

La ricerca sperimentale dei neutrini di Majorana

Oliviero Cremonesi
INFN Sezione di Milano Bicocca

Neutrini in Cosmologia
16 Maggio 2011 - Aula Emiciclo dell'Orto Botanico di Padova

Riassunto

1. Introduzione

- Scopo
- EMN
- Approcci Sperimentali
- Sensibilità
- Tecniche Sperimentali

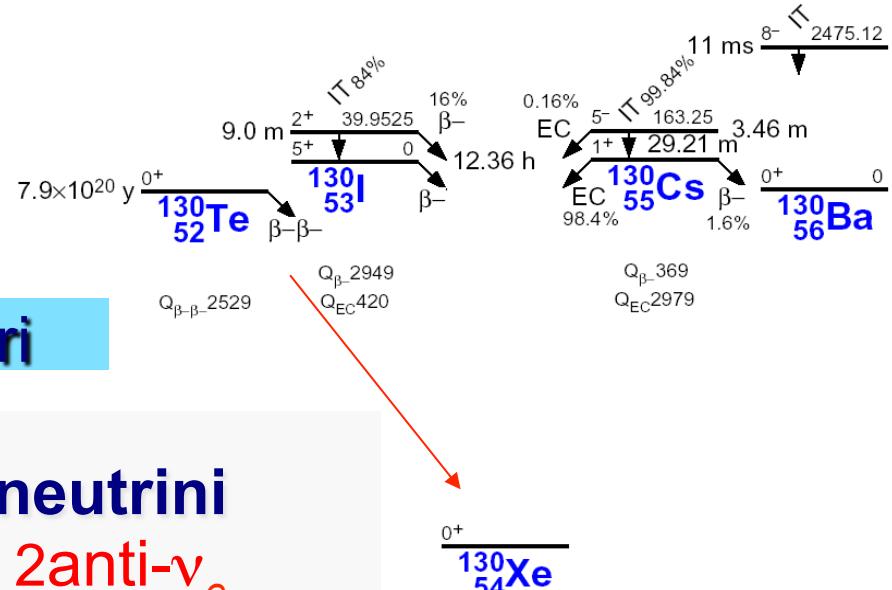
2. Situazione attuale

3. Esperimenti a breve ...

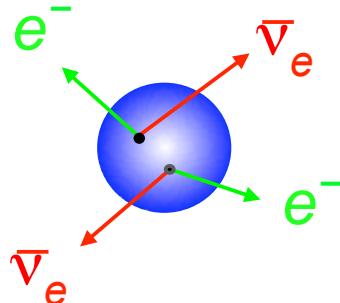
... e lungo termine

Il Doppio Decadimento Beta Nucleare

Decadimento Nucleare RARO
 $(A, Z) \rightarrow (A, Z+2) + 2e^- + [...]$

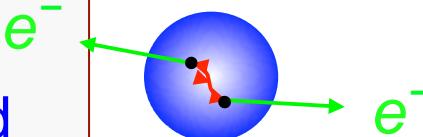


E' possibile per numerosi **nuclei pari-pari**



$\beta\beta(2\nu)$: il modo a due neutrini
 $(A, Z) \rightarrow (A, Z+2) + 2e^- + 2\nu_e$
Permesso dal Modello Standard:
transizione debole del secondo ordine

$\beta\beta(0\nu)$: il modo senza neutrini
 $(A, Z) \rightarrow (A, Z+2) + 2e^-$
Non ammesso dal Modello Standard
Natura e scala di massa del Neutrino

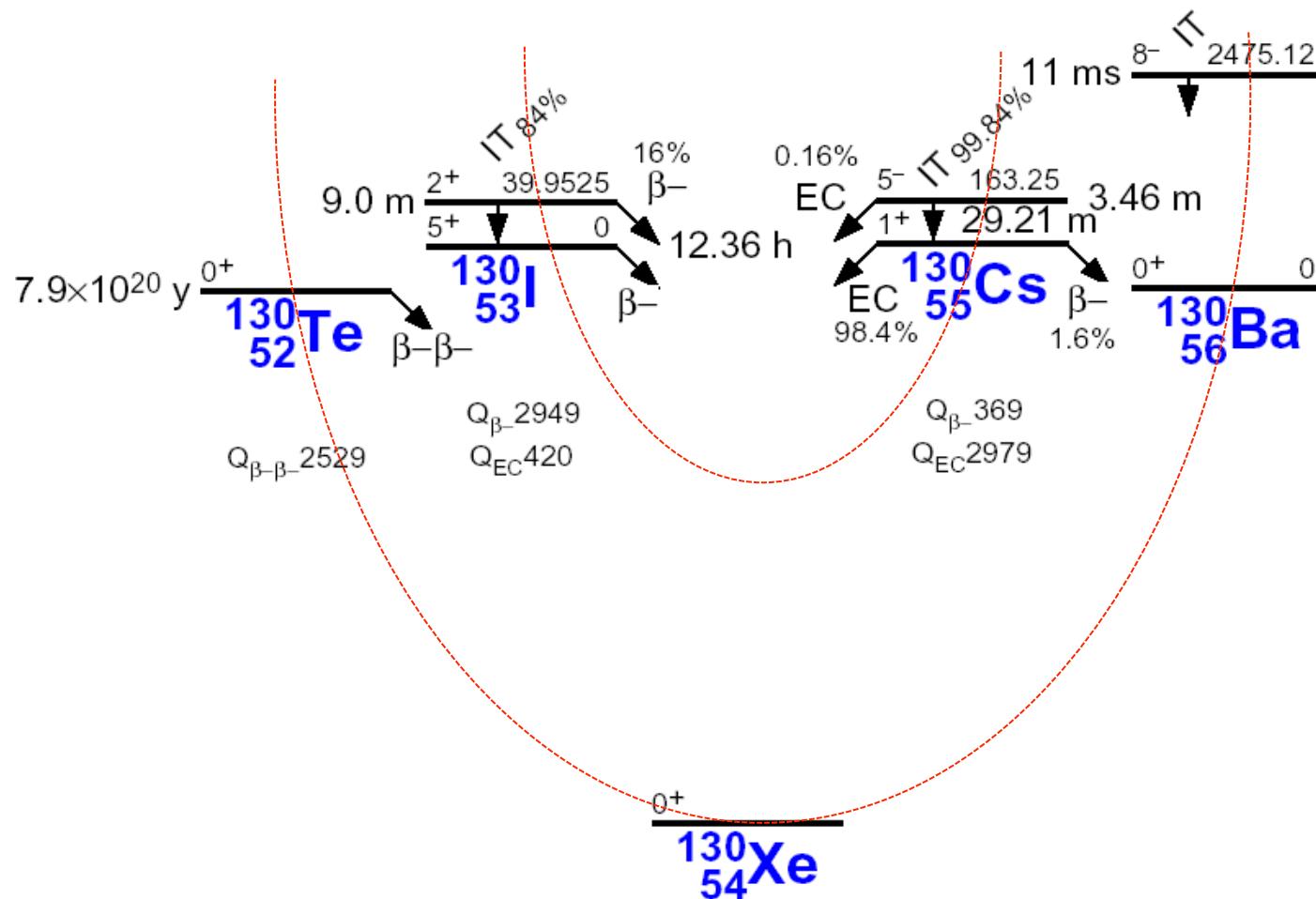


$\Delta L=2$
 $\nu = \nu^c$
 $m_\nu > 0$

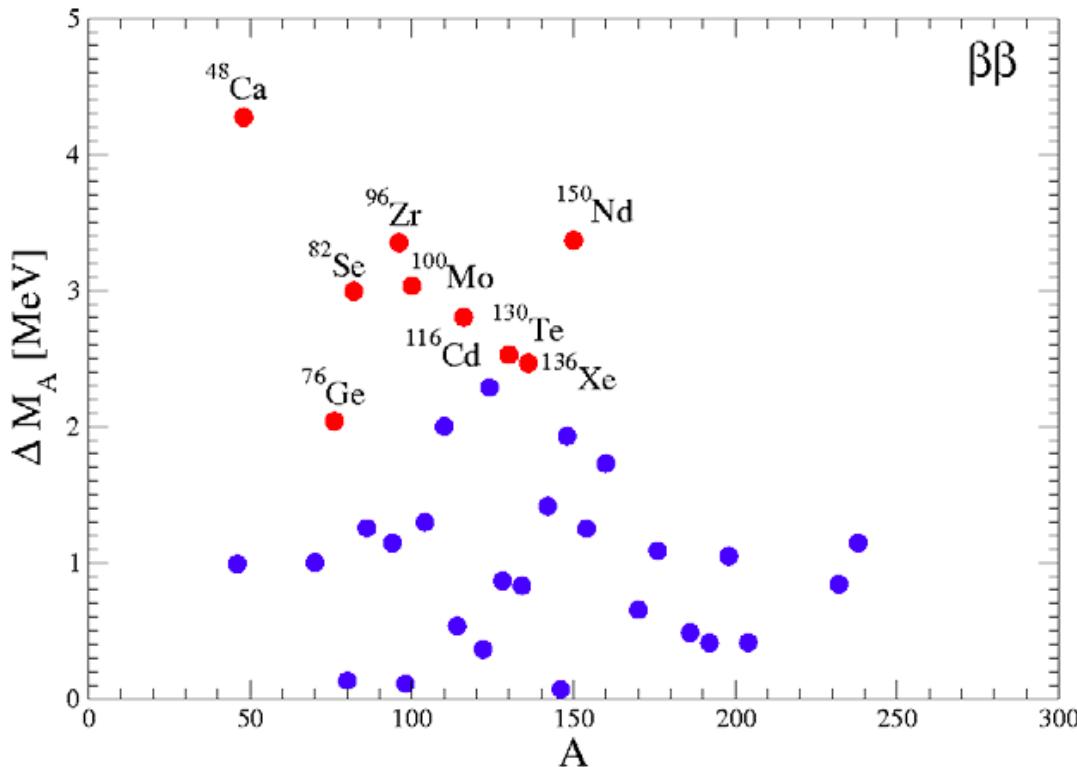
Processo Unico per stabilire proprietà del neutrino

Massa Nucleari

$$E_B(\text{MeV}) = a_v A - a_a (N - Z)^2/A - a_c Z^2/A^{1/3} - a_s A^{2/3} \pm a_\delta/A^{3/4}$$

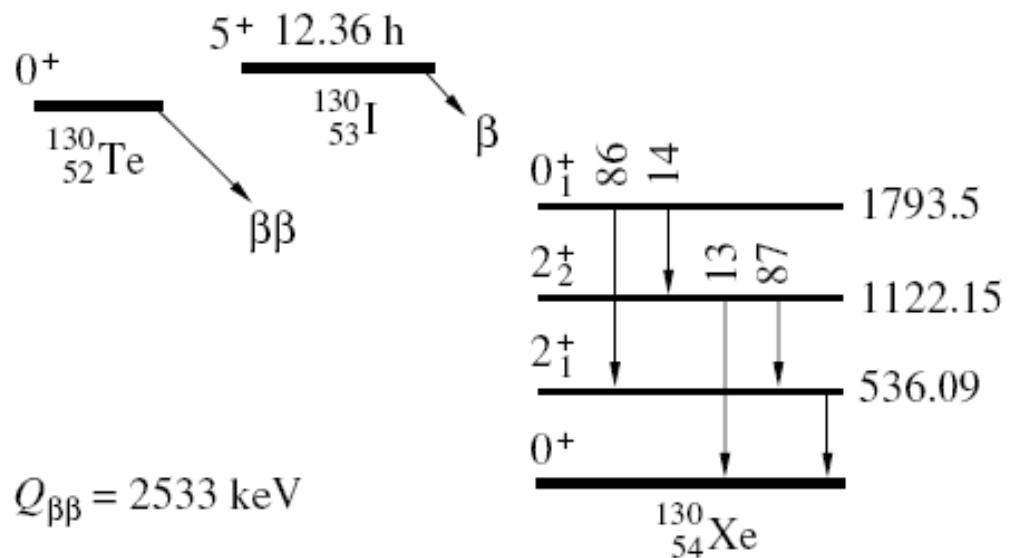


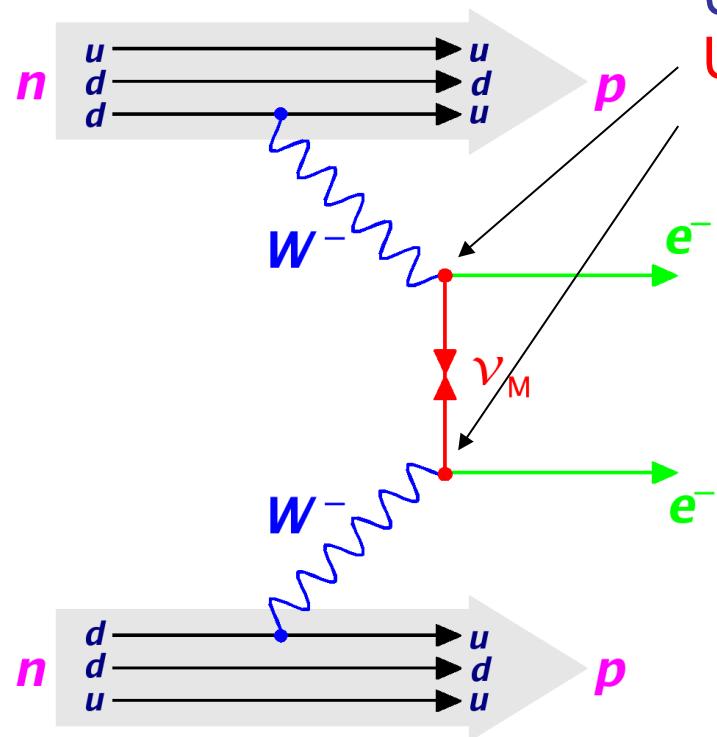
Il Doppio Decadimento Beta Nucleare



Possibile per numerosi nuclei.
Condizioni favorevoli per un
Certo numero di nuclei pari-pari

Decadimento sugli stati eccitati
Meno probabile ma interessante
dal punto di vista sperimentale





Un neutrino LH ($L=-1$) è assorbito ad un vertice
Un antineutrino RH ($L=1$) è emesso all'altro

• Particella di Majorana

- Inversione dell'elicità

Nel limite di piccole masse, l'ampiezza è proporzionale ad un solo parametro:

la **massa efficace del neutrino**

$$\langle m_\nu \rangle = \sum_k U_{ek}^2 m_k \\ = c_{12}^2 c_{13}^2 m_1 + s_{12}^2 c_{13}^2 m_2 e^{i\alpha} + s_{13}^2 e^{i\beta} m_3$$

Sette parametri incogniti:

- 3 masse: m_k
- 2 angoli: θ_{12} e θ_{13}
- 2 fasi violanti CP: α and β

Un UNICO vincolo sperimentale
Indispensabili più misure COMPLEMENTARI

Mixing e Gerarchie di massa

La spiegazione degli esperimenti di oscillazione dei neutrini (solari, atmosferici, reattore, acceleratore) richiede l'esistenza di un mescolamento dei 3 stati a chiralita' L

$$\nu_{jL} = \sum_k U_{jk} \nu_{kl} \quad U = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13} & -c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} diag(1, e^{\alpha_{21}/2}, e^{\alpha_{31}/2})$$

dove U e' una matrice unitaria e ν_j sono autostati di massa (di Majorana). Si avranno così due Δm^2 indipendenti: Δm_{21}^2 e Δm_{32}^2

- Δm^2 nel range di valori misurato dagli esperimenti sui ν ($e \leftrightarrow \mu$) solari (10^{-4} eV 2)
- Δm^2 nel range di valori misurato dagli esperimenti sui ν ($\mu \leftrightarrow \tau$) atmosferici (10^{-3} eV 2)

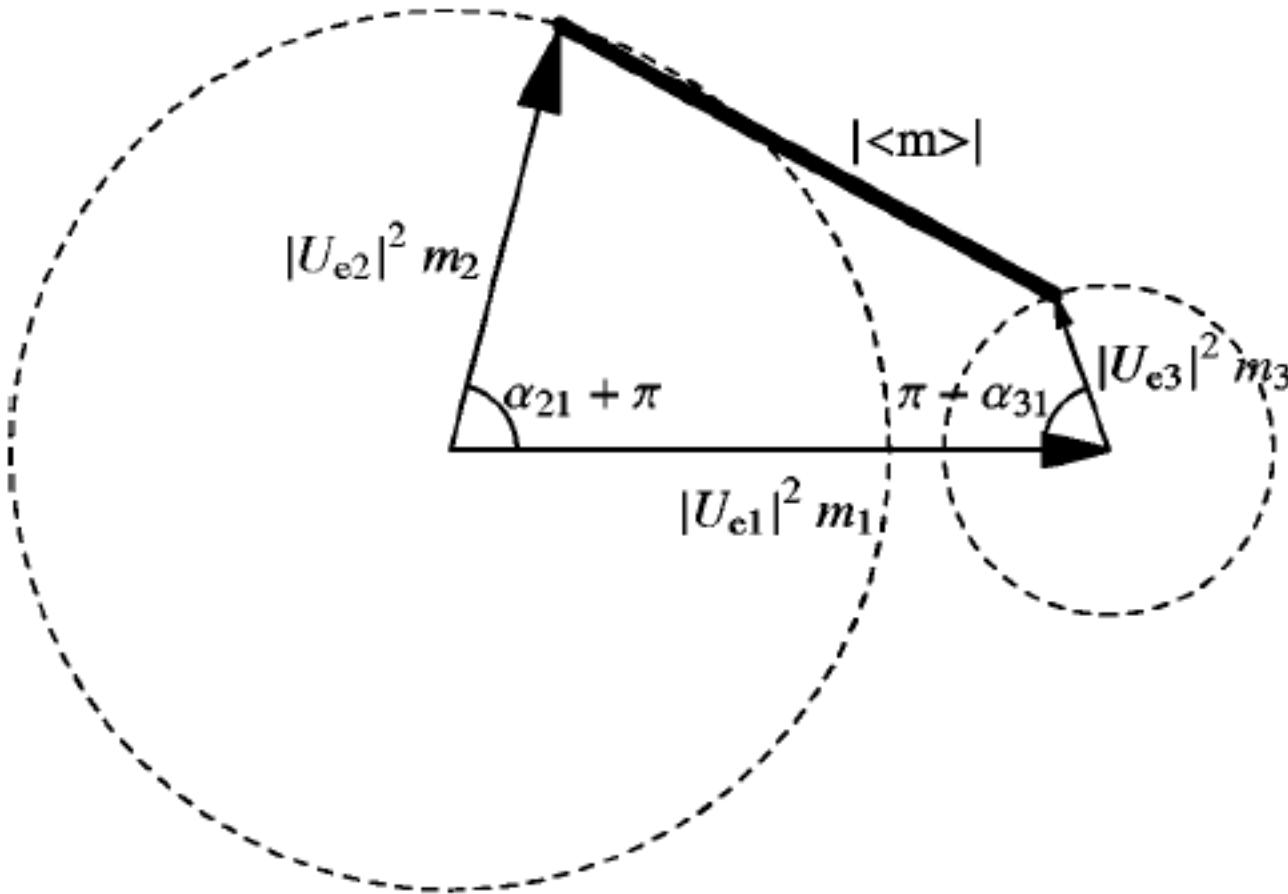
Si hanno allora tre diversi casi (gerarchie) con differenti conseguenze su DBD e misure cinematiche di m_ν , ma fenomenologia simile per le oscillazioni:

- gerarchia diretta: m_1 (Δm^2 (sol)) m_2 (Δm^2 (atm)) m_3
- gerarchia inversa: m_1 (Δm^2 (atm)) m_2 (Δm^2 (sol)) m_3
- gerarchia quasi degenera: m_1 (Δm^2) m_2 (Δm^2) m_3 ($m_1 \gg \Delta m^2$)



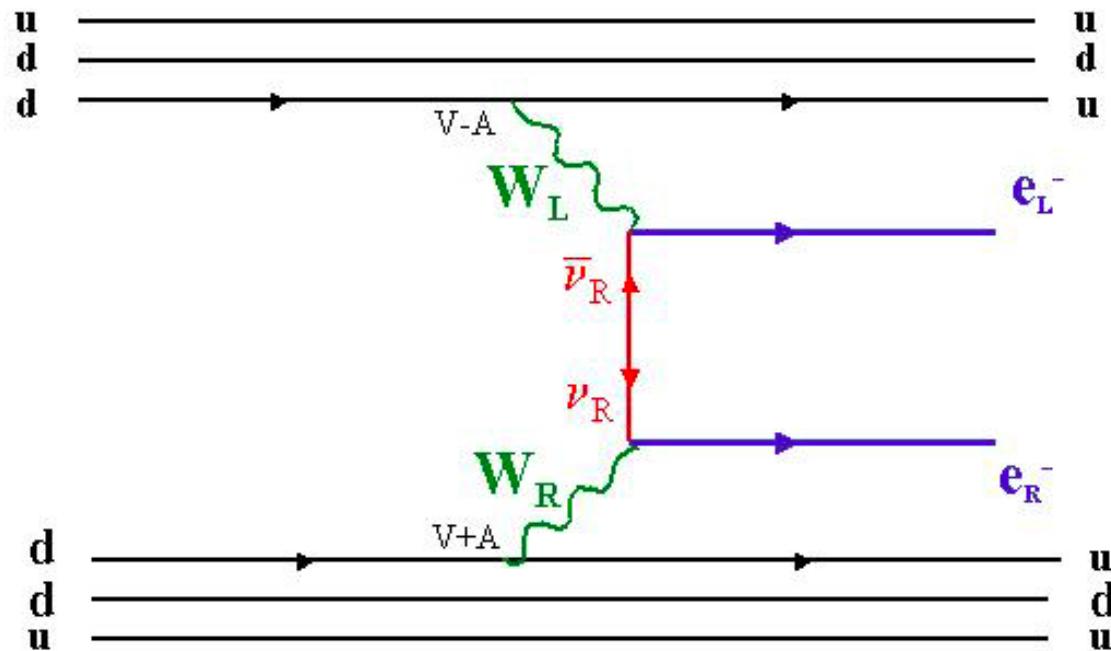
Fasi di Majorana

Effetto delle fasi di Majorana: interpretazione grafica



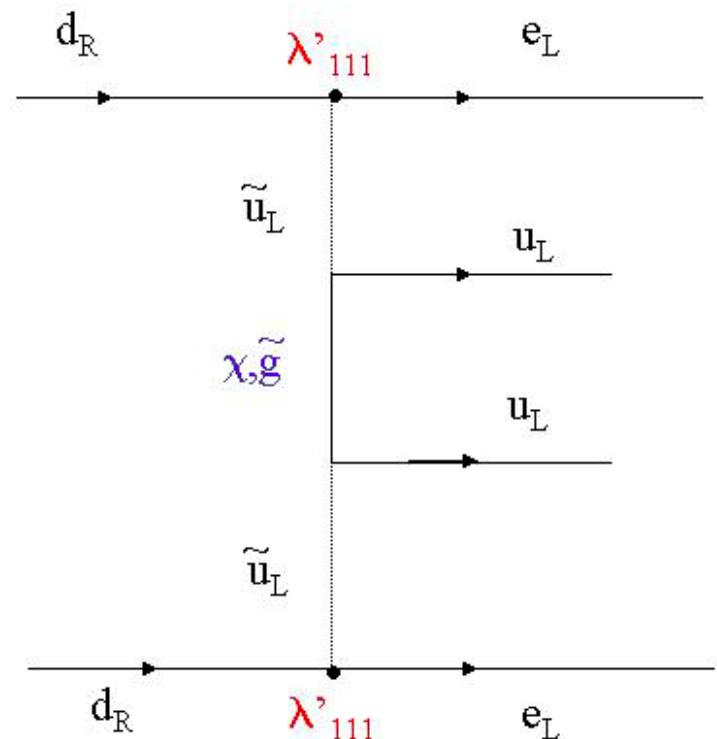
$$\langle m \rangle = | |U_{e1}|^2 m_1 + e^{i\alpha_1} |U_{e2}|^2 m_2 + e^{i\alpha_2} |U_{e3}|^2 m_3 |$$

Processi esotici

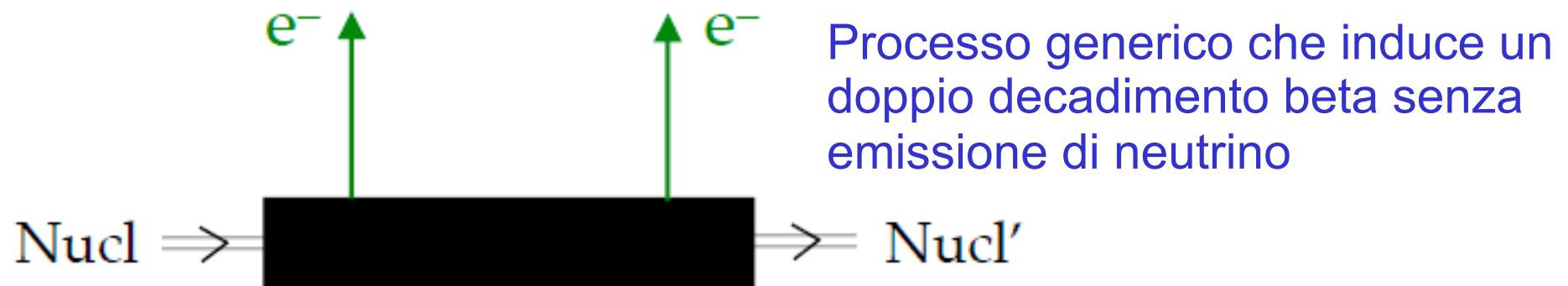


(V+A): $\langle m_V \rangle, \langle \lambda \rangle, \langle \eta \rangle$

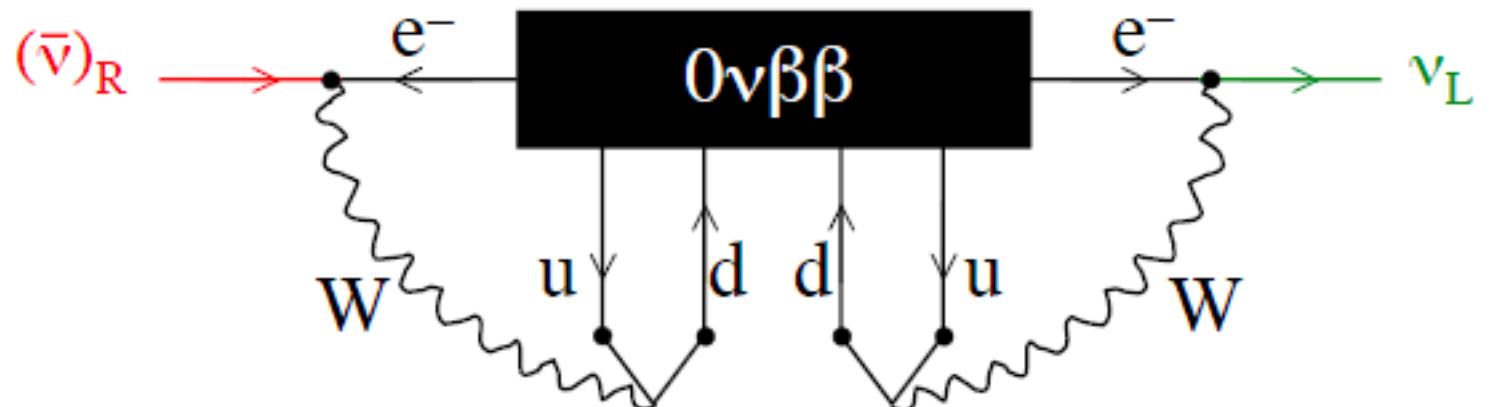
SUSY $\lambda'_{111}, \lambda'_{113}, \lambda'_{131}, \dots$



$\beta\beta(0\nu)$ e m_ν : teorema di Schechter-Valle



Termine di massa corrispondente



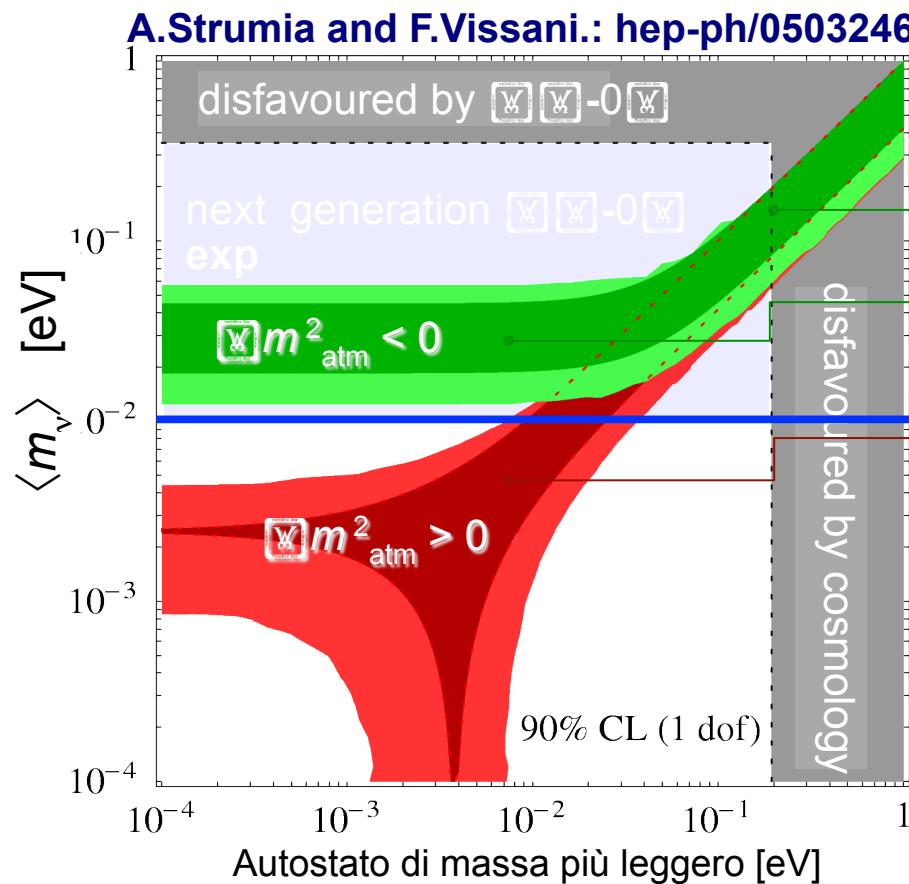
Gerarchie di Massa del Neutrino

Gerarchie: possibili ordinamenti delle masse dei neutrini compatibili con i risultati degli esperimenti sulle oscillazioni

Il parametro misurato sperimentalmente può essere espresso in funzione dell'autostato di massa più leggero del neutrino

Appaiono così due bande, corrispondenti alle gerarchie **inversa** e **diretta**

Nel caso degenero (il solo finora accessibile) le due bande sono indistinguibili



degenero: $m_1 \approx m_2 \approx m_3$

inversa: $m_3 \ll m_1 \approx m_2$

normale: $m_1 \approx m_2 \gg m_3$

$$\langle m_\nu \rangle = f(m_{\text{low}}, U_{\text{ek}})$$

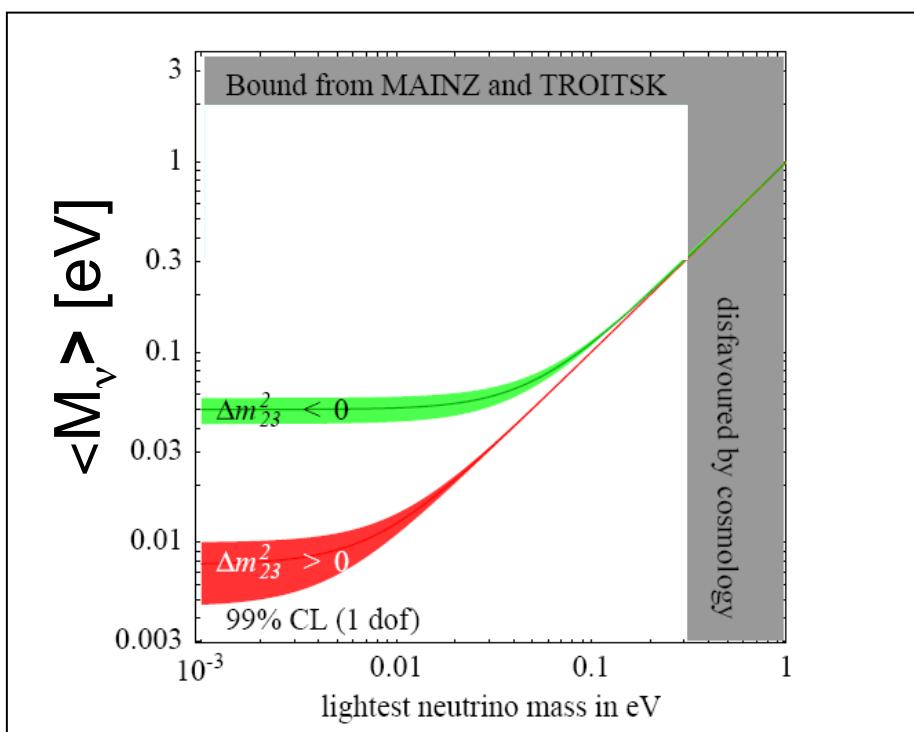
Risultati attuali

Informazioni combinate:

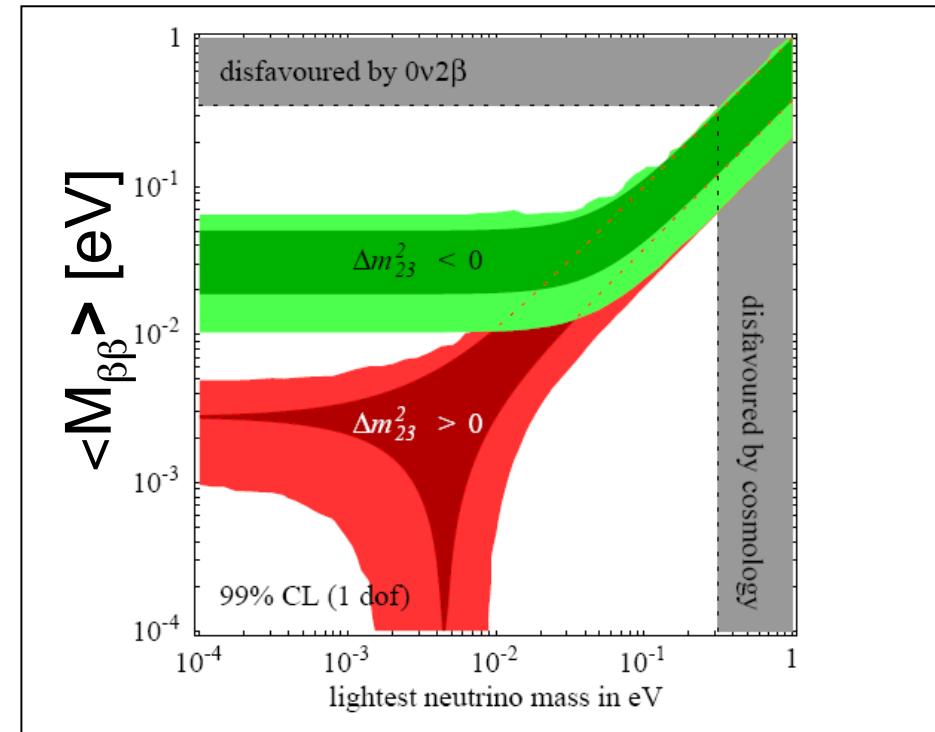
- **Cosmologia** $\sum m_i$
- **β singolo** $[\sum m_i^2 |U_{ei}|^2]^{1/2}$
- **β doppio** $|\sum m_i |U_{ei}|^2 e^{i\alpha_i} |$

Sensibilità (eV)

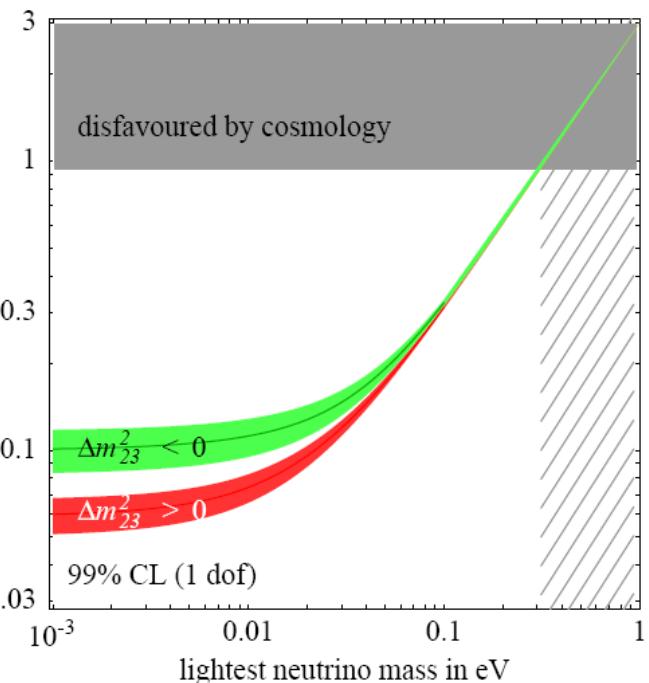
Metodo	Presente	Futuro
Cosmologia	0.7-1.0	0.1
$\beta\beta(0\nu)$	0.5	0.05
β singolo	2.2	0.2



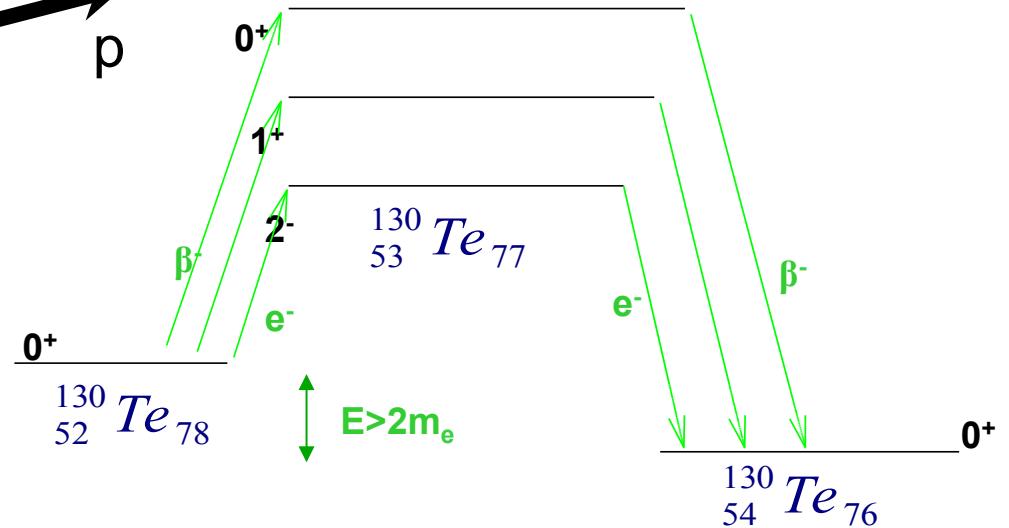
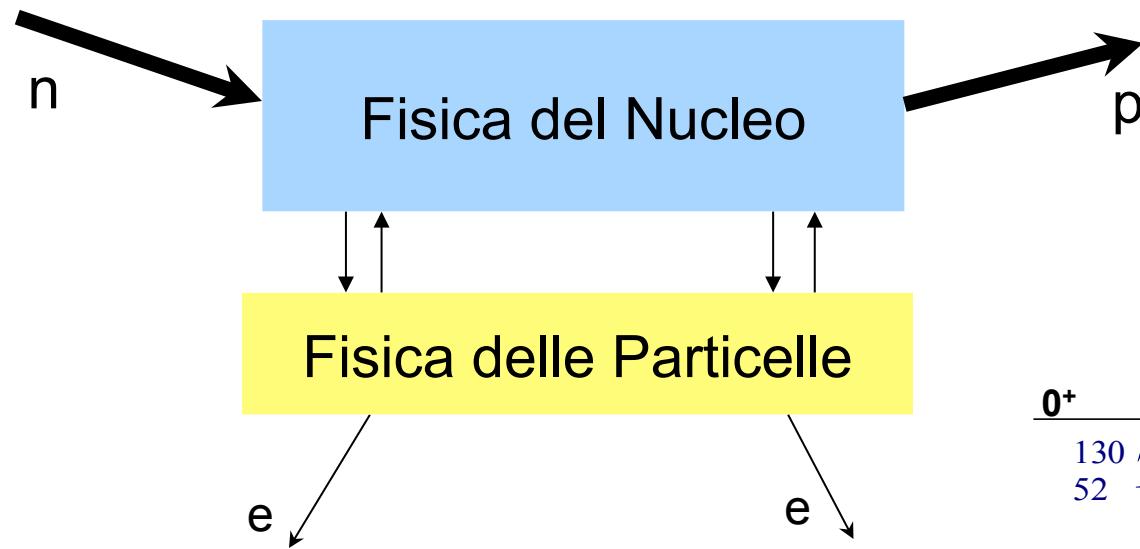
Strumia-Vissani [hep-ph/0503246](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0503246)



$[\Delta M^2]$ [eV²]



Il Tasso di Decadimento



Spazio delle fasi

Elemento di matrice nucleare

incertezze

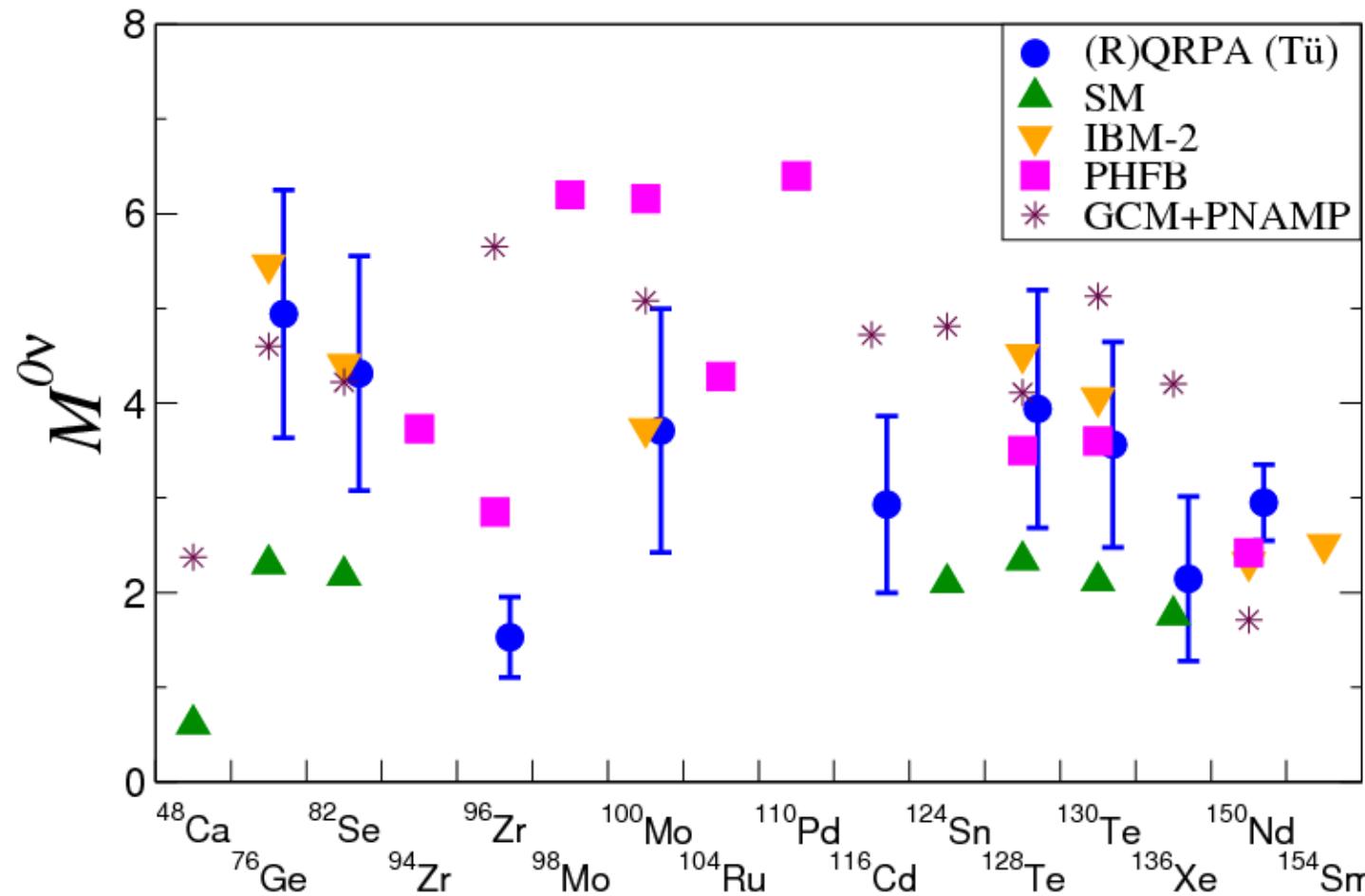
$$\tau^{-1} = G_{0\nu} |M^{0\nu}|^2 \left| \langle m_{\beta\beta} \rangle \right|^2 \equiv F_N \frac{\left| \langle m_{\beta\beta} \rangle \right|^2}{m_e^2}$$

Massa efficace del Neutrino

Fattore di Merito Nucleare

$\tau_i = \tau_j \frac{F_N^j}{F_N^i}$

Elementi di Matrice Nucleare: stato



Valori medi:

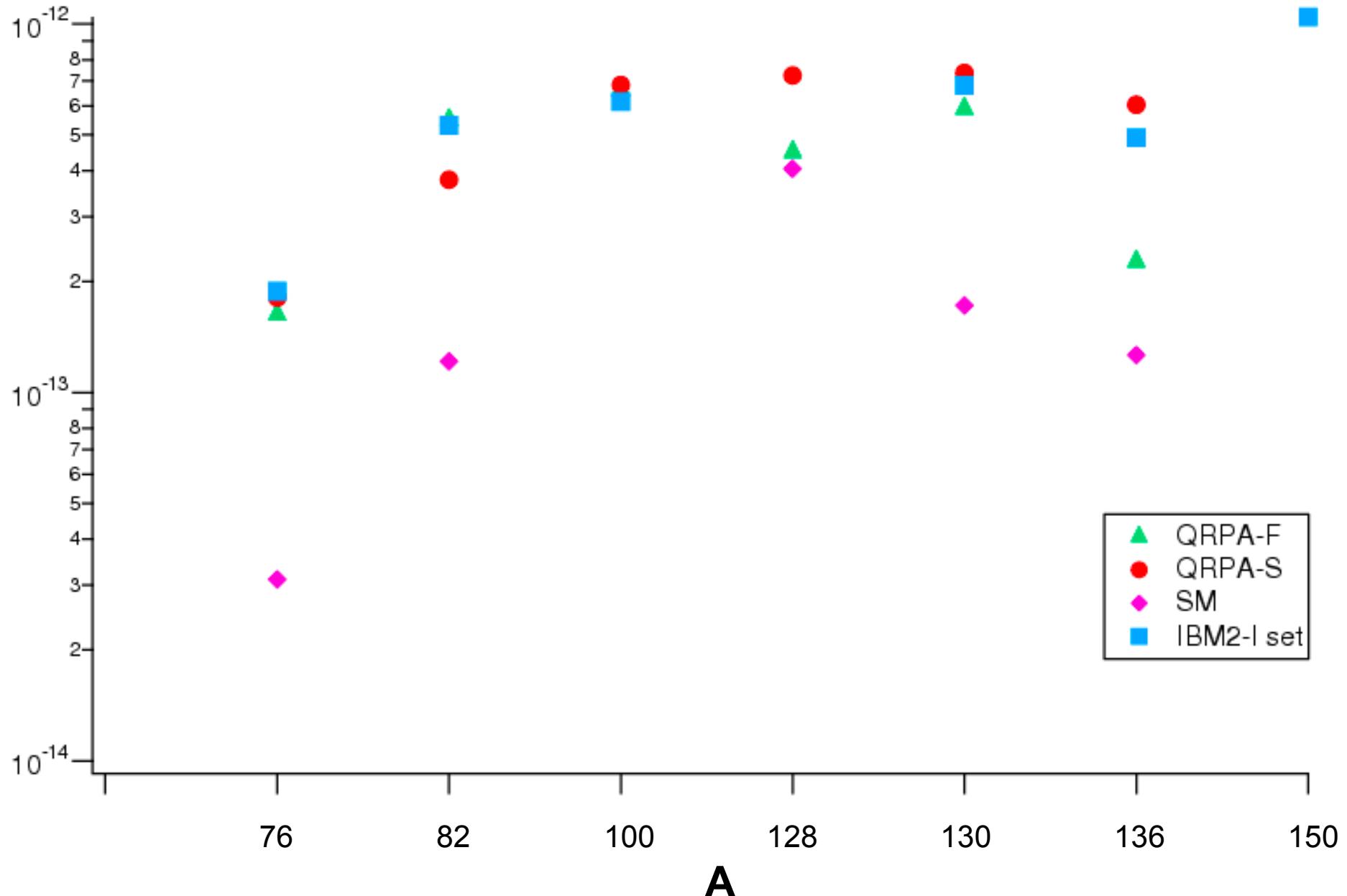
Intervalli di variabilità
non indicati

Errori dell'ordine
25-30%

- QRPA da F. Šimkovic, A Faessler, V. Rodin, P. Vogel, and J. Engel, Phys. Rev. C77, 045503 (2008), with $gA = 1.25$, Jastrow SRC.
- ◆ SM da E. Caurier, J. Menendez, F. Nowacki, and A. Poves, Phys. Rev. Lett. 100, 052503 (2008).
- IBM-2 da J.Barea and F.lachello, Phys. Rev. C79, 044301 (2009), $gA = 1.25$, Jastrow SRC.

Fattore di merito nucleare

E' il vero parametro che determina la sensibilita': $F_N = |M^{0v}|^2 \cdot G_{0v}$



Elementi di Matrice Nucleare ... “Roadmap”

Goal: Accordo entro 25% di tutte le stime con diversi metodi.

Inclusione di tutti I metodi: calcolo di prova di M_{GT} , M_F , M_T for $^{76}\text{Ge}-^{76}\text{Se}$ (GERDA) e $^{130}\text{Te}-^{130}\text{Xe}$ (CUORE)

- Con le stesse assunzioni per gli stati di particella singola
- Stessi valori di $g_A = 1.25$, $g_V = 1.00$
- Stesso operatore di transizione (richiesta più importante)

Controllo di tutte le funzioni d'onda: Tutti i metodi dovrebbero produrre spettri dei nuclei iniziali e finali da confrontare con I dati sperimentali.

Controllo degli integrali radiali

Firma (segnatura)



Segnale:

- Un nuovo isotopo (ionizzato)
- Due elettroni

In principio si possono quindi ricavare:

Informazione spettroscopica

- Energie dei singoli elettroni
- Angolo tra le direzioni degli elettroni
- Somma delle energie degli elettroni

Spesso la solo informazione disponibile

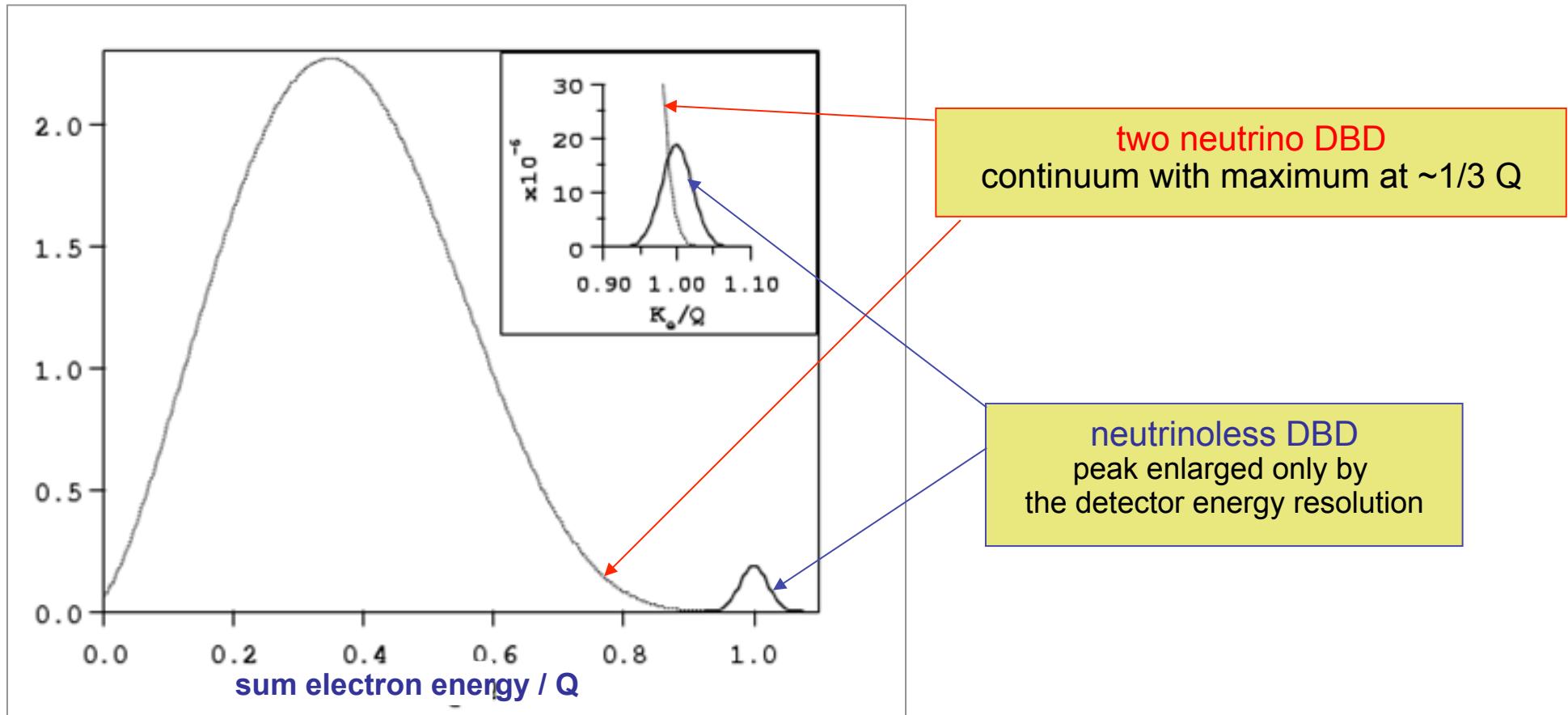
Ione figlio ($A,Z+2$)

Raggi gamma

- Decadimenti su stati eccitati
- Fotoni da 511 keV in decadimenti con β^+

DBD: energia somma degli elettroni

La **forma** dello spettro della somma delle energie degli elettroni **permette di distinguere** da sola tra i modi di decadimento principali



Segniture addizionali:

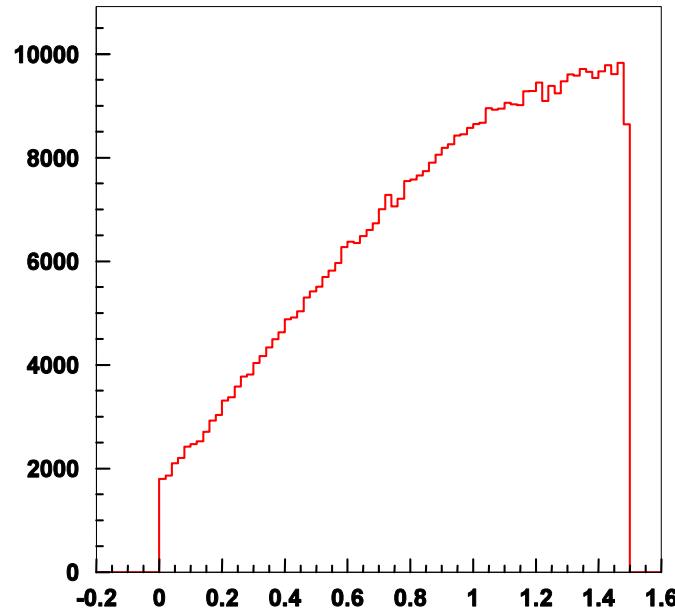
- Distribuzione delle energie dei singoli elettroni
- Distribuzione angolare

Nuclidi più promettenti

$Q \sim 2\text{-}3 \text{ MeV}$

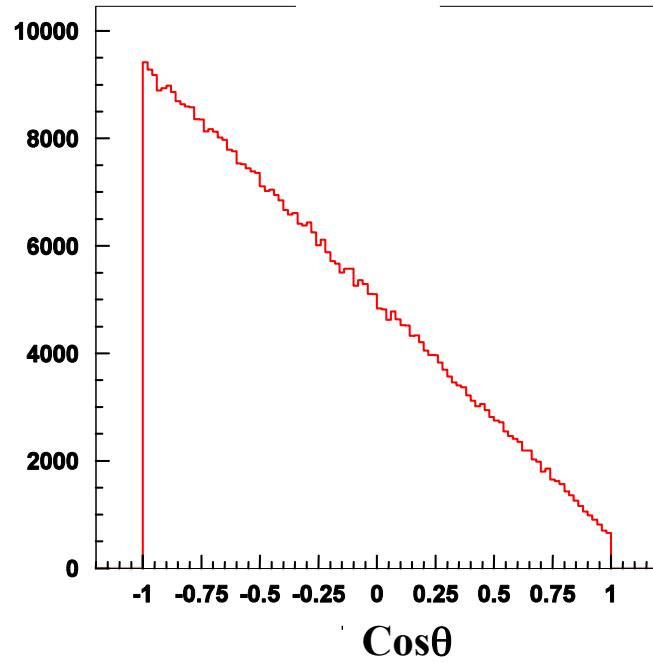
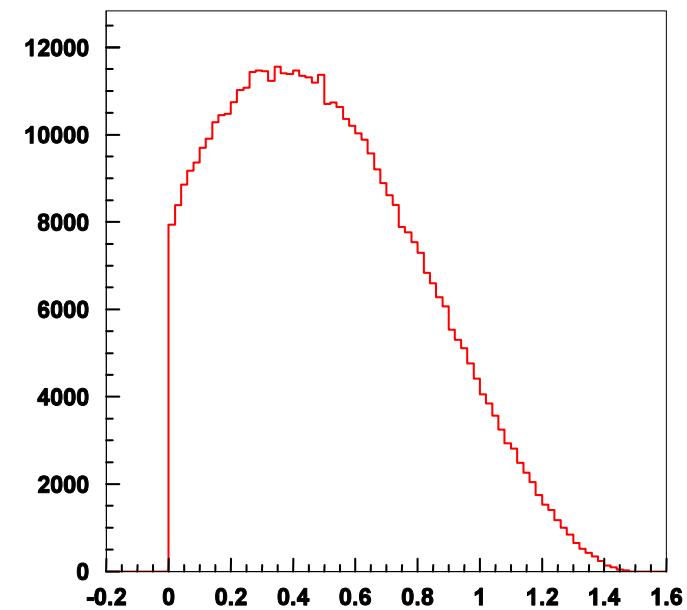
DBD: energie di singolo elettrone

Scambio di un neutrino leggero

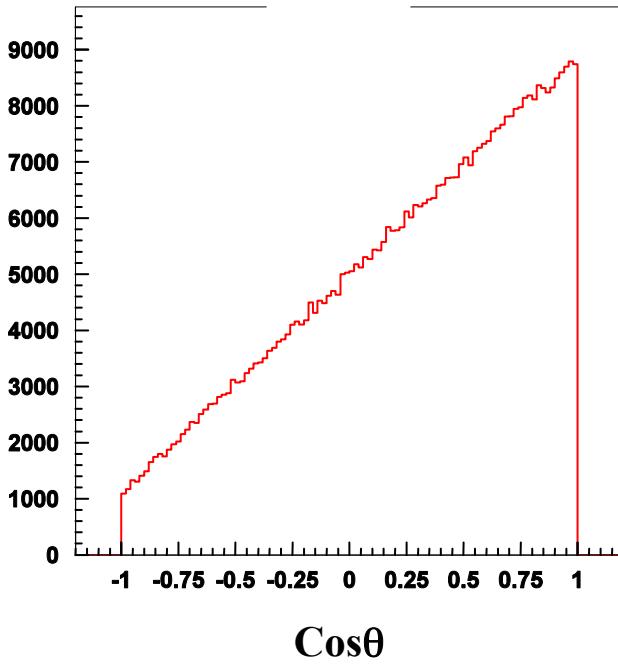


Spettro energetico
dell'elettrone

Corrente V+A



Distribuzione angolare



Tasso sperimentale e sensibilità

Tasso sperimentale $\beta\beta-0\nu$

con $N_{\beta\beta}$ decadimenti $\beta\beta-0\nu$ osservati

$$\tau_{1/2}^{-1} = \ln 2 \frac{\varepsilon N_{nuclei} t_{misura}}{N_{\beta\beta}}$$

N_{nuclei}	numero di nuclei attivi
t_{meas}	tempo di misura [y]
M	massa del rivelatore [kg]
ε	efficienza di rivelazione
i.a.	Abbondanza isotopica
A	numero atomico
ΔE	risoluzione energetica [keV]
Bkg	tasso di fondo [c/keV/y/kg]

Sensibilità sperimentale a $\tau_{1/2}^{0\nu}$

Con nessun decadimento $\beta\beta-0\nu$ osservato

$$N_{\beta\beta} \leq (bkg \cdot \Delta E \cdot M \cdot t_{meas})^{1/2} \text{ at } 1\sigma$$

$$\Sigma(\tau_{1/2}^{0\nu}) \propto \varepsilon \frac{a.i.}{A} \sqrt{\frac{M \cdot t_{misura}}{\Delta E \cdot bkg}}$$

per $bkg = 0$, a 1σ

$$\Sigma^0(\tau_{1/2}^{0\nu}) \propto \varepsilon \frac{a.i.}{A} M \cdot t_{misura}$$

$$N_{TOT} \sim O(1)$$

Parametri cruciali:

- Abbondanza isotopica
- Massa
- Risoluzione energetica
- Livello del fondo

Strategie sperimentali

Rivelazione & identificazione dei nuclei figli (ricerche indirette)

- impossibile distinguere il canale di decadimento
- importante negli anni 70s-80s – non piu' perseguita in pratica

Esperimenti geochimici
Esperimenti radiochimici

Rivelazione in-linea dei due elettroni (ricerche dirette)

Alta risoluzione energ.
Basso fondo
Massa elevata
Ricostruzione eventi

Va rivelato un picco sopra un fondo continuo (0ν-DBD)

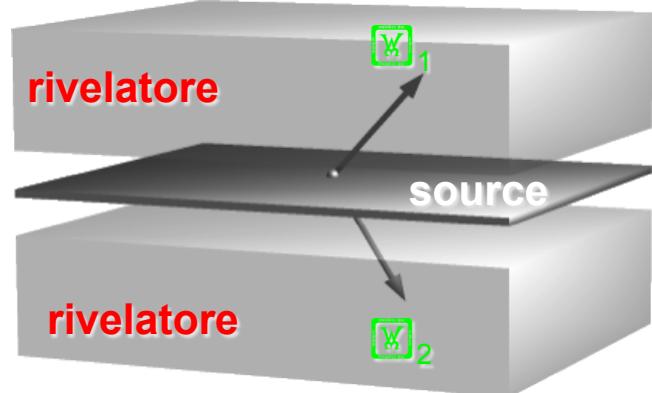
Schermo da raggi cosmici (interazioni dirette e attivazione)
→underground

materiali radio-puri
 $^{238}\text{U} - ^{232}\text{Th} \Rightarrow \tau \sim 10^{10} \text{ y}$
signal rate $\Rightarrow \tau > 10^{25} \text{ y}$

Esperimenti più sensibili al momento: 10 - 100 kg
Goal futuro: $\sim 1000 \text{ kg} \Rightarrow 10^{27} - 10^{28} \text{ nuclidi}$

rejzione fondo: Studio delle energie dei singoli elettroni e della loro distribuzione angolare

Approccio disomogeneo

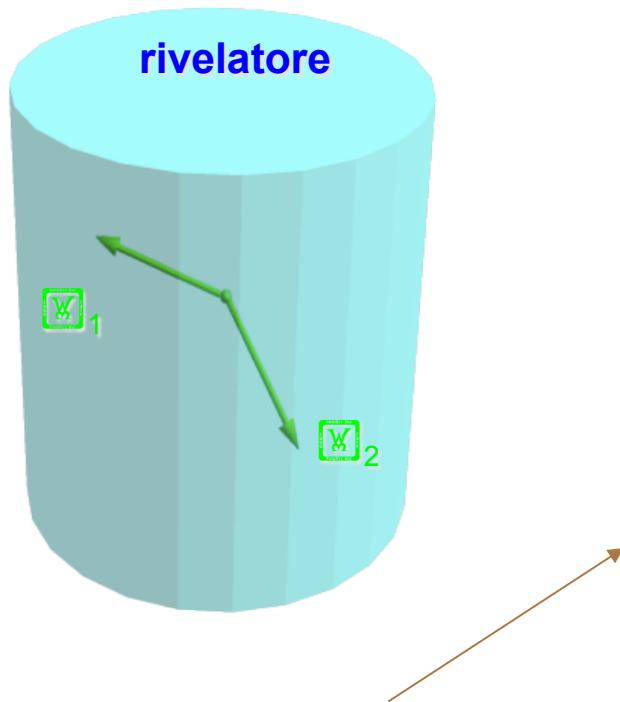


Sorgente \neq Rivelatore

- scintillatori
- TPC a gas
- Camere a deriva a gas
- Campo magnetico eTOF

- ☺ chiara ricostruzione della topologia dell'evento
- ☹ difficile avere grandi masse
- ☺ Parecchi candidati possono essere studiati con lo stesso rivelatore

Approccio omogeneo



Source \equiv Detector
(calorimetric technique)

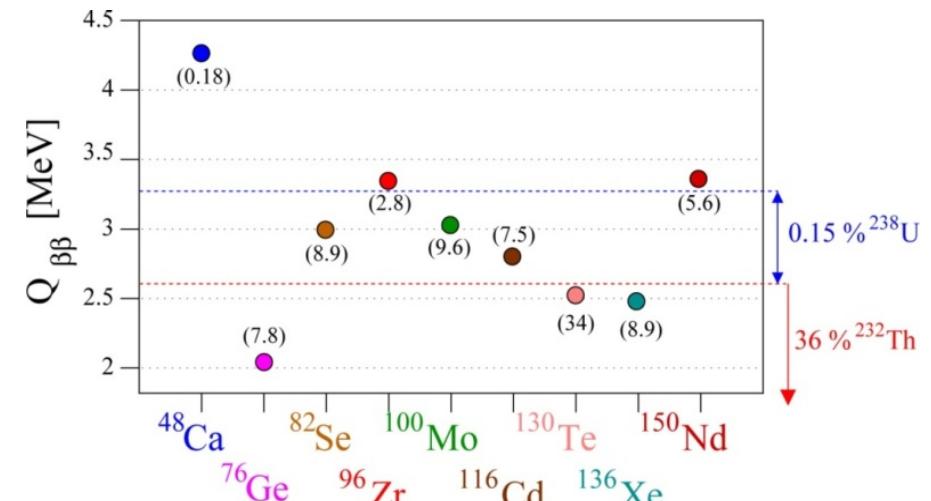
scintillation
phonon-mediated detection
solid-state devices
gaseous detectors

- ⌚ limitazioni sui materiali dei rivelatori
- 😊 masse molto elevate
dimostrato: fino a ~ 50 kg
proposto: fino a ~ 1000 kg
- 😊 con opportuna scelta del rivelatore elevata risoluzione energetica
- 😊 nei calorimetri a gas (Xe)
ricostruzione della topologia dell'evento
- ⌚ richieste spesso contrastanti

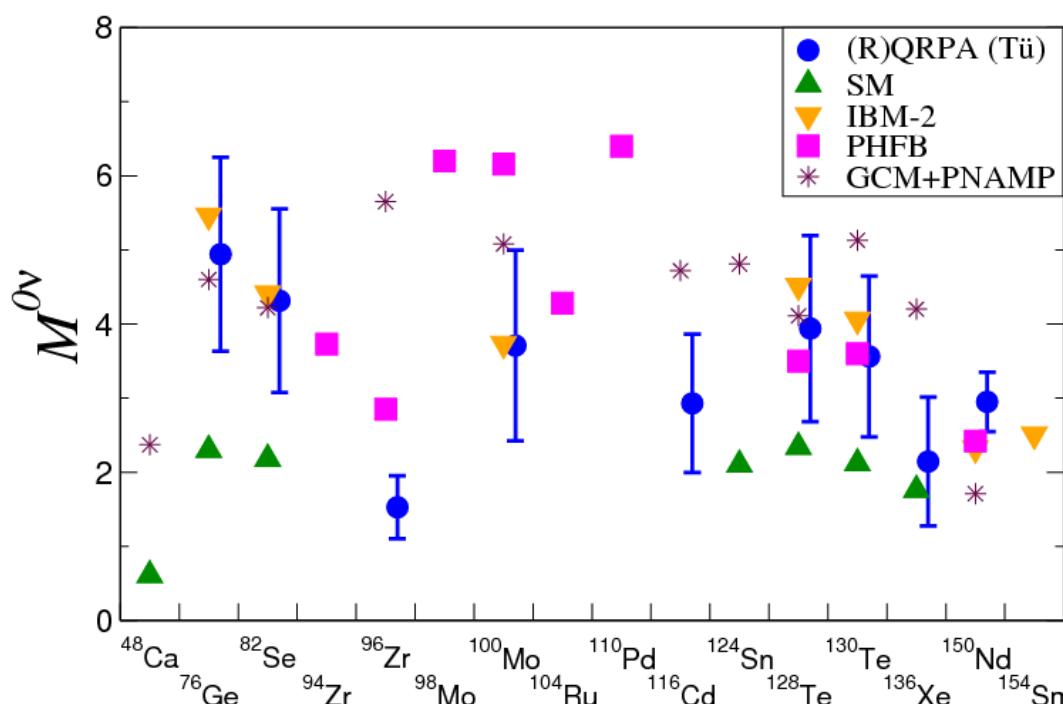
Diodi a Ge
Bolometri

Scelta dell'isotopo

	Q	a.i.
$^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$	4.271	0.19
$^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$	2.479	8.9
$^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$	2.533	34.5
$^{124}\text{Sn} \rightarrow ^{124}\text{Te}$	2.228	5.64
$^{116}\text{Cd} \rightarrow ^{116}\text{Sn}$	2.802	7.5
$^{110}\text{Pd} \rightarrow ^{110}\text{Cd}$	2.013	11.8
$^{100}\text{Mo} \rightarrow ^{100}\text{Ru}$	3.034	9.6
$^{96}\text{Zr} \rightarrow ^{96}\text{Mo}$	3.350	2.8
$^{82}\text{Se} \rightarrow ^{82}\text{Kr}$	2.995	9.2
$^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$	2.040	7.8
$^{150}\text{Nd} \rightarrow ^{150}\text{Sm}$	3.367	5.6



- Energia di transizione
- Abbondanza isotopica
- Elementi Matrice Nucleare



GLI ESPERIMENTI

Presente e passato prossimo

Isotopo	Rivelatore		ESP	Materiale	kg y	$\tau_{1/2}$ Limite (y) (90% CL)	$\langle m_\nu \rangle$		
^{76}Ge	Ge diode	1	HDM*	Ge	~ 47.7	$> 1.9 \times 10^{25}$	$< 0.22\text{-}0.41$		
		2	IGEX			$\approx 1.2 \times 10^{25}$	$\approx 0.28\text{-}0.52$		
		3				$\approx 2.2 \times 10^{25}$	$\approx 0.21\text{-}0.38$		
		4				$> 1.6 \times 10^{25}$	$< 0.24\text{-}0.44$		
^{82}Se	Tracking	5	NEMO3	Se	3.6	$> 3.6 \times 10^{23}$	$< 1.1\text{-}1.6$		
^{100}Mo	Tracking	5	NEMO3	Mo	26.7	$> 1.1 \times 10^{24}$	$< 0.45\text{-}0.93$		
^{128}Te	Bolometer		Cuoricino	TeO_2		$> 1.1 \times 10^{23}$			
^{130}Te	Bolometer	6	Cuoricino	TeO_2	~ 20	$> 2.8 \times 10^{24}$	$< 0.35\text{-}0.59$		
^{136}Xe	Xe scint	7	DAMA	L Xe	~ 4.5	$> 1.2 \times 10^{24}$	$< 1.1\text{-}2.9$		
^{116}Cd	Scintillator	8	Solotvino	CdWO_4		$> 1.7 \times 10^{23}$	$< 1.45\text{-}2.76$		

1. H.V. Klapdor-Kleingrothaus et al., Phys. Lett. A 16, 2409 (2001)
2. H.V. Klapdor-Kleingrothaus et al., Lett. B 586, 198 (2004)
3. H.V. Klapdor-Kleingrothaus et al., Phys. Lett. A 21, 1547 (2006)
4. C.E. Aalseth, Phys. Rev. C 65, 092007 (2002)
5. A.S. Barabash, and V.B. Brudanin, nucl-ex/1002.2862
6. E.Andreotti et al, Astroparticle Physics 34 (2011) 822–831
7. R. Bernabei et al. Phys. Lett. B 546, 23 (2002)
8. F.A. Danevich et al. Phys. Rev. C 67, 035501 (2003)

- M.Kortelainen, and J. Suhonen, Phys. Rev. C 75, 051203(R) (2007).
- M.Kortelainen, and J. Suhonen, Phys. Rev. C 76, 024315 (2007).
- F. Simkovic et al., Phys. Rev. C 77, 045503 (2008).
- J. Barea, and F. Iachello, Phys. Rev. C 79, 044301 (2009).
- K. Chaturvedi et al., Phys. Rev. C 78, 054302 (2008).

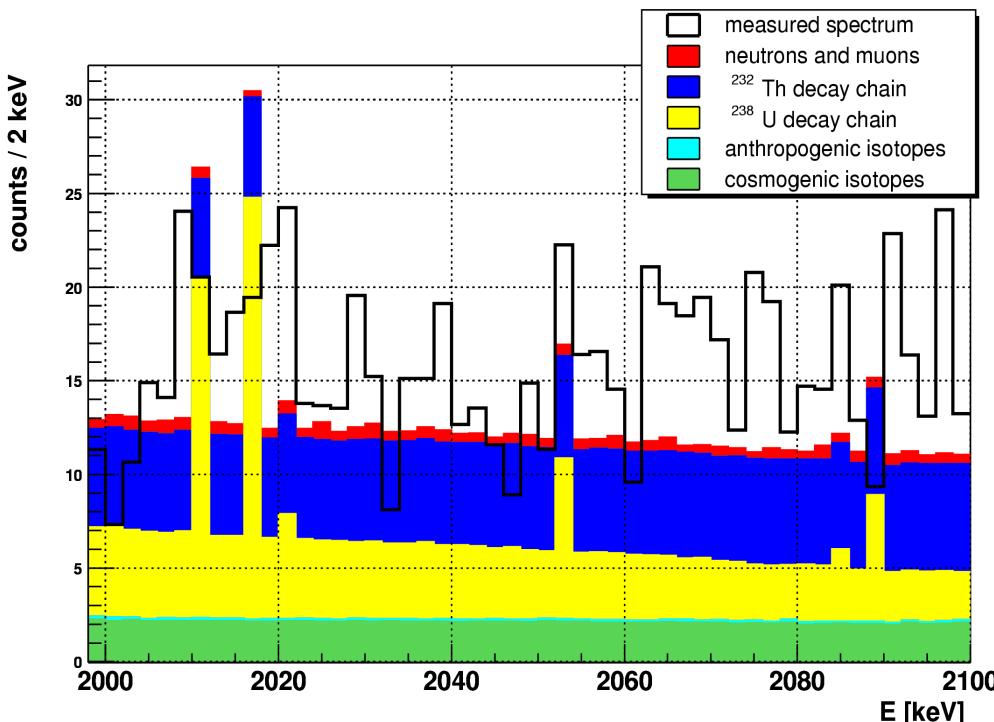
Presente e passato prossimo (2)

I risultati più rilevanti degli ultimi 15-20 anni sono stati ottenuti nell'ambito di tre principali esperimenti basati su tecniche molto differenti:

- **Heidelberg –Moscow (HM) (fermato nel Maggio 2003)**
Ha dominato la scena per oltre un decennio.
E' l'unico esperimento per il quale sia stata dichiarata un'evidenza di segnale.
- **NEMO3 (fermato a Dicembre 2010)**
Esperimento di generazione intermedia in grado di studiare diversi isotopi
- **CUORICINO (fermato nel Giugno 2008)**
Esperimento di generazione intermedia basato sulla tecnica bolometrica.
Dimostratore di CUORE

Heidelberg-Moscow: ^{76}Ge

- 5 cristalli HP-Ge, arricchiti a 87% in ^{76}Ge
massa totale attiva 10.96 kg \Rightarrow 125.5 moli di ^{76}Ge
- run da 1990 a 2003 al Gran Sasso
- statistica totale 71.7 kg \times y
820 moli \times y
- fondo: U/Th nei materiali del set-up
 $b \approx 0.11 \text{ c/keV/kg/y}$ a $Q_{\beta\beta}$
- Schermatura di piombo e flusso N_2
- Analisi di forma dei segnali (PSA)

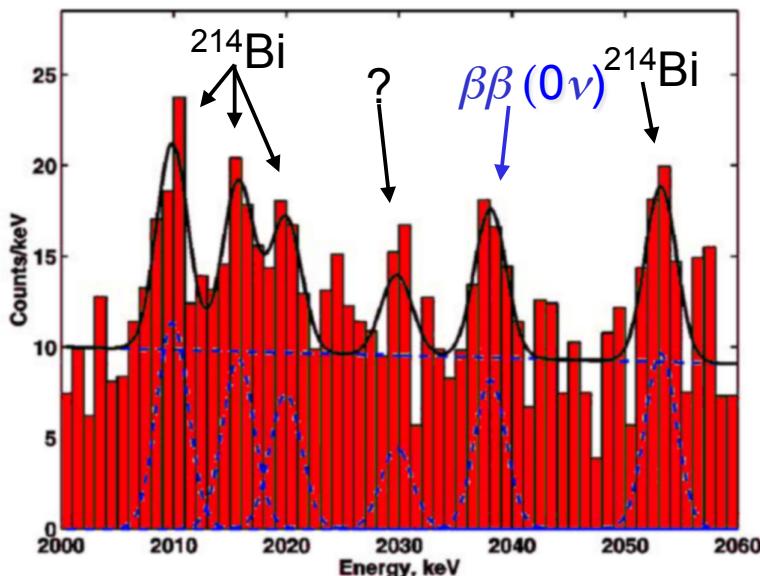


1990 – 2001
esposizione = 35.5 kg \times y SSD
 $\tau_{1/2}^{0\nu} > 1.9 \times 10^{25} \text{ years}$
 $\langle m_\nu \rangle < 0.35 \text{ eV (0.3 – 1.24 eV)}$

- Prima asserzione nel gennaio 2002 ([Klapdor-Kleingrothaus HV et al. hep-ph/0201231](#)) con una statistica di 55 kg y ed una significatività di $2.2\text{-}3.1 \sigma \rightarrow$ forti critiche
- Confermato nel 2004 con l'aggiunta di una frazione significativa di dati ($\sim 1/4$)
- Ulteriori perfezionamenti negli anni successivi:

2004:

- Fondo: 0.11 counts / (kg y keV)
- Segnale: 28.75 ± 6.87 eventi (Bkg: ~ 60)
- Significatività: 4.2σ
- $T_{1/2} = (0.69\text{--}4.18) \times 10^{25} \text{ y}$ (3σ)



1990 – 2003, tutti i 5 rivelatori
esposizione = 71.7 kg×y
 $\tau_{1/2} = 1.2 \times 10^{25} \text{ years}$
 $\langle m_\nu \rangle = 0.44 \text{ eV}$

H.V.Klapdor-Kleingrothaus *et al.*, Phys. Lett. B 586 (2004) 198

H.V.Klapdor et al.: evidenza 0ν-DBD ^{76}Ge

2006:

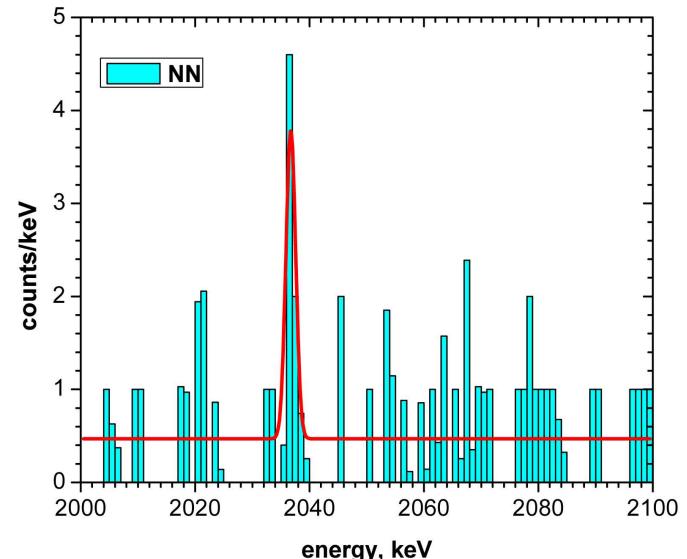
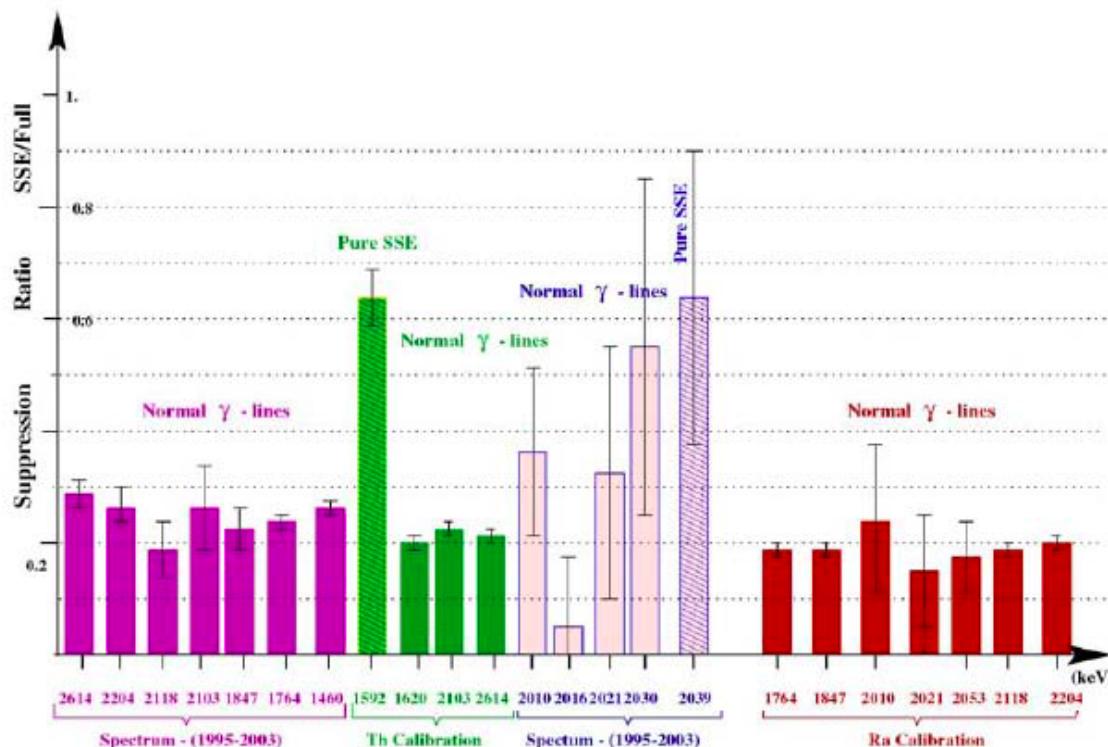
**1995-2003, nuova rianalisi:
selezione SSE con MC & ANN**

Segnale a 6.4σ

7.05 ± 1.11 eventi

$2.23^{+0.44}_{-0.31} \cdot 10^{25}$ years / 0.32 ± 0.03 eV

H.V.Klapdor-Kleingrothaus *et al.*, Phys. Scr. T127 (2006) 40–42

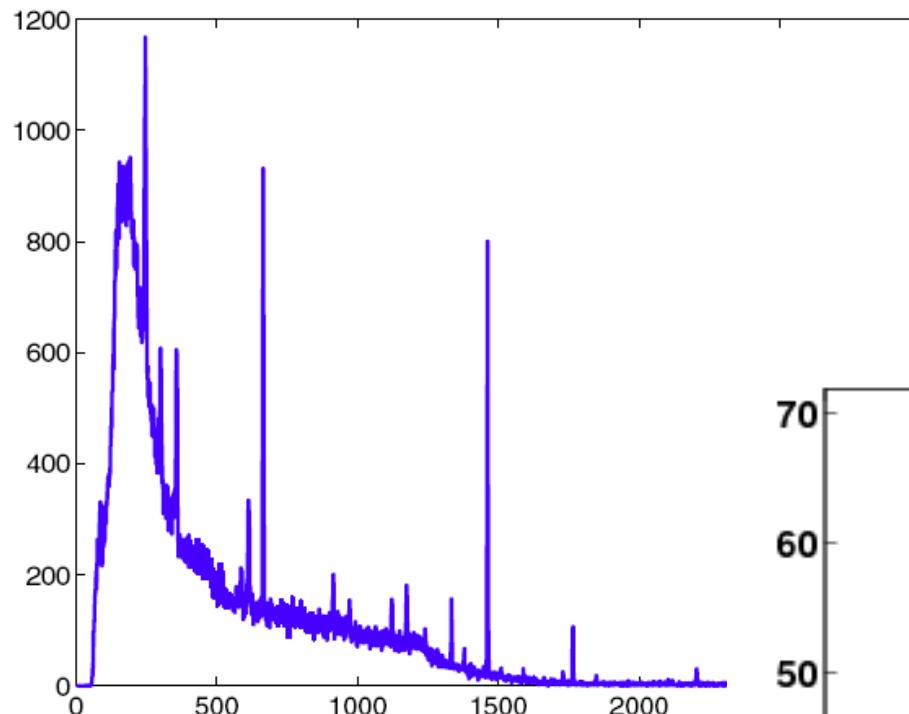


Ricerca SSE molto sofisticata:

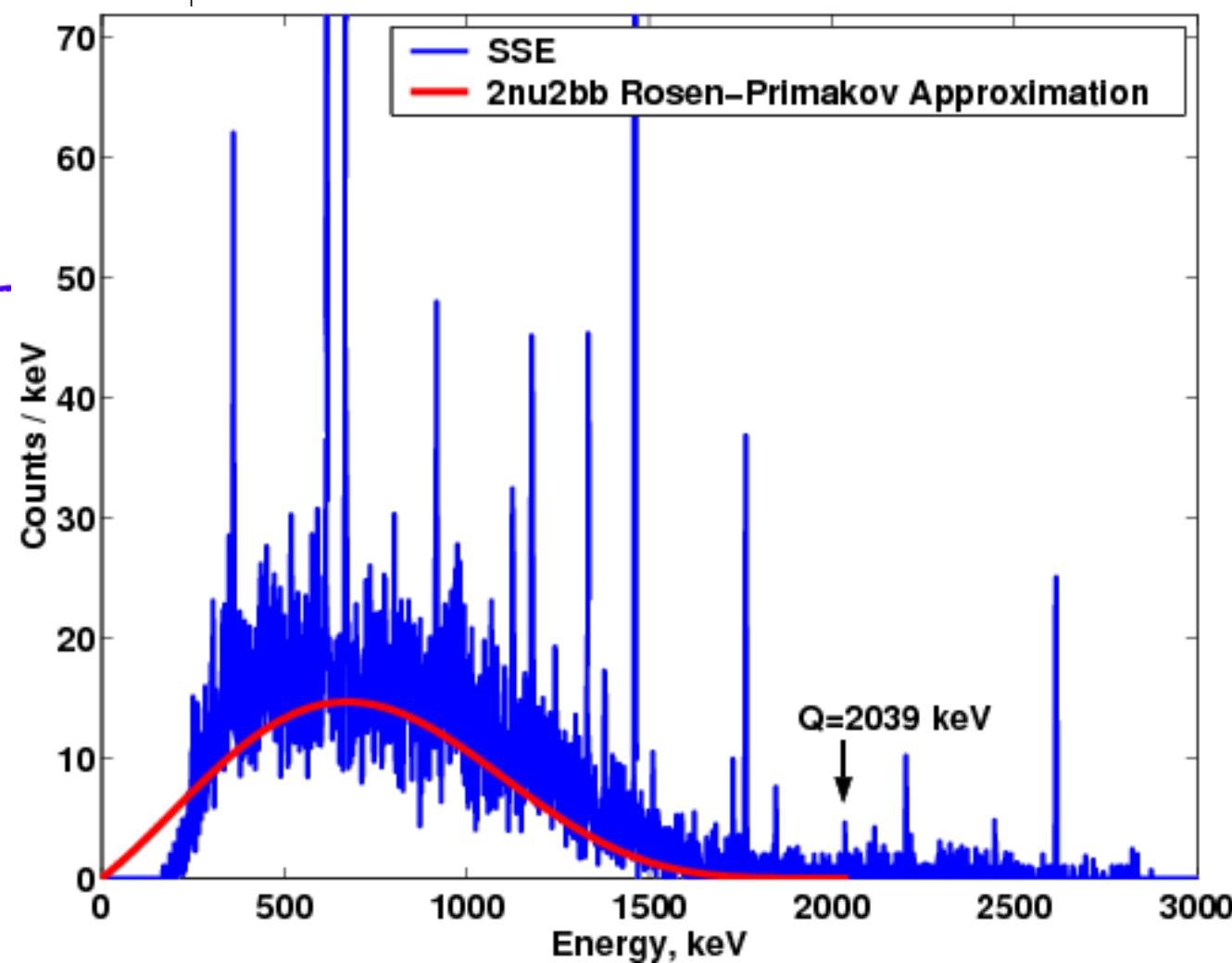
- PSA
- Reti neurali

 Verifica su dati di fondo e calibrazione

statistica e si già amara di futuri esperimenti non potranno confrontarsi con questo risultato

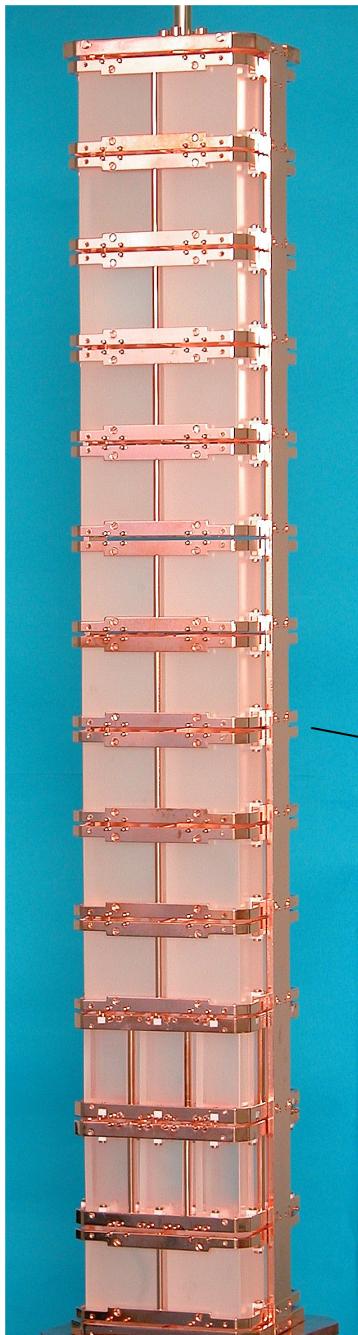


Analisi del “segnale doppio beta”

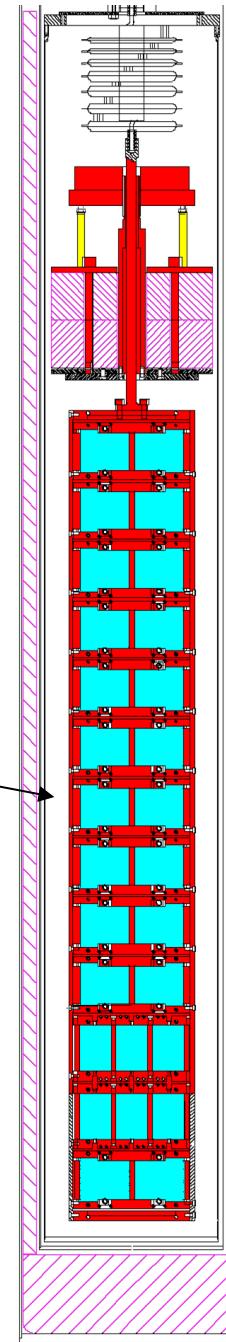


CUORICINO

Cuoricino tower: 62 TeO₂ crystals



~85 cm



TeO₂: calorimetri termici Isotopo attivo ¹³⁰Te

- Abbondanza naturale: a.i. = 33.9%
- energia di transizione: $Q_{\beta\beta} = 2529$ keV
 - Vite medie teoriche incoraggianti
 $\langle m_\nu \rangle \approx 0.3$ eV $\Leftrightarrow \tau_{1/2}^0 \approx 10^{25}$ years

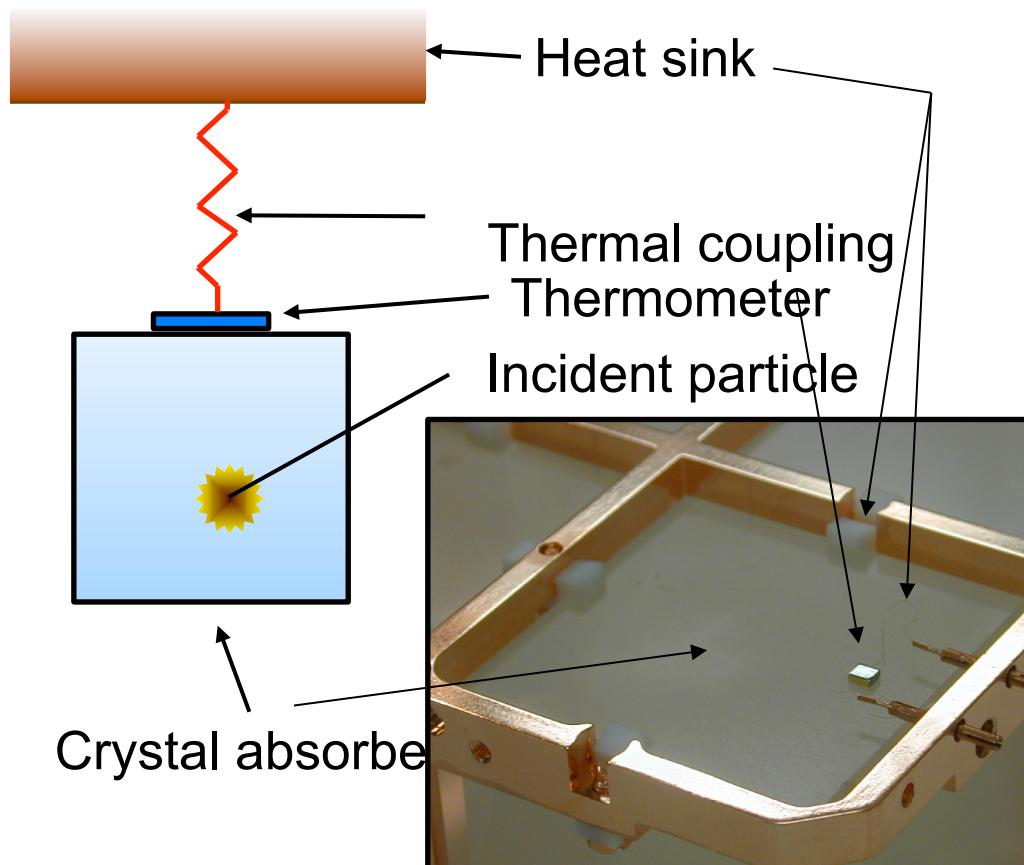
Materiale rivelatore TeO₂

- Bassa capacità termica
- Cristalli di grandi dimensioni (5x5x5 cc)
 - Elevato livello di radiopurezza

Esperimento $\beta\beta$ di dimensioni intermedie
Importante test per

- Radioattività
- Prestazioni di grande matrice LTD

Rivelatori a bassa temperatura (LTD)



Proprietà

- Buona risoluzione energetica
 - Ampia scelta di materiali
 - Approccio calorimetrico
 - Lentezza $\tau = C/G \sim 1 \div 10^3$ ms

Principio di rivelazione

$$\Delta T = E/C \quad [C = \text{capacità termica}]$$

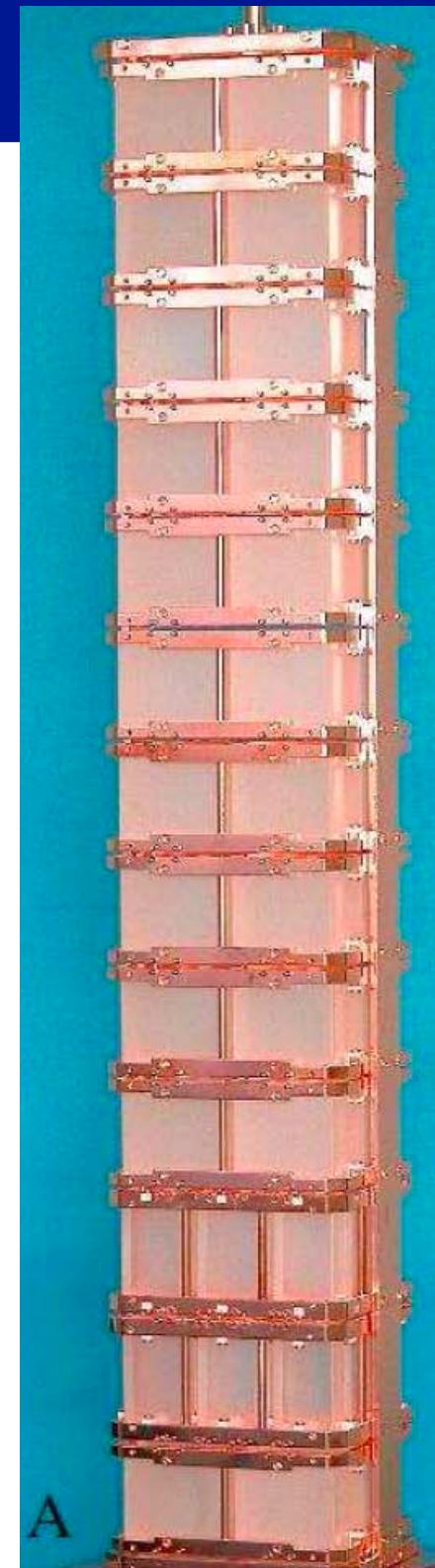
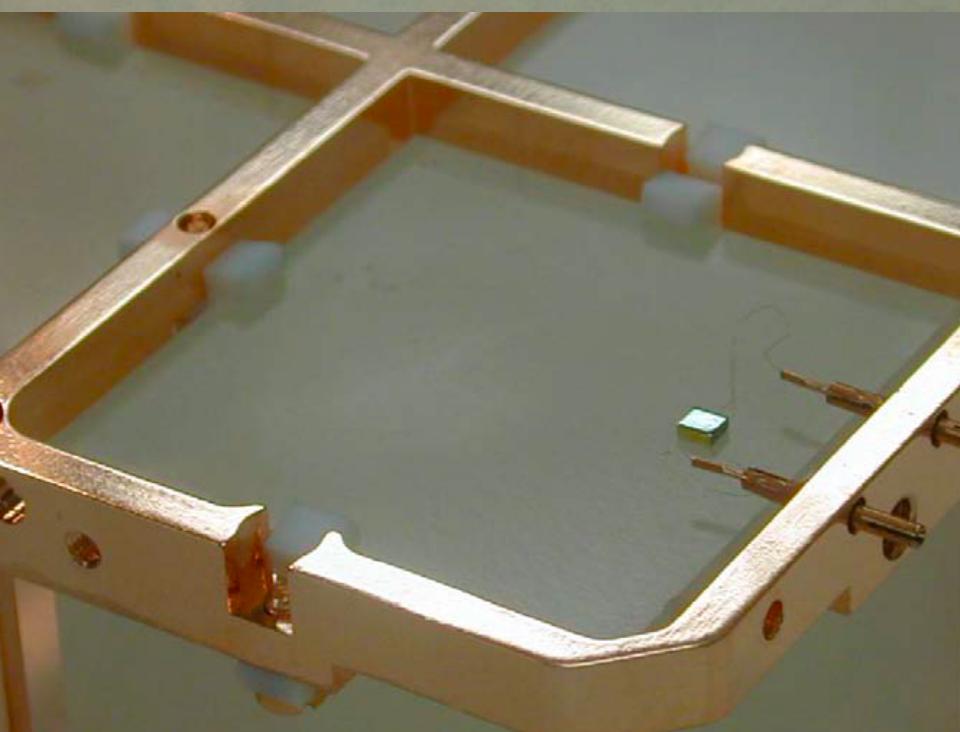
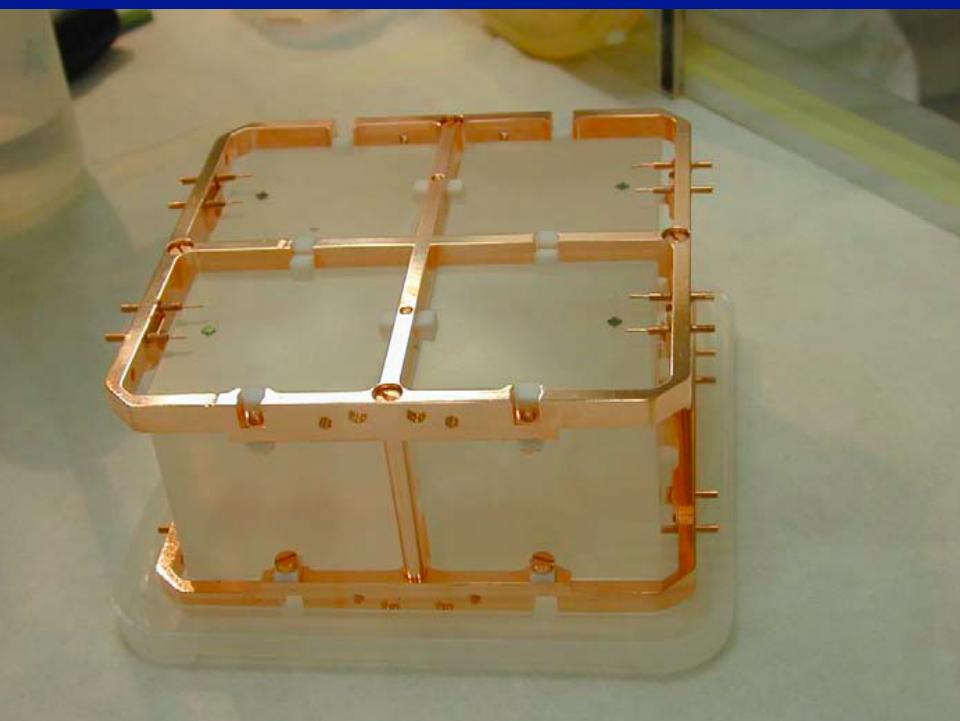
Bassa C

- Bassa T (i.e. $T \ll 1\text{K}$)
- Materiali dielettrici, superconduttori

**Limite ultimo alla risoluzione E:
fluttuazioni statistiche dell'energia
interna U**

$$\langle \Delta U^2 \rangle = k_B T^2 C$$

Cuoricino



A



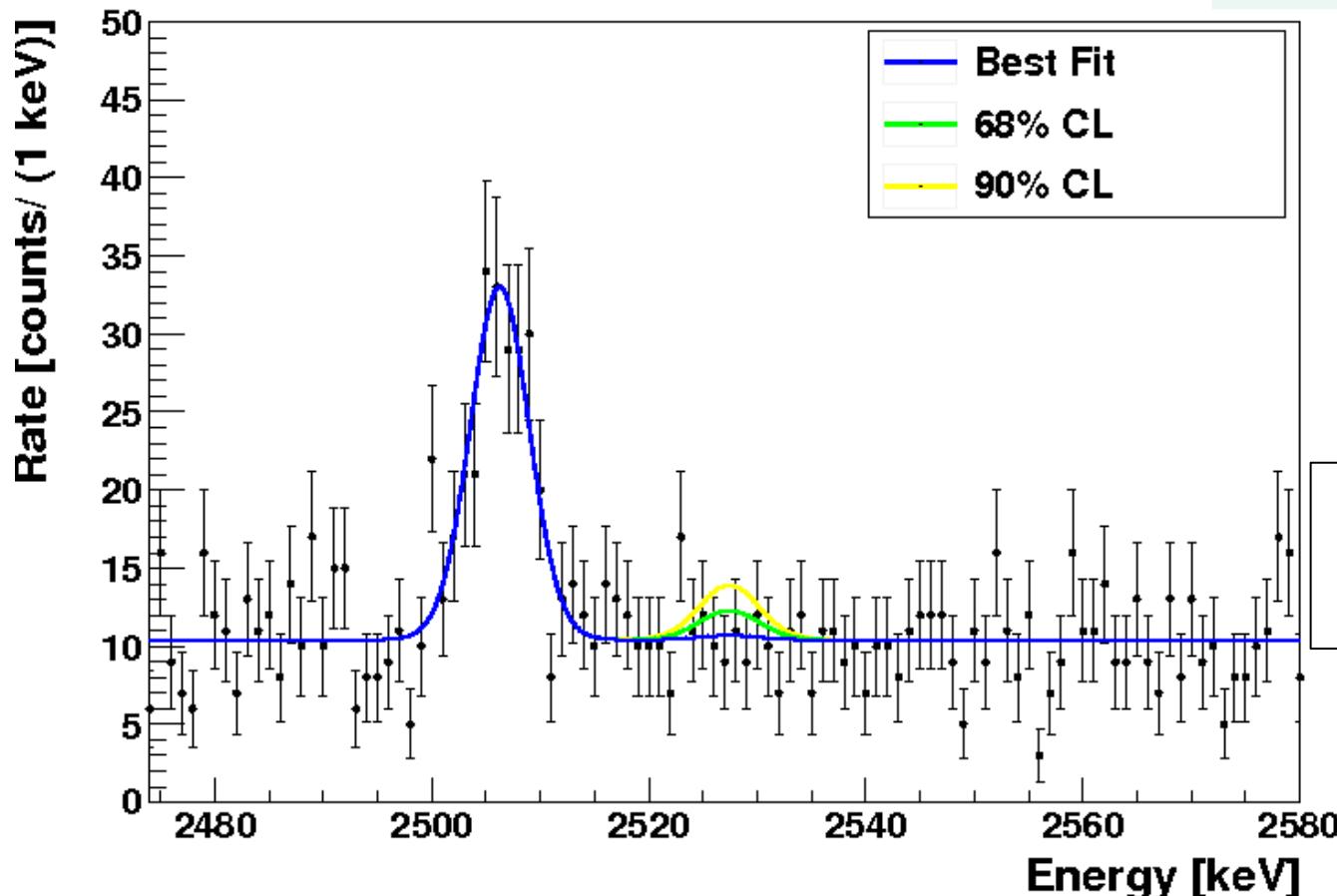
B

CUORICINO: risultati

- Statistica totale $18 \text{ kg} \times \text{y}$
- Risoluzione energetica media FWHM $\Delta E = 7.5 \text{ keV}$ at $Q_{\beta\beta}$
- anticoincidenza per riduzione contributi superficie U/Th e γ 's esterni
- Buon livello di fondo $b \approx 0.18 \pm 0.01 \text{ c/keV/kg/y} @ Q_{\beta\beta}$

$30\% \pm 10\%$ ^{208}TI (contaminazioni criostato)
 $20\% \pm 10\%$ superficie TeO_2 (contaminazioni α)
 $50\% \pm 10\%$ superficie Cu (contaminazioni β)

Statistica	Q	Limite 90% CL
[y kg(^{130}Te)]	[keV]	[y]
19.75	2527.2	$2.8 \cdot 10^{24}$



$$\langle m_\nu \rangle \leq 0.30 \div 0.71 \text{ eV}$$

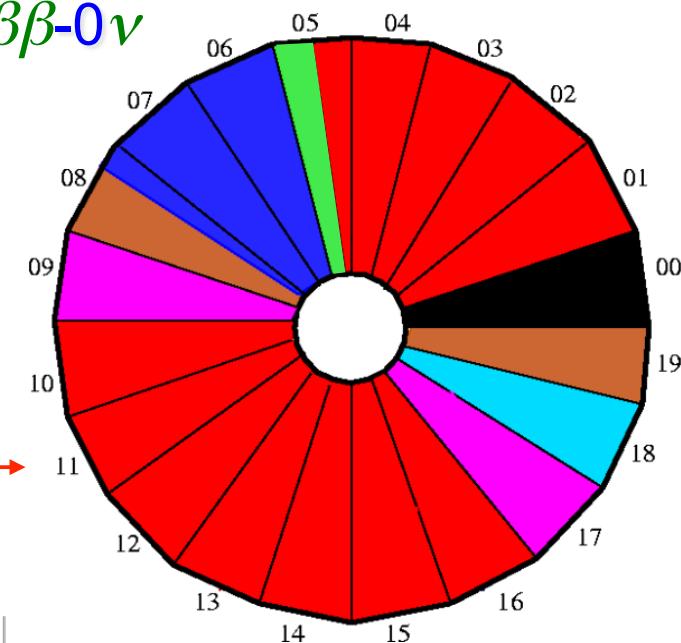
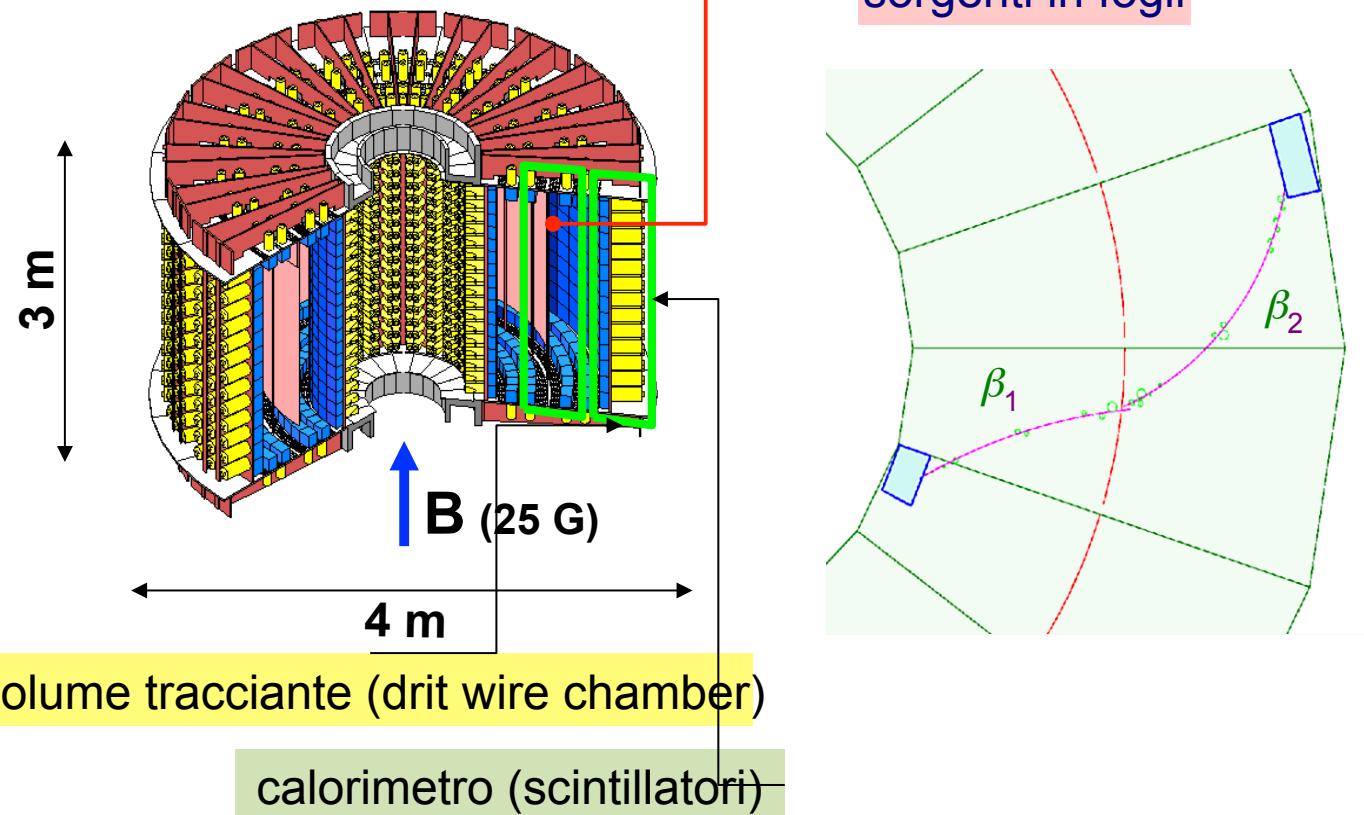
NME da Rodin et al
 • <http://arxiv.org/e-print1012.3266v1>
 • Nucl. Phys. A 766,107 (2006) and
 nucl-th:0706.4304v1

Fermato nel giugno 2008
 e smontato

NEMO-3

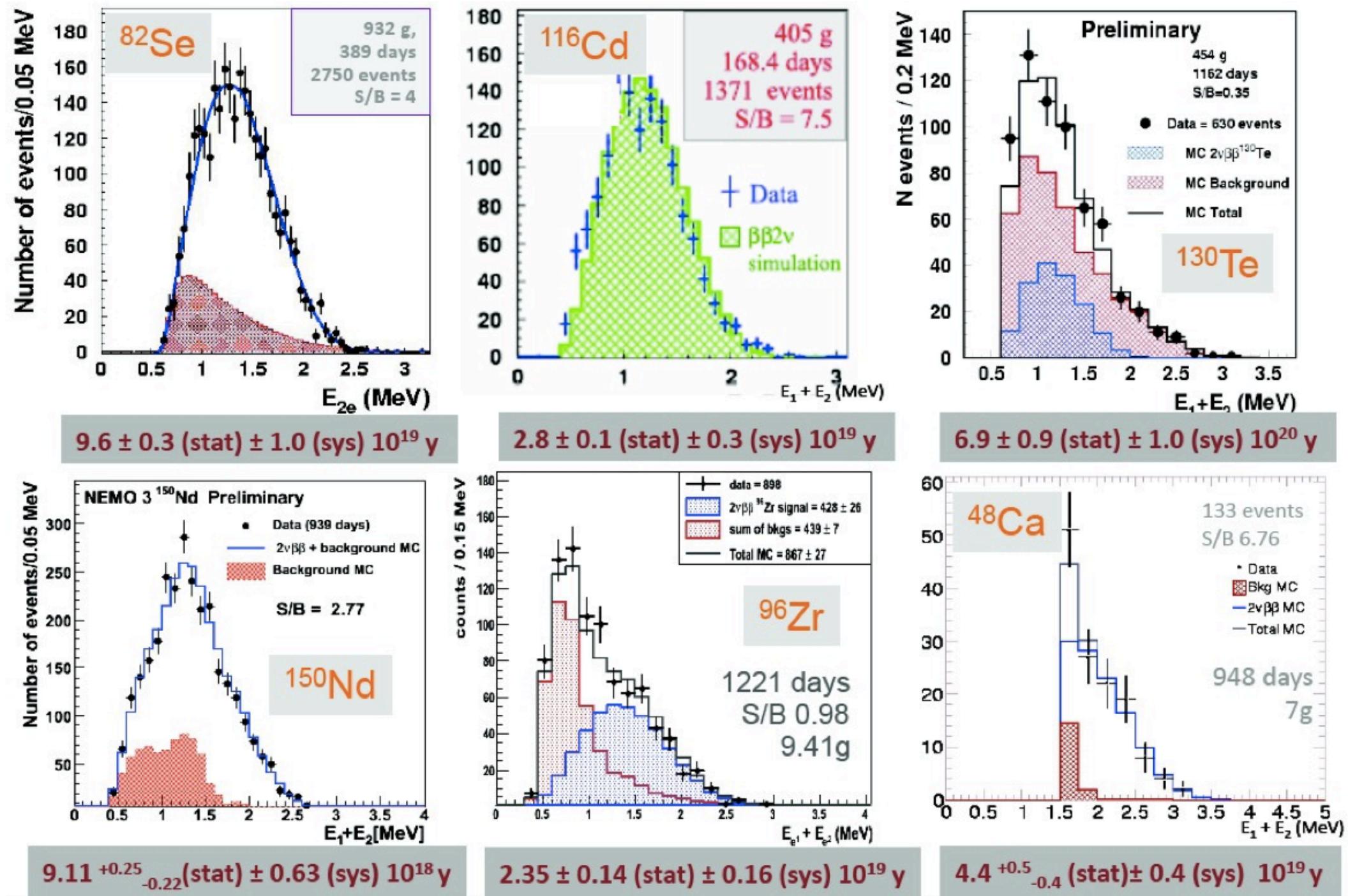
Rivelatore Tracciatore-Calorimetrico per $\beta\beta-2\nu$ e $\beta\beta-0\nu$ @ Frejus (4800 m.w.e.)

- 10 kg di materiale arricchito, in fogli
- 6180 celle geiger \Rightarrow drift wire chamber
- 1940 scintillatoi plastici + PMTs
- ferro (γ) + acqua con B (n) e box anti-Rn
- Identificazione e^- , e^+ , γ and α



^{100}Mo	(6.9 kg)	$\rightarrow \beta\beta-0\nu$
^{82}Se	(0.9 kg)	
^{130}Te	(0.45 kg)	
^{116}Cd	(0.4 kg)	
^{150}Nd	(37g)	
^{96}Zr	(9.4 g)	
^{48}Ca	(7.0g)	
nat ^{Te}	(0.5 kg)	
Cu	(0.6 kg)	

NEMO-3: uno strumento unico per $\beta\beta(2\nu)$



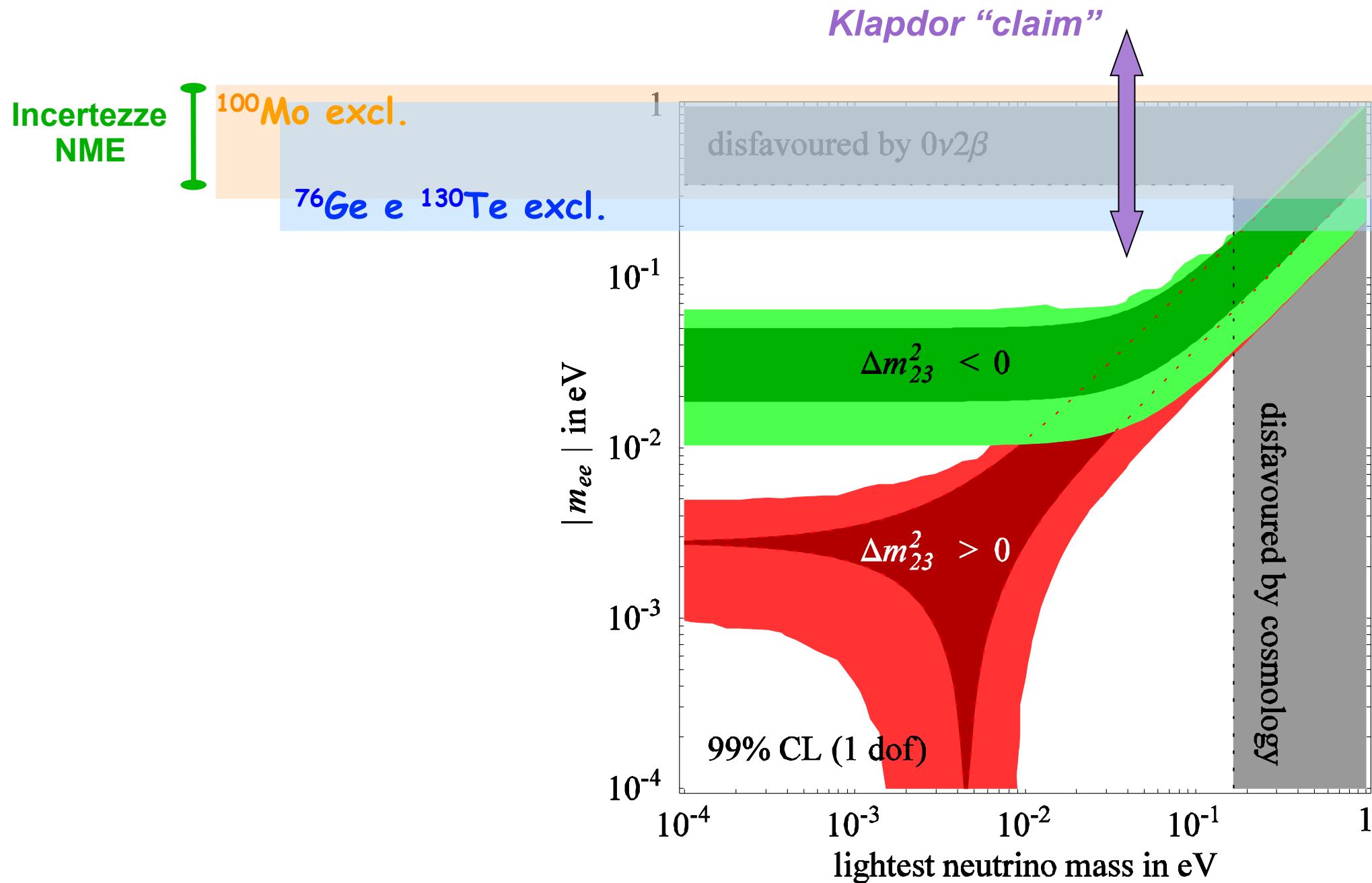
NEMO-3 $\beta\beta(0\nu)$: risultati

Isotopo	Esposizione [kg y]	$T_{1/2}$ [anni]	$\langle m_\nu \rangle$ [eV]	NME
^{100}Mo	26.66	$> 1.1 \times 10^{24}$	$< 0.45 - 0.93$	1-3
^{82}Se	3.6	$> 3.6 \times 10^{23}$	$< 0.9 - 1.6$ < 2.3	1-3 7
^{116}Cd	0.085	$> 1.6 \times 10^{22}$		
^{150}Nd	0.095	$> 1.8 \times 10^{22}$	$< 1.5 - 2.5$ $< 4.0 - 6.8$	4-5 6
^{130}Te	1.4	$> 1.0 \times 10^{22}$	$< 1..6 - 3.1$	2,3
^{96}Zr	0.031	$> 9.2 \times 10^{21}$	$< 7.2 - 19.5$	2,3
^{48}Ca	0.017	$> 1.3 \times 10^{22}$	< 29.6	7

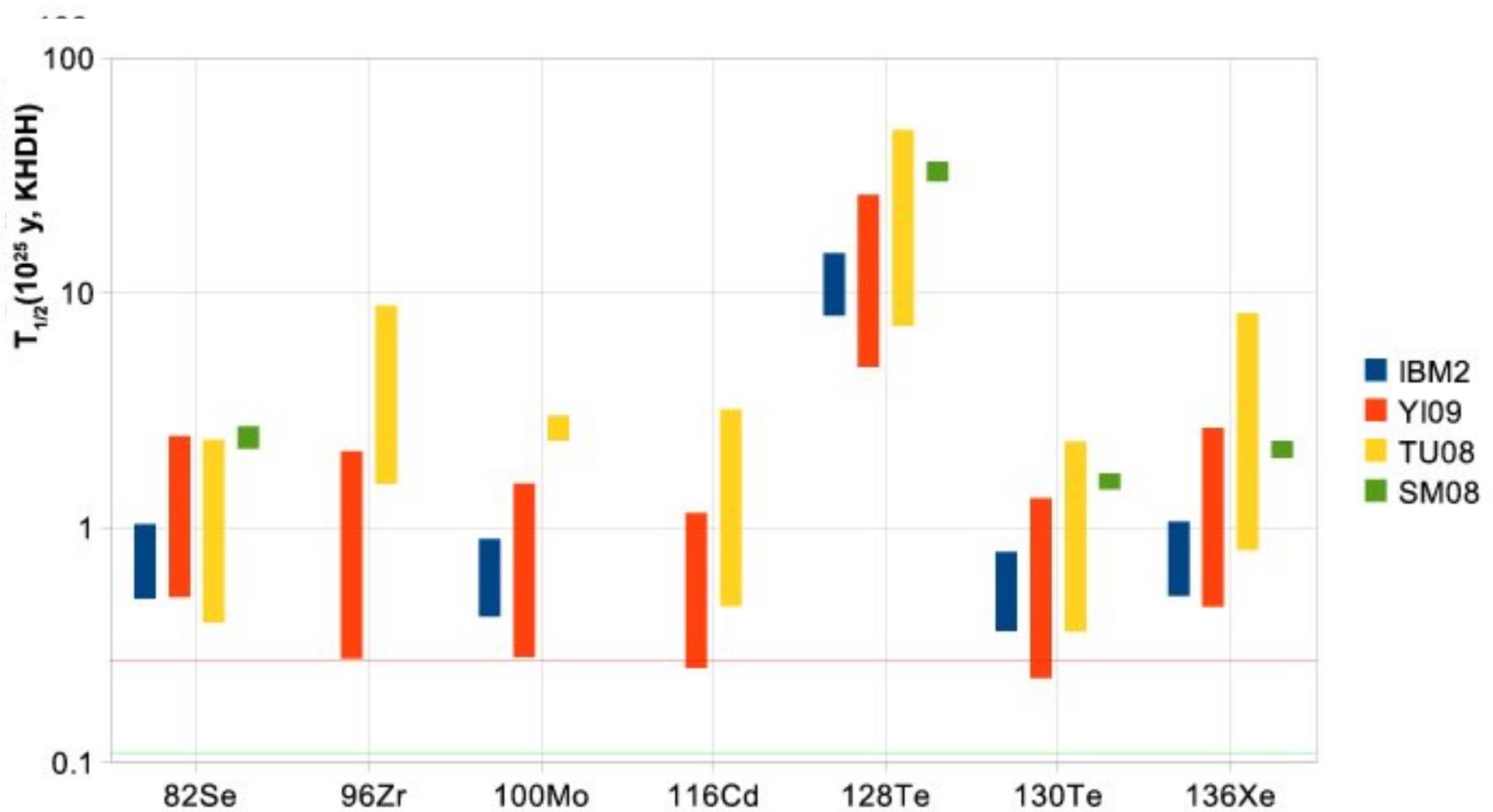
Nuclear Matrix Elements references:

- [1] M.Kortelainen and J.Suhonen, Phys.Rev. C 75 (2007) 051303(R)
- [2] M.Kortelainen and J.Suhonen, Phys.Rev. C 76 (2007) 024315
- [3] F.Simkovic, et al. Phys.Rev. C 77 (2008) 045503
- [4] V.A. Rodin et al. Nucl.Phys. A 793 (2007) 213
- [5] V.A. Rodin et al. Nucl.Phys. A 766(2006) 107
- [6] J.H.Hirsh et al. Nucl.Phys. A 582(1995) 124
- [7] E.Caurier et al. Phys.Rev.Lett 100 (2008) 052503

Situazione attuale



Evidenza $\beta\beta$ (^{76}Ge - HM): stato



$\beta\beta(0\nu)$ tempi di dimezzamento riscalati, corrispondenti all'intervallo (90% CL) dell'evidenza ^{76}Ge (KHDH), ($T_k = T_{^{76}\text{Ge}} G(\text{Ge}) M(\text{Ge})^2 / G(k) M(k)^2$) secondo diversi calcoli NME:IBM2, YI09, TU08 e SM08.

Limiti per ^{130}Te (CUORICINO: rosso) e ^{82}Se (NEMO3: verde).

Goals degli esperimenti di prossima generazione

- Sensibilità di pochi 0.01 eV su $\langle m_\beta \rangle$
- Soluzione del problema delle gerarchie
- Buone possibilità di osservare $\beta\beta(0\nu)$ (LNV, Majorana ν 's)
- conferma/rejezione del risultato su ^{76}Ge

conferma: sensibilità di poche 100 meV su $\langle m_\nu \rangle$ sono sufficienti controllo su diversi isotopi

rejezione: sensibilità molto maggiori su $\langle m_\nu \rangle$ sono indispensabili

Come?

- Maggior numero di esperimenti su isotopi diversi
- Riduzione delle incertezze su F_N
- Miglioramento dei parametri che determinano la sensibilità

Abbondanza isotopica tramite arricchimento

$$\Sigma(\tau_{1/2}^{0\nu}) \propto \varepsilon \frac{a.i.}{A} \sqrt{\frac{M \cdot t_{misura}}{\Delta E \cdot bkg}}$$

Massa del rivelatore

Riduzione fondo con:

- Selezione e manipolazione materiali
- Scelta della tecnica opportuna
- Segnatura
- Risoluzione energetica

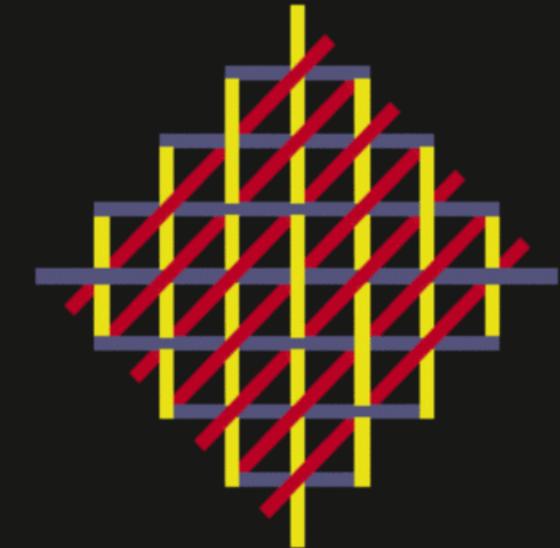
La strategia Internazionale per il DDB senza emissione di neutrini

APS neutrino study

We recommend, as a high priority, that a phased program of increasingly sensitive searches for

**neutrinoless nuclear double beta decay
($0\nu\beta\beta$)**

be initiated as soon as possible.



The Neutrino Matrix

DNP / DPF / DAP / DPS JOINT STUDY ON THE FUTURE OF NEUTRINO PHYSICS

Range	Covered spectrum	Required mass	Status
100 – 500	Quasi-degenerate	200 kg	close
20 – 50	Inverted	1 ton	proposed
2 – 5	Any	100 tons	future technology

In the first two stages, more than one experiment is desirable, worldwide, both to permit confirmation and to explore the underlying physics.

ASPERA roadmap

PHASED PROGRAM

Present: 10-50 kg

Next Future: 200-500 kg

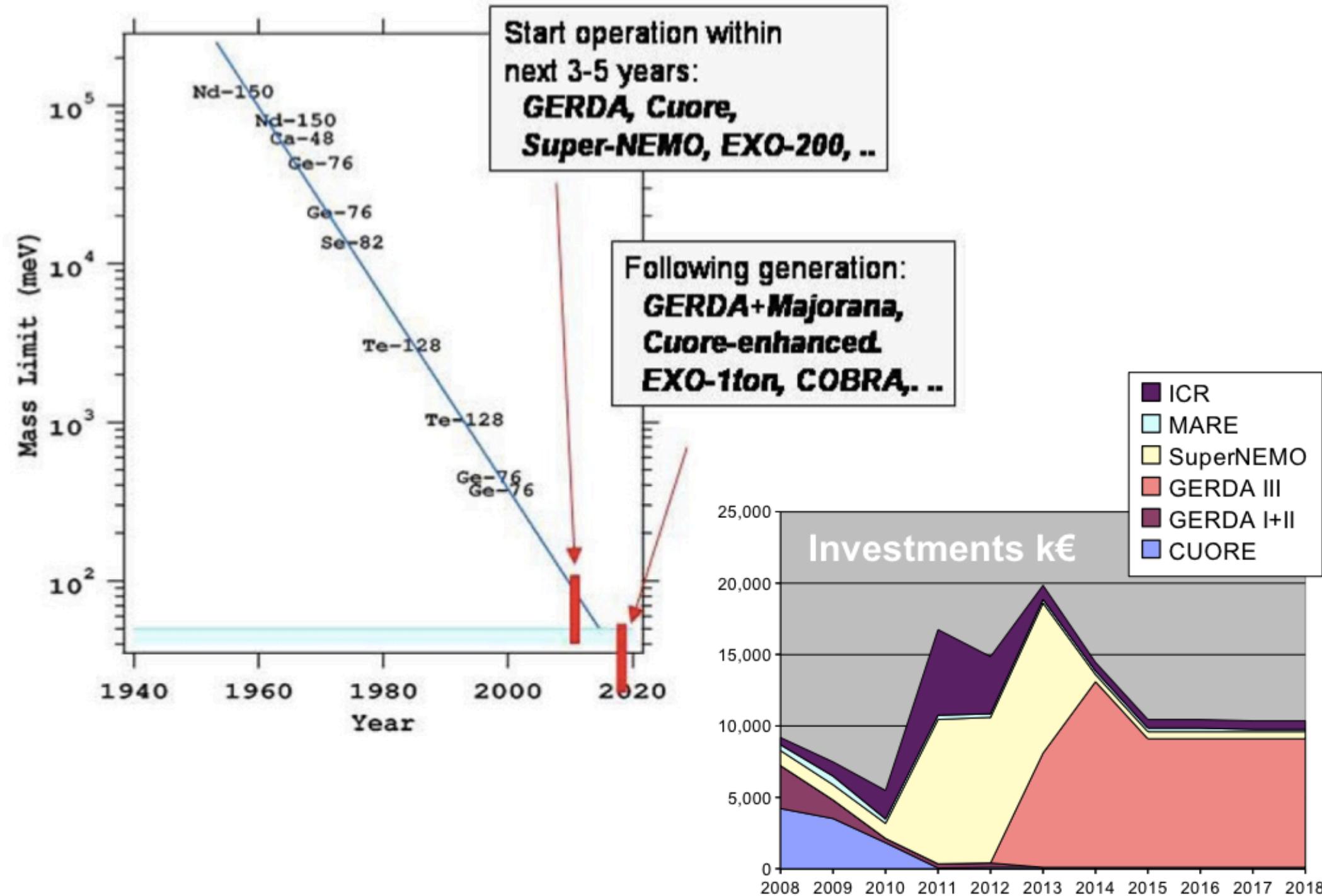
Long range: tons

**KAMLAND (Xe)
SNO+ (Nd)**

LS @ LNGS (Nd)

Name	Nucleus	Method	Location	European Members	Others
<i>Running experiments</i>					
CUORICINO	^{130}Te	bolometric	LNGS	IT, NL, ES	US
NEMO-3	^{100}Mo ^{82}Se	tracko-calorimeter	LSM	FR, CZ, UK ES, FIN	US, RU, JP
<i>Construction funding</i>					
CUORE	^{130}Te	bolometric	LNGS	IT, NL, ES	US
GERDA	^{76}Ge	ionization	LNGS	DE, BE, IT, PO	RU
<i>Substantial R&D funding</i>					
EXO	^{136}Xe	tracking	WIPP	CH	US, RU, CAN
SuperNEMO	^{150}Nd or ^{82}Se	tracko-calorimeter	LSC or LSM	FR, CZ, UK, SK, PL, ES, FIN	US, RU, JP UKR
<i>R&D and/or conceptual design</i>					
CANDLES	^{48}Ca	scintillation	Oto Lab	-	JP
CARVEL	^{48}Ca	scintillation	Solotvina	-	UKR, RU, US
COBRA	^{116}Cd , ^{130}Te	ionization	LNGS	UK, DE, IT, PO, SK	US
DCBA	^{150}Nd	tracking	t.b.d.	-	JP
MAJORANA	^{76}Ge	ionization	SNOLAB or DUSEL	-	US
MOON	^{100}Mo	tracking	t.b.d.	-	JP
XNO++	^{150}Nd	scintillation	SNOLAB	-	CAN, US + ...
<i>other decay modes</i>					
TGV	^{106}Cd	el. capture, running	LSM	FR, CZ	RU

ASPERA roadmap



ASPERA recommendations

Isotopical enrichment

Isotope enrichment will have a large impact on the cost of future Experiments. The production of a large amount of isotopes is possible through ultra-centrifugation, laser separation (AVLIS) or Ion Cyclotron Resonance (ICR) techniques. [...]

A Design Study should be done for a large production (100kg) with the ICR technique.

Nuclear Matrix Elements

We finally reiterate the importance of assessing and reducing the uncertainty in our knowledge of the corresponding nuclear matrix elements, experimentally and theoretically as well as the importance of studying alternative interpretations of neutrino-less double beta decay such as those offered by super-symmetry. This requires a program as vigorous, although not as expensive, as construction of the double beta detectors itself.

La sfida

Controversia ^{76}Ge : perchè?

- Bassa statistical – misura ripetibile con difficoltà
- Incertezze su livello ed modellizzazione del fondo
- Righe non identificate
- Strumenti ausiliari insufficienti

Problema delle gerarchie: riduzione fondo

- Per iniziare a esplorare la gerarchia inversa: 1-10 counts / y ton
- Per coprire la regione della gerarchia inversa: 0.1 -1 counts / y ton

Goal: 1 count/ton/y

NEMICI

- ($\beta\beta 2\nu$)
- Radioattività naturale dei materiali
- neutroni
- isotopi cosmogenici a vita lunga

Un programma graduale

Gli esperimenti attuali hanno masse **~10 kg (isotopo)**

Per escludere la gerarchia inversa

- Massa (isotopo): 1 ton

e naturalmente

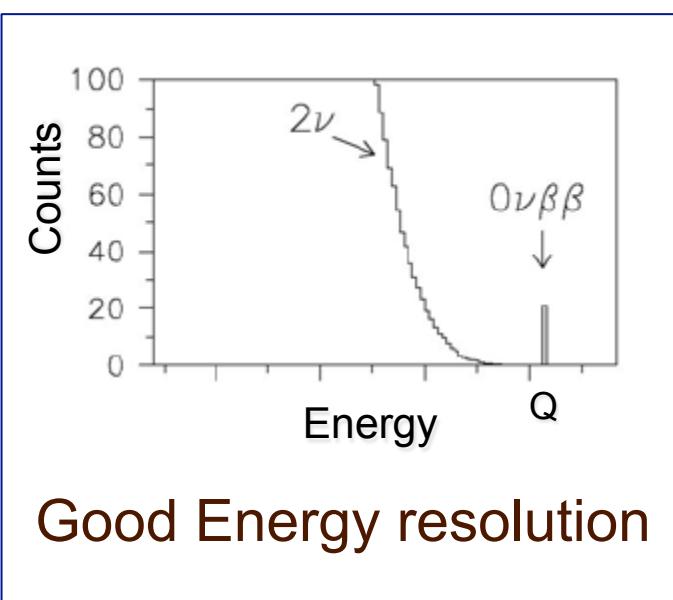
- Isotopo appropriato
- Basso livello di fondo

Irrealistico proporre direttamente un salto da 10 kg to 1 ton

Necessaria tappa intermedia a **100 kg ...**

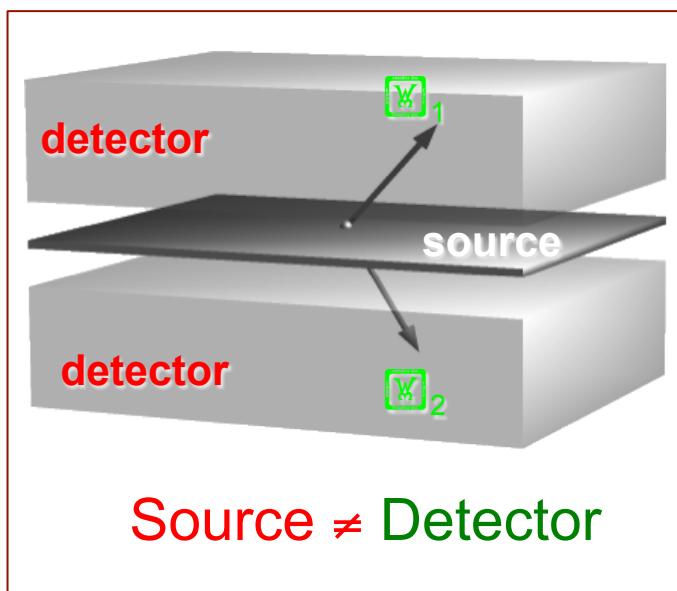
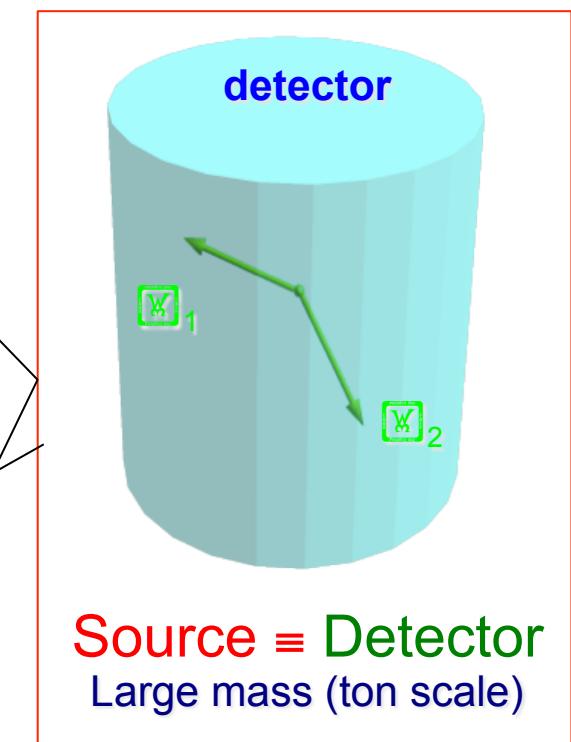
... caratterizzata da piena comprensione e controllo del fondo

Esperimenti e tecniche



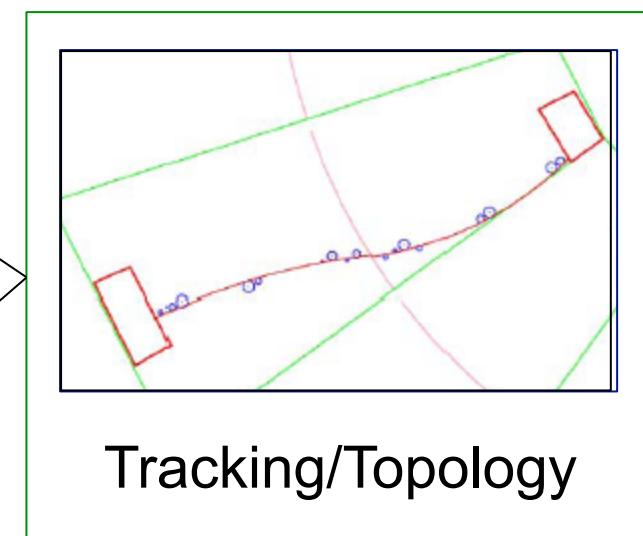
CANDLES
CAMEO
XMASS
SNO+
KAMLAND

CUORE
GERDA
MAJORANA
COBRA
LUCIFER



EXO
NEXT
COBRA

SUPERNEMO
MOON*
DCBA



Calorimetri ad alta risoluzione

CUORE - ^{130}Te

Matrice di rivelatori di TeO_2 naturale operanti a 10 mK

Prima fase: 200 Kg (2012) – LNGS – può contare su esperienza Cuoricino

Risoluzione energetica dimostrata: 0.2 % FWHM

GERDA – ^{76}Ge

Matrice di diodi a Ge arricchiti operanti in argon liquido

Prima fase: 18 Kg; seconda fase: 40 Kg - LNGS

Risoluzione energetica dimostrata: 0.16 % FWHM

MAJORANA - ^{76}Ge

Matrice di diodi a Ge arricchiti operanti in criostati convenzionali di rame

Moduli da 60 kg; prima fase: 2x60 Kg moduli

Risoluzione energetica dimostrata: 0.16 % FWHM

COBRA - ^{116}Cd – 9 possibili isotopi $\beta\beta$

Matrice di rivelatori CdZnTe arricchiti in ^{116}Cd operanti a temperatura ambiente

Goal: 117 kg di ^{116}Cd

Prototipi su piccola scala @ LNGS

Risoluzione energetica dimostrata: 1.9% FWHM

LUCIFER - ^{82}Se – ^{116}Cd – ^{100}Mo

Matrice di bolometri scintillanti operanti a 10 mK (ZnSe or CdWO_4 or ZnMoO_4)

Prima fase: 20 Kg (2013) – LNGS – basato su R&D INFN-V @ LNGS

Risoluzione energetica dimostrata: 0.25-1 % FWHM

Proprietà dei calorimetri ...

Anche se i calorimetri ad alta risoluzione **non** hanno capacità traccianti, sono in grado di fornire informazioni topologiche.

Inoltre, quando accoppiati ad altri dispositivi possono ottenere riduzioni sensibili dei livelli di fondo:

GRANULARITA' del disegno di base

- CUORE: 988 singoli bolometri in matrice compatta
- COBRA: 64,000 rivelatori in matrice compatta
- MAJORANA: 57 singoli diodi in matrice compatta per ciascun modulo

DISCRIMINAZIONE DI FORMA DEGLI IMPULSI (PSA)

- GERDA / MAJORANA possono separare gli eventi **sito singolo / multiplo**

SEGMENTAZIONE (PIXEL)

La granularità può essere ottenuta attraverso una sementazione degli elettrodi di lettura.

R&D in corso per GERDA, MAJORANA, COBRA

SCHERMATURE ATTIVE

- GERDA: diodi a Ge operanti in LAr attivo

RIVELAZIONE SIMULTANEA DI LUCE E FONONI (calore)

- BOLUX/CUPIDO R&D in corso per numerosi isotopi
- LUCIFER dimostratore finanziato da ERC

Ancora calorimetri: scintillatori

CANDLES – ^{48}Ca

Matrice di cristalli CaF_2 scintillanti (non drogati)

CANDLES I and II: dimostratori a massa limitata

Prossima fase: CANDLES III, incostruzione, consiste di 305 kg divisi in 96 cristalli letti da 40 PMT

Fasi successiva: CANDLES IV (richiede R&D) - 6.4 ton divise in 600 cristalli - 6.4 Kg di ^{48}Ca

Goal: CANDLES V - 100 ton

Risoluzione energetica dimostrata: 3.4 % FWHM (estrapolata da 9.1 % a 662 keV)

L'elevato Q valore (4.27 MeV) contribuisce ad abbattere i contributi della radioattività naturale. PSA e correlazioni temporali dovrebbero fare il resto.

SNO+ - ^{150}Nd

Evoluzione di SNO: Scintillatore organico liquido ultrapuro caricato con Nd (0.1-1%)

Rivelatore ben conosciuto - Enormi quantità di isotopo – Difficoltà per la resa in luce

Sensibilità $m_{\nu} < 0.04-0.1 \text{ eV}$.

Stima fondo incompleta.

Finanziato da NSERC . Inizio costruzione 2008. Completamento: 2010

KAMLAND-Zen – ^{136}Xe

Scintillatore organico liquido ultrapuro caricato con Xe. Proposta recente.

R&D su arricchimento e purificazione: completi. Stima fonod incompleta.

Fase I: 240-400 kg – dimostrazione fattibilità

Fase II: 1000 kg ^{136}Xe , concentratori di luce e scintillatore di qualità per migliore risoluzione energetica (~30M\$) 25 meV in 5 anni. **Inizio fine 2012.**

Ancora calorimetri: TPC

EXO - ^{136}Xe

TPC a Xenon liquido arricchito isotopicamente

Riconoscimento di vertice e traccia; possibile identificazione del singolo ione di (prodotto DBD) \Rightarrow solo fondo 2v DBD.

Prima fase: (EXO-200: finanziato, installazione @ WIPP): 200 kg

Sensibilità m_{γ} : 270-380 meV

Passi futuri: 1-10 ton

Risoluzione energetica dimostrata: 3.3 % FWHM (migliorata grazie alla rivelazione simultanea di carica e luce [correlazione])

In parallelo con EXO-200: R&D per identificazione ed estrazione ione Ba

Ba⁺⁺ identificato tramite spettroscopia ottica

NEXT - ^{136}Xe

TPC a gas ad alta pressione. Tracciamento: vertice + ricostruzione topologica.

Massa totale : 80 kg

Goal: miglioramento risoluzione energetica a ~1%

@ CANFRANC nel 2013

Rivelatori non omogenei

SUPERNEMO - ^{82}Se o ^{150}Nd

Moduli con sorgente in fogli, sezioni traccianti (camere a deriva in modalità Geiger) e calorimetriche (scintillatori a basso Z)

Campo magnetico per riconoscimento carica

Possibile configurazione: 20 moduli con 5 kg di sorgente ciascuno $\Rightarrow 100 \text{ Kg @ Modane}$ (dopo estensione)

Risoluzione energetica: 4 % FWHM

Basato sull'esperienza di NEMO3

MOON - ^{100}Mo o ^{82}Se o ^{150}Nd

Scintillatori plastici a molti strati intercalati con sorgente in fogli + sezioni traccianti (fibre o MWPC)

MOON-1 prototipo senza sezione tracciatrice (2006)

MOON-2 prototipo con sezione tracciatrice

Risoluzione energetica dimostrata: 6.8 % FWHM

Goal finale: esposizione di 5 y x ton

DCBA - ^{82}Se o ^{150}Nd

Spettrometro per particelle beta particles consistente di sorgente in fogli inserita in camera a deriva con campo magnetico

Prototipo: fogli di $\text{Nd}_2\text{O}_3 \Rightarrow 1.2 \text{ g of } ^{150}\text{Nd}$

Risoluzione spaziale $\sim 0.5 \text{ mm}$; risoluzione energetica 11% FWHM a 1 MeV $\Rightarrow 6 \text{ % FWHM at 3 MeV}$

Rivelatore finale: 10 moduli con 84 m^2 di sorgente in fogli per modulo(da 126 a 330 Kg di massa totale)

Stato e progetti a breve termine

Esperimento	Isotopo	Massa isotopo (kg)	$T_{1/2}$ (y)	Presa dati Start	Stato
CUORE	^{130}Te	203	2.1×10^{26}	2012	Construction
GERDA I	^{76}Ge	17.9	3×10^{25}	2009	Construction
GERDA II	^{76}Ge	40	2.0×10^{26}	2011	Funded
EXO-200	^{136}Xe	200	6.4×10^{25}	2009	Construction
Majorana	^{76}Ge	30-60	1.1×10^{26}	2011	Funded R&D
SuperNEMO	^{82}Se	100	2.1×10^{26}	2011	R&D
SuperNEMO	^{150}Nd	100	1.0×10^{26}	2011	R&D
CANDLES	^{48}Ca	0.35		2009	Funded R&D
MOON II	^{100}Mo	120			R&D
DCBA	^{150}Nd	20			R&D
SNO+	^{150}Nd	50-500			R&D
KAMLAND	^{136}Xe	400-1000		2012	Construction
COBRA	^{116}Cd	420			R&D
COBRA	^{130}Te	420			R&D

CONCLUSIONI

Il doppio decadimento beta senza emissione di neutrini resta uno strumento unico per lo studio delle proprietà del neutrino

- **Natura (Majorana/Dirac)**

- ▶ Scala assoluta delle masse
- ▶ Violazione del numero leptonico
- ▶ (Violazione di CP)

Calcoli NME

Situazione sperimentale:

- Evidenza asserita per $\beta\beta(0\nu)$ di ^{76}Ge
- Nuovi esperimenti di 2nda generazione (200 kg isotopo) in costruzione
- Numerosi sviluppi tecnici interessanti e promettenti.
- Programmi a diverse fasi con dimostratori

Confronto con misure complementari da altri campi di ricerca (cosmologia)

Goal ultimo: $\langle m_\nu \rangle \sim 10 \text{ meV}$

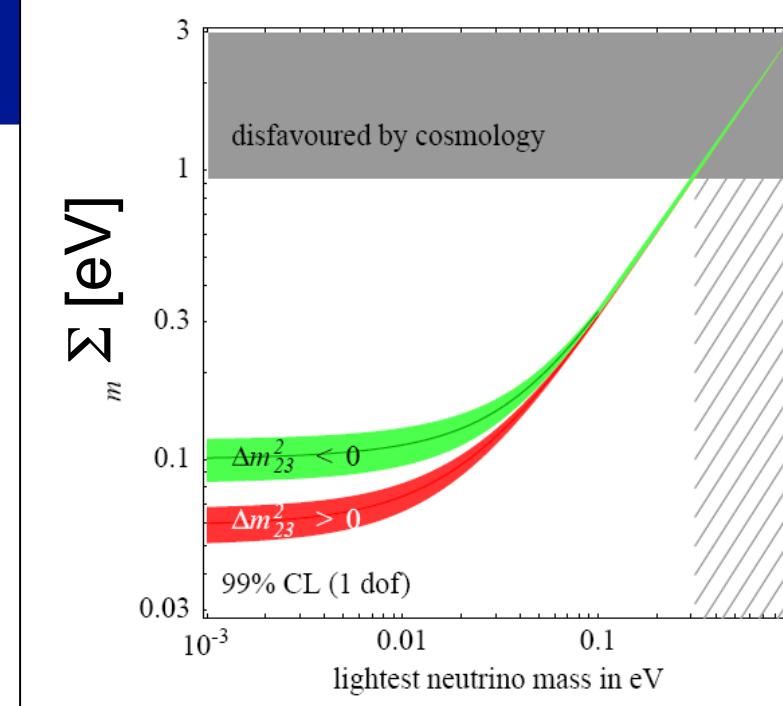
- Molte proposte con tecniche ed isotopi diversi
- Promuovere il maggior numero possibile di esperimenti su isotopi diversi
- Ridurre le incertezze sugli elementi di matrice nucleare F_N

CONCLUSIONI (2)

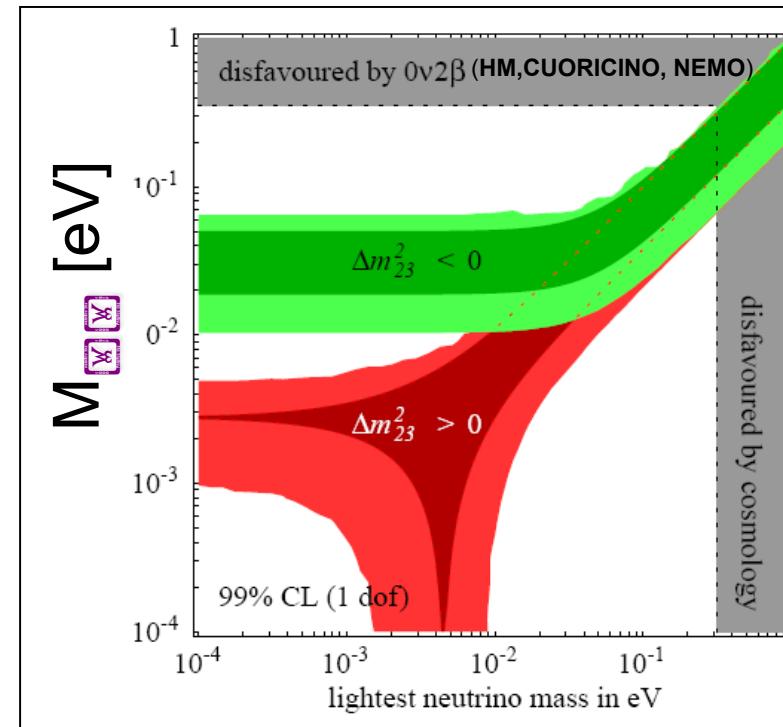
Periodo importante per la fisica del Neutrino:

- Regione **degenera** sta per essere completamente analizzata
- Elevato potenziale di scoperta nel caso della **gerarchia inversa**

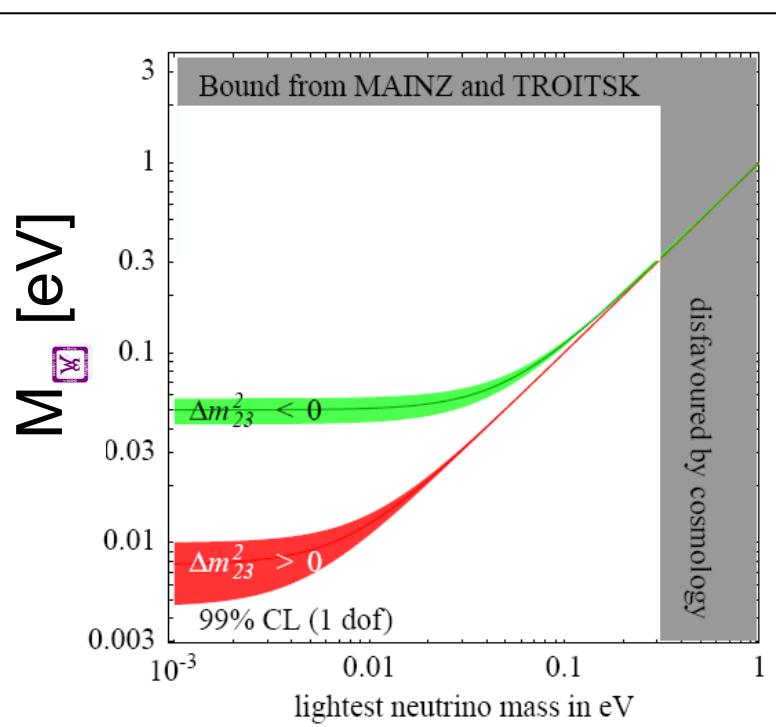
COSMOLOGY



DOUBLÉ

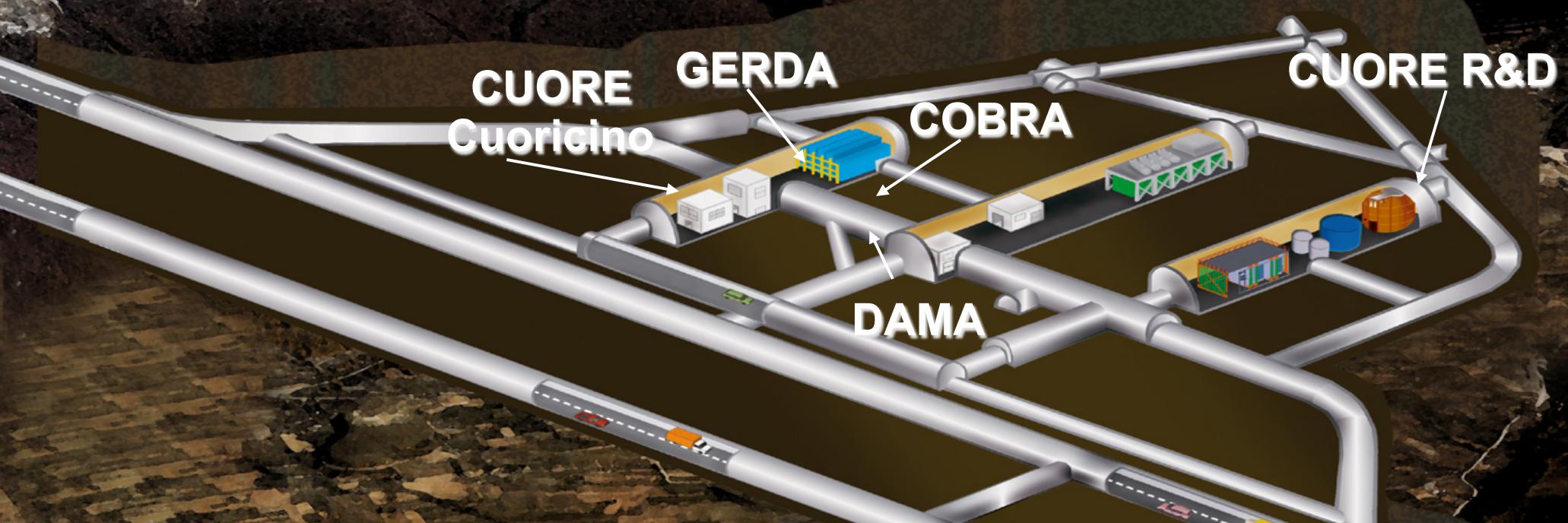


S - I - N - G - L - E



IN EUROPA

LNGS



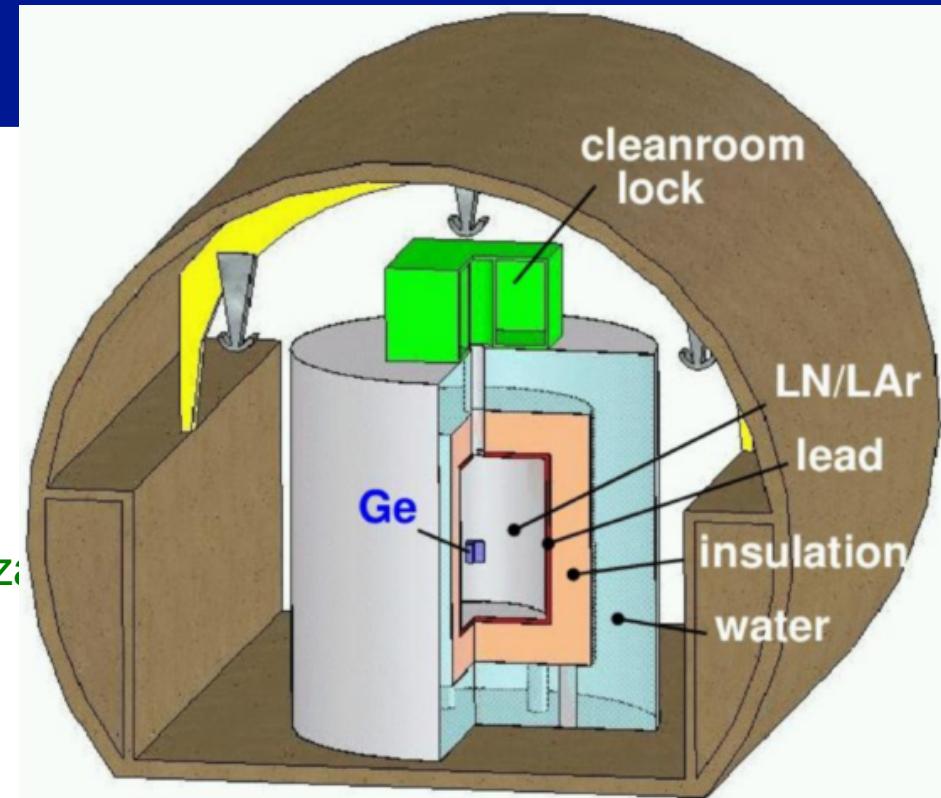
GERDA

Germania, Italia, Belgio, Russia

Scopo: verifica “a tempi brevi” dell’evidenza HM
Utilizzando i rivelatori arricchiti in ^{76}Ge esistenti
(HM, Igex)

Proposta: cristalli di Ge nudi in LAr

- 1.5 m (LAr) + 10 cm Pb + 2 m water
- Livello di fondo migliorato di 2-3 ordini di grandezza
- Schermatura attiva con LAr scintillante



3 fasi sperimentali

Fase I: rivelatori HM & IGEX (~20 kg)

- Installazione in lab sotterraneo
- Background: 0.01 counts/ keV kg y
- Analisi del risultato ^{76}Ge per lo stesso nucleide (**esclusione/conferma a 5σ**)
- Sensibilità: 3×10^{25} y
- Inizio presa dati: 2011

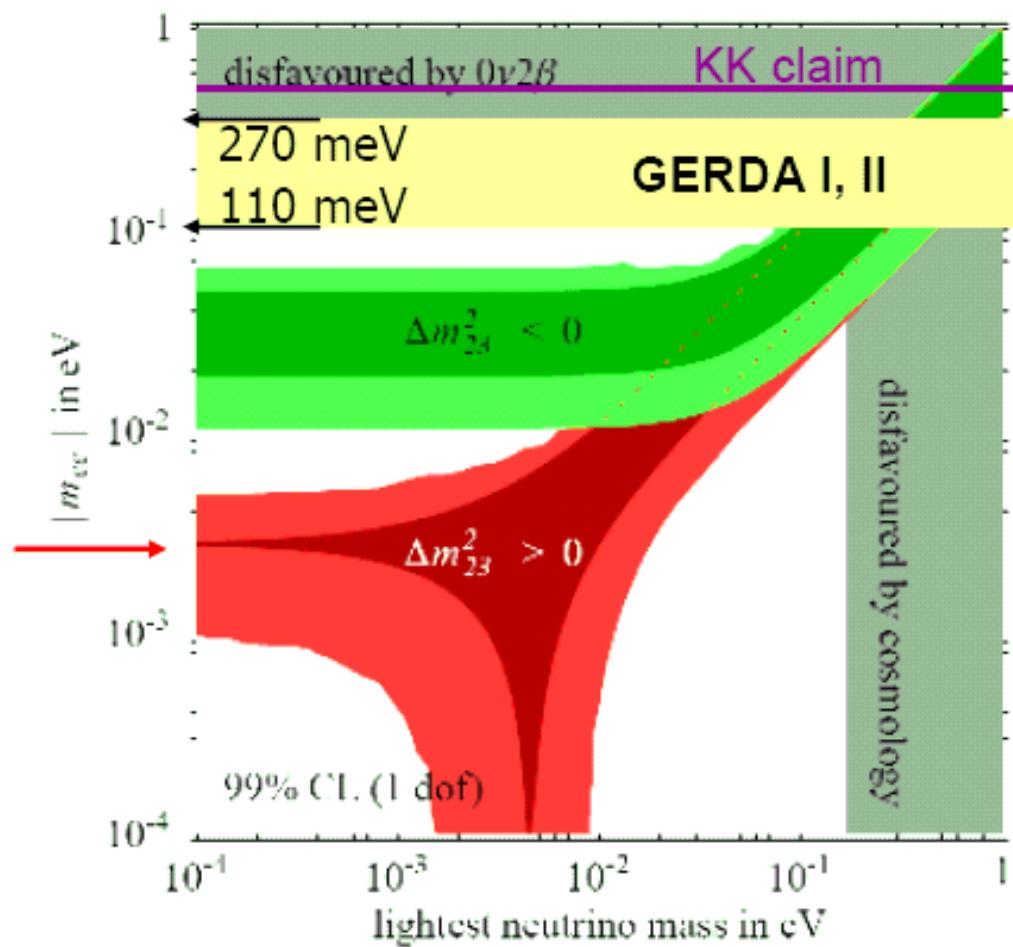
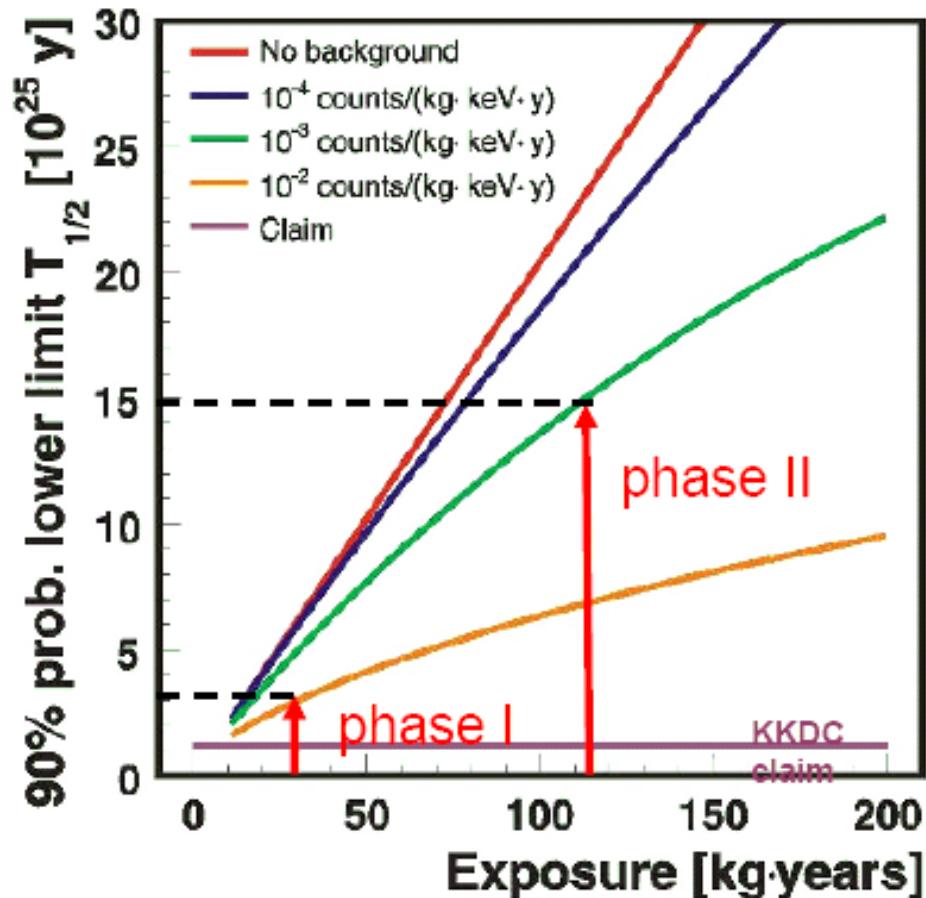
Fase II: ~20 kg addizionali di diodi ^{76}Ge (rivelatori segmentati)

- Background: 0.001 counts / keV kg y
- Sensibilità dopo 100 kg y (~3 anni): 2×10^{26} y ($\langle m_\nu \rangle < 90 - 290$ meV)

Fase III: a seconda dei risultati fisici delle fasi I/II

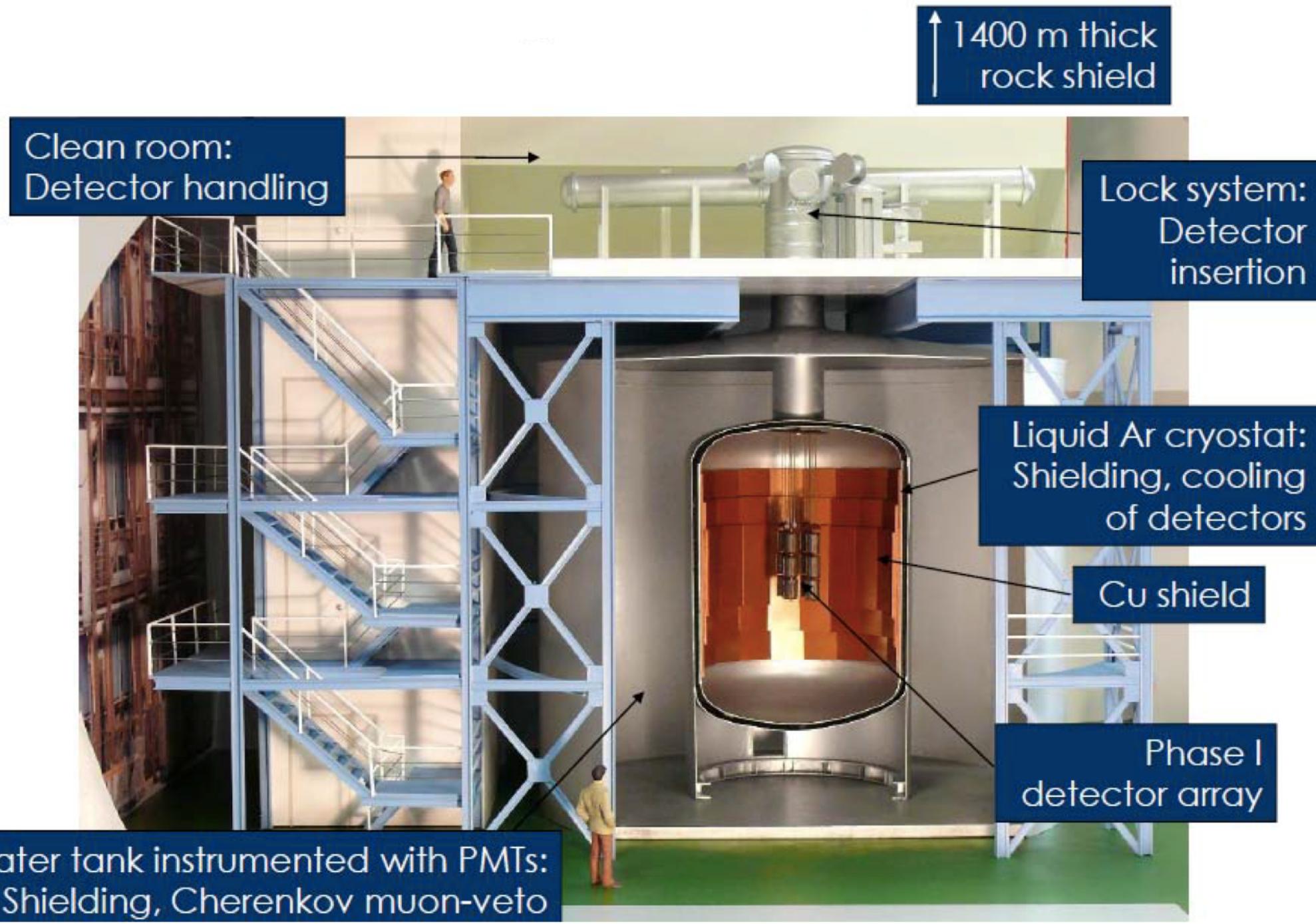
- **Esperimento da ~ 1 ton con collaborazione al livello mondiale (MAJORANA)**
 $\langle m_\nu \rangle < 20 - 50$ meV

GERDA: sensibilità



Se il segnale dichiarato da KK in HM e' effettivamente bb, allora GERDA I osservera' circa 7 conteggi in un anno (18 kgxy), sopra un fondo di 0.5 Conteggi (corrispondente ad una probabilita' di $\sim 10^{-5}$)

GERDA @ LNGS



GERDA: il criostato



Realizzato in acciaio a basso livello di radioattività:

1-5 mBq/kg



Installazione del coperchio in rame

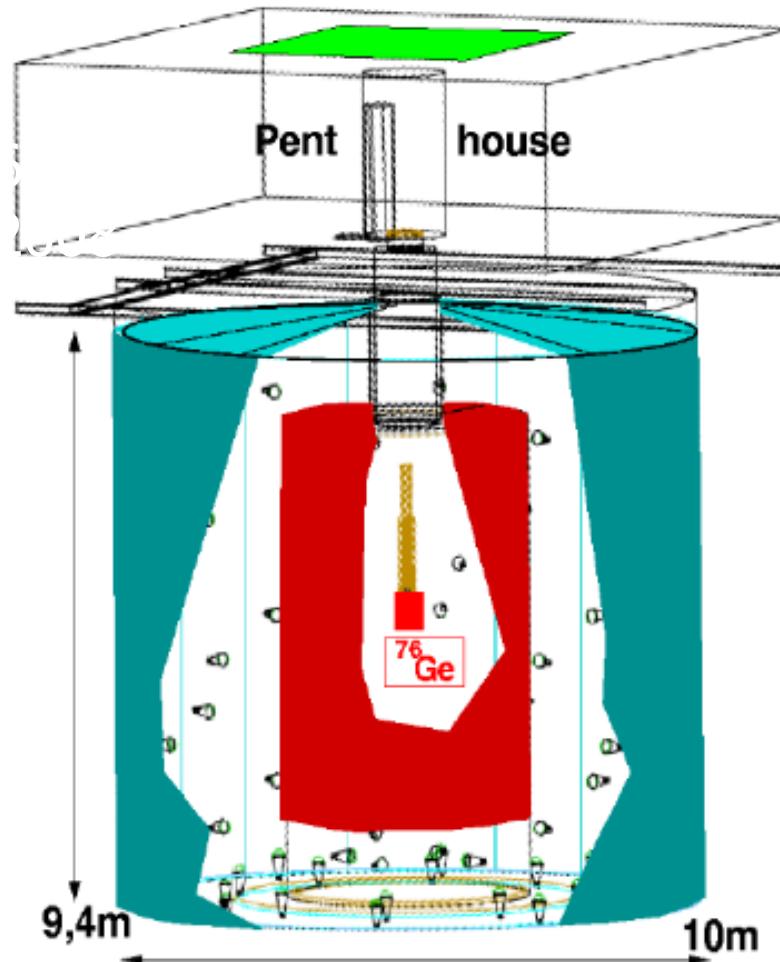


Interno del criostat con il rivestimento di rame

- Flussaggio costante per ridurre l'emanazione di Rn da ~30 a 15 mBq
- Rivestimento interno di rame (spessore 3/6 cm)
- controllo livello evaporazione Lar (< 2% /giorno)
- scintillazione del LAr per ridurre il fondo dall'esterno

GERDA: contenitore esterno e muon veto

- Schermo attivo
- Acqua ultrapura dall'impianto di Borexino
- 66 PMTs: rivelatore Cerenkov
- Scintillatori plastici sul tetto della clean room



GERDA: muon veto



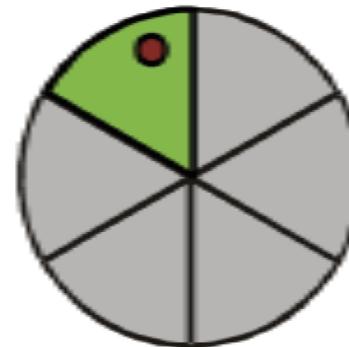
GERDA: I rivelatori

Fase I

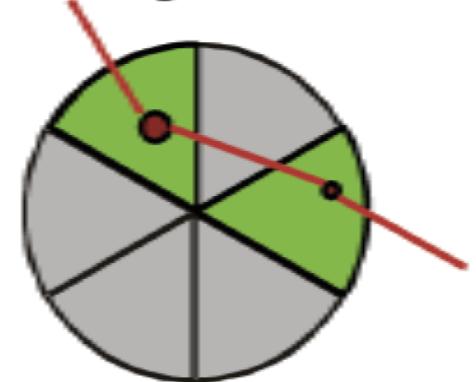


Fase II

Signal:



Background:



GERDA I: detector testing

Low mass detector holder: developed and tested

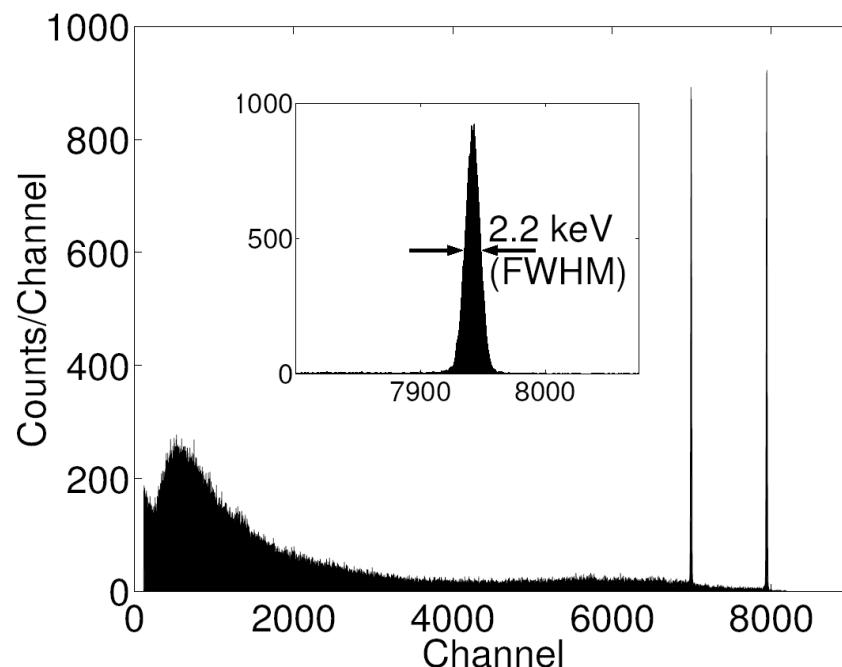
- Definition of detector handling protocol
- Optimization of thermal cyclings



Bare Ge Crystals in Lar

- current in LAr with prototype detector
- detector parameters are not deteriorated
- **>40 warming and cooling cycles carried out**
- More than 1 year of operation at low leakage

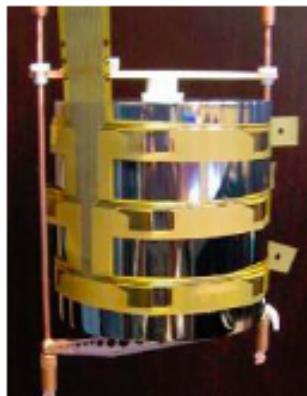
Same performance in LN₂/LAr



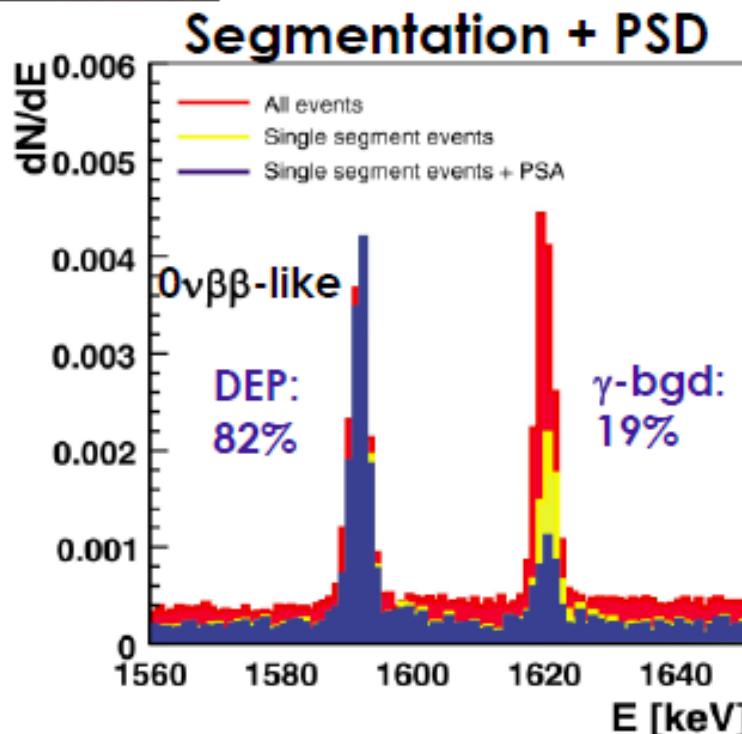
GERDA II: detectors R&D

Two technologies pursued with advanced $0\nu\beta\beta$ -signal recognition & bgd suppression

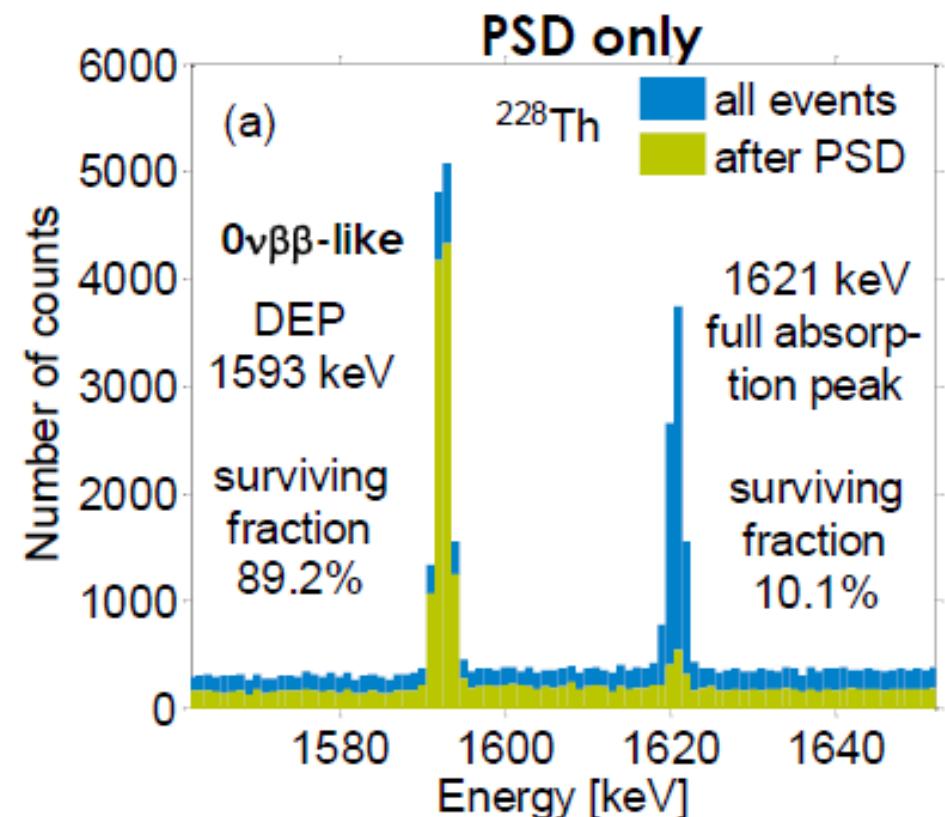
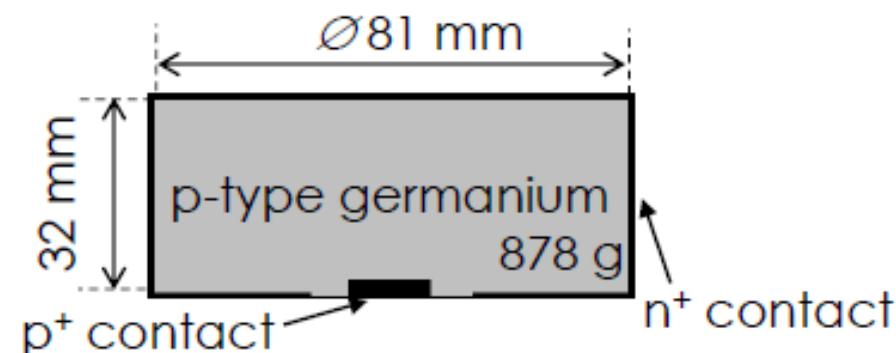
1) n-type segmented



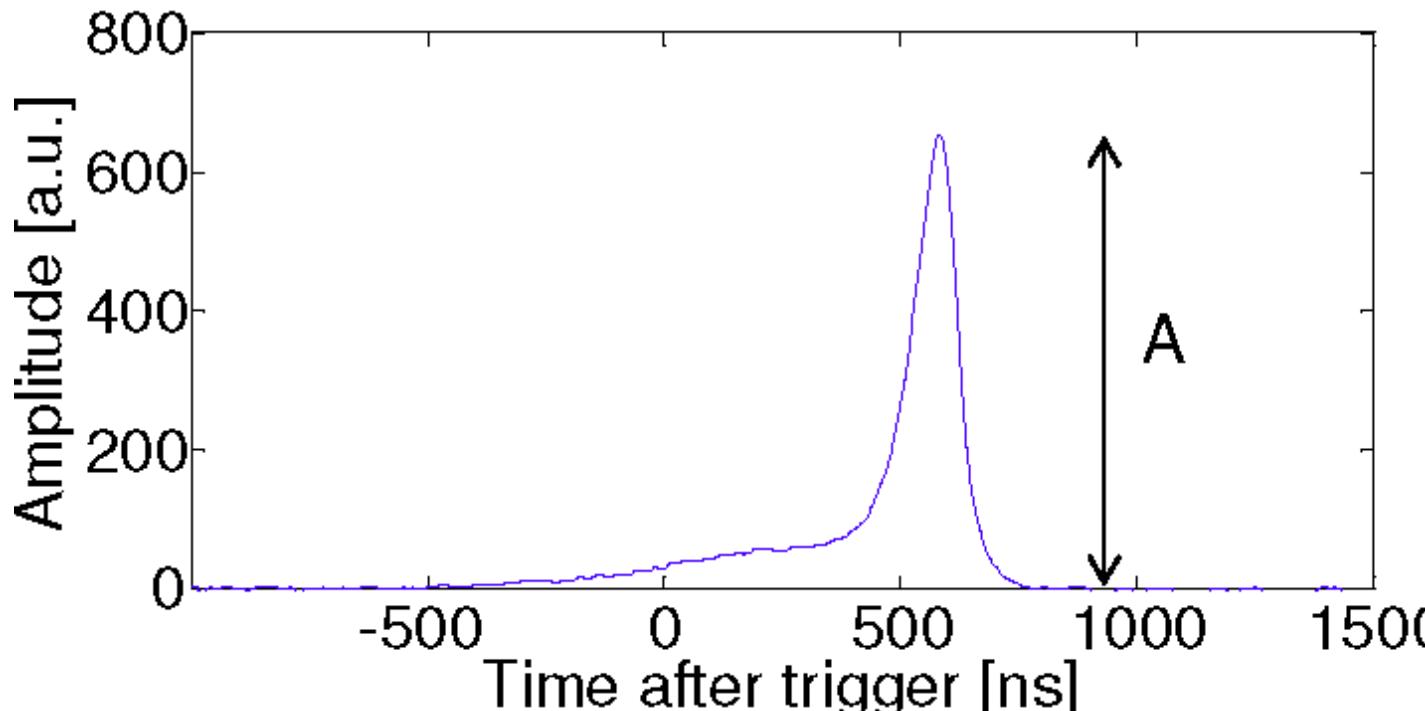
n-type detectors
with 18-fold
segmented
electrodes, 1.6 kg



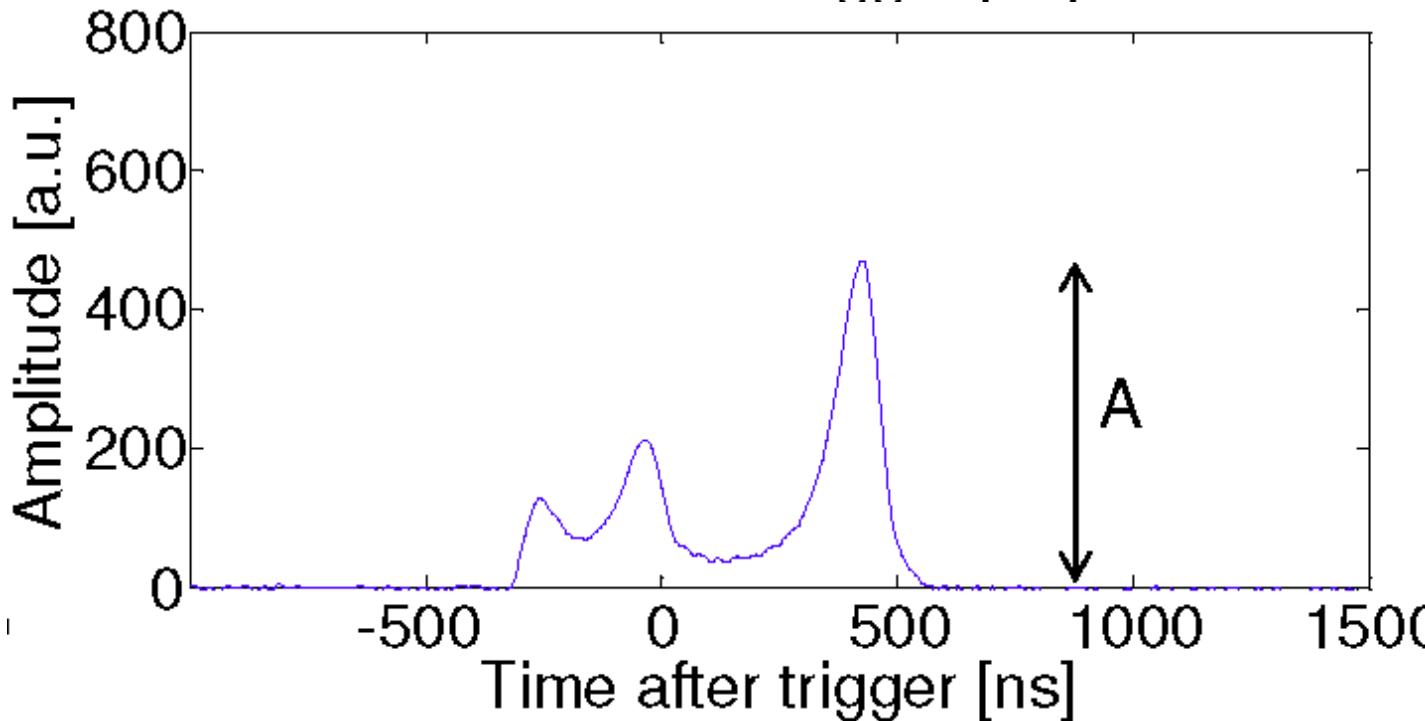
2) p-type BEGe



GERDA II: discriminazione con BEGe



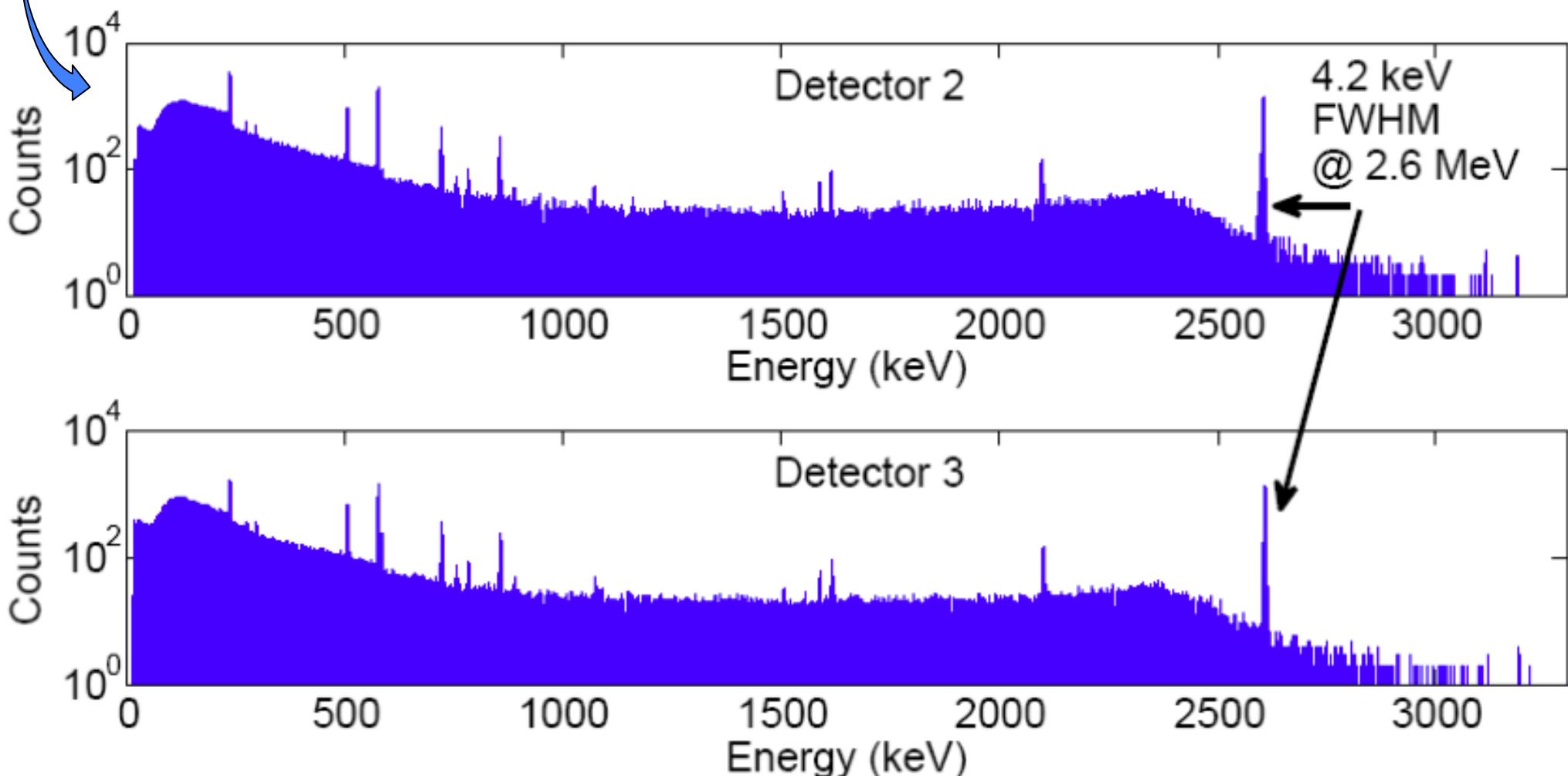
Singolo sito (segna)



Sito multiplo (fondo)

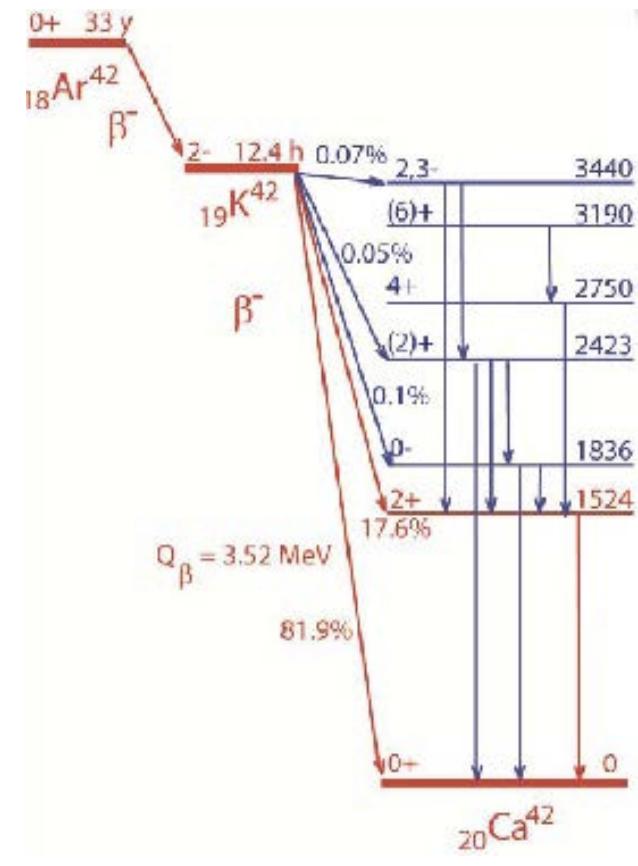
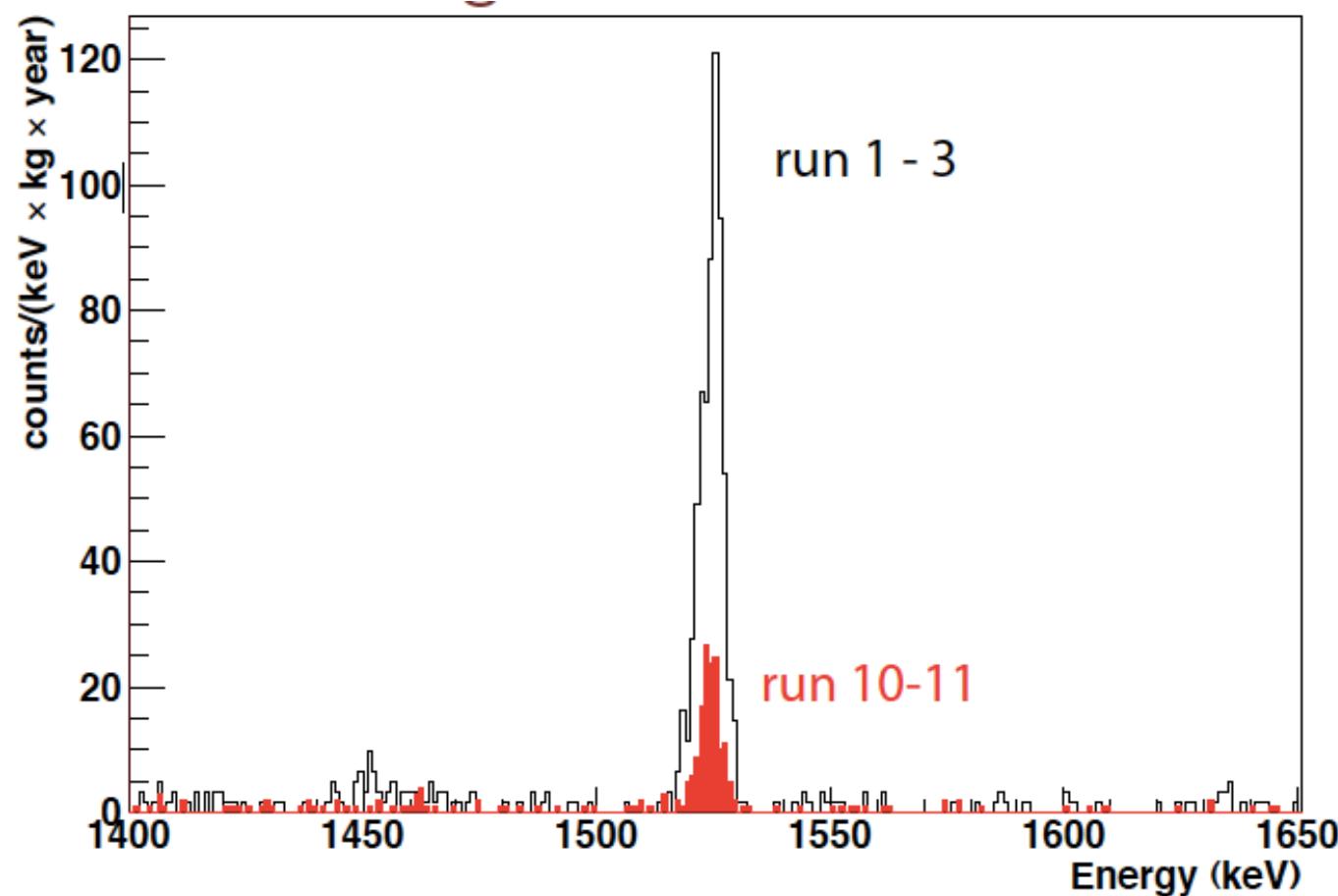
GERDA I: stato

- Fase preliminare con rivelatori di Germanio naturale (2010)
- Introduzione rivelatori IGEX/HM ed inizio GERDA I (2011)



GERDA I: stato

- Primo inserimento: giugno 2010
- Misure di fondo e di calibrazione
 - background index from 0.169 cts/(keV kg y) to 0.074 cts/(keV kg y)
 - current background index (E-field free): 0.055 cts/(keV kg y)



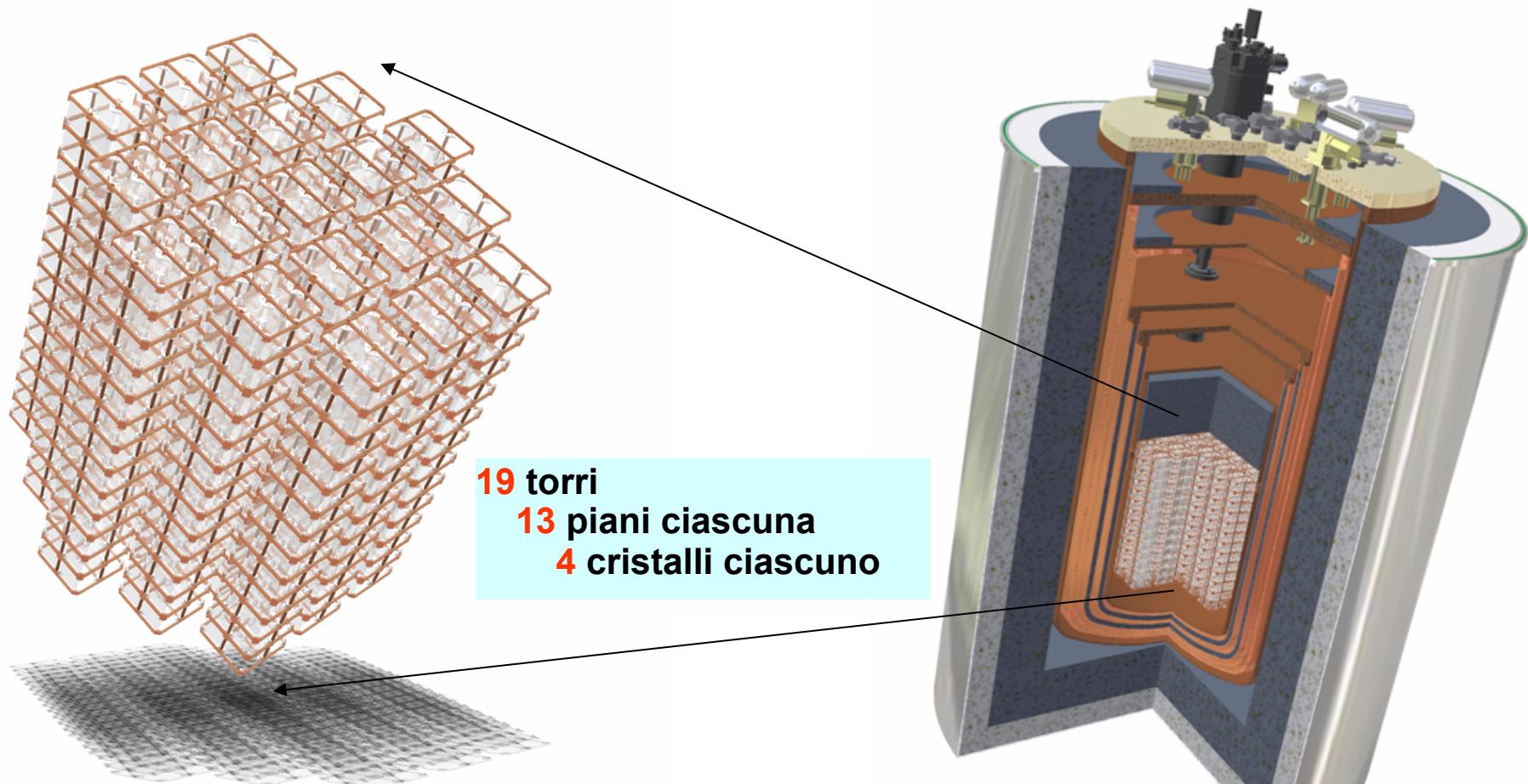
Cryogenic Underground Observatory for Rare Events

- array compatto di 988 cristalli di TeO_2 $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ (750 g)

741 kg TeO_2 : calorimetro granulare

600 kg Te = 203 kg ^{130}Te

- Rivelatore singolo ad alta granularità'



CUORE (2)



Collaborazione internazionale

I - GB - US- CINA

Buon controllo del fondo

- Setup sperimentale dedicato
- Fattibilità dimostrata (CUORICINO)

In fase di installazione @ LNGS

- criostato realizzato con tecniche speciali e materiali selezionati
- refrigeratore a diluizione senza liquidi criogenici
- diversi livelli (strati) di schermatura

Approvato nell'autunno del 2004

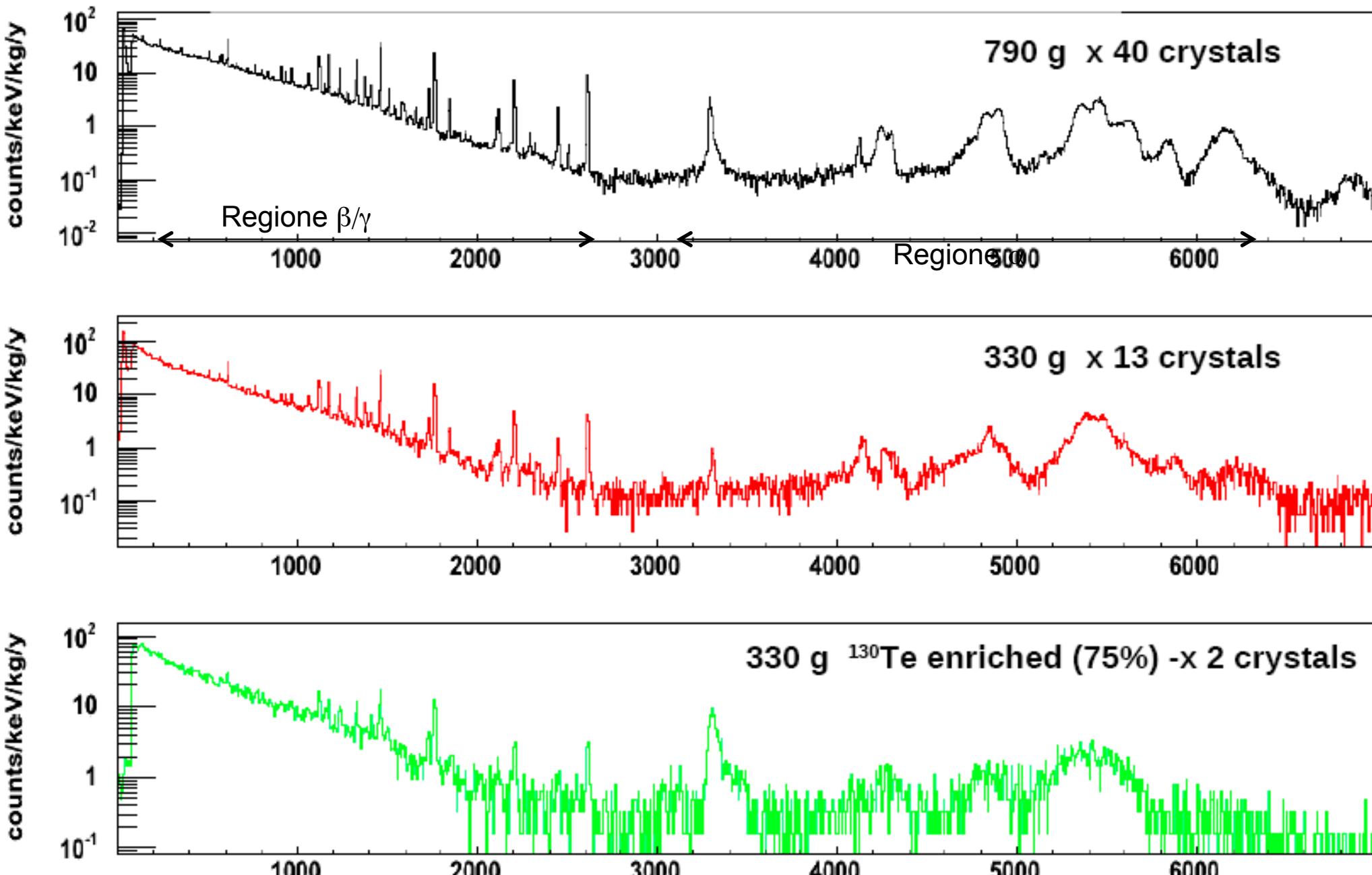
In costruzione dal 2005

- 988 cristalli di TeO_2 finanziati da INFN and DoE. Inizio produzione: 2008
- La prima torre di CUORE (CUORE-0) sara' assemblata durante la prossima estate (2011)

sensibilità a 5 anni

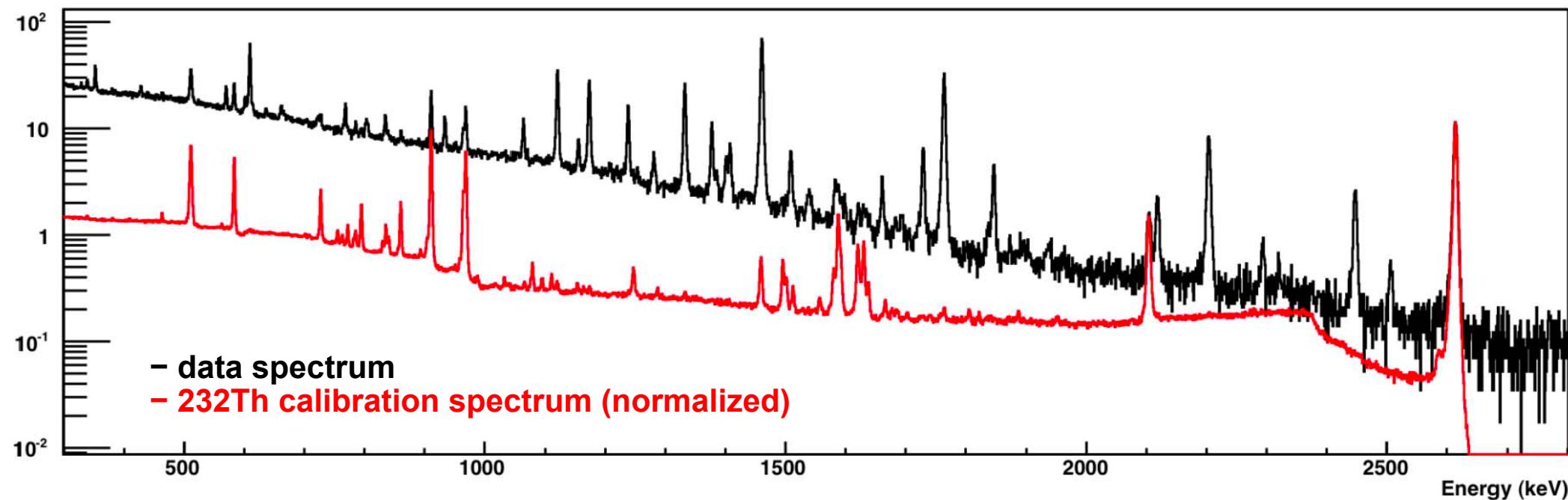
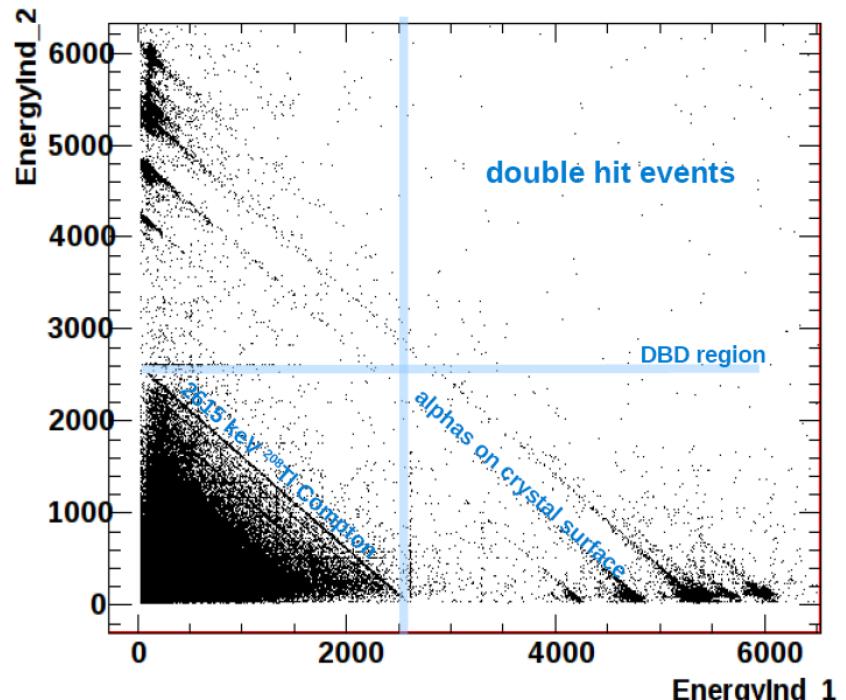
B c/keV/ton/y	D keV	$T_{1/2}$ 10^{26} y	$ \langle m_\nu \rangle $ meV
10	5	2.1	19-100

CUORICINO: il fondo



CUORICINO: background budget

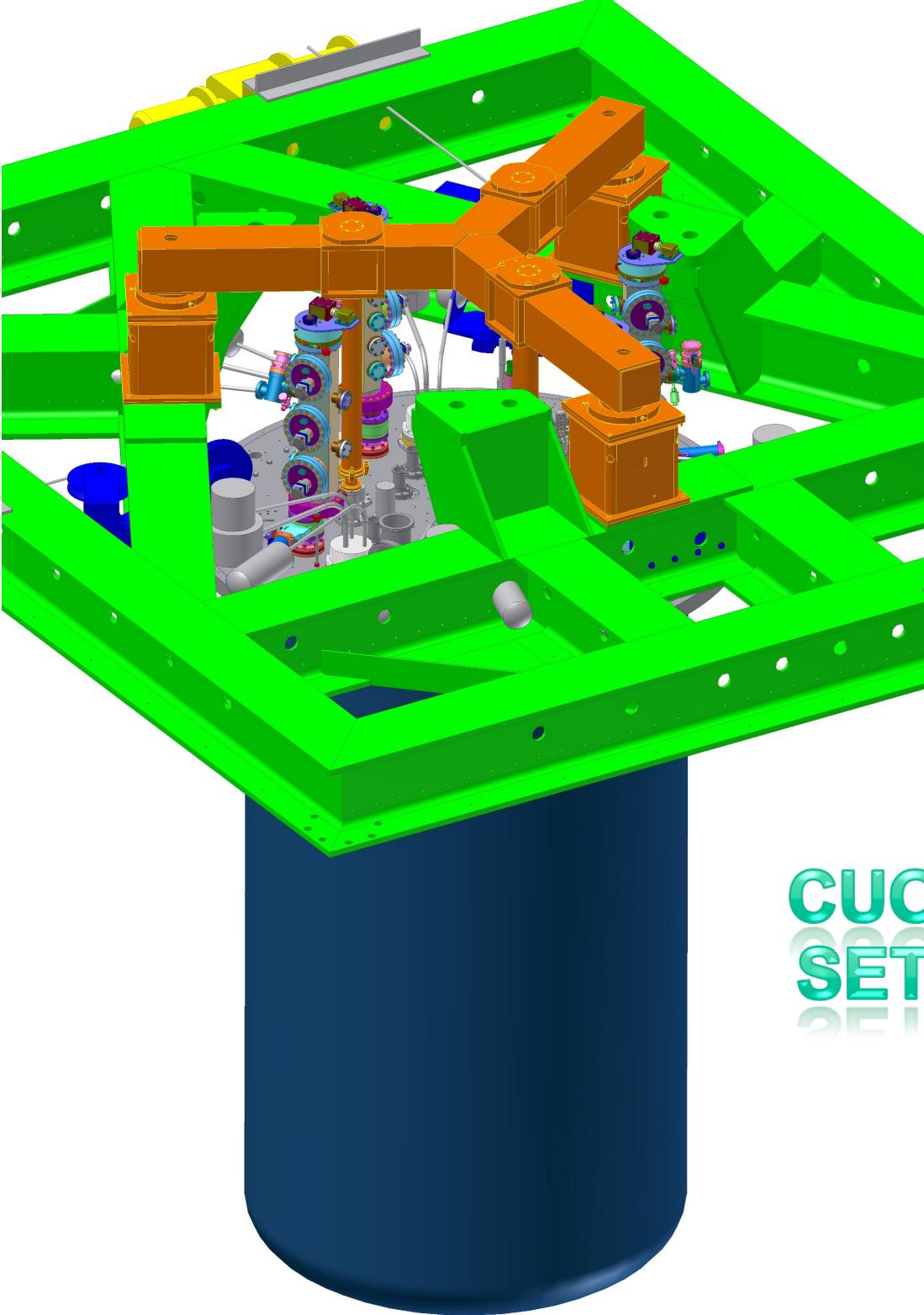
- (~40%) Compton events from 2615 keV peak of ^{208}TI , from ^{232}Th cryostat contamination
- (~50%) Degraded alphas from ^{238}U and ^{232}Th on copper surfaces
- (~10%) Degraded alphas from ^{238}U and ^{232}Th on crystal surfaces



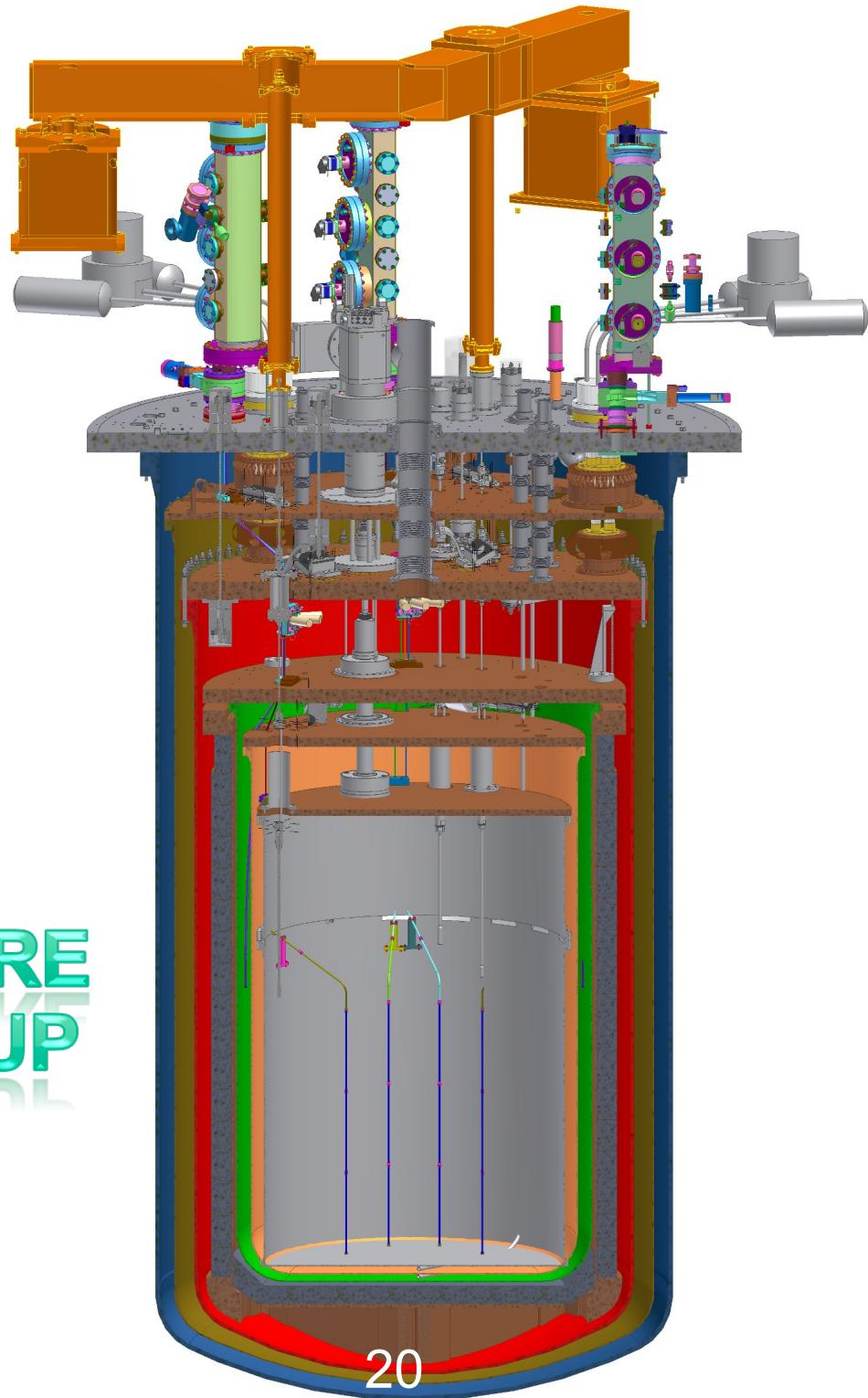
CUORE: piano temporale

ID	Task Name	Start	Finish	Est Float (mo.)			2011		2012		2013		2014	
					Qtr 3	Qtr 4	Qtr 1	Qtr 2	Qtr 3	Qtr 4	Qtr 1	Qtr 2	Qtr 3	Qtr 4
1	1.0 Hut	Mon 10/13/08	Fri 6/29/12											
2	CUORE Lifting System (CLS)	Thu 9/17/09	Wed 4/27/11	n/a										
3	Clean Room Radon Seal & Abatement	Mon 10/13/08	Wed 12/14/11	n/a										
4	Faraday Cage	Mon 1/2/12	Fri 6/29/12	13 mo										
5	2.0 Detector	Wed 8/1/07	Fri 8/16/13											
6	Crystal Procurement	Wed 6/30/10	Fri 8/31/12	7 mo.										
7	Thermistors	Wed 3/16/11	Fri 7/13/12	8 mo.										
8	Structure - Design, Prod.	Wed 8/1/07	Mon 1/9/12											
9	Surface Cleaning	Thu 4/24/08	Fri 5/31/13	0 mo.										
10	3.0 Cryogenics	Wed 8/1/07	Thu 11/15/12											
11	3.1 Cryo Design & Construction	Wed 8/1/07	Thu 11/15/12											
12	Cryogenic Procurements	Wed 8/1/07	Thu 2/16/12											
13	Cooling Units and Test Dewar	Wed 8/1/07	Fri 11/4/11	5 mo.										
14	300K - 4K Chamber Fab	Mon 5/10/10	Thu 6/9/11	1 mo.										
15	600mK - MC Fab	Fri 6/10/11	Thu 2/16/12	2 mo.										
16	Detector Suspension	Mon 3/1/10	Fri 3/30/12	16 mo.										
17	Internal Lead Shielding	Mon 12/1/08	Thu 11/15/12	9 mo.										
18	3.2 Calibration System	Thu 4/23/09	Fri 8/31/12											
19	Finalize Calibration Design	Thu 4/1/10	Wed 3/23/11											
20	Calibration Prototypes	Thu 4/23/09	Fri 4/15/11	2 mo.										
21	Calibration Construction	Tue 2/1/11	Fri 8/31/12	3 mo.										
22	4.0 Electronics	Tue 12/22/09	Thu 12/6/12											
23	Elec. Production & Testing	Tue 12/22/09	Thu 12/6/12	2 mo.										
24	6.0 Data Analysis Tools	Mon 10/3/11	Fri 2/17/12	n/a										
25	7.0 Assembly Integration & Test	Fri 6/10/11	Mon 2/16/15											
26	Cryostat Integration into Hut	Fri 6/10/11	Thu 6/27/13											
27	Initial Installation & 4K Test	Fri 6/10/11	Mon 3/19/12	1 mo.										
28	Shield Install and Partial Load Test	Tue 3/20/12	Tue 11/6/12	1 mo.										
29	Base Temperature Test - Full Load	Wed 11/7/12	Thu 6/27/13	1 mo.										
30	7.4 Tower Assembly & Integration	Mon 10/31/11	Tue 7/30/13											
31	Assemble Towers 1 to 3	Mon 10/31/11	Thu 1/26/12											
32	Assemble Towers 4 to 9	Mon 6/4/12	Wed 11/7/12	4 mo.										
33	Assemble Towers 10 to 15	Mon 12/3/12	Thu 5/16/13	4 mo.										
34	Assemble Towers 16 to 19	Mon 6/3/13	Tue 7/30/13	0 mo.										
35	7.5 Electronics Install & Commissioning	Fri 12/7/12	Thu 6/6/13	2 mo.										
36	7.6 Detector Insertion & Sys. Testing	Thu 8/1/13	Mon 2/16/15											
37	Detector Insertion	Thu 8/1/13	Fri 10/25/13	3 wk.										
38	Initial Cooldown and System Check	Mon 11/11/13	Wed 1/22/14	3 wk.										
39	Lvl 2 System Test Complete	Fri 2/14/14	Fri 2/14/14											
40	CD 4 - US Deliverables Complete	Mon 2/16/15	Mon 2/16/15											

2/14



CUORE
SETUP



CUORE: edificio

Praticamente ultimato @ LNGS



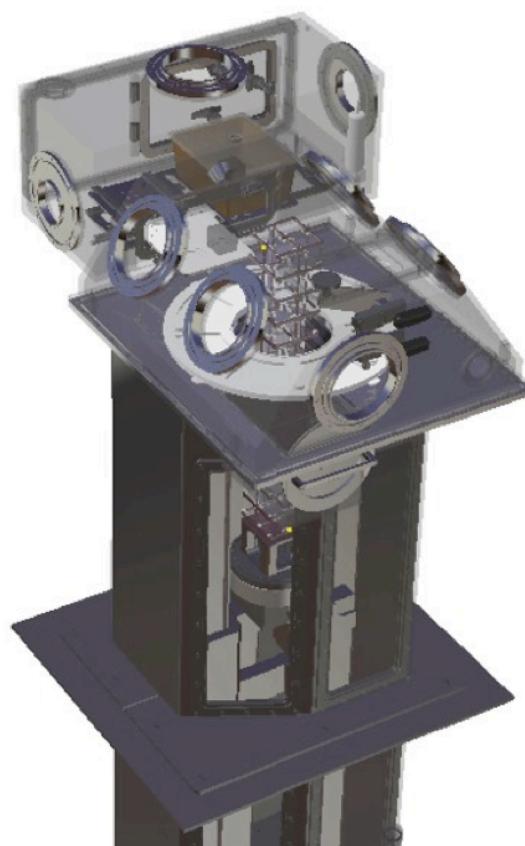
CUORE: linea di assemblaggio torri



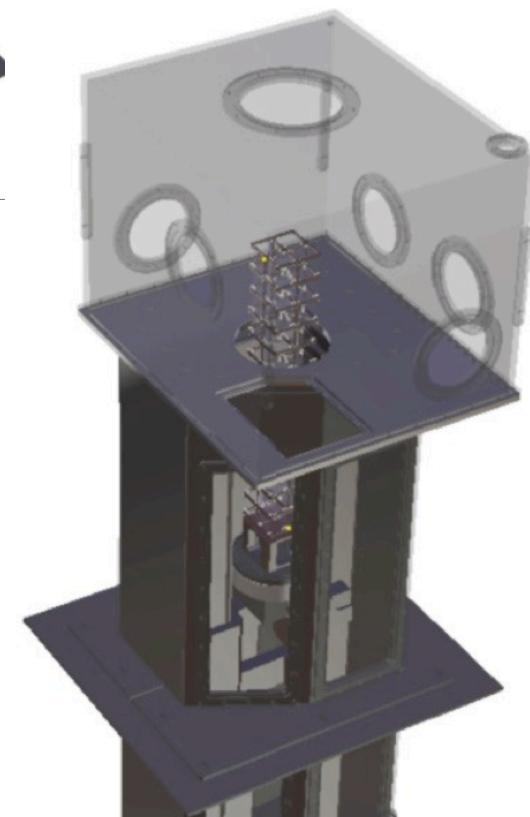
Mech Box



Bonding Box

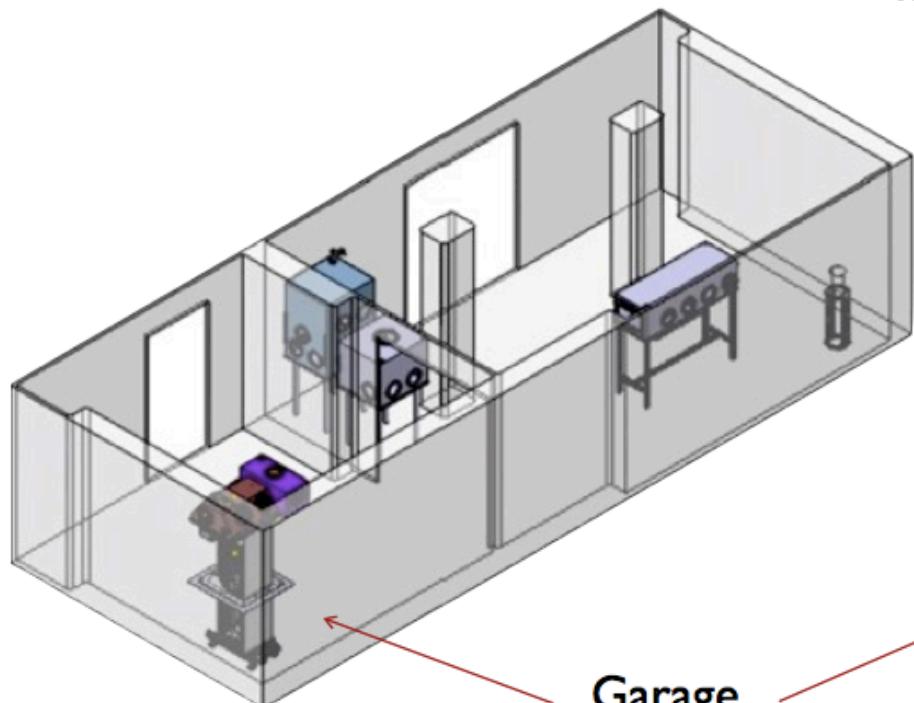


Cabling Box

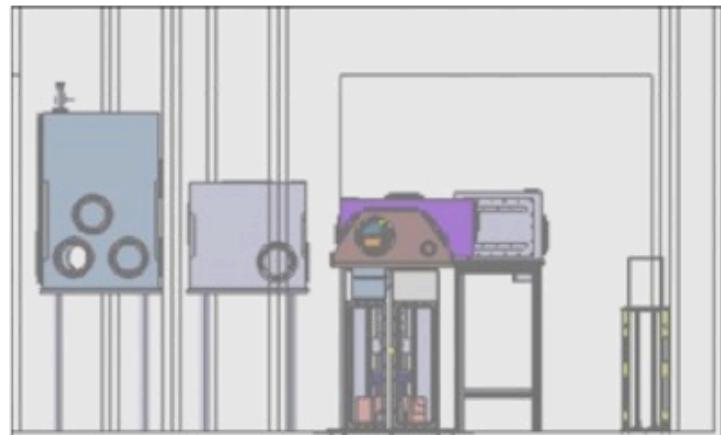
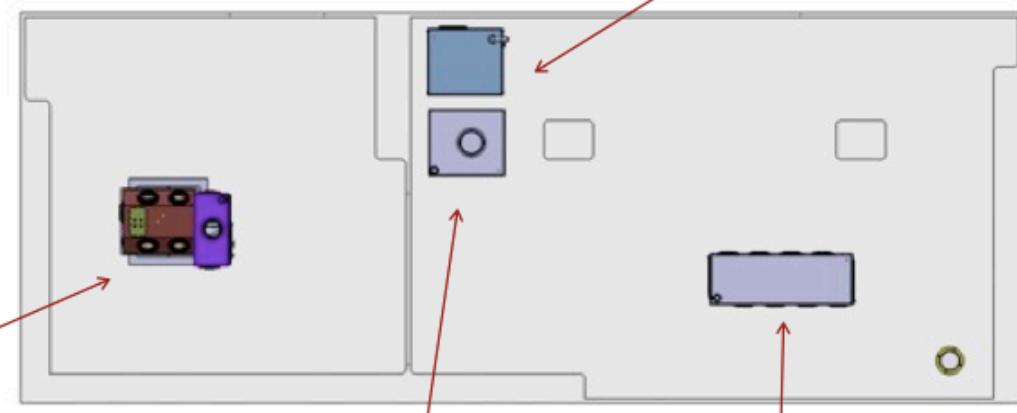


II GARAGE

CUORE: camera pulita e linea di assemblaggio torri



here goes the towers storage area



clean room layout

CUORE-0

- prima torre di CUORE
- criostato di CUORICINO (hall A @ LNGS)

Motivazioni

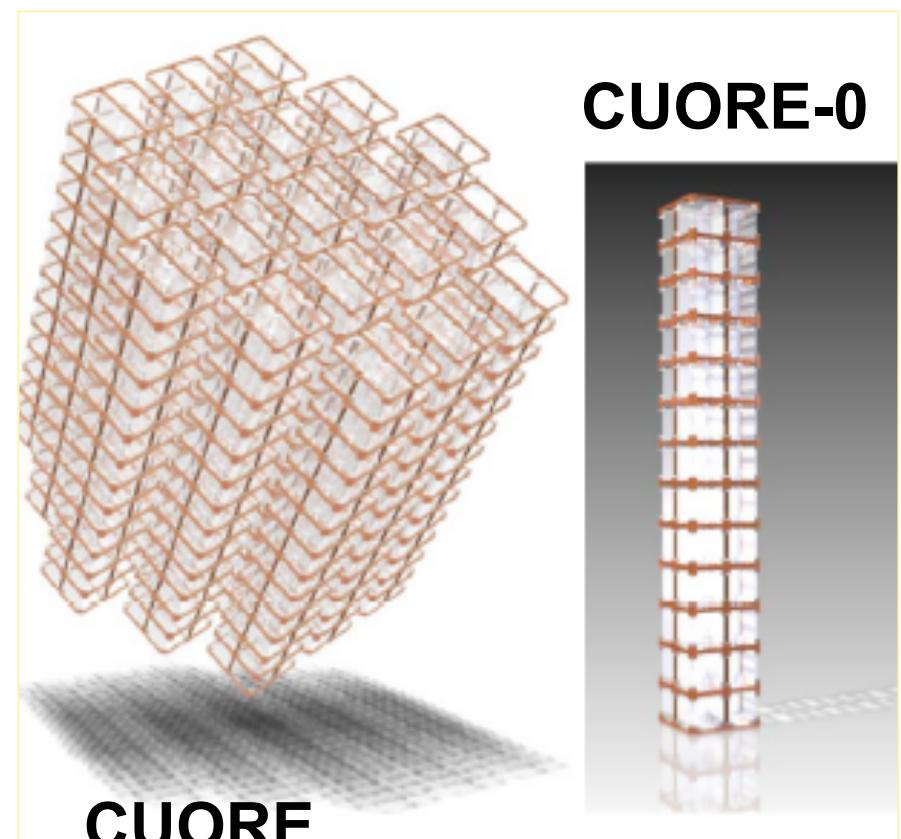
test ad alta statistica dei numerosi cambiamenti introdotti per la struttura ed assemblaggio delle torri di CUORE:

- Incollaggio
- montaggio
- Assemblaggio
- Fili
- ...

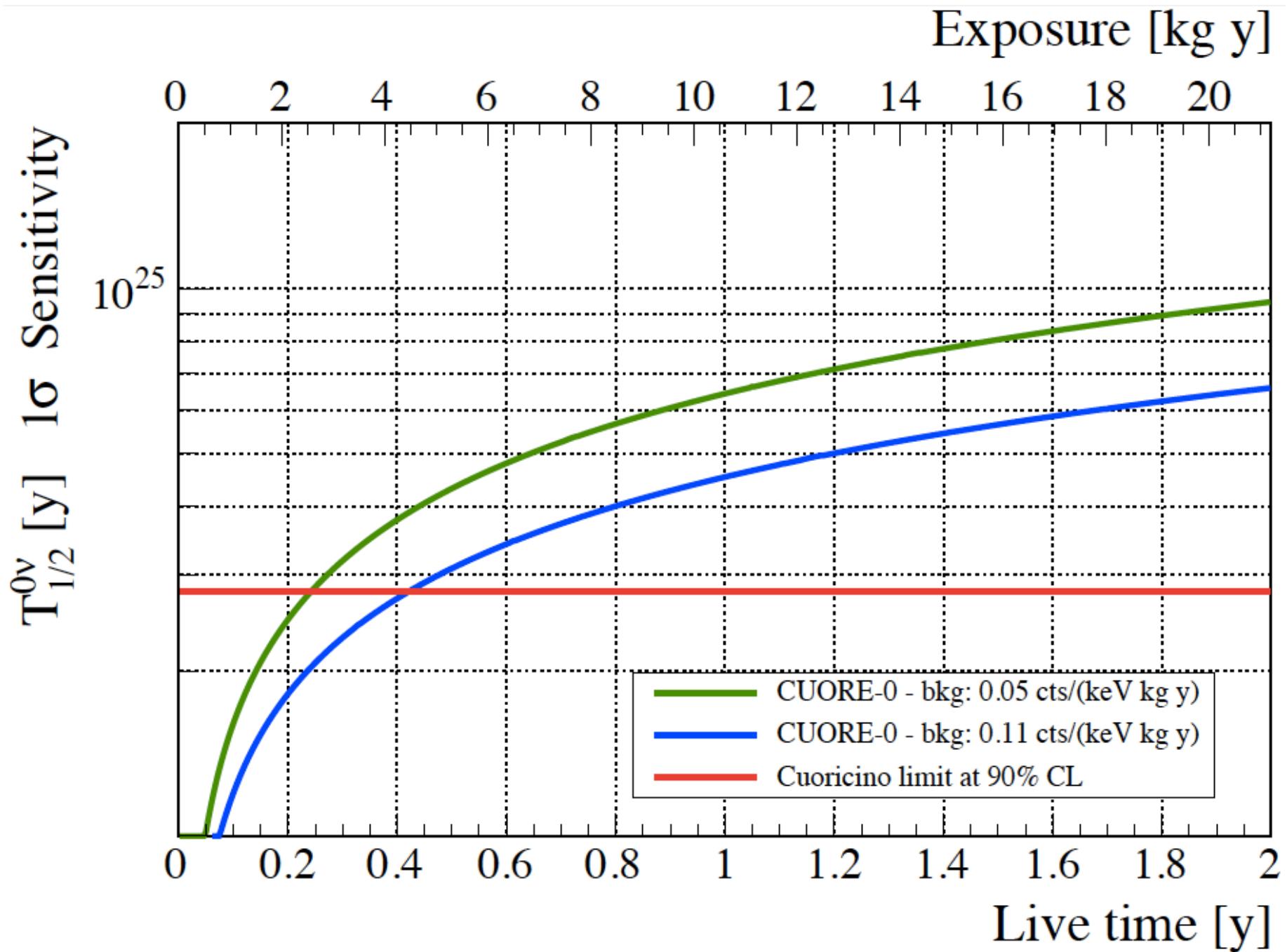
Dimostratore di CUORE: fondo atteso in ROI e nella regione alfa (> 3-4 MeV) migliorato di un fattore 3 rispetto a CUORICINO

0.07 counts/keV/kg/y

Esperimento indipendente: sensibilità migliore rispetto a CUORICINO



CUORE-0: sensibilità'



Bolometri: strategie per il controllo del fondo

Strategia adottata da CUORE: eliminazione/riduzione del contributo superficiale

Azione sulla superficie dei materiali

- Tecniche di ultra-pulizia del rame
- Rivestimento con strati di plastica (PET)

Test diretto @ LNGS (TTT): TECM Legnaro

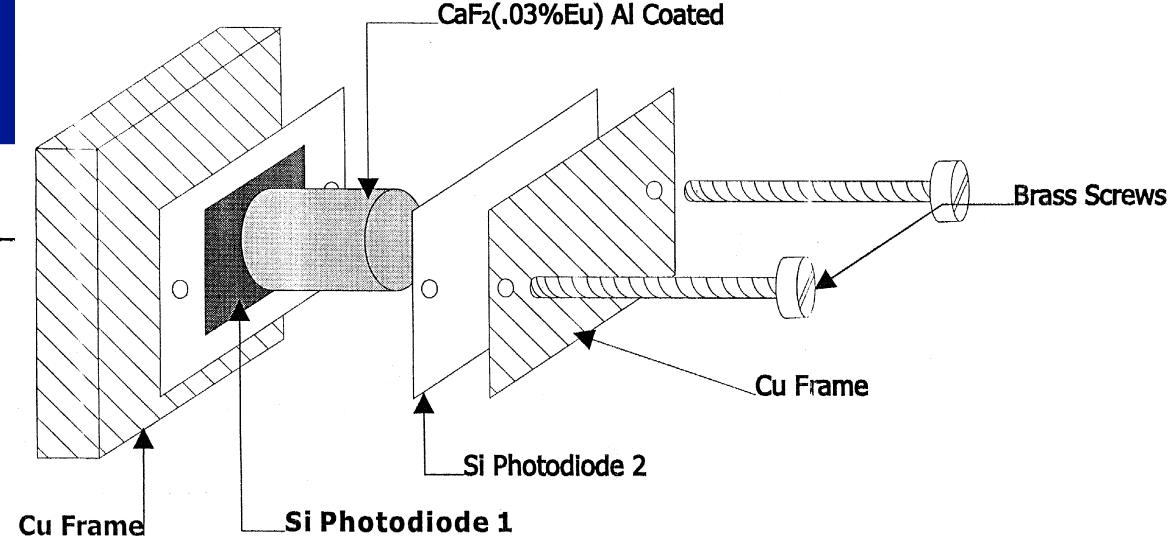
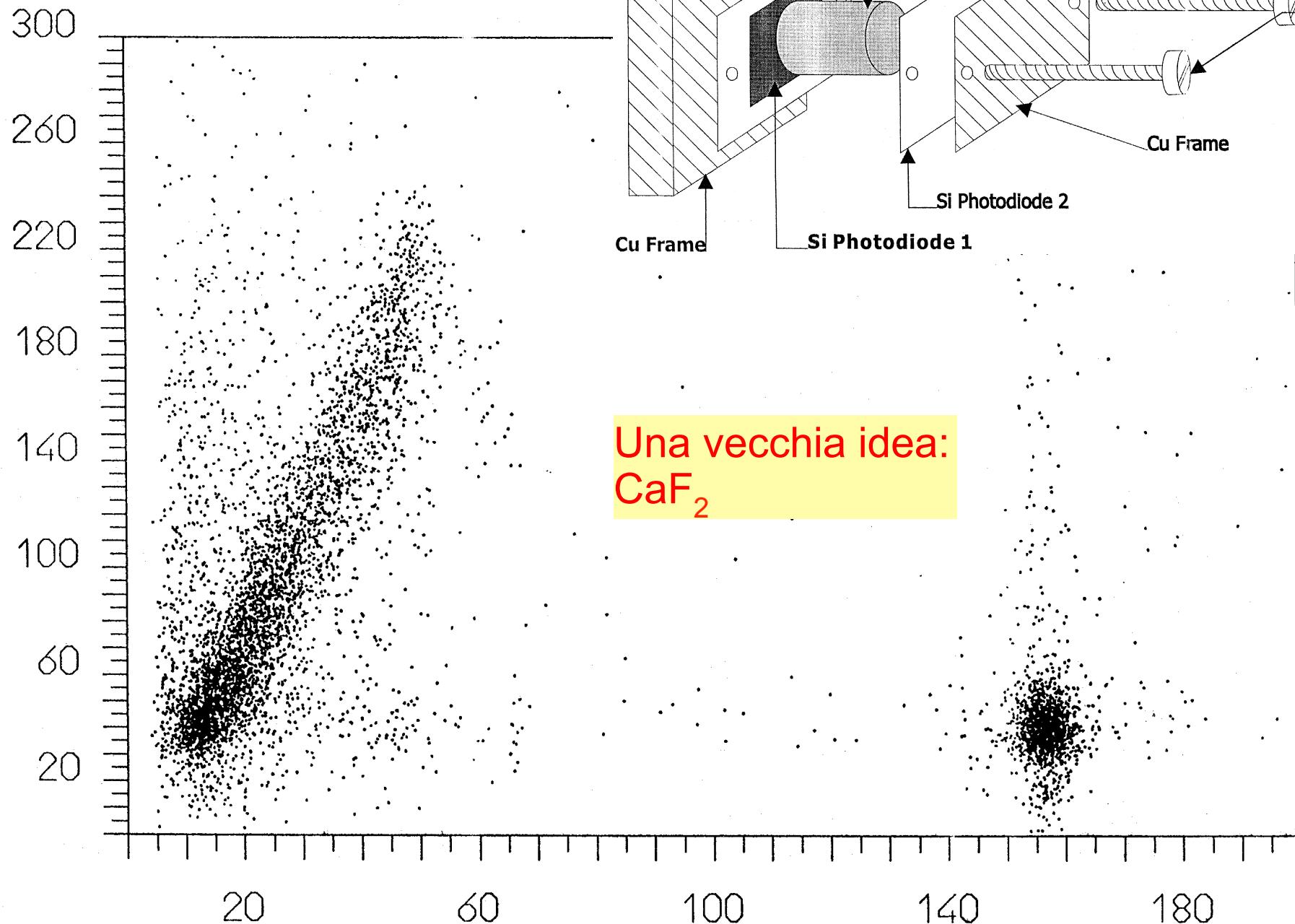
Strategia alternativa

Azioni sul rivelatore: rivelatori compositi

- Scintillazione (diretta/indiretta)
- Cerenkov
- Topologia

Bolometri scintillanti

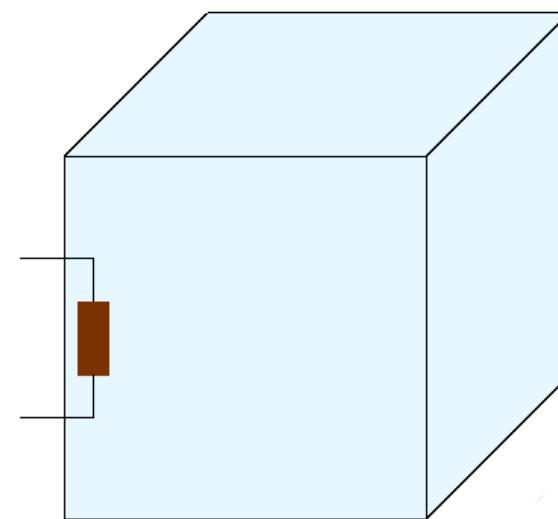
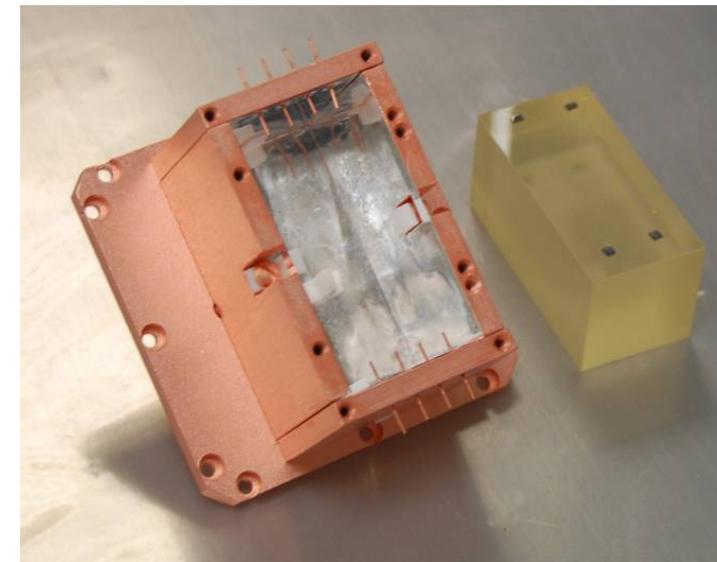
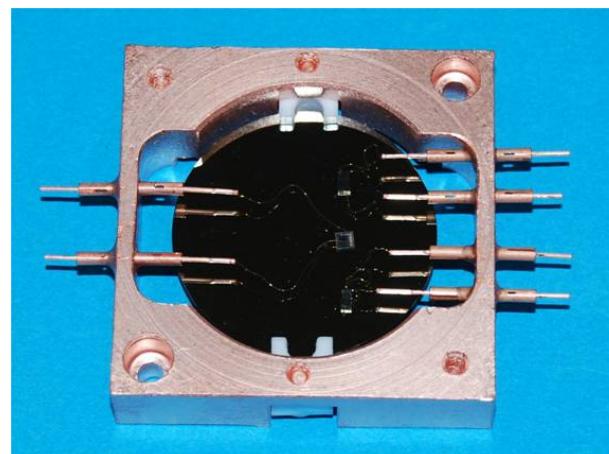
Scintillation [mV]



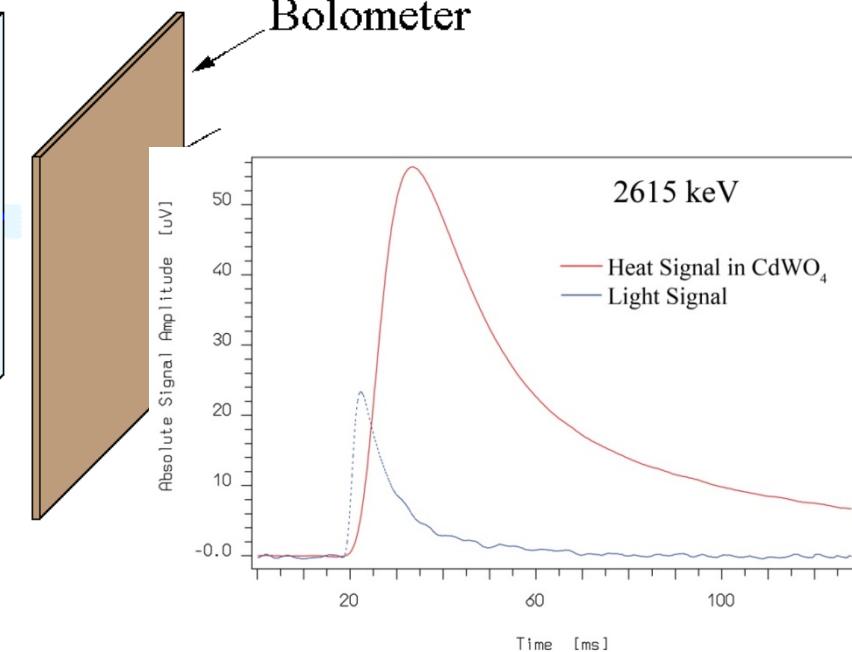
Bolometri scintillanti: BOLUX

Tecnica molto promettente per la riduzione (e diagnostica) del fondo

Concept: separate the dangerous alpha background exploiting different scintillating properties



Scintillating Bolometer

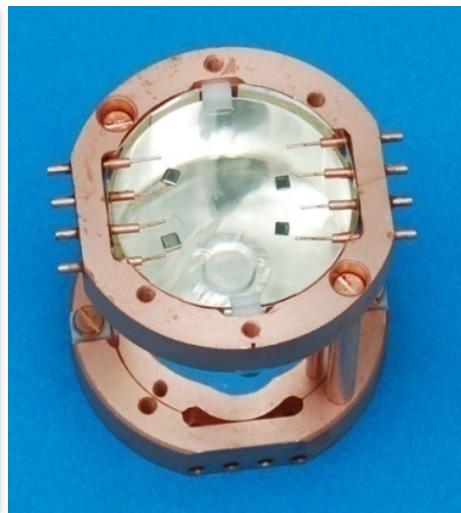
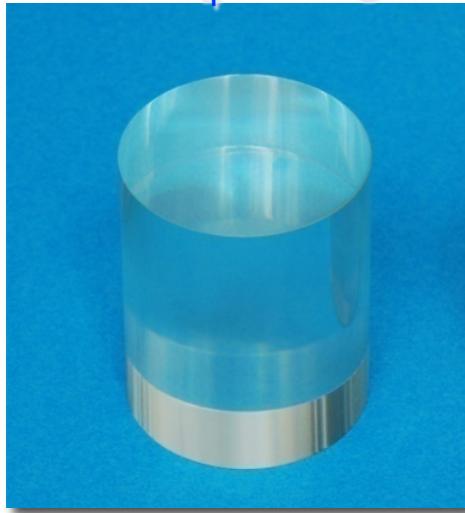


Not viable for TeO₂

... but ...

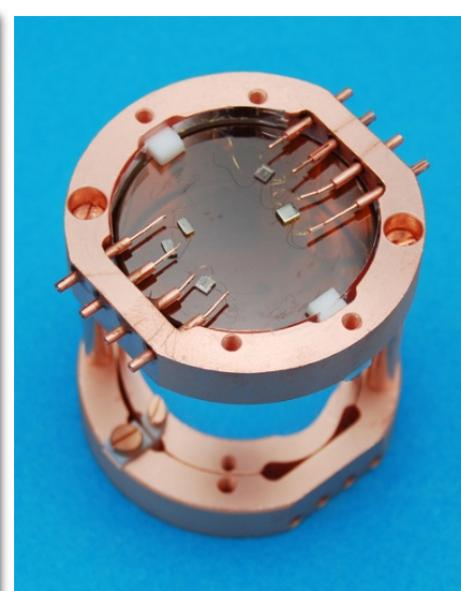
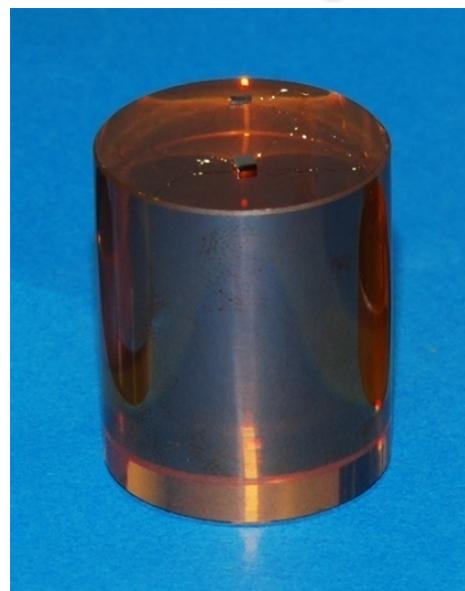
Bolometri scintillanti: BOLUX

CdWO_4 : 508g



- Already tested different scintillating crystals (CdWO_4 , CaF_2 , CaMoO_4 , SrMoO_4 , PbMoO_4 , ZnSe , ...).
- With some of them we have obtained excellent results (for example CdWO_4 , CaMoO_4 and ZnSe).

ZnSe : 337 g



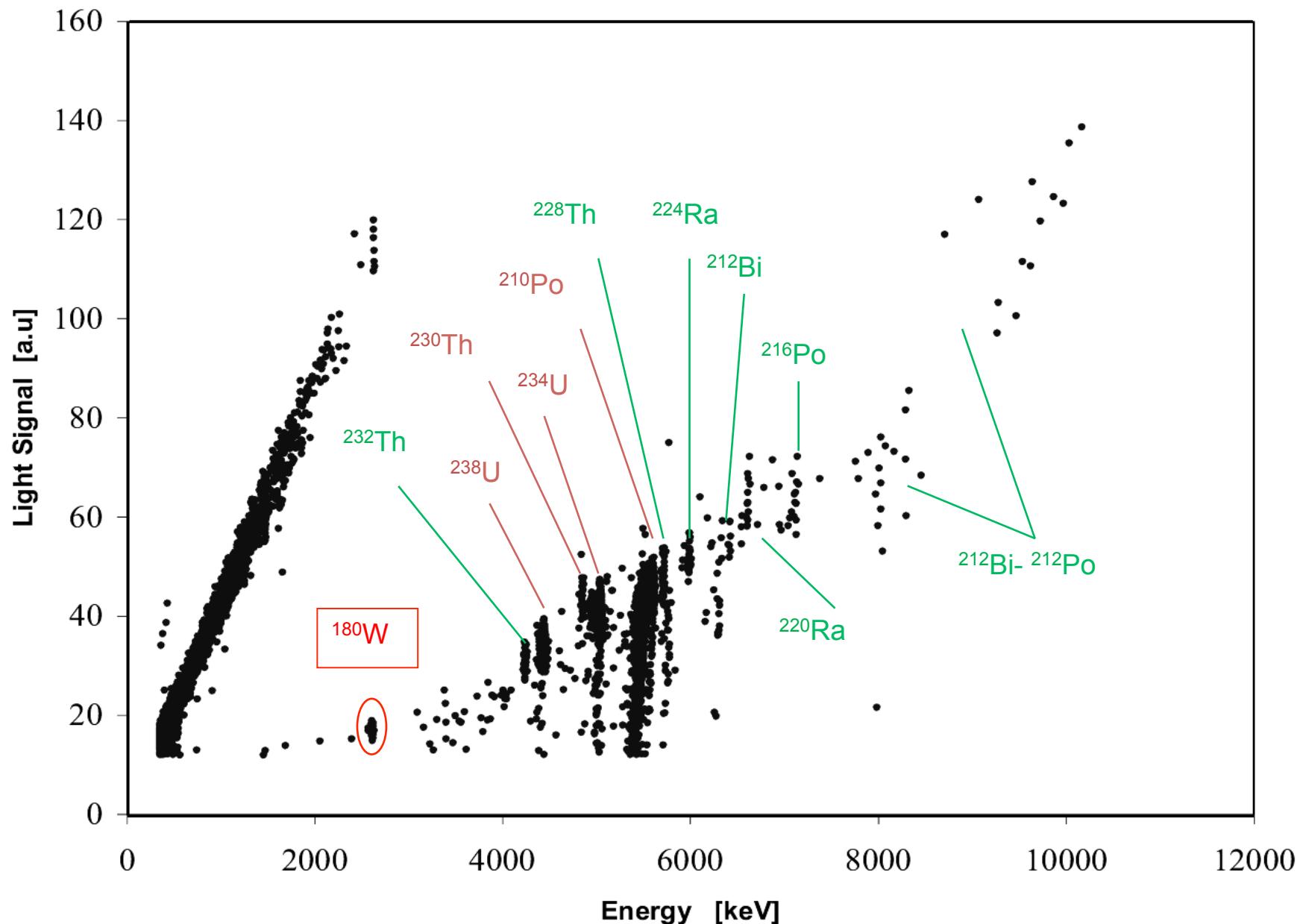
CaMoO_4 : 157g



BOLUX: CdWO₄

Background CdWO₄ 3x3x6 (426 g) – Scatter Plot

724 hours



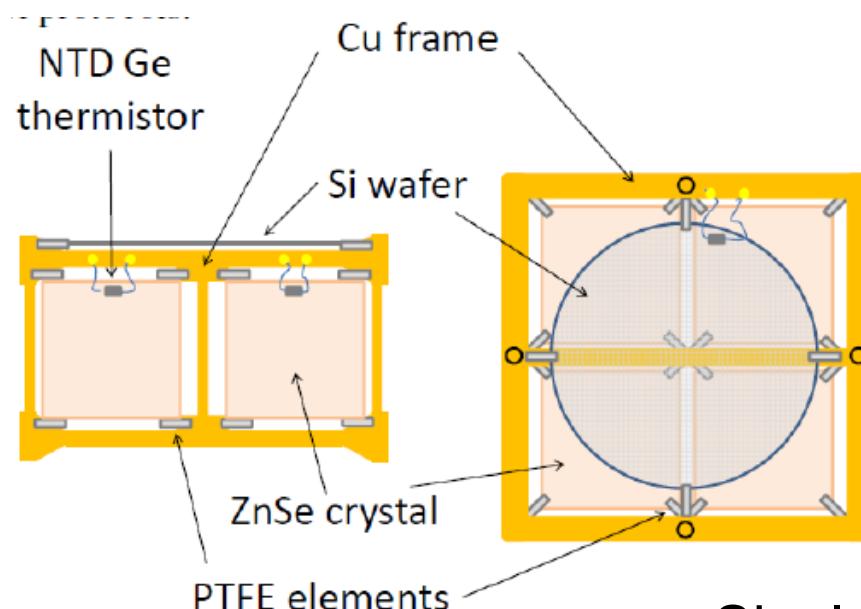
LUCIFER: progetto ERC

^{82}Se – ^{116}Cd – ^{100}Mo

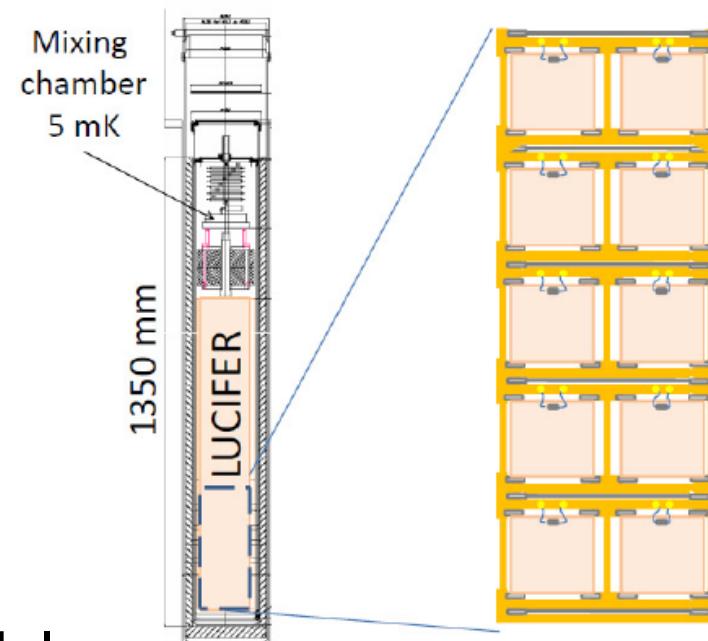
Matrice di bolometri scintillanti operanti a 10 mK (ZnSe or CdWO₄ or ZnMoO₄)

Prima fase: 20 Kg (2013) – LNGS – basato su R&D INFN-V @ LNGS

Risoluzione energetica dimostrata: 0.25-1 % FWHM



Single module



Crystal	Isotope weight	Useful material	Half Life limit (10^{26}y)	Sensitivity* to m_{ee} (meV)
CdWO ₄	^{116}Cd 15.1 kg	32%	1.15	65-80
ZnMoO ₄	^{100}Mo 11.3 kg	44%	1.27	67-73
ZnSe [baseline]	^{82}Se 17.6 kg	56%	2.31	52-65
ZnSe [option 1]	^{82}Se 20.5 kg	56%	2.59	49-61
ZnSe [option 2]	^{82}Se 27.8 kg	56%	3.20	44-55

SuperNEMO

Francia, UK, Russia, Spagna, USA, Giappone, Repubblica Ceca, Ucraina, Finlandia

- Stesso principio di NEMO3 su scala maggiore
100 kg of ^{82}Se or ^{150}Nd
- Possibilita' di produrre ^{150}Nd (AVLIS)
- Calorimetro tracciante
- Tecnologia provata (NEMO3)
- **Topologia (rivelazione dei 2 elettroni)**
- **Energie singole e somma + correlazione angolare**
- **Identificazione delle particelle**
- Background control
- **source purification**
- **background level measurement**
- **external background reduction (Rn)**

3 years R&D aiming at a 50-90 meV

$\langle m_{\nu} \rangle$ sensitivity: $T_{1/2} > 2 \cdot 10^{26} \text{ yr}$

- improvement of energy resolution
- increase of efficiency
- background reduction

funded by France, UK and Spain

Planar geometry

- source (40 mg/cm^2): 12 m^2
- tracking volume: ~ 3000 channels
- calorimeter: ~ 1000 PMT

Modular:

- $\sim 5 \text{ kg}$ of enriched isotope/module
- **100 kg: 20 modules**
- **$\sim 60\,000$ channels for drift chamber**
- **$\sim 20\,000$ PMT**

energy resolution $\Delta_E = 2.6\% @ 3 \text{ MeV}$
efficiency: 40%

Canfranc/LSM

- 2009: TDR
- 2011: commissioning and data taking of first module
- 2013: Full detector running

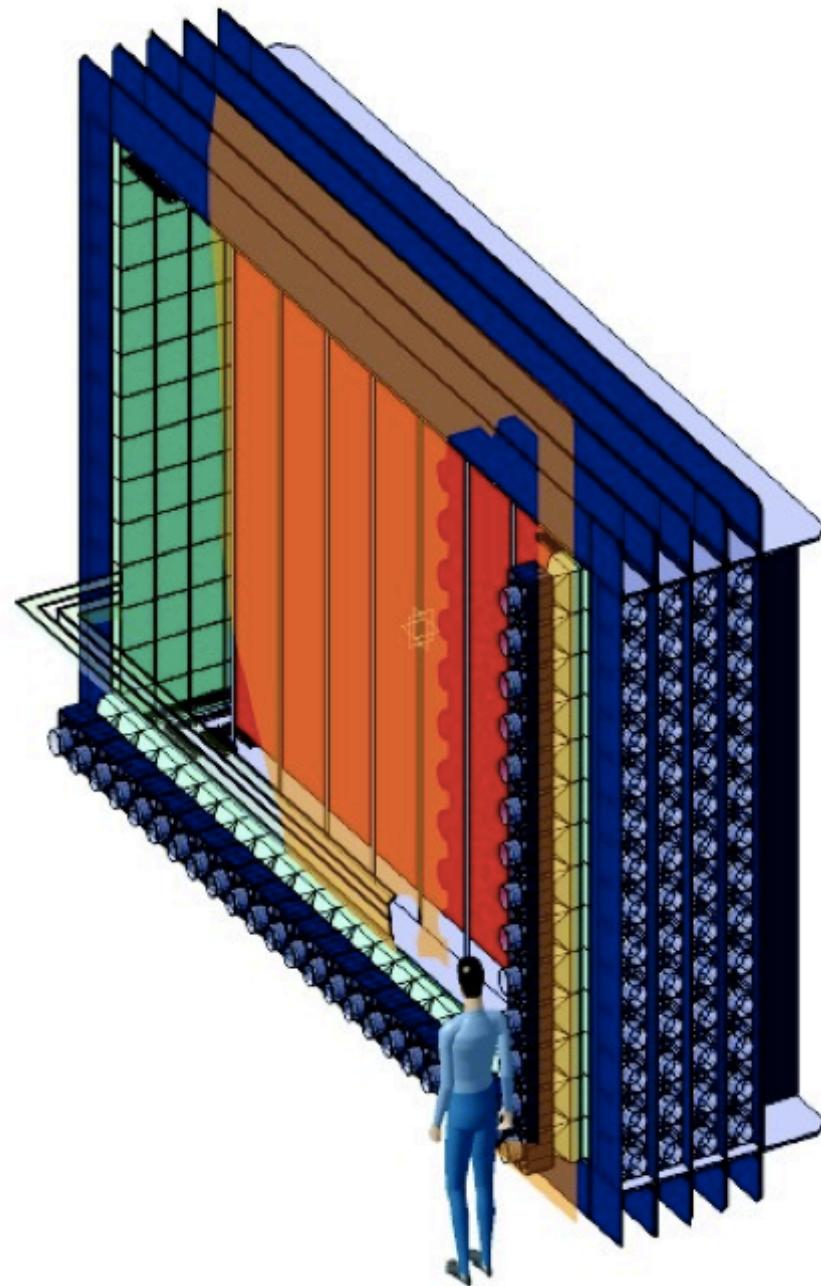
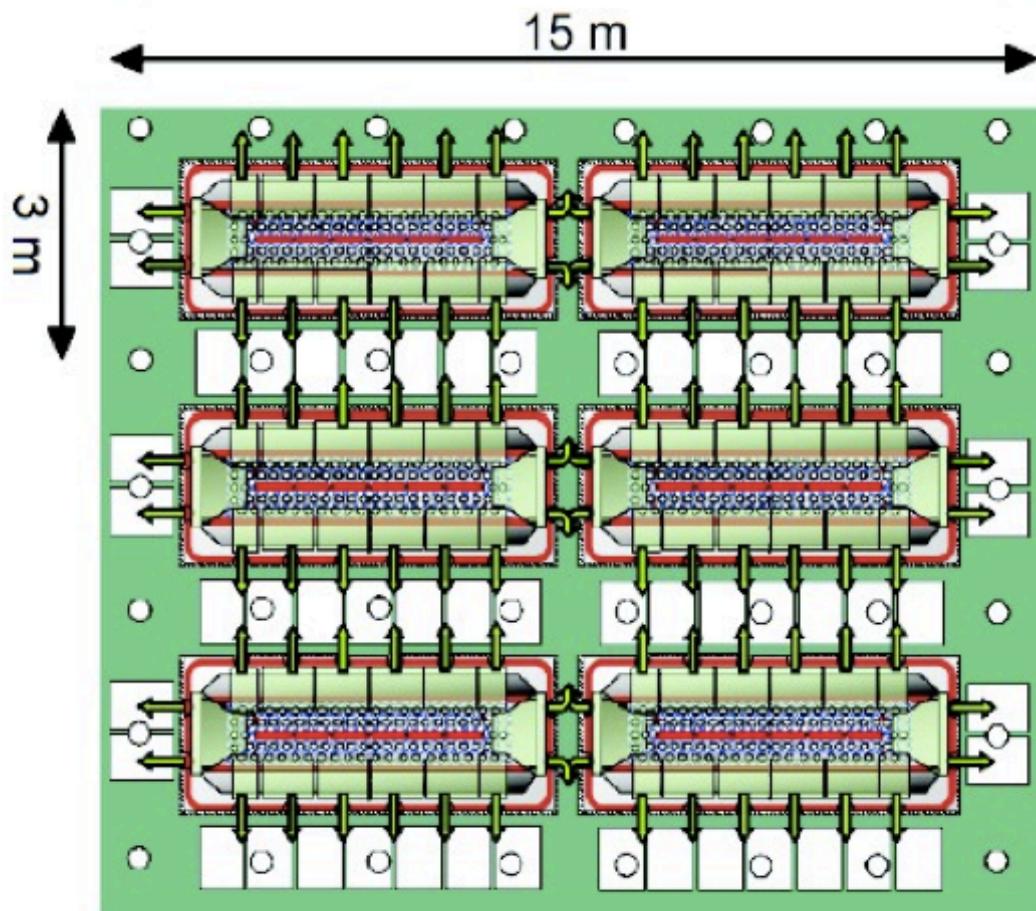
SuperNEMO

20 modules for 100 kg

Source: ~ 5kg (4.0 mg/cm², 12m²)

Tracking: ~2,100 drift cells).

Calorimeter: ~600 blocks



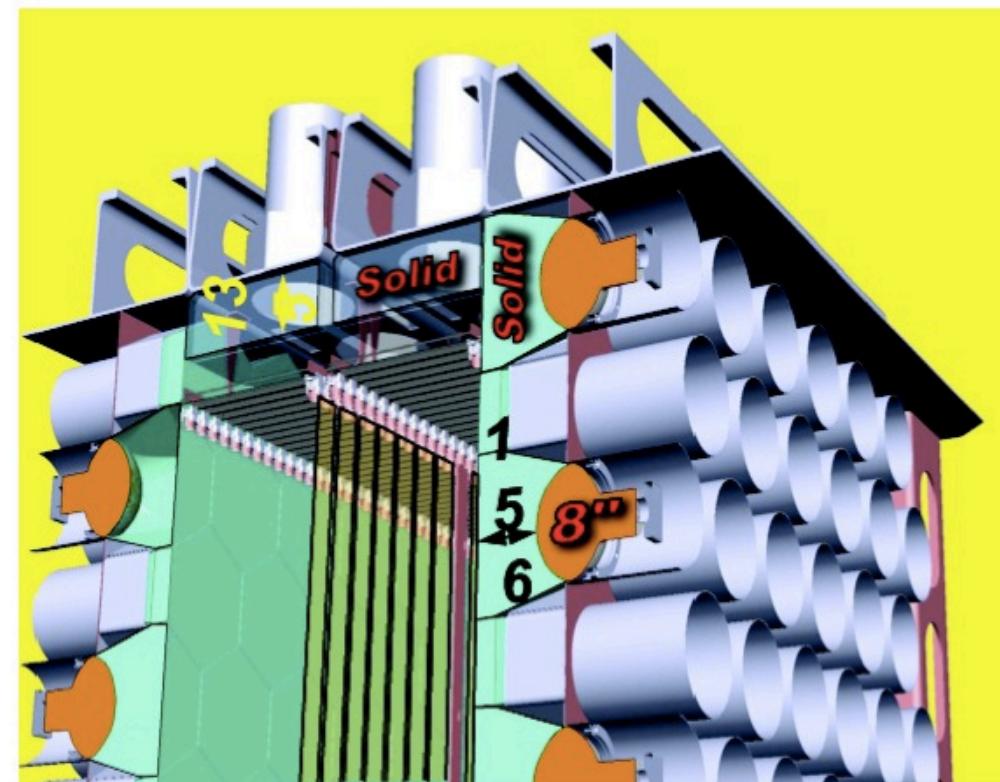
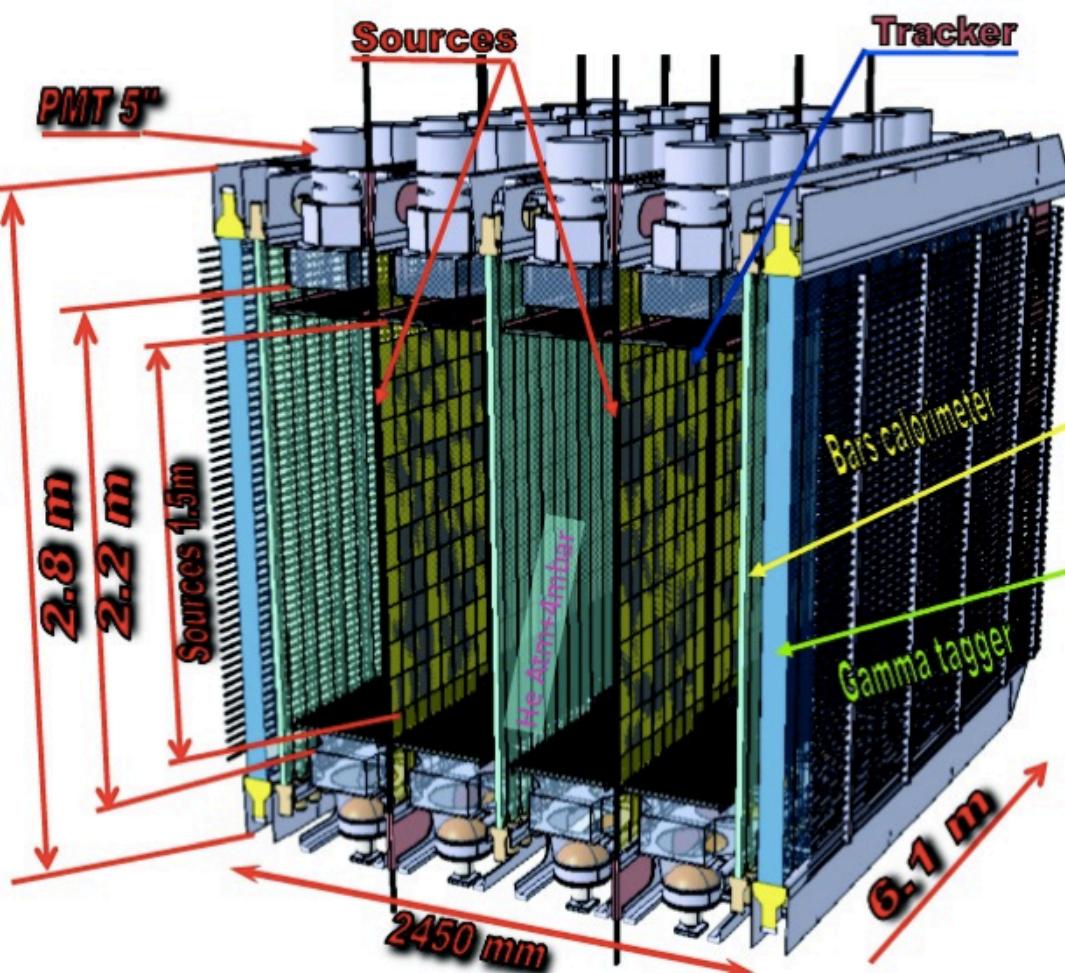
SuperNEMO



LABORATOIRE DE L'ACCÉLÉRATEUR LINÉAIRE

IN2P3-CNRS et Université PARIS-SUD Centre Scientifique d'Orsay - Bât 200 - B.P. 34 91898 ORSAY Cedex (France)

J.FORGET & C.BOURGEOIS - SuperNEMO module

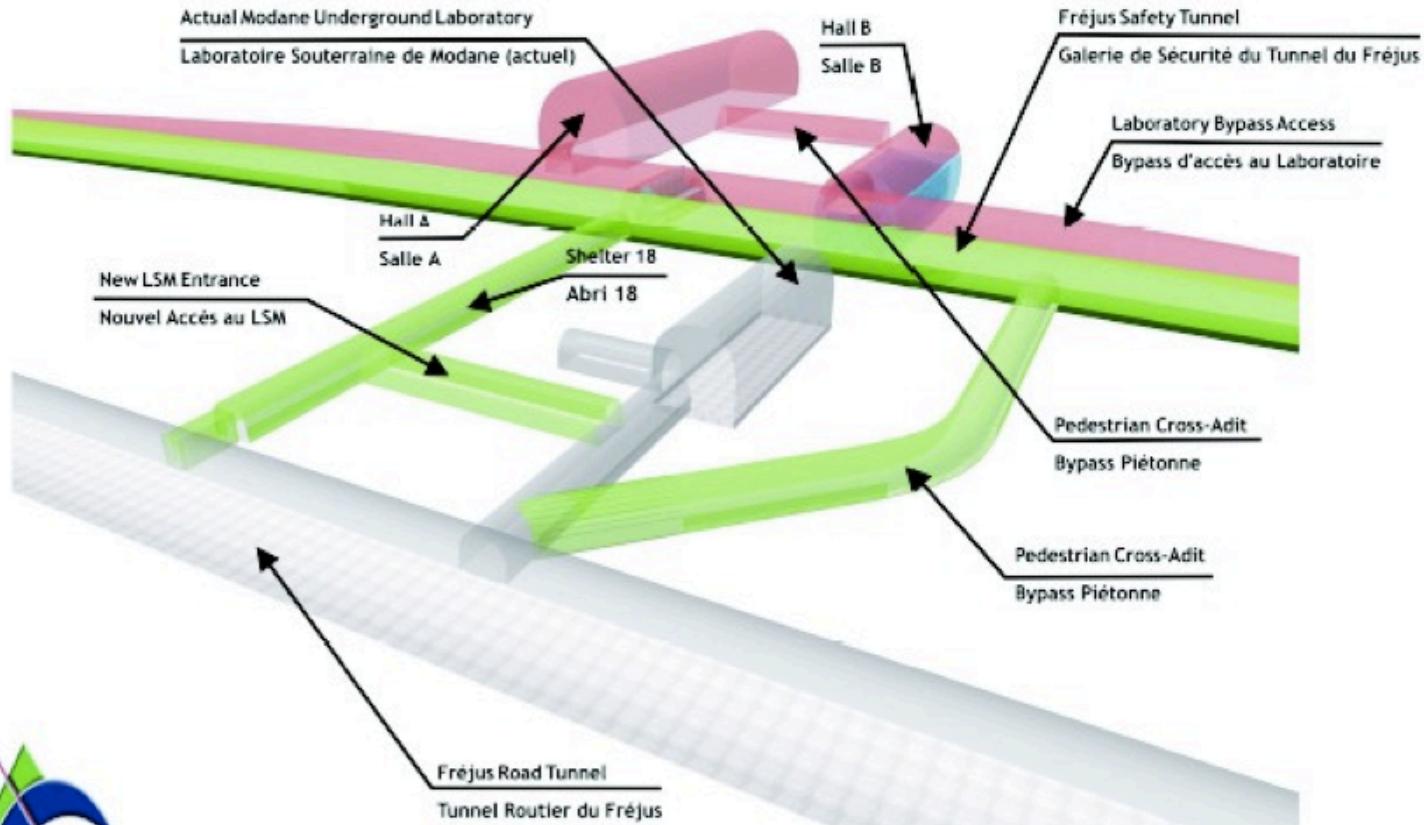




ULISSE project

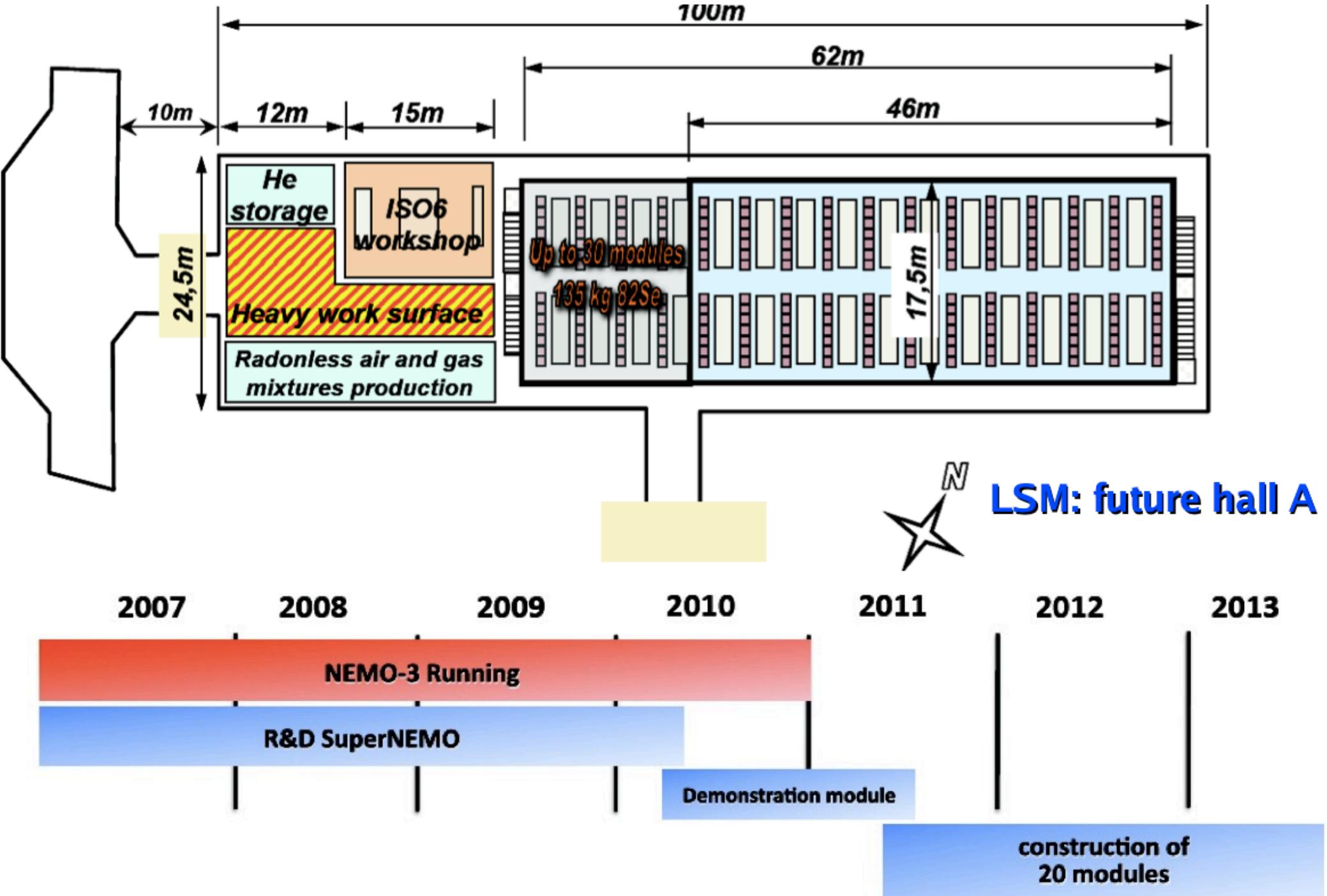
MODANE UNDERGROUND LABORATORY 60'000 m³ EXTENSION

LABORATOIRE SOUTERRAINE DE MODANE AGRANDISSEMENT 60'000 m³



LOMBARDI SA
INGEGNERI CONSULENTI

SuperNEMO



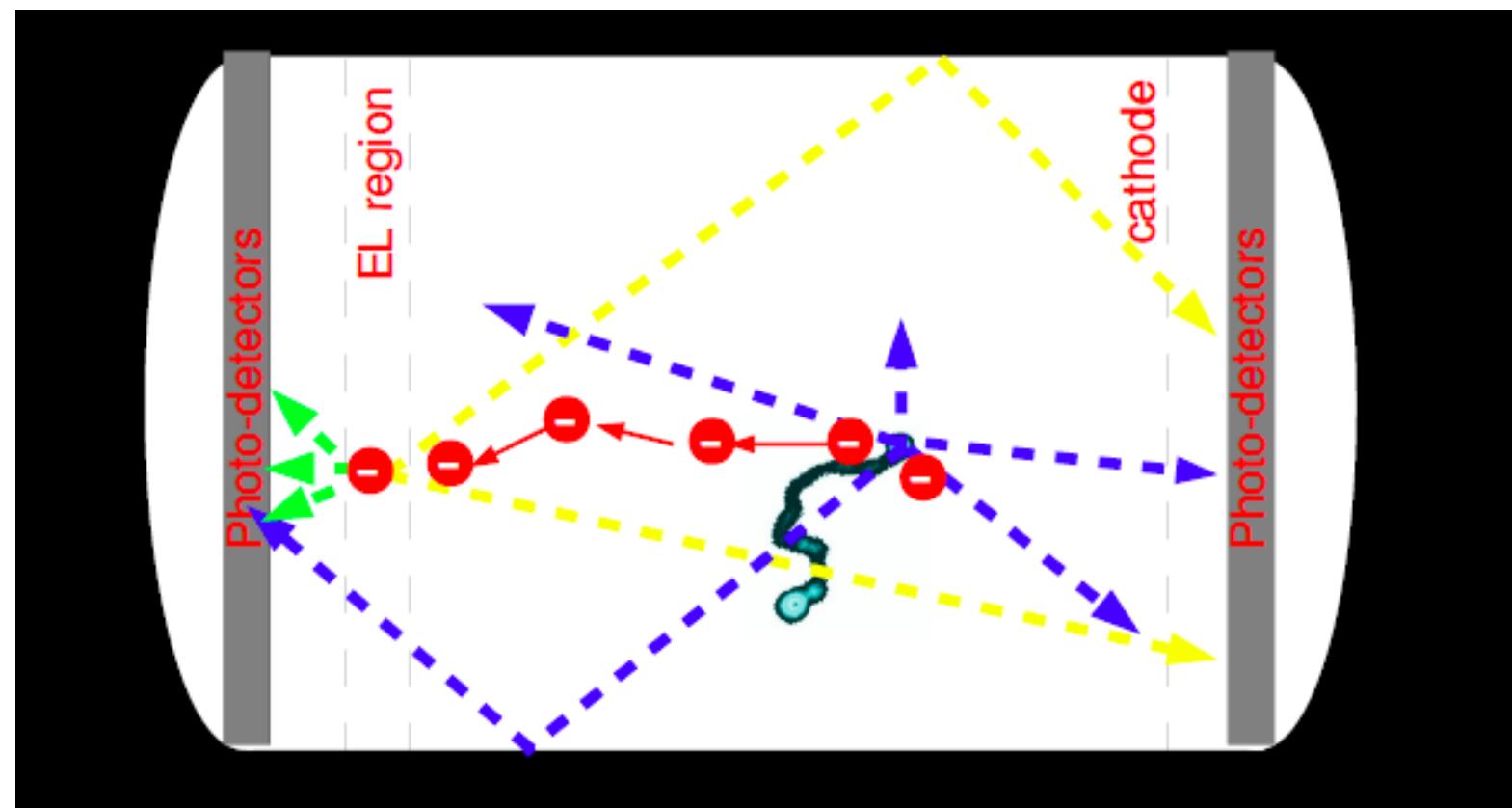
Spagna (varie istituzioni), Francia (CEA-Saclay,) Portogallo (Coimbra), ...

Xe TPC ad alta pressione

- Scintillazione primaria per t0
- Luce di elettroluminescenza per
 - Tracciamento
 - Calorimetria

Spagna:

- maggior parte dei collaboratori e finanziamenti
- laboratorio (Canfranc)



NEXT: 3 experimental phases

NEXT-0 and NEXT-1 (2008-2011):

- Show technological feasibility
- Acquire know-how
- Choose technologies
- Proliferation of small-scale (1kg or less of Xe at 10 bar)
- TPC prototypes at various NEXT institutions

NEXT-10 (2010-2013):

- Show control of backgrounds
- Mid-scale (10 kg of Xe) radiopureprototype at Canfranc Underground Laboratory

NEXT-100 (2012-):

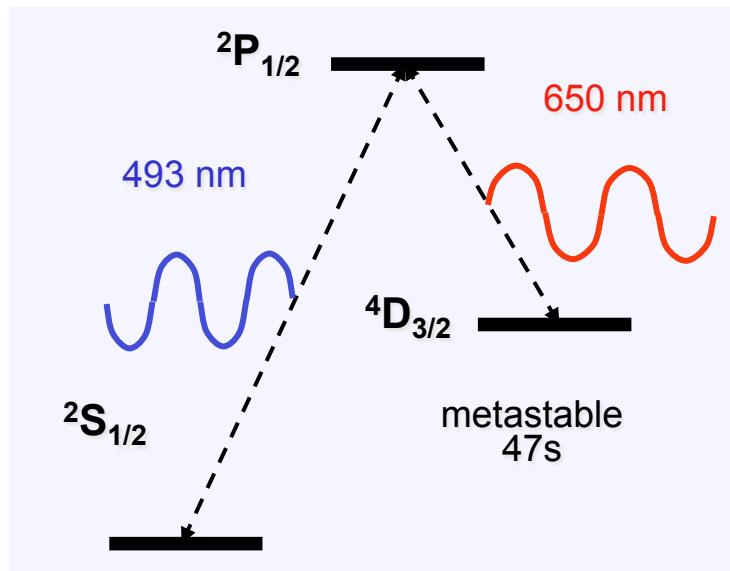
- $B\beta 2v$ and $\beta\beta 0v$ search
- Large-scale (100 kg of Xe) detector at CanfrancUnderground Laboratory

- UNIZAR NEXT-1 built
- IFIC NEXT-1 in preparation



NEL MONDO

- concept: scale Gotthard experiment adding Ba tagging to suppress background ($^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}^{++} + 2\text{e}$)
- calorimetry + tracking
- single Ba^+ detected by optical spectroscopy
- ^{136}Xe enrichment easier and safer
- LXe TPC + scintillation
- energy resolution $\Delta_E = 2\%$
- expected bkg only by $\beta\beta-2\nu$



Goal: 5y sensitivity (1 ton 80% i.e. Xe): $T_{1/2} > 2 \cdot 10^{27} \text{ y}$ ($\langle m \rangle \sim 25-30 \text{ meV}$)

Parallel activities:

EXO-200:

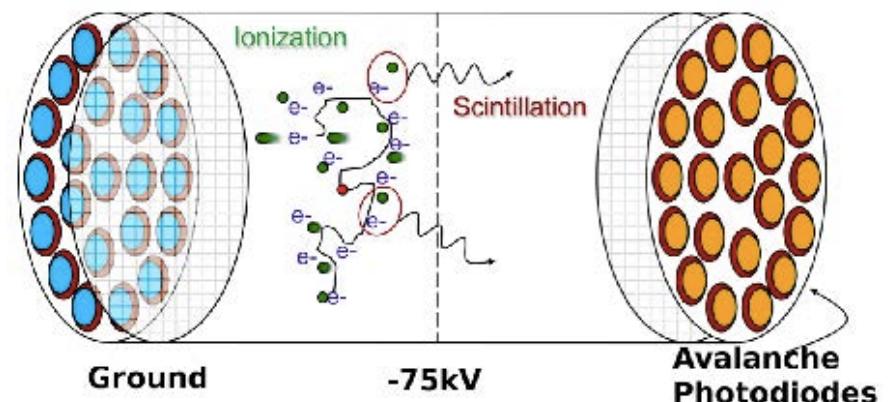
a LXe detector without Ba tagging using 200 kg of Xe enriched to 80% in ^{136}Xe with ~150 meV sensitivity to Majorana masses

Ba-tagging R&D:

- Transfer from LXe to ion trap
- Directly tag in LXe volume

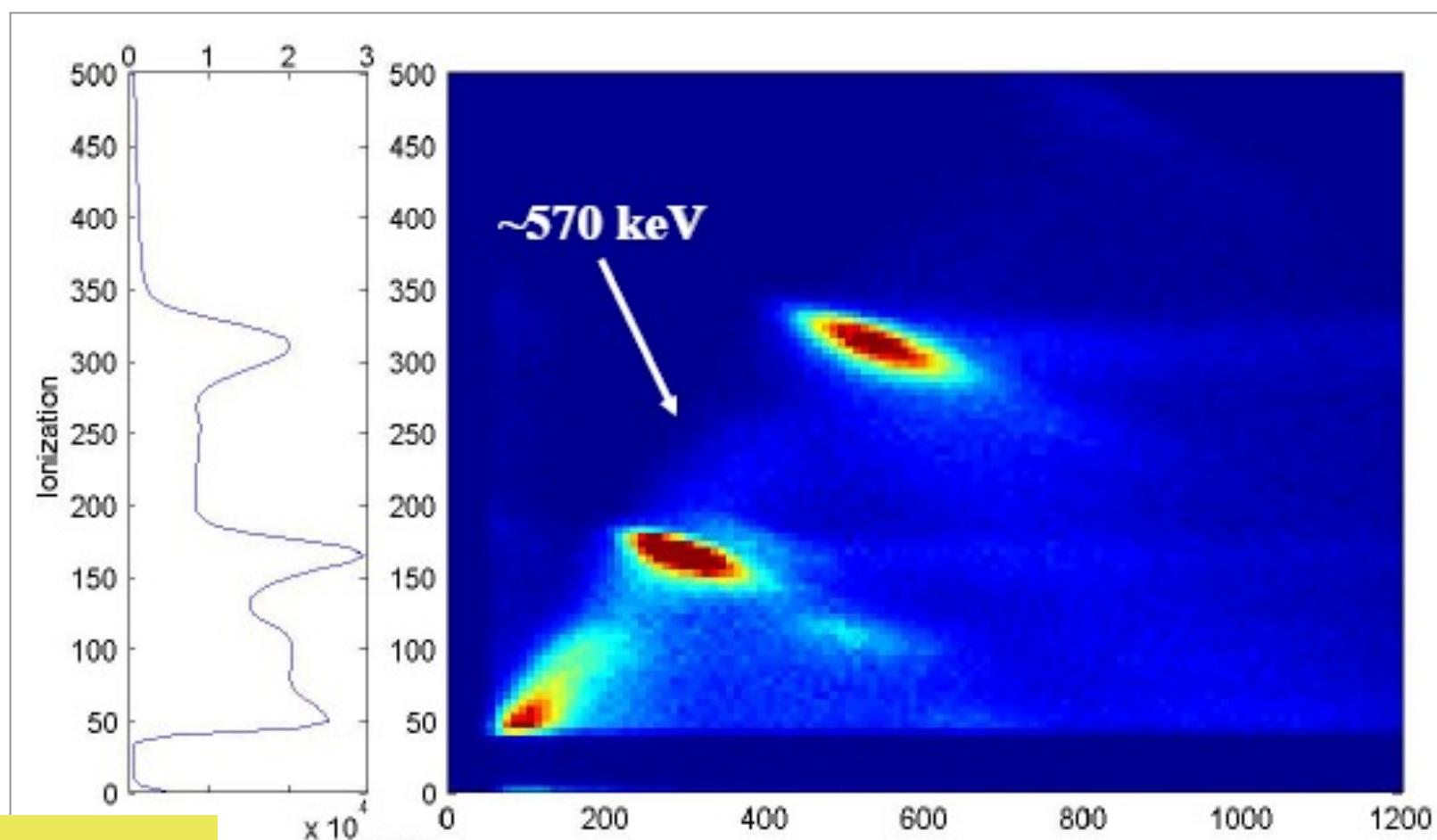
High pressure GXe detector R&D:

- Energy resolution and readout scheme
- Tracking: pressure and light gas mixes
- Ba tagging in gas



EXO: energy resolution

Use (anti)correlations between ionization and scintillation signals (now also used in DM detectors)



Ionization alone:

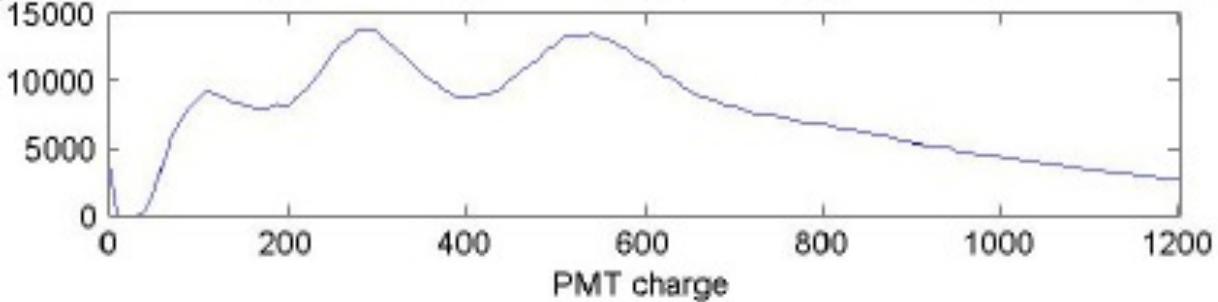
$\sigma(E)/E = 3.8\% @ 570 \text{ keV}$

or $1.8\% @ Q_{\beta\beta}$

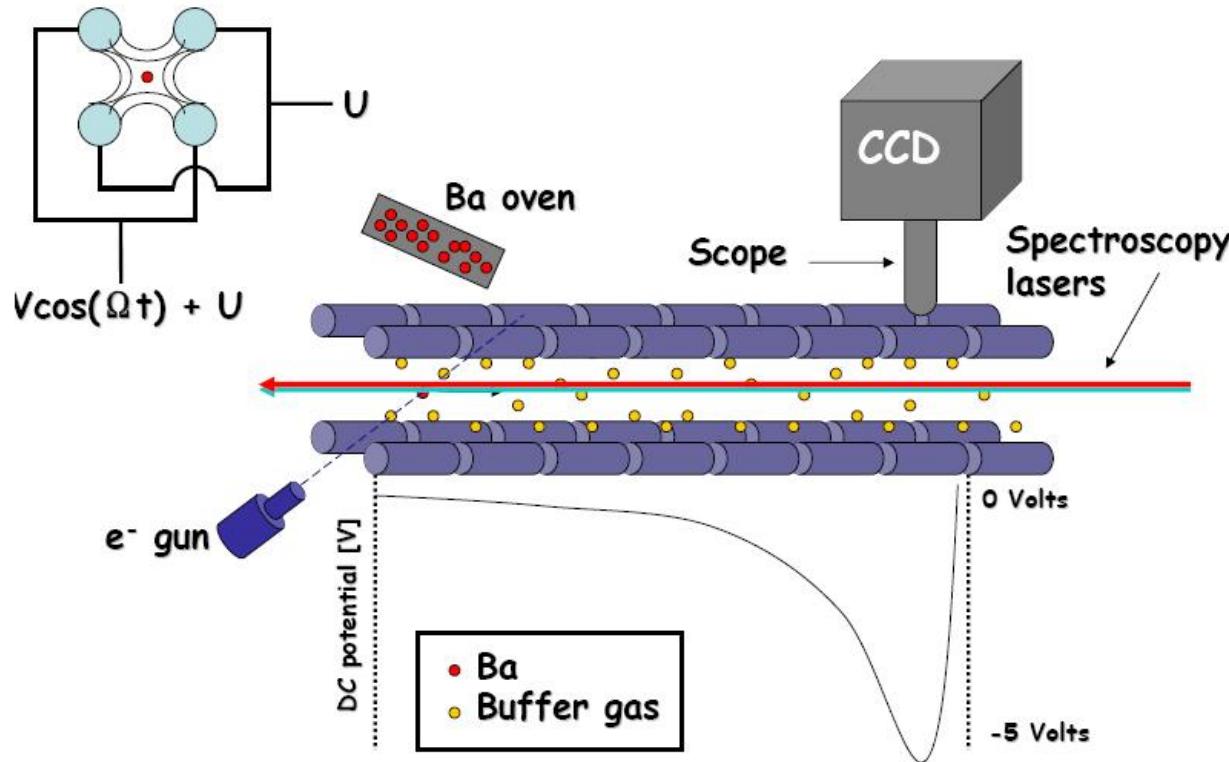
Ionization & Scintillation:

$\sigma(E)/E = 3.0\% @ 570 \text{ keV}$

or $1.4\% @ Q_{\beta\beta}$



EXO: Ba⁺ tagging



First single ion detection in high pressure gas (He, Ar)

Remaining challenge is the efficient transfer of single Ba ions from LXe to the ion trap

Cryogenic dipstick

Capture ion on SXe coating

LHe cooling (~20K) to maintain stable SXe coating in 10⁻⁸ torr vacuum

Microcapacitor used to measure and stabilize SXe with accuracy of a few monolayers in LXe and vacuum

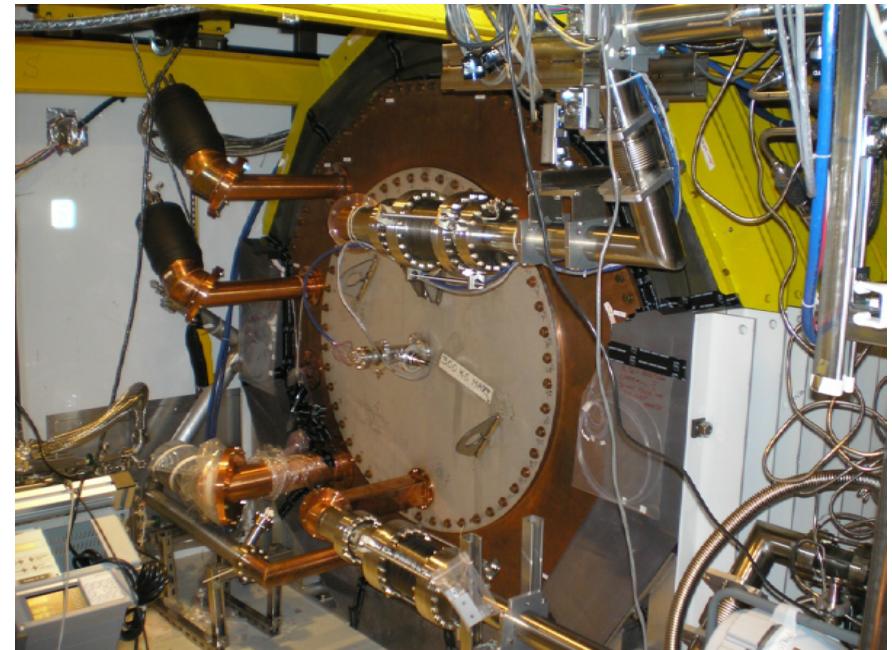
EXO-200

Intermediate Prototype without Barium Tagging

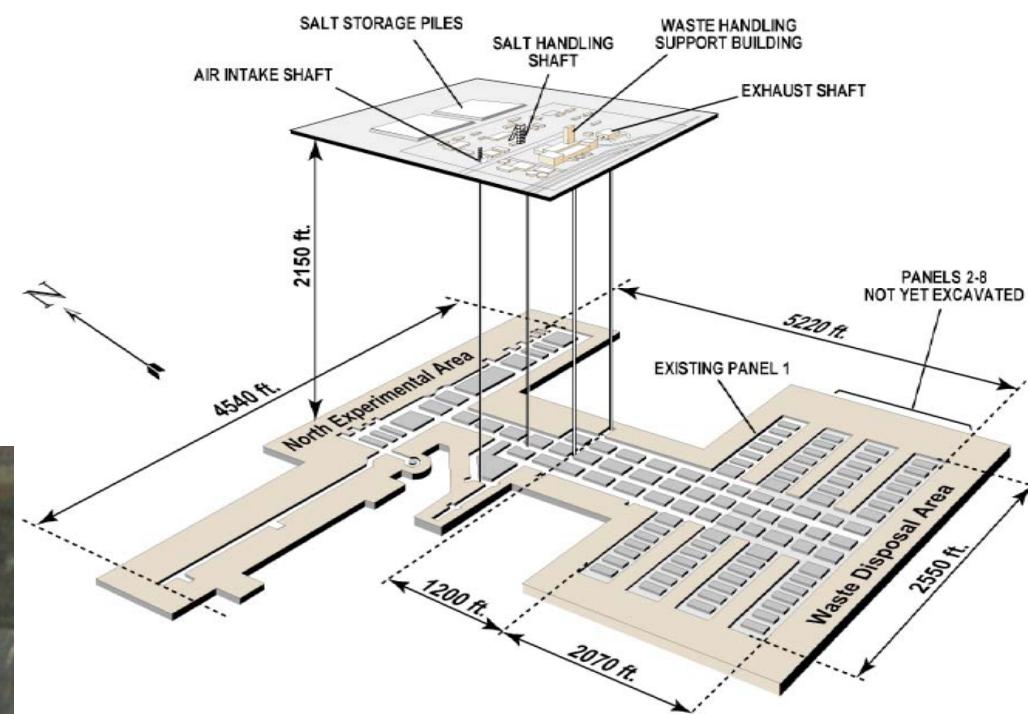
- TPC Vessel fully machined at Stanford under 7 m.w.e shielding; E-beam welding used for all but final weld to minimize introduction of radioactive background
- **200 kg enr. Xe (80% in ^{136}Xe)**
- Vessel complete, welded to door
- Half detectors almost complete
- (APDs, cables under assembly)
- Detector at WIPP: lead shielding, Xe plumbing almost complete, cryogenics tests in progress

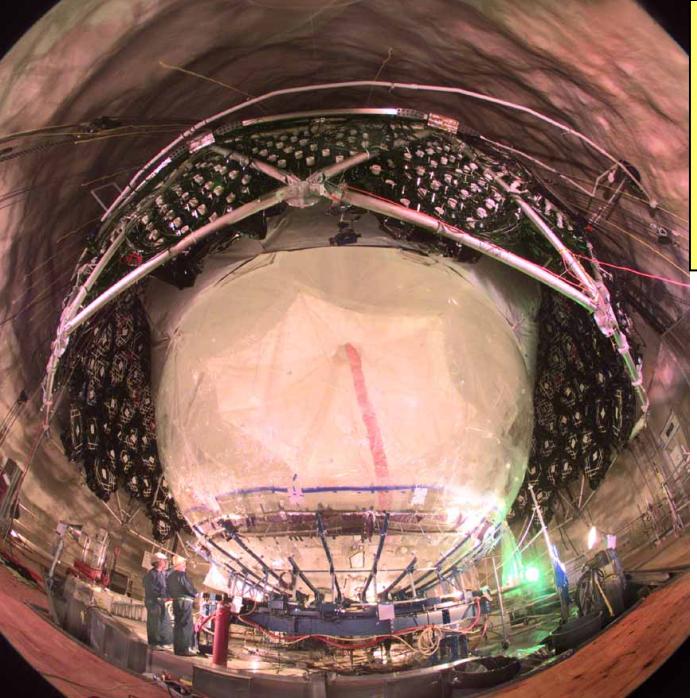
Schedule:

- engineering run Summer 09
- physics run Fall 09
- first 2ν measurement 2010
- 0ν 3–5 years



EXO-200 @ WIPP





SNO: One million pieces transported down in the 9 ft x 12 ft x 9 ft mine cage and re-assembled under ultra-clean conditions. Every worker takes a shower and wears clean, lint-free clothing.

SNO



**Over 70,000
Showers
to date and
counting**

SNO+: SNO filled with liquid scintillator

A liquid scintillator detector has poor energy resolution

Huge quantities of isotope (high statistics) and low backgrounds however help compensate

- source in–source out capability
- large, homogeneous liquid detector leads to well-defined background model
- possibly source in–source out capability
- using the technique that was developed originally for LENS and now also used for Gd-loaded scintillator
- SNO+ collaboration managed to load Nd into pseudocumene and in linear alkylbenzene (>1% concentration)
- with 1% Nd loading (natural Nd) a very good neutrinoless double beta decay sensitivity is predicted, but...

Nd loaded scintillator:

1% loading (Natural Nd) large light absorption by Nd

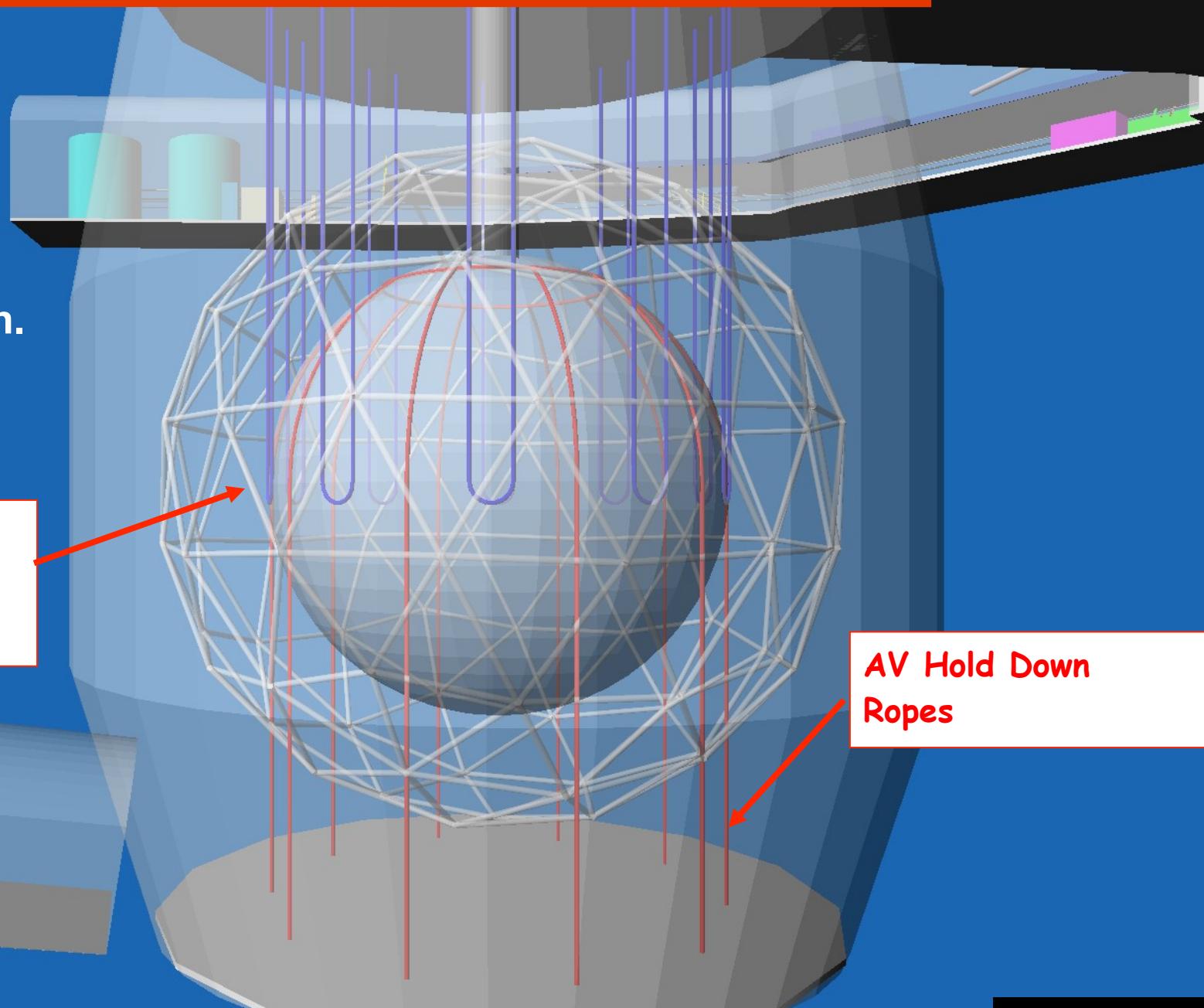
$47 \pm 6 \text{ pe/MeV (Monte Carlo)}$

0.1% loading (Isotopically enriched to 56% Nd) acceptable

$400 \pm 21 \text{ pe/MeV (Monte Carlo)}$

SNO: main engineering changes

The organic liquid is lighter than water so the Acrylic Vessel must be held down.

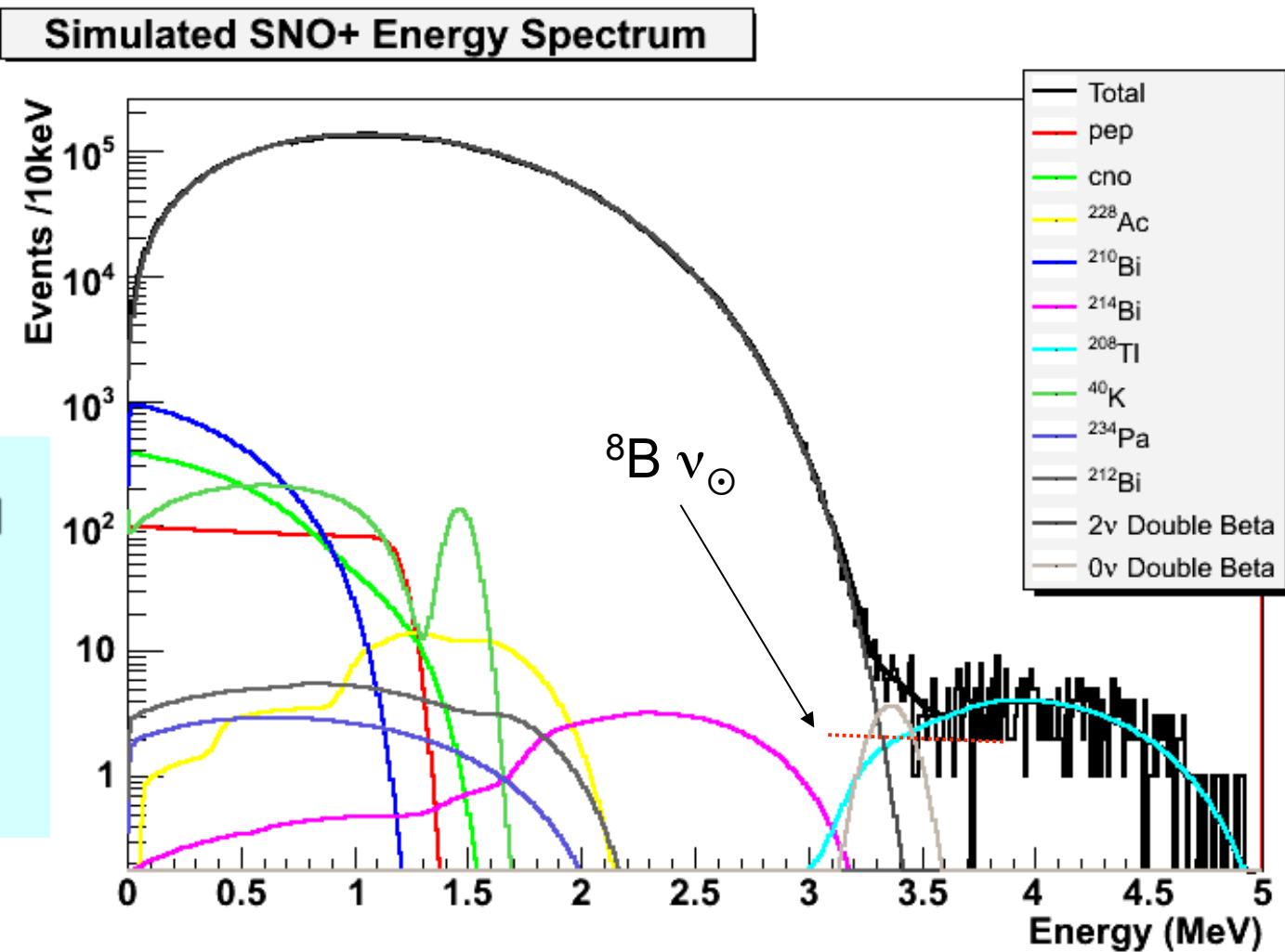


Scint. Purification, AV Hold Down
Otherwise, the existing detector, electronics etc. are unchanged.

- Using existing SNO infrastructure
- Well understood detector

1057 events per year with 500 kg ^{150}Nd -loaded liquid scintillator in SNO+.

Simulation assuming light output and background similar to Kamland.



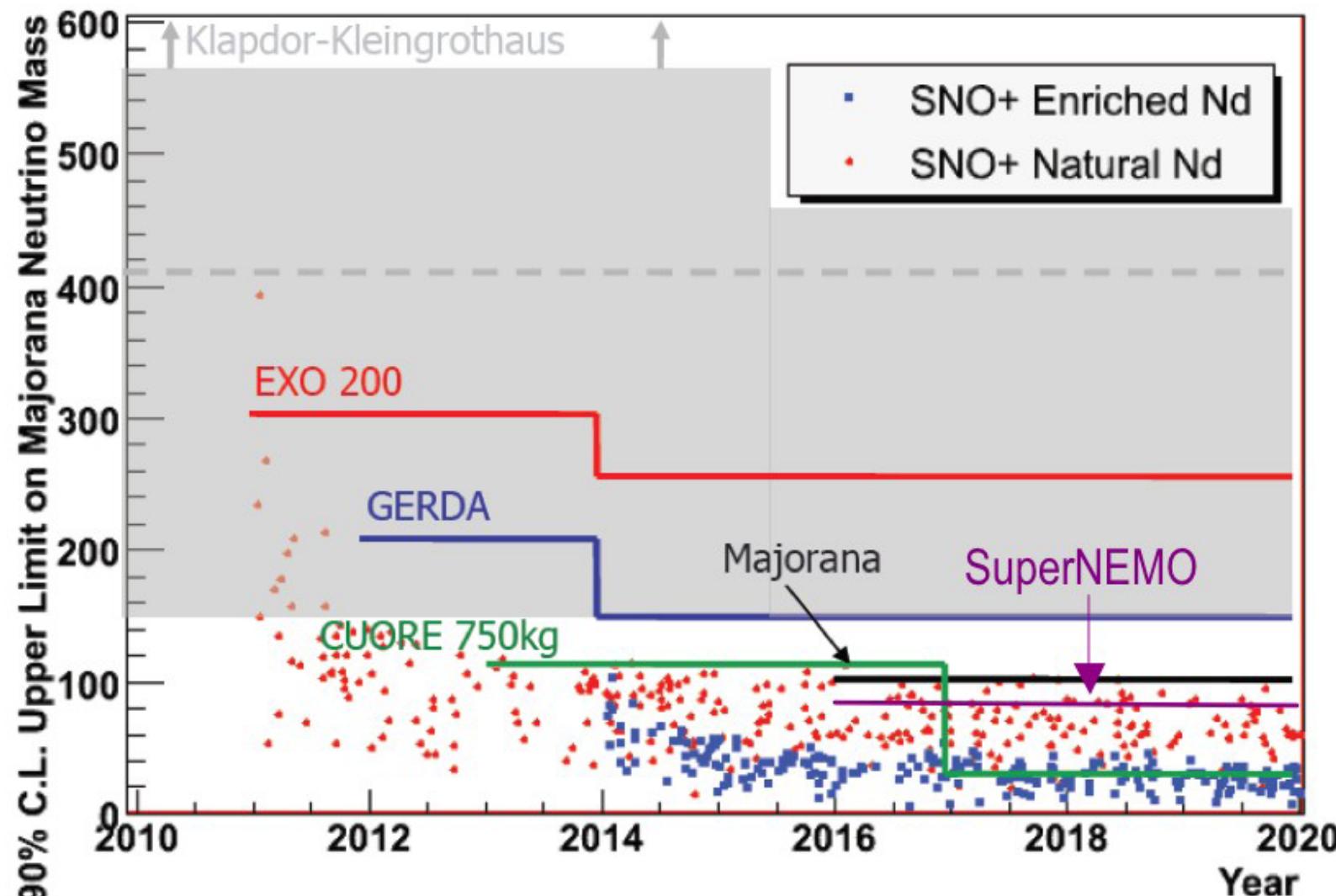
Sensitivity Limits (3 yrs):

- Natural Nd (56 kg isotope):
 $m_{\beta\beta} \sim 0.1 \text{ eV}$
- 500 kg enriched ^{150}Nd
 $m_{\beta\beta} \sim 0.04 \text{ eV}$

- Funded by NSERC for final design/ engineering and initial construction 2008-2010
- Early 2011 → ready for scintillator filling
- Commissioning and data taking in early 2012

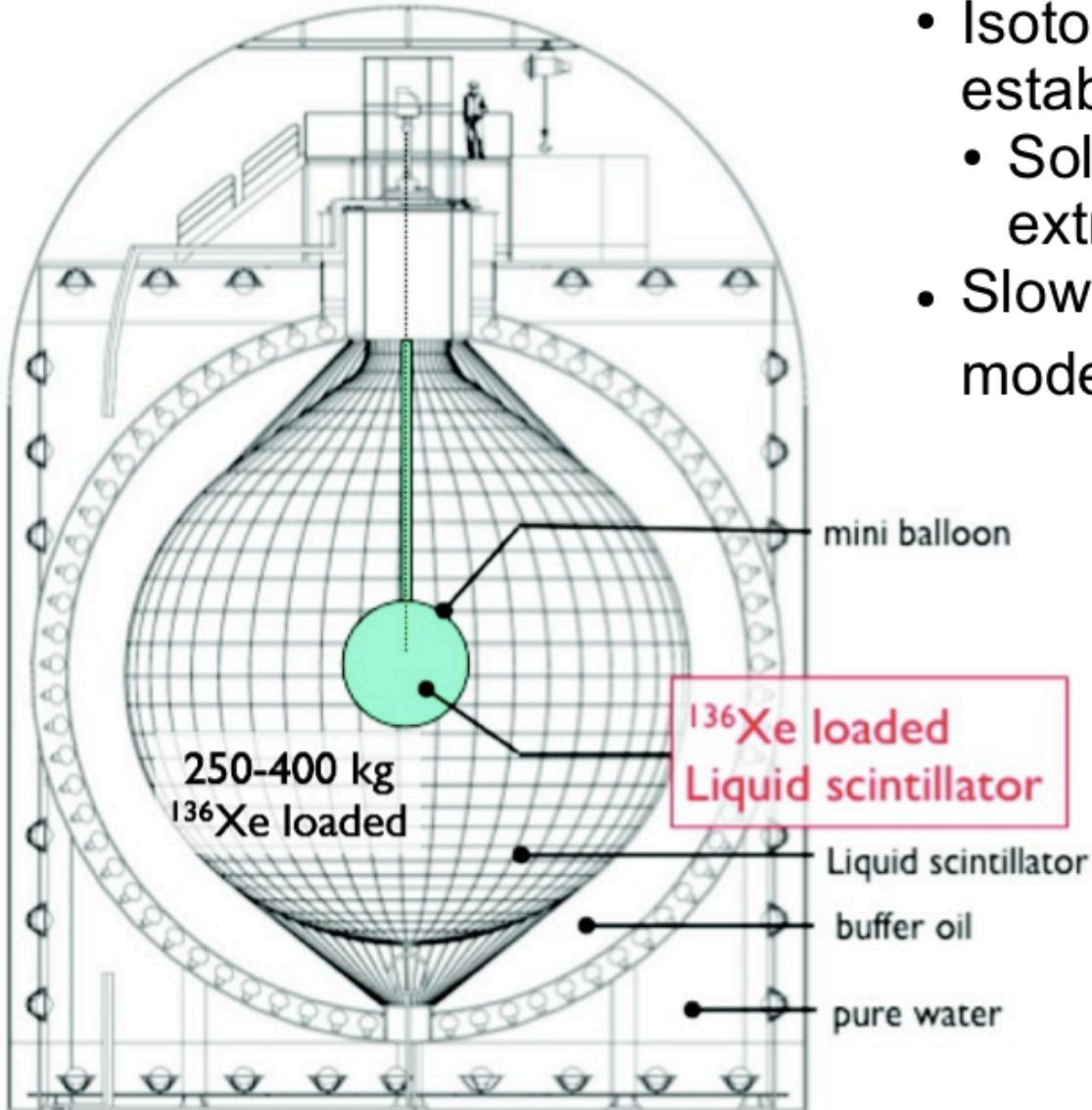
SNO+ sensitivity

The D.B.D. Limit as a Function of Livetime

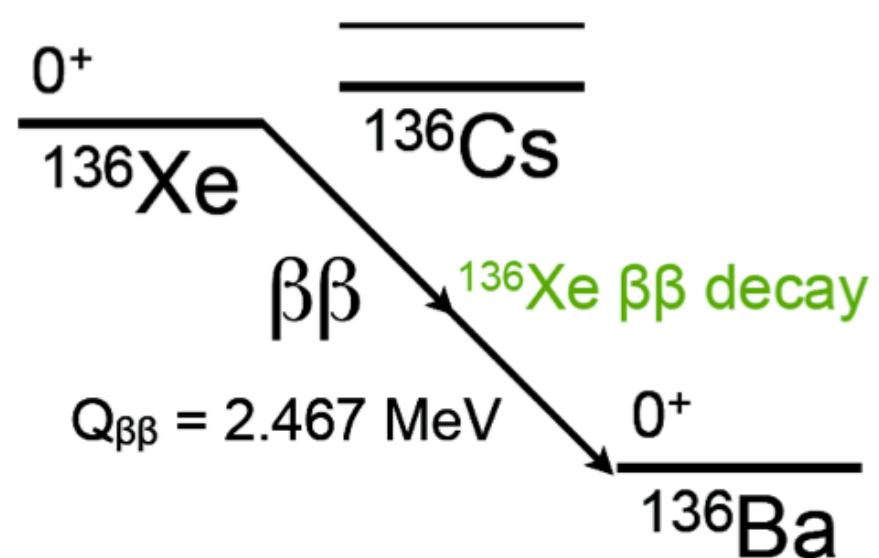


- Each SNO+ point represents a different MC “experiment” so as to reflect the statistical spread of derived limits.
- Ultimately, the ability to achieve such sensitivities in practise may rest on securing sufficient control of backgrounds

136Xe loaded LS



- Isotopic enrichment, purification established
 - Soluble to LS more than 3 wt%, easily extracted
- Slow $2\nu\beta\beta$ ($T_{1/2} > 10^{22}$ years) requires modest energy resolution



Phase I concept

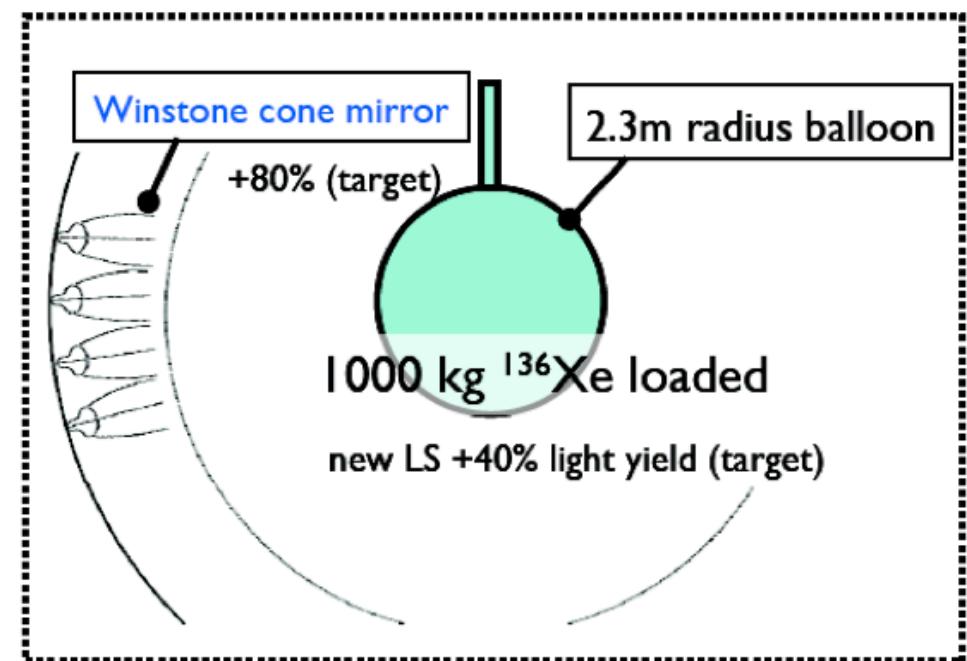
KAMLAND merits

- Ultra low radioactivity environment based on ultra pure LS and
- 9m radius active shield: $^{38}\text{U} < 3.5 \cdot 10^{-18} \text{ g/g}$ $^{232}\text{Th} < 5.2 \cdot 10^{-17} \text{ g/g}$
- No modification to the detector is necessary to accommodate DBD nuclei
- High sensitivity with low cost (~6M\$, budget secured) **60 meV in 1.5 years**
- Reactor and geo- antineutrino observations continue
- High scalability (2nd phase)

Phase II

1000 kg ^{136}Xe , improvement of energy resolution with light concentrators and brighter LS (~30M\$)

25 meV in 5 years



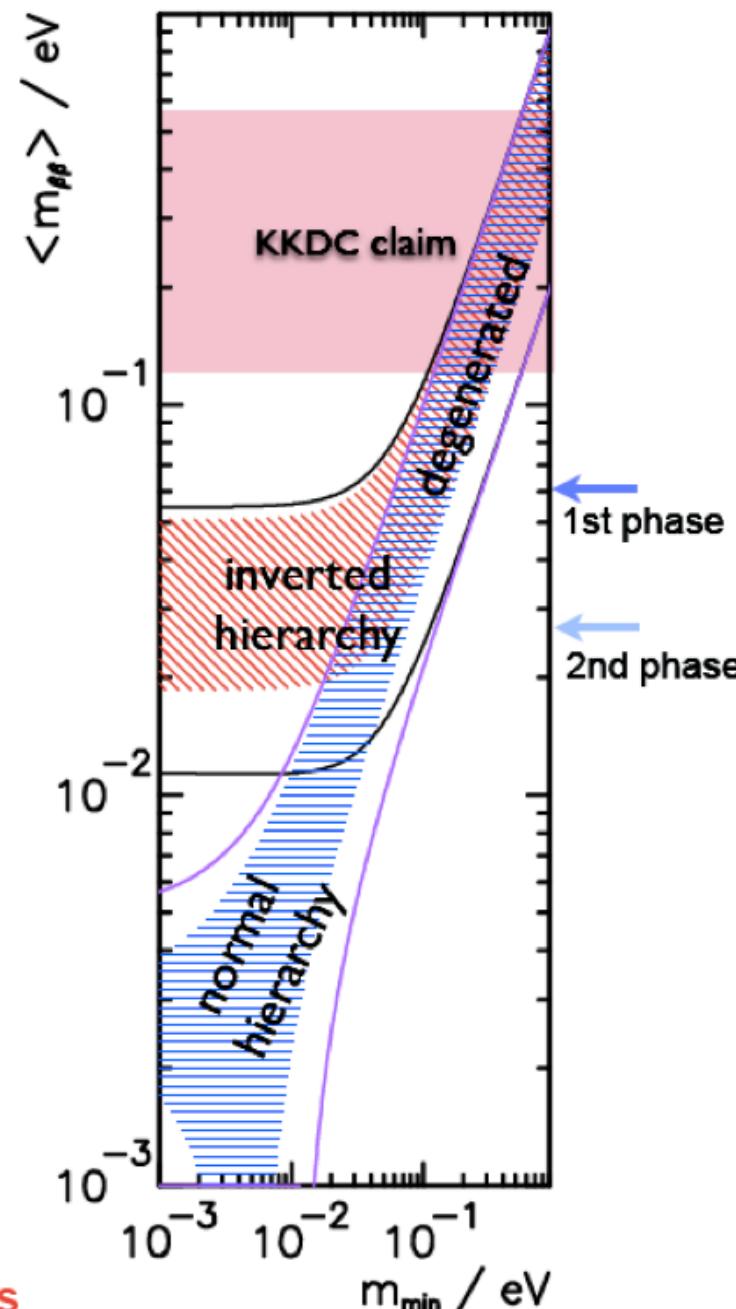
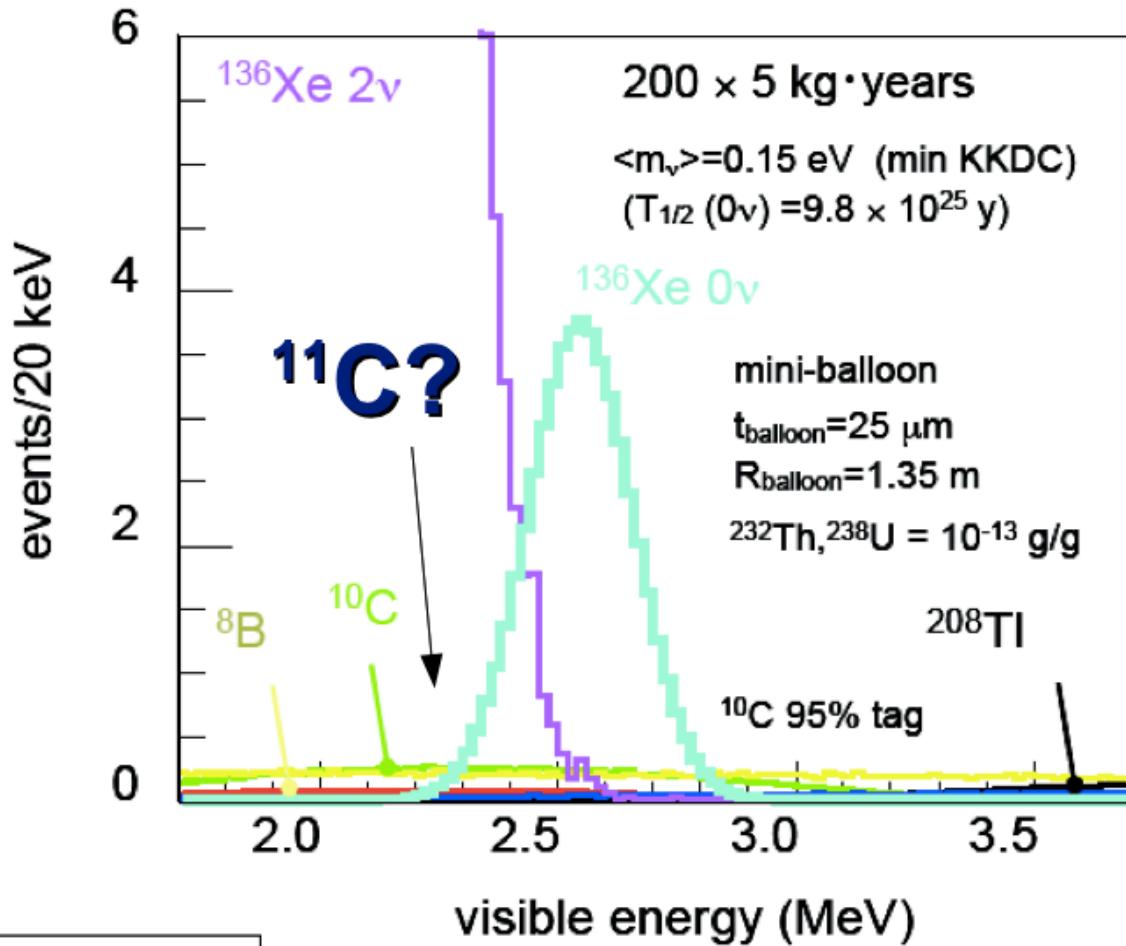
R&D items

- Xenon loaded LS with the same density, luminosity, transparency
- 2.7~4 m φ Mini-balloon
- Xenon purification, storage, extraction etc
- Cosmogenic background rejection with dead-time free electronics

KAMLAND sensitivity

1st phase

KKDC claim, degenerated hierarchy test

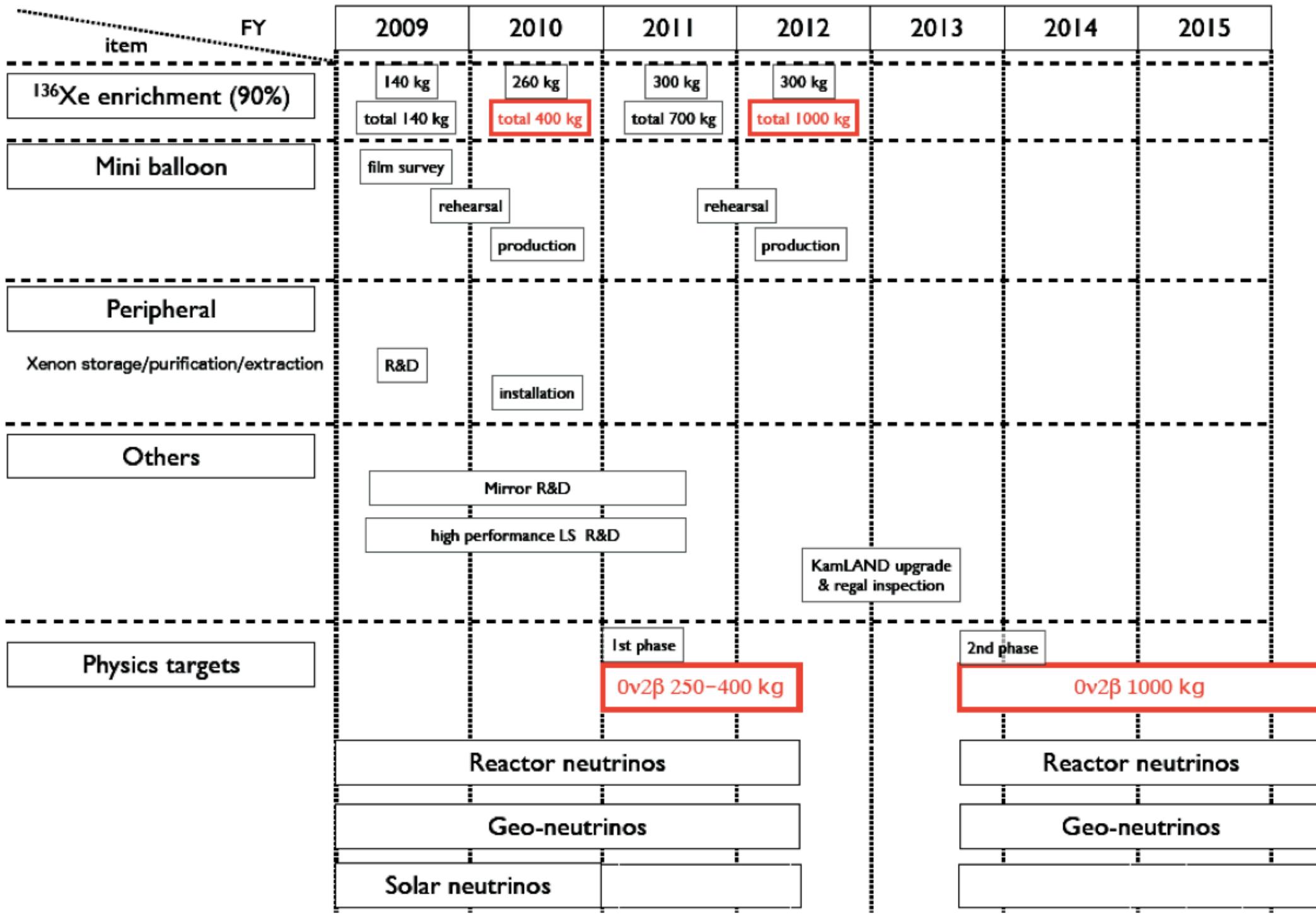


2nd phase

inverted hierarchy test

Target sensitivity of the 2nd phase is ~25 meV with 5 years

KAMLAND timeline



MAJORANA

Array of enriched Ge diodes operated in conventional Cu cryostats

Based on 60 Kg modules

First step: Actively pursue the development of R&D aimed at a ~1 ton scale ^{76}Ge $\beta\beta(0\nu)$ -decay experiment.

Proved energy resolution: 0.16 % FWHM

Technical goal: Demonstrate background low enough to justify building a tonne scale Ge experiment.

Science goal: build a prototype module (60kg) to test the recent claim of an observation of $\beta\beta(0\nu)$. This goal is a litmus test of any proposed technology.

Work cooperatively with GERDA Collaboration to prepare for a single international tonne-scale Ge experiment that combines the best technical features of MAJORANA and GERDA.

Pursue longer term R&D to minimize costs and optimize the schedule for a 1-tonne experiment.

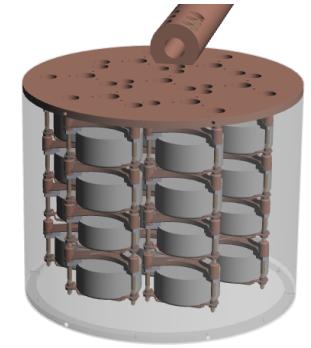
MAJORANA: demonstrator module

^{76}Ge offers an excellent combination of capabilities & sensitivities.

**Excellent energy resolution, intrinsically clean detectors,
commercial technologies, best $0\nu\beta\beta$ sensitivity to date**

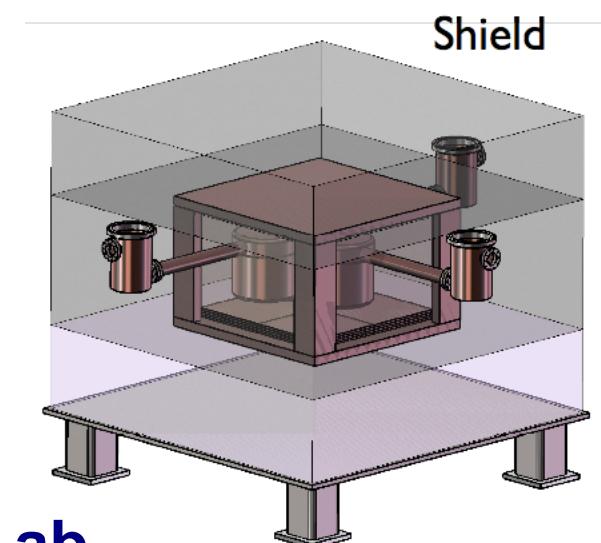
60-kg of Ge detectors

- 30-kg of 86% enriched ^{76}Ge crystals required
for science goal; 60-kg for background sensitivity
- Examine detector technology options
focus on point-contact detectors for DEMONSTRATOR



Low-background Cryostats & Shield

- ultra-clean, electroformed Cu
- naturally scalable
- Compact low-background passive Cu and Pb
shield with active muon veto



Agreement to locate at 4850' level at Sanford Lab

Background Goal in the $\beta\beta(0\nu)$ peak ROI (4 keV at 2039 keV)

- ~ 1 count/ROI/t-y (after analysis cuts)

MAJORANA: demonstrator schedule

