

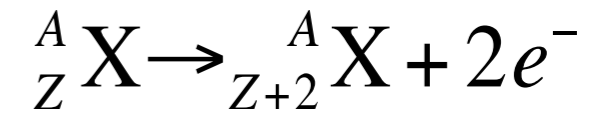
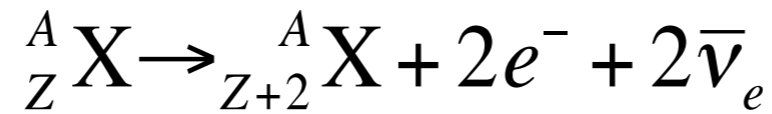
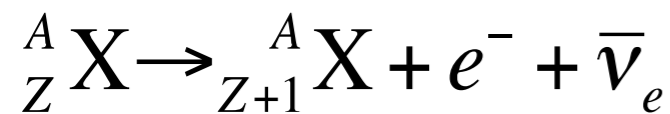
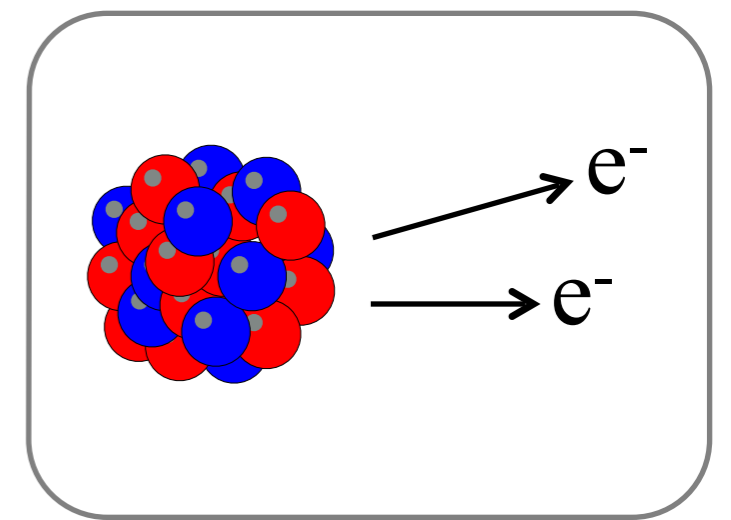
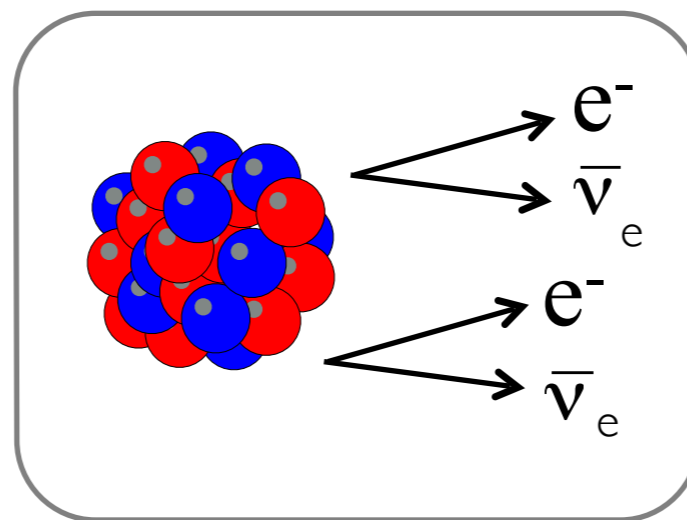
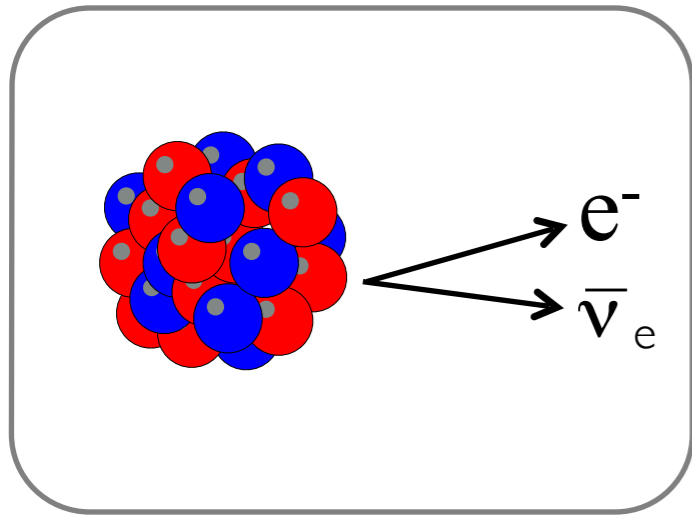


Ricerca del decadimento doppio beta senza neutrini: stato e prospettive

Claudia Tomei - INFN Sezione di Roma

101° Congresso Nazionale SIF, Roma 21-25 settembre 2015

Decadimento beta singolo e beta doppio



decadimento β

Decadimento nucleare ben conosciuto.

$2\nu\beta\beta$

Decadimento permesso dal Modello Standard (ma molto raro) e già osservato ($T_{1/2} > 10^{19}$ yr).

Solo per nuclei in cui il decadimento beta singolo è proibito.

$0\nu\beta\beta$

Ancora più raro del decadimento $2\nu\beta\beta$ (se esiste).

Mai osservato finora (a parte un controverso claim non verificato). 2

Decadimento doppio beta senza neutrini ($0\nu\beta\beta$)

Osservare il decadimento $0\nu\beta\beta$:

Dimostrerebbe che il numero leptonico non è conservato

Proverebbe la natura di Majorana del neutrino

Porrebbe limiti sulla massa effettiva di Majorana $m_{\beta\beta}$ e fornirebbe informazioni sulla scala di massa assoluta dei neutrini.

L'osservabile del decadimento è la vita media:

$$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} = G^{0\nu} |M_{\eta}^{0\nu}|^2 \eta^2$$

Termine che viola il numero leptonico ed è legato al meccanismo del decadimento

Fattore cinematica dello spazio delle fasi: contiene le informazioni sulla cinematica delle particelle nello stato finale.

Elemento di matrice nucleare del decadimento $0\nu\beta\beta$ tra lo stato iniziale e finale

Scambio di un neutrino di Majorana

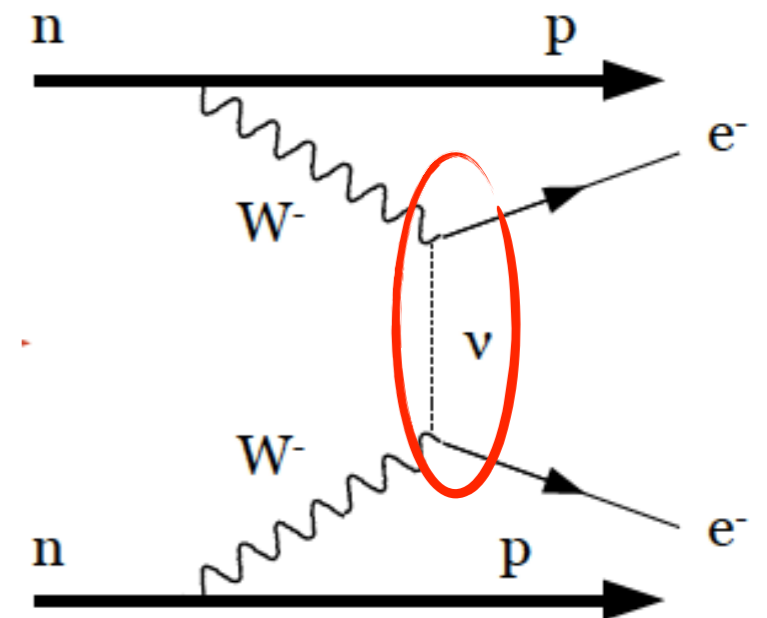
È il meccanismo più semplice in cui i neutrini massivi che sono responsabili delle oscillazioni mediano il decadimento doppio-beta.

Un anti neutrino right-handed viene emesso in un vertice e un neutrino left-handed viene assorbito nell'altro.

$$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} = G^{0\nu} |M_{\eta}^{0\nu}|^2 m_{\beta\beta}^2$$

$$m_{\beta\beta} = \left| \sum_i m_{\nu_i} U_{ei}^2 \right| \longrightarrow \text{elementi della matrice di mixing}$$

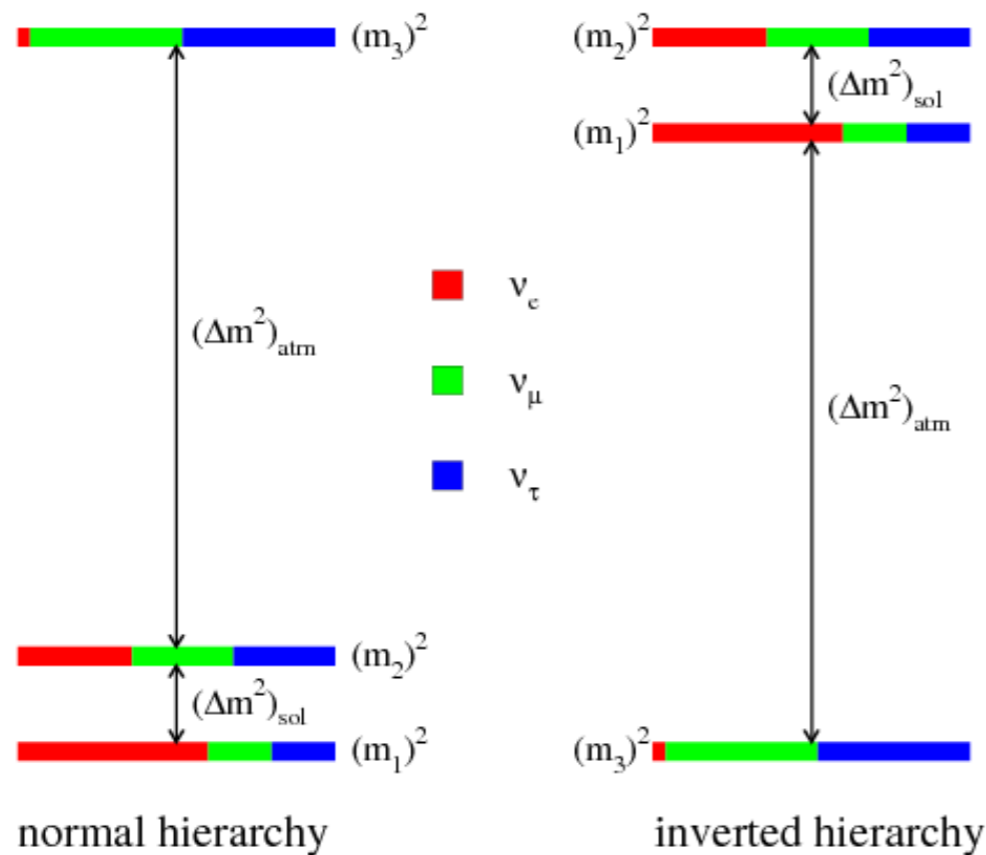
autostati di massa dei neutrini



Misura (limite) di half-life \Rightarrow misura (limite) di $m_{\beta\beta}$

Poiché gli elementi U contengono le fasi di Majorana, sono possibili cancellazioni nella somma: la massa effettiva di Majorana potrebbe essere più piccola del singolo autostato di massa.

Scala di massa e gerarchia di massa dei neutrini



Gli esperimenti sulle oscillazioni sono sensibili alla differenza tra gli autostati di massa al quadrato.

L'ordine delle masse è ancora sconosciuto, così come la massa del neutrino più leggero:

Gerarchia Normale: $m_3 > m_2 > m_1$

Gerarchia Inversa: $m_2 > m_1 > m_3$

$$U = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \text{diag}(1, e^{i\alpha}, e^{i(\beta+\delta)})$$

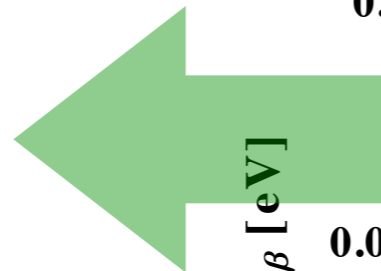
$$m_{\beta\beta} = f(\theta_{12}, \theta_{13}, \alpha, \beta, m_1, m_2, m_3)$$

Non conosciamo le fasi di Majorana e la massa del neutrino più leggero

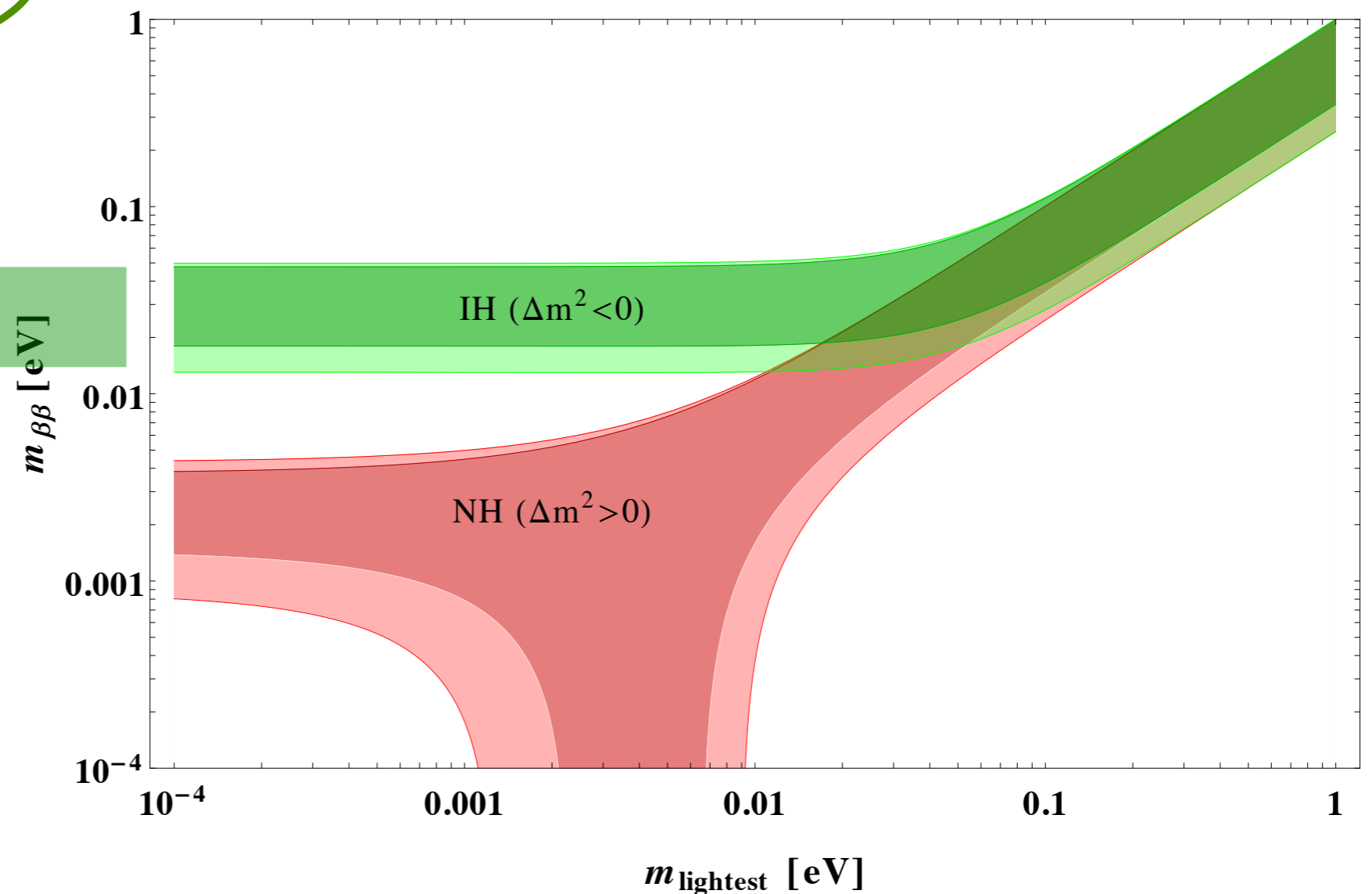
Massa effettiva di Majorana

$$m_{\beta\beta} = \left| \sum_i m_{\nu_i} U_{ei}^2 \right|$$

Testare questa regione è il goal sperimentale



Scenario standard che può venire modificato radicalmente se variano le assunzioni teoriche (es. light sterile neutrinos).



Stefano Dell'Oro, Simone Marcocci, Francesco Vissani, Phys. Rev. D 90, 033005 (2014)

Meccanismi Esotici

In questo caso il decadimento doppio beta senza neutrini è mediato da altri meccanismi che violano il numero leptonic e i neutrini di Majorana non contribuiscono o contribuiscono in maniera trascurabile.

- Beyond the Standard Model (BSM):
 - heavy neutrinos
 - non standard Higgs
 - Left-right symmetric theories
 - SUSY
 - Majorons

La ricerca del decadimento $0\nu\beta\beta$ può fornire limiti competitivi con le altre ricerche in corso.

NME - Elemento di Matrice Nucleare

Il calcolo degli elementi di matrice nucleare, soprattutto per nuclei pesanti, è molto complesso.

Diversi metodi usati in letteratura:

- Nuclear Shell Model (NSM)
- Quasi-Random Phase Approximation (QRPA)
- Interacting Boson Model (IBM)
- Projected Hartree-Fock-Bogoliubov (PHFB)
- Generating coordinate method extensions of PHFB (GCM o EDF)

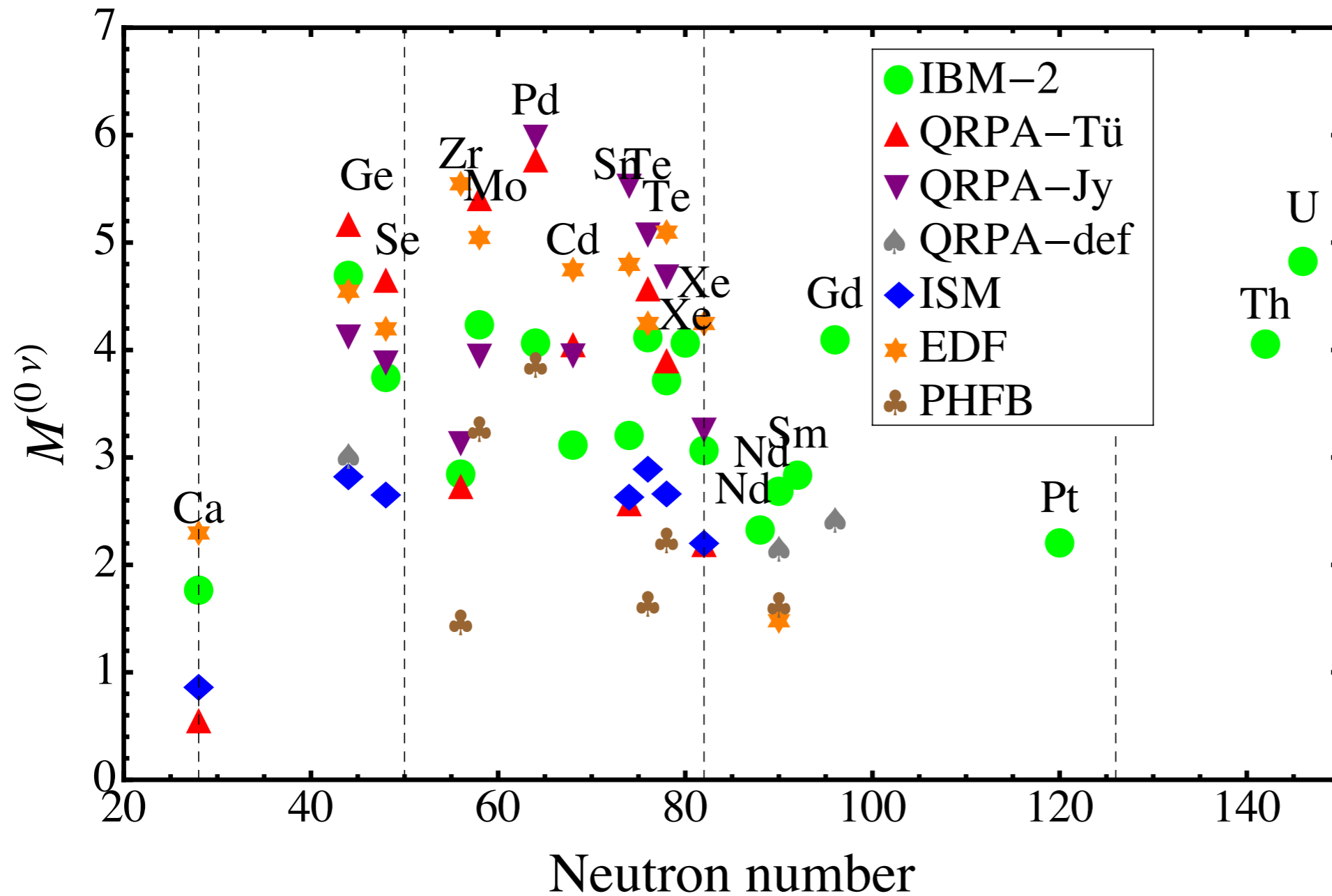
$$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} = G^{0\nu} |M_{\eta}^{0\nu}|^2 m_{\beta\beta}^2$$

Ciascun metodo fornisce un range di valori, dovuto all'incertezza su vari parametri (correlazioni, g_A , etc...).

L'approccio generale è di utilizzare lo spread nei valori calcolati del NME come una stima dell'incertezza teorica.

Misura (limite) di half-life \Rightarrow range di valori (limiti) per $m_{\beta\beta}$

NME - Elemento di Matrice Nucleare



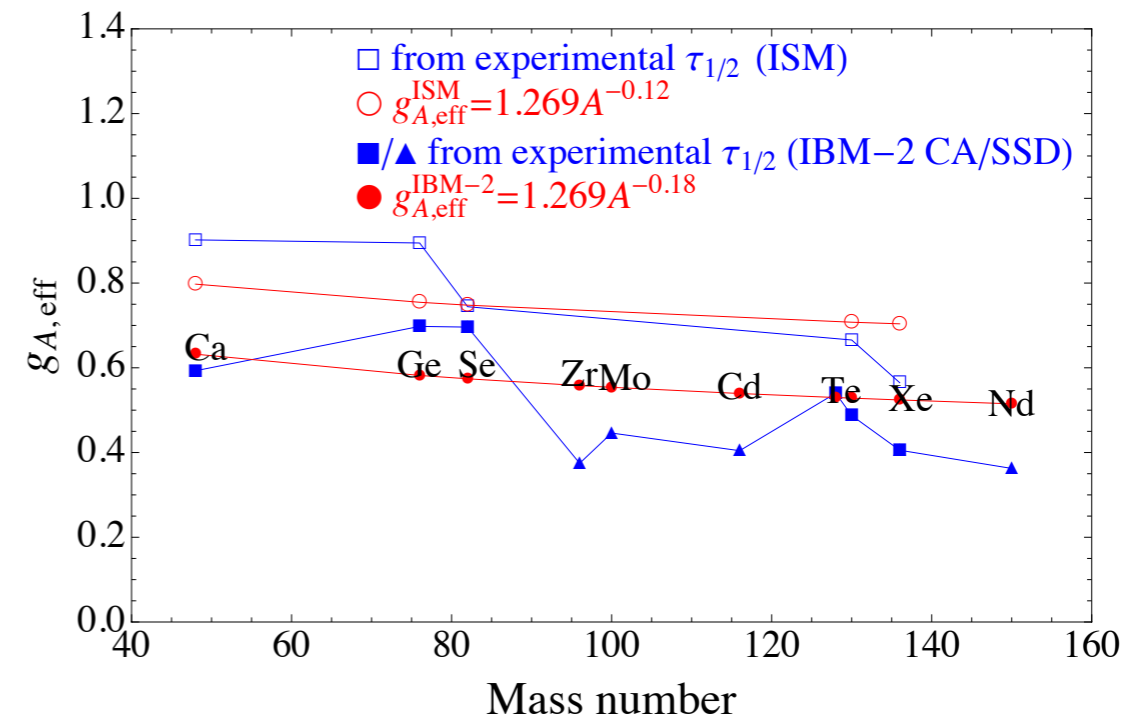
Quenching di g_A

Sia il fattore di spazio delle fasi G che l'elemento di matrice nucleare M dipendono dal valore di g_A (costante di accoppiamento assiale).

- g_A (nucleone libero) = 1.269 ma si ritiene che nel nucleo g_A subisca un quenching
- I limiti su $m_{\beta\beta}$ vengono dati calcolando NME nell'approssimazione di standard quenching $g_{A,eff} \sim 1$
- Un quenching diverso, quindi $g_{A,eff} < 1$ rende il limite su $m_{\beta\beta}$ meno stringente
- NME contiene g_A al quadrato quindi $(T_{1/2})^{-1}$ è proporzionale a g_A alla quarta potenza. L'entità del quenching è molto importante.

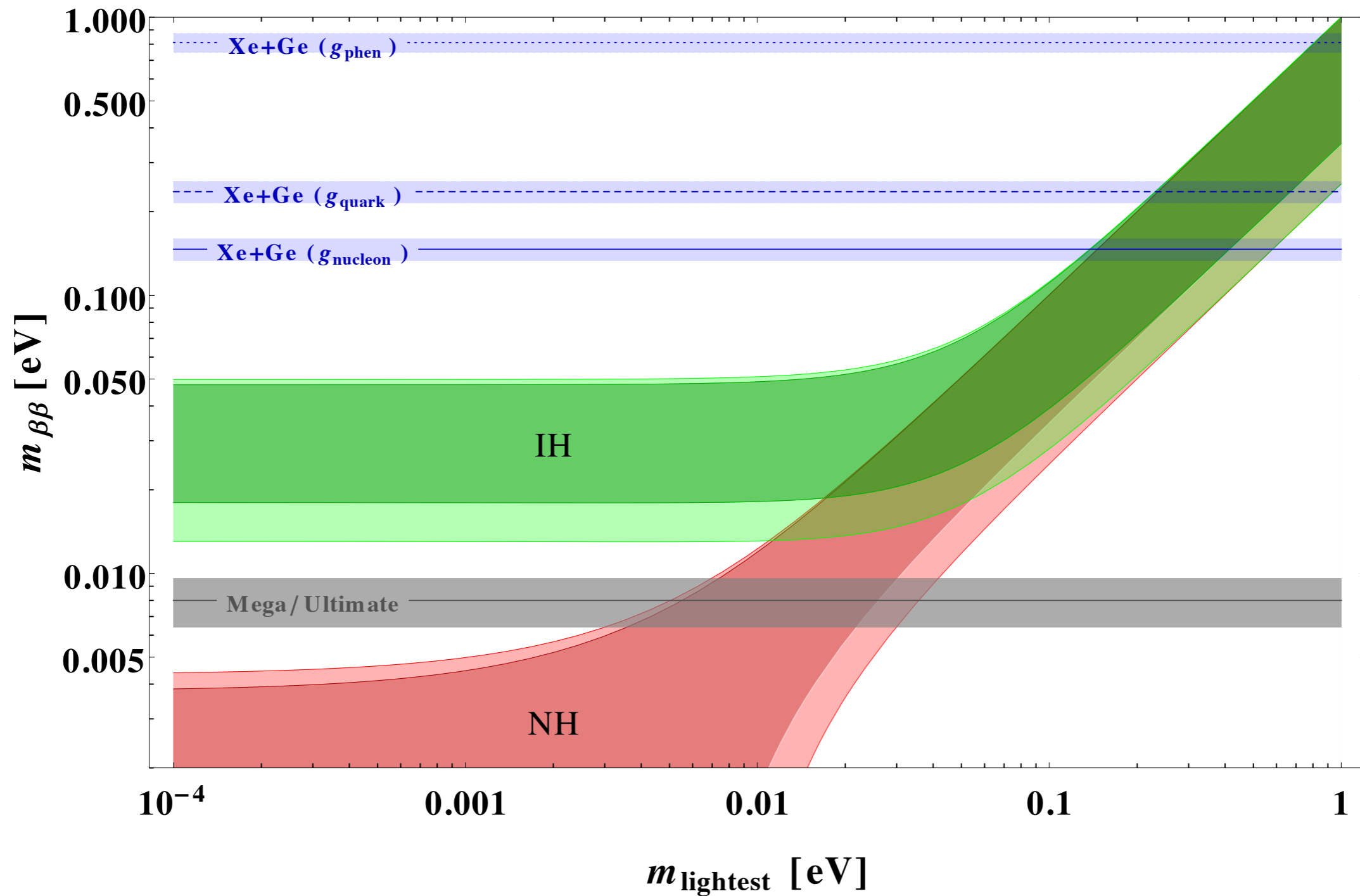
$$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} = G^{0\nu} |M_{\eta}^{0\nu}|^2 m_{\beta\beta}^2$$

$$\frac{g_{A,eff}}{g_A} \quad (\text{quenching})$$

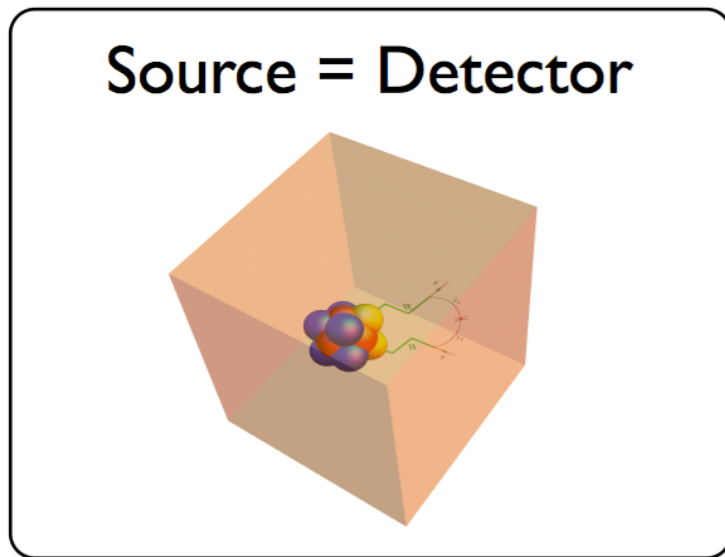


Quenching di g_A

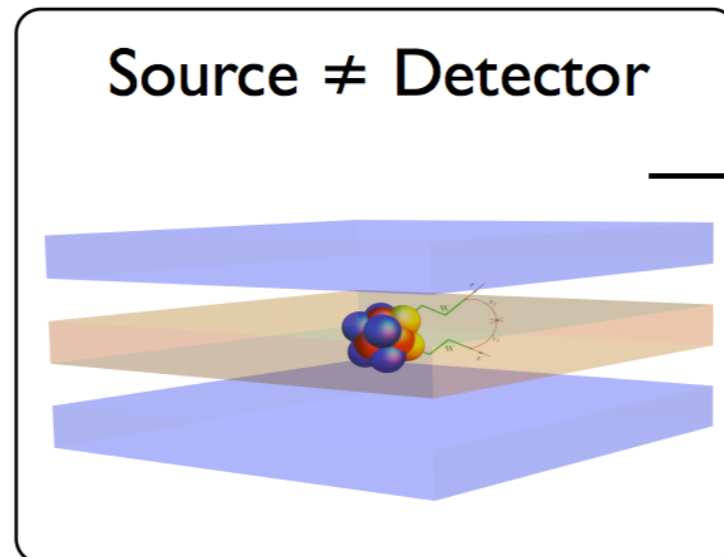
Stefano Dell'Oro, Simone Marcocci, Francesco Vissani, Phys. Rev. D 90, 033005 (2014)



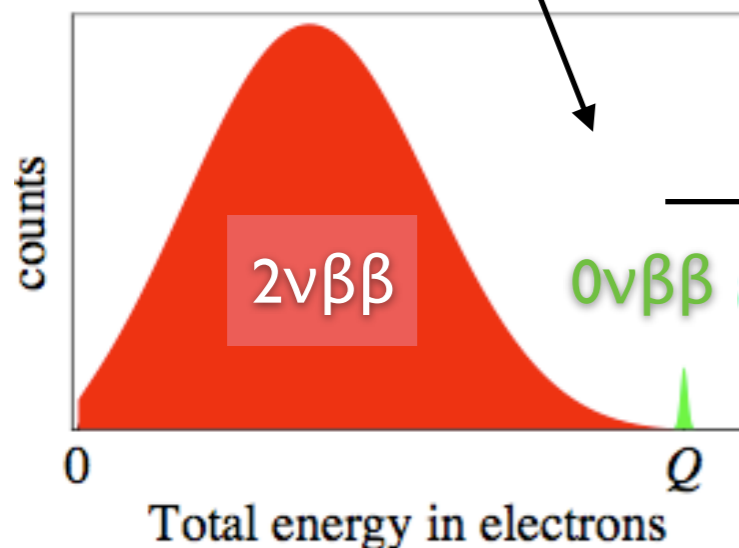
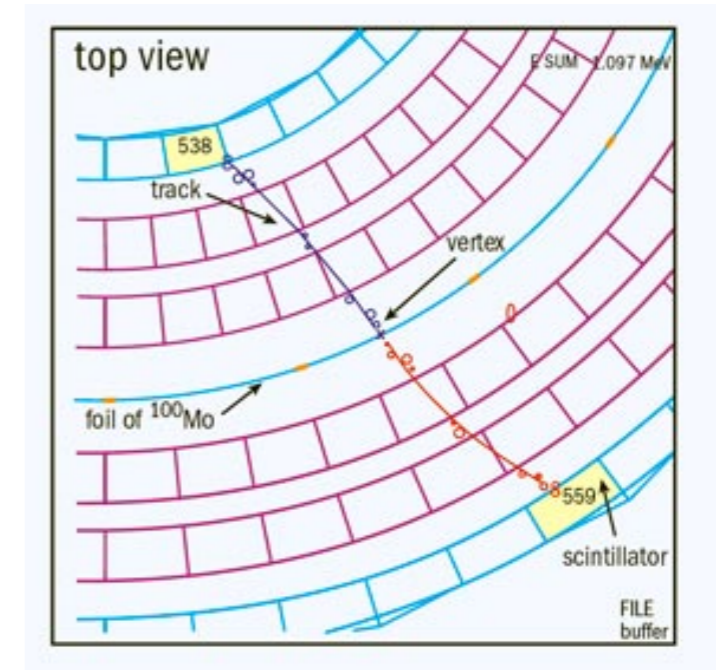
Ricerca sperimentale del decadimento doppio-beta



Il segnale è un picco all'energia del Q-valore ($Q_{\beta\beta}$).



Il segnale è costituito dalle tracce dei due elettroni con $\Sigma E = Q_{\beta\beta}$.



In generale fornisce:

- alta efficienza
- grande massa
- risoluzione energetica (dipende dalla tecnica del rivelatore).

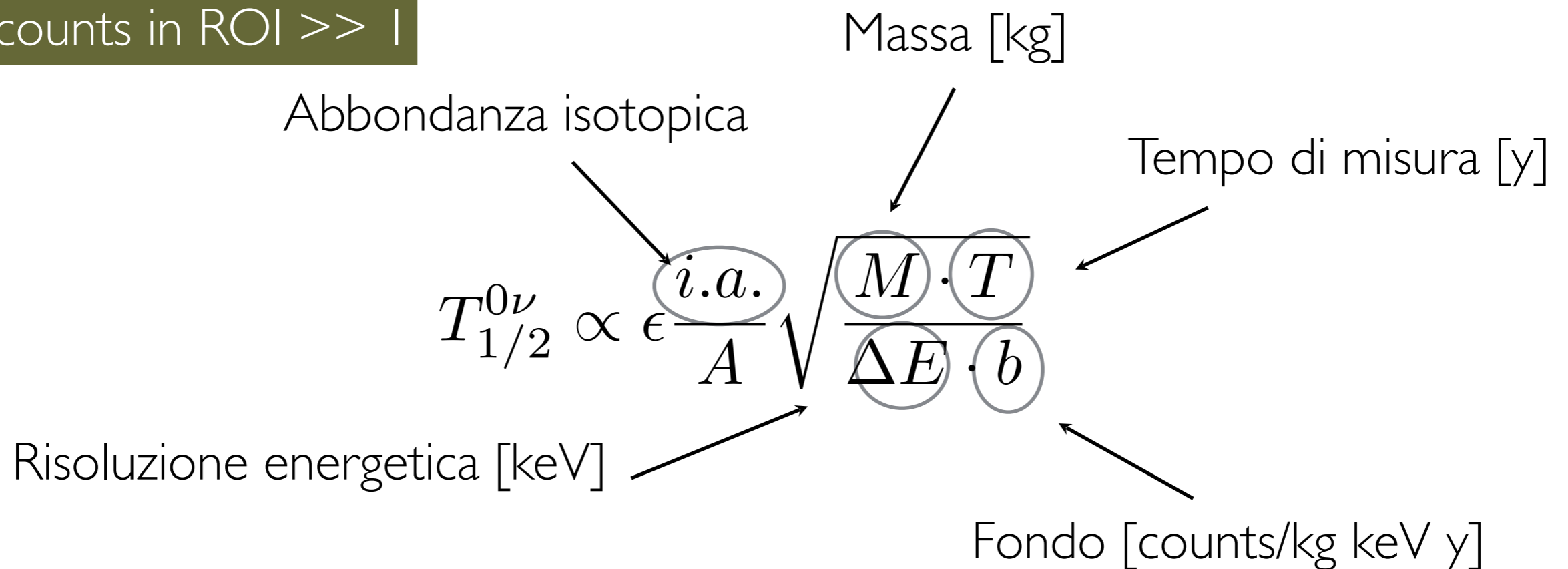
Massa e efficienza limitate ma fornisce informazioni aggiuntive:

- Spettro energetico del singolo elettrone;
- Correlazione angolare tra i due elettroni.

Sensitività sperimentale

Vita media corrispondente al minimo numero di eventi di segnale rivelabili sopra il fondo a un dato C.L.

bkg counts in ROI \gg 1



bkg counts in ROI $<$ 1

Zero-background condition

$$T_{1/2}^{0\nu} \propto \epsilon \frac{i.a.}{A} \cdot M \cdot T$$

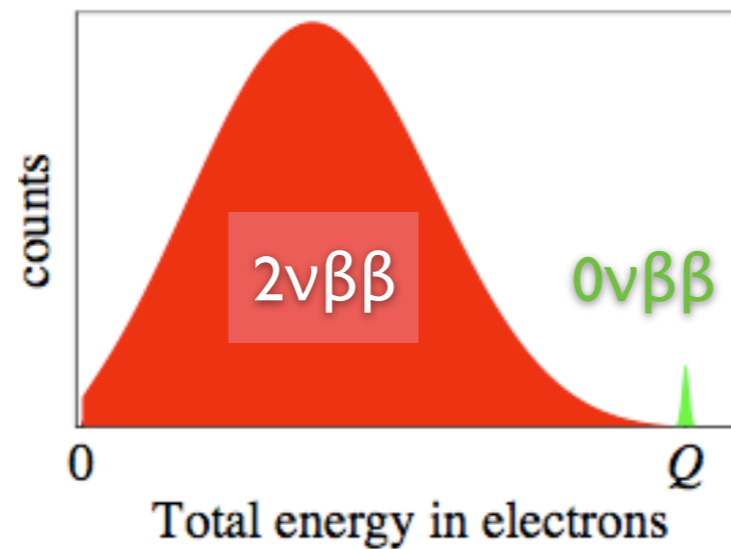
Sensibilità sperimentale

Abbondanza isotopica → arricchimento (90%)

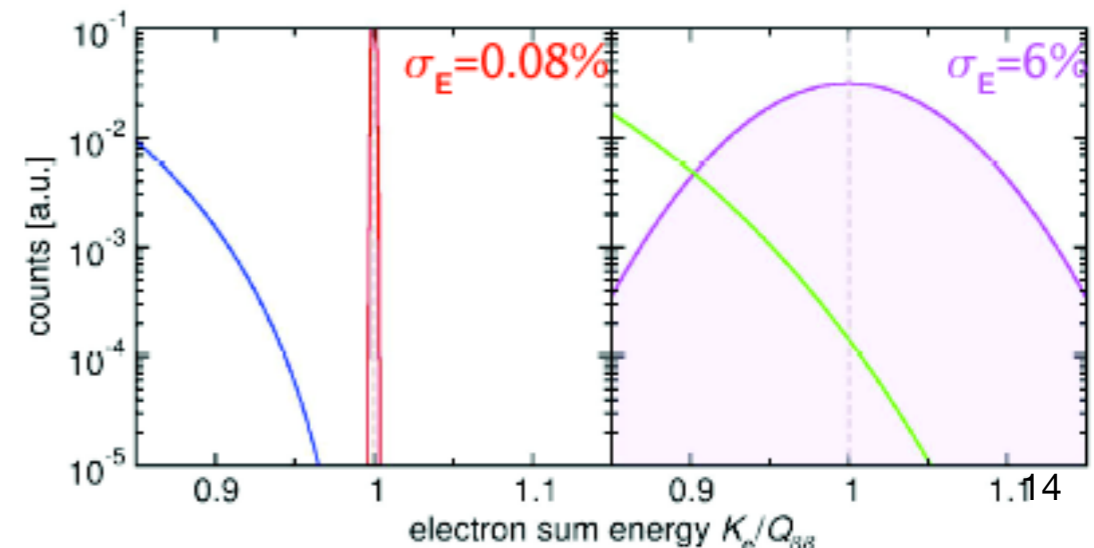
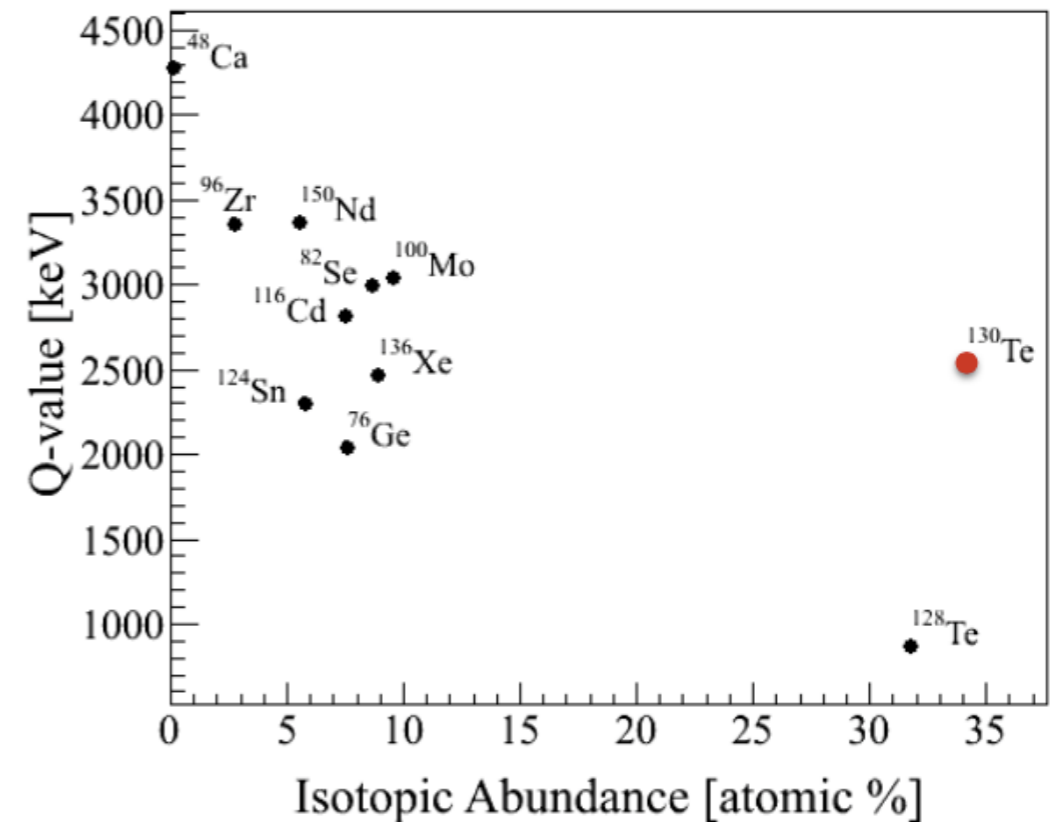
Exposure (M·T) → incremento della massa (ton)

Risoluzione energetica:

- high (% of $Q_{\beta\beta}$)
- low (% of $Q_{\beta\beta}$)



Molto importante per eliminare il fondo (irriducibile) del decadimento $2\nu\beta\beta$ e identificare e separare i diversi contributi al fondo.



Background

È sicuramente il più critico tra i parametri che regolano la sensibilità di un esperimento.

Segnale: $0\nu\beta\beta$
0.1 - 1 counts/y/ton

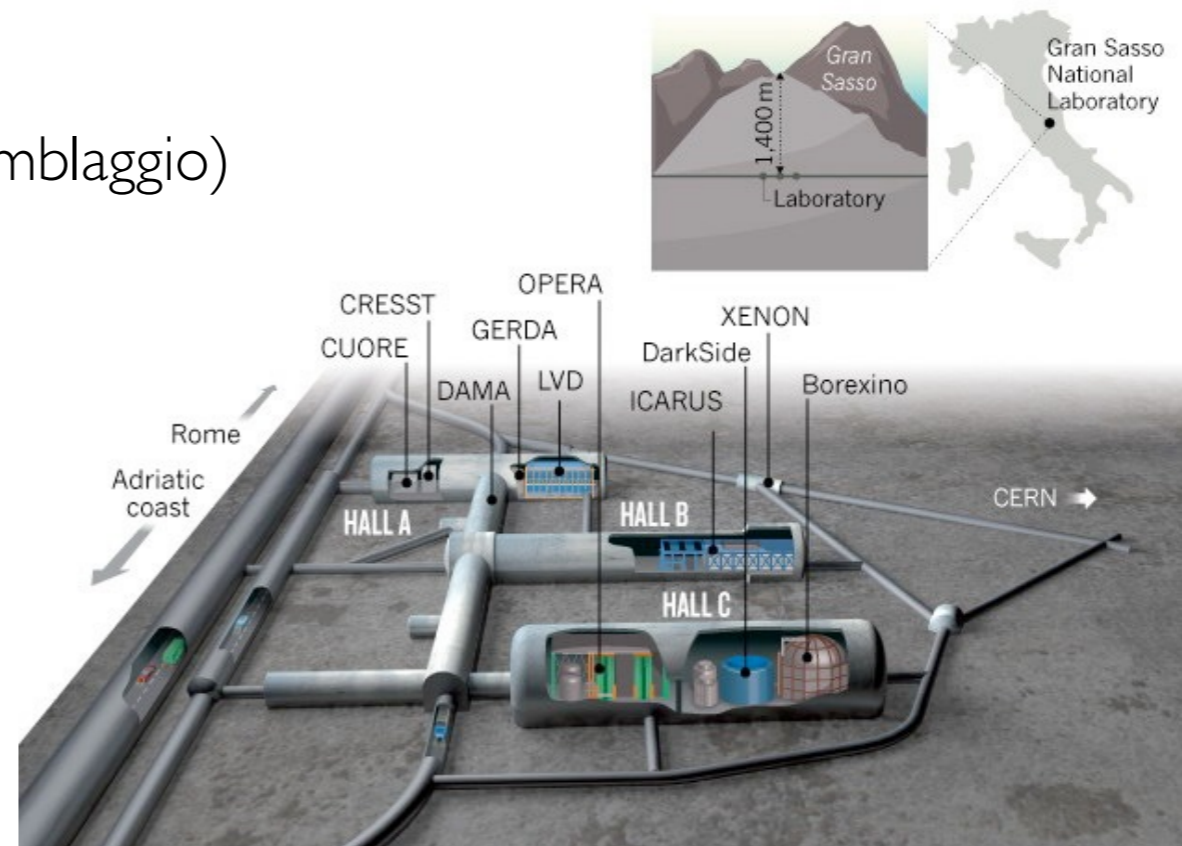
Fondo: radioattività intrinseca dei materiali, attivazione cosmogenica, fondo indotto da μ , $2\nu\beta\beta$
0.01 - 0.1 counts/y/ton

Strategie di riduzione:

- Esperimento underground
- Materiali ultra-puri (produzione, pulizia, assemblaggio)

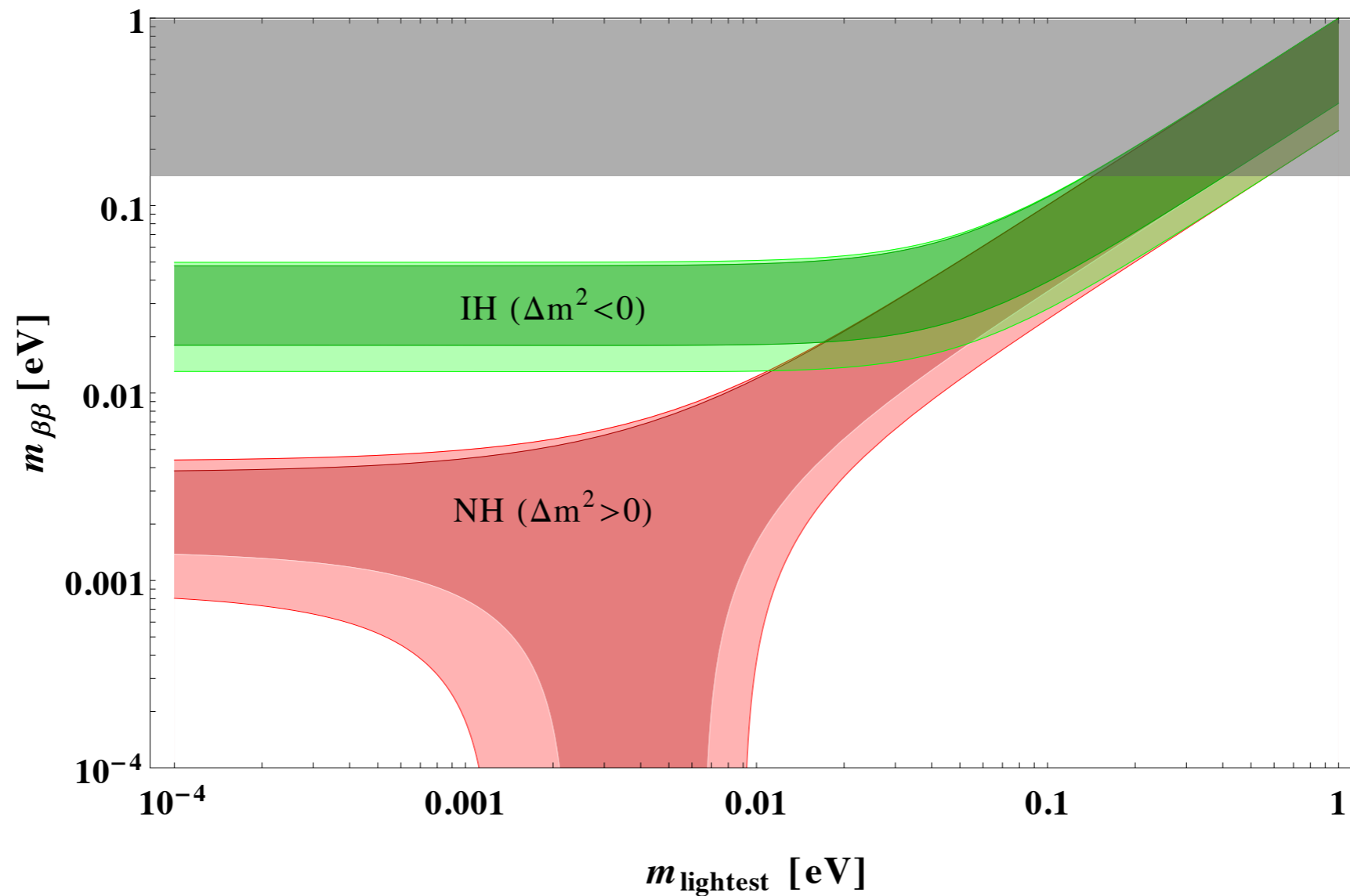
Strategie di discriminazione:

- Risoluzione energetica
- Veto attivo
- Tracking, particle ID
- Volume fiduciale
- Granularità, anticoincidenza
- Pulse shape discrimination (PSD)
- Ion Identification

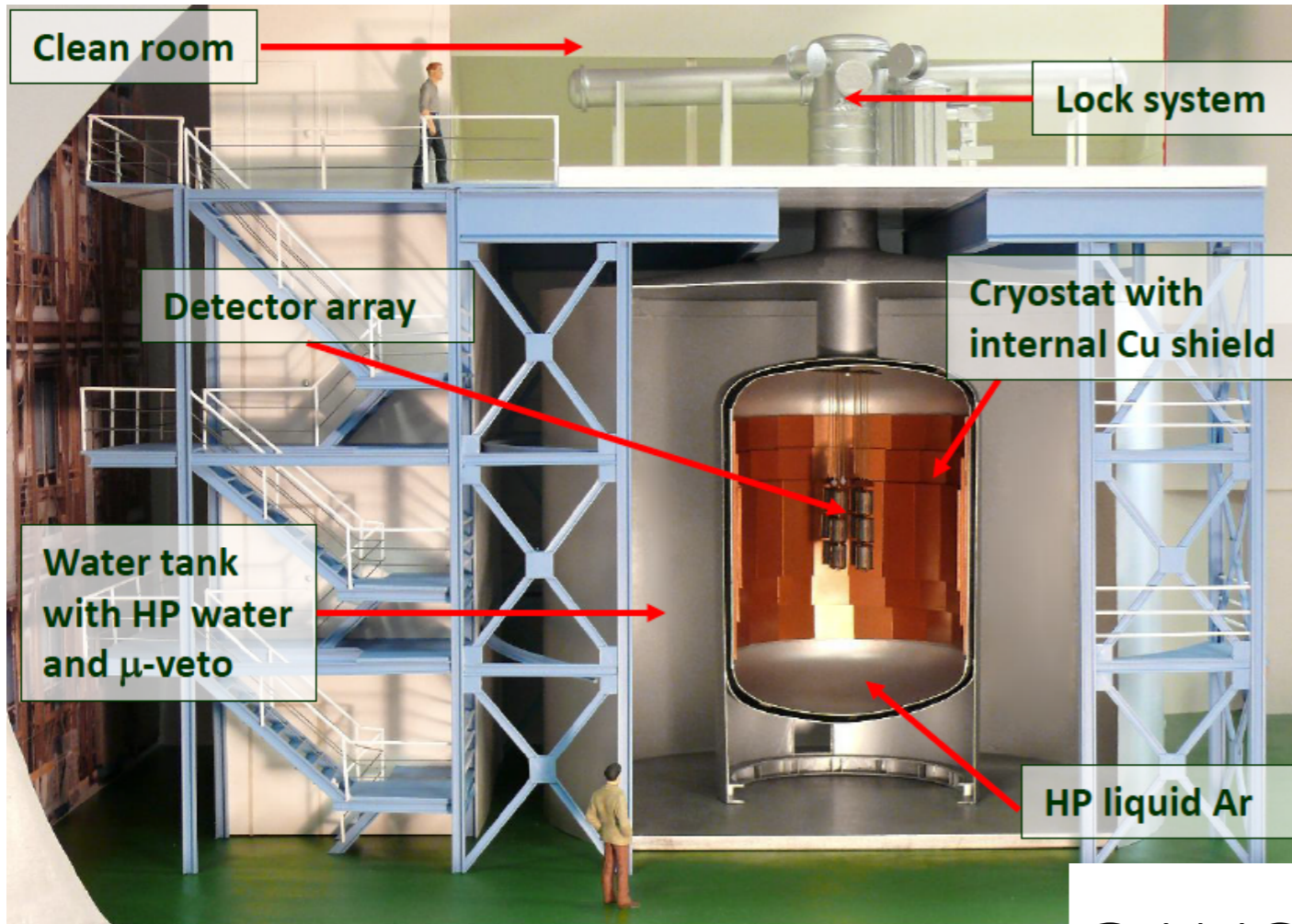


Esperimenti in corso o recentemente conclusi (oggi)

La regione esclusa al 90% C.L. dagli esperimenti in corso o da poco conclusi si trova al di sopra di $m_{\beta\beta} = 100$ meV.



GERDA: Fase I



Tecnica sperimentale:

Rivelatori a Germanio arricchiti in ^{76}Ge all'86% immersi in Argon liquido.



Nuovi rivelatori BEGe
3 kg
FWHM: 3.2 keV @ $Q_{\beta\beta}$
+ Pulse Shape
Discrimination



@ LNGS

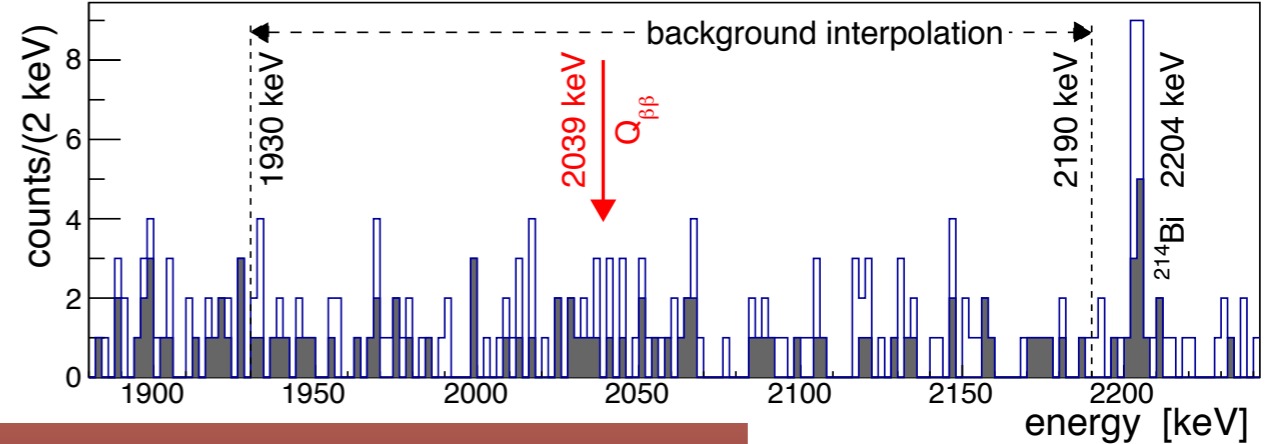
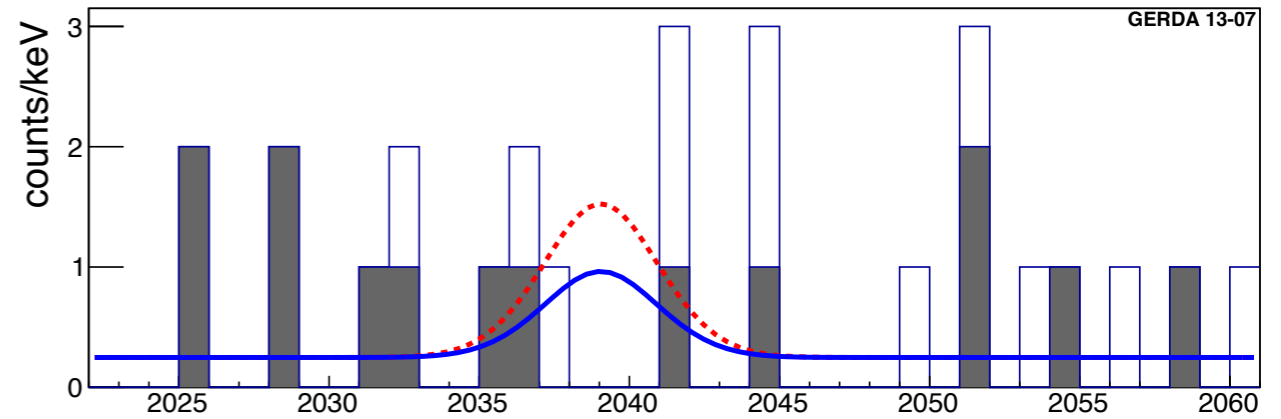
Rivelatori coassiali da HdMo e IGEX riprocessati
17.66 kg - FWHM: 4.8 keV @ $Q_{\beta\beta}$.

Background (con PSD): 10^{-2} counts / (keV kg y)¹⁷

GERDA: Fase I

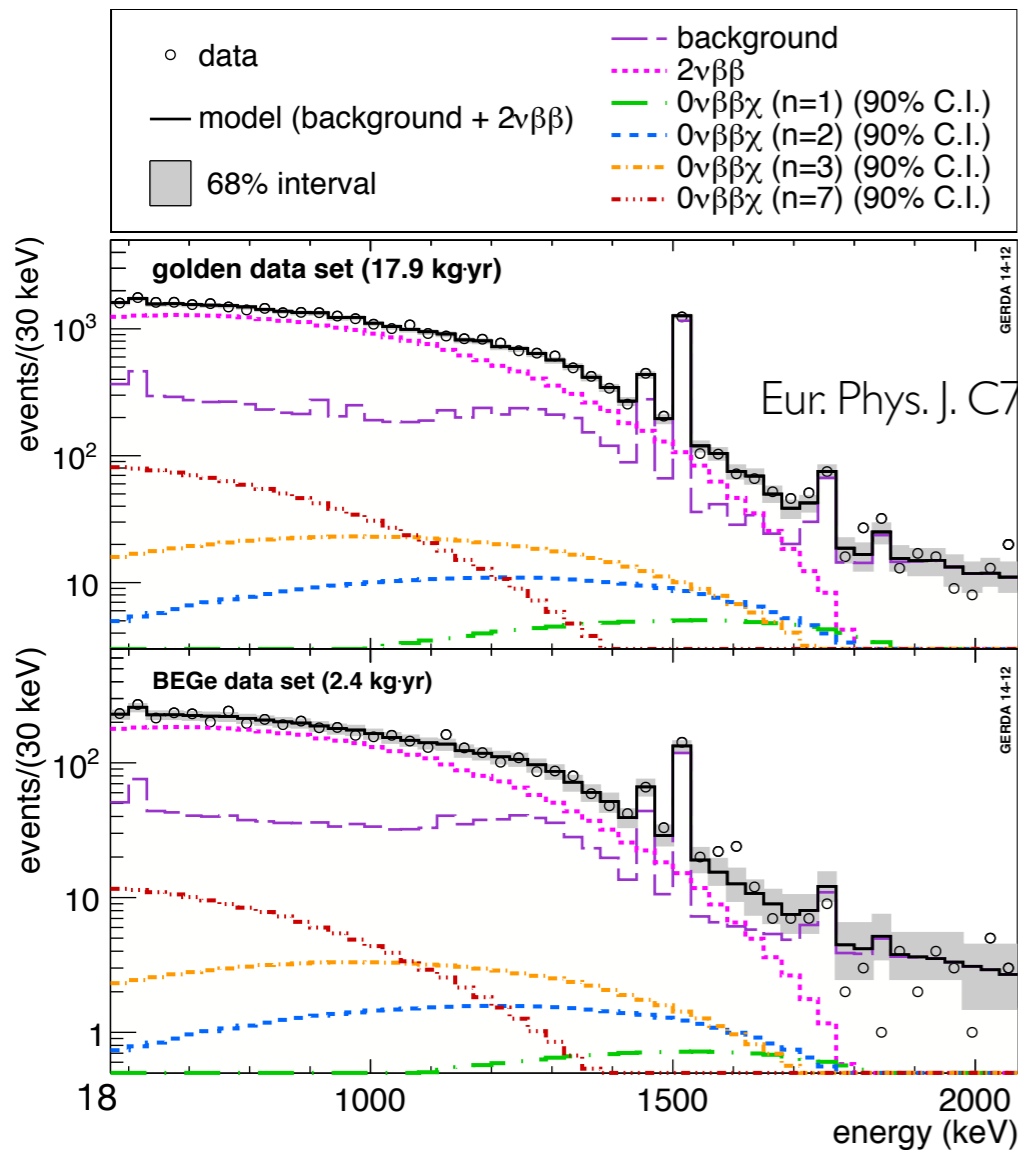
$0\nu\beta\beta: T_{1/2}(0\nu) > 2.1 \times 10^{25}$ yr 90% C.L.

$T_{1/2}(0\nu) > 3.2 \times 10^{25}$ yr 90% C.L.
combinato con HdMo e IGEX

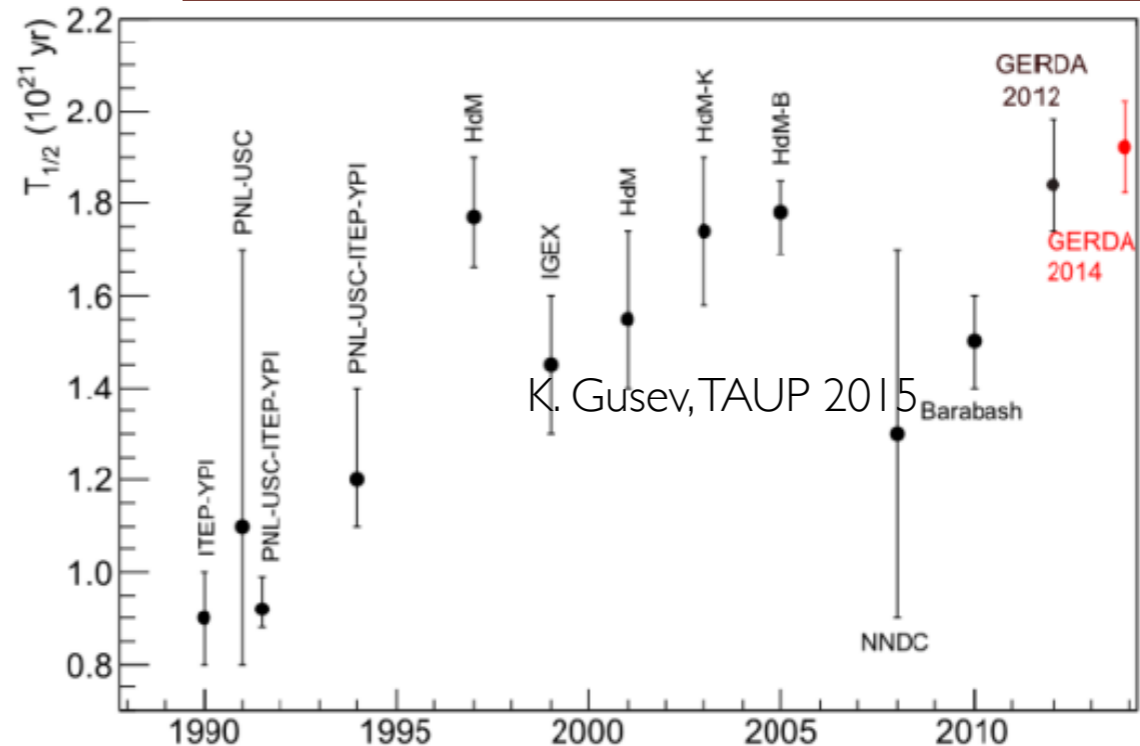


$0\nu\beta\beta$ con emissione di Majoroni:
 $T_{1/2}(\chi) > 4.2 \times 10^{23}$ yr 90% CL

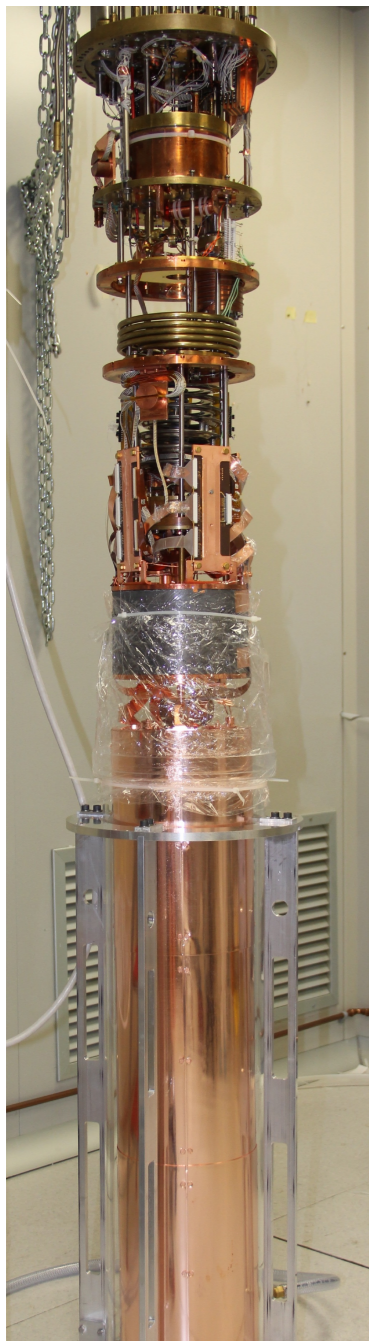
$2\nu\beta\beta: T_{1/2}(2\nu) = (1.926 \pm 0.095) \times 10^{21}$ y



Eur. Phys. J. C75 (2015) 416



CUORE-0



Tecnica sperimentale:

Bolometri criogenici di TeO_2 (isotopo emettitore ^{130}Te) a temperatura $T \sim 10 \text{ mK}$

Prima torre assemblata a CTAL (CUORE Tower Assembly Line)

52 cristalli di TeO_2 , massa totale $39 \text{ kg TeO}_2 = 10.9 \text{ kg } ^{130}\text{Te}$

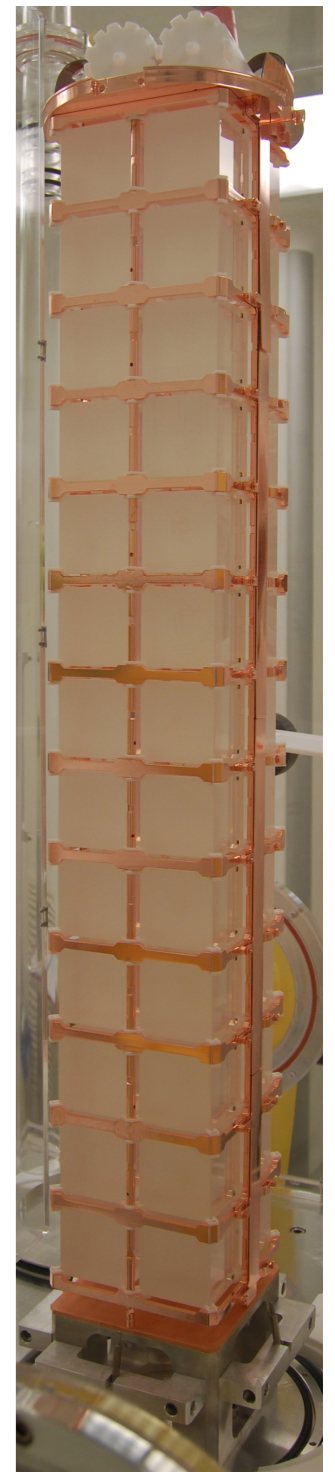
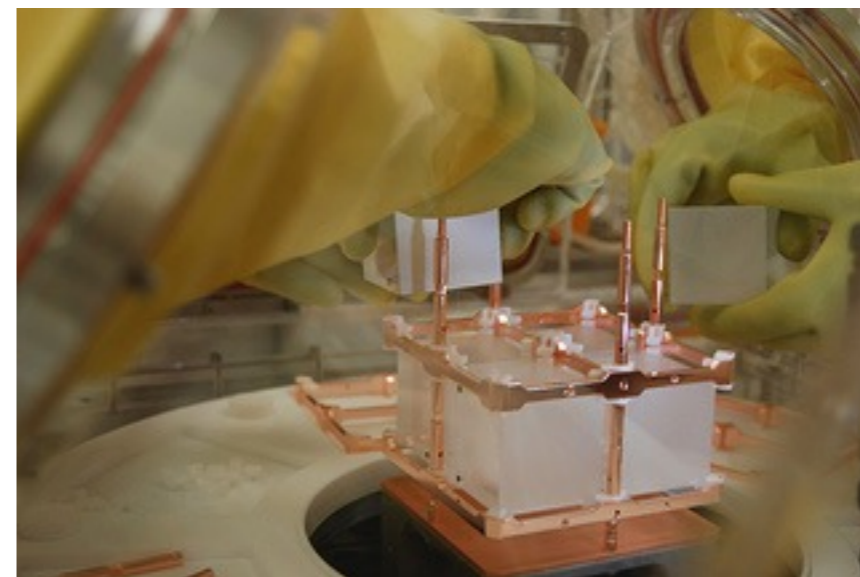
Scopo:

Commissioning linea di assemblaggio

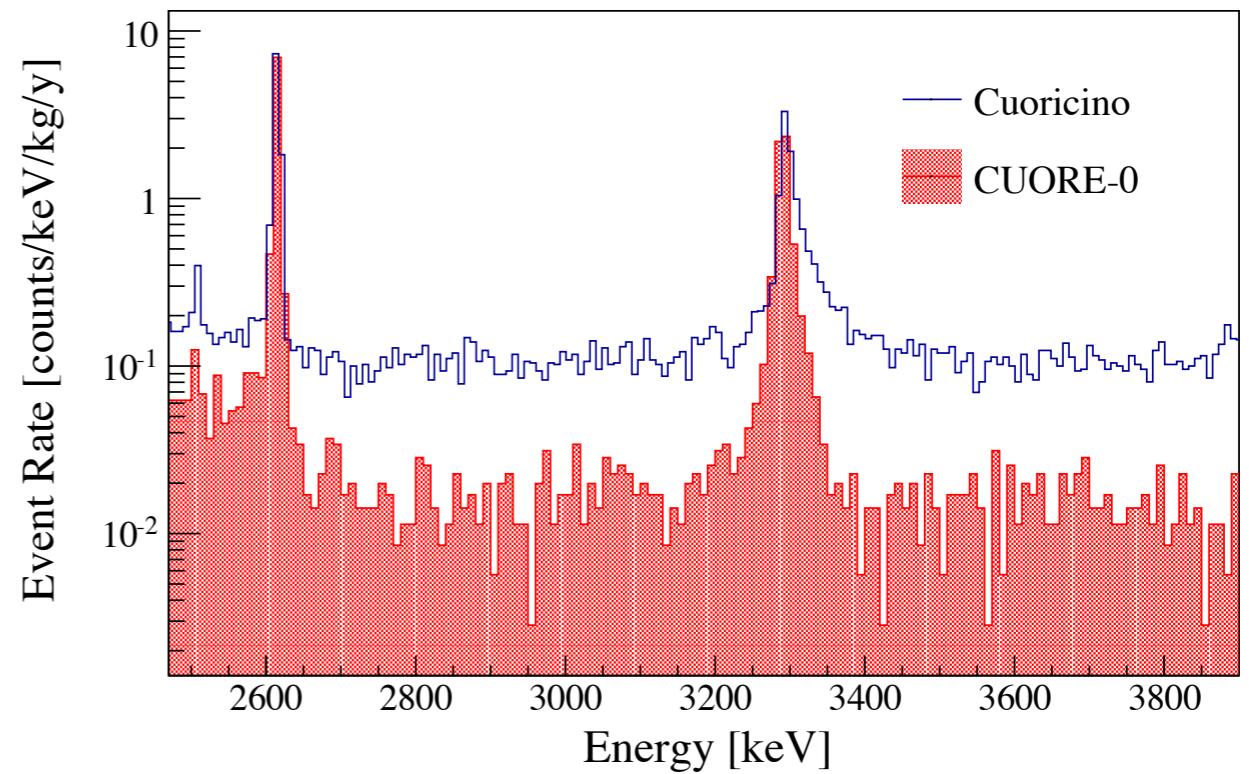
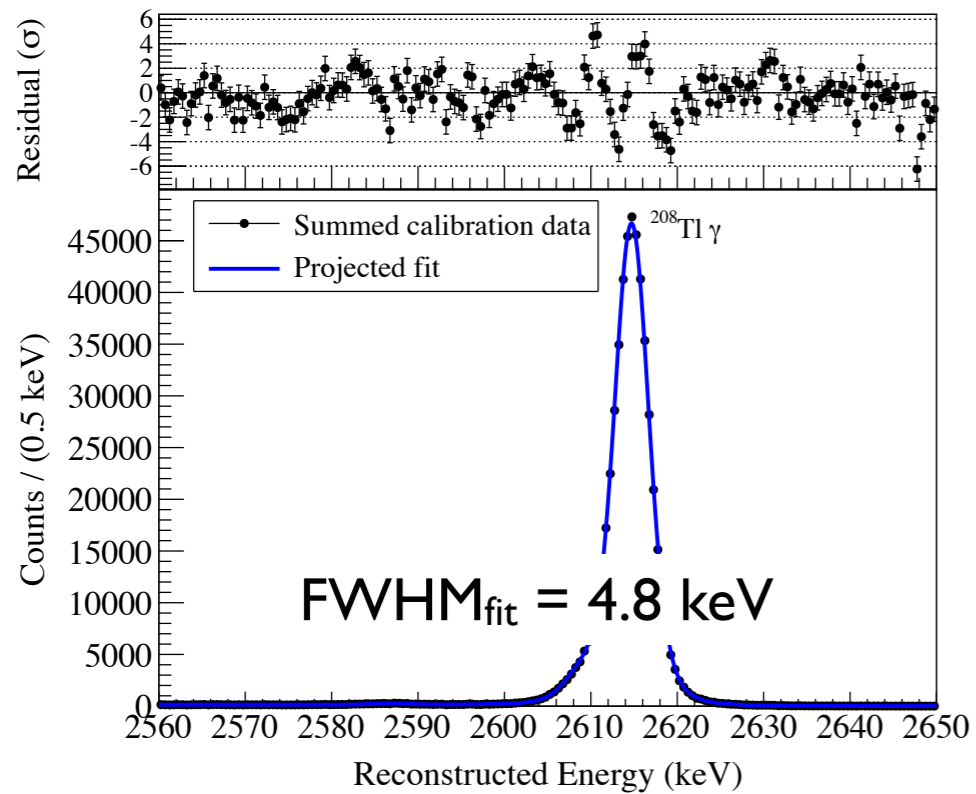
Validazione disegno sperimentale di CUORE

Ricerca del decadimento $0\nu\beta\beta$ del ^{130}Te con sensibilità superiore al precedente prototipo (Cuoricino).

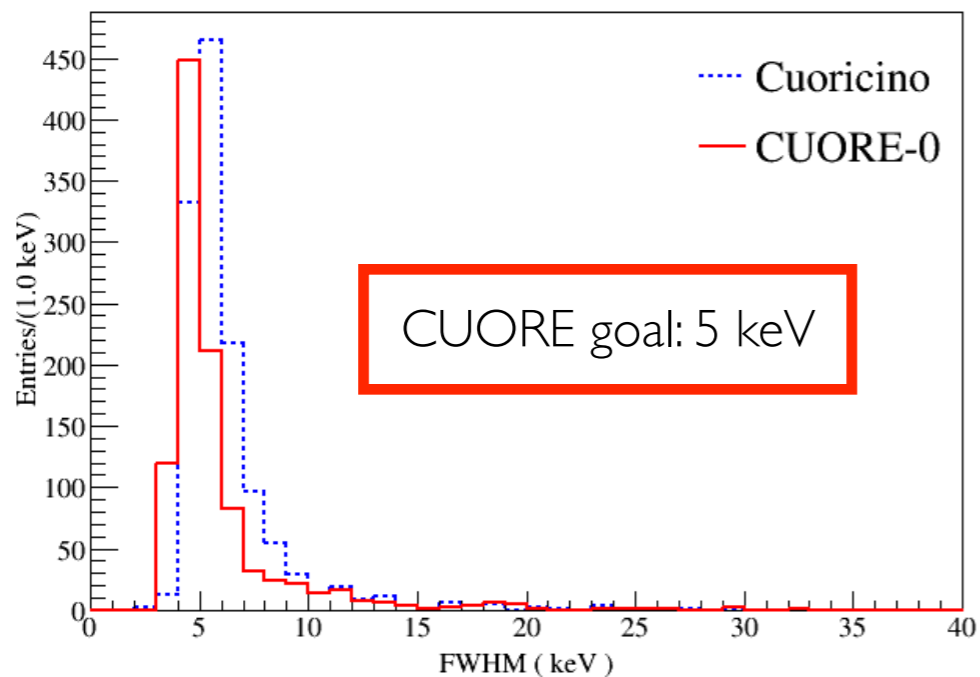
In presa dati da Marzo 2013
nel criostato già usato dal
predecessore Cuoricino.



CUORE-0

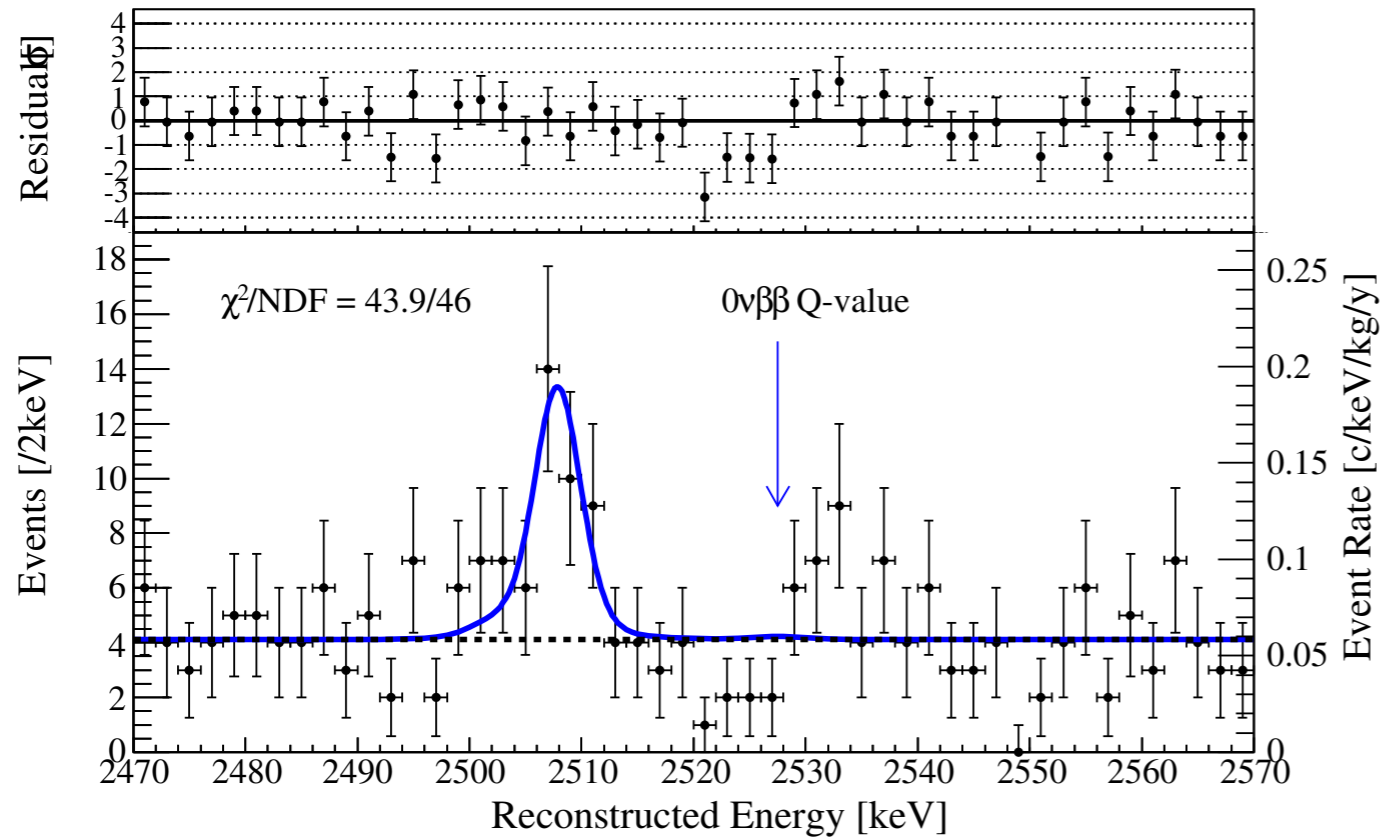


Riduzione di un fattore 6 rispetto a Cuoricino grazie alla pulizia dei materiali e alle tecniche di assemblaggio pensati per CUORE.



	2.7-3.9 MeV
CUORE-0	0.016 ± 0.001
Cuoricino	0.110 ± 0.001

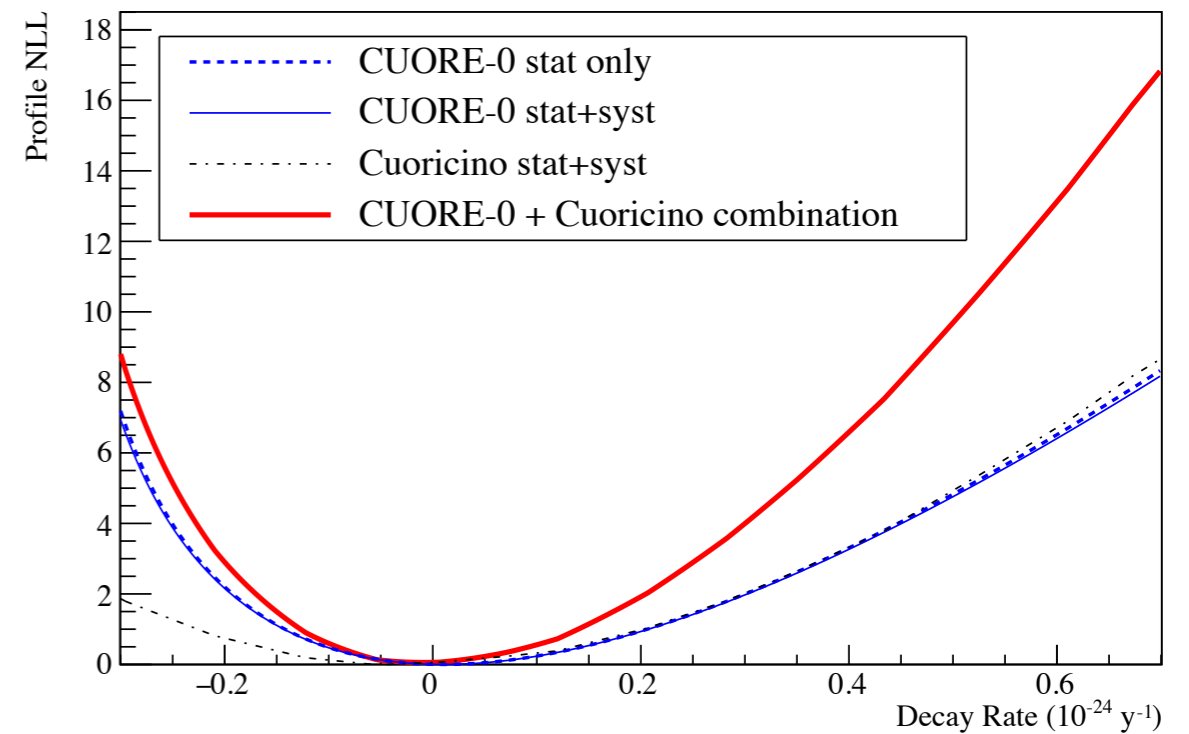
CUORE-0



$0\nu\beta\beta: T_{1/2}(0\nu) > 2.7 \times 10^{24}$ yr 90% C.L.

Combinando il risultato di CUORE-0 con Cuoricino (19.75 kg · yr di ^{130}Te)

$0\nu\beta\beta: T_{1/2}(0\nu) > 4.0 \times 10^{24}$ yr 90% C.L.



Altri esperimenti

Tecnica sperimentale: sorgente ≠ rivelatore

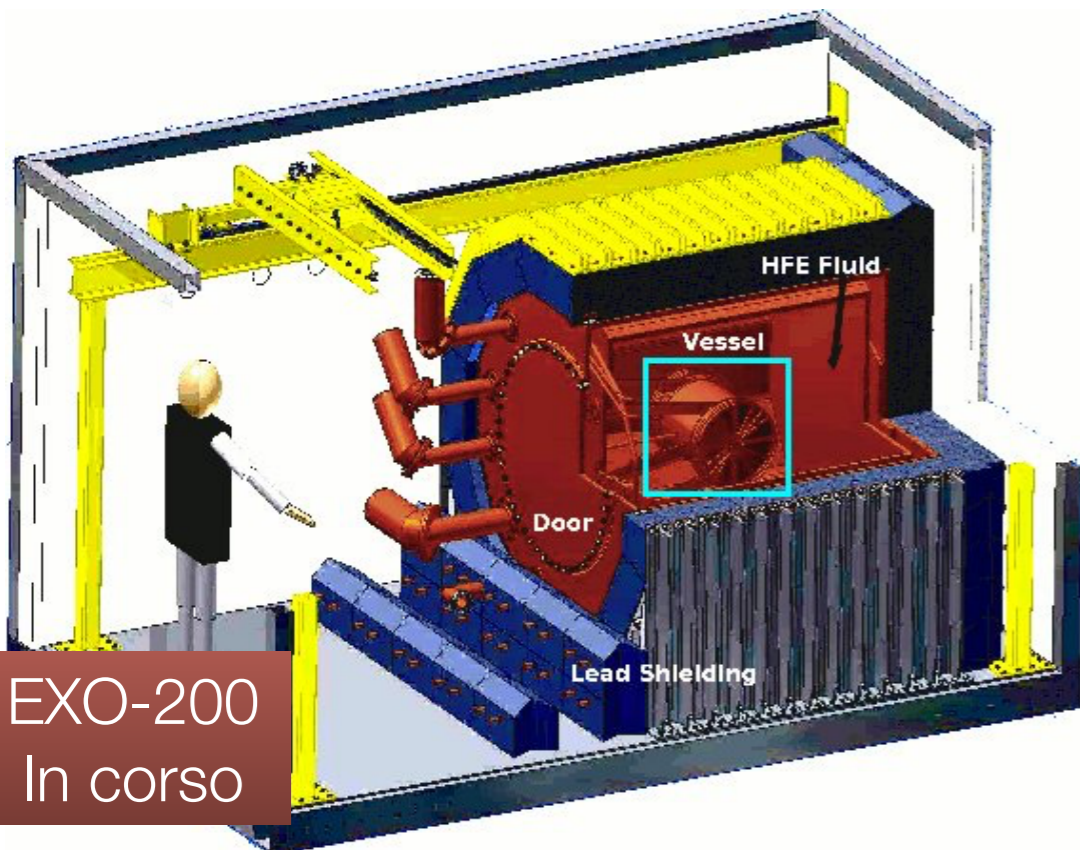
^{100}Mo (6.9 kg)/ ^{82}Se (0.9 kg) + (^{130}Te , ^{116}Cd , ^{150}Nd , ^{96}Zr and ^{48}Ca) in fogli sottili
Tracking chamber con Geiger cells + Calorimeter (top, bottom, in and out)
Laboratorio sotterraneo di Modane (Fréjus, Francia)

$$0\nu\beta\beta: T_{1/2}(0\nu) > 1.1 \times 10^{24} \text{ yr } 90\% \text{ C.L.}$$

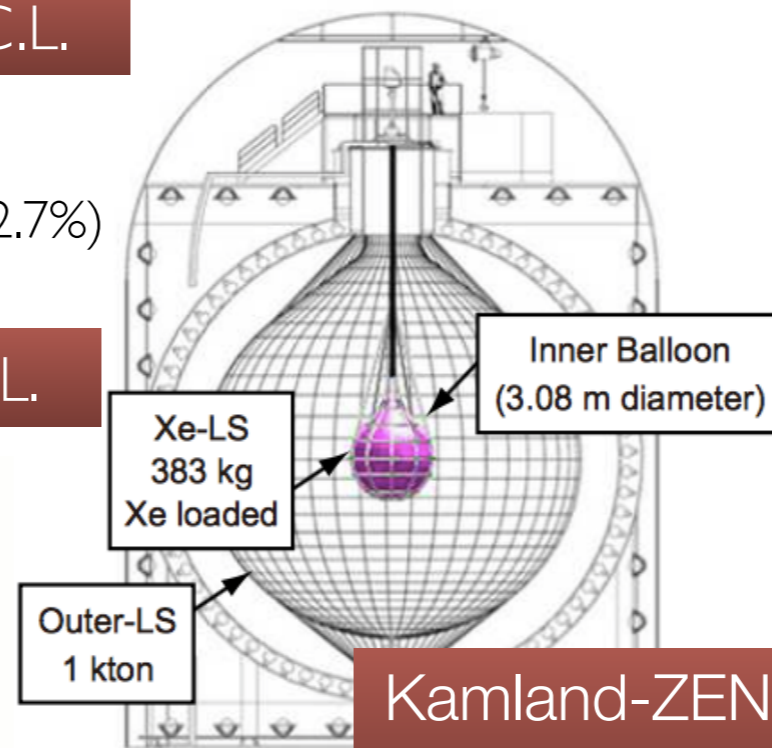
Tecnica sperimentale: sorgente = rivelatore

Scintillatore liquido (380 kg) contenente ^{136}Xe (2.7%)
dentro Kamland (LS detector 1kton) @ Kamioka

$$0\nu\beta\beta: T_{1/2}(0\nu) > 2.6 \times 10^{25} \text{ yr } 90\% \text{ C.L.}$$



EXO-200
In corso



Kamland-ZEN
In corso

NEMO3
Completato



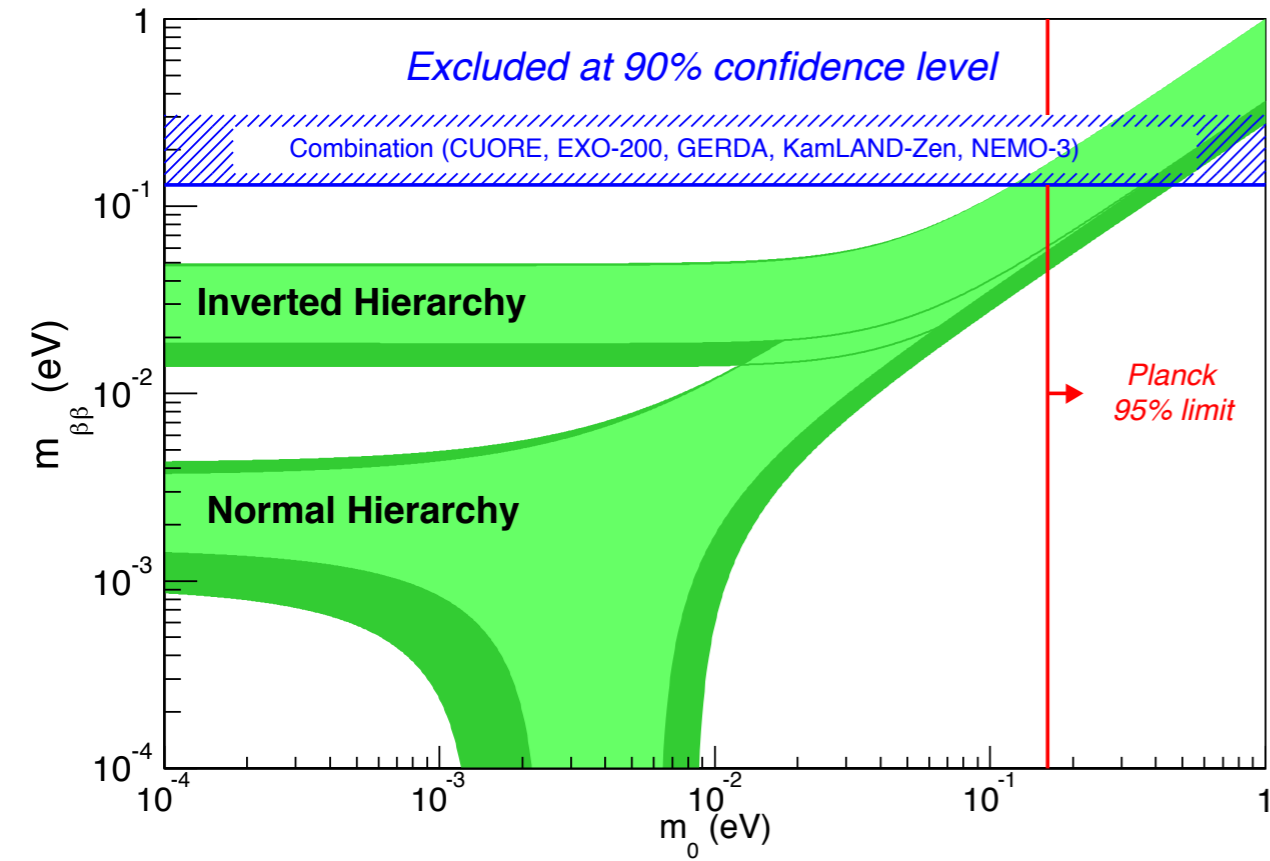
Tecnica sperimentale: sorgente = rivelatore

TPC a Xenon liquido (arricchito in ^{136}Xe all'80.6%)
~175 kg in fase liquida (Time Projection Chamber)
~100 kg massa fiduciale

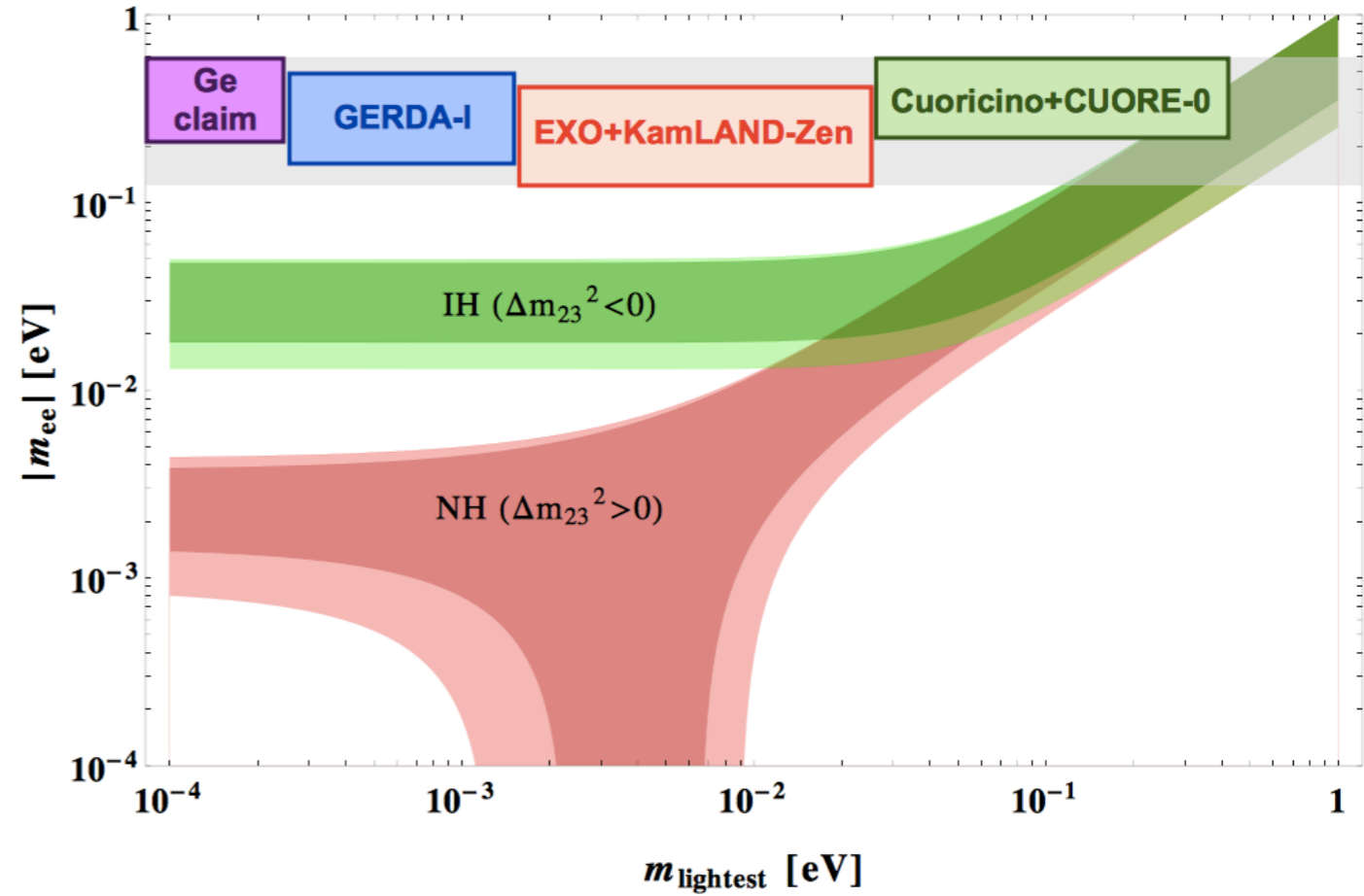
In presa dati a WIPP (1585 m.w.e.), Carlsbad, New Mexico

$$0\nu\beta\beta: T_{1/2}(0\nu) > 1.1 \times 10^{25} \text{ yr } 90\% \text{ C.L.}^{22}$$

Lo stato attuale



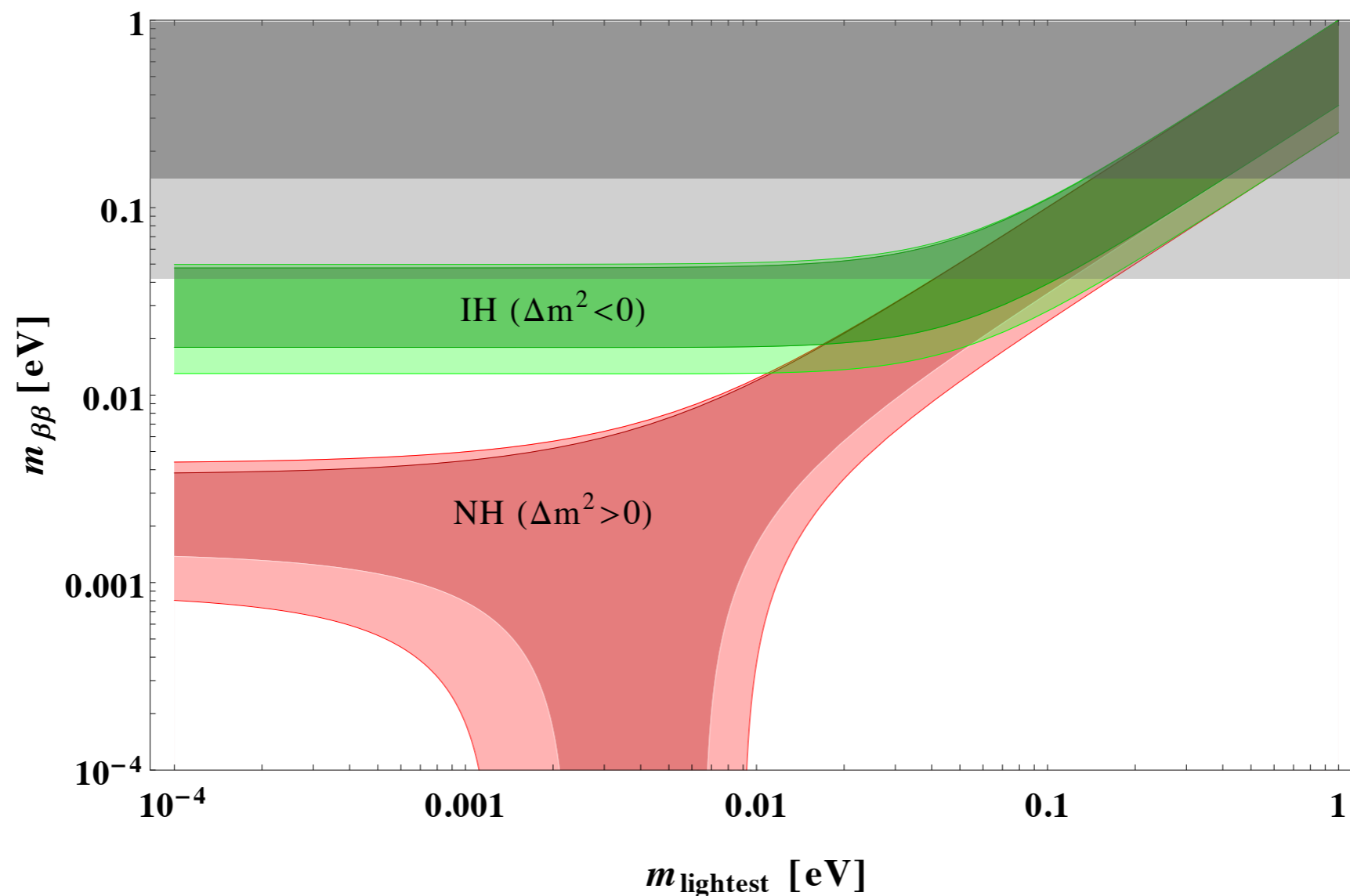
P. Guzowski, TAUP 2015



O. Cremonesi, TAUP 2015

Prossimi esperimenti (domani)

Gli esperimenti oggi in fase di costruzione o commissioning si propongono di entrare per la prima volta nella regione corrispondente alla gerarchia di massa inversa ($m_{\beta\beta} < 50$ meV).



CUORE, GERDA-II, KamLAND-Zen, MJD, CUPID-0

GERDA: Fase II

Nuovi rivelatori BEGe (20 kg)

Goal: background ≈ 0.001 counts / (keV kg yr)

30 nuovi BEGe prodotti e testati

Nuovo design per:

holder

front end readout

front end cabling

HV e signal cabling

Minishroud di nylon

Pulse shape discrimination (PSD) con i BEGe

Performance dei rivelatori stabile e risoluzione energetica analoga a Fase I.

Liquid Argon Veto attivo

Commissioning Fase II in corso:

- 27 di 40 rivelatori installati
- Installazione completa entro fine 2015

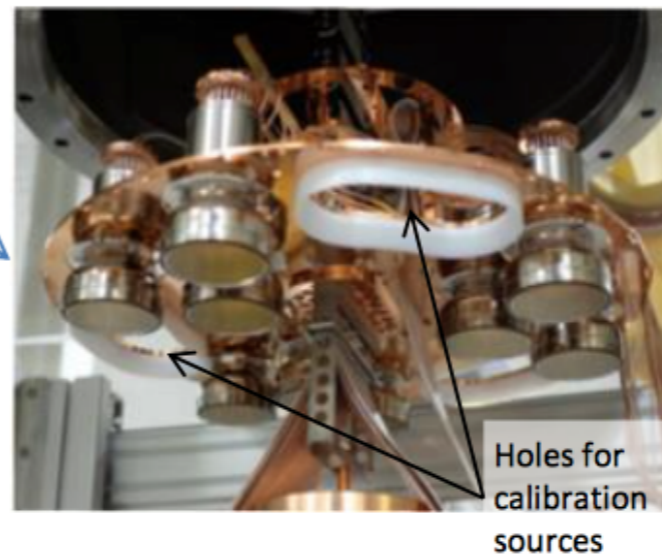


GERDA: Fase II

Veto attivo di LAr installato e funzionante

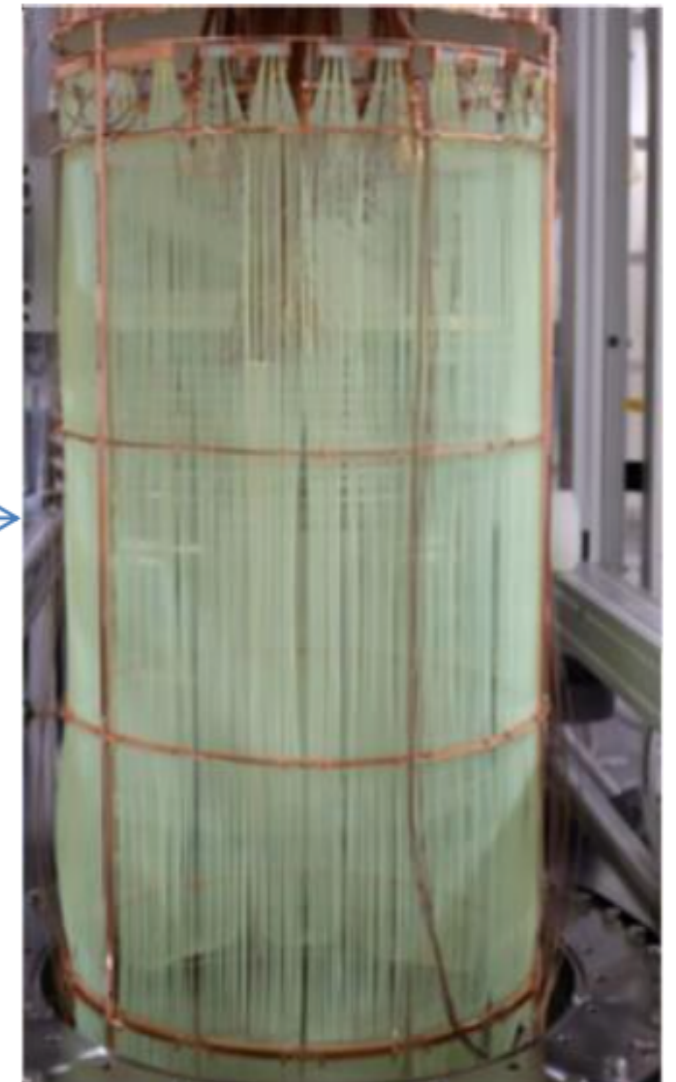


3" PMTs



Holes for calibration sources

Fibers (coated with WLS) coupled to SiPMs



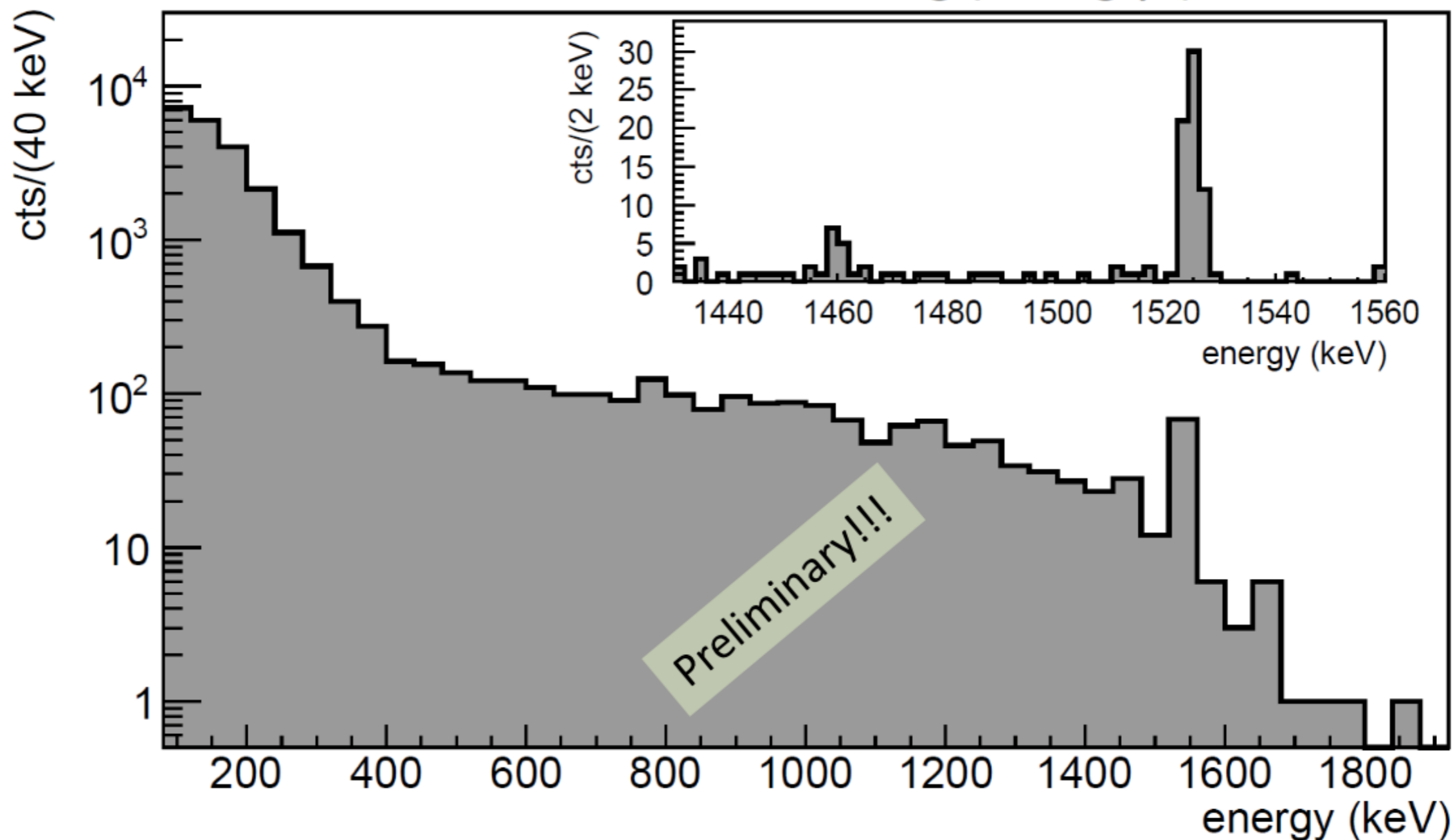
Cu cylinders with WLS foil

GERDA: Fase II

Primo spettro di background GERDA Fase II

K. Gusev, TAUP 2015

Phase II commissioning (~ 1 kg yr)

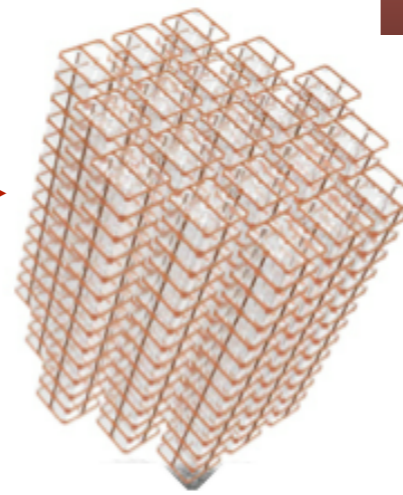
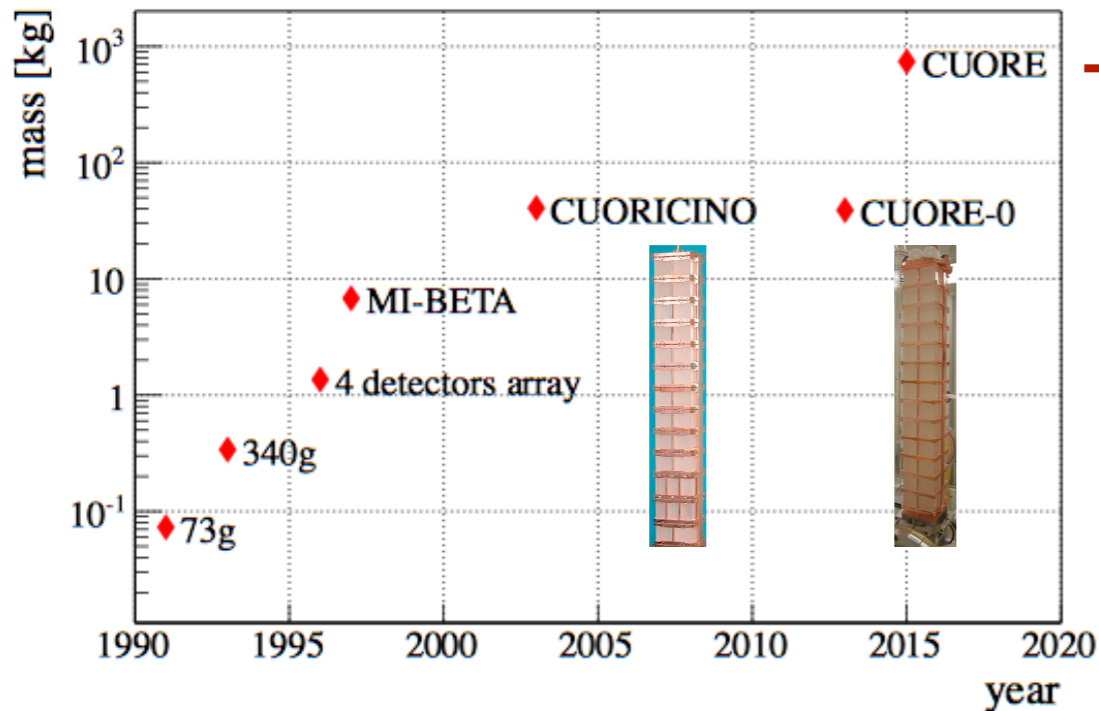


CUORE

Tecnica sperimentale:

Bolometri criogenici di TeO_2 (isotopo emettitore ^{130}Te) mantenuti a una temperatura $T \sim 10$ mK.

Risoluzione energetica 5 keV
Background: 0.01 counts / (kg keV y)



External lead shield

Internal lead shields

Copper thermal shields (6)
(300, 40, 4, 0.6, 0.05, 0.01 K)

PET + boric acid shield

Dilution refrigerator

Pulse tubes (5)

Array di 988 cristalli di TeO_2 :

- ▶ ogni cristallo $5 \times 5 \times 5$ cm³ (750 g);
- ▶ 19 torri - 13 piani - un modulo da 4 cristalli per piano
- ▶ massa totale 741 kg - 206 kg di ^{130}Te ($\sim 10^{27}$ nuclei di ^{130}Te).

CUORE

Criostato

- ▶ Sistema di raffreddamento e criostato custom made: pulse tubes + refrigeratore a diluizione. Temperatura di esercizio: 10 mK and several tons at various low temperature stages.
- ▶ Sistema di inserzione automatico delle sorgenti di calibrazione.
- ▶ Sistema di sospensione dell'array di rivelatori indipendente dall'unità a diluizione per diminuire il rumore vibrazionale.

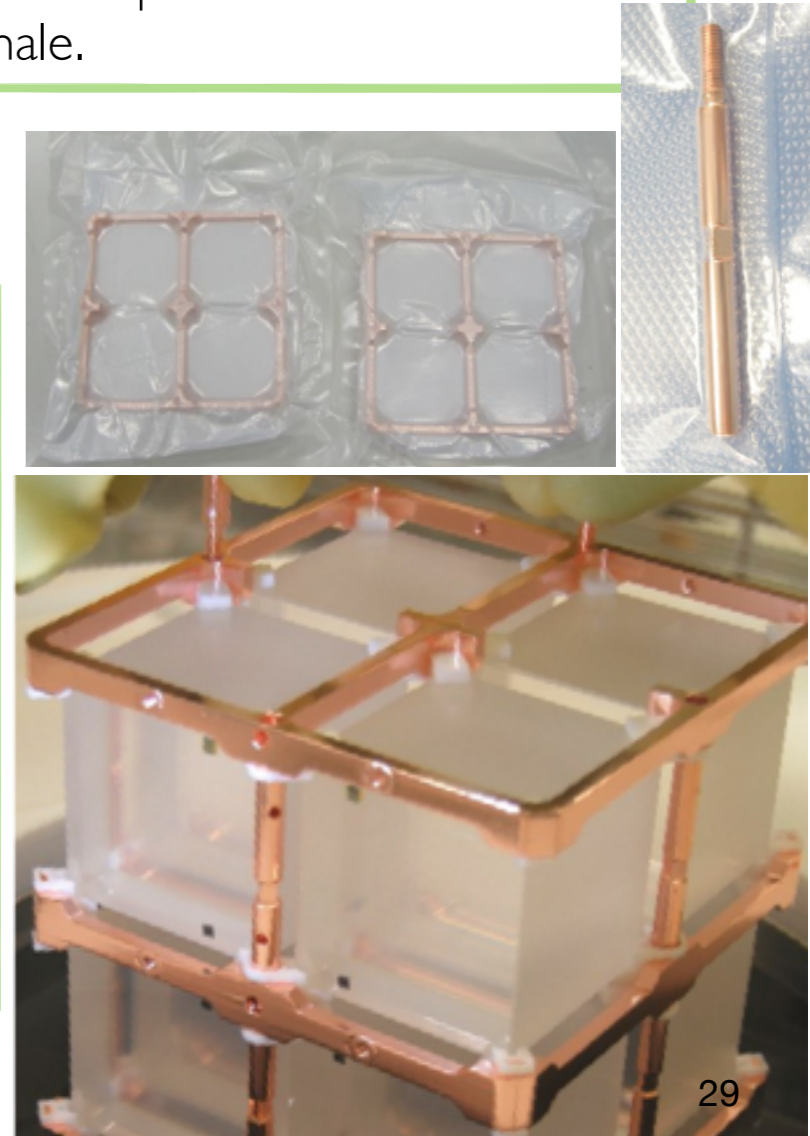
Materiali radiopuri

Cristalli:

- ▶ Protocollo di produzione che prevede limiti molto stringenti sulle contaminazioni di volume e superficie.
- ▶ Trasporto via mare per ridurre l'attivazione cosmogenica.

Rame:

- ▶ Plasma cleaning per le superfici di rame.
- ▶ Assemblaggio pulito (atmosfera di azoto).



CUORE

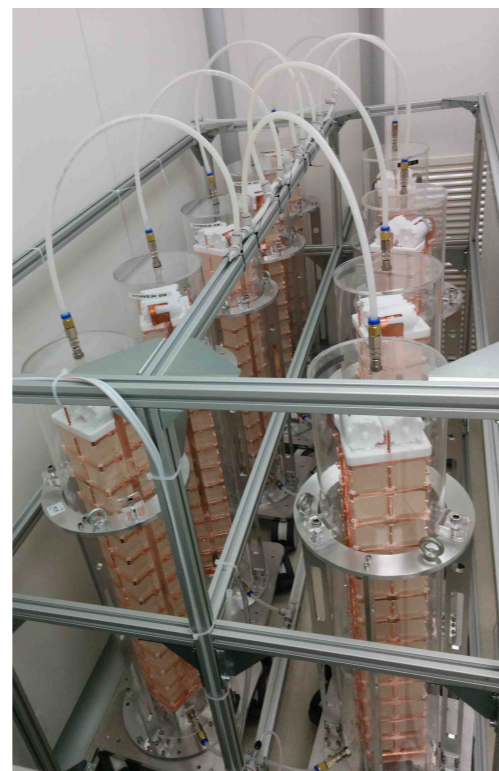
Assemblaggio delle 19 torri di CUORE completato.

Commissioning del sistema criogenico in corso:

Fase I: test a 4K, test del vuoto, caratterizzazione pulse tubes

Fase II: test del sistema completo

- 3 cicli di raffreddamento di cui 2 completati con successo: $T_{\text{base}} < 6 \text{ mK}$!
- ultimo ciclo a pieno carico (escludendo i rivelatori) in corso

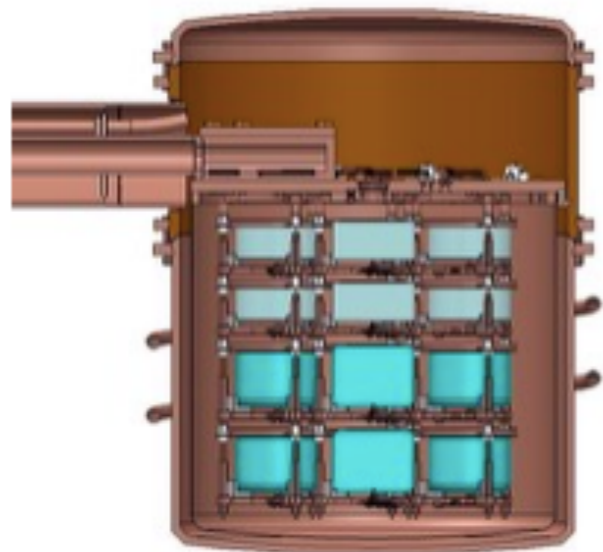


Installazione torri:
autunno 2015
Data taking: inizio 2016

Majorana Demonstrator (MJD)

Tecnica sperimentale:

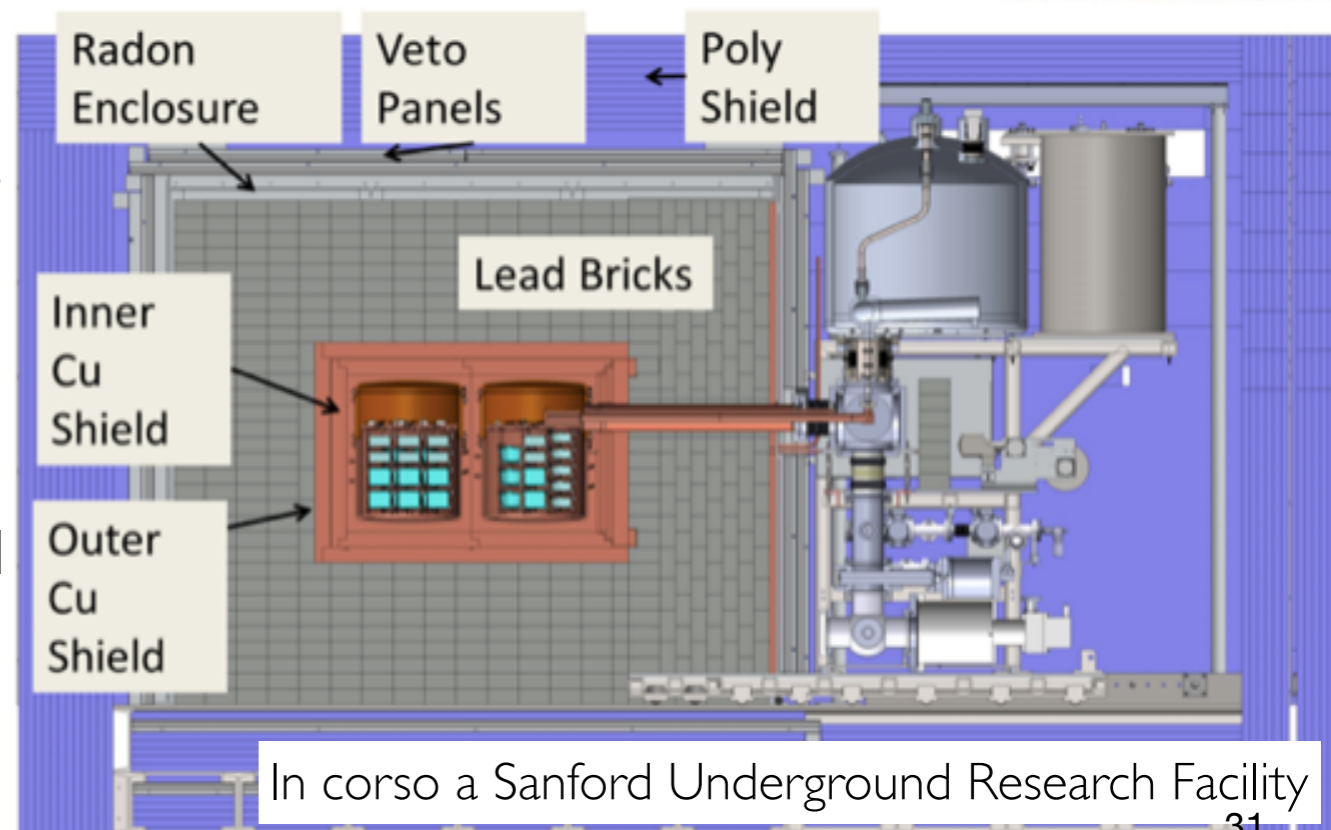
Rivelatori a Germanio arricchiti in ^{76}Ge all'87% in criostati di rame elettroformato ultra-puro.



44.8 kg di rivelatori a Germanio (29.7 kg arricchiti 87% in ^{76}Ge e 15.1 kg di germanio naturale)

2 criostati indipendenti di rame ultra-puro - 20 kg di rivelatori per criostato – facile da scalare

Schermo compatto: rame e piombo a basso fondo + veto attivo per muoni



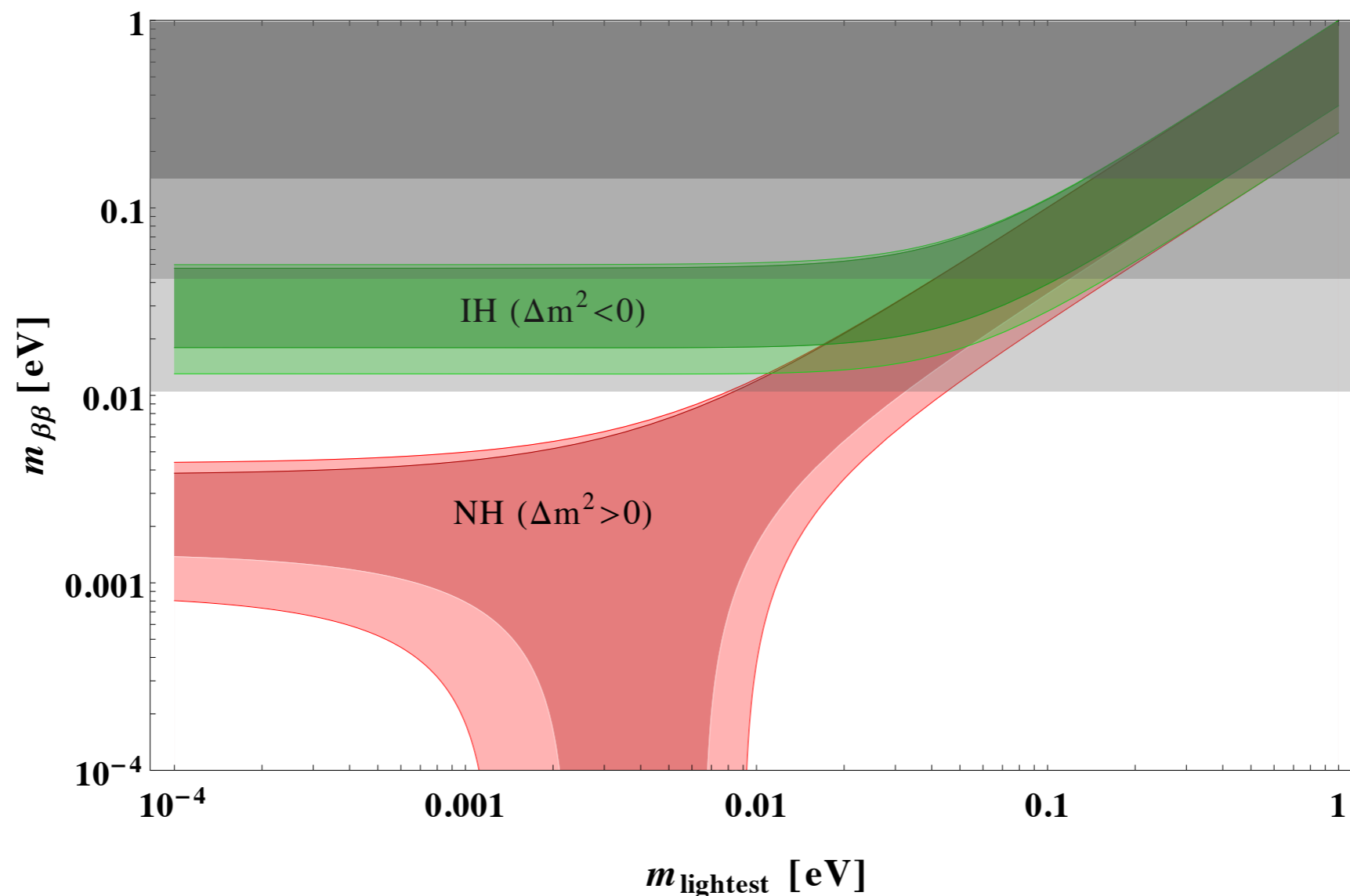
Goal: verifica del livello di fondo adatto a giustificare un esperimento tonne-scale.

Studio di fattibilità per la costruzione di array modulari di rivelatori a germanio.

Allo stesso tempo ricerca del decadimento $0\nu\beta\beta$ del ^{76}Ge con fondo 3 counts/(ROI ton y) - ROI: 4 keV da scalare a 1 count/(ROI ton y) per l'esperimento tonne-scale.

Esperimenti futuri (dopodomani)

Il goal degli esperimenti di nuova generazione è di coprire interamente la regione corrispondente alla gerarchia di massa inversa ($m_{\beta\beta} \sim 10$ meV). Le sensibilità corrispondenti sono dell'ordine di $T_{1/2} \sim 10^{27}-10^{28}$ yr.



Servono tonnellate di isotopo e fondo zero (grandi collaborazioni internazionali).

Progetti futuri

Isotopo	Esperimento	Tecnica
^{76}Ge	GERDA MAJORANA	HPGe, ton scale
^{82}Se	SuperNEMO CUPID	Se in fogli + tracker e calorimetro Bolometri + lettura della luce
^{136}Xe	nEXO NEXT KamLAND2-Zen	Liquid TPC, 5 ton Gas TPC ad alta pressione, ton scale ^{136}Xe in scintillatore liquido
^{130}Te	CUPID SNO+	Bolometri + lettura della luce ^{130}Te in scintillatore liquido
^{100}Mo	AMoRE CUPID	Bolometri scintillanti $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$ Bolometri + lettura della luce

+ CANDLES, COBRA, DCBA, ...

CUPID

CUORE Upgrade with Particle IDentification: un esperimento di nuova generazione basato sulla tecnologia e la criogenica di CUORE

Approccio: accoppiare un bolometro criogenico (alla CUORE) con un rivelatore di luce per discriminare particelle α (fondo) da β (segnale)

Possibili tecniche:

- Scintillatori Bolometrici (^{116}Cd , ^{100}Mo , ^{82}Se)
- Rivelatori Cherenkov (^{130}Te)

Goal: testare interamente la regione della gerarchia inversa
background < 0.02 counts / (ton y)

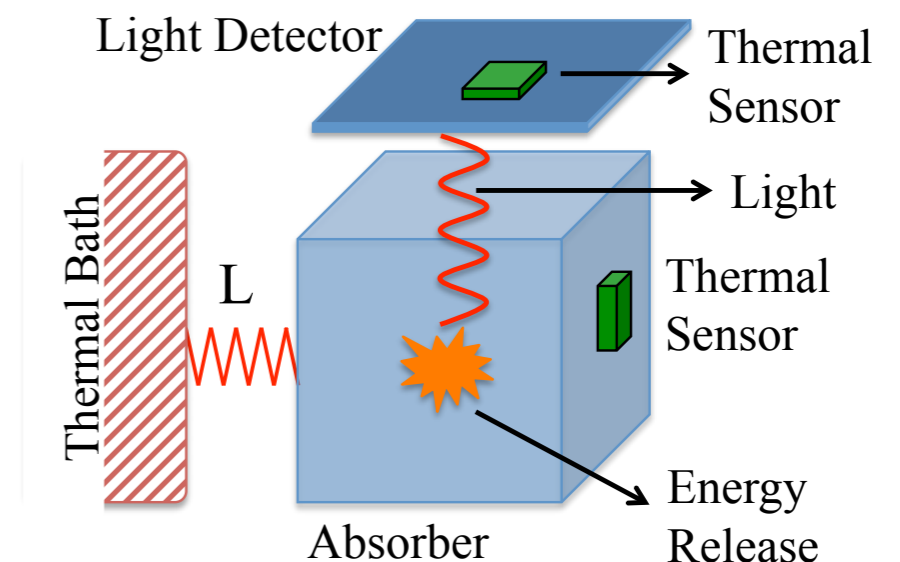
FWHM: 5 keV

99.9% reiezione α con >90% efficienza sul segnale

Prossimi passi:

Dimostratore CUPID-0

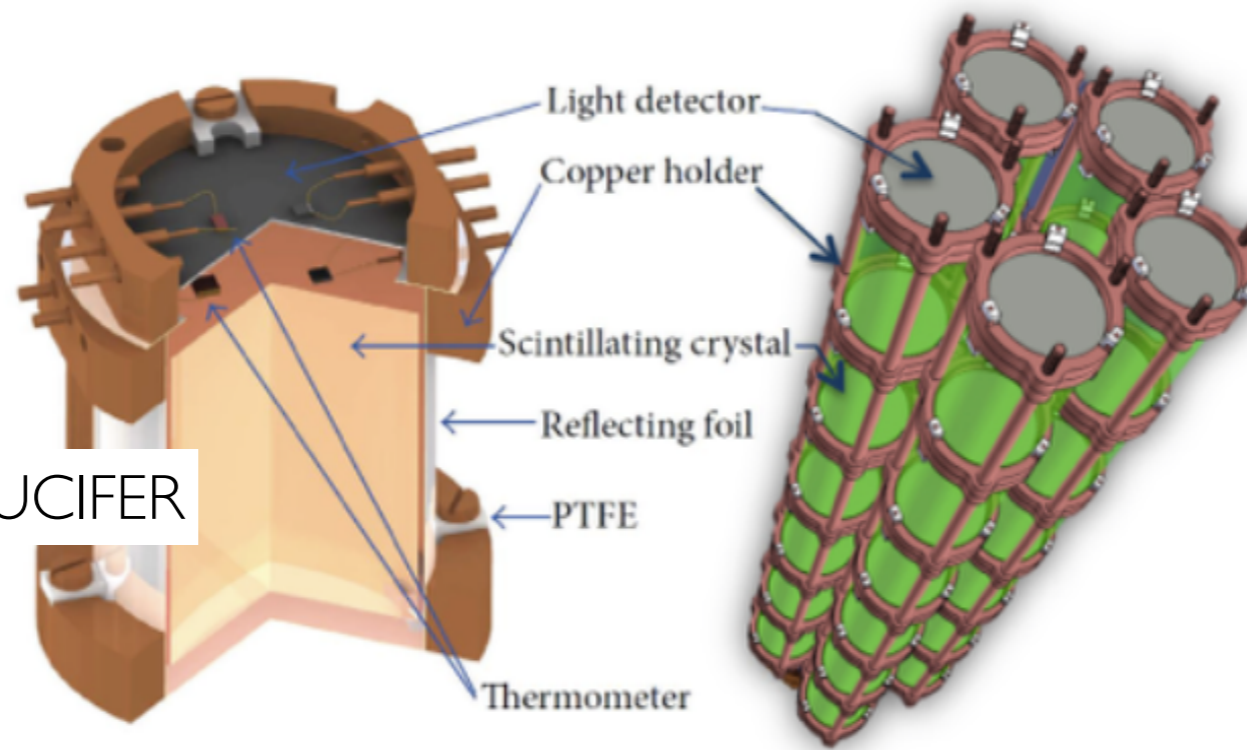
Ottimizzazione dei rivelatori di luce



- Rivelatori basati su Amplificazione Neganov-Luke
- Sviluppo di sensori KIDs
- Produzione di TES basati su film di Tungsteno

CUPID-0

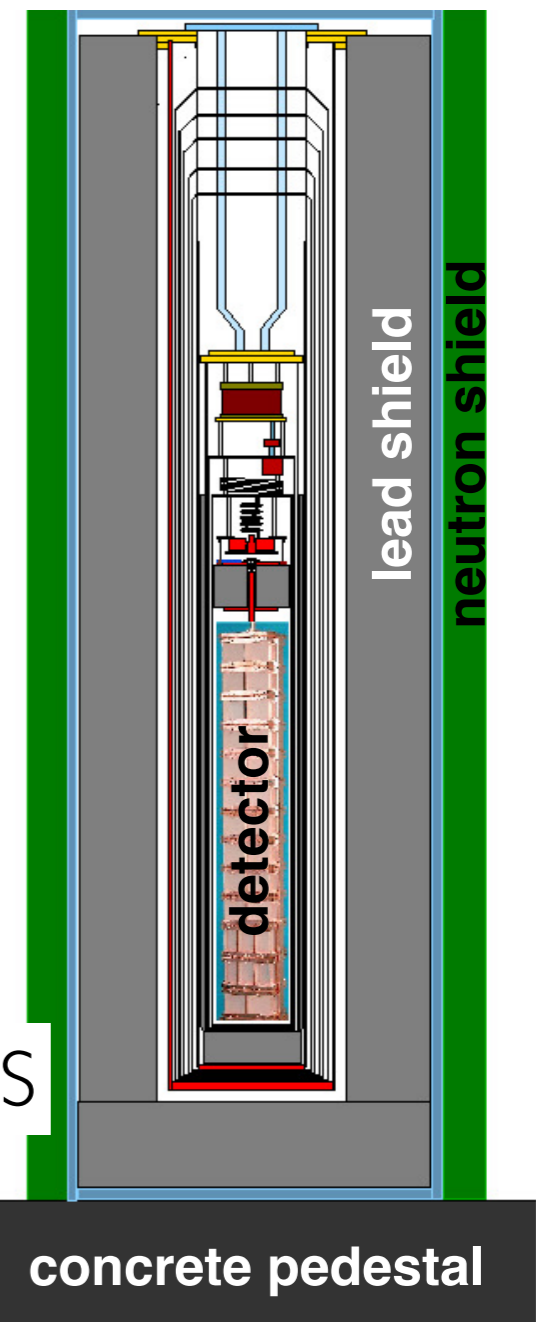
Progetto di piccola scala con grandi potenzialità grazie all'eccellente risoluzione energetica e al basso fondo (discriminazione α).



basato sull'R&D di LUCIFER

- 30 (20) rivelatori arricchiti @ 95%
- massa: 17 kg di Zn^{82}Se (14 kg of $\text{Zn}^{100}\text{MoO}_4$)
- fondo @ ROI 10^{-3} counts (keV kg y)
- FWHM @ ROI: 10 keV (5 keV)
- Sensitività: 1.8×10^{25} y @ 90% C.L. per il ^{82}Se
 6.2×10^{24} y @ 90% C.L. per il ^{100}Mo in 2 y

2016 @ LNGS



SNO+

@ Sudbury, Ontario, Canada

Fase I (2016 - 2017):

Misura e studio del fondo

Risposta del rivelatore con loading 0.3% in Te

Verifica delle tecniche di purificazione

Sensibilità sul decadimento $0\nu\beta\beta$ del ^{130}Te a:

$T_{1/2} > 9.4 \times 10^{25}$ y (90% C.L.)

Fase II:

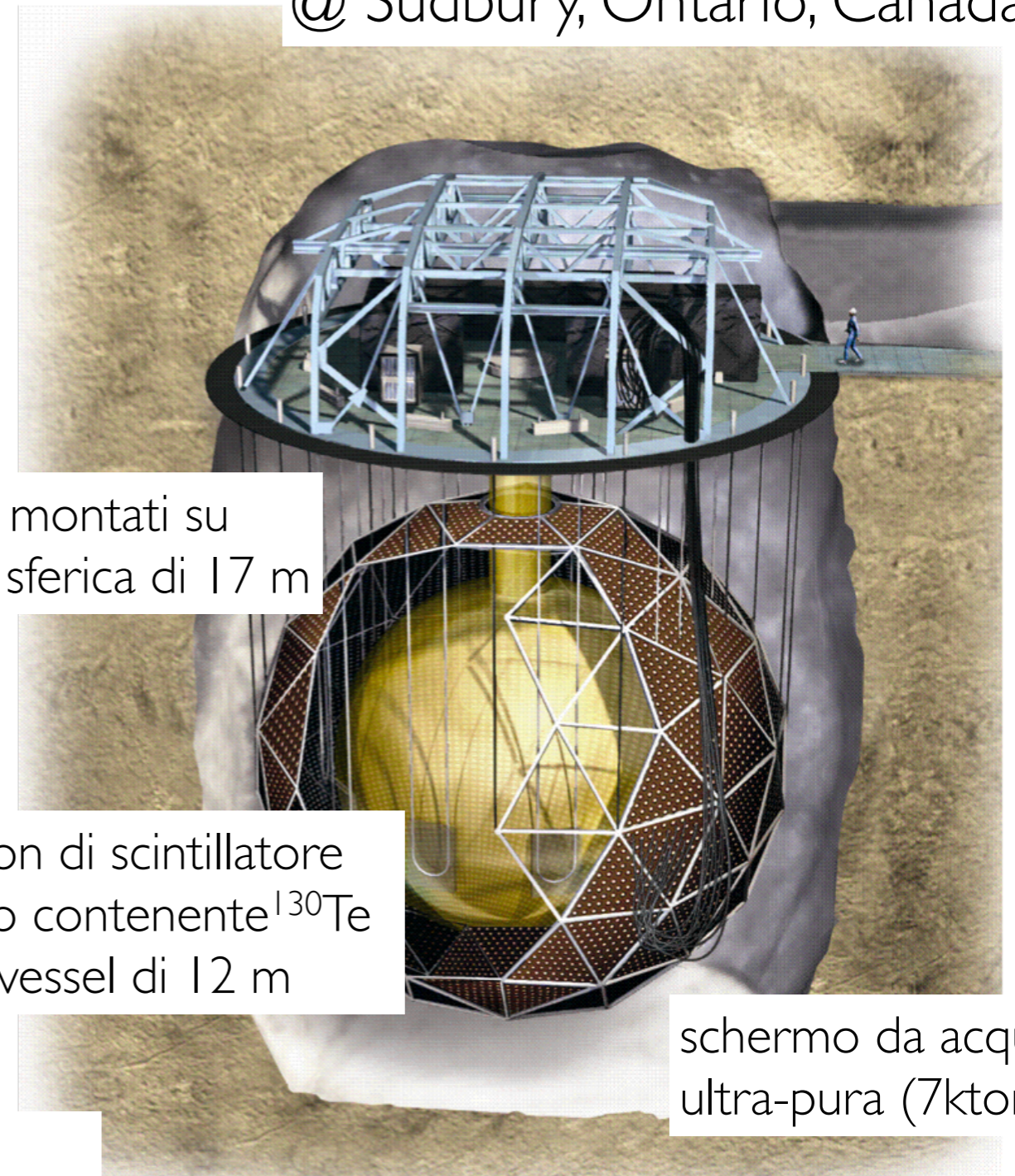
	$T^{0\nu\beta\beta}_{1/2}$	$m_{0\nu\beta\beta}$
0.3 % Te, 1 yr	3.9×10^{25} yr	~ 105 meV
0.3% Te, 5 yrs	9×10^{25} yr	55 - 133 meV
3% Te, HQE PMTs, 5 yrs	7×10^{26} yr	19 - 46 meV

+ neutrini solari e geo-neutrini

~9300 PMTs montati su
una struttura sferica di 17 m

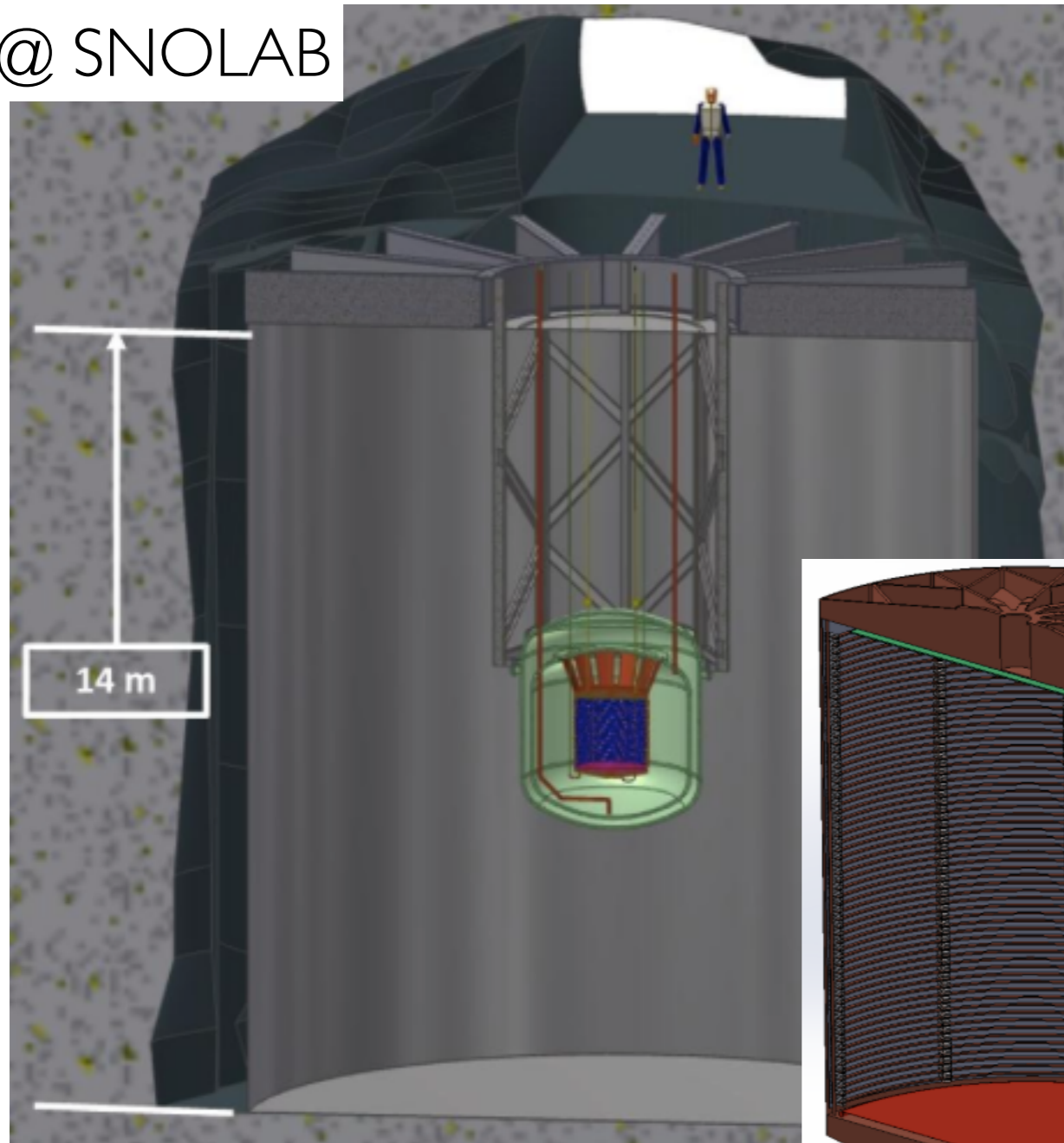
730 ton di scintillatore
liquido contenente ^{130}Te
in un vessel di 12 m

schermo da acqua
ultra-pura (7kton)



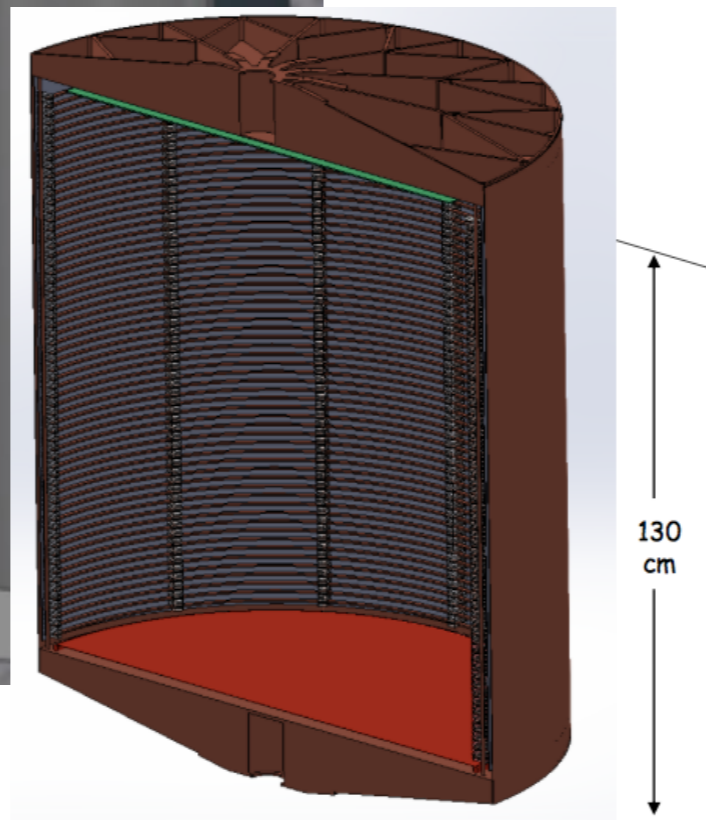
nEXO

@ SNOLAB



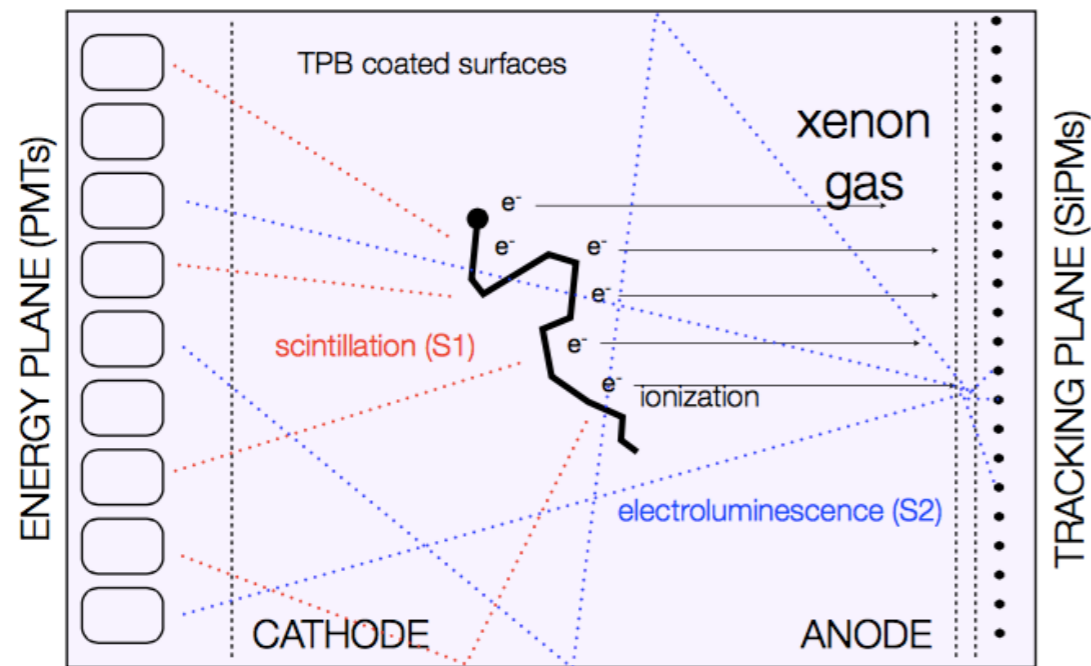
5 ton di Xenon liquido (arricchito in ^{136}Xe) in una TPC omogenea, secondo il disegno di EXO-200

Riduzione del fondo attraverso una combinazione di risoluzione energetica, topologia e localizzazione degli eventi



$$T_{1/2} = 6 \times 10^{27} \text{ yr in 5 yr}$$
$$m_{\beta\beta} \sim 7-18 \text{ meV}$$

NEXT



TPC di Xenon ad alta pressione (HPXe)
100 kg di Xenon arricchiti al 90% in ^{136}Xe a una pressione di 15 bar.

Buona risoluzione energetica:
~1% FWHM (misurata a 662 keV in un prototipo di NEXT)

0.5 % FWHM at $Q\beta\beta$ (estrapolata)

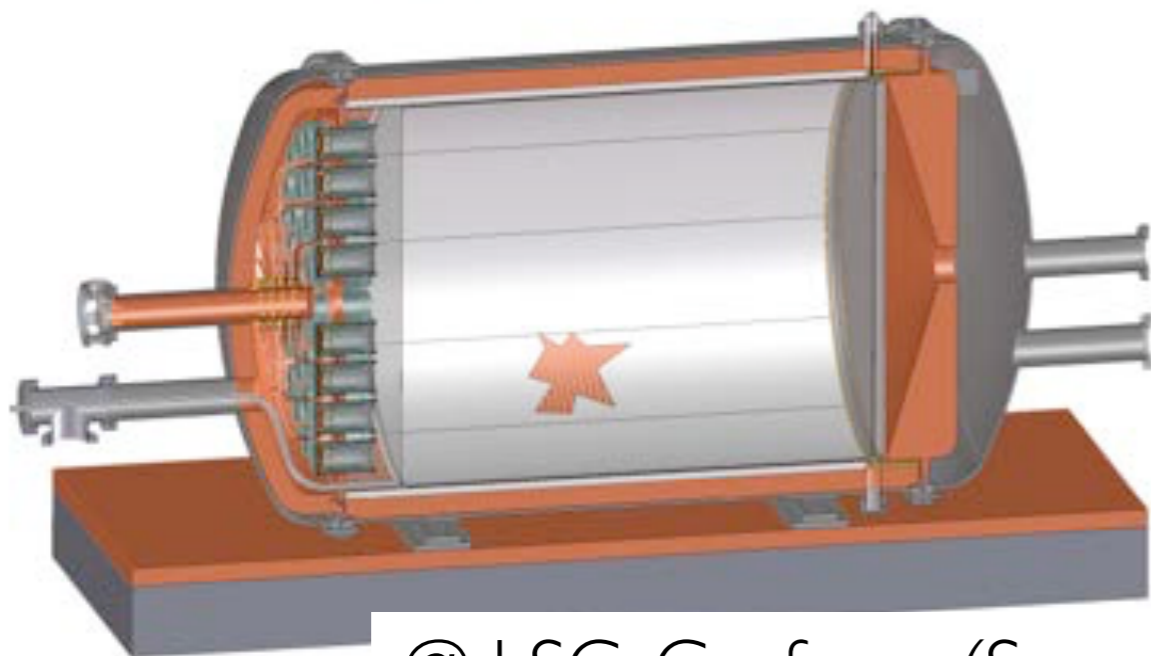
Topologia degli eventi: distingue il segnale (“double electrons”) dal background (“single electrons”).

TPC: scalabile

Prototipo da 10 kg installato @ LSC, Canfranc, per studi di calibrazione, fondo e $2\nu\beta\beta$.

Prossimo passo NEXT 100 kg.

Sensibilità 5×10^{25} y in 3 yr (2018-2020)
 $m_{\beta\beta} \sim [90-180]$ meV



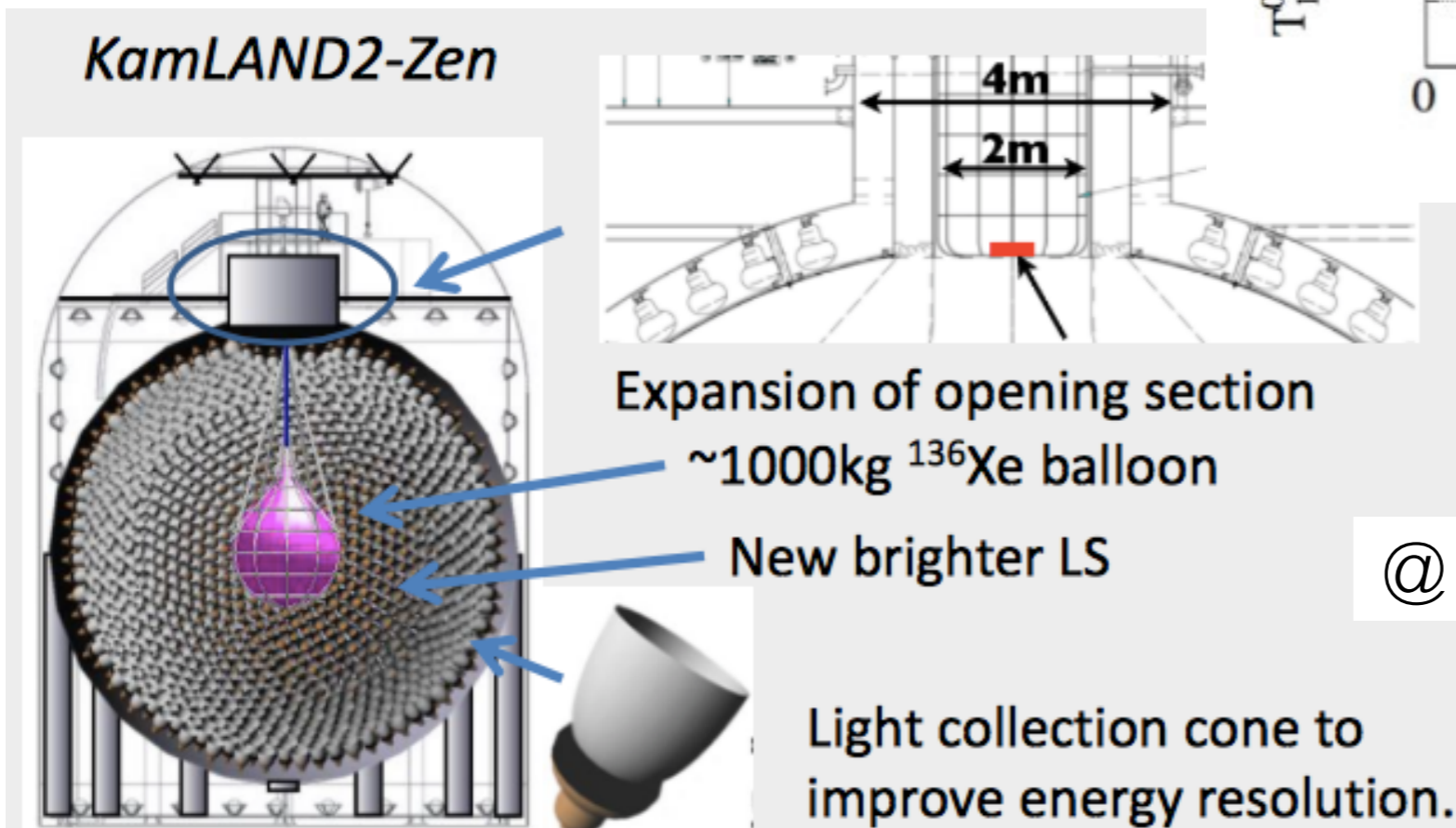
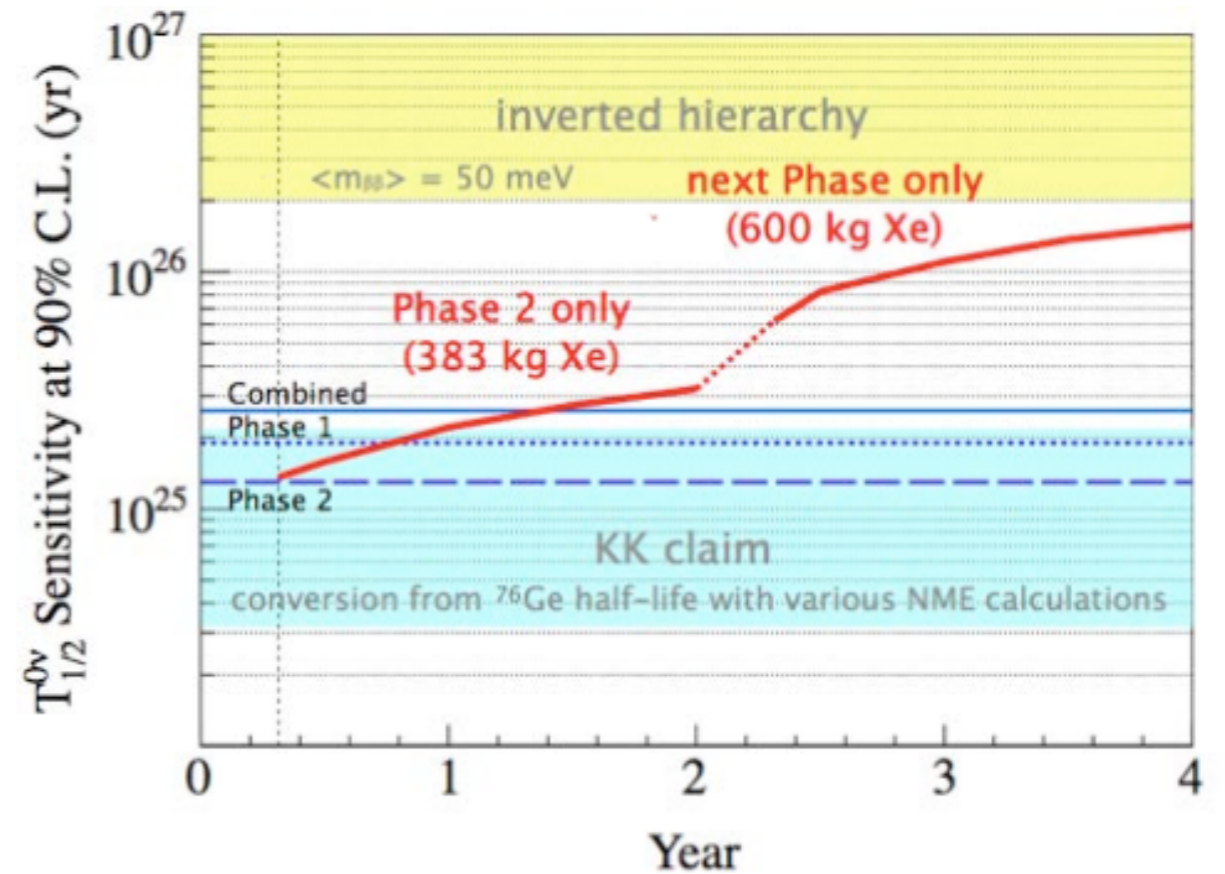
@ LSC, Canfranc (Spagna)

KamLAND-Zen

2017: KamLAND-Zen 700 kg

Progetto futuro: **KamLAND-Zen2**

- PMT con alta efficienza quantica
- Scintillatore Liquido con alto light yield
- $\sigma_E(2.6 \text{ MeV}) < 2.5\%$



@ Kamioka, Giappone

Conclusions

Osservare il decadimento $0\nu\beta\beta$:

- Dimostrerebbe che il numero leptonico non è conservato.
- Proverebbe la natura di Majorana del neutrino.

Inoltre:

- Ci sono ancora alcune importanti domande senza risposta in fisica del neutrino.
- Se il decadimento $0\nu\beta\beta$ è mediato dal neutrino di Majorana, la sua osservazione porrebbe limiti sulla massa effettiva di Majorana $m_{\beta\beta}$ e fornirebbe informazioni sulla scala di massa assoluta dei neutrini.
- Le incertezze sulla conoscenza degli elementi di matrice nucleare limitano questa possibilità.

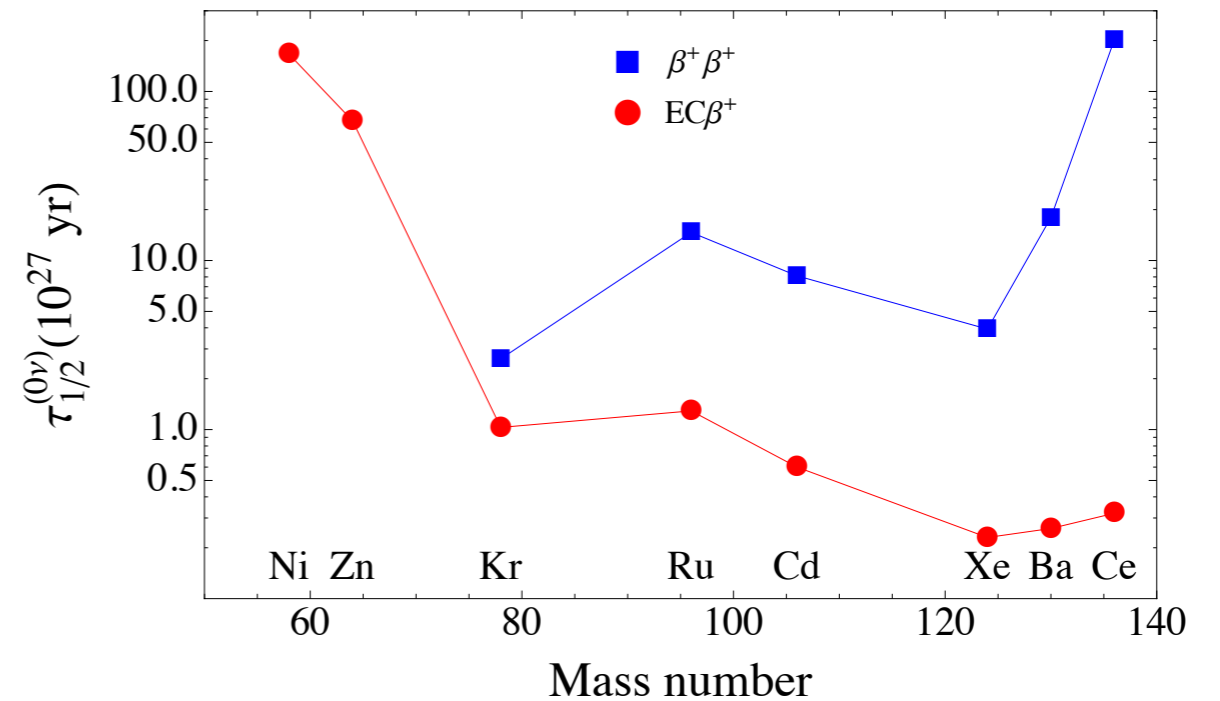
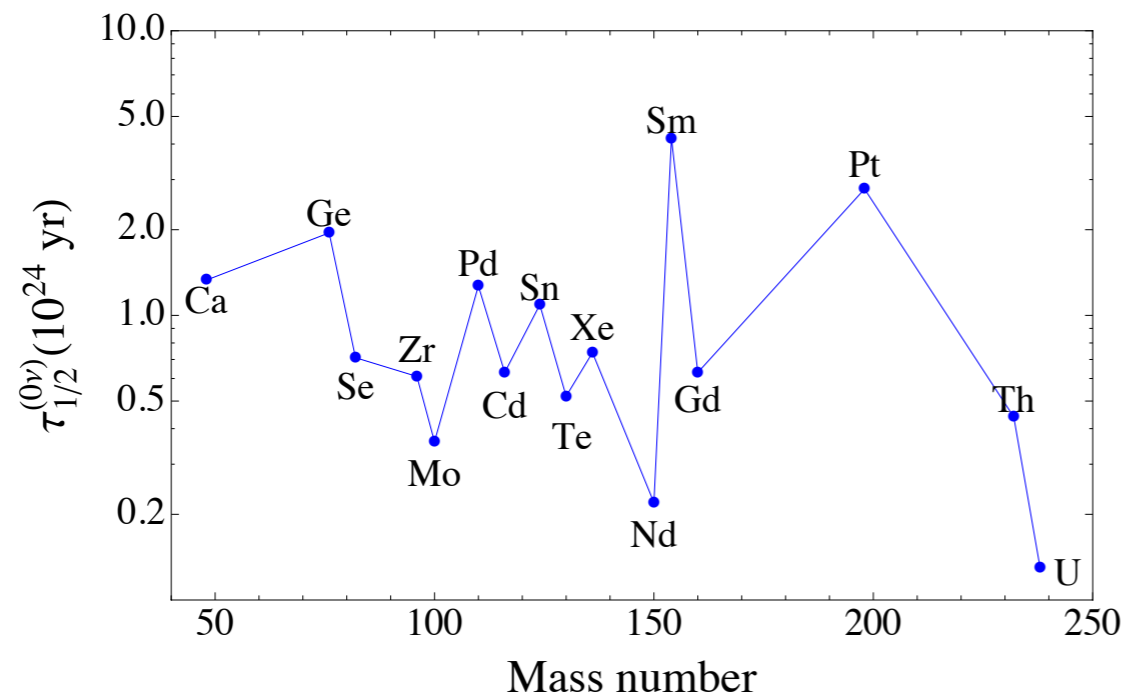
Dal punto di vista sperimentale:

- Nuovi esperimenti con maggiore sensibilità saranno presto operativi.
- Per gli esperimenti di prossima generazione lo sforzo può diventare scoraggiante in termini di sforzo tecnologico e costi.
- Pochi esperimenti con grandi collaborazioni internazionali: la preparazione e lo studio delle possibili proposte è già iniziata.

Backup slides

Decadimenti $0\nu\beta^+\beta^+$ $0\nu\beta^+/\text{EC}$, $0\nu\text{EC}/\text{EC}$

$$m_{\beta\beta} = 1 \text{ eV} \quad g_A = 1.269$$



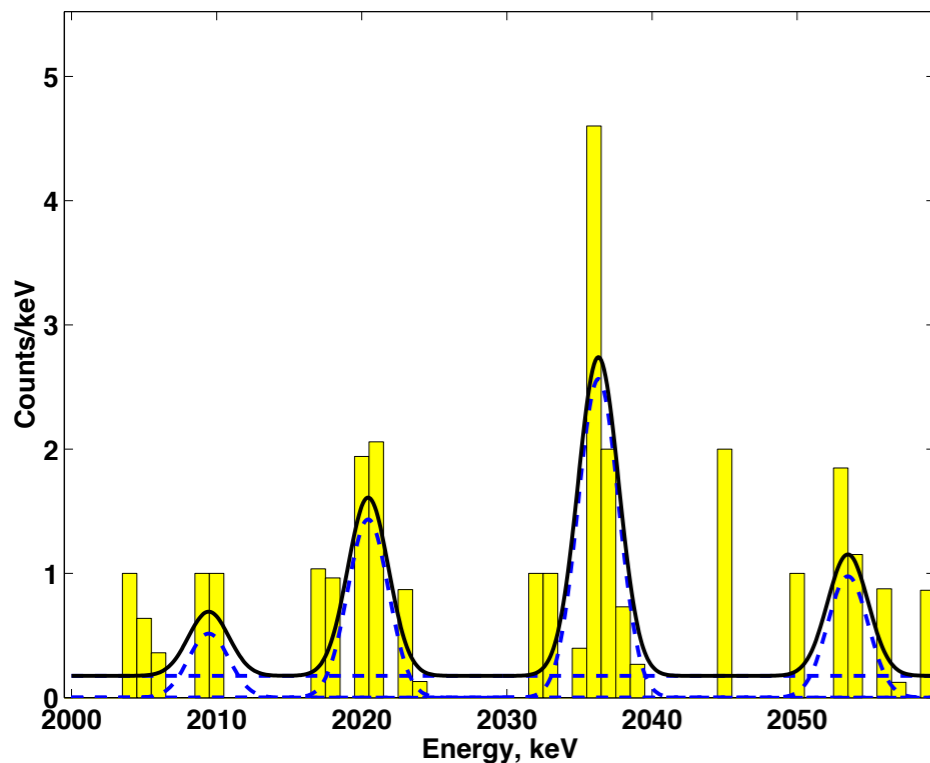
J. Barea, J. Kotila, F. Iachello, PRC 91 034304 (2015)

^{76}Ge claim

Evidence for Neutrinoless Double Beta Decay, H.V. Klapdor-Kleingrothaus, A. Dietz, H. L. Harney, I.V. Krivosheina, Mod. Phys. Lett. A16 (2001) 2409-2420, arXiv:hep-ph/0201231.

Evidence in favor of the observation of neutrinoless double-beta decay of ^{76}Ge is claimed, with $T_{1/2} = (0.8-18.3) \times 10^{25}$ y at 95% CL and best value $T_{1/2} = 1.5 \times 10^{25}$ y.

The corresponding effective neutrino mass is $m_{\beta\beta} = 0.11-0.56$ eV and best value $m_{\beta\beta} = 0.39$ eV.



Search for neutrinoless double beta decay with enriched ^{76}Ge in Gran Sasso 1990-2003,

H.V. Klapdor-Kleingrothaus, I.V. Krivosheina, A. Dietz, O. Chkvorets, Phys. Lett. B586 (2004) 198-212, arXiv:hep-ph/0404088

Significance [$kg y$]	Detectors	$T_{1/2}^{0\nu}$ [y] (3σ range)	$\langle m \rangle$ [eV] (3σ range)	Conf. level (σ)
<i>Period 1990 ÷ 2003</i>				
71.7	1,2,3,4,5	$(0.69 - 4.18) \times 10^{25}$ $1.19 \times 10^{25*}$	$(0.24 - 0.58)$ 0.44^*	4.2

^{76}Ge claim after GERDA

Comparison with Phys. Lett. B 586 198 (2004) claim

- Compare **two hypotheses**

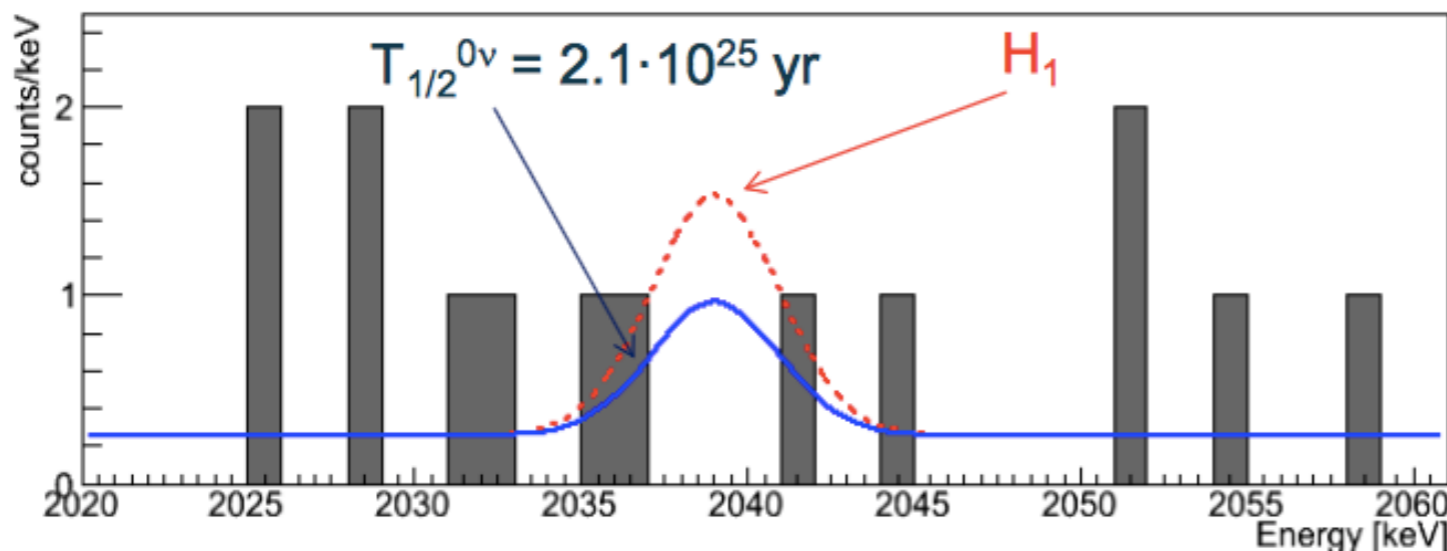
- **H_1** : $T_{1/2}^{0\nu} = 1.19^{+0.37}_{-0.23} \cdot 10^{25}$ yr (*) vs. **H_0** : background only

Expected **Signal** (w/ PSD): (5.9 ± 1.4) cts in $\pm 2\sigma$

Expected **Background** (w/ PSD): (2.0 ± 0.3) cts in $\pm 2\sigma$

Observed: **3.0** in $\pm 2\sigma$ (0 in $\pm 1\sigma$)

L. Pandola, SSP2015



Claim strongly disfavoured

GERDA only:

Profile likelihood:

$P(N^{0\nu}=0|H_1)=0.01$

Bayes factor

$P(H_1)/P(H_0)=0.024$

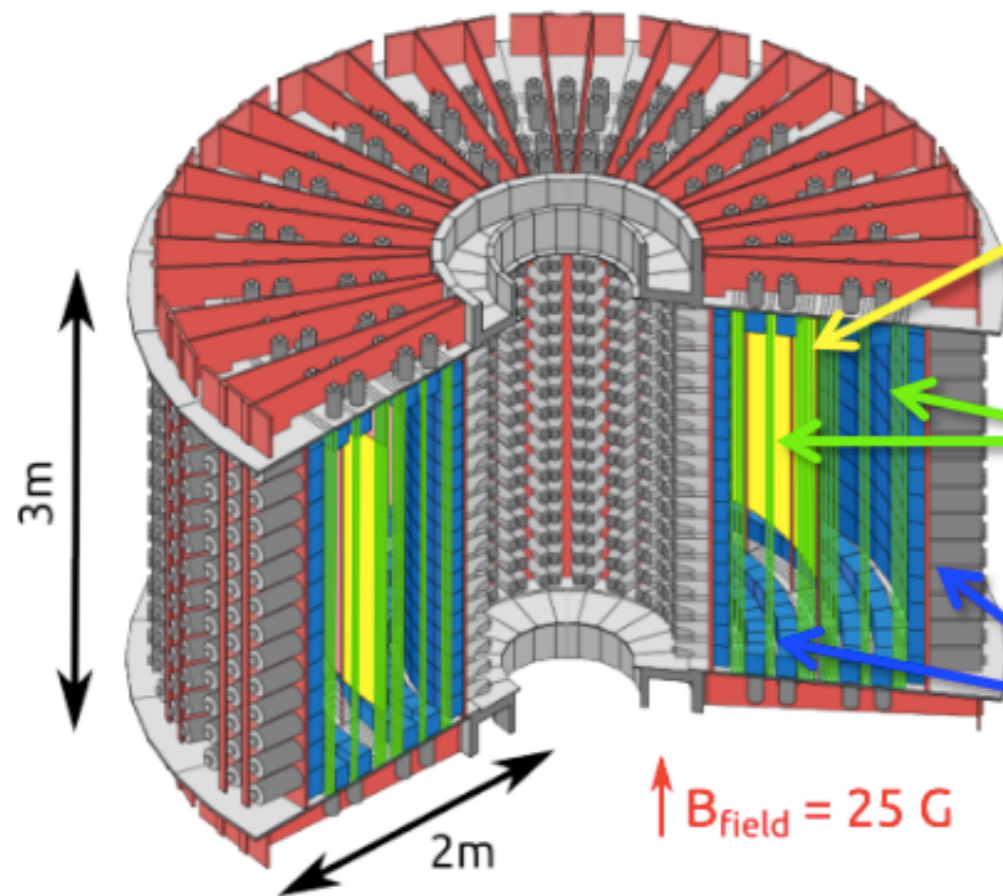
GERDA+HdM+IGEX:

Bayes factor

$P(H_1)/P(H_0)=0.0002$

(*) $T_{1/2}^{0\nu}$ from Mod. Phys. Lett. A 21 (2006) 1547 **not** considered because of the **inconsistencies** (= missing efficiency factors, *problem in the conversion from counts to $T_{1/2}^{0\nu}$*) pointed out in Ann. Phys. 525 (2013) 269

The NEMO-3 detector



Largest mass/exposure
with ^{100}Mo (6.9 kg)
and ^{82}Se (0.93 kg)

- ◆ ~10 kg of $\beta\beta$ -decay isotopes
 - ◆ ^{100}Mo , ^{82}Se , ^{130}Te , ^{116}Cd , ^{150}Nd , ^{96}Zr and ^{48}Ca
 - ◆ Produced as **thin foils** 30-60mg/cm²
 - ◆ Typically 2.5m in height, 63-65 mm wide

- ◆ Tracking chamber (both sides of foil)
 - ◆ 6180 Geiger cells operating in gas mixture of 95% He, 4% alcohol, 1% Ar and 0.1% H₂O
 - ◆ **Vertex resolution** $\sigma_{xy} \sim 3 \text{ mm}$, $\sigma_z \sim 10 \text{ mm}$

- ◆ Calorimeter (top, bottom, in and out)
 - ◆ 1940 optical modules
 - ◆ 3" and 5" PMTs + plastic scintillator blocks
 - ◆ FWHM 14-17%, $\sigma_t \sim 250 \text{ ps}$ for electrons @1MeV

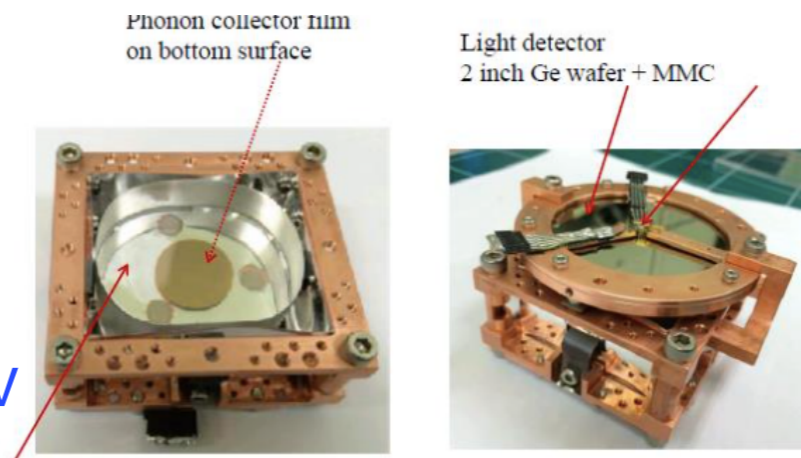
AMORE

- Advanced **M**olibdenum **R**are process **E**xperiment at Yangyang (2 km.w.e.) Korea
- $^{40}\text{Ca}^{100}\text{MoO}_4$ scintillating bolometers read out by MicroMagneticCalorimeter

▶ Ca needs to be depleted in ^{48}Ca due to its high $2\nu\beta\beta$ rate

▶ $LY \sim 2 \text{ keV/MeV}$,

▶ $\Delta E_{\text{Heat}} \sim 12 \text{ keV}$ on small crystals, $\Delta E_{\text{light}} \sim 500 \text{ eV}$



stage	start run	background (cts/kev/ke/y)	$\tau_{1/2}$ Sensitivity(y)	$\langle m_{\beta\beta} \rangle$ (eV)
AMoRE pilot	Jan 2015	0,01	$\sim 10^{24}$	0.4-1
AMoRE(10)	Sep 2016	0,002	$\sim 2 \cdot 10^{25}$	0.08-0.22
AmoRE(200)	Jan 2019	0,0002	$\sim 4 \cdot 10^{26}$	0.016-0.047