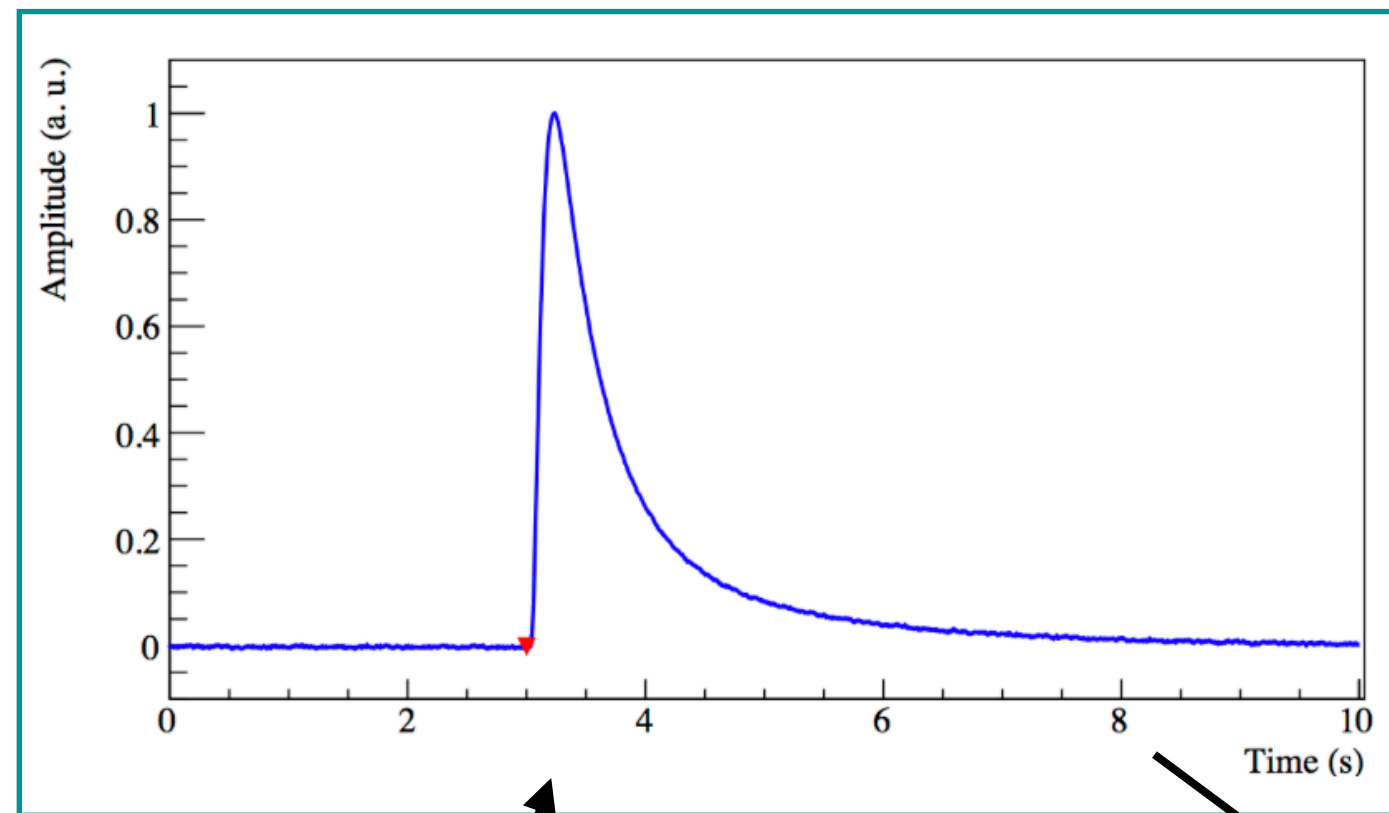
Stato attuale dell'esperimento



La presa dati procede stabile da marzo 2019

- Accumulata un'esposizione di oltre 1600 kg·yr: 15/17 dataset inclusi nell'analisi più recente
- Il rate medio di acquisizione è ~50 kg·yr/mese
- Trigger ottimo applicato offline
- Dati suddivisi in *dataset*: 40-60 giorni di dati di fisica (per la ricerca del $0\nu\beta\beta$) intervallati da periodi di calibrazione di 3/4 giorni
- Acquisizione in continua del segnale degli NTD con frequenza di campionamento 1 kHz

L'analisi dei dati di CUORE

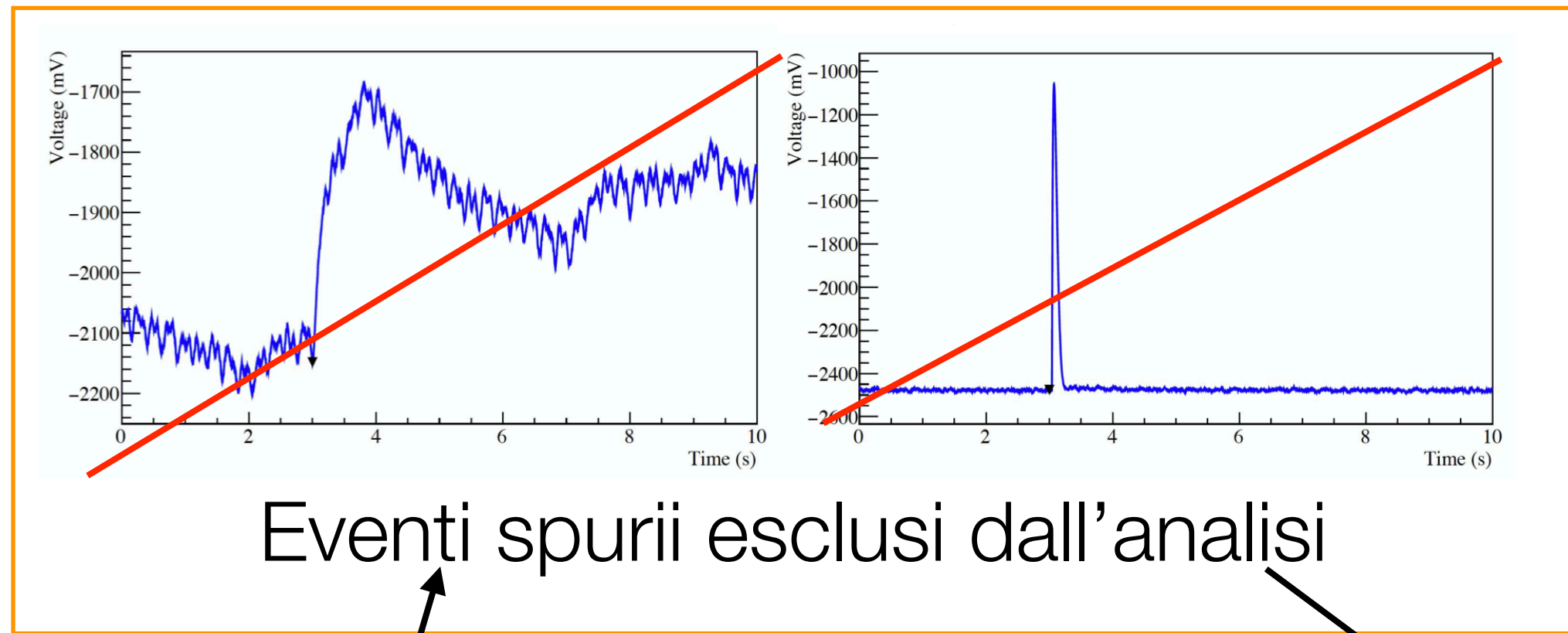


- Calibrazione con ^{232}Th e ^{60}Co
- Fit quadratico per i coefficienti di calibrazione

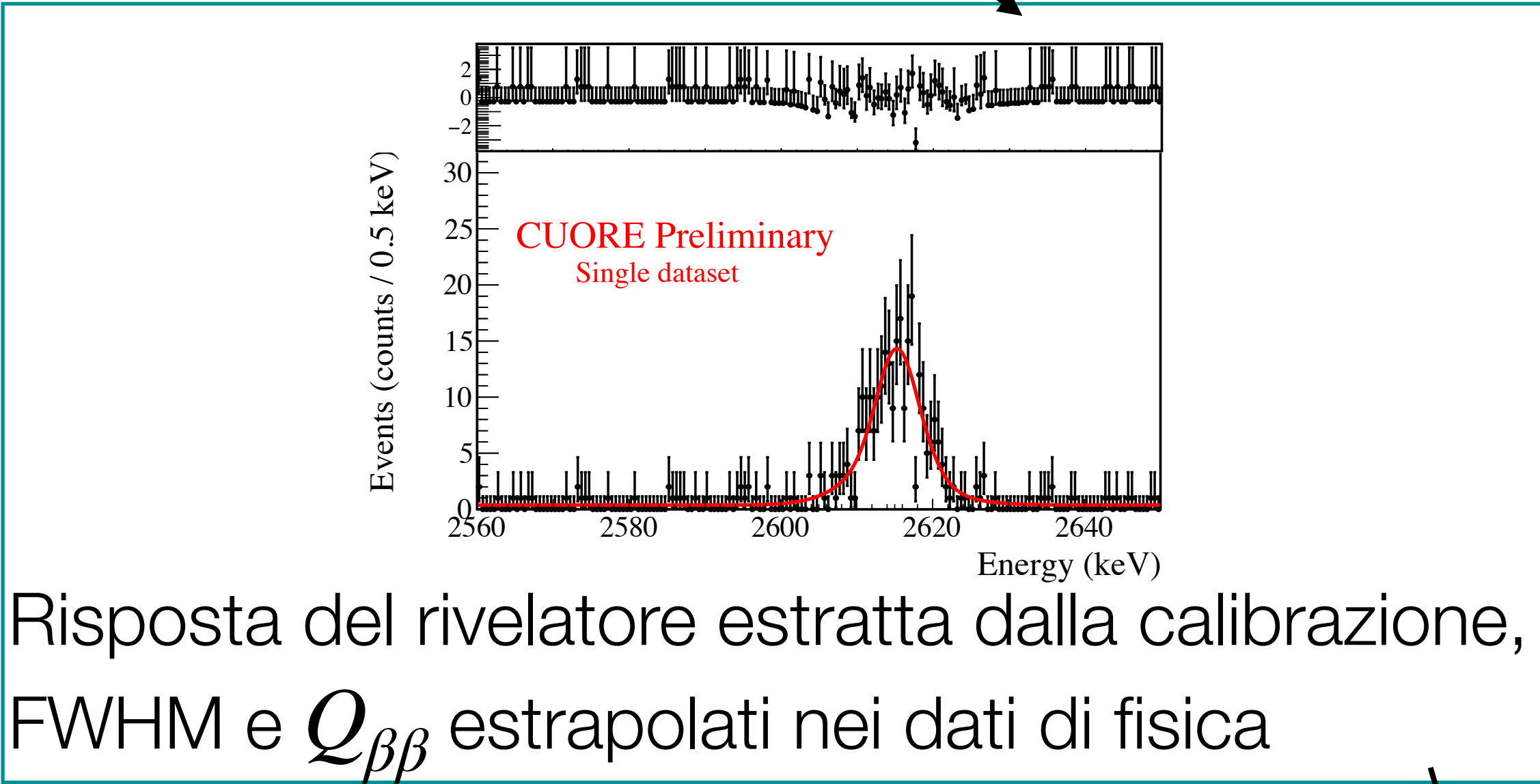
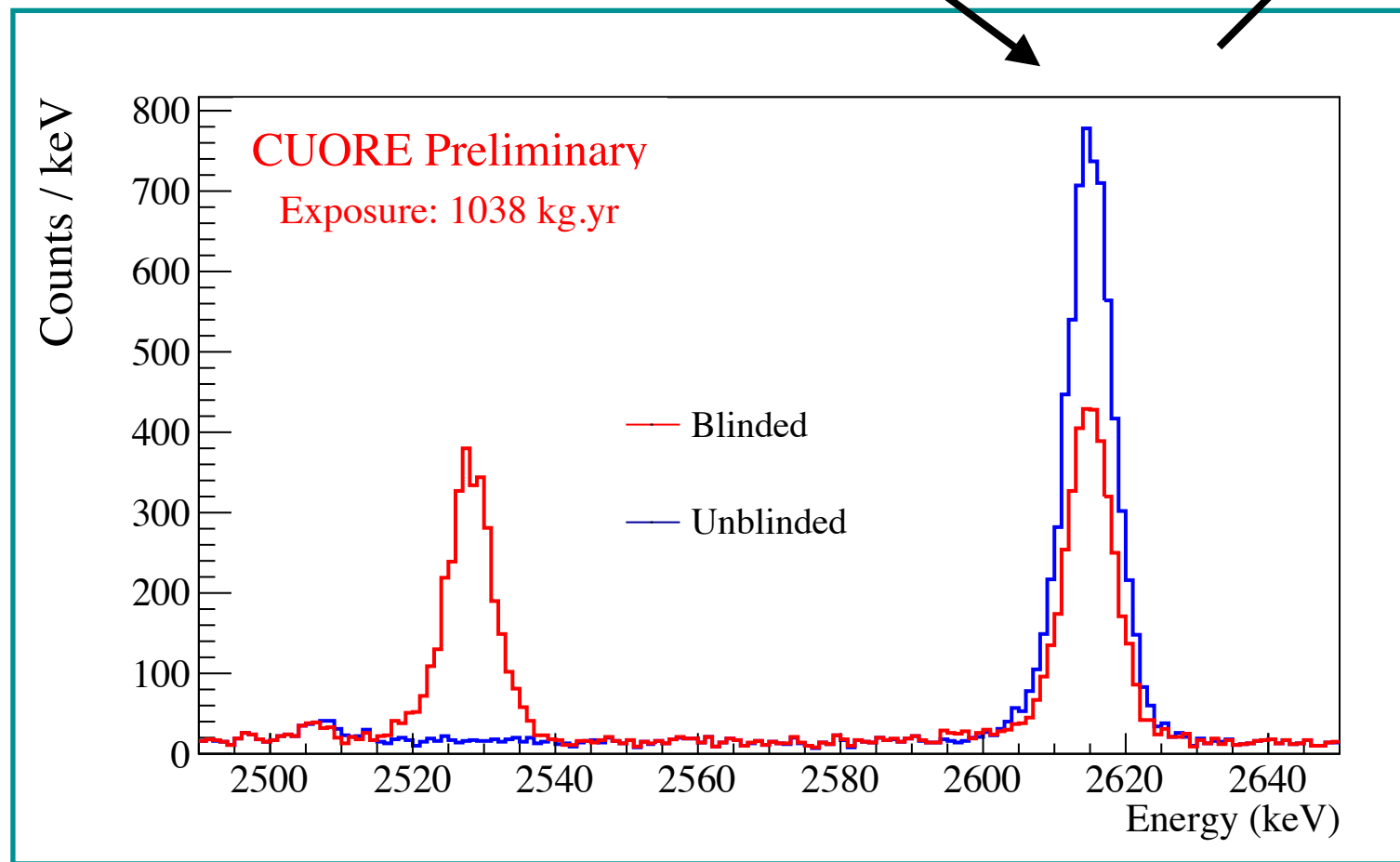
Tecnica del filtro ottimo



L'analisi dei dati di CUORE



Total analysis efficiency (data)	92.4(2)%
Reconstruction efficiency	96.418(2)%
Anticoincidence efficiency	99.3(1)%
PSD efficiency	96.4(2)%
Containment efficiency (MC)	88.35(9)%



Forma dell'impulso

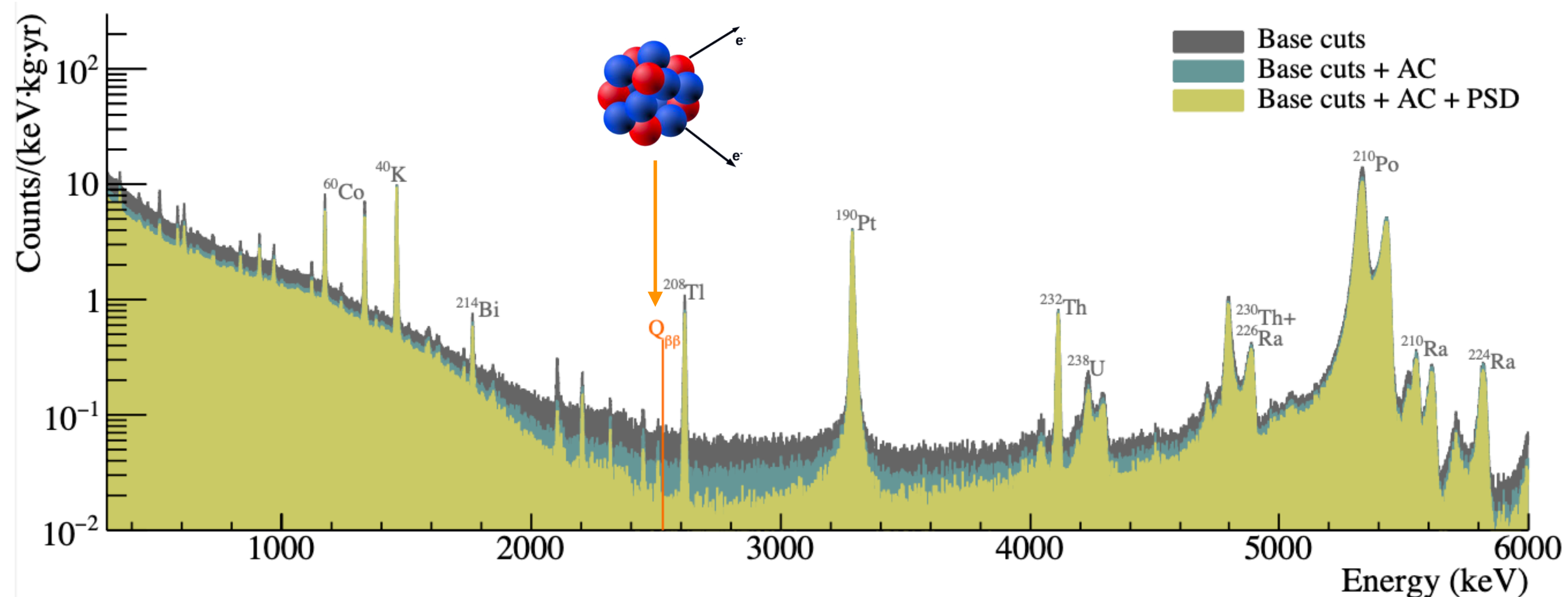
Blinding della ROI

Efficienza di rivelazione

Risposta del rivelatore

Modello della ROI e fit

Lo spettro di energia finale



Efficienza dei tagli di base:
(96.4%)

- Trigger di segnale
- Energia ben ricostruita
- Esclusi effetti di per pile-up

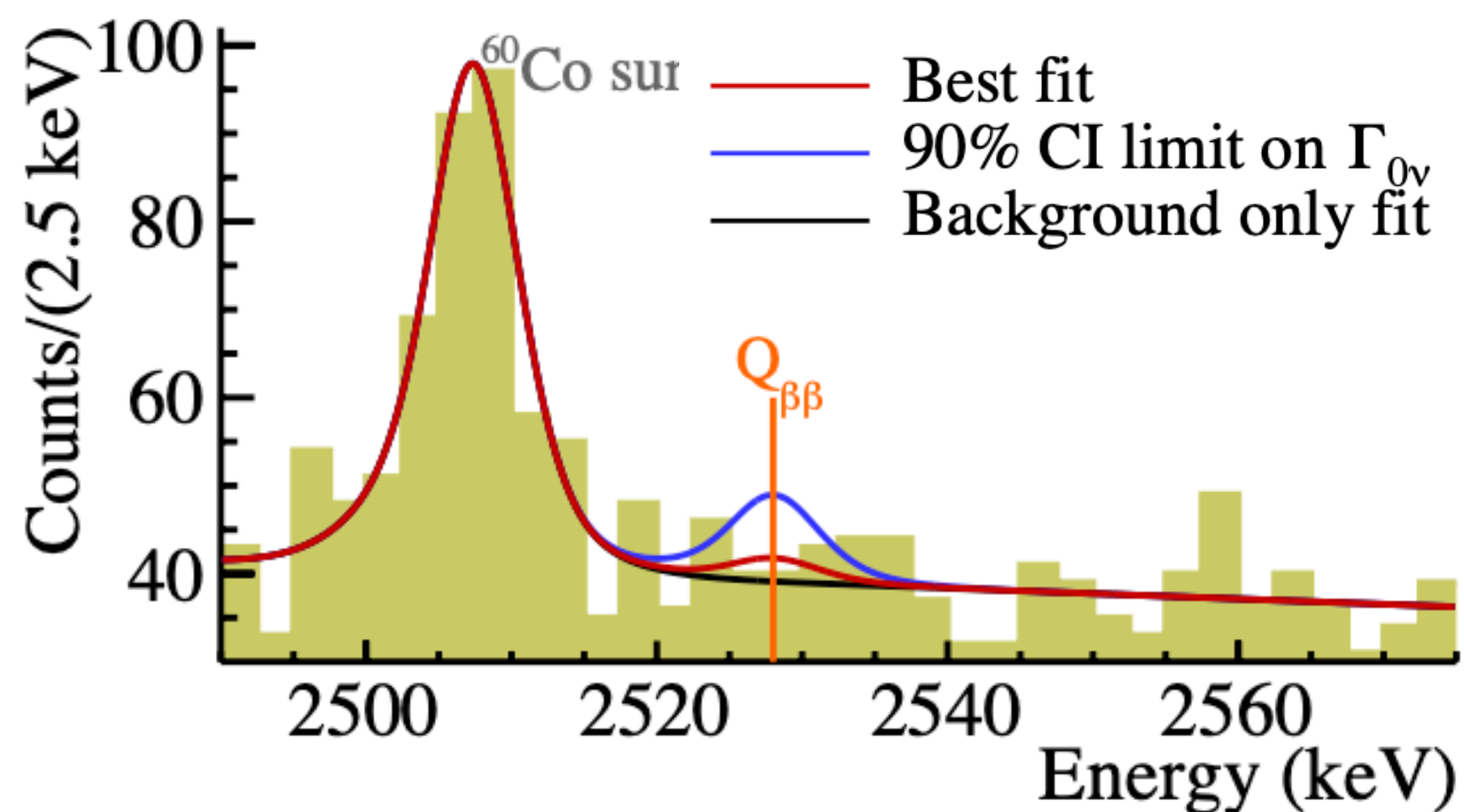
Efficienza di anti-coincidenza:
(99.3%)

- Probabilità di non escludere segnali per coincidenze casuali (riga a 1461 keV del ^{40}K)

Efficienza del taglio di PSD:
(96.4%)

- Frazione di eventi che passano il taglio di forma basato sulla Principal Component Analysis

Il fit nella regione di interesse: il decadimento $0\nu\beta\beta$ del ^{130}Te



L'esposizione di TeO_2 è $1038.4 \text{ kg} \cdot \text{yr}$

Nessuna evidenza di $0\nu\beta\beta$

Rate di best fit $\hat{\Gamma}_{0\nu} = (0.9 \pm 1.4) \cdot 10^{-26} \text{ yr}$

Limite $T_{0\nu\beta\beta}^{1/2} > 2.2 \cdot 10^{25} \text{ yr}$ (90 % C. I.)



Nature 604, 53-58 (2022)

Article | [Open Access](#) | [Published: 06 April 2022](#)

Search for Majorana neutrinos exploiting millikelvin cryogenics with CUORE

[The CUORE Collaboration](#)

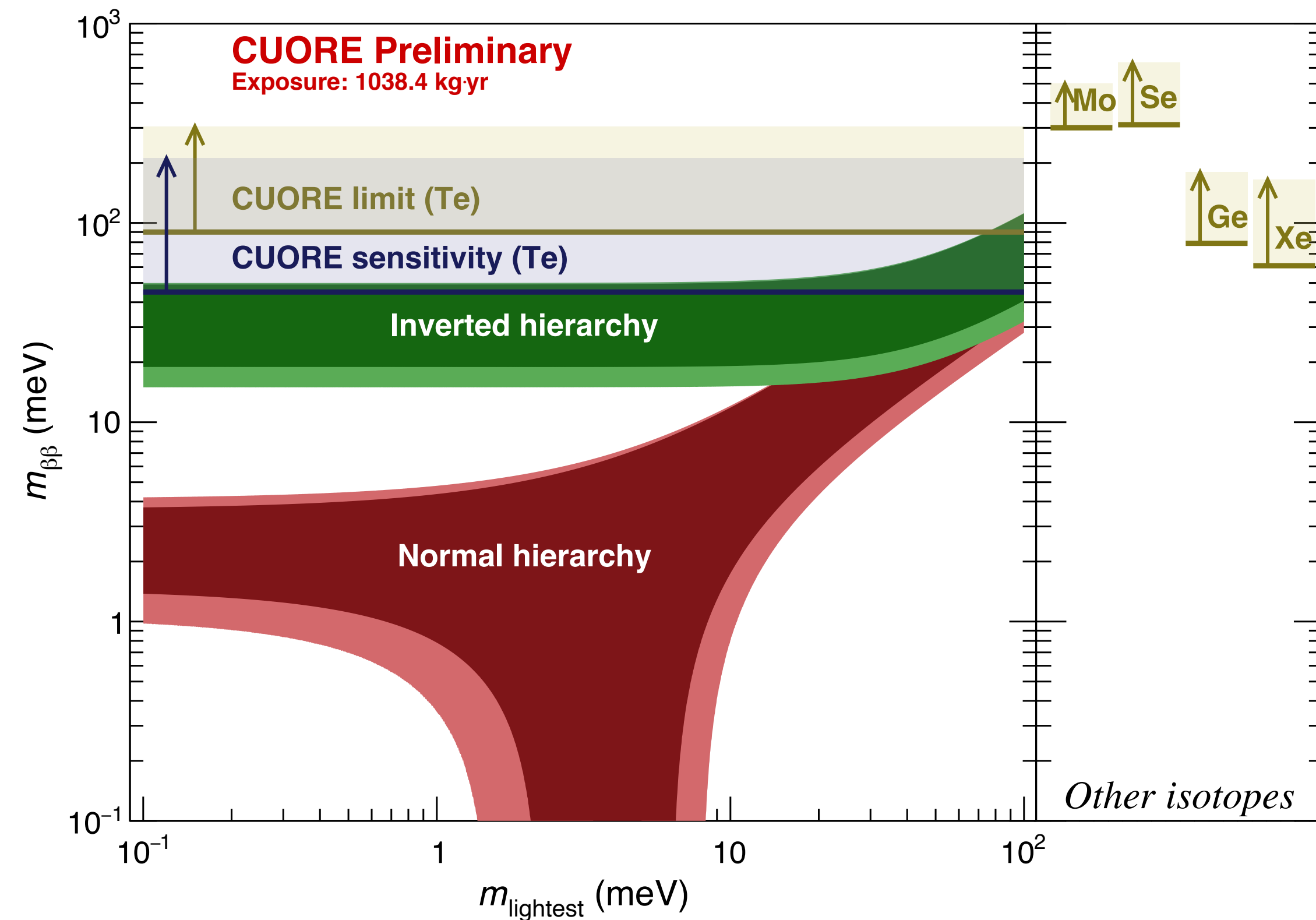
[Nature](#) 604, 53–58 (2022) | [Cite this article](#)

8593 Accesses | 90 Altmetric | [Metrics](#)

Abstract

The possibility that neutrinos may be their own antiparticles, unique among the known fundamental particles, arises from the symmetric theory of fermions proposed by Ettore Majorana in 1937¹. Given the profound consequences of such Majorana neutrinos, among which is a potential explanation for the matter–antimatter asymmetry of the universe via leptogenesis², the Majorana nature of neutrinos commands intense experimental scrutiny globally; one of the primary experimental probes is neutrinoless double beta ($0\nu\beta\beta$) decay. Here we show results from the search for $0\nu\beta\beta$ decay of ^{130}Te , using the latest advanced cryogenic calorimeters with the CUORE experiment³. CUORE, operating just 10 millikelvin above absolute zero, has pushed the state of the art on three frontiers: the sheer mass held at such ultralow temperatures, operational longevity, and the low levels of ionizing radiation emanating from the cryogenic infrastructure. We find no evidence for $0\nu\beta\beta$ decay and set a lower bound of the process half-life as 2.2×10^{25} years at a 90 per cent credibility interval. We discuss potential applications of the advances made with CUORE to other fields such as direct dark matter, neutrino and nuclear physics searches and large-scale quantum computing, which can benefit from sustained operation of large payloads in a low-radioactivity, ultralow-temperature cryogenic environment.

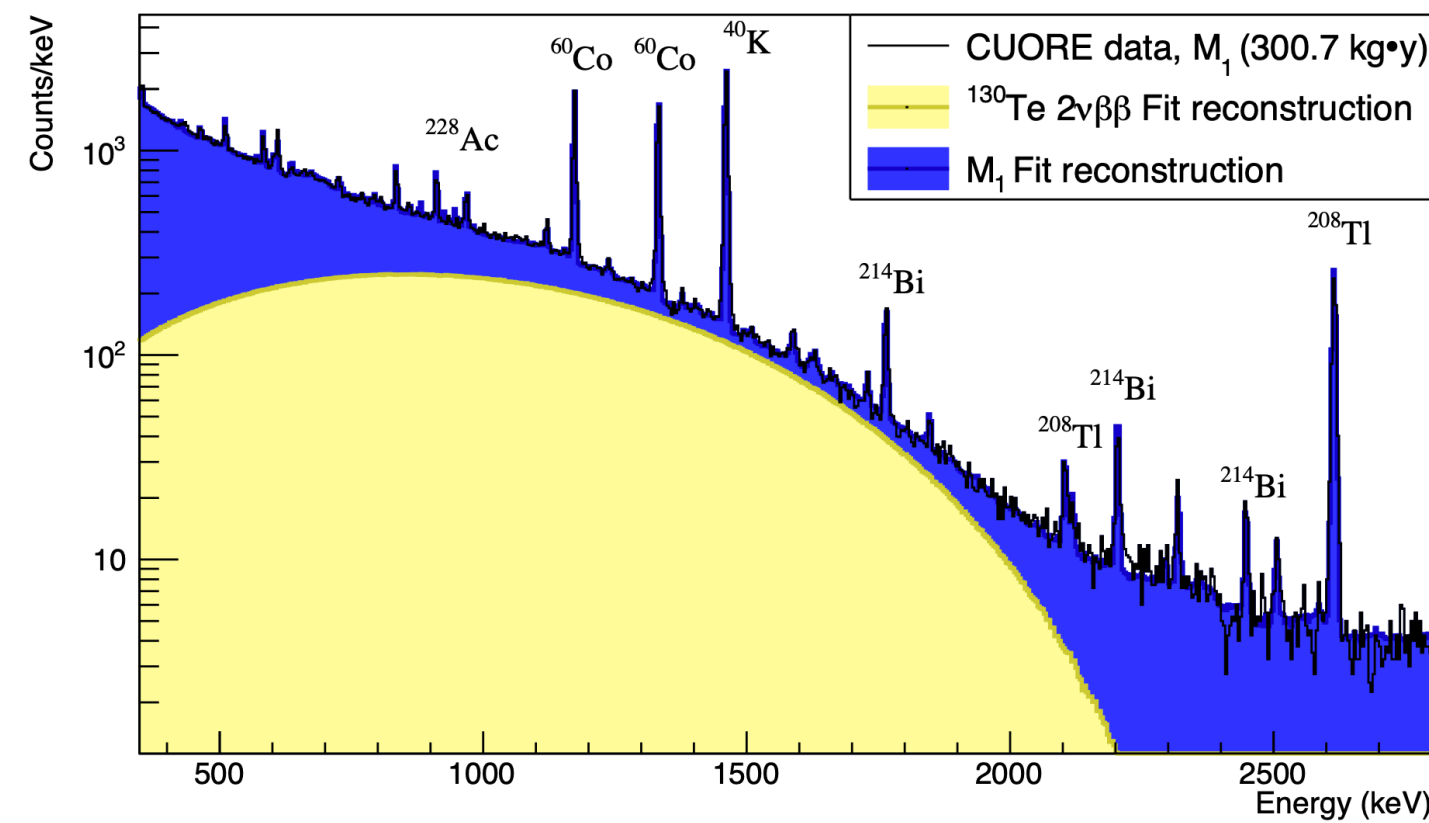
Risultati dell'analisi del decadimento $0\nu\beta\beta$ del ^{130}Te



Assumendo che lo $0\nu\beta\beta$ avvenga nel canale più semplice in base ai valori degli elementi di matrice estraiamo un limite su $m_{\beta\beta} < 75 - 350$ meV

Altre analisi recenti con i dati di CUORE

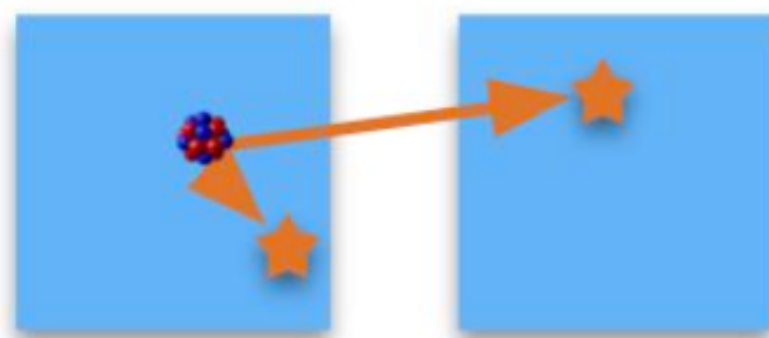
Misura del decadimento $2\nu\beta\beta$ del ^{130}Te



Phys. Rev. Lett. 126, 171801 (2020)

$$T_{2\nu\beta\beta}^{1/2} = [7.71^{+0.08}_{-0.06}(\text{stat.})^{+0.12}_{-0.15}(\text{syst.})] 10^{20} \text{ yr}$$

Doppio decadimento beta del ^{130}Te su stati eccitati del ^{130}Xe

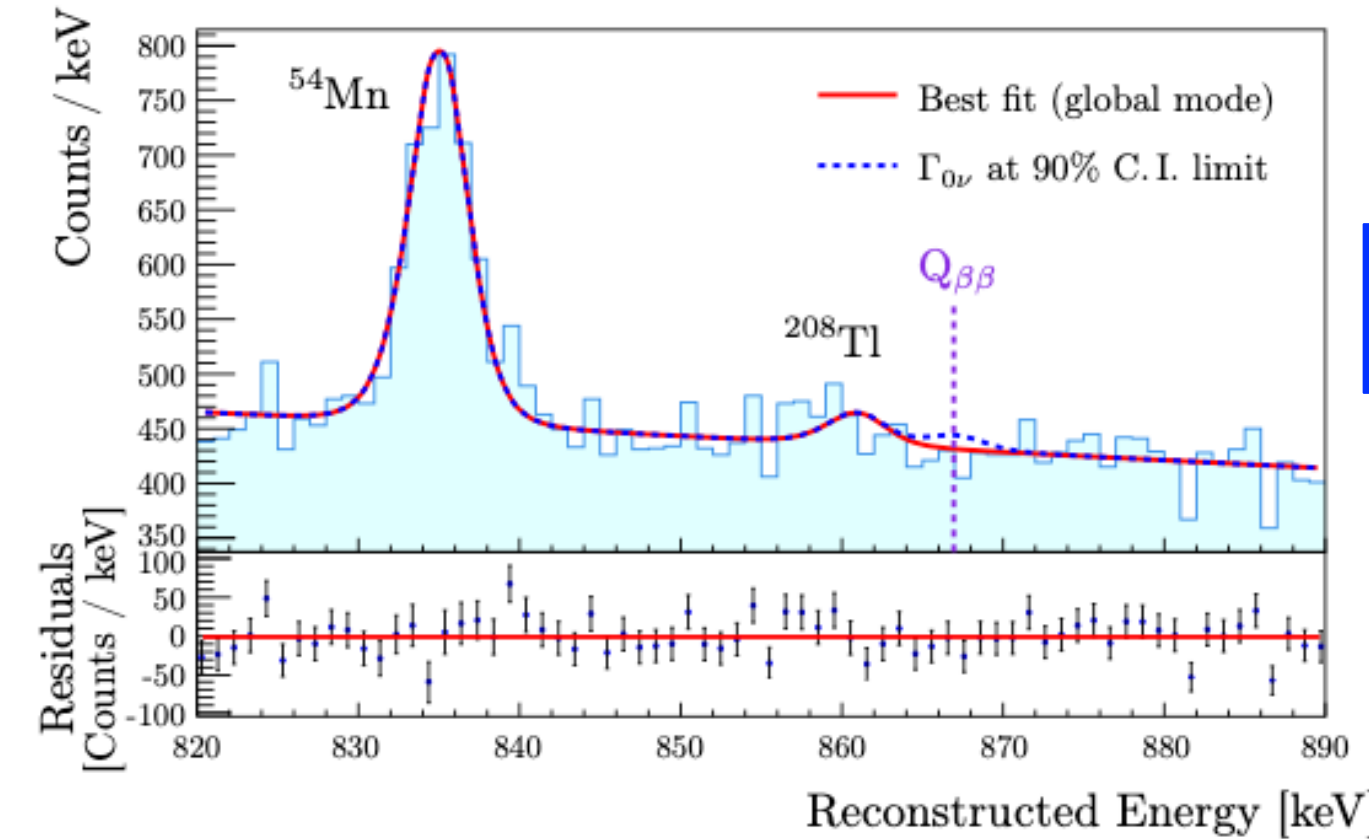


$$T_{1/2}^{0\nu} > 5.9 \times 10^{24} \text{ yr (90 \% C. I.)}$$

$$T_{1/2}^{2\nu} > 1.3 \times 10^{24} \text{ yr (90 \% C. I.)}$$

Eur. Phys. J. C, 81 57 (2021)

Misura del decadimento $0\nu\beta\beta$ del ^{128}Te



arxiv:2203.08684 (Mandato a PRL)

$$T_{0\nu\beta\beta}^{1/2} > 3.6 \cdot 10^{24} \text{ yr (90 \% C. I.)}$$

Modello termico della risposta dei rivelatori

arxiv:2205.04559 (Mandato a JAP)

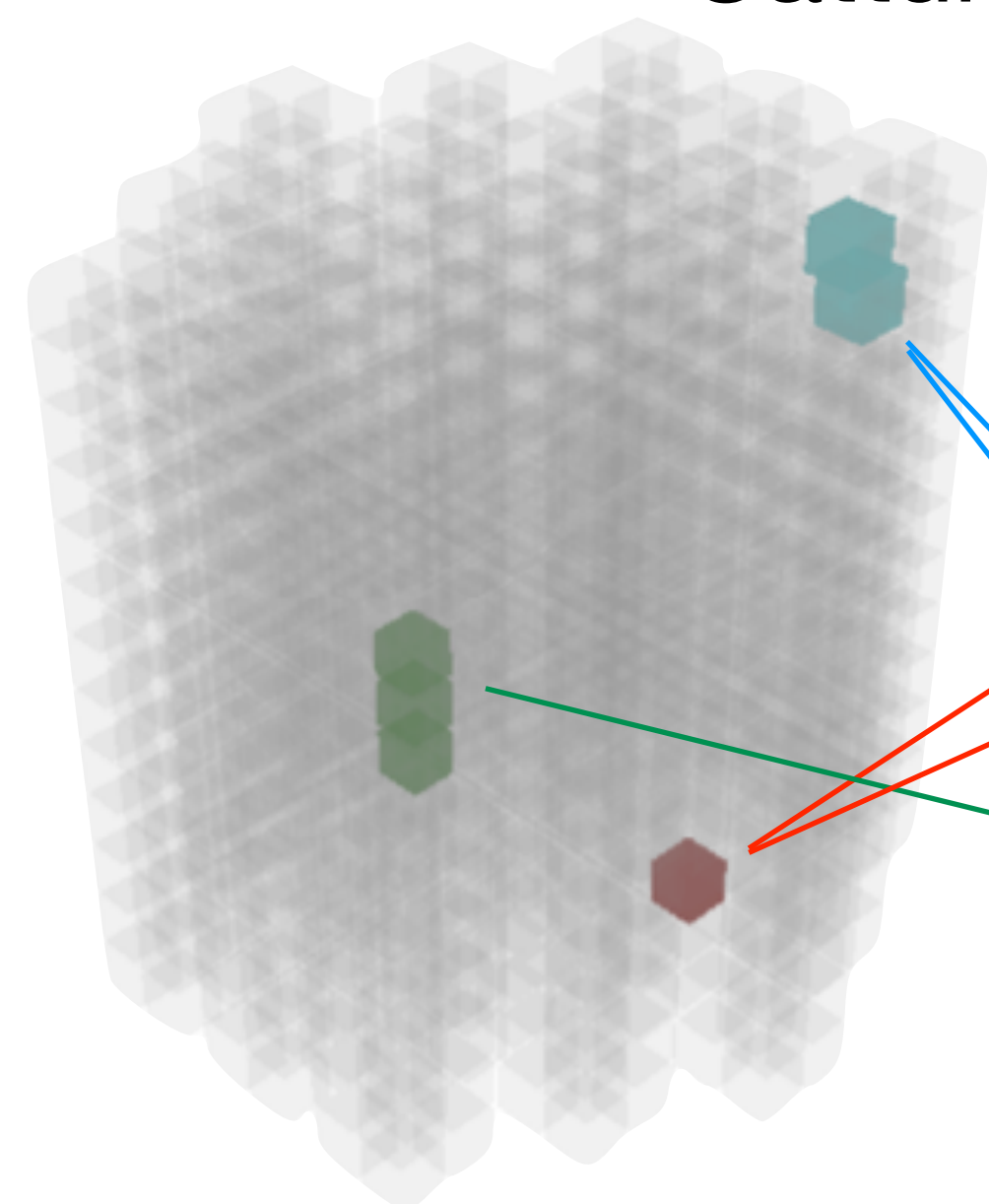
E molto altro ancora!

- Studio delle sorgenti di rumore ambientali e antropiche in CUORE, modello delle sorgenti di fondo per CUPID, analisi di bassa energia.

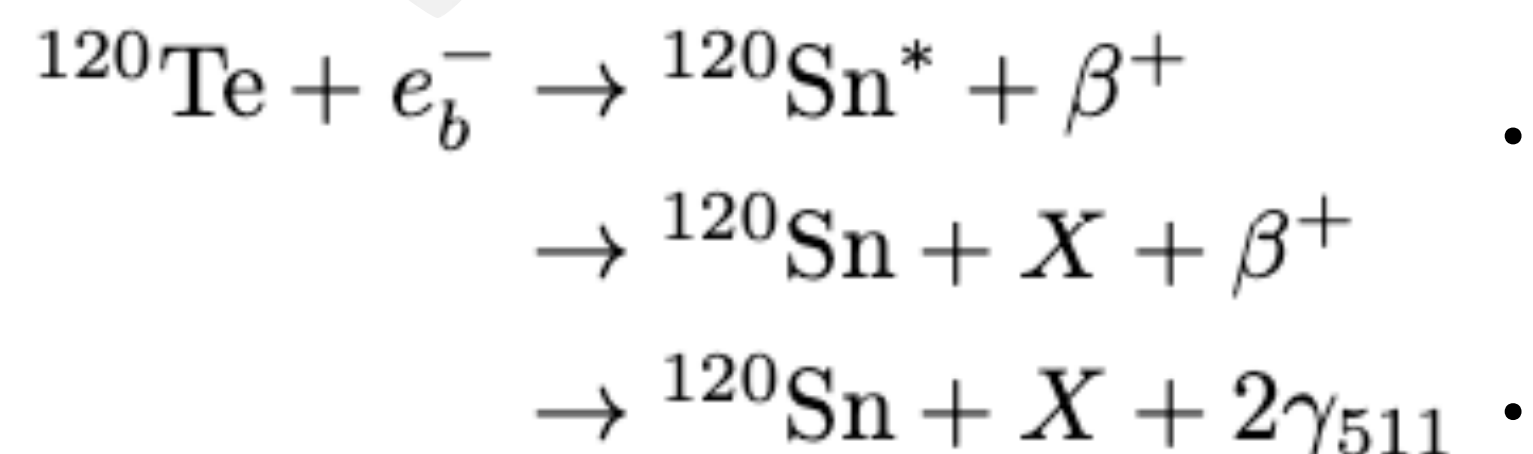
Altre analisi recenti con i dati di CUORE

Cattura elettronica con emissione di un positrone ($0\nu EC\beta^+$) del ^{120}Te

$$Q_{\beta\beta} = 1714.8 \text{ keV, abbondanza isotopica } 0.09\%$$



Signature	Particles Detected	Signal Peak Position [keV]	Multiplicity	Energy range [keV]			Containment efficiency ϵ_{mc} [%]
				ΔE_0	ΔE_1	ΔE_2	
(a)	$\beta^+ + X + \gamma_{511}$	1203.8	1	[1150,1250]			12.8(5)
(b)	$\beta^+ + X + 2\gamma_{511}$	1714.8	1	[1703,1775]			13.1(5)
(c)	$(\beta^+ + X, \gamma_{511})$	(692.8, 511)	2	[650,750]	[460,560]		4.10(20)
(d)	$(\beta^+ + X + \gamma_{511}, \gamma_{511})$	(1203.8, 511)	2	[1150,1250]	[460,560]		13.8(6)
(e)	$(\beta^+ + X, \gamma_{511}, \gamma_{511})$	(692.8, 511, 511)	3	[650,750]	[460,560]	[460,560]	2.15(9)

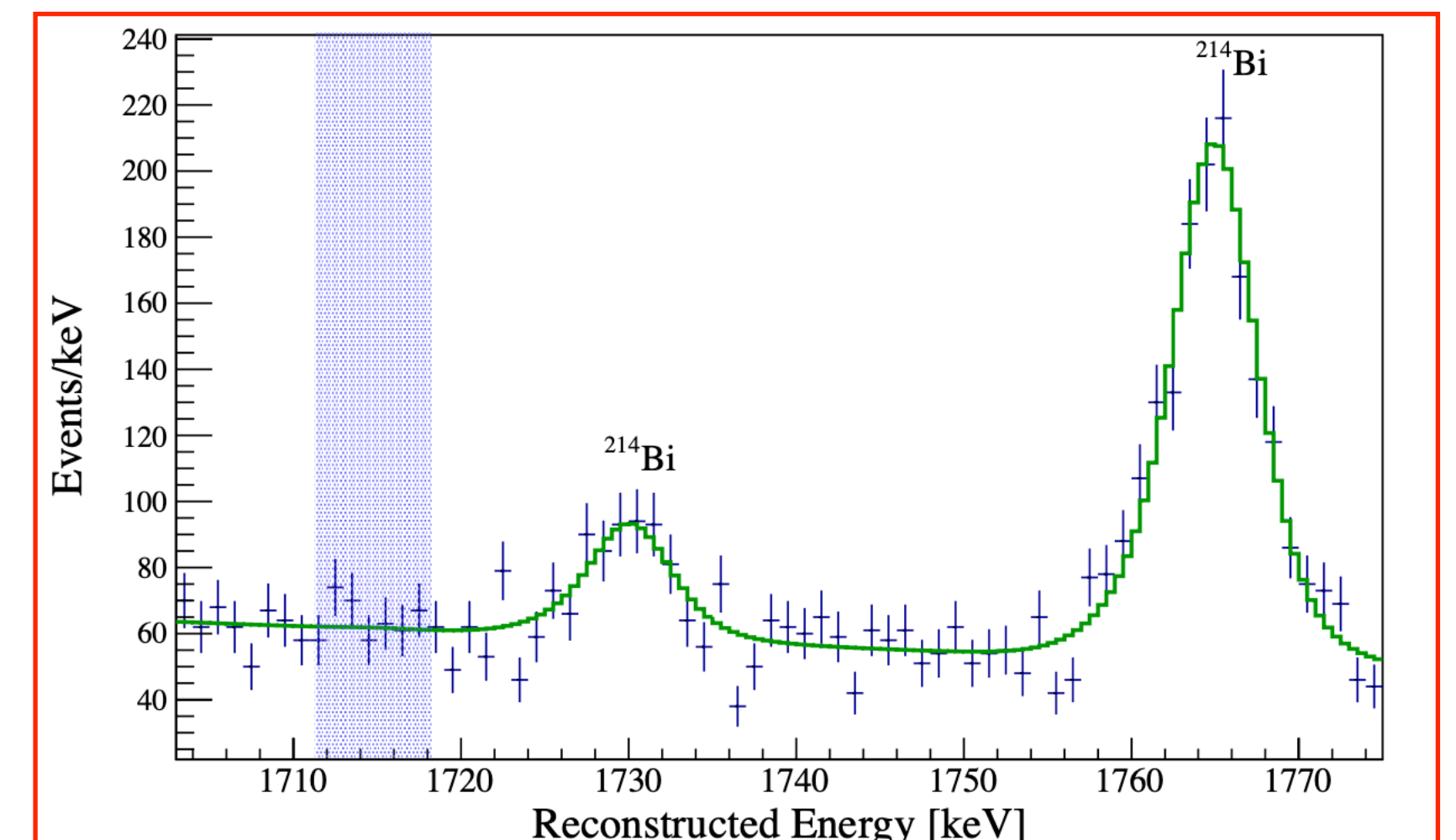
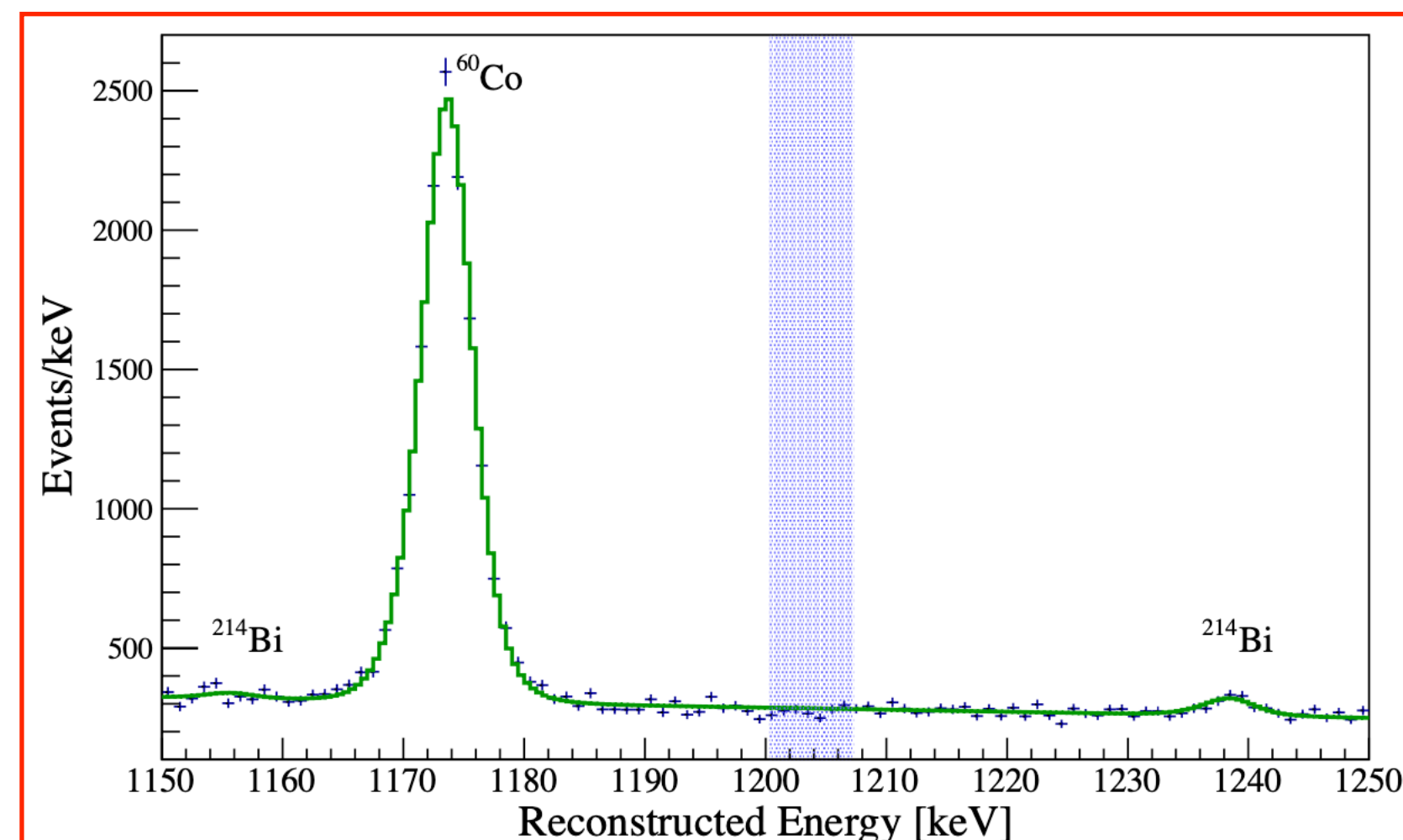
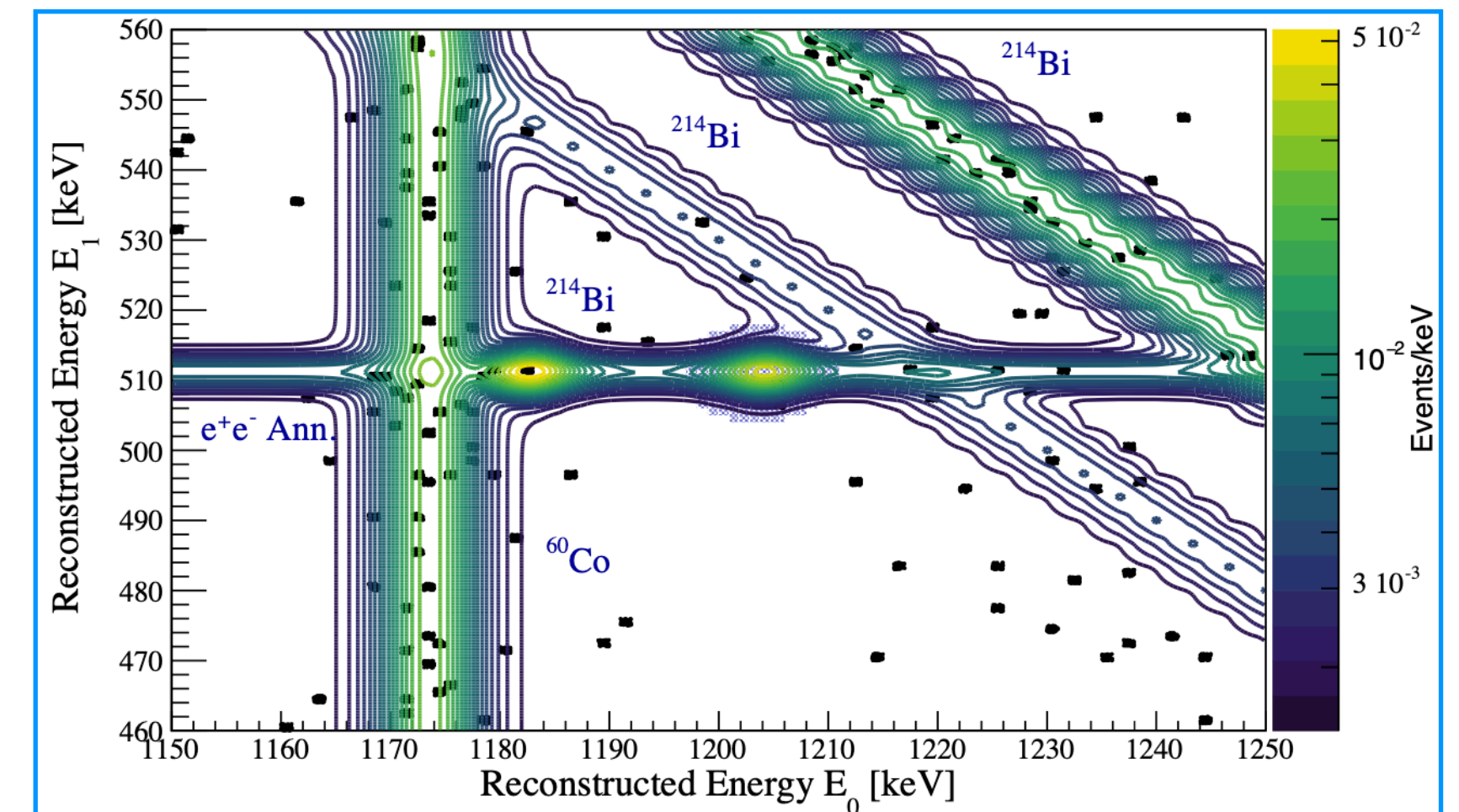
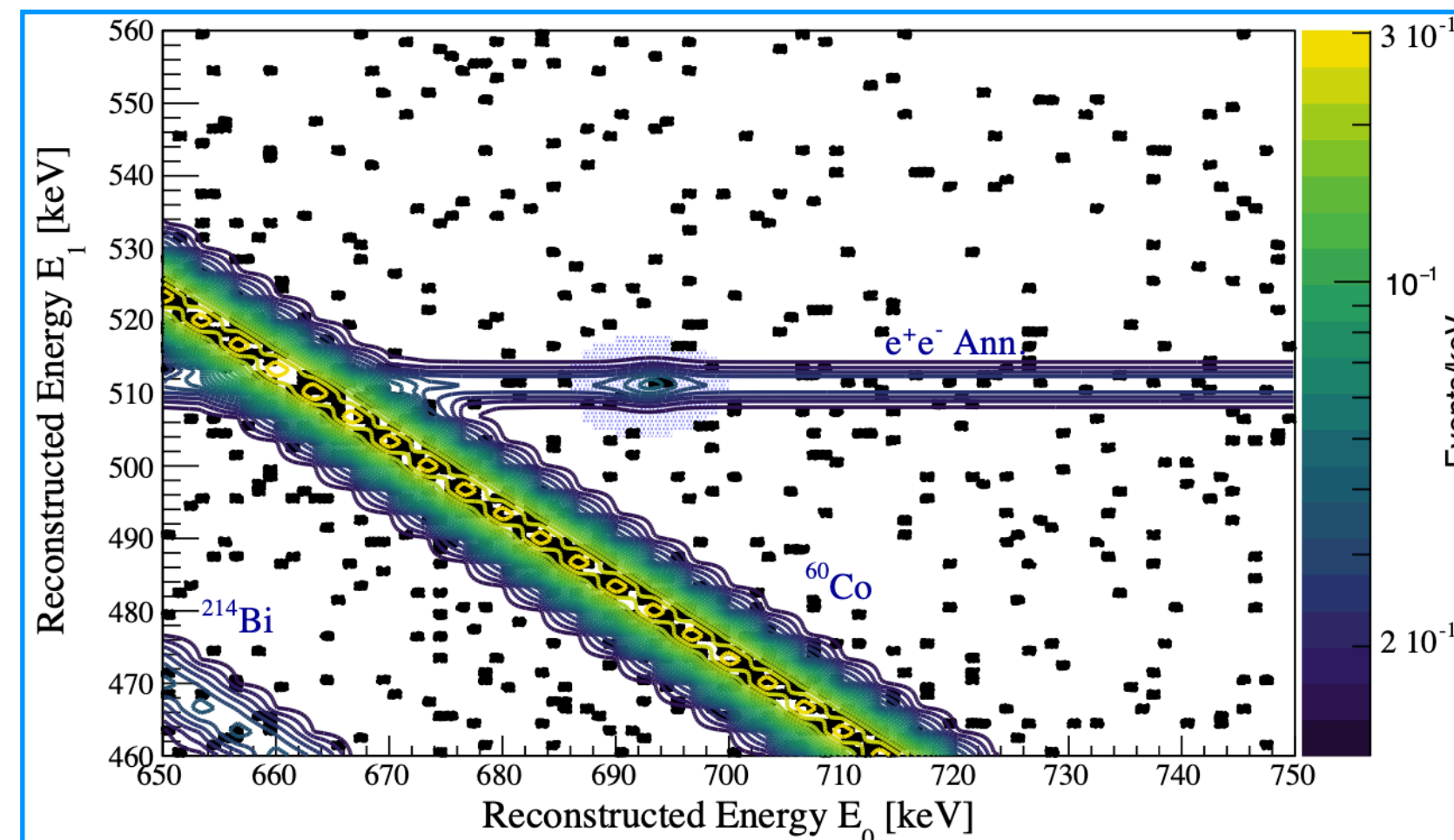
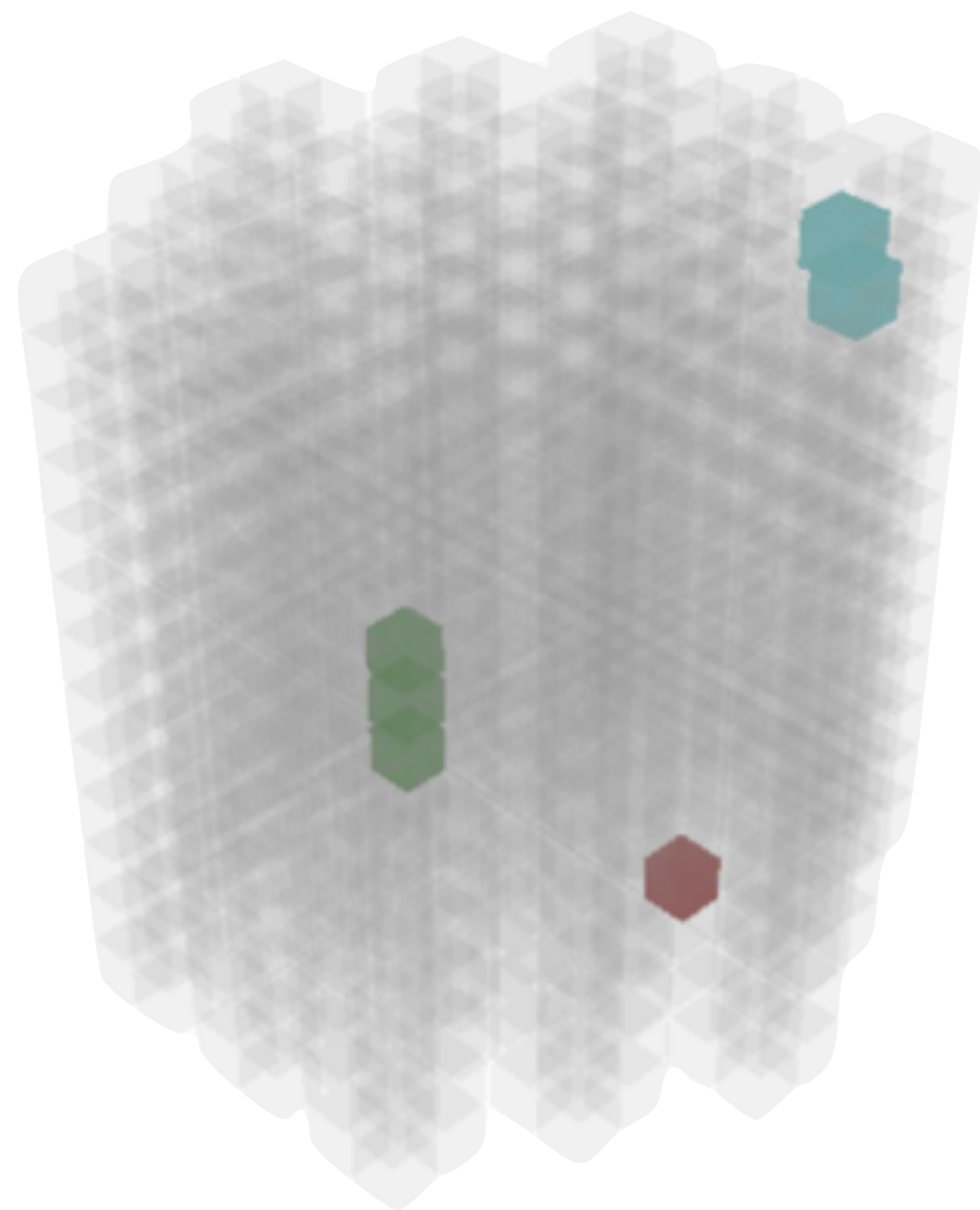


- Prova della efficacia della granularità del rivelatore CUORE per analisi di coincidenza
- Analisi Bayesiana “ibrida”: modello unbinned per (a) e (b), spettri binnati per le segnature (c)-(e)
- Miglioramento di ~ 10 rispetto a CUORE-0 e Cuoricino


Segnatura molto chiara grazie al positrone nello stato finale: γ da 511 keV back-to-back
 Cinque canali di decadimento in CUORE: due a singoli cristalli, tre con eventi su 2/3 cristalli

Altre analisi recenti con i dati di CUORE

Cattura elettronica con emissione di un positrone ($0\nu EC\beta^+$) del ^{120}Te



$$T_{0\nu EC\beta^+}^{1/2} > 2.9 \cdot 10^{22} \text{ yr} \\ \text{(90 \% C.I.)}$$

 [arxiv:2203.08684](https://arxiv.org/abs/2203.08684)
(Mandato a PRC)

Conclusioni e prospettive

- CUORE ha dimostrato che la tecnica bolometrica è scalabile a masse dell'ordine della tonnellata, aprendo la strada alla ricerca di eventi rari con calorimetri criogenici
- Un vantaggio notevole della tecnica bolometrica è che è applicabile a isotopi diversi
 - Feedback importante per CUPID:
 - mantenimento e funzionamento del sistema criogenico,
 - modello accurato delle sorgenti di fondo
- Piano a lungo termine: la presa dati continuerà fino al raggiungimento di 3 tonne yr di esposizione e quindi presumibilmente fino alla fine del 2024

Il futuro di CUORE


CUPID: Cuore Upgrade with Particle IDentification

- Obiettivo scientifico principale: la ricerca del $0\nu\beta\beta$ del ^{100}Mo
 $Q_{\beta\beta} \sim 3034$ keV, fondo β/γ ridotto ancora, spazio delle fasi migliore
- Stessa scala di massa di CUORE (presa dati stabile da 3 anni):
1500 cristalli scintillanti di Li_2MoO_4 arricchiti $>95\%$ di ^{100}Mo (~ 250 kg)

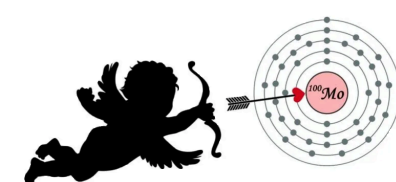
- Tecnica bolometrica con cristalli scintillanti rende possibile l'identificazione delle particelle dimostrata dagli esperimenti


CUPID-0 (^{82}Se)



 [Phys. Rev. Lett. 123, 032501 \(2019\)](#)

CUPID-Mo (^{100}Mo)



 [Phys. Rev. Lett. 126, 181802 \(2021\)](#)

- Sarà posizionato nel criostato di CUORE (alcuni upgrade previsti)
- Aggiunta di un veto esterno per μ

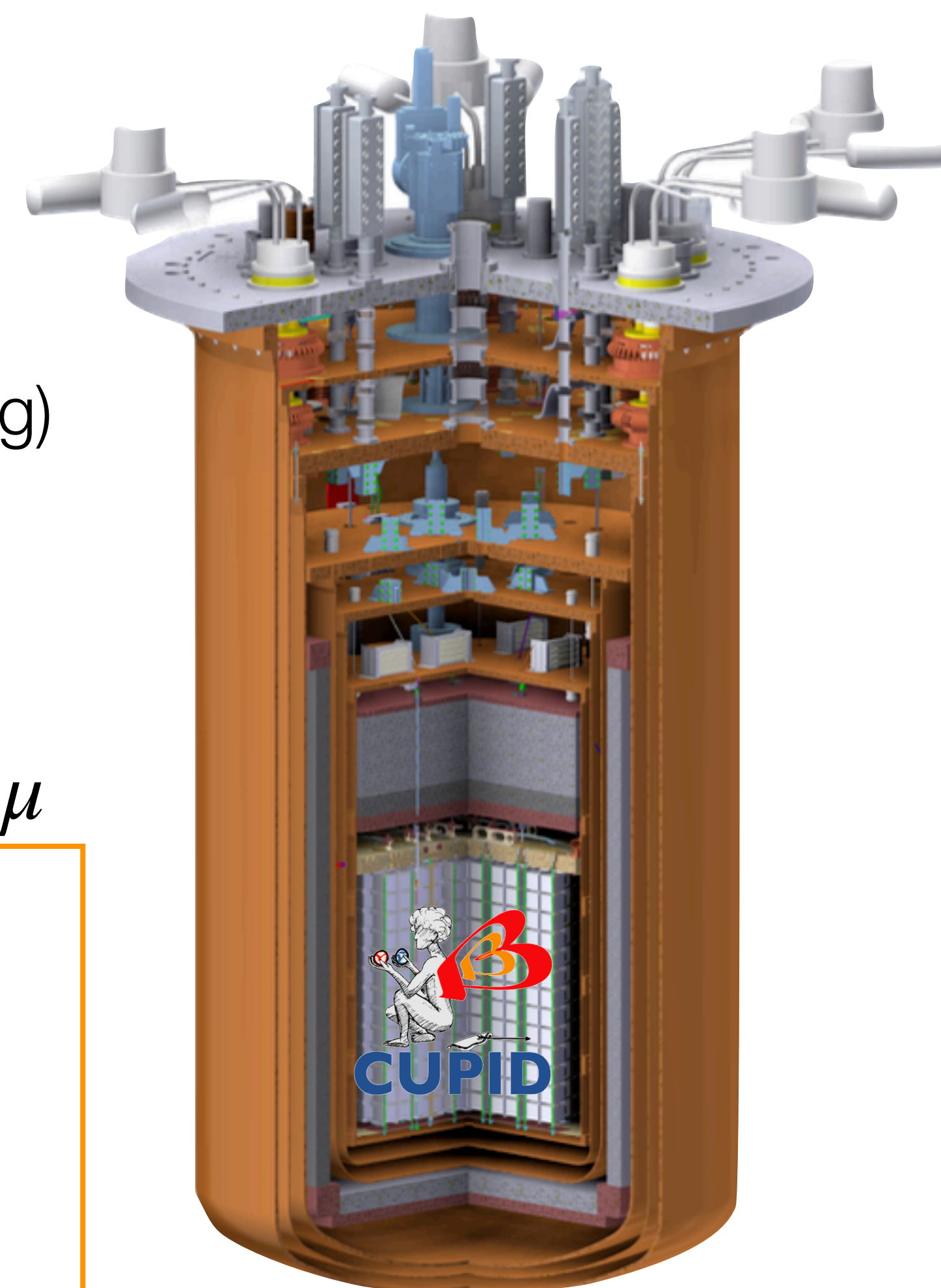
Target

Fondo 10^{-4} conteggi/keV/kg/yr

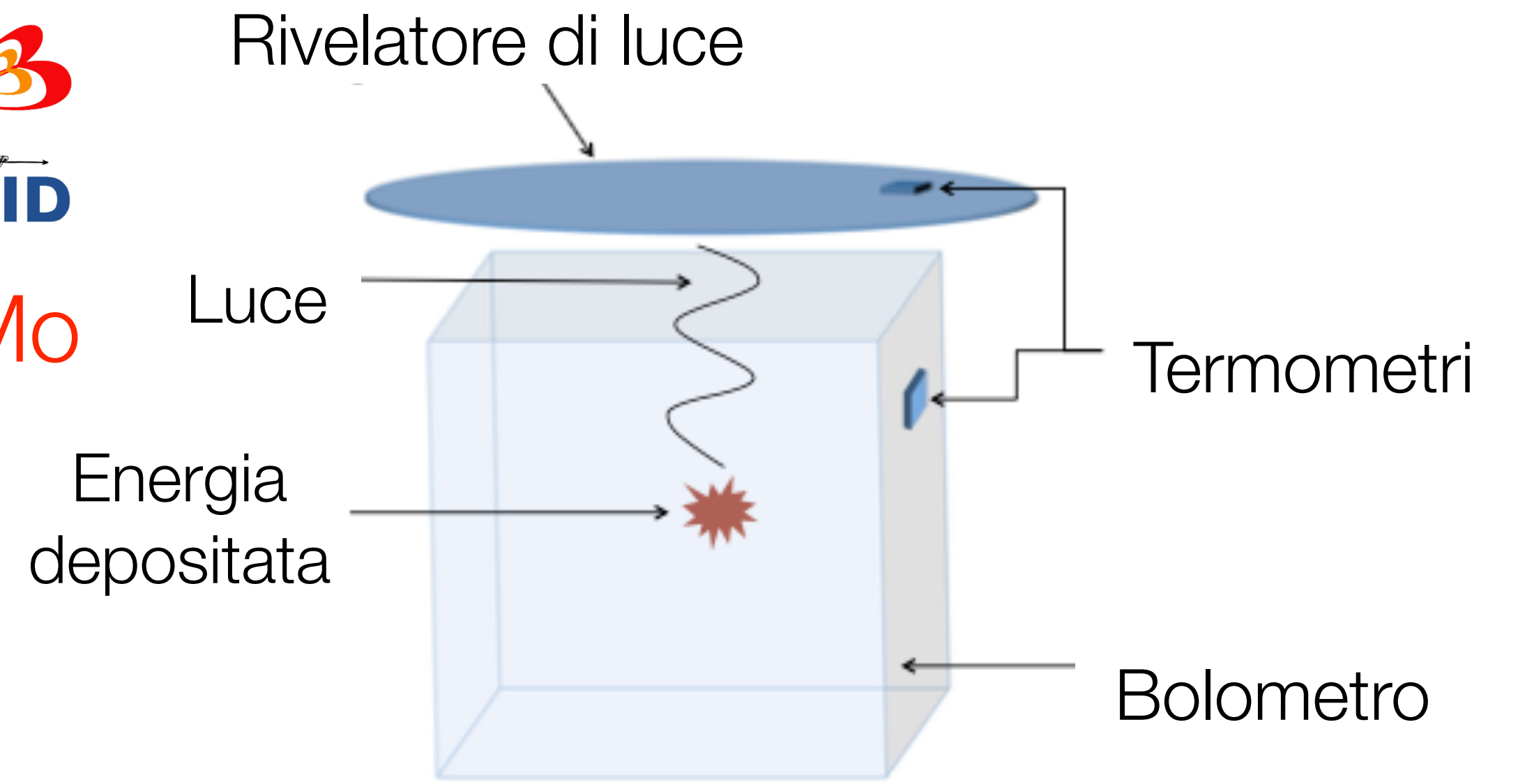
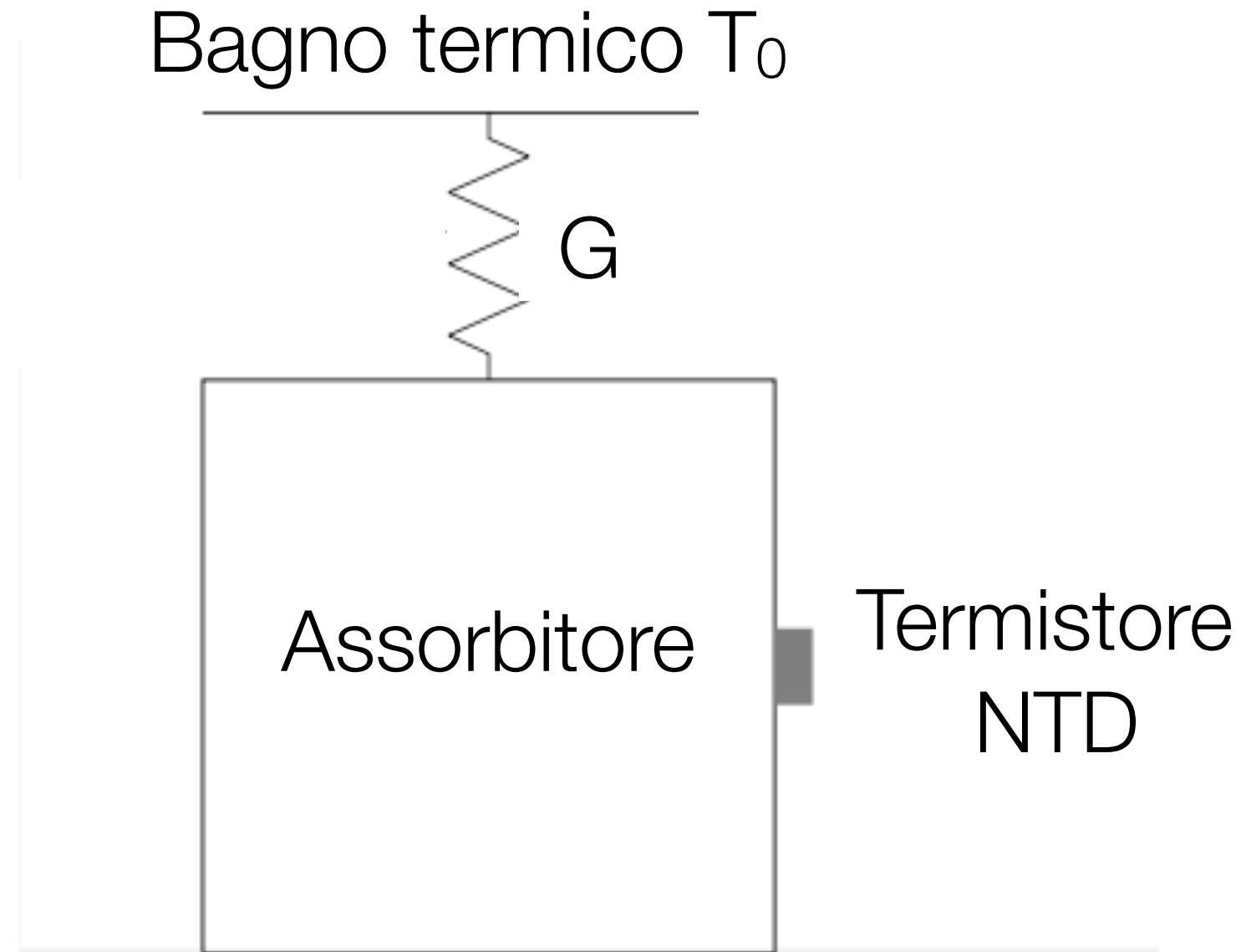
Risoluzione (FWHM) 5 keV

Sensitivity 10^{27} yr (in 10 anni)

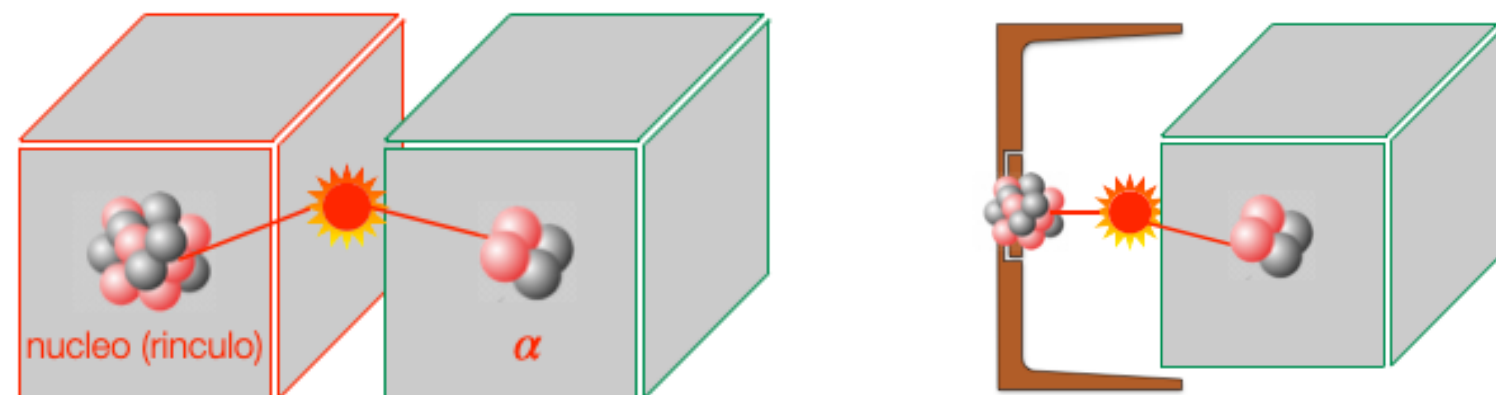
Gerarchia diretta $m_{\beta\beta} \sim 12-20$ meV



Da CUORE a CUPID: bolometri scintillanti

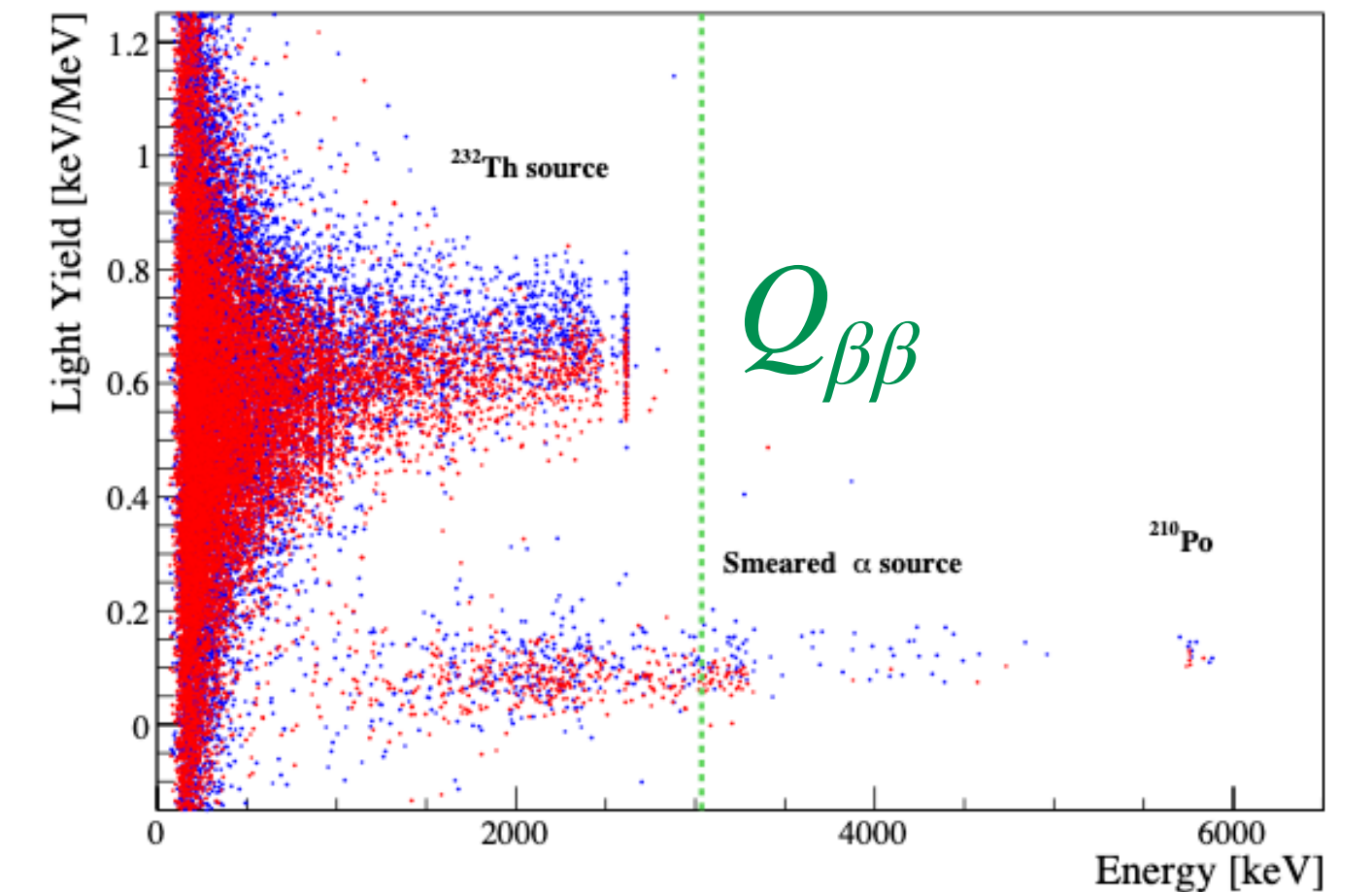


- Rivelatore termico puro: non distingue le particelle interagenti
- Fondo principale: α da decadimenti superficiali sui cristalli o strutture vicine



- La misura simultanea del segnale di calore e di luce (2° bolometro) permette di distinguere β e γ dalle α

PID (α) + ^{100}Mo (β, γ)
fondo ridotto di $\sim 1/150$

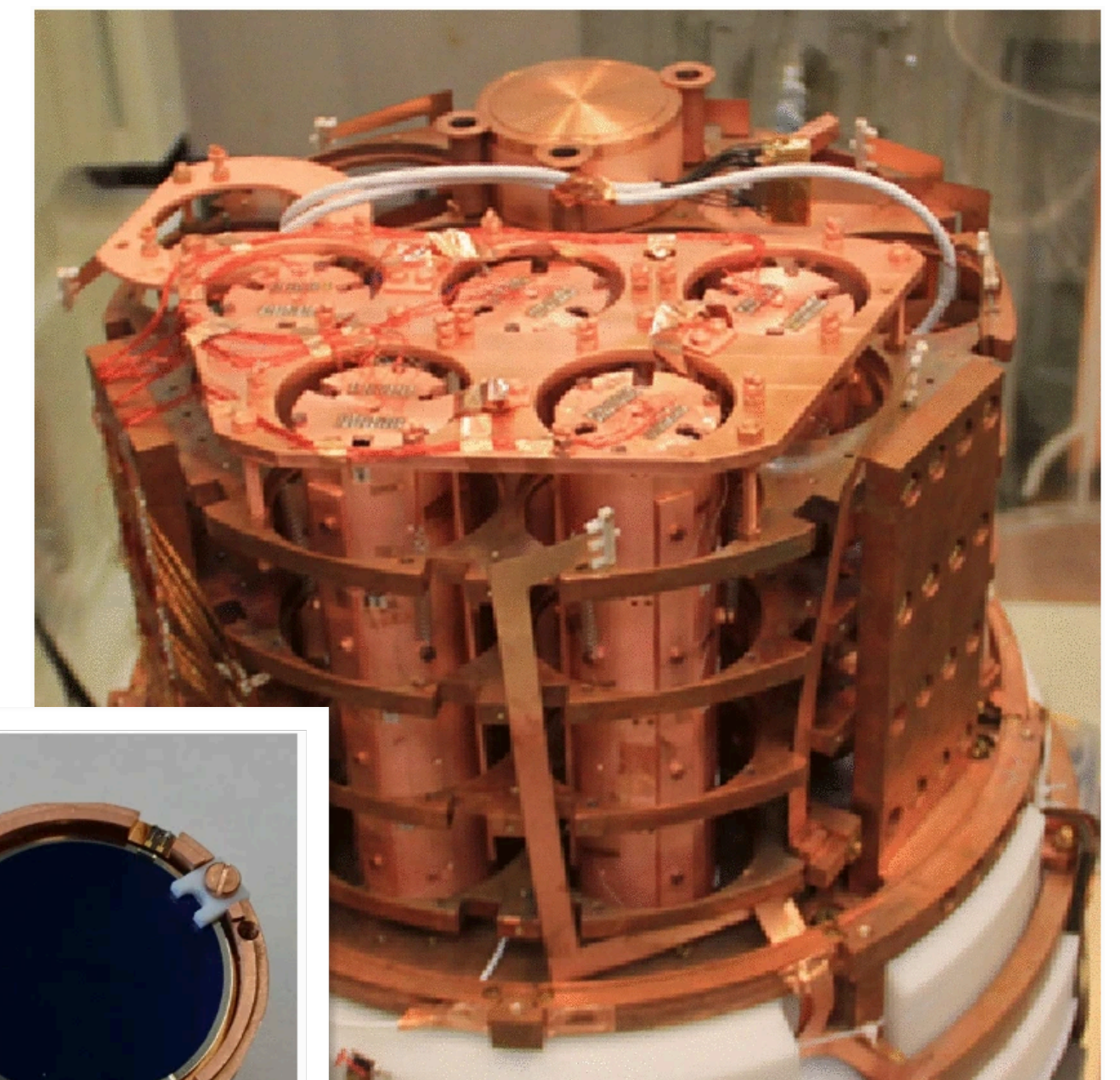


Esperimenti pilota: CUPIDO e CUPID-Mo

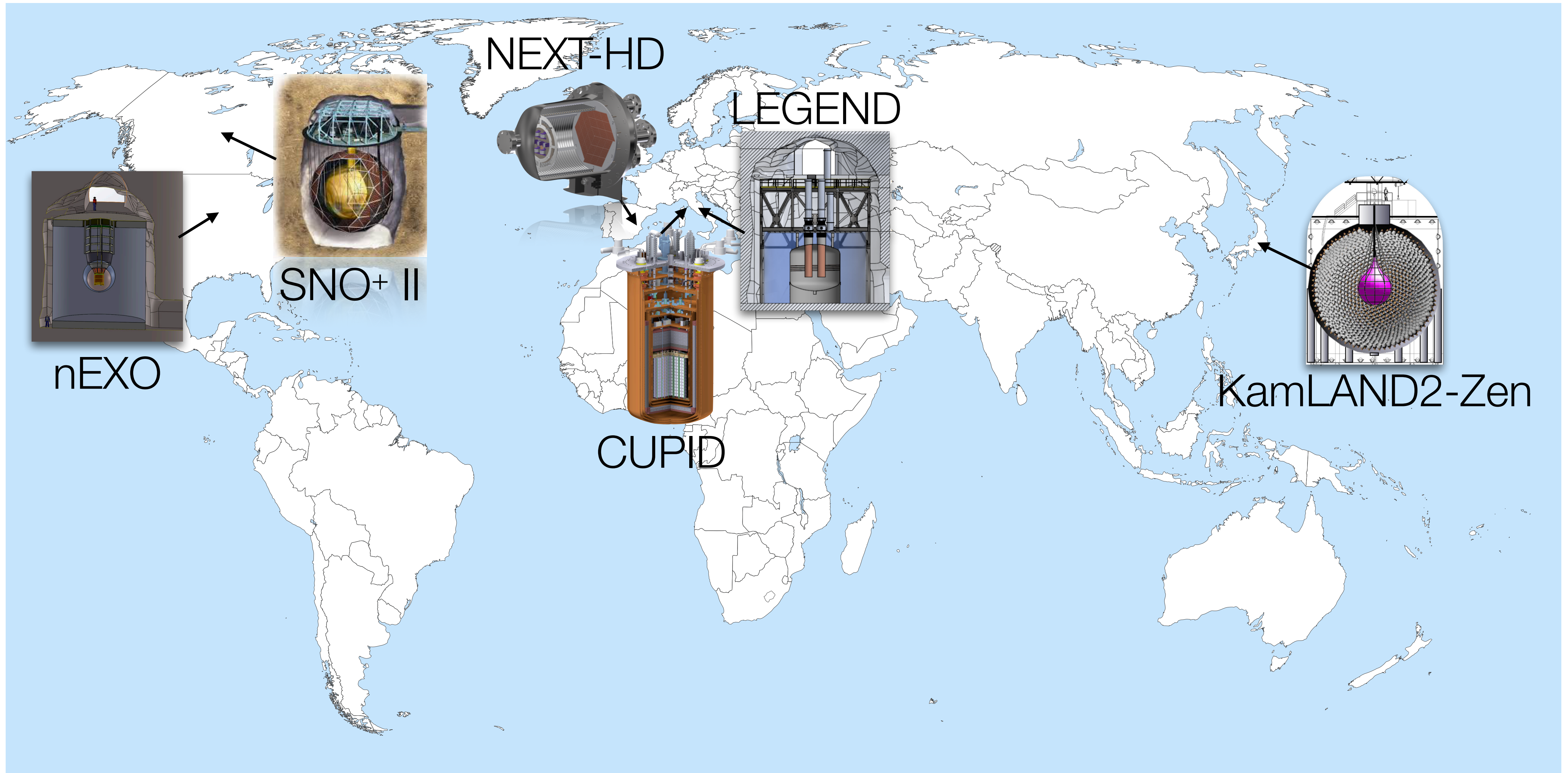
- Bolometri scintillanti di $\text{Zn}^{\text{enr}}\text{Se}$: $m(^{82}\text{Se}) \sim 5\text{kg}$
- Ai LNGS nel criostato di CUORE-0



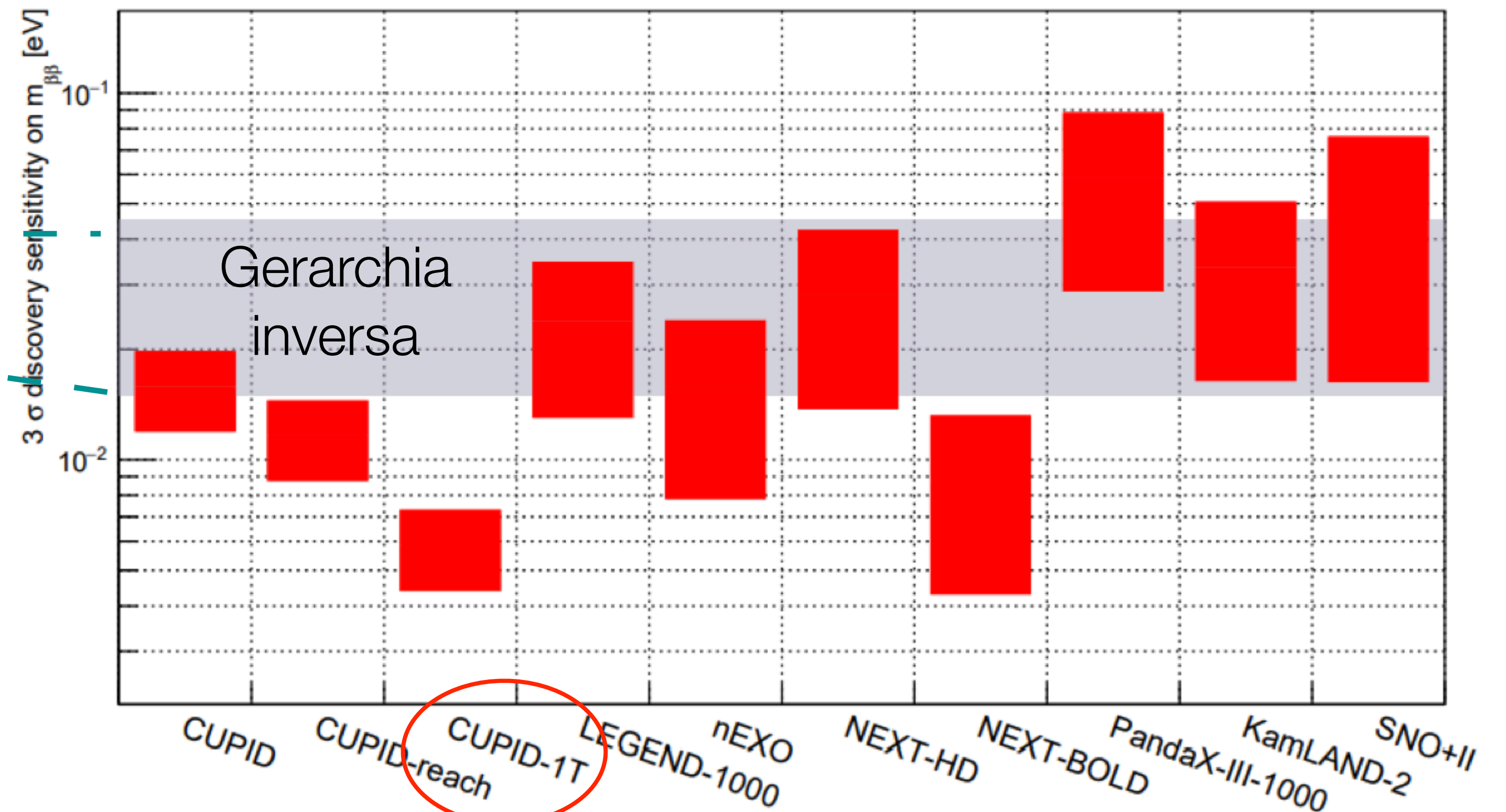
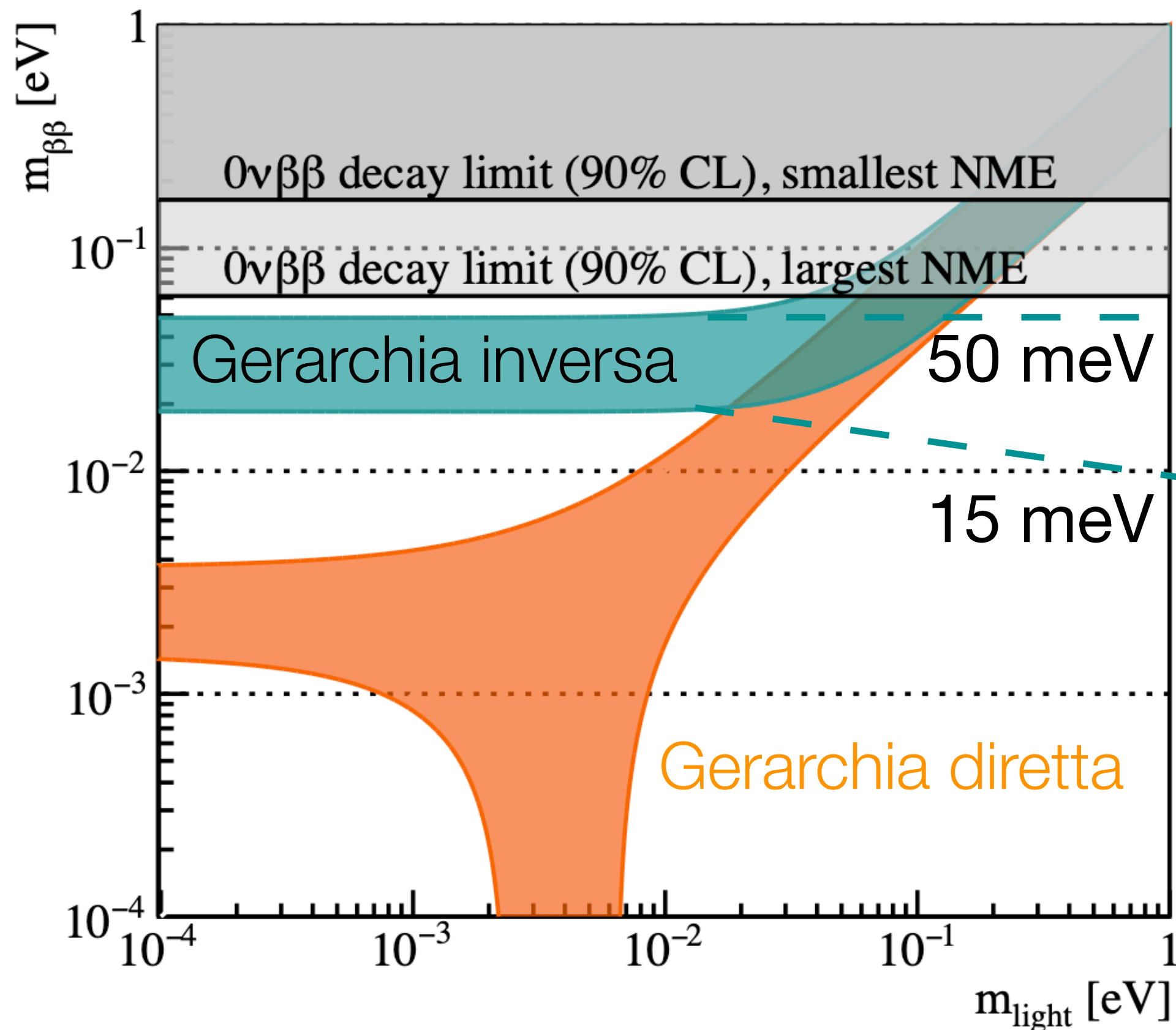
- Matrice di 20 cristalli di Li_2MoO_4 arricchiti al 97% di ^{100}Mo : 2.26 di ^{100}Mo
- Ai Laboratori sotterranei di Modane



Prospettive future



Prospettive future



Gli esperimenti della prossima generazione hanno l'obiettivo di esplorare la zona della gerarchia diretta

Carlo Bucci Alice Campani Laura Marini Antonio D'Addabbo carl rosenfeld Stefano Zucchelli
 Yury Kolomensky lucataffa Yale CBroff Paolo Gorla Oliviero Cremonesi
 Lindley Winslow (She/Her) Giovanni Valentina Giorgio Keppel Pranava Teja Surukuchi monicasisti
 Simone Quitadamo Irene Nutini Frank Avignone Kenny Vetter Jon SILVIA
 Daniel William Mayer Andrea Giachero Penny Slocum Ridge Liu Matteo Blassoni Brian Fujikawa | LBNL (he/him)
 Rebecca Kowalski Jorge Torres (he/him) Alberto Gianvecchio Reina Maruyama (she/her) Emanuela Cell Bradford Welliver
 Simone Copello Stefano Ghislandi Vivek Singh Pedro Guillaume Chiara Capelli Erin V Hansen (she/her)
 James Wilhelmi James Wilhelmi Chris Alduino Eric Norman Thomas O'Donnell Claudia Francesca Del Corso
 Shihong Fu Davide Chiesa Huan Zhong Huang James Nikkel Alberto Ressa Douglas Adams Maura Pavan - Univ. Milano Bic...

CUORE
 Virtual CUORE
 collaboration meeting
 8-10 November 2021

Grazie a tutti per l'attenzione!