

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Fisica

Tesi di Laurea

Stabilità nel tempo della risoluzione energetica e
discriminazione della forma dell’impulso nei rivelatori al
germanio dell’esperimento LEGEND-200

Relatore

Prof. Riccardo Brugnera

Correlatore

Dr.ssa Sofia Calgaro

Laureando

Emanuele Da Silva Costa

Anno Accademico 2021/2022

Indice

1	Introduzione	1
2	Il progetto LEGEND	2
3	Il rivelatore di LEGEND	3
4	Rilevazione e calibrazione	5
5	Risoluzione energetica nel tempo	8
6	Pulse Shape Discrimination	10
7	Conclusioni	13

Capitolo 1

Introduzione

LEGEND [1] [2] è un esperimento situato ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS) che ha come obiettivo la ricerca del raro processo nucleare conosciuto come *doppio decadimento beta senza emissione di neutrini* ($0\nu\beta\beta$). Nel $0\nu\beta\beta$ un nucleo atomico (A, Z) decade in un nucleo ($A, Z + 2$) emettendo due elettroni ($\beta\beta$) senza però emettere alcun neutrino come avviene invece nei *doppi decadimenti beta con emissione di due neutrini* ($2\nu\beta\beta$). I rispettivi diagrammi sono mostrati in figura 1.1. Il decadimento $0\nu\beta\beta$ viola la conservazione del numero leptonico e non è finora stato osservato, a differenza del processo $2\nu\beta\beta$. L'esistenza del decadimento è legato all'ipotesi che il neutrino coincida con l'antineutrino, la sua antiparticella (una particella che coincide con la sua antiparticella è chiamata *particella di Majorana*). La firma sperimentale del decadimento $0\nu\beta\beta$ è data dal fatto che la somma delle energie degli elettroni emessi coincide con il Q-valore della reazione, $Q_{\beta\beta}$. Al contrario, lo spettro energetico della somma delle energie dei due elettroni è continuo perché è un decadimento a più corpi; questa differenza tra gli spettri è mostrata nella figura 1.2. In particolare LEGEND ricerca il decadimento $0\nu\beta\beta$ del nucleo ^{76}Ge dove $Q_{\beta\beta} = 2039.061(7)$ keV.

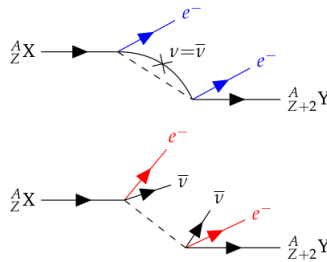


Figura 1.1: Diagrammi del decadimento $0\nu\beta\beta$ (in blu) e del decadimento $2\nu\beta\beta$ (in rosso).

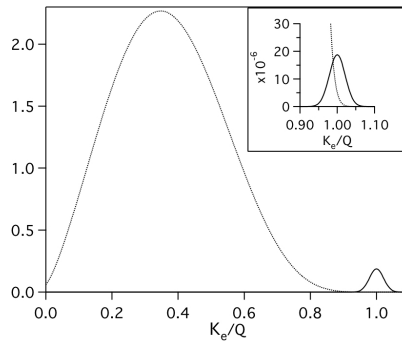


Figura 1.2: Spettro del decadimento $2\nu\beta\beta$ (curva tratteggiata) e spettro del decadimento $0\nu\beta\beta$ (curva continua). Nel decadimento $2\nu\beta\beta$ dovendo ripartire la propria energia coi neutrini la somma delle energie degli elettroni è, in generale, diversa dal Q-valore della reazione.

Capitolo 2

Il progetto LEGEND

L'esperimento LEGEND (Large Enriched Germanium Experiment for Neutronless double beta Decay) nasce con lo scopo di spingere la stima del limite dell'emivita del ^{76}Ge ben oltre i 10^{27} anni. LEGEND nasce dalla collaborazione dei precedenti esperimenti GERDA (GERmanium DETector Array) [3] e MAJORANA DEMONSTRATOR [4], prendendo in prestito elementi dell'uno e dell'altro. In particolare sono stati presi: dal primo il design a basso numero atomico Z (acqua ed Argon) e l'utilizzo dell'Argon come scintillatore al fine di produrre un segnale di veto contro gli eventi indesiderati (eventi di fondo o di background); dal secondo la tecnica di produzione di rame ultrapuro e una elettronica di front end a basso rumore.

LEGEND è pensato in due fasi:

- **LEGEND-200** è la prima fase che prevede l'utilizzo di 200 kg di Germanio. Utilizzerà le infrastrutture di GERDA per circa 5 anni in modo da raccogliere un'esposizione di 1 t·anno. Con LEGEND-200 si raggiungerà un limite sull'emivita del ^{76}Ge superiore ai 10^{27} anni (90% C.L.).
- **LEGEND-1000** è la seconda fase che prevede invece l'utilizzo di 1000 kg di germanio arricchito nell'isotopo ^{76}Ge . Prenderà dati per almeno 10 anni in modo da raccogliere un'esposizione di 10 t·anno. Con LEGEND-1000 si raggiungerà un limite sull'emivita del ^{76}Ge superiore ai 10^{28} anni (90% C.L.).

Capitolo 3

Il rivelatore di LEGEND

La struttura di LEGEND coincide con quella di GERDA quindi in generale ci si può riferire a quest'ultimo [5]. Lo scopo è quello di far operare rivelatori al germanio 'nudi' in un bagno di Argon liquido (LAr). La sfida sperimentale è quella di ridurre al minimo i segnali di fondo nella regione di interesse, ovvero in un intorno di $Q_{\beta\beta}$. I principali segnali di fondo presenti nel laboratorio sono: raggi cosmici (adroni e muoni) provenienti dall'atmosfera; neutroni e raggi gamma provenienti dal decadimento di rocce del Gran Sasso e altri materiali presenti nelle parti strutturali del rivelatore, incluso il liquido criogenico (isotopi ^{39}Ar e ^{42}Ar).

La struttura di GERDA è illustrata nella figura 3.1. I rivelatori al germanio sono posti all'interno di un criostato con volume nominale di 64 m^3 riempito di LAr, che serve sia da mezzo refrigerante che da schermo contro la radiazione gamma proveniente dalle pareti del criostato. Il criostato consiste in due contenitori coassiali in acciaio con un rivestimento in rame che fa da scudo contro la radiazione elettromagnetica proveniente dal recipiente in acciaio stesso. Il sistema che si occupa di raccogliere i fotoni emessi dalla scintillazione dell'argon liquido (LAr veto) è costituito da fotomoltiplicatori (PMTs) e fotomoltiplicatori al silicio (SiPMs) accoppiati con fibre WLS (wave-length shift) che hanno il compito di incrementare la luce raccolta nei rivelatori [6]. A sua volta il criostato si trova infine in un recipiente d'acqua purissima con una capacità nominale di 590 m^3 che funge sia da schermo per la radiazione proveniente dalle pareti del laboratorio (in particolare neutroni e raggi gamma) sia da mezzo Cherenkov per i muoni producendo un segnale di veto letto da fotomoltiplicatori.

I rivelatori sono composti da Ge arricchito fino all'86% con l'isotopo ^{76}Ge (in natura il germanio è costituito solo al 7.8% da questo isotopo). Il rivelatore è quindi allo stesso tempo generatore e rivelatore di segnale. LEGEND-200 userà rivelatori ICPC nuovi (fanno eccezione quelli già presenti

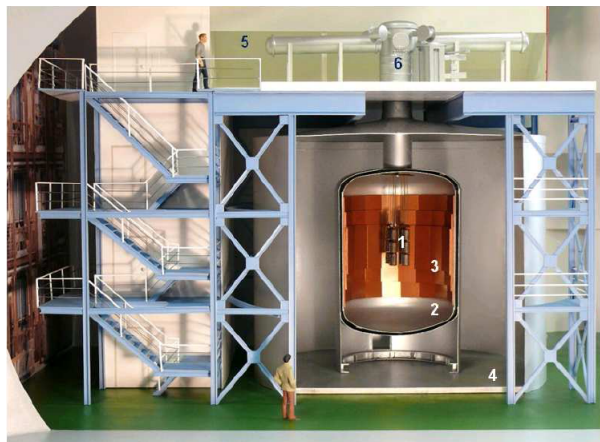


Figura 3.1: Schema di GERDA: le stringhe di rivelatori al germanio (1), il criostato LAr (2) con il suo rivestimento in rame (3) e il recipiente d'acqua (4) che funge da mezzo Cherenkov per il rilevamento di muoni, la camera pulita (5) e il lock (6). Vari impianti dell'esperimento che includono l'elettronica di acquisizione dei germani e degli altri rivelatori, l'impianto di purificazione dell'acqua si trovano dietro le scale.

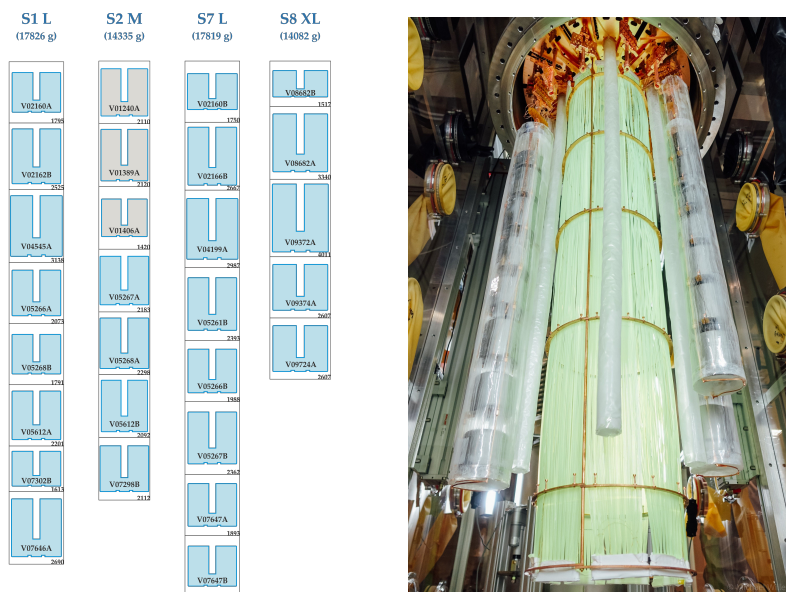


Figura 3.2: Configurazione di LEGEND-60: a sinistra uno schema rappresentante la disposizione delle 4 stringhe di rivelatori al germanio; a destra una foto dell'apparato su cui è possibile vedere le stringhe dei rivelatori ICPC, il sistema di veto interno (di cui si vedono le fibre WLS in verde) e i tubi usati per posizionare le sorgenti radioattive durante la calibrazione dei rivelatori.

in GERDA), BEGe e semicoassiali (da GERDA) e PPC (da MAJORANA DEMONSTRATOR). In questa tesi è stata analizzata la configurazione LEGEND-200 composta di soli rivelatori di tipo ICPC per un totale di 60 kg di germanio. Questa configurazione verrà chiamata di seguito LEGEND-60 ed è una disposizione transitoria della cosiddetta fase di 'commissioning' dell'apparato. Una foto della configurazione LEGEND-60 è mostrata in figura 3.2 insieme alla disposizione dei rivelatori, suddivisi in 4 stringhe. I più moderni design dei rivelatori ICPC (**I**nverted **C**oaxial **P**oint **C**ontact) hanno permesso di aumentare la massa di un singolo rivelatore fino a 2 – 3 kg. La possibilità di avere rivelatori di grande massa aiuta nella lotta all'abbattimento del fondo, poiché fa diminuire il numero di canali di lettura e cavi. Tutte questi sono sorgenti importanti di eventi di fondo. Altra caratteristica peculiare di questi rivelatori è data dalla possibilità di usare il fronte di salita per eliminare gli eventi di fondo (Pulse Shape Discrimination, si veda il capitolo 6). Altra eccellente proprietà è quella di avere una eccellente risoluzione energetica. La risoluzione energetica (FWHM) misurata durante la caratterizzazione di questi rivelatori è di 2.19 keV ottenuta con una media pesata sulla massa di vari rivelatori, come illustrato nella figura 3.3.

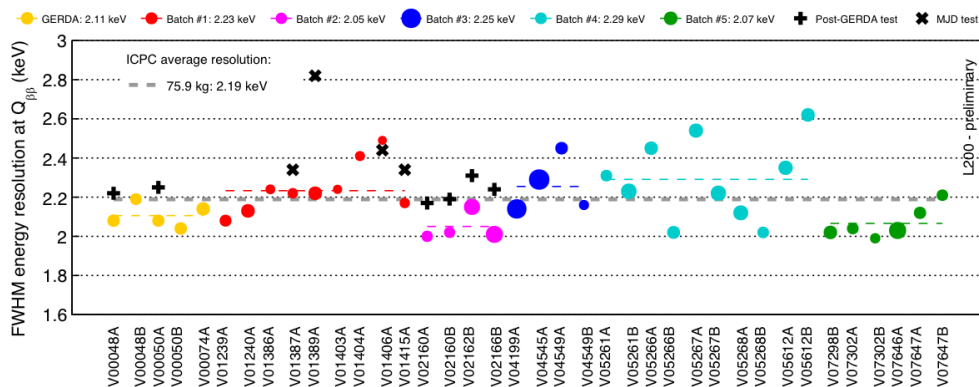


Figura 3.3: Risoluzione energetica dei diversi rivelatori ICPC che verranno usati in LEGEND-200 espressa in FWHM (che corrisponde a $2.35 \cdot \sigma$ per una densità di probabilità gaussiana). Queste misure sono state fatte durante la campagna di caratterizzazione.

Capitolo 4

Rilevazione e calibrazione

La calibrazione dei rivelatori di LEGEND-200 viene fatta regolarmente ogni settimana e dura alcune ore. Le prese dati di LEGEND sono divise in run, di seguito tabulati i run di calibrazione trattati in questa tesi con relativa data di inizio e fine.

run	Data inizio	Data fine
26	2022/09/09 19:02:52	2022/09/10 01:32:39
27	2022/09/16 12:02:15	2022/09/16 18:35:21
28	2022/09/23 16:54:18	2022/09/23 22:57:28

Scopo della calibrazione è di monitorare con continuità la scala delle energie, la risoluzione energetica e i parametri utili per la Pulse Shape Discrimination (capitolo 6). La sorgente viene posta in 3 differenti posizioni verticali in modo fornire a ciascun rivelatore un numero sufficiente di dati. Le posizioni vengono misurate dal *Source Insertion System* (SIS) presente in cima al criostato (Figura 4.1) e sono 8200, 8500 e 8799 mm. La sorgente di calibrazione è di ^{228}Th che decade in ^{208}Pb attraverso una catena di decadimenti α e β^- . I vari nuclei eccitati prodotti in questo decadimento forniscono uno spettro di raggi gamma che spazia dai 100 keV ai 2.6 MeV. Per i run 25, 26 e 27 sono stati usate 13 sorgenti di diversa attività. L'attività di ogni singola sorgente è stata stimata separatamente in data 9 Febbraio 2021. Usando la legge esponenziale dei decadimenti si ricava facilmente che l'attività A di un radionuclide deve soddisfare la legge temporale

$$A(t) = A(t_0) \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau}\right)$$

dove τ è la costante di decadimento legata all'emivita $T_{1/2}$ dalla relazione $T_{1/2} = \tau \ln 2$. Conoscendo la emivita del ^{228}Th ($T_{1/2} = 1.9126 \pm 0.0009$ anni [7]) è possibile stimare l'attività all'inizio della presa dati. Di seguito tabulate le attività delle sorgenti usate

ID	A [Bq]	ID	A [Bq]
1	1648 ± 75	11	1180 ± 47
2	974 ± 41	12	3432 ± 94
3	1468 ± 50	13	3139 ± 91
5	2636 ± 82	14	3113 ± 90
7	3402 ± 94	16	2437 ± 80
8	4190 ± 99	17	189 ± 19
9	1679 ± 77		

Poiché i tre run di calibrazione hanno occupato una finestra temporale inferiore ai 15 giorni l'attività di ogni singola sorgente durante la presa dati ha avuto una riduzione inferiore all'1.5%.

Tra i vari picchi dello spettro quello a energia maggiore è denominato¹ *Full Energy Peak* (FEP) che

¹In generale quando si parla di full energy peak è necessario specificare il nucleo che stiamo considerando: qui sottointendiamo che si tratti sempre del ^{208}Tl . Lo stesso si applica al single escape peak e double escape peak.

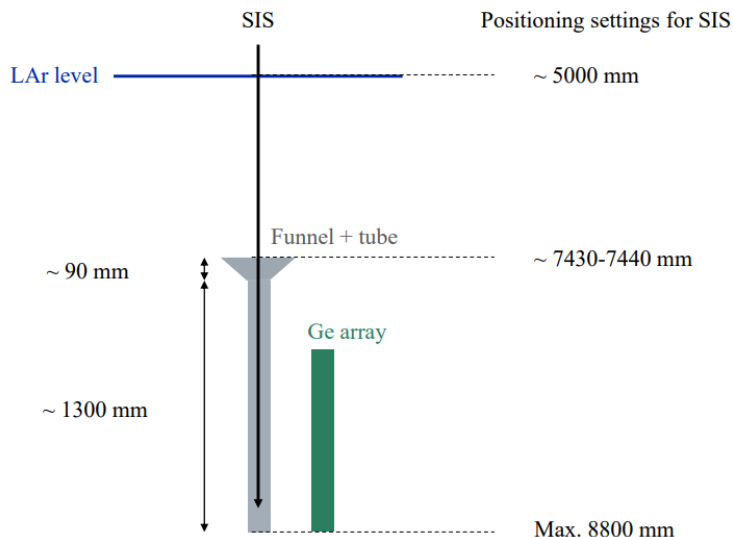


Figura 4.1: Schema del Source Insertion System

corrisponde a un decadimento γ del ^{208}Tl a energia $E_{FEP} = 2614.5$ keV dove il fotone incidente rilascia tutta la sua energia nel rivelatore. L'energia del fotone emesso in questo decadimento è sufficiente affinché nel rivelatore avvenga produzione di coppie, il positrone così generato si annichila con un elettrone nel mezzo generando due fotoni che se sfuggono al rivelatore generano un picco denominato *Double Escape Peak* (DEP) di energia $E_{DEP} = E_{FEP} - 2m_e = 1592.5$ keV (dove m_e è la massa dell'elettrone qui espressa in keV). I DEP corrispondono a eventi in cui l'energia trasmessa al rivelatore è data unicamente dall'energia cinetica della coppia elettrone-positrone venutasi a creare e poiché elettrone e positrone perdono tutta la loro energia in pochi millimetri di rivelatore questi eventi sono chiamati *single site events*. Eventi in cui solo uno dei fotoni sfugge al rivelatore generano invece un picco denominato *Single Escape Peak* (SEP) di energia $E_{SEP} = E_{FEP} - m_e = 2103.5$ keV. [8] In figura 4.2 si vede lo spettro (calibrato) raccolto da un rivelatore di LEGEND-60 e la relativa posizione di questi 3 picchi.

Le procedure di calibrazione energetica dei dati hanno seguito i seguenti passi. Il segnale visto dai rivelatori è raccolto in carica e successivamente digitalizzato. Vengono poi applicati diversi filtri per ricavare una stima dell'energia del segnale. In questa tesi sono state usate le stime E_{cusp} calcolate attraverso un *cusp filter* ovvero una convoluzione del segnale con una funzione a tratti che presenta una curva esponenziale crescente seguita da una simmetrica curva esponenziale decrescente (Per il cusp filter non è necessario effettuare una correzione di pole-zero). Il fondo è stato modellato con una funzione lineare mentre la posizione dei picchi è stata stimata tramite interpolazione con una funzione gaussiana dove :

$$f_{gauss}(x) = \frac{n}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$$

dove μ , σ e n sono rispettivamente posizione, larghezza e integrale del picco. Si è eseguita una correzione di *charge trapping*, ovvero una correzione che tiene conto delle impurità del rivelatore che causano una non perfetta raccolta di carica in eventi di interesse riflettendosi in una attenuazione del segnale. Questa correzione consiste nel calcolare $E_{ctc} = E_{cusp}(1 + \alpha \cdot dt)$ dove dt è una correzione di drift time ed α è un parametro calcolato da una interpolazione delle energie $E(\alpha)$ attorno al FEP al fine di minimizzare il rapporto σ/μ . Per calibrare la scala delle energie sono stati identificati 7 picchi dello spettro del ^{228}Th di energia (in keV) 583.191, 727.330, 860.564, 1592.53 (DEP), 1620.50, 2103.53 (SEP), 2614.50 (FEP). Per descrivere il fondo dei picchi elencati sopra si è usata una funzione a step per descrivere i vari Compton scattering

$$f_{step}(x) = \frac{d}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x-\mu}{\sqrt{2}\sigma}\right)$$

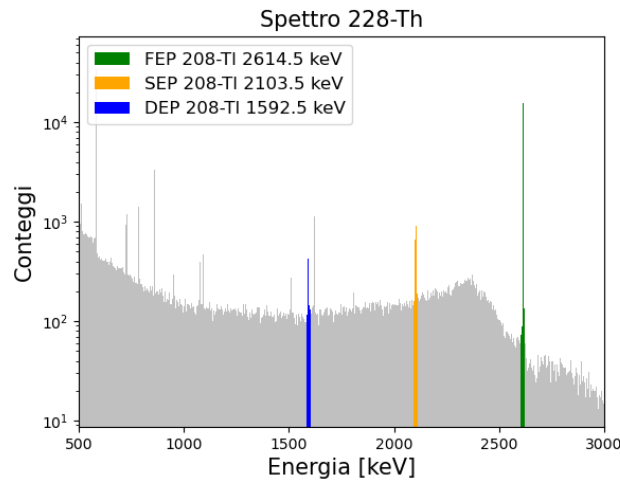


Figura 4.2: Spettro del ²²⁸Th dove sono stati evidenziati i picchi legati al decadimento γ del ²⁰⁸Tl.

dove d è l'altezza dello step e erfc è la funzione degli errori complementare definita come

$$\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt$$

Si è inoltre usato un'ulteriore funzione che tiene conto dell'asimmetria nelle code dei picchi dovuto a imperfezioni nella collezione di carica dei rivelatori

$$f_{tail}(x) = \frac{c}{2\beta} \exp\left(\frac{x - \mu}{\beta} + \frac{\sigma^2}{2\beta^2}\right) \text{erfc}\left(\frac{x - \mu}{\sqrt{2}\sigma} + \frac{\sigma}{\sqrt{2}\beta}\right)$$

Infine sono state interpolate le energie conosciute dei picchi con le rispettive posizioni tramite una funzione lineare $E = a \cdot E_{ctc} + b$ ottenendo un'energia calibrata in keV. L'illustrazione dei vari contributi è mostrato nel capitolo successivo.

Per la discriminazione degli eventi di segnale da quelli di fondo (si veda il capitolo 6) è necessario stimare il parametro A/E dove A è la corrente massima ed E è l'energia depositata nel rivelatore. Per misurare il massimo della corrente A è stato preso il massimo della derivata del segnale, a cui è stato prima applicata una correzione di pole-zero, ovvero una correzione che tiene conto della componente RC dell'elettronica. Per prima cosa vengono calcolati i parametri $(A/E)_{raw} = A/E_{cal}$ dove E_{cal} sono i valori E_{cusp} normalizzati tramite la FEP. Vengono poi interpolate le distribuzioni A/E nella parte di spettro relativa al fondo Compton. I centroidi di queste distribuzioni in funzione dell'energia E vengono interpolati con le funzioni $\mu_0 \cdot E + \mu_1$ e $\sqrt{\sigma_0 + \frac{\sigma_1}{E^2}}$. Tramite i parametri μ_0, μ_1, σ_0 e σ_1 vengono poi effettuate due correzioni

$$(A/E)_c = \frac{(A/E)_{raw}}{\mu_0 \cdot E + \mu_1} - 1$$

$$A/E = \frac{1}{\mu_0 \cdot E + \mu_1} \frac{(A/E)_c}{\sqrt{\sigma_0 + \frac{\sigma_1}{E^2}}}$$

La prima correzione serve a normalizzare il centroide ad 1 e poi spostarlo a 0. La seconda correzione serve a rimuovere le possibili dipendenze di A/E dall'energia. Nonostante ci sia una correlazione tra A e il drift time non è stata eseguita nessuna correzione riguardante quest'ultimo.

Capitolo 5

Risoluzione energetica nel tempo

Per stimare la risoluzione energetica dei rivelatori è stata analizzata la FWHM del FEP per poi valutarne il comportamento nel tempo (ovvero per i tre diversi run). In questa tesi l'analisi è stata ristretta alla posizione verticale 8500 mm per i rivelatori nella stringa 8 di LEGEND-60 riassunti nella seguente tabella (lo stesso vale per le analisi nel capitolo successivo).

Rivelatore	Canale(ch)	Massa[kg]
V08682B	002	1.535
V08682A	003	3.389
V09374A	005	2.648
V09724A	006	2.643
V09372A	008	4.096

I dati attorno al FEP sono stati interpolati con i tre contributi esposti nel capitolo precedente con l'aggiunta di un parametro di offset, ovvero una costante additiva per tener conto dei conteggi del fondo. Per l'interpolazione è stata presa una finestra simmetrica rispetto al picco larga 30 keV (Figura 5.1). L'interpolazione è stata fatta per ogni detector e per ogni run.

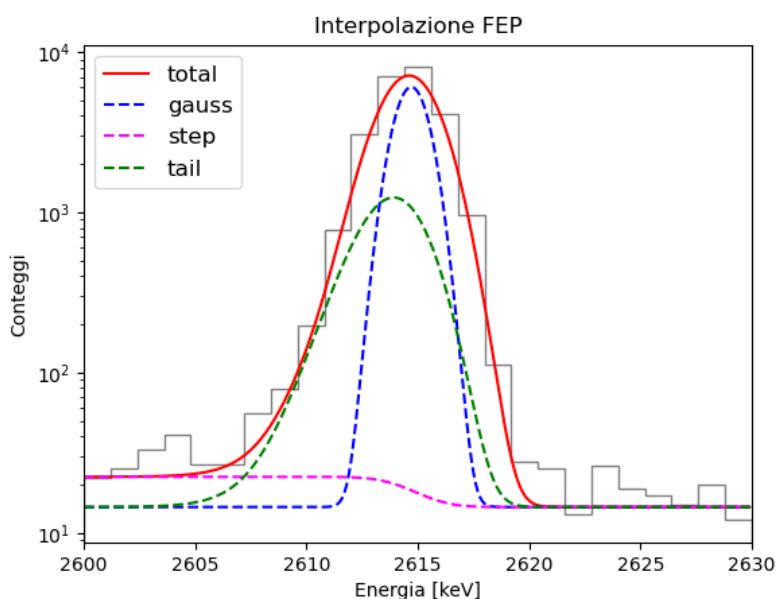


Figura 5.1: Grafico della interpolazione della FEP con l'aggiunta dei tre contributi mostrati separatamente. Tutti e tre i contributi sono stati disegnati con l'aggiunta del parametro di offset.

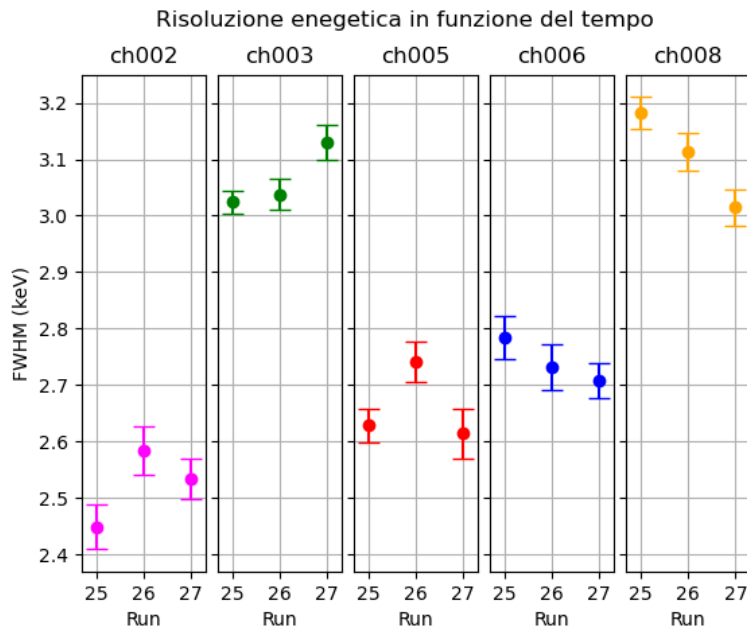


Figura 5.2: Grafico riassuntivo delle FWHM ottenute dalle interpolazioni della FEP per i diversi detector e run.

La risoluzione è stata poi calcolata tramite la nota relazione

$$FWHM = \sqrt{8 \ln(2)} \sigma \approx 2.355 \sigma$$

I risultati sono stati riassunti nella figura 5.2. I canali 2, 5, 6 mostrano risoluzioni energetiche vicine a quella di progetto (2.5 keV). Invece i canali 3 e 8 mostrano risoluzioni nettamente peggiori (3-3.2 keV). Questo peggioramento della risoluzione energetica rispetto a quella di progetto deriva da rumore raccolto dall'elettronica. Attualmente si sta lavorando per ridurre l'entità.

Infine in figura 5.3 è stata sondata una eventuale correlazione tra la posizione del rivelatore e la risoluzione energetica (si veda schema della stringa 8 in figura 3.2) non rilevando nessuna dipendenza.

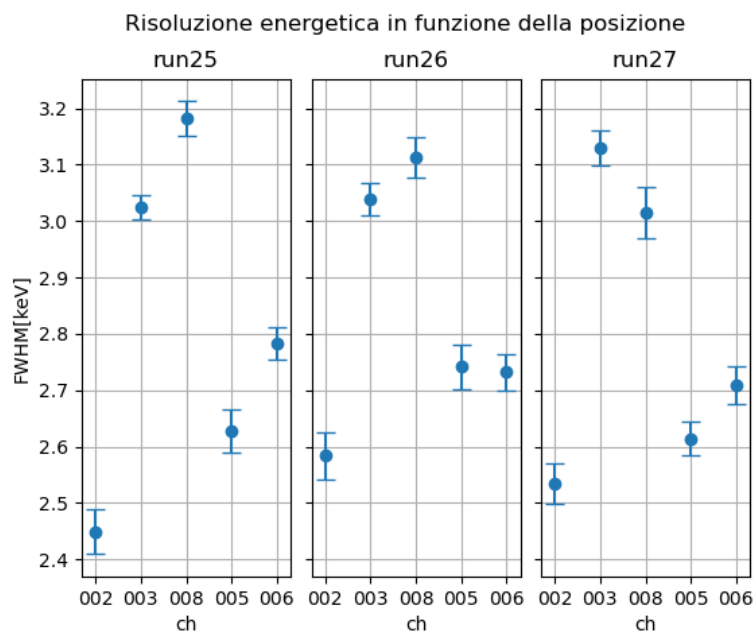


Figura 5.3: Risoluzione energetica in funzione dei rivelatori disposti in ordine di posizione

Capitolo 6

Pulse Shape Discrimination

La caratteristica principale dei rivelatori ICPC è che il rapporto A/E è costante per eventi in cui l'energia è depositata tutta in pochi millimetri del singolo rivelatore, questi eventi sono denominati *single-site events* (SSE). Eventi dove l'energia è depositata in più siti del rivelatore sono invece denominati *multi-site events* (MSE), nei rivelatori ICPC per questo tipo di eventi si ha che il rapporto A/E è ridotto rispetto a quello dei SSE. Nei doppi decadimenti β i due elettroni emessi perdono energia in un sito ben preciso del rivelatore al contrario della maggior parte del fondo gamma dove l'interazione col rivelatore avviene attraverso Compton scattering multipli in zone diverse del rivelatore. Questa differenza nel segnale tra SSE e MSE costituisce quindi un metodo per la reiezione di segnali denominato *pulse shape discrimination* (PSD) [9].

Come precedentemente discusso gli eventi che caratterizzano il DEP sono di tipo SSE. Si ha quindi che la distribuzione in A/E sarà formata per lo più da SSE che si distribuiscono secondo una normale attorno a 0 (per come sono stati normalizzati i parametri, vedi capitolo 4) più alcuni MSE che si distribuiscono a sinistra della normale. Poiché si vuole valutare la distribuzione A/E senza tener conto dei contributi di fondo si è separato lo spettro in una banda di segnale costituita da una finestra larga 10 keV attorno al picco e una banda di fondo costituita da due finestre larghe la metà alle due estremità della banda di segnale (di modo che le due bande siano larghe uguale prendendo idealmente lo stesso contributo di fondo). Sono poi state prese le due diverse distribuzioni A/E corrispondenti alle due diverse bande (Figura 6.1). La distribuzione finale è stata calcolata come la differenza tra la distribuzione per la banda di segnale e la distribuzione per la banda di fondo. Poiché i dati presentavano una bassa statistica, per alcuni intervalli della distribuzione i conteggi relativi alla banda di fondo superavano quella relativa alla banda di segnale; il problema è stato aggirato rendendo nulli eventuali conteggi negativi nella distribuzione finale. Infine è stata calcolato il parametro A/E *cut* tale per cui l'integrale della distribuzione a destra costituisse il 90% della distribuzione totale (Figura

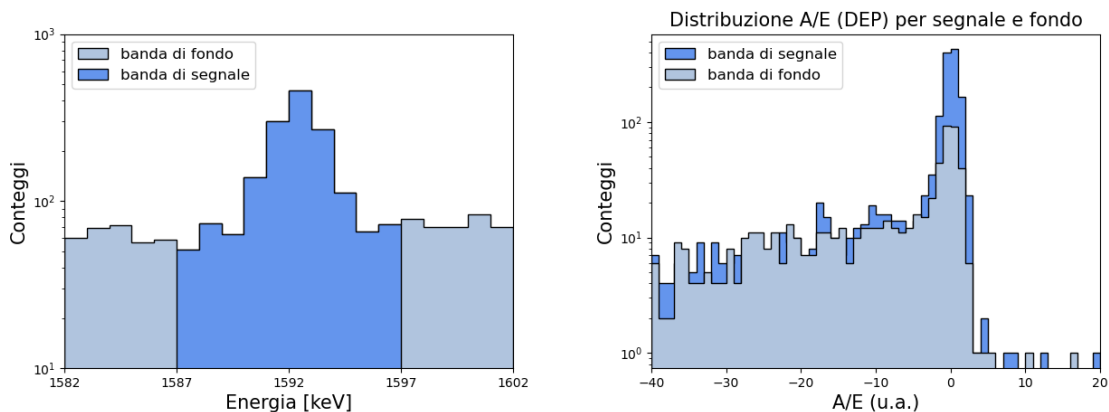


Figura 6.1: A sinistra la divisione dello spettro in banda di segnale e banda di spettro, a destra le rispettive distribuzioni delle due bande messe in scala logaritmica per evidenziare i vari contributi.

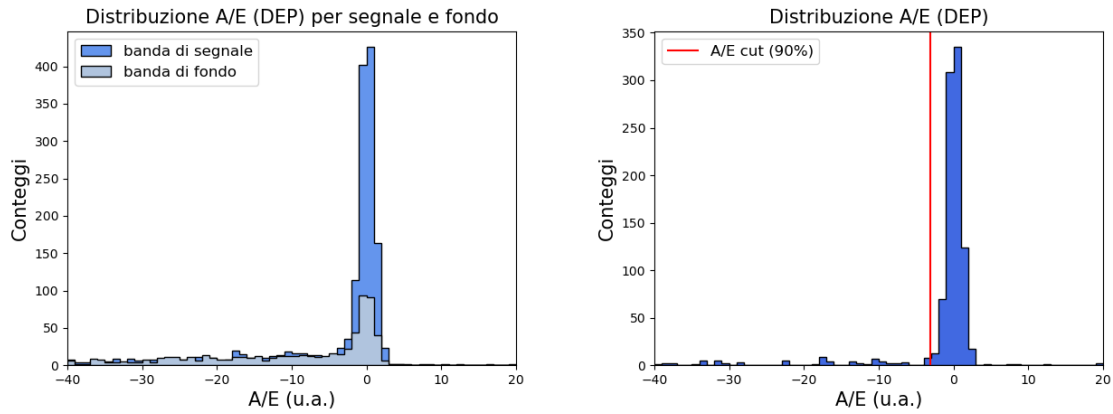


Figura 6.2: A sinistra si vedono le distribuzioni A/E per banda di segnale e di fondo, a destra la sottrazione della prima con la seconda con il taglio A/E cut che lascia a destra il 90% dell'integrale totale dell'istogramma

6.2). Questo taglio della distribuzione è introdotto per separare i SSE dai MSE e poter poi applicare un taglio alle distribuzioni A/E di altri picchi.

In questa tesi sono stati analizzate le distribuzioni in A/E dei SEP e FEP: come per il DEP è stata presa una banda di segnale attorno al picco (larga 10 keV) e una di fondo, sono poi state prese le due

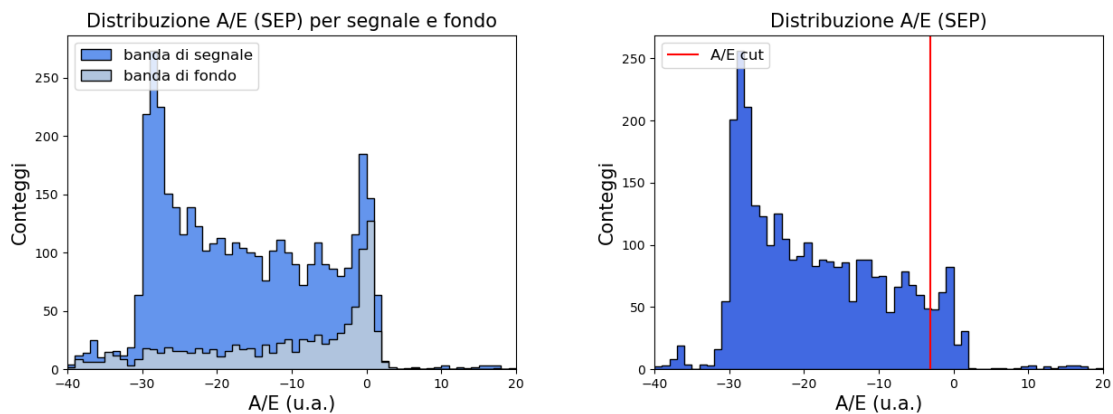


Figura 6.3: Distribuzioni A/E per la single escape peak dove viene fatta una sottrazione della distribuzione in banda di segnale da quella di fondo. La distribuzione finale viene poi tagliata con il parametro A/E cut per calcolare la Survival Fraction.

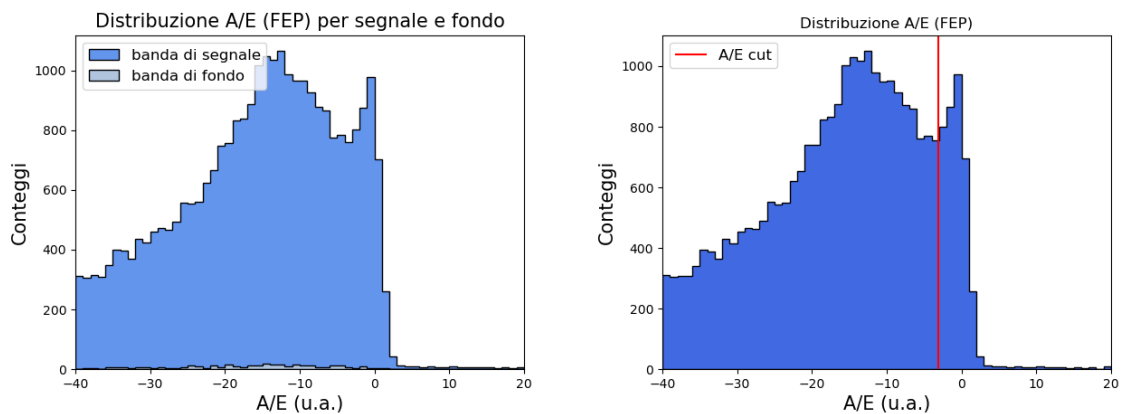


Figura 6.4: Distribuzioni A/E per la full escape peak dove viene fatta una sottrazione della distribuzione in banda di segnale da quella di fondo. La distribuzione finale viene poi tagliata con il parametro A/E cut per calcolare la Survival Fraction.

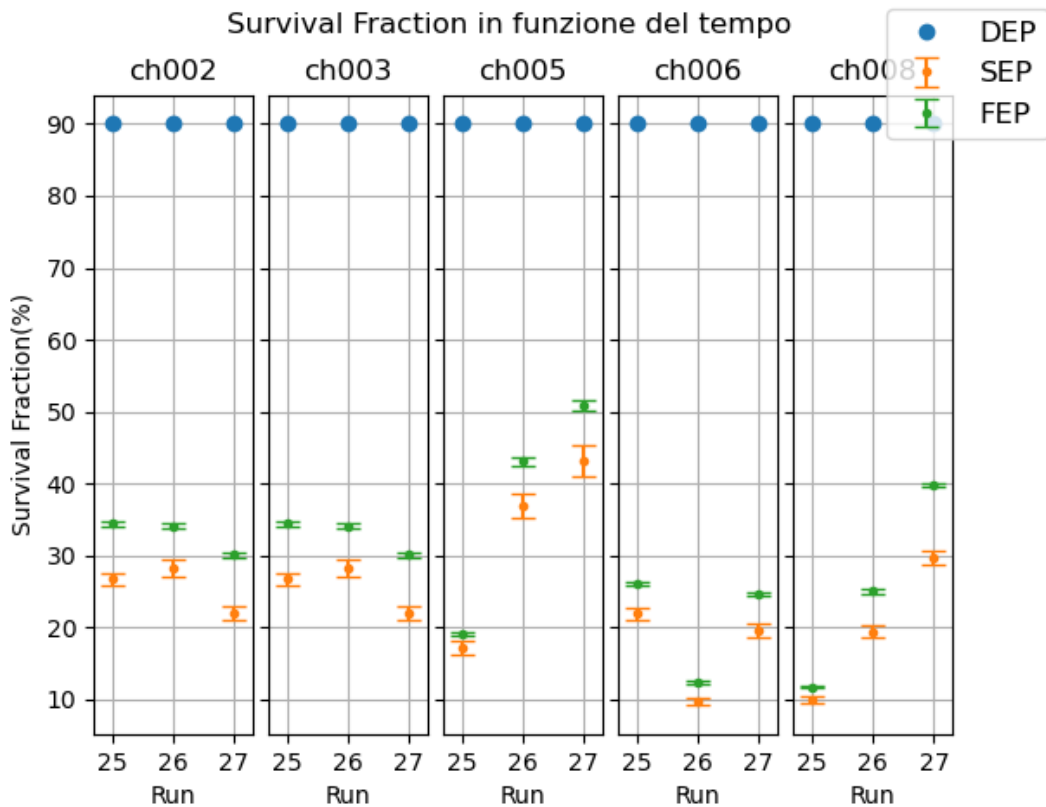


Figura 6.5: Le diverse Survival Fraction divise per rivelatore sono state sintetizzate in questo grafico dove la Survival Fraction del DEP è per definizione 90% per come è stato definito il parametro A/E cut.

distribuzioni ed è stata fatta una sottrazione tra quella relativa alla banda di segnale e quella relativa alla banda di fondo. Infine è stato applicato un taglio con il parametro A/E cut ed è stata calcolata la *Survival Fraction* definita come il rapporto tra l'integrale della distribuzione a destra del taglio e l'integrale totale (Figure 6.3 e 6.4). Si può vedere come nelle distribuzioni A/E per il SEP e il FEP si notano due picchi che corrispondono ai due diversi contributi per SSE e MSE.

Questa analisi è stata ripetuta per ogni rivelatore e per ogni run: il taglio è stato eseguito con il parametro calcolato dalla analisi del DEP per il corrispettivo detector e la corrispettiva run. Le diverse Survival Fraction per SEP e FEP in funzione del tempo (run) sono state sintetizzate nella figura 6.5. Per i rivelatori nei canali ch005 e ch008 c'è un ben definito peggioramento nella reiezione dei MSE con l'avanzare del tempo mentre gli altri tre rivelatori presentano un andamento stabile.

Capitolo 7

Conclusioni

La ricerca del doppio decadimento beta senza emissione di neutrini costituisce uno degli argomenti di ricerca più interessanti nel campo della fisica del neutrino. Uno dei progetti più avanzati è l'esperimento LEGEND che usa come isotopo attivo il ^{76}Ge . Essendo il processo molto raro, l'eliminazione degli eventi di fondo costituisce un punto centrale in questa attività sperimentale. La risoluzione energetica dei rivelatori e un efficiente metodo di reiezione di segnale di fondo sono dunque elementi cruciali al fine di aumentare la sensibilità nella ricerca del decadimento $0\nu\beta\beta$. In questa tesi sono state analizzate la risoluzione dei più moderni rivelatori al germanio di tipo ICPC e il loro impiego per la PSD attraverso i dati di calibrazione con sorgente di ^{228}Th . La PSD discrimina SSE e MSE, permettendo di distinguere un eventuale segnale del decadimento $0\nu\beta\beta$ dal restante fondo gamma nella regione di spettro attorno a $Q_{\beta\beta}$.

La risoluzione energetica è stata stimata attraverso la larghezza dei picchi del FEP. La risoluzione energetica di tre su cinque rivelatori analizzati (2.4-2.8 keV) è vicina a quella di progetto (2.1 keV) e compatibili con le risoluzioni dei rivelatori ICPC usati nelle stesse condizioni in GERDA. Fanno eccezione i due rivelatori più massivi, soggetti ancora ad un eccessivo rumore di elettronica. Il numero di calibrazioni e tempi di esposizione considerati rimane tuttavia insufficiente per una significativa stima della stabilità del tempo.

La PSD viene invece fatta considerando le distribuzioni A/E di eventi in una finestra di segnale. Il DEP costituisce il campione utile alla reiezione dei MSE, in quanto gli eventi relativi a quel picco sono SSE. La PSD è stata messa alla prova tramite le distribuzioni in A/E dei SEP e FEP fornendo dei validi risultati di reiezione dei MSE nonostante i tre run di calibrazione presentino un bassa statistica per le distribuzioni A/E relativa al DEP. Sono necessarie ulteriori analisi che tengano conto della correlazione tra il rapporto A/E e il drift time.

Bibliografia

- [1] N. Abgrall *et al.* (LEGEND Collaboration). Letter of intent for LEGEND-200 using the GERDA infrastructure.
- [2] N. Abgrall *et al.* (LEGEND Collaboration). Proposal LNGS-P 58/18. 2018.
- [3] M. Agostini *et al.* (GERDA Collaboration). Final Results of GERDA on the Search for Neutrinoless Double- β Decay. *Phys. Rev. Lett.*, 125(252502), 2020.
- [4] S. I. Alvis *et al.* (MAJORANA Collaboration). Search for neutrinoless double- β decay in ^{76}Ge with 26 kg yr of exposure from the MAJORANA DEMONSTRATOR. *Phys. Rev. C*, 100(025501), 2019.
- [5] K.-H. Ackermann *et al.* (GERDA Collaboration). The GERDA experiment for the search of $0\nu\beta\beta$ decay in ^{76}Ge . *Eur. Phys. J. C.*, 73(2330), 2013.
- [6] M. Agostini *et al.* (GERDA Collaboration). Upgrade for Phase II of the GERDA experiment. *Eur. Phys. J. C.*, 78(338), 2018.
- [7] Laboratoire National Henri Becquerel - Recommended Data. http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm.
- [8] Glenn F. Knoll. *Radiation Detection and Measurement*. John Wiley & Sons, Inc., New York, Third edition, 1999.
- [9] M. Agostini *et al.* (GERDA Collaboration). Characterization of inverted coaxial ^{76}Ge detectors in GERDA for future double- β decay experiments. *Eur. Phys. J. C.*, 81(505), 2021.