

PRIMI RISULTATI DI LEGEND-200:

ALLA RICERCA DEL DOPPIO DECADIMENTO BETA SENZA NEUTRINI

Giovanna Saleh¹ a nome della Collaborazione LEGEND

1. Università e INFN Padova, Università di Zurigo

9 Aprile 2025, IFAE 2025, Cagliari

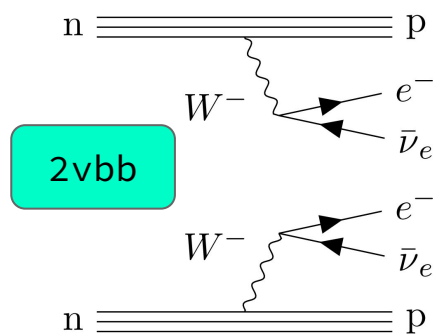


SOMMARIO

- Introduzione
 - Doppio decadimento beta (senza neutrini)
 - Panorama sperimentale
- LEGEND(-200)
 - La collaborazione
 - L'esperimento
 - I rivelatori
 - Strategie per la soppressione del fondo
- Primi risultati
 - Esposizione
 - Performances e stabilità
 - Spettro energetico
 - Primo unblinding: indice di background e limiti sull'half life
- Conclusioni

INTRODUZIONE

DOPPIO DECADIMENTO BETA (SENZA NEUTRINI)

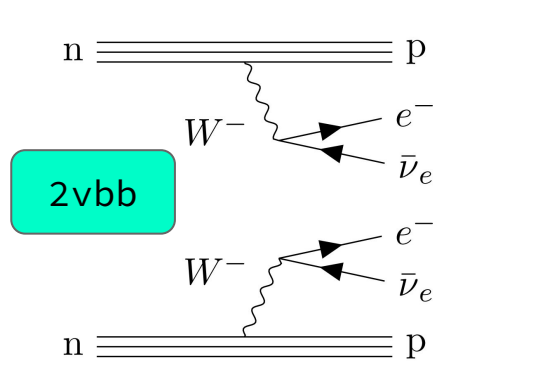


$$\Delta L = 0$$

Consentito dal SM
Osservato sperimentalmente

Fortemente soppresso
(secondo ordine)

DOPPIO DECADIMENTO BETA (SENZA NEUTRINI)

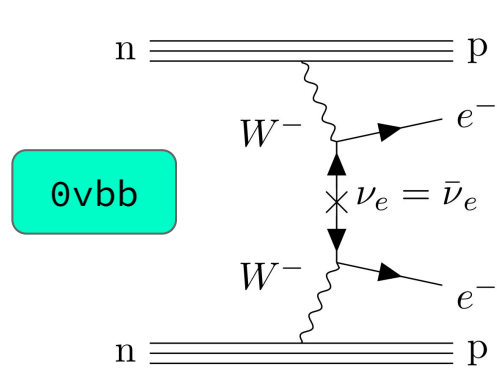


2νbb

$\Delta L = 0$

Consentito dal SM
Osservato sperimentalmente

Fortemente soppresso
(secondo ordine)



0νbb

$\Delta L = 2$

Non consentito dal SM
Non osservato

Se osservato $\Rightarrow$ neutrini
fermioni di Majorana

DOPPIO DECADIMENTO BETA (SENZA NEUTRINI)

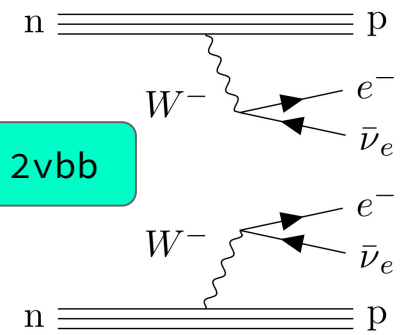


Diagram illustrating the $2\nu\beta\beta$ process. Two neutrons (n) transition to two protons (p) via two W^- bosons. Each W^- boson decays into an electron (e^-) and an anti-electron neutrino ($\bar{\nu}_e$). A cyan box labeled $2\nu\beta\beta$ is on the left.

$\Delta L = 0$

Consentito dal SM
Osservato sperimentalmente

Fortemente soppresso
(secondo ordine)

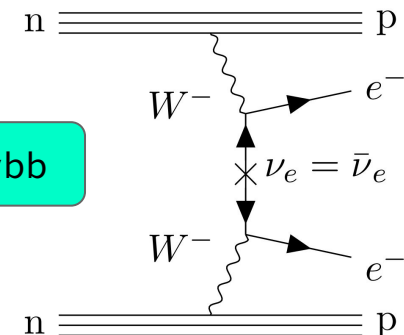


Diagram illustrating the $0\nu\beta\beta$ process. Two neutrons (n) transition to two protons (p) via two W^- bosons. Each W^- boson decays into an electron (e^-) and a virtual Majorana neutrino ($\nu_e = \bar{\nu}_e$), indicated by a cross on the internal line. A cyan box labeled $0\nu\beta\beta$ is on the left.

$\Delta L = 2$

Non consentito dal SM
Non osservato

Se osservato $\Rightarrow$ neutrini
fermioni di Majorana

Half life:

$$[T_{1/2}^{0\nu}]^{-1} = G^{0\nu}(Q_{\beta\beta}, Z) |M^{0\nu}|^2 \frac{|m_{\beta\beta}|^2}{m_e^2}$$

DOPPIO DECADIMENTO BETA (SENZA NEUTRINI)

2vbb

$\Delta L = 0$

Consentito dal SM
Osservato sperimentalmente

Fortemente soppresso
(secondo ordine)

0vbb

$\Delta L = 2$

Non consentito dal SM
Non osservato

Se osservato $\Rightarrow$ neutrini
fermioni di Majorana

Half life:

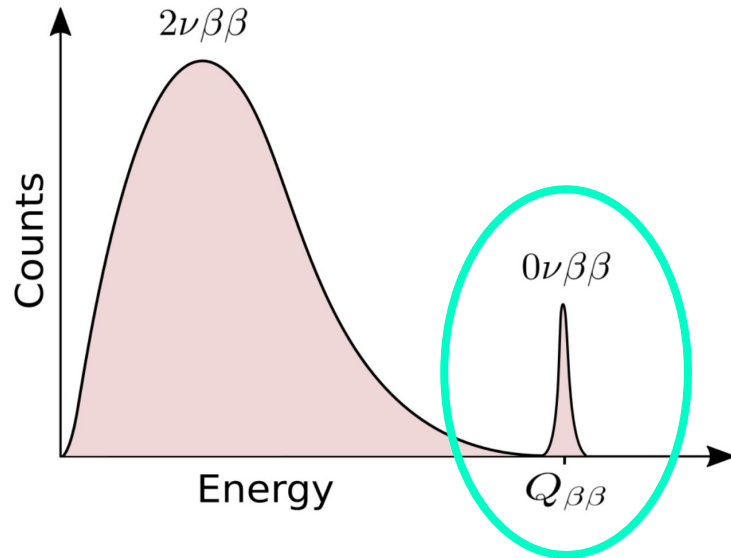
$$[T_{1/2}^{0\nu}]^{-1} = G^{0\nu}(Q_{\beta\beta}, Z) |M^{0\nu}|^2 \frac{|m_{\beta\beta}|^2}{m_e^2}$$

Phase space integral

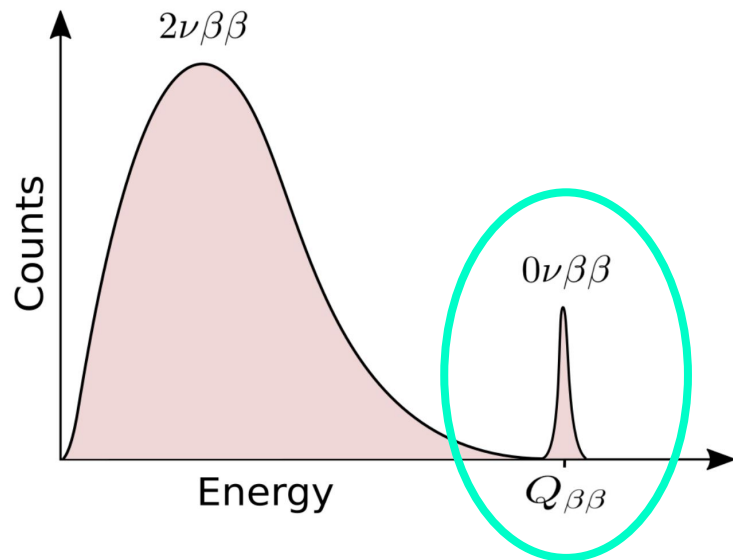
Nuclear matrix element

Effective ν Majorana mass

DOPPIO DECADIMENTO BETA (SENZA NEUTRINI)



DOPPIO DECADIMENTO BETA (SENZA NEUTRINI)



Sensibilità sperimentale:

$$T_{1/2}^{0\nu} \propto \left\{ \frac{M \cdot t}{\sqrt{\frac{M \cdot t}{B \cdot \sigma}}} \right\}$$

-> BACKGROUND FREE

-> CON BACKGROUND

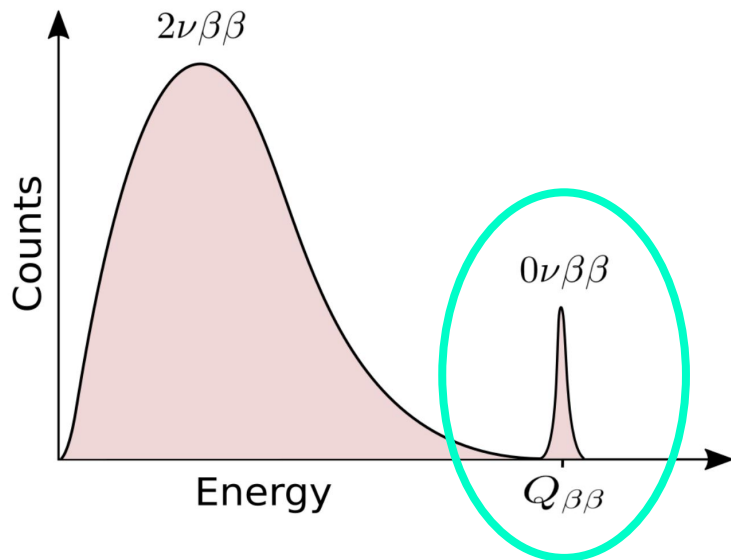
M = Massa totale

t = Durata acquisizione

B = Frazione di fondo

σ = Risoluzione energetica al $Q_{\beta\beta}$

DOPPIO DECADIMENTO BETA (SENZA NEUTRINI)



Sensibilità sperimentale:

$$T_{1/2}^{0\nu} \propto \begin{cases} M \cdot t & \bullet f \bullet \epsilon & \rightarrow \text{BACKGROUND FREE} \\ \sqrt{\frac{M \cdot t}{B \cdot \sigma}} & \bullet f \bullet \epsilon & \rightarrow \text{CON BACKGROUND} \end{cases}$$

M = Massa totale

t = Durata acquisizione

B = Frazione di fondo

σ = Risoluzione energetica al $Q_{\beta\beta}$

f = Frazione isotopo che decade $0\nu\beta\beta$

ϵ = Efficienza di rivelazione

PANORAMA SPERIMENTALE

Esperimento	Isotopo	Median sensitivity (x 10^{26} anni)	Limite half life (x 10^{26} anni)	Limite mbb (meV)	Fonte
KamLAND-Zen	^{136}Xe	2.3	3.8	28-122	link
GERDA	^{76}Ge	1.8	1.8	79-180	link
CUORE	^{130}Te	0.44	0.38	70-240	link

PANORAMA SPERIMENTALE

Esperimento	Isotopo	Median sensitivity (x 10^{26} anni)	Limite half life (x 10^{26} anni)	Limite mbb (meV)	Fonte
KamLAND-Zen	^{136}Xe	2.3	3.8	28-122	link
GERDA	^{76}Ge	1.8	1.8	79-180	link
CUORE	^{130}Te	0.44	0.38	70-240	link

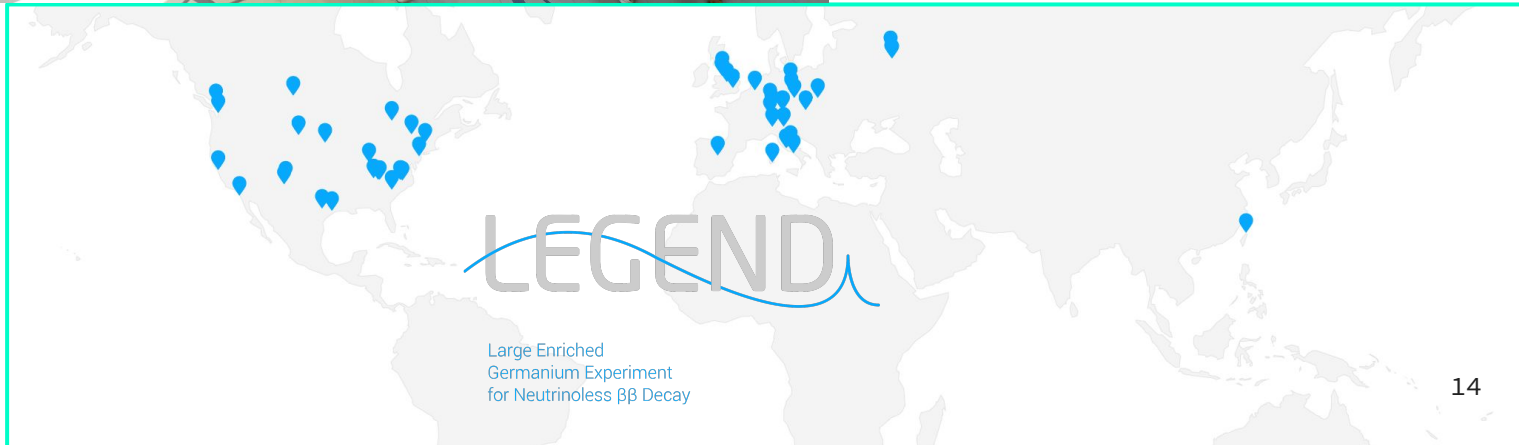
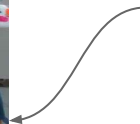
+ Primi risultati di **LEGEND**

LEGEND(-200)

LA COLLABORAZIONE



+ 50 istituzioni
+ 300 membri



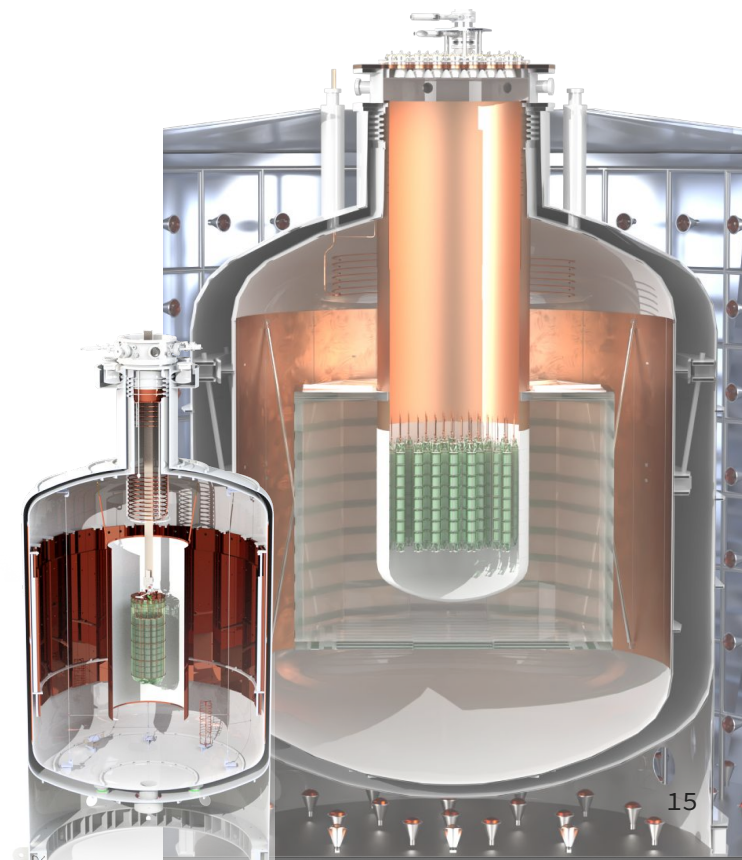
LEGEND

Large Enriched
Germanium Experiment
for Neutrinoless $\beta\beta$ Decay

IL PROGETTO

	LEGEND-200	LEGEND-1000
Massa [kg]	200	1 000
Esposizione [kg yr]	1 000	10 000
BI goal [cts/(keV kg yr)]	$2 \cdot 10^{-4}$	10^{-5}
Half-life sensitivity [yr]	10^{27}	10^{28}
m $\beta\beta$ sensitivity [meV]	34 - 78	9 - 21

*“The collaboration aims to develop a **phased, ⁷⁶Ge-based** double-beta decay experimental program with **discovery potential** at a **half-life beyond 10^{28} yr**, using existing resources as appropriate to expedite physics results”*



L'ESPERIMENTO

Rivelatori HPGe

Criostato Argon Liquido (LAr)

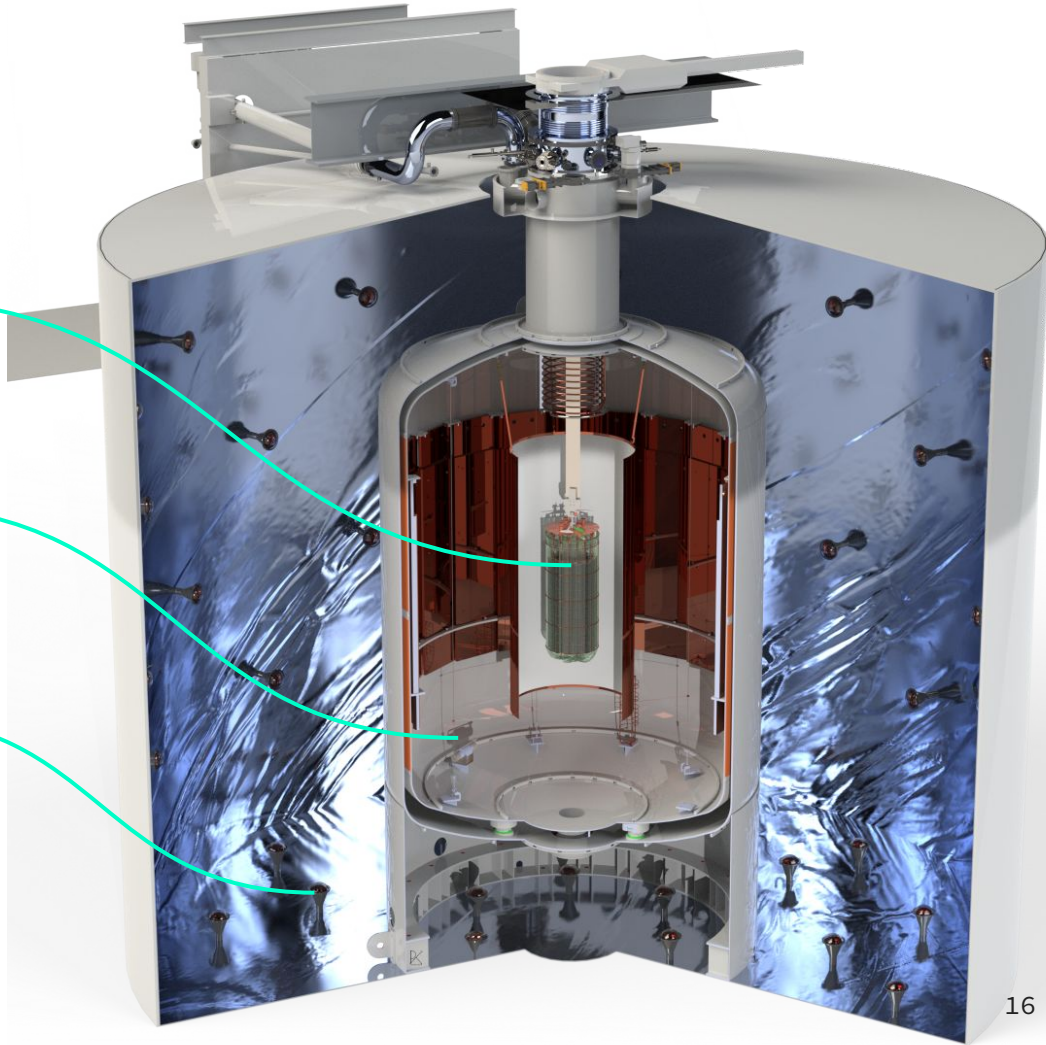
Volume: 64 m³

Scopo: Refrigerante & veto attivo (SiPM)

Tanica d'acqua

Volume: 590 m³

Scopo: Schermatura & veto attivo (PMTs)



I RIVELATORI

Rivelatori attivi al Germanio ad alta purezza arricchiti in ^{76}Ge

I RIVELATORI

Rivelatori **attivi** al **Germanio** ad alta purezza **arricchiti in ^{76}Ge**

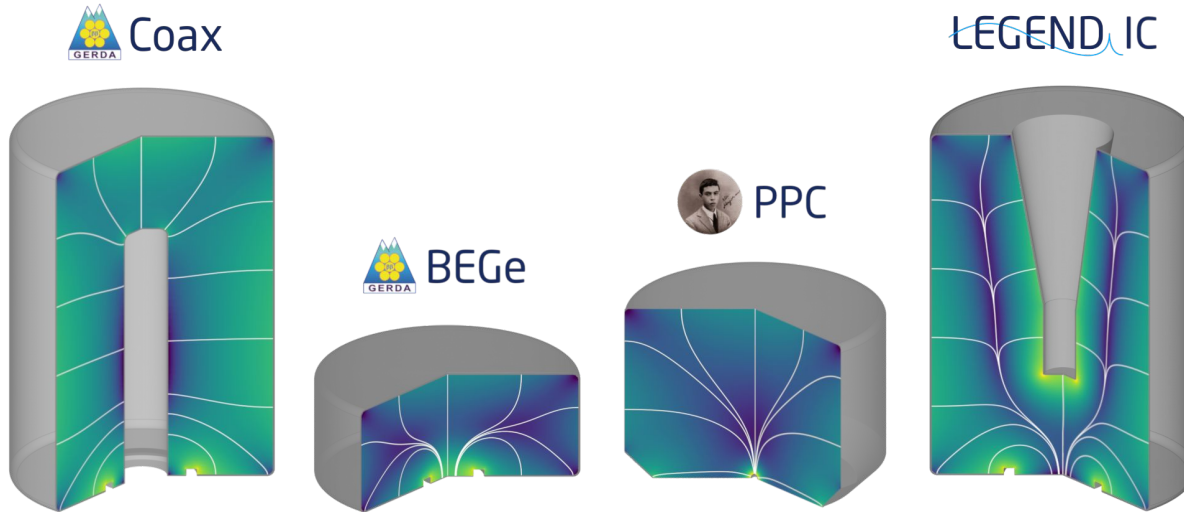
Rivelatore = Sorgente

- Tecnologia ben nota
- **Eccellente risoluzione energetica:**
FWHM $\sim 0.1\%$ @Q $\beta\beta$

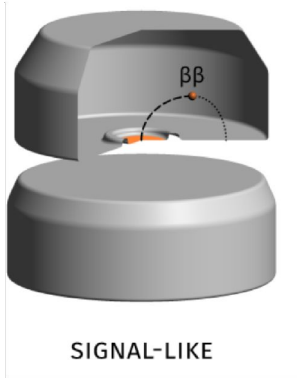
- $^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se} + 2e \text{ [+ } 2\nu]$
- $f(^{76}\text{Ge}, \text{nat}) \sim 8\%$
 $\rightarrow f(^{76}\text{Ge}, \text{enr}) \sim 92\%$
- **Q $\beta\beta$ (^{76}Ge) = 2039.061 ± 0.007 keV**

I RIVELATORI

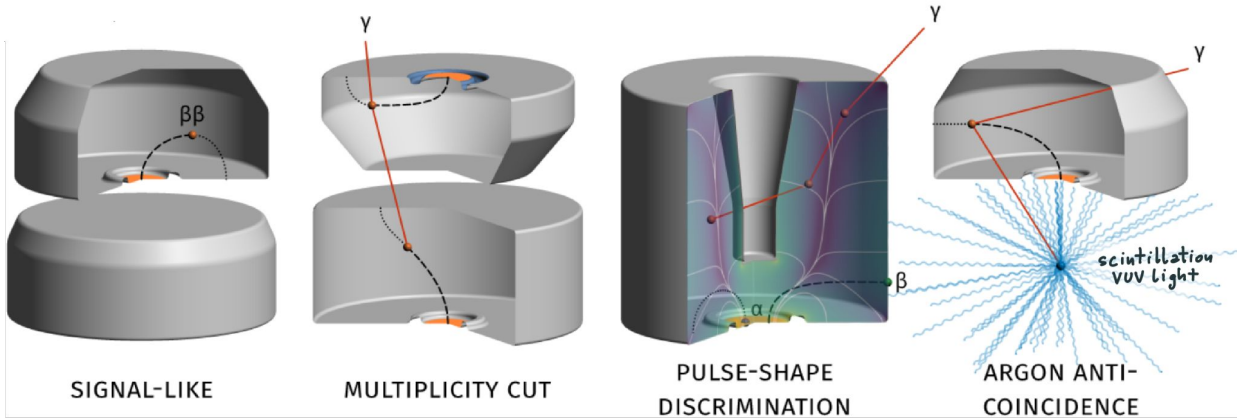
Rivelatori attivi al Germanio ad alta purezza arricchiti in ^{76}Ge



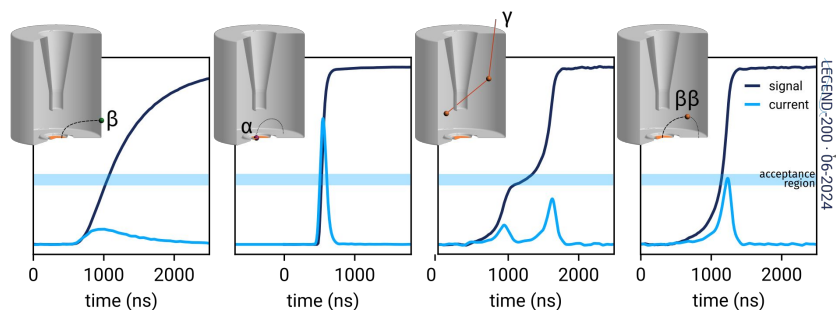
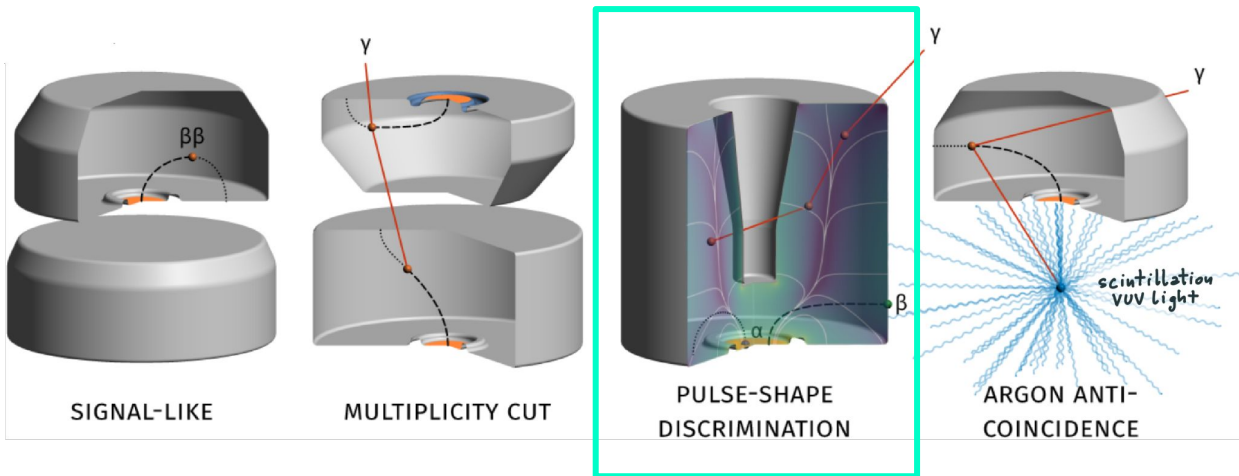
STRATEGIE PER LA SOPPRESSIONE DEL FONDO



STRATEGIE PER LA SOPPRESSIONE DEL FONDO

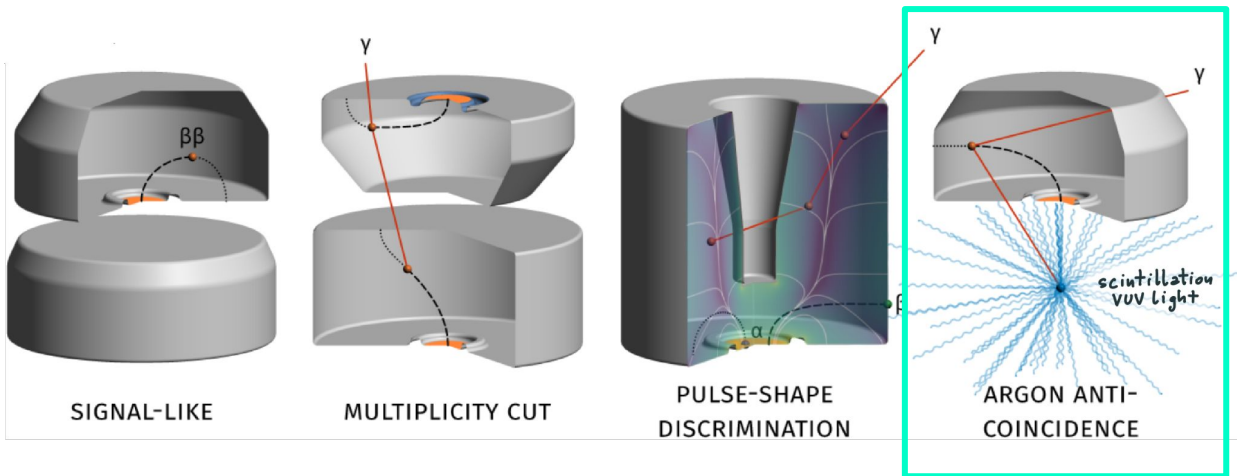


STRATEGIE PER LA SOPPRESSIONE DEL FONDO

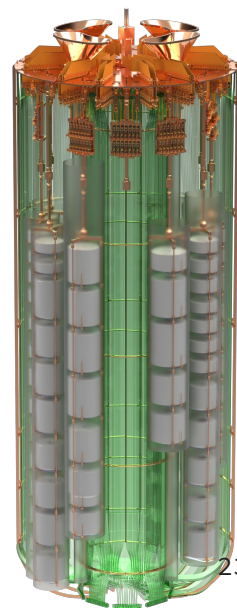


La **forma** del segnale acquisito dipende dalla **topologia** del rilascio di energia nel rivelatore, che è legata al tipo di evento

STRATEGIE PER LA SOPPRESSIONE DEL FONDO

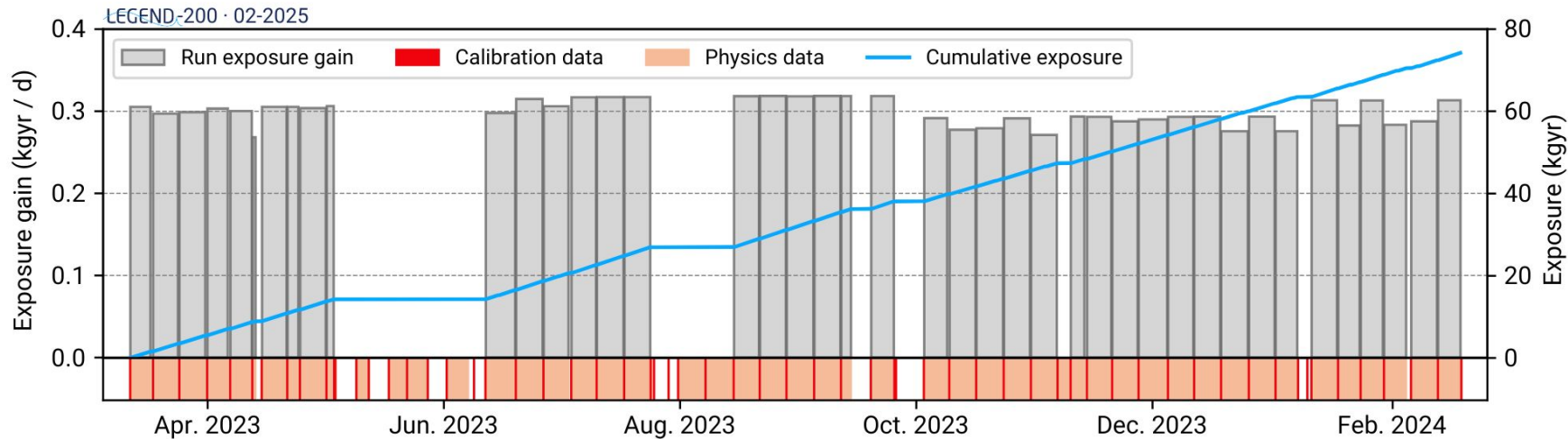


LAr adeguatamente strumentato (fibre, SiPMs) consente di rivelare **luce di scintillazione** quando si ha un deposito di energia nell'Argon in **coincidenza** con deposito di energia nel Germanio



PRIMI RISULTATI

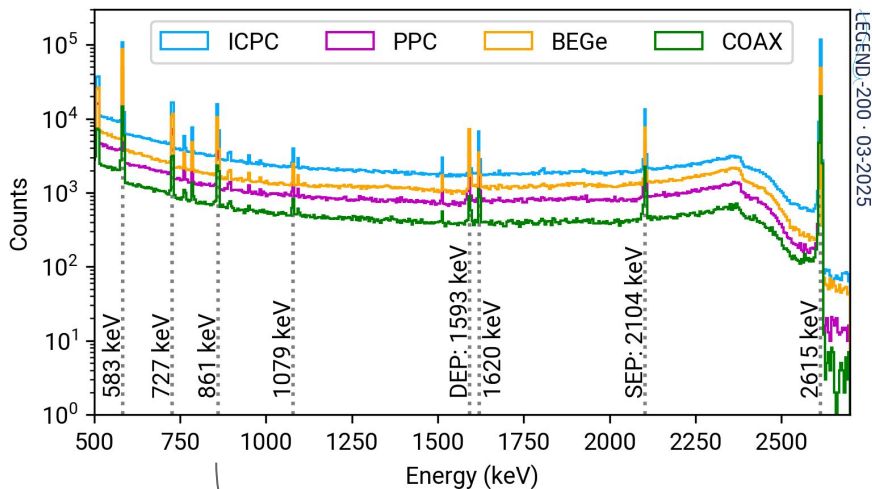
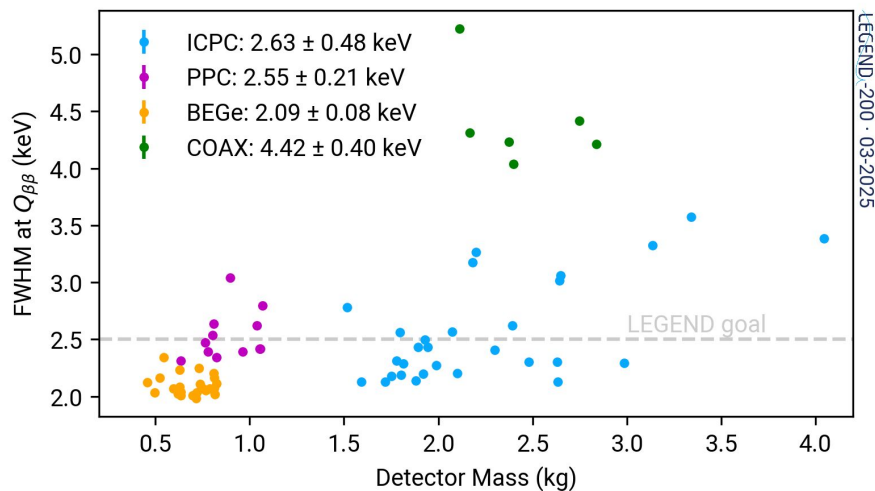
ESPOSIZIONE



142 kg di Germanio (101 rivelatori)
Circa **un anno** di presa dati

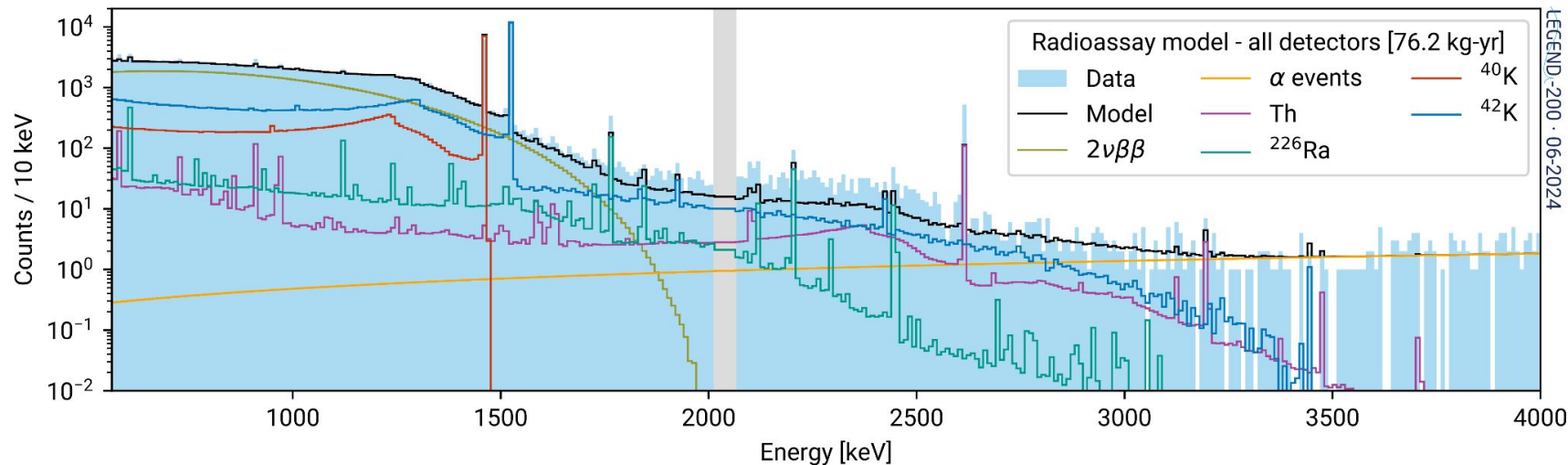
PERFORMANCES E STABILITÀ

Risoluzione energetica
al Qbb dei diversi
tipi di rivelatori



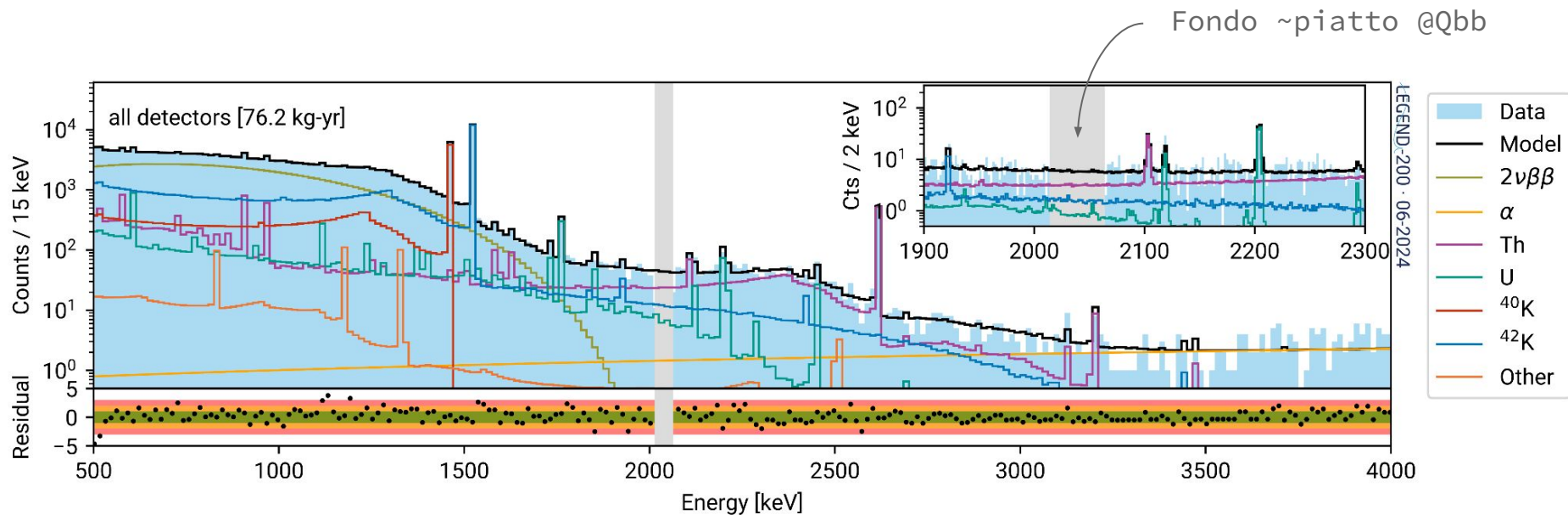
Calibrazione settimanale
con sorgente di ²²⁸Th

BACKGROUND PREDICTION (RADIOASSAY)



Fondo (prima dei tagli di analisi) maggiore di quanto previsto da radioassay

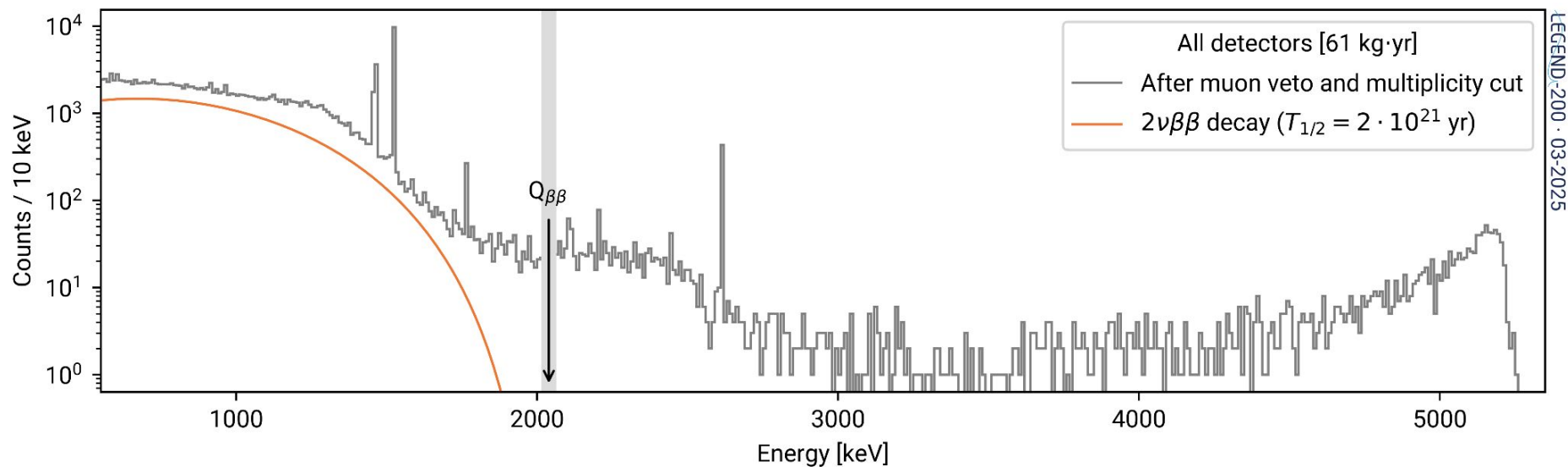
BACKGROUND MODEL



Background model fit suggerisce eccesso dovuto a catena del ^{228}Th
↳ Campagna di screening in corso per identificare sorgente

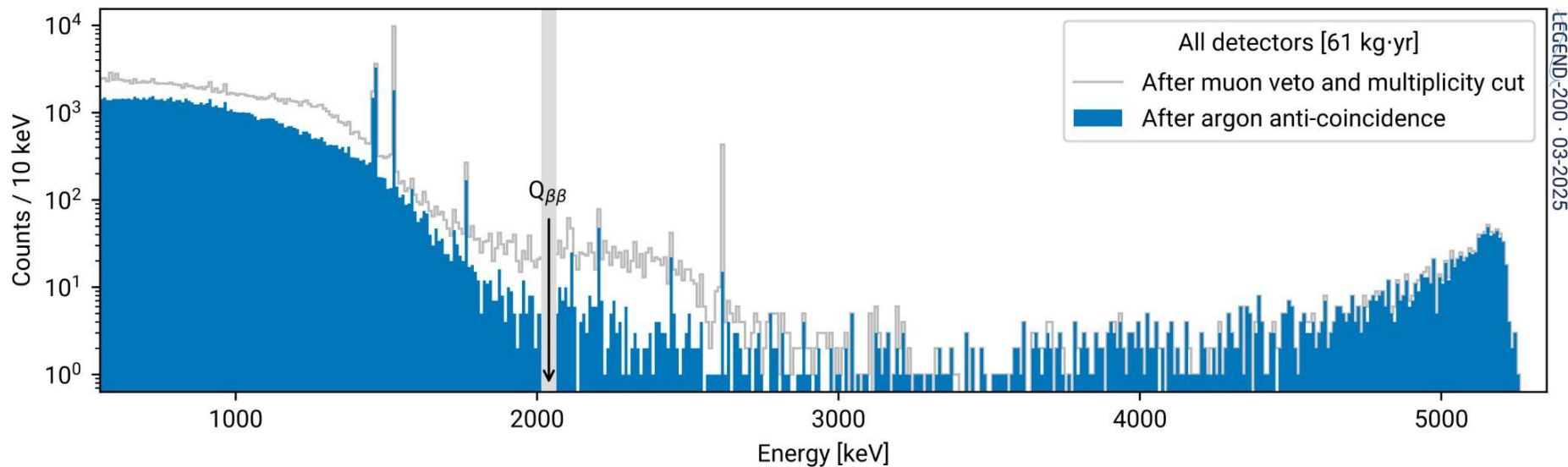
[Eccesso eliminato efficacemente da tagli di analisi]

SPETTRO ENERGETICO



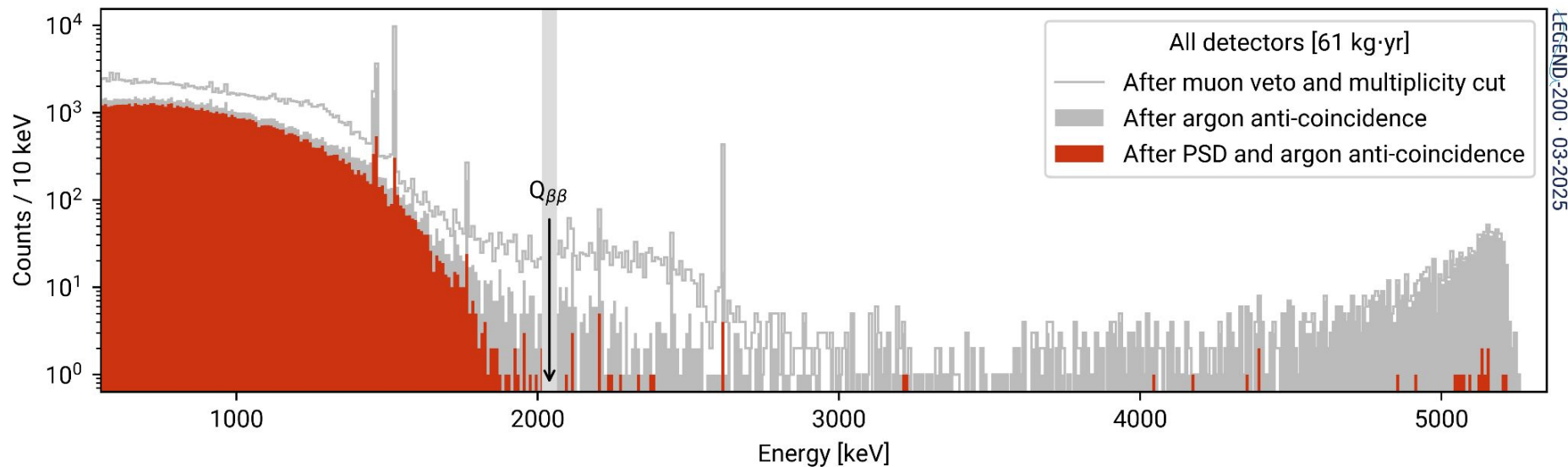
Analisi totalmente **blind** nella regione **$Q_{\beta\beta} \pm 25$ keV**

SPETTRO ENERGETICO



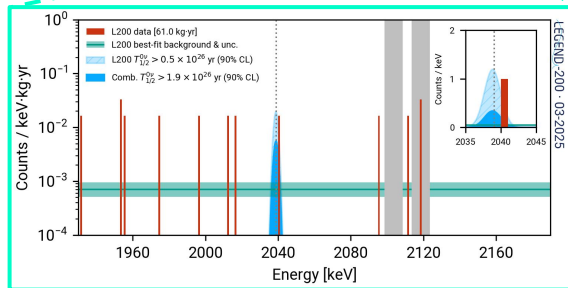
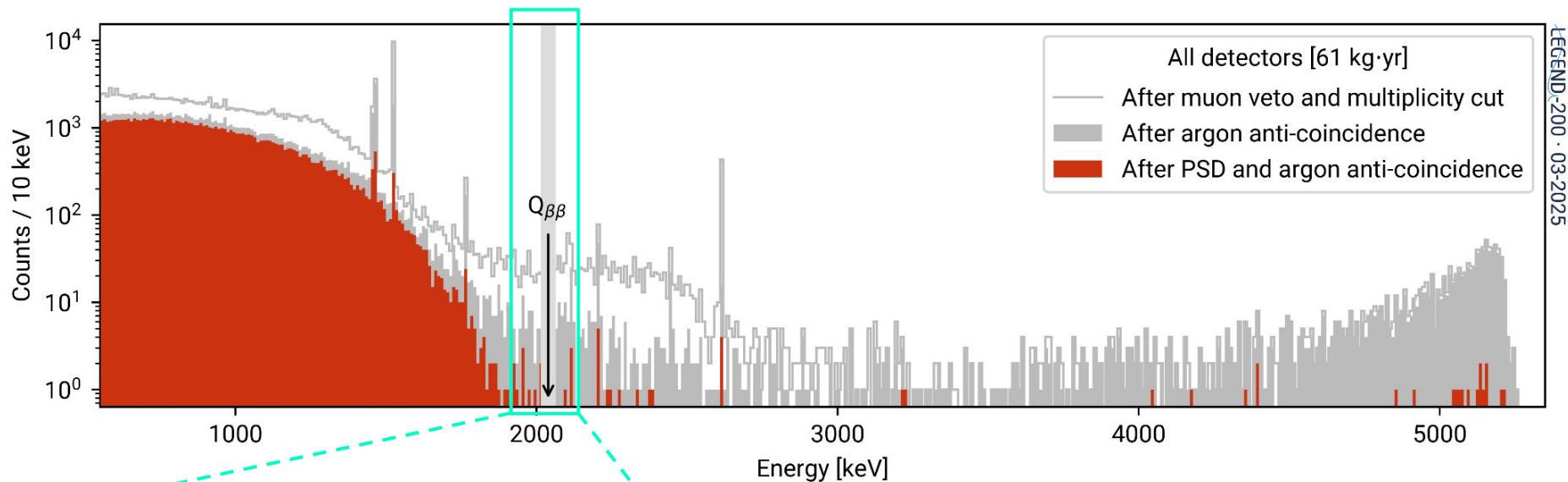
Efficace soppressione eventi Compton
Efficienza LAr ($0\nu\beta\beta$) ~ 93 %

SPETTRO ENERGETICO



Forte anti-correlazione tra taglio di LAr e PSD
Efficienza PSD ($0\nu\beta\beta$) ~ 85 %

UNBLINDING

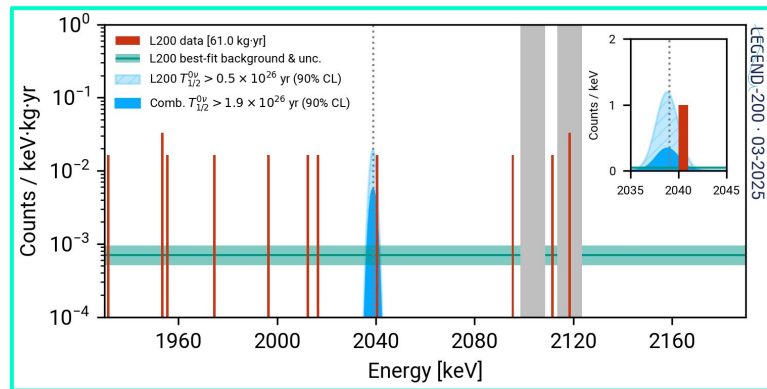


Finestra di analisi: [1930-2190] keV

Linee gamma note (escluse):

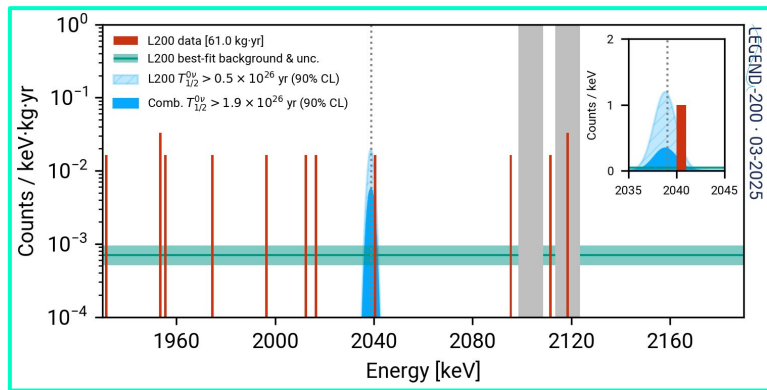
- $^{208}\text{Tl} \rightarrow (2104 \pm 5)$ keV
- $^{214}\text{Bi} \rightarrow (2119 \pm 5)$ keV

UNBLINDING: INDICE DI BKG E LIMITI SULL' HALF LIFE



- Due unblinding successivi:
 - **Golden dataset: 48.3 kg yr**
 - **Silver dataset: 12.7 kg yr**
- Totale: 61.0 kg yr
- 11 eventi nella finestra di analisi dopo i tagli

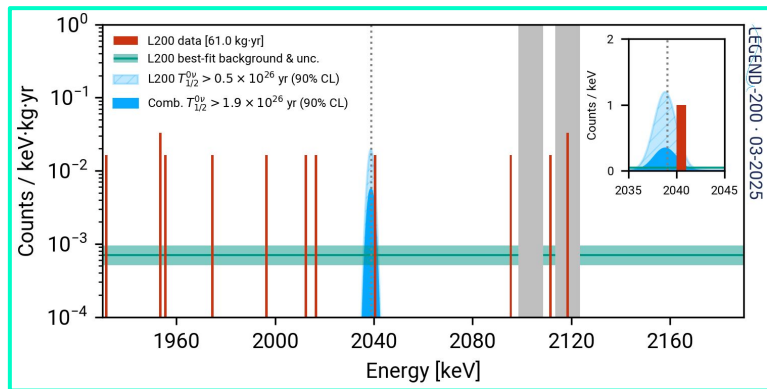
UNBLINDING: INDICE DI BKG E LIMITI SULL' HALF LIFE



- Due unblinding successivi:
 - **Golden dataset: 48.3 kg yr**
 - **Silver dataset: 12.7 kg yr**
- Totale: 61.0 kg yr
- 11 eventi nella finestra di analisi dopo i tagli

- Indici di background corrispondenti:
 - **BI(golden) = $5.4^{+2.7}_{-2.0} \times 10^{-4}$ cts/(keV kg yr)**
 - **BI(silver) = $13^{+8.0}_{-5.4} \times 10^{-4}$ cts/(keV kg yr)**

UNBLINDING: INDICE DI BKG E LIMITI SULL' HALF LIFE



- Due unblinding successivi:
 - **Golden dataset: 48.3 kg yr**
 - **Silver dataset: 12.7 kg yr**
- Totale: 61.0 kg yr
- 11 eventi nella finestra di analisi dopo i tagli

- Indici di background corrispondenti:
 - **BI(golden) = $5.4^{+2.7}_{-2.0} \times 10^{-4}$ cts/(keV kg yr)**
 - **BI(silver) = $13^{+8.0}_{-5.4} \times 10^{-4}$ cts/(keV kg yr)**
- Fit combinato GERDA+MJD+LEGEND (90% CL, analisi frequentista):
 - Limite half life: $T_{1/2}^{0\nu} > 1.95 \times 10^{26}$ yr $\rightarrow$ **mbb < 70-200 meV**
 - Median exclusion sensitivity: 2.81×10^{26} yr
- Analisi bayesiana fornisce risultati compatibili

CONCLUSIONI

- Completato il primo anno di misure con LEGEND-200
 - **142 kg** di Germanio messi in opera
 - 4 tipologie di rivelatori HPGe
- Studiate le performance dell'esperimento
 - Risoluzione energetica per lo più compatibile con obiettivo di 2.5 keV FWHM @Qbb (0.12%)
 - Fondo (prima dei tagli di analisi) più alto del previsto (radioassay model)
 - ↳ Campagna di screening in corso per identificare e rimuovere sorgente
- Presentati i primi risultati di LEGEND-200
 - 61 kg yr di esposizione
 - Fit combinato GERDA+MJD+LEGEND: $T_{1/2}^{0\nu} > 1.95 \times 10^{26} \text{ yr}$
 - ↳ Limite < sensibilità a causa di un evento a 1.4σ da Qbb

BACKUP

TIMELINE

