

Ricerca di violazioni delle simmetrie di Lorentz e CPT nel decadimento doppio-beta $2\nu\beta\beta$ utilizzando i dati dell'esperimento GERDA

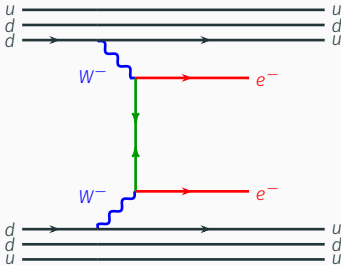
Luigi Pertoldi

18 Luglio 2017

Università degli Studi di Padova
INFN – Sezione di Padova

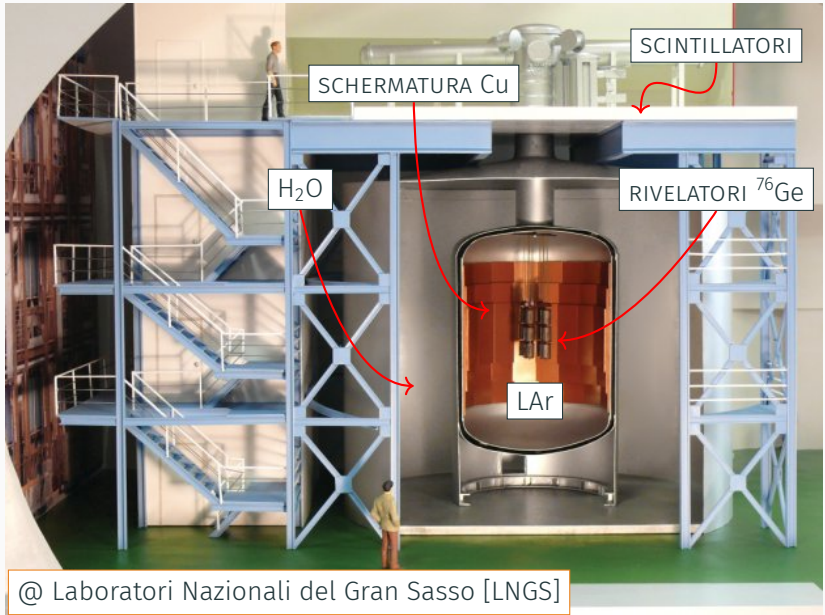


The GERmanium Detector Array



- GERDA: ricerca decadimento doppio-beta senza neutrini ($0\nu\beta\beta$) dell'isotopo ^{76}Ge
- Array di rivelatori arricchiti al ^{76}Ge
 \mapsto rivelatore = sorgente
- Fase II
 - aumento della quantità di ^{76}Ge
 - aggiornamento della strumentazione
 \mapsto migliore discriminazione del fondo.

The GERmanium Detector Array



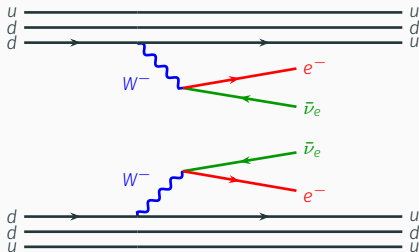
- Molte teorie candidate a descrivere la Gravità Quantistica prevedono la rottura spontanea (alla scala di Planck) della simmetria di Lorentz \mapsto **Standard Model Extension (SME)**.
- La scala di energia di Planck è attualmente non accessibile per via sperimentale \mapsto ricerca a energie minori di **segnali soppressi**.
- Questo tipo di rottura spontanea può essere studiata nel settore dei neutrini.

Proposta

È possibile ricercare effetti di violazione della simmetria di Lorentz nei dati di $2\nu\beta\beta$ (**non** $0\nu\beta\beta$!) raccolti da GERDA

Lorentz-violating $2\nu\beta\beta$ per l'isotopo ^{76}Ge

(Standard Model $2\nu\beta\beta$)



Lorentz-violating $2\nu\beta\beta$

Distorsione dello spettro in energia ($K = K_1 + K_2$) dei due elettroni in uscita.

Distorsione regolata dal coefficiente $\dot{a}_{\text{of}}^{(3)}$

$$\frac{d\Gamma_{TOT}}{dK} = \frac{d\Gamma}{dK} + \frac{d\delta\Gamma}{dK}$$

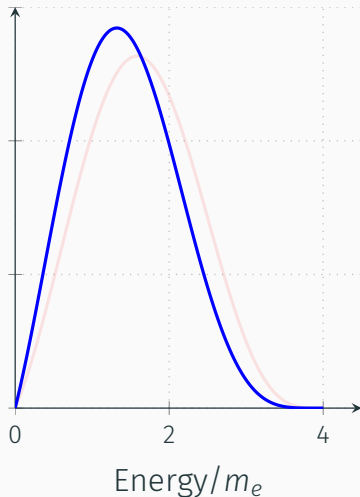
Lo spettro in energia del $2\nu\beta\beta$

Standard-Model $2\nu\beta\beta$

$$\frac{d\Gamma}{dK} = C(K^5 + 10K^4 + 40K^3 + 60K^2 + 30)(Q_{\beta\beta} - K)^5$$

Lorentz-violating $2\nu\beta\beta$

$$\frac{d\delta\Gamma}{dK} = C(K^5 + 10K^4 + 40K^3 + 60K^2 + 30)10\hat{a}_{\text{of}}^{(3)}(Q_{\beta\beta} - K)^4$$



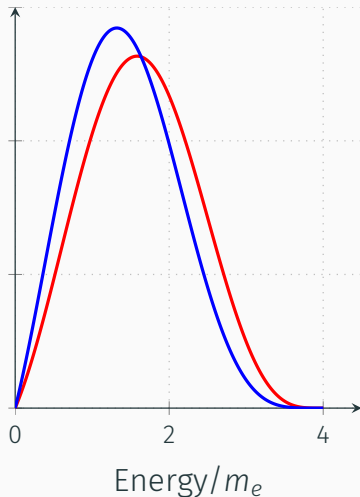
Lo spettro in energia del $2\nu\beta\beta$

Standard-Model $2\nu\beta\beta$

$$\frac{d\Gamma}{dK} = C(K^5 + 10K^4 + 40K^3 + 60K^2 + 30)(Q_{\beta\beta} - K)^5$$

Lorentz-violating $2\nu\beta\beta$

$$\frac{d\delta\Gamma}{dK} = C(K^5 + 10K^4 + 40K^3 + 60K^2 + 30)10\hat{a}_{\text{of}}^{(3)}(Q_{\beta\beta} - K)^4$$



Obiettivo

Estrarre una stima di $\hat{\alpha}_{of}^{(3)}$ dai dati di GERDA – Fase II tramite un'analisi statistica Bayesiana

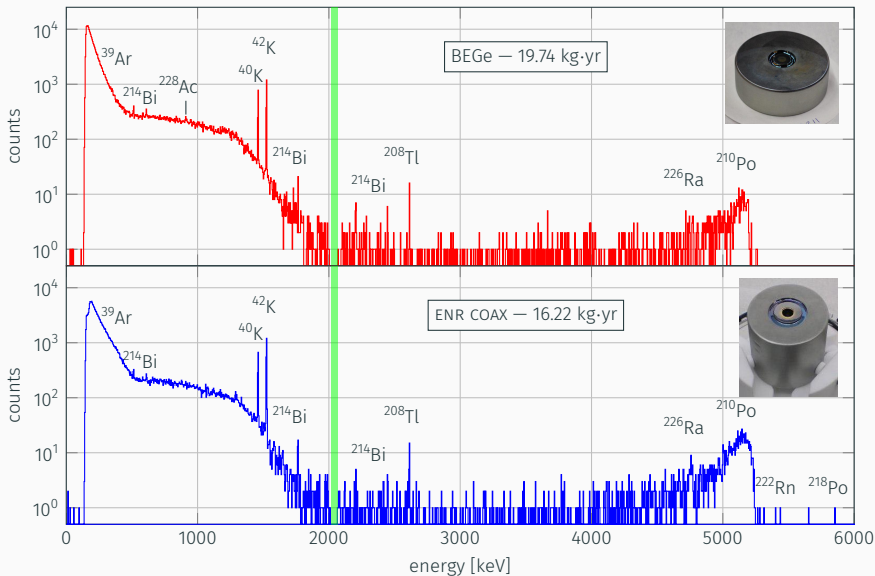
Preparazione all'analisi statistica:

- Applicazione dei tagli di qualità sui dati.
- Costruzione del modello di fondo: produzione delle simulazioni Monte Carlo.
- Costruzione del modello statistico utilizzato per interpolare i dati con le simulazioni.

È possibile attuare i seguenti tagli di qualità sui dati: eventi corrispondenti a

- **errori di acquisizione o di ricostruzione** delle quantità fisiche associate a una forma d'onda
- rilascio di energia nell'acqua o negli scintillatori posti sopra l'apparato (**muon veto**)
- rilascio di energia in più rivelatori (**coincidenze**) \mapsto evento di fondo

sono **esclusi** dall'analisi.



Modello di fondo — simulazioni Monte Carlo

La costruzione di un **modello di fondo** è fondamentale per estrarre gli eventi $2\nu\beta\beta$ dai dati e studiarne lo spettro in energia.

I cambiamenti apportati in GERDA — Fase II richiedono un modello di fondo aggiornato rispetto ai modelli preesistenti.

- il $2\nu\beta\beta$, *Standard-Model* e *Lorentz-violating*, simulato nei rivelatori al Germanio
- misure di screening dei materiali \mapsto gli isotopi

^{212}Bi , ^{214}Bi , ^{208}Tl , ^{214}Pb , ^{40}K , ^{42}K , ^{60}Co , ^{228}Ac , ^{234}Pa , ^{207}Bi ,

sono stati simulati all'interno delle varie componenti di GERDA

- Le sorgenti di particelle α simulate sulla superficie dei rivelatori \mapsto *α -model*

Modello di fondo — simulazioni Monte Carlo

La costruzione di un **modello di fondo** è fondamentale per estrarre gli eventi $2\nu\beta\beta$ dai dati e studiarne lo spettro in energia.

I cambiamenti apportati in GERDA — Fase II richiedono un modello di fondo aggiornato rispetto ai modelli preesistenti.

- il $2\nu\beta\beta$, *Standard-Model* e *Lorentz-violating*, simulato nei rivelatori al Germanio
- **misure di screening dei materiali** \mapsto gli **isotopi**

^{212}Bi , ^{214}Bi , ^{208}Tl , ^{214}Pb , ^{40}K , ^{42}K , ^{60}Co , ^{228}Ac , ^{234}Pa , ^{207}Bi ,

sono stati simulati all'interno delle varie componenti di GERDA

- Le sorgenti di particelle α simulate sulla superficie dei rivelatori \mapsto **α -model**

La presenza delle varie componenti simulate è stata indagata con un'analisi statistica di tipo **Bayesiano** (librerie software **BAT**¹).

- Intervallo di Fit: [570, 5300] keV
- gli spettri in energia sommati sui due tipi di rivelatori (**BEGe** e **EnrCoax**) mantenuti **separati** nell'analisi ($\mathcal{L} = \mathcal{L}_1 \cdot \mathcal{L}_2$)
- **binning variabile** in larghezza studiato per ovviare alle incertezze sulla calibrazione in energia attorno alle linee γ più evidenti
- **prior distributions** per le attività di alcune sorgenti
- **p-value** per stimare il grado di *goodness-of-fit*

¹basate su metodi MCMC. <https://www.wold.mppmu.mpg.de/bat/>

1. Modello con il solo $2\nu\beta\beta$ del Modello Standard

- 1.1 Modello massimale con tutte le sorgenti di fondo in tutte le posizioni possibili
- 1.2 Modello minimale con sorgenti ad attività non nulla
- 1.3 Modello minimale con l'aggiunta delle *prior distributions*

⟶ Stima della vita media $T_{1/2}^{2\nu}$ dello *Standard-Model* $2\nu\beta\beta$

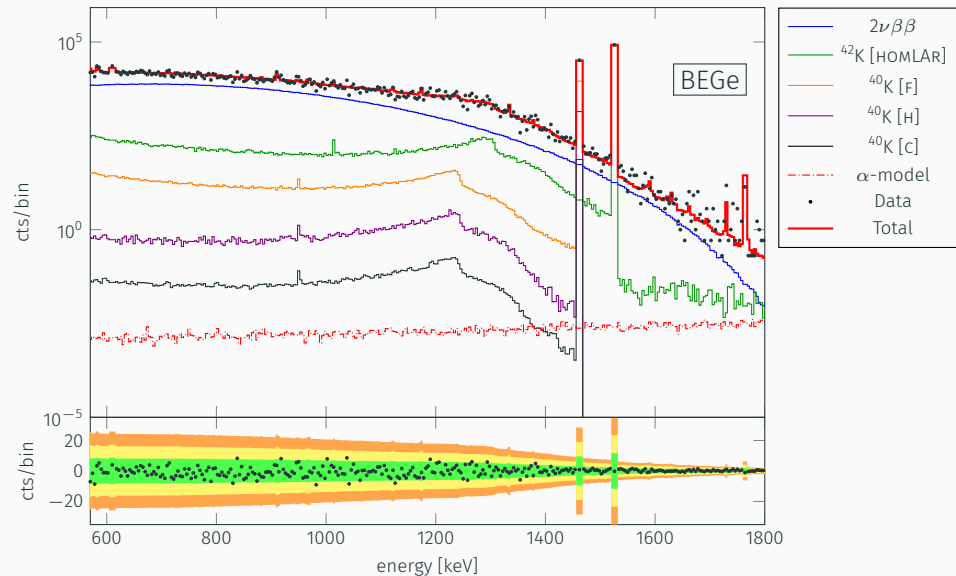
2. Modello di cui al punto (1.3) con l'aggiunta del canale *Lorentz-violating* del $2\nu\beta\beta$

⟶ Stima del parametero $\hat{a}_{\text{of}}^{(3)}$ del *Lorentz-violating* $2\nu\beta\beta$

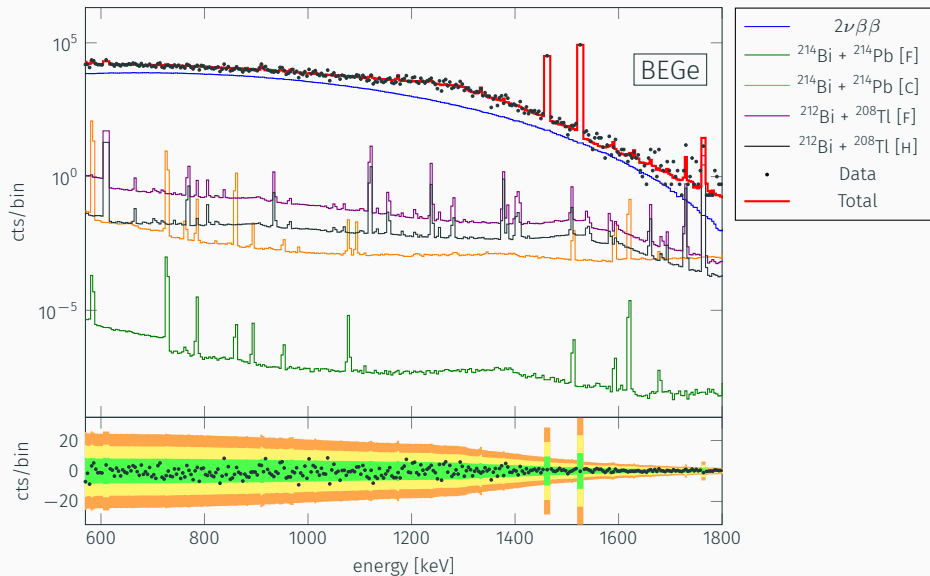
1. Modello con il solo $2\nu\beta\beta$ del Modello Standard
 - 1.1 Modello massimale con tutte le sorgenti di fondo in tutte le posizioni possibili
 - 1.2 Modello minimale con sorgenti ad attività non nulla
 - 1.3 Modello minimale con l'aggiunta delle *prior distributions*
- Stima della vita media $T_{1/2}^{2\nu}$ dello *Standard-Model* $2\nu\beta\beta$
2. Modello di cui al punto (1.3) con l'aggiunta del canale *Lorentz-violating* del $2\nu\beta\beta$
- Stima del parametero $\hat{a}_{\text{of}}^{(3)}$ del *Lorentz-violating* $2\nu\beta\beta$

Risultati

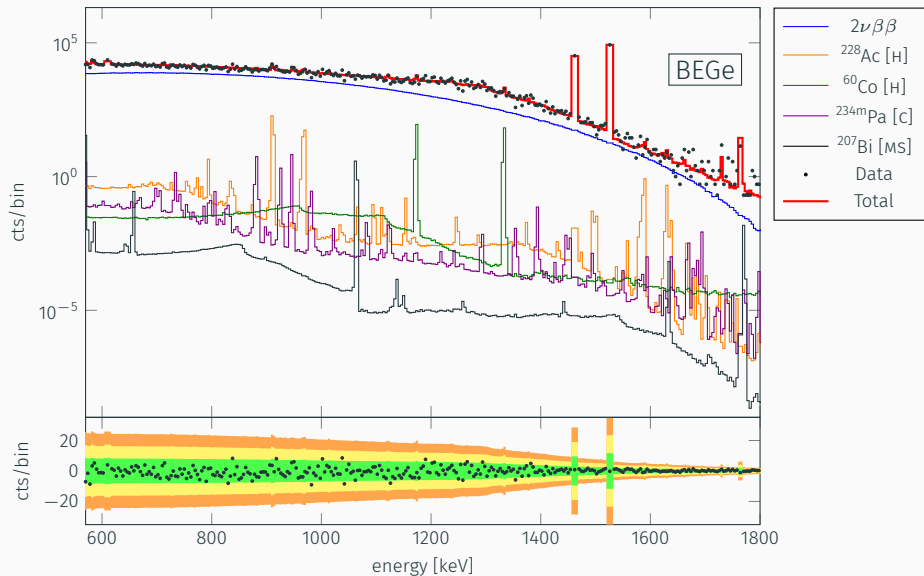
Risultati — modello di fondo

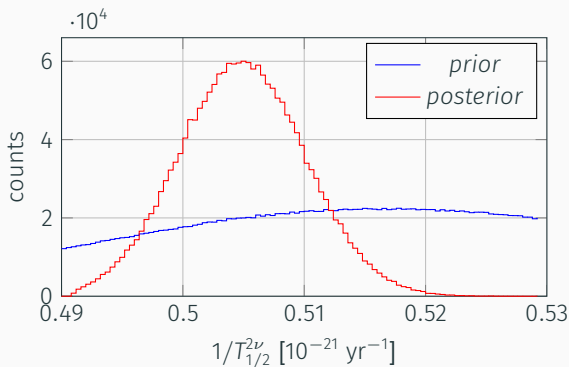


Risultati — modello di fondo



Risultati — modello di fondo

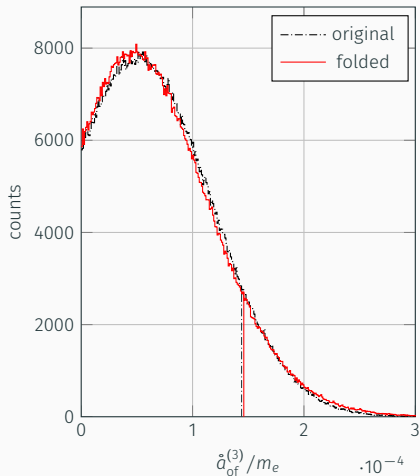




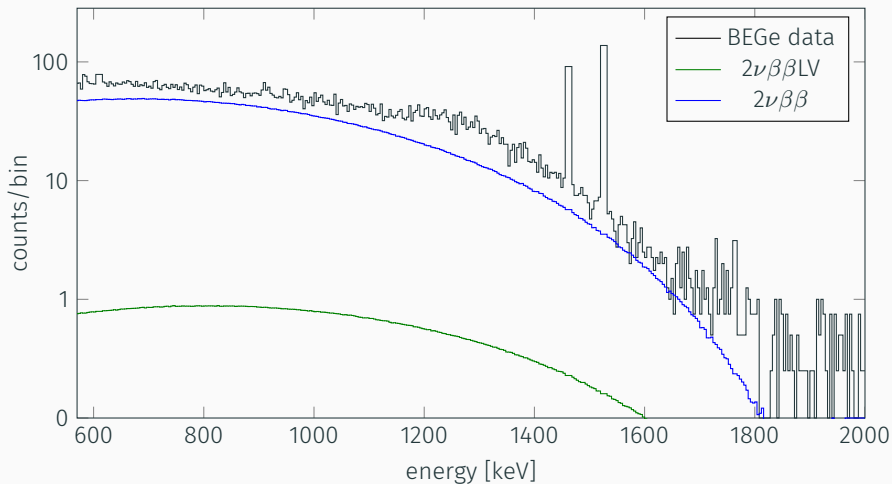
$$\begin{aligned}
 T_{1/2}^{2\nu} &= (1.984^{+0.020}_{-0.020 \text{ stat}} \quad {}^{+0.098}_{-0.075 \text{ sys}}) \cdot 10^{21} \text{ yr} \\
 &= (1.98^{+0.10}_{-0.08}) \cdot 10^{21} \text{ yr}
 \end{aligned}$$

- La moda è compatibile con zero al 90% C.I.
- Convoluzione con la distribuzione delle **incertezze sistematiche**.

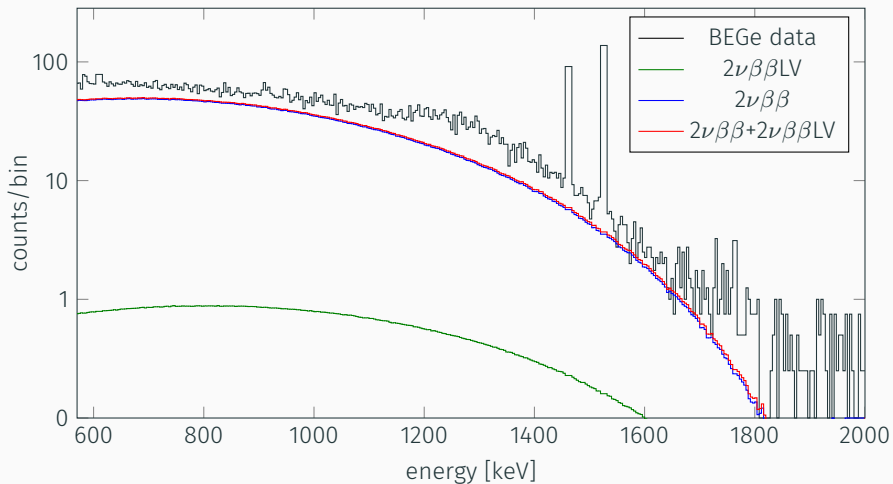
$$\dot{a}_{\text{of}}^{(3)} < 7.5 \cdot 10^{-8} \text{ GeV (90\% C.I.)}$$



Risultati — $2\nu\beta\beta$



Risultati — $2\nu\beta\beta$



$$T_{1/2}^{2\nu} = (1.98^{+0.10}_{-0.08}) \cdot 10^{21} \text{ yr}$$

- **GERDA – Fase I:** $(1.926 \pm 0.094) \cdot 10^{21} \text{ yr}$

Agostini M. et al. *Eur. Phys. J. C* 75(9):416, 2015

$$\tilde{a}_{\text{of}}^{(3)} < 7.5 \cdot 10^{-8} \text{ GeV (90\% C.I.)}$$

- **Analisi a posteriori su decadimento- β :** $\tilde{a}_{\text{of}}^{(3)} \lesssim 1 \cdot 10^{-9} \text{ GeV}$

Díaz J.S. et al. *Phys. Rev. D* 88(7):071902, 2013

- **EXO-200:** $\tilde{a}_{\text{of}}^{(3)} \lesssim 7.6 \cdot 10^{-6} \text{ GeV}$

Albert J.B. et al. *Phys. Rev. D* 93:072001, 2016

Obiettivo

Ricerca di effetti *Lorentz-violating* nei dati $2\nu\beta\beta$ di GERDA
→ valutazione della distorsione dello spettro in energia regolata da $\ddot{a}_{\text{of}}^{(3)}$.

Tramite:

- un **modello di fondo aggiornato** alla Fase II di GERDA;
- l'implementazione di un'analisi statistica Bayesiana.

Risultati (comprensivi delle incertezze sistematiche):

$$T_{1/2}^{2\nu} = (1.98 \pm_{-0.08}^{+0.10}) \cdot 10^{21} \text{ yr}, \quad \ddot{a}_{\text{of}}^{(3)} < 7.5 \cdot 10^{-8} \text{ GeV (90\% C.I.)}$$

confrontati con precedenti stime presenti in letteratura.

Backup

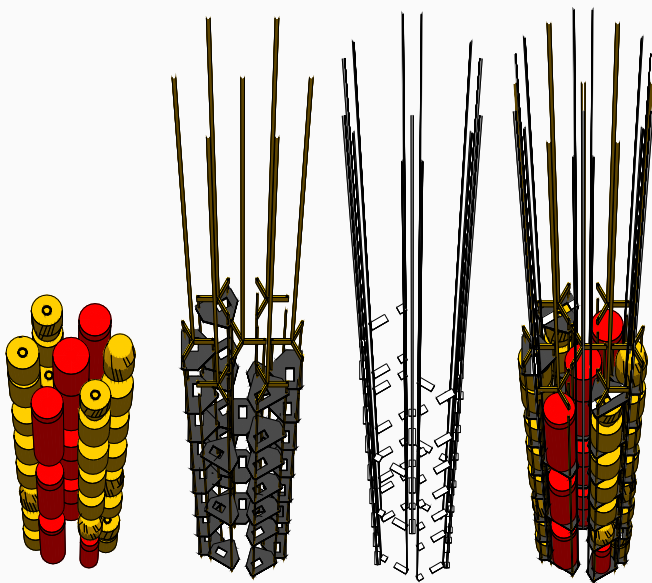
Source	Line [keV]	bin size [keV]
^{42}K	1461	12
^{40}K	1525	12
^{208}Tl	2614	12
^{214}Bi	609	12
	1764	8
	2204	8
	2247	12
else		4

Sistematiche

Singoli contributi alle incertezze sistematiche su $T_{1/2}^{2\nu}$ e sul 90° quantile della *posterior distribution* di $\dot{a}_{\text{of}}^{(3)}$

Contributo	$T_{1/2}^{2\nu}$ [%]	$\dot{a}_{\text{of}}^{(3)}$ [%]
<i>Binning</i>	± 1.2	± 14.3
MC geometria	± 1.0	
MC GEANT4	± 2.0	
Frazione di massa attiva	$+3.9$ -2.5	$+3.8$ -1.7
Frazione di arricchimento	$+2.0$ -1.6	$+2.0$ -1.8
Acquisizione e selezione dati	± 0.5	
Totale	$+5.1$ -3.9	$+15.1$ -14.7

Simulazioni Monte Carlo — Volumi



Simulazioni Monte Carlo — Summary

	Holders	Cables	Mini-shroud	Fibers	Contacts	LAr	Ge
$2\nu\beta\beta$							✓
$2\nu\beta\beta$ LV							✓
^{42}K					✓	✓	
^{40}K		✓	✓	✓	✓		
^{214}Bi	✓	✓	✓	✓			
^{214}Pb	✓	✓	✓	✓			
$^{234\text{m}}\text{Pa}$	✓		✓		✓		
^{212}Bi	✓	✓	✓	✓			
^{208}Tl	✓	✓	✓	✓			
^{228}Ac	✓						
^{60}Co	✓						
^{207}Bi	✓	✓	✓				
α -model						✓	

Learning from experiment:

$$P_{i+1}(\vec{\lambda}, \vec{\nu}, M \mid \vec{D}) = \frac{f(\vec{x} = \vec{D} \mid \vec{\lambda}, \vec{\nu}, M) P_i(\vec{\lambda}, \vec{\nu}, M)}{\sum_M \int f(\vec{x} = \vec{D} \mid \vec{\lambda}, \vec{\nu}, M) P_i(\vec{\lambda}, \vec{\nu}, M)}$$

Parameter estimation:

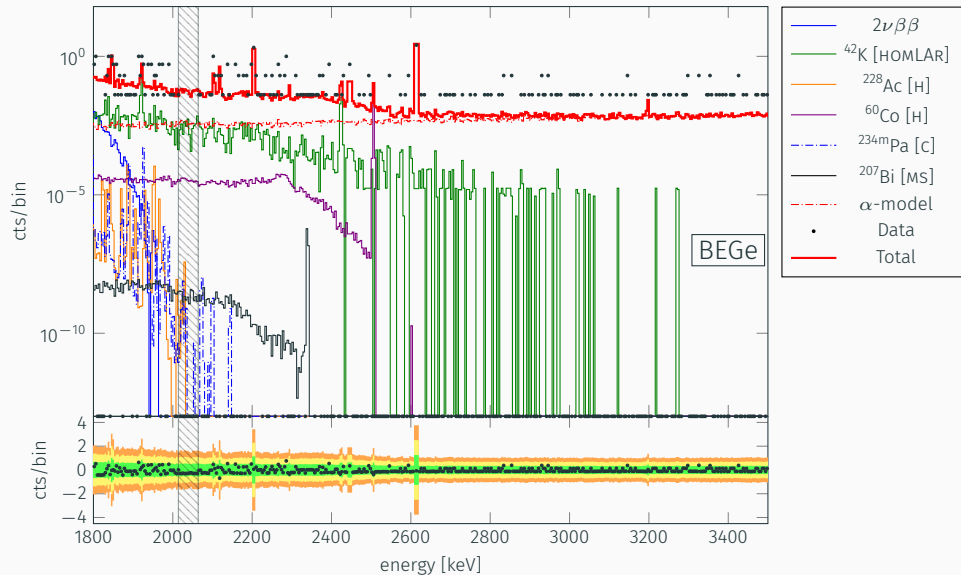
$$P(\vec{\lambda}, \vec{\nu} \mid \vec{D}, M) = \frac{P(\vec{x} = \vec{D} \mid \vec{\lambda}, \vec{\nu}, M) P_0(\vec{\lambda}, \vec{\nu} \mid M)}{\int P(\vec{x} = \vec{D} \mid \vec{\lambda}, \vec{\nu}, M) P_0(\vec{\lambda}, \vec{\nu} \mid M)}$$

Marginalized posterior:

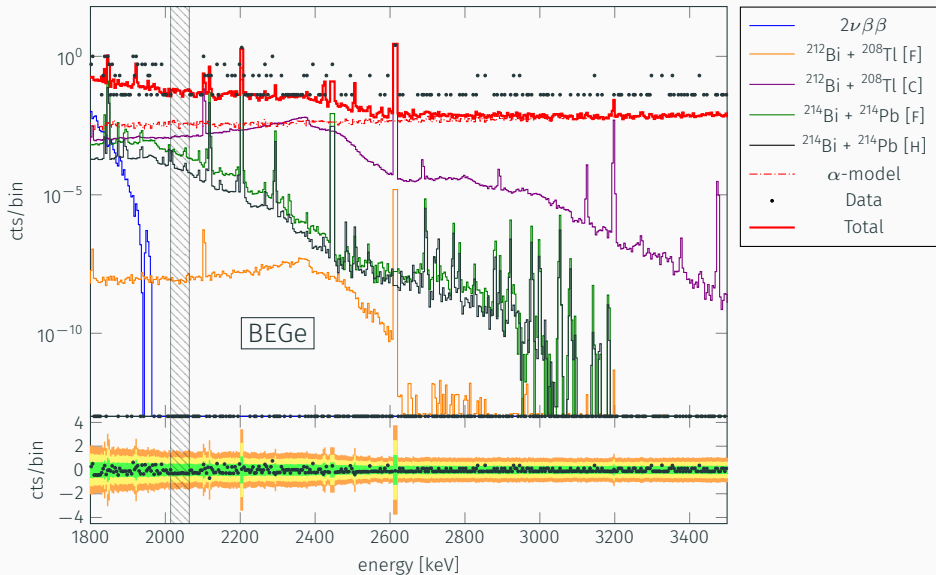
$$P(\lambda_i \mid \vec{D}, M) = \int P(\vec{\lambda}, \vec{\nu} \mid \vec{D}, M) d\vec{\lambda}_{i \neq j} d\vec{\nu}$$

$$P(\vec{D} \mid \vec{\lambda}) = P_{\text{BEGe}}(\vec{D} \mid \vec{\lambda}) P_{\text{COAX}}(\vec{D} \mid \vec{\lambda}) = \prod_i^N \left[\frac{e^{-\mu_i} \mu_i^{n_i}}{n_i!} \right]_{\text{BEGe}} \prod_j^N \left[\frac{e^{-\mu_j} \mu_j^{n_j}}{n_j!} \right]_{\text{COAX}}$$

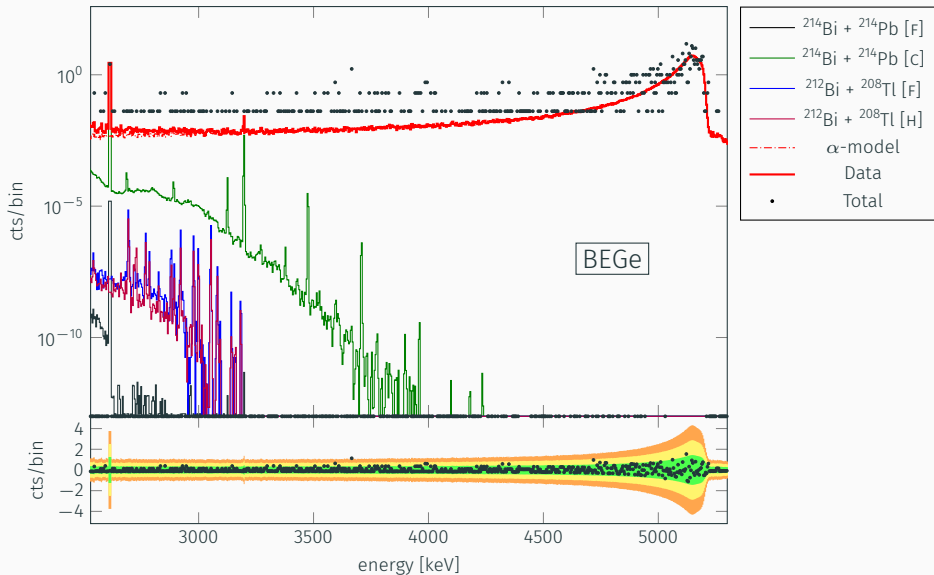
Risultati — modello di fondo



Risultati — modello di fondo



Risultati — modello di fondo



Risultati

Source	Global [mBq/kg]	Marg. [mBq/kg]	1σ [mBq/kg]	BI [BEGe] [10^{-2} cts/(keV·kg·yr)]	BI [COAX]
$T_{1/2}^{2\nu}$ [10^{21} yr] (\dagger)	1.984	1.980	± 0.020	0.001	0.001
FIBERS					
^{40}K	89.71	88.65	$^{+11}_{-14}$	–	–
$^{212}\text{Bi} + ^{208}\text{Tl}$ (\dagger)	0.0583	0.0595	± 0.012	0.002	0.002
$^{214}\text{Pb} + ^{214}\text{Bi}$	2.08	2.13	$^{+0.64}_{-0.77}$	0.149	0.169
HOLDERS					
^{40}K (\dagger)	4.00	4.17	0.83	–	–
$^{214}\text{Pb} + ^{214}\text{Bi}$	0.064	0.052	$^{+0.065}_{-0.052}$	0.086	0.062
^{228}Ac	0.315	0.305	± 0.075	0.005	0.005
^{60}Co	0.086	0.099	± 0.025	0.053	0.042
CABLES					
^{40}K	79	46	$^{+89}_{-63}$	–	–
$^{212}\text{Bi} + ^{208}\text{Tl}$	12.1	11.9	± 1.6	0.285	0.226
$^{234\text{m}}\text{Pa}$	7.2	6.0	$^{+4.3}_{-3.8}$	0.002	0.002

Risultati

MINI-SHROUD ^{207}Bi	0.50	0.56	$+0.44$ -0.37	0.001	0.003
OTHER					
^{42}K in LAr	0.2019	0.2004	± 0.0038	0.377	0.471
^{42}K on COAX n^+ [cts]	660	630	± 170	–	0.379
α -model BEGe [cts]	1343	1332	± 50	0.416	–
α -model COAX [cts]	2955	2962	± 78	–	0.470
TOTAL				1.38 ± 0.20	1.83 ± 0.25
p-value					0.94