

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

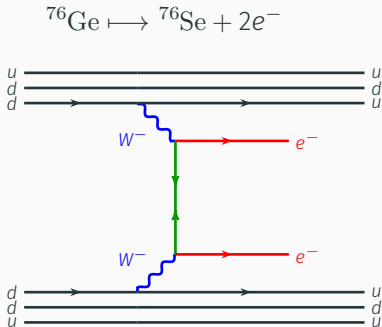
Luigi Pertoldi

18 Luglio 2017

Università degli Studi di Padova
INFN – Sezione di Padova

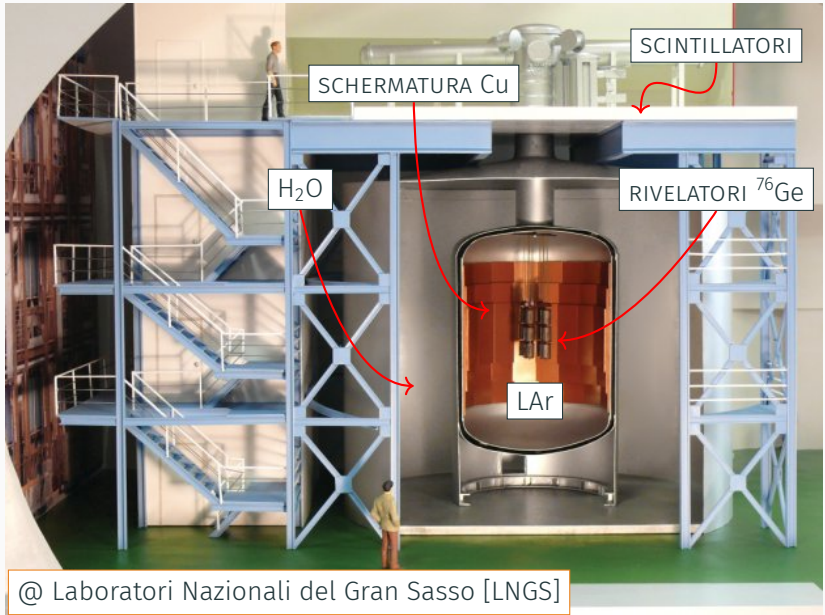


The GERmanium Detector Array



- GERDA misura la vita media del 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 e aggiornamento della strumentazione per una maggiore efficienza di reiezione degli eventi di fondo.

The GERmanium Detector Array



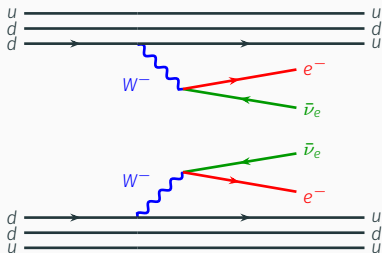
- Molte teorie candidate a descrivere la Gravità Quantistica prevedono la rottura spontanea (alla scala di Planck) della simmetria di Lorentz \mapsto **Standard Model Extension (SME)**.
- La scala di energia di Planck è attualmente non accessibile per via sperimentale \mapsto ricerca a energie minori 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 $2\nu\beta\beta$)



In decadimenti con neutrini la violazione della simmetria di Lorentz porta a una distorsione dello spettro in energia ($K = K_1 + K_2$) dei due elettroni in uscita.

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

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

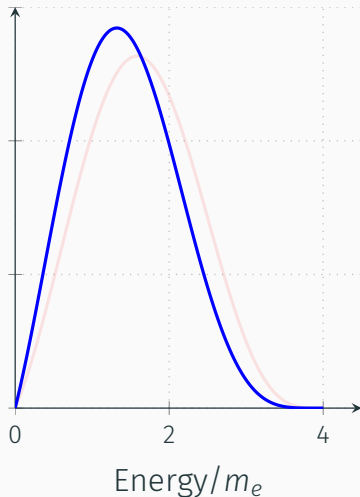
Lo spettro in energia del $2\nu\beta\beta$

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 $2\nu\beta\beta$

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



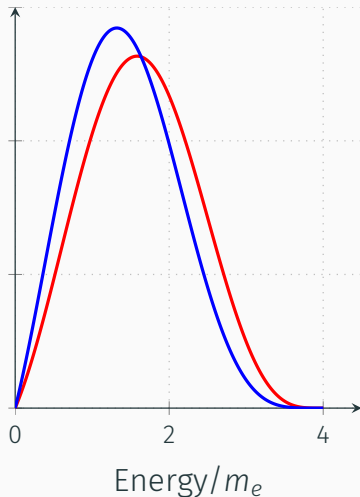
Lo spettro in energia del $2\nu\beta\beta$

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

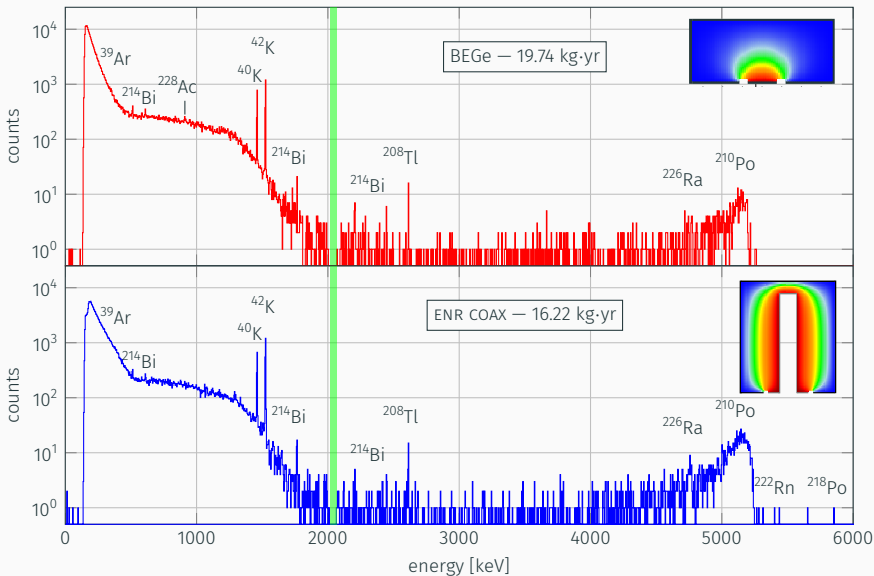
Preparazione all'analisi statistica:

- 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.wld.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* $2\nu\beta\beta$

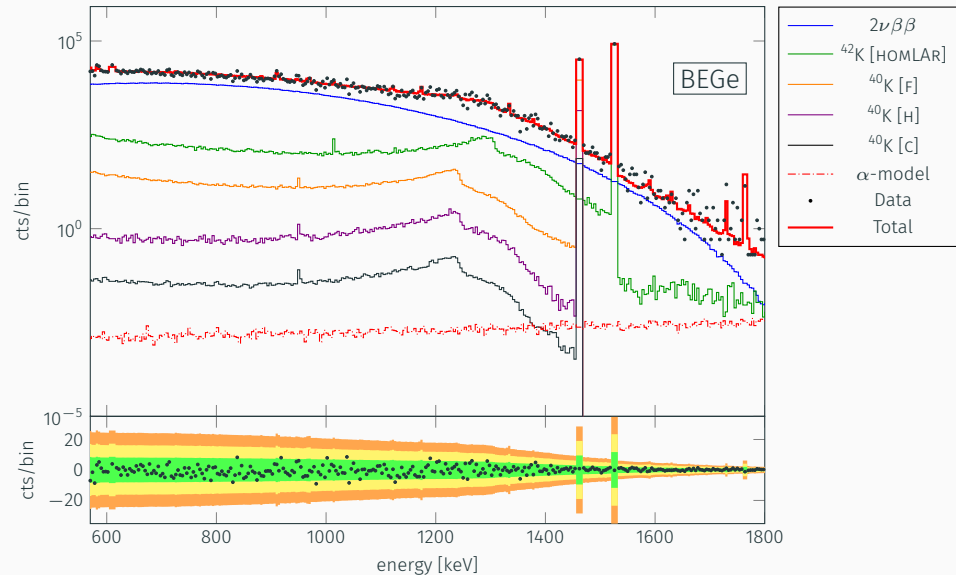
2. Modello di cui al punto (1.3) con l'aggiunta del canale *Lorentz-violating* del $2\nu\beta\beta$

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

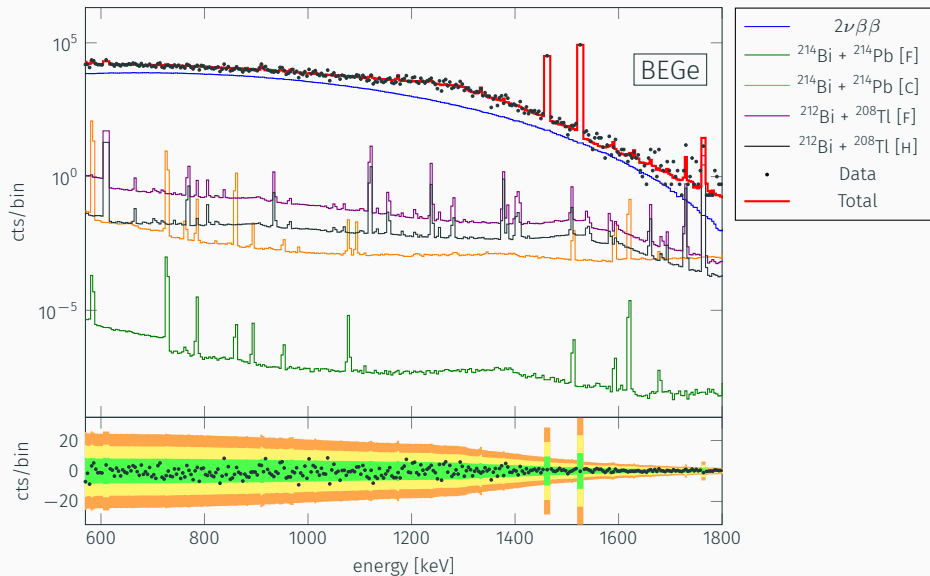
1. Modello con il solo $2\nu\beta\beta$ del Modello Standard
 - 1.1 Modello massimale con tutte le sorgenti di fondo in tutte le posizioni possibili
 - 1.2 Modello minimale con sorgenti ad attività non nulla
 - 1.3 Modello minimale con l'aggiunta delle *prior distributions*
- Stima della vita media $T_{1/2}^{2\nu}$ 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

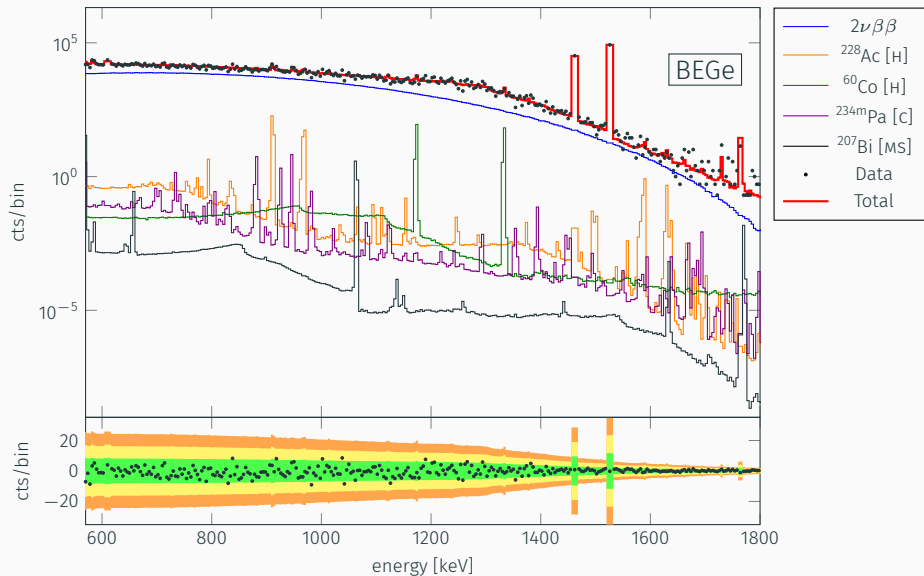
Risultati — modello di fondo

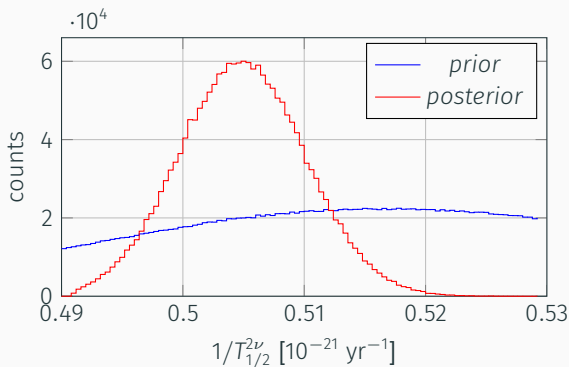


Risultati — modello di fondo



Risultati — modello di fondo



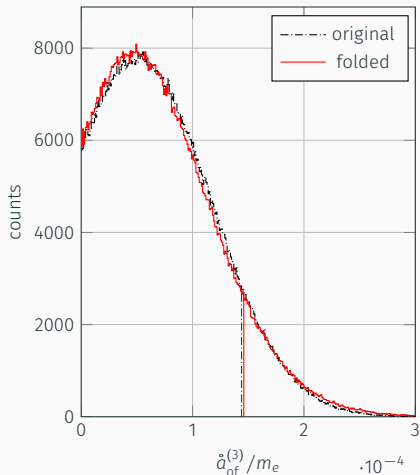


$$T_{1/2}^{2\nu} = (1.984^{+0.020}_{-0.020} \text{ stat } ^{+0.098}_{-0.075} \text{ sys}) \cdot 10^{21} \text{ yr}$$

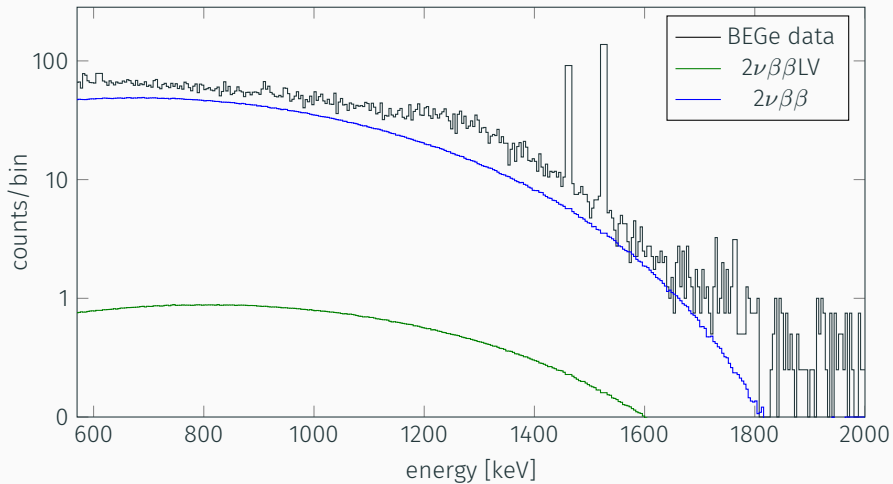
$$= (1.98^{+0.10}_{-0.08}) \cdot 10^{21} \text{ yr}$$

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

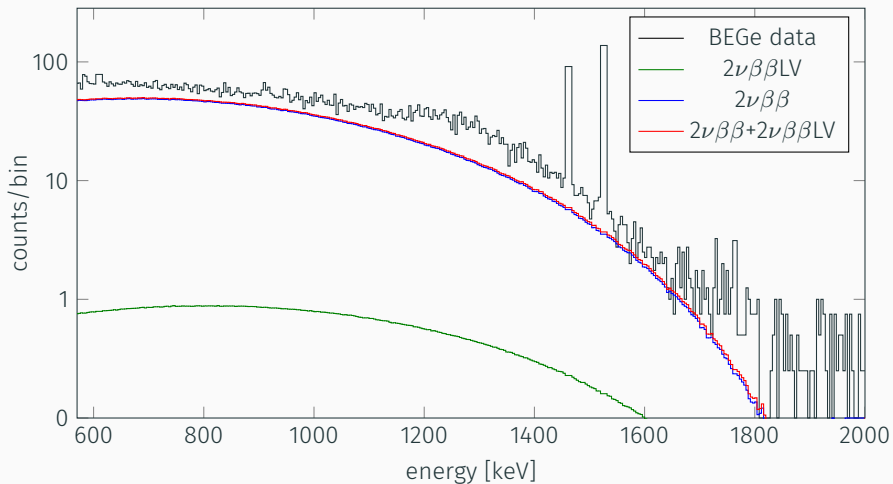
$$\dot{a}_{\text{of}}^{(3)} < 7.5 \cdot 10^{-8} \text{ GeV (90\% C.I.)}$$



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

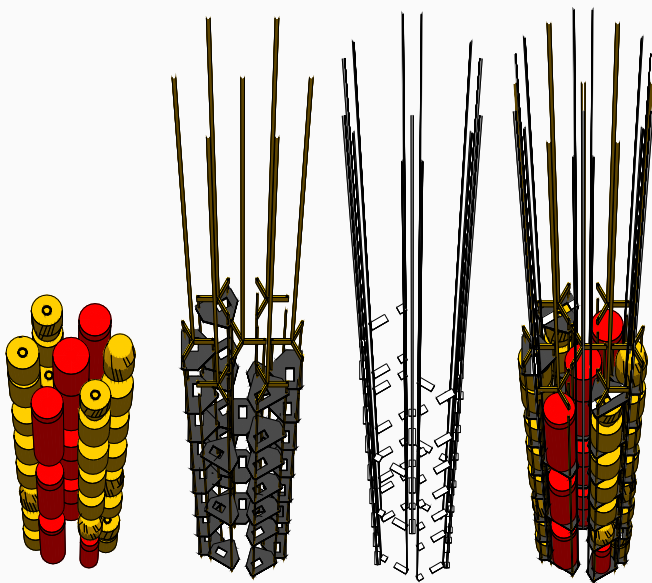
| Source | Line [keV] | bin size [keV] |
|-------------------|------------|----------------|
| ^{42}K | 1461 | 12 |
| ^{40}K | 1525 | 12 |
| ^{208}Tl | 2614 | 12 |
| ^{214}Bi | 609 | 12 |
| | 1764 | 8 |
| | 2204 | 8 |
| | 2247 | 12 |
| else | | 4 |

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:

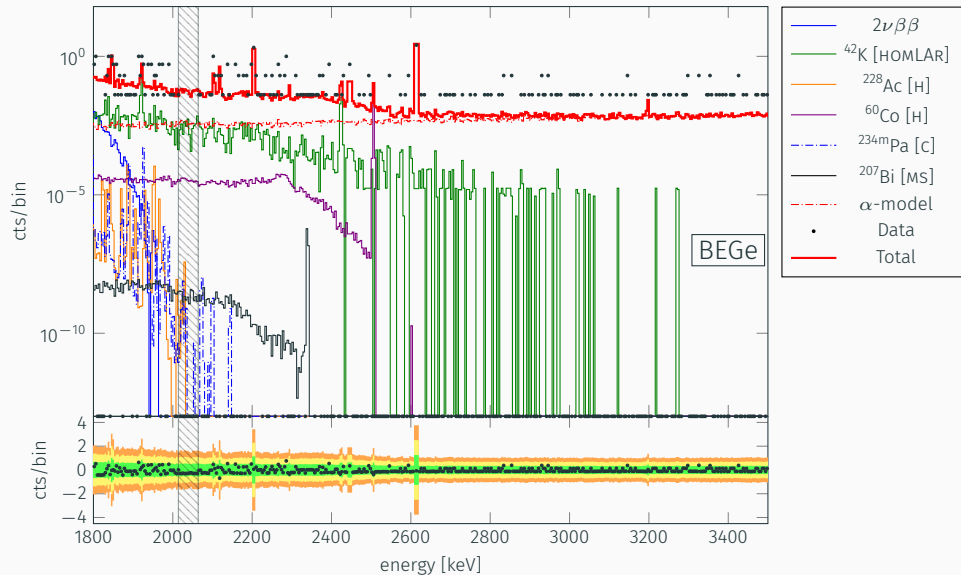
$$P(\vec{\lambda}, \vec{\nu} \mid \vec{D}, M) = \frac{P(\vec{x} = \vec{D} \mid \vec{\lambda}, \vec{\nu}, M) P_0(\vec{\lambda}, \vec{\nu} \mid M)}{\int P(\vec{x} = \vec{D} \mid \vec{\lambda}, \vec{\nu}, M) P_0(\vec{\lambda}, \vec{\nu} \mid M)}$$

Marginalized posterior:

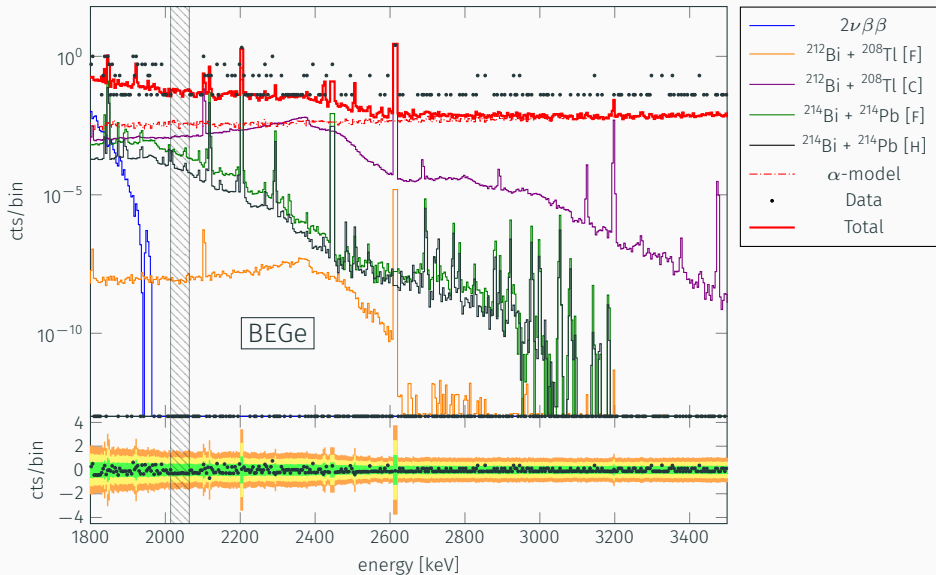
$$P(\lambda_i \mid \vec{D}, M) = \int P(\vec{\lambda}, \vec{\nu} \mid \vec{D}, M) d\vec{\lambda}_{i \neq j} d\vec{\nu}$$

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

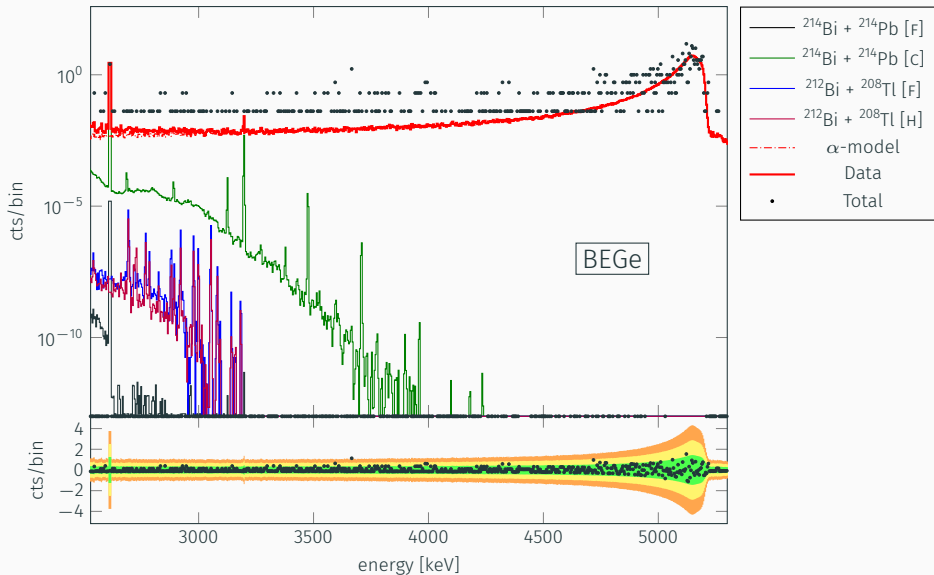
Risultati — modello di fondo



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 |