



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Facoltà di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali

Corso di Laurea in Fisica

Dissertazione di Laurea Triennale

**Caratterizzazione di uno
strumento per misure di
radioattività naturale in
ambiente sottomarino**

Candidata

Priscilla Pani

Relatore

prof. Antonio Capone

Matricola

1127491

Corelatore

dott. Francesco Simeone

Anno Accademico 2007/2008

Capitolo 1

Introduzione e descrizione degli strumenti

1.1 Gli obiettivi di GEMS

GEMS (*Gamma Energy Marine Spectrometer*) è un prototipo di rivelatore per il monitoraggio della radioattività naturale progettato e costruito dall'INP (research Institute for Nuclear Problems, Belarus State University) per l'Istituto Nazionale di Geologia e Vulcanologia (INGV) [6]. Tale strumento sarà presto utilizzato per la caratterizzazione delle proprietà di siti sottomarini scelti per la rivelazione di neutrini astrofisici (progetto *KM3NeT*) [2, 5]. Le sorgenti di radioattività naturale, di cui il ^{40}K è la più abbondante, sono infatti, assieme ai fenomeni di luminescenza prodotta da entità biologiche (bioluminescenza), la principale fonte di rumore ottico nei rivelatori Cherenkov sottomarini. Il ^{40}K , ad esempio, emette attraverso il primo dei canali di decadimento (equazione (1.1)), un gran numero di elettroni sopra-soglia per

la produzione di luce Cherenkov.



La stima di tale rumore ottico, dovuto al ${}^{40}\text{K}$, viene effettuata a partire dalla salinità complessiva dell'acqua [10, 12]. Tale stima non tiene conto di possibili variazioni legate, ad esempio all'apporto di ${}^{40}\text{K}$ attraverso i sedimenti oppure alla presenza di altre sorgenti di radioattività. *GEMS* è basato su uno scintillatore di NaI(Tl) e si prefigge di quantificare sperimentalmente, e monitorare, l'attività dei vari nuclei radioattivi (in particolare del ${}^{40}\text{K}$) nei siti di rivelazione del progetto *KM3NeT*.

1.2 Finalità del lavoro

Allo scopo di rendere possibile l'attività del rivelatore, è stato necessario un lavoro di caratterizzazione e calibrazione dello stesso, ricavando, attraverso l'analisi della risposta di *GEMS* ad opportune sorgenti di riferimento (tabella 1.1), una funzione di conversione della risposta numerica in energia (MeV), e studiando l'andamento della risoluzione energetica in funzione dell'energia stessa.

Sorgente	γ_1 [MeV]	γ_2 [MeV]	Tipo di decadimento	Prodotto di decadimento
$^{133}_{56}\text{Ba}$	0.302853	0.356017	EC	$^{133}_{55}\text{Cs}$
$^{137}_{55}\text{Cs}$	0.6616537	-	β^-	$^{137}_{56}\text{Ba}$
$^{22}_{11}\text{Na}$	1.274532	($m_e = 0.510999$)	β^+	$^{22}_{10}\text{Ne}$
$^{60}_{27}\text{Co}$	1.173237	1.332501	β^-	$^{60}_{28}\text{Ni}$
$^{40}_{19}\text{K}$	1.460830	-	EC	$^{40}_{18}\text{Ar}$

Tabella 1.1: Sorgenti di riferimento per la calibrazione [1, 4]. EC indica la cattura elettronica

1.3 Descrizione degli strumenti

La caratterizzazione di *GEMS* è stata effettuata mediante lo studio della risposta dello strumento in presenza di sorgenti radioattive di riferimento per la calibrazione.

1.3.1 Apparato sperimentale

L'apparato sperimentale del quale ci si è serviti per le misure necessarie alla caratterizzazione è composto dalla seguente strumentazione

- rivelatore *GEMS* da caratterizzare [7].
- software di interfaccia (*RUBY*), al rivelatore [8].
- 5 sorgenti radioattive; di queste il KCl (Cloruro di Potassio) è previsto dal costruttore dello strumento per un processo di autocalibrazione.

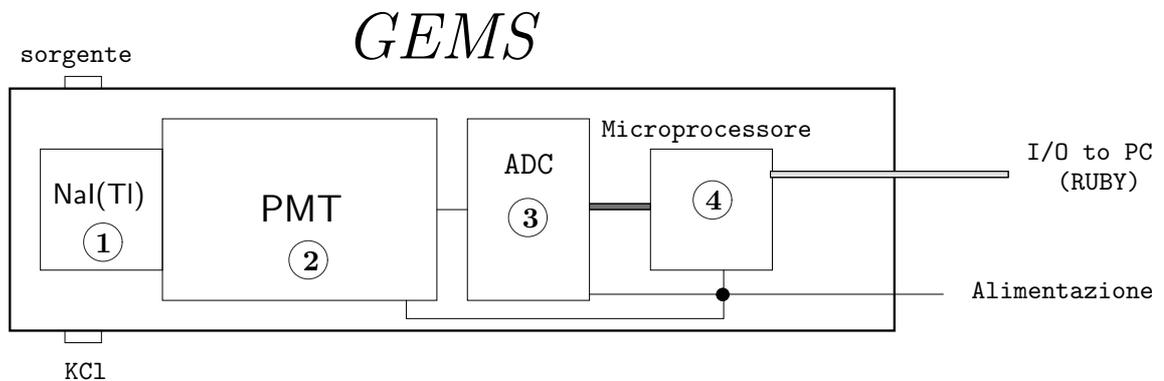


Figura 1.1: Schema del rivelatore *GEMS*

Lo strumento

Il rivelatore *GEMS* (figura 1.1) è composto di uno scintillatore NaI(Tl) (1) di dimensioni 15x10 cm assemblato ad un fotomoltiplicatore (PMT) (2). Il PMT è connesso ad un microprocessore (4) che provvede alla conversione in canali di ADC (3) del segnale analogico e ad un'analisi preliminare dei conteggi misurati. Il sistema è infine provvisto di una porta per l'alimentazione ed una per la trasmissione dei dati all'interfaccia esterna.

L'intero sistema è racchiuso in un rivestimento ermetico di alluminio ², progettato per permettere l'uso dello strumento in ambiente sottomarino.

Il rivelatore a scintillazione è un calorimetro, predisposto per la misura totale dell'energia della particella incidente, nel nostro caso fotoni. Il mezzo di scintillazione permette la conversione dell'energia del fotone γ in N fotoni di scintillazione, ove ci aspettiamo che N sia proporzionale all'energia rilasciata dal fotone stesso. L'interazione del fotone incidente con lo scintillatore rilascia parte della sua energia nella struttura cristallina, attraverso

²progettato e realizzato da TECNOMARE



Figura 1.2: *GEMS*, prototipo del radiometro dell'INGV

una catena di processi stocastici. I fotoni, primari e secondari, interagiscono per effetto fotoelettrico e Compton; gli elettroni secondari perdono la loro energia per ionizzazione. Successivamente il sistema cristallino si diseccita, anche mediante emissione di fotoni di scintillazione, in numero proporzionale all'energia del fotone assorbita dal cristallo. I fotoni di scintillazione vengono convertiti, mediante effetto fotoelettrico in *fotoelettroni*, che a loro volta vengono moltiplicati dal sistema di dinodi del fotomoltiplicatore (PMT), il cui segnale analogico d'uscita viene convertito in digitale dal convertitore analogico-digitale (ADC) ed analizzato dal microprocessore [9, 11].

Date le dimensioni finite dello scintillatore e la sua risoluzione, lo spettro in energia (Conteggi vs Canali di ADC) che si ottiene irraggiando il rivelatore con fotoni monoenergetici ($E = E_\gamma$) non è una δ di Dirac, bensì una

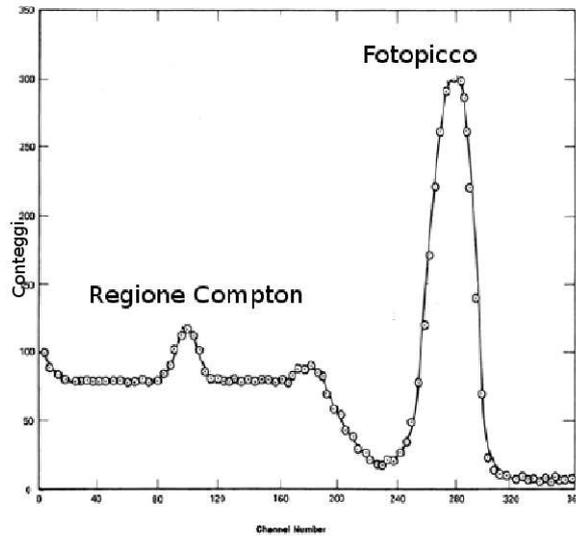


Figura 1.3: Rappresentazione schematica di uno spettro tipico di una sorgente di fotoni monoenergetici [3].

distribuzione di conteggi schematicamente rappresentata in figura 1.3.

La regione in cui le misure si addensano attorno al valore più frequente del segnale misurato (detta *“fotopicco”*), corrisponde ad eventi in cui tutta l’energia del fotone incidente è stata rilasciata nel cristallo. Le fluttuazioni rappresentate dalla distribuzione gaussiana attorno al valore centrale del *fo-topicco*, sono dovute al variare del numero di processi elementari di perdita di energia nel cristallo, del numero di fotoni di luminescenza emessi, della loro raccolta e conversione nel fotomoltiplicatore.

Gli eventi in cui il fotone γ emesso dalla sorgente interagisce per effetto Compton nel cristallo NaI(Tl) ed in cui il γ' uscente dall’interazione sfugge alla rivelazione nel cristallo stesso, appaiono, nello spettro, nella regione di segnali di minor ampiezza (denominata in figura *“regione Compton”*). Per tali eventi, l’energia rilasciata nel cristallo è quella dell’ e^- prodotto

nell'interazione, di energia

$$T_e = 1 + \frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos\theta) \quad (1.2)$$

ove θ è l'angolo fra il γ' ed il γ . Il flesso tra la *regione Compton* ed il *fotopicco* può essere descritto con la massima energia disponibile per l'elettrone, corrispondente a $\cos\theta = -1$

L'energia media dei fotoni incidenti sul rivelatore corrisponde al picco della distribuzione gaussiana. La risoluzione energetica dello strumento viene stimata dalla larghezza di tale distribuzione (FWHM³)

Le modalità di funzionamento dello spettrometro sono due:

1. *RTM (Real Time Monitoring)*, nella quale il rivelatore è in comunicazione diretta con il PC e da esso viene controllato. I dati vengono elaborati dal microprocessore ed inviati, su richiesta, al PC esterno.
2. *SA (Stand Alone)*, nella quale non c'è comunicazione esterna ed i dati, raccolti ed analizzati, vengono immagazzinati nella memoria interna. Tale modalità permette allo strumento di raccogliere dati in mare, in autonomia, per molti mesi.

La risposta dello strumento avviene in canali di ADC⁴. L'ADC utilizzato ha a disposizione 10 bit, il risultato numerico è compreso tra 0 e 1023 e vogliamo che corrisponda approssimativamente ad un intervallo di energia tra

³Full Width at Half Maximum. Per distribuzioni gaussiane $FWHM = \sigma * 2.35$, con σ^2 varianza della gaussiana.

⁴Analog to Digital Converter

0 e 3 MeV. La risposta per energie al di sotto dei 50 keV non è garantita dal costruttore [7], perciò è necessario trascurare i primi 20 canali della risposta, riducendo parzialmente l'intervallo di funzionamento.

Il corretto funzionamento dello spettrometro è subordinato alla presenza, in sede di misura, di un quantitativo rilevabile di KCl, (e quindi di ^{40}K) poiché, all'inizio dell'acquisizione dati, il microprocessore controlla la presenza del *picco* attribuibile al ^{40}K e modifica, se necessario, il coefficiente di calibrazione, in modo da mantenerne la posizione centrale in corrispondenza del canale 511 dell'ADC (metà scala). In tal modo viene fissata per lo strumento una "scala di energia", di cui con questa tesi vogliamo verificare la linearità, la stabilità e la risoluzione.

Tale procedimento di autocalibrazione è potenzialmente giustificabile sulla base del fatto che il rivelatore è stato costruito per effettuare misure in ambiente marino, nel quale la presenza di ^{40}K è inevitabile.

L'acquisizione dei dati avviene tramite il software *RUBY*, che permette la scelta della modalità di funzionamento ed effettua un'analisi preliminare degli spettri e dell'attività specifica dei radionuclidi rivelati .

1.3.2 Procedura sperimentale

Lo strumento da calibrare è stato fornito nell'assetto per misure sottomarine, ovvero chiuso nel rivestimento ermetico di alluminio. Non è stato possibile aprire il rivestimento per verificare la posizione esatta del cristallo all'interno; le sorgenti sono state perciò posizionate in corrispondenza della zona nella quale è stata orientativamente indicata la posizione del cristallo di scin-

tillazione, direttamente a contatto con la superficie laterale del cilindro di rivestimento.

Affinchè lo strumento potesse mantenere costante nel tempo la sua taratura, fornendo serie di dati tra loro consistenti, si è provveduto a mantenere, secondo le specifiche del costruttore, una quantità fissa (1/2 kg) di cloruro di potassio (KCl) in prossimità del cristallo in ogni acquisizione di dati.

Lo strumento è stato utilizzato in modalità RTM (*Real Time Monitoring*), in tal modo abbiamo ottenuto una serie di dati ogni 10 minuti. Sono state acquisite 3 serie di dati per le sorgenti di ^{137}Cs , ^{133}Ba e ^{60}Co e 4 serie di dati per la sorgente di ^{22}Na ; tutte le misure sono state effettuate durante il giorno. La caratterizzazione del fondo ambientale, comprensivo della sorgente di KCl, è stata invece effettuata utilizzando lo strumento in modalità *Stand-Alone*, acquisendo 14 serie di dati, una ogni ora, durante la notte.

Capitolo 2

Analisi dei dati

2.1 Procedura di analisi dei dati

2.1.1 Sottrazione del fondo

La figura 2.1 riporta la distribuzione, in canali di ADC, dei conteggi ri-elaborati con *GEMS* durante 10 minuti di acquisizione dati con la sorgente di ^{137}Cs . La scala delle ascisse è stata limitata tra 50 e 700 canali, per meglio evidenziare la zona in cui il ^{137}Cs presenta il suo spettro caratteristico. Nello stesso grafico sono riportati i conteggi relativi alla caratterizzazione del fondo ottenuta esponendo *GEMS* alla sola sorgente di KCl. Il campione di dati è ottenuto mediando e rinormalizzando opportunamente le 14 serie di misure di fondo, da 1 ora ciascuna.

Attraverso un'analisi quantitativa dei conteggi presenti nelle due serie, di fondo e di ^{137}Cs , per canali superiori a 700, corrispondenti ad energie alle quali la sorgente di ^{137}Cs non ha più influenza, si evidenzia una non perfet-

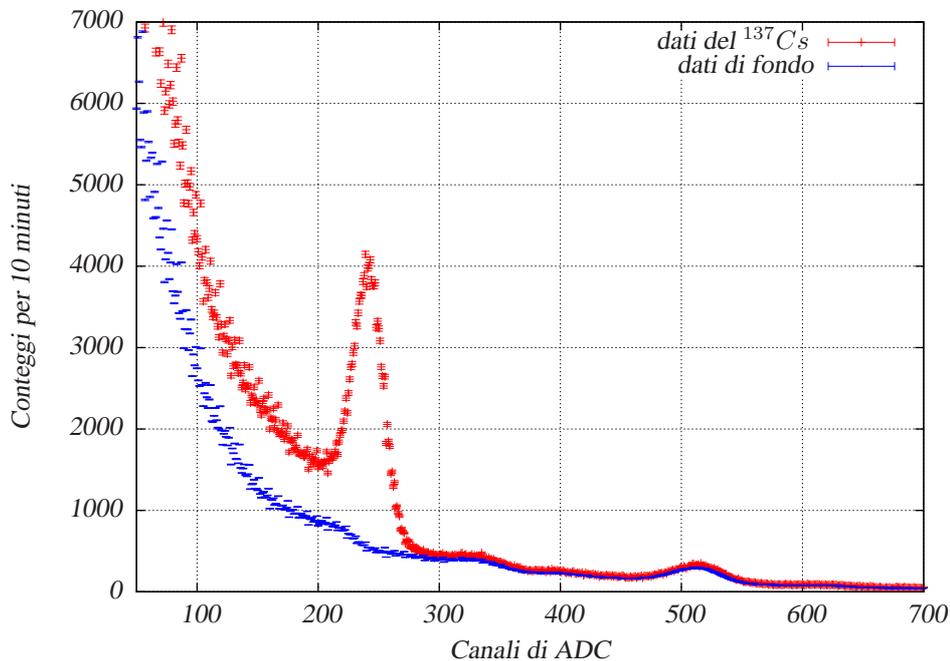


Figura 2.1: Spettro del ^{137}Cs e della serie di fondo

ta coincidenza tra le due serie: come si nota dall'esempio in figura 2.2, la serie di fondo presenta sistematicamente un numero di conteggi inferiore a quello della serie di ^{137}Cs . Tale incongruenza si evidenzia per tutte le serie di misure effettuate con le sorgenti di calibrazione e può essere attribuita al fatto che le serie del fondo sono state acquisite durante la notte, mentre tutte le serie delle sorgenti sono state acquisite durante il giorno, con temperature ambientali evidentemente differenti. Non essendo stato possibile stimare quantitativamente gli effetti della variazione di temperatura sulle prestazioni dello strumento, si è deciso di operare nel modo seguente. Per la serie di ^{137}Cs in analisi è stato calcolato l'integrale di conteggi tra il canale 700 ed il canale 830, ovvero in una zona "piatta" dello spettro. Tale integrale è stato calcolato nello stesso intervallo per la serie di fondo. Il rapporto R tra i due

integrali così ottenuti è stato utilizzato come fattore di “normalizzazione” del fondo nell’operazione di sottrazione del fondo stesso dalla serie di dati del ^{137}Cs .

Nel grafico 2.3 sono riportati, applicando tale metodo, i conteggi dello spettro del ^{137}Cs dopo la sottrazione del fondo, secondo la formula (2.1).

$$y = x - \frac{f}{R} \quad (2.1)$$

dove R è il rapporto tra i conteggi del fondo e quelli della sorgente nell’intervallo considerato, f i conteggi per canale (bin) della serie di fondo e x i conteggi per canale della serie di una determinata sorgente, ^{137}Cs nell’esempio in questione.

Tale procedura di “normalizzazione” del fondo prima della sottrazione è stata applicata per ogni sorgente in esame. I fattori R di normalizzazione utilizzati per ogni sorgente sono riportati nella tabella 2.1, assieme agli intervalli nei quali è stato calcolato tale fattore.

Sorgente	R \pm ϵ	Intervallo [Canali]
^{137}Cs	0.892 \pm 0.016	700÷830
^{133}Ba	0.925 \pm 0.017	700÷830
^{22}Na	0.918 \pm 0.016	700÷830
^{60}Co	0.7246 \pm 0.0087	600÷830

Tabella 2.1: Fattore di “normalizzazione” del fondo

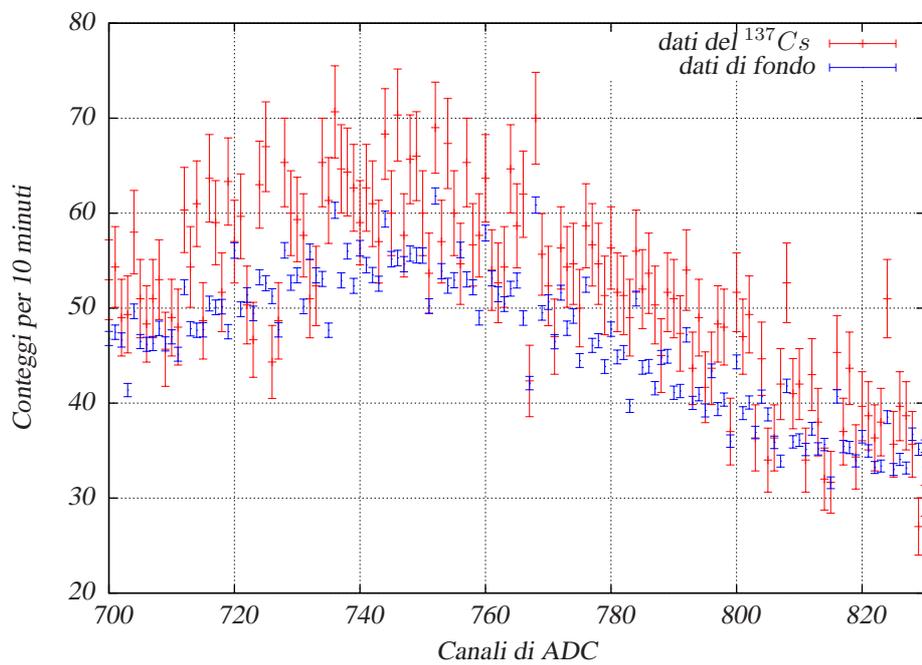


Figura 2.2: Confronto ad alti canali tra ^{137}Cs e fondo

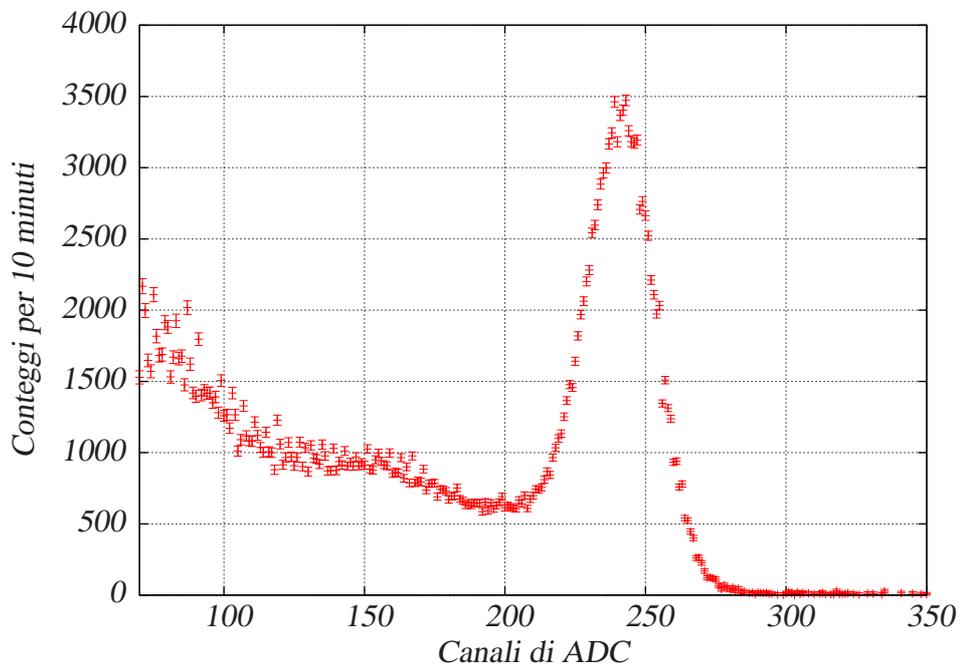


Figura 2.3: Spettro del ^{137}Cs dopo la sottrazione del fondo

2.1.2 Anatomia degli spettri

Gli spettri ottenuti dalle sorgenti di calibrazione sono stati analizzati allo scopo di ricavare il valore medio dell'energia dei fotoni in canali di ADC, ovvero la posizione del *fotopicco*. La distribuzione dovuta alla sola interazione tramite effetto Compton dei fotoni con il cristallo di scintillazione è stata parametrizzata mediante una distribuzione di Fermi-Dirac, mentre il *fotopicco* è stato descritto attraverso una distribuzione gaussiana (2.2).

$$\text{Fermi-Dirac} \quad y = \frac{c}{e^{\frac{x-d}{kt}} + 1} \quad (2.2a)$$

$$\text{Gaussiana} \quad y = Ae^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.2b)$$

Dunque ogni spettro è stato fittato, per ogni fotone monoenergetico presente, con un'unica funzione data dalla somma di una Fermi-Dirac ed una gaussiana. I risultati sono stati riportati in tabella 2.2.

Nei dati acquisiti da *GEMS* si è riscontrata, in particolare per piccoli valori del segnale misurato, un'eccessiva dispersione sistematica dei conteggi (incompatibile con gli errori sperimentali, assunti come poissoniani). Riteniamo di poter attribuire tali fluttuazioni, ininfluenti nello studio dei *fotopicchi* di nostro interesse, alla eccessiva risoluzione dell'ADC utilizzato. Tale effetto è ben visibile nel Compton dello spettro del ^{137}Cs (figura 2.4) e produce, evidentemente, un improprio aumento del valore di $\frac{\chi^2}{ndf}$ ¹ del fit complessivo dello spettro.

¹ $\frac{\chi^2}{ndf}$ è il χ^2 già rinormalizzato ai gradi di libertà della funzione. Un valore di $\frac{\chi^2}{ndf}$ prossimo ad 1 evidenzia un buon accordo dei dati sperimentali con la funzione

Nelle figure 2.4, 2.5, 2.6 e 2.7 sono stati riportati gli spettri delle sorgenti di calibrazione, il fit effettuato sullo spettro ed il relativo valore di $\frac{\chi^2}{ndf}$

Lo spettro del ^{137}Cs è particolarmente interessante perchè è ben visibile la distribuzione gaussiana del *fotopicco* e la Fermi-Dirac che parametrizza la *regione Compton*.

È da notare, in questo spettro, un eccesso di conteggi nella zona del Compton a basse energie. Riteniamo che tali conteggi siano dovuti a fotoni di decadimento del ^{137}Cs che abbiano interagito Compton nel rivestimento esterno di alluminio di *GEMS*, prima di raggiungere lo scintillatore. Il fotone, interagendo Compton nell'alluminio, perde parte della sua energia in favore dell'elettrone, che viene assorbito nel mezzo. Il fotone γ' uscente dall'interazione, possiede un'energia complementare a quella dell'elettrone calcolata nell'equazione (1.2), $E_\gamma - E_{MAX} < E'_\gamma < E_\gamma$. Esso può essere completamente assorbito nel cristallo oppure perdere nuovamente una parte della sua energia per interazione Compton e poi sfuggire alla rivelazione, incrementando i conteggi nella zona a bassa energia, come riscontrato nel nostro spettro.

Lo spettro del ^{60}Co (figura 2.5) è caratterizzato dalla presenza di due fotoni di decadimento prodotti in cascata dalla diseccitazione del nucleo di Nickel. Esso permette una valutazione “*visiva*” della capacità risolutiva di *GEMS*. La risoluzione energetica dello strumento, infatti, ci permette di distinguere i *picchi* del ^{60}Co , distanti 0.16 MeV (approssimativamente 50 canali di ADC), ma non ci avrebbe permesso di risolvere nello stesso spettro, per esempio, anche il picco del ^{22}Na , che si troverebbe in una posizione intermedia tra i due.

Lo spettro del ^{22}Na (figura 2.6) presenta un picco a 0.511 MeV, generato

dalla rivelazione, da parte dello scintillatore, di uno dei due fotoni di annichilazione del positrone prodotto nel decadimento β^+ . Il picco a più alta energia presente nello spettro è prodotto dalla diseccitazione del nucleo di Neon ed è oggetto di una ulteriore analisi nella sezione 2.4.

Dal momento che la sorgente di ^{40}K è presente nelle misure di caratterizzazione del fondo, per tale spettro (figura 2.7) la sottrazione del fondo, effettuata per le altre sorgenti mediante il confronto diretto con i dati raccolti senza le sorgenti stesse, è stata effettuata invece parametrizzando con una funzione esponenziale i conteggi raccolti in una regione di energia opportunamente scelta attorno al picco del ^{40}K . Al fine di effettuare una parametrizzazione del fondo, è stato cioè aggiunto nel fit un esponenziale, la cui costante di decadimento, stimato dal fit, è riportato in figura.

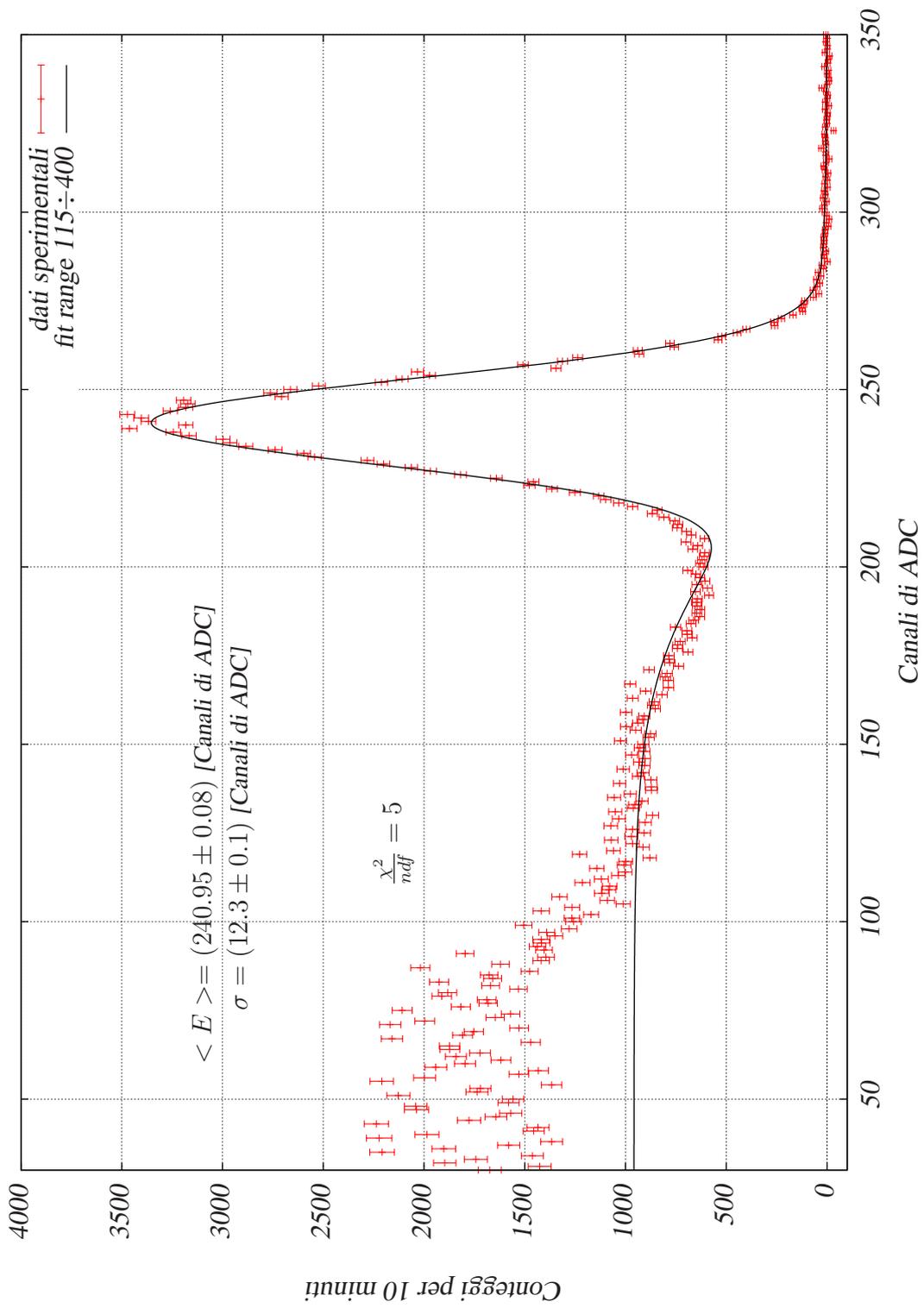


Figura 2.4: Spettro del ^{137}Cs

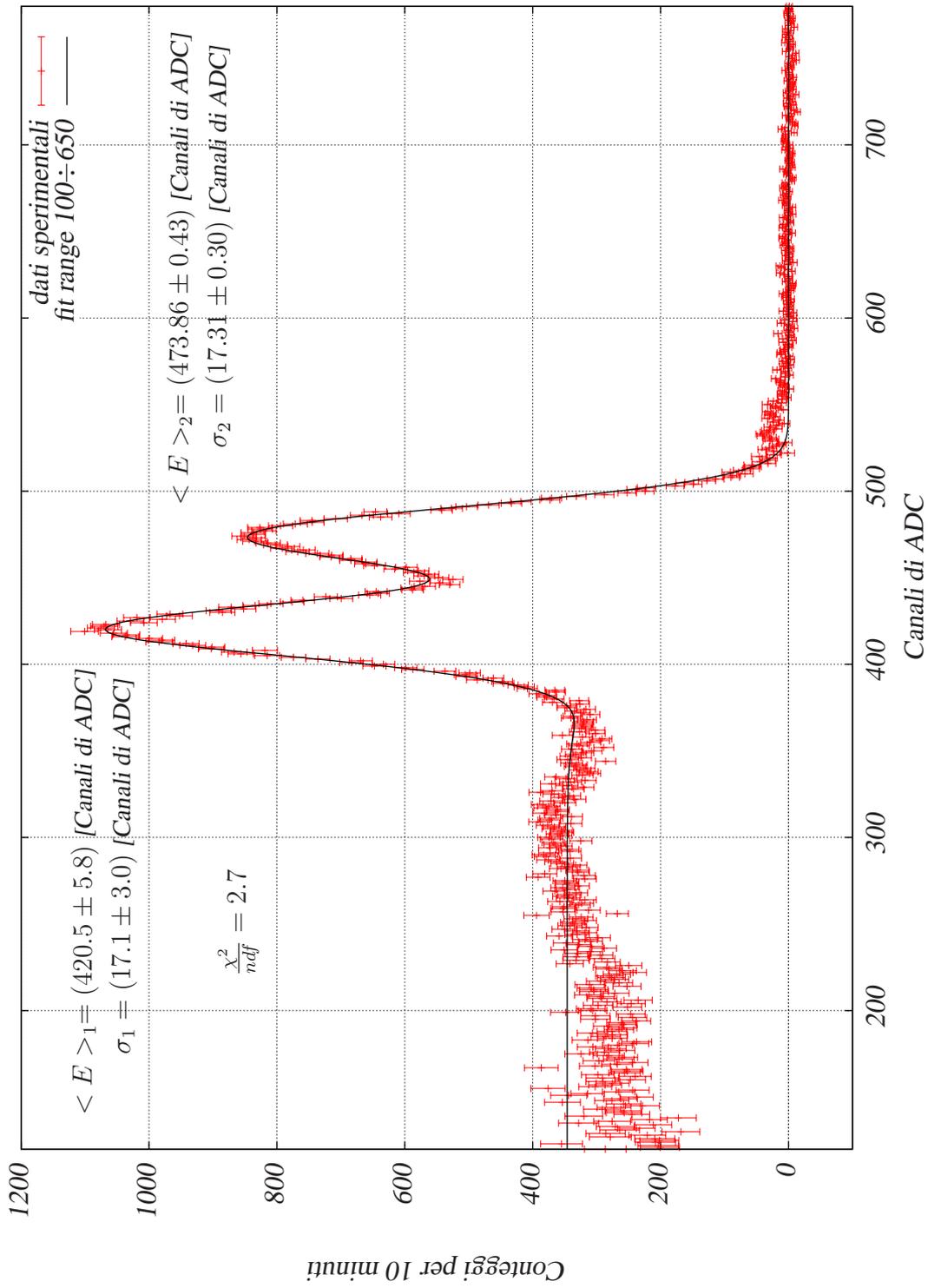


Figura 2.5: Spettro del ^{60}Co

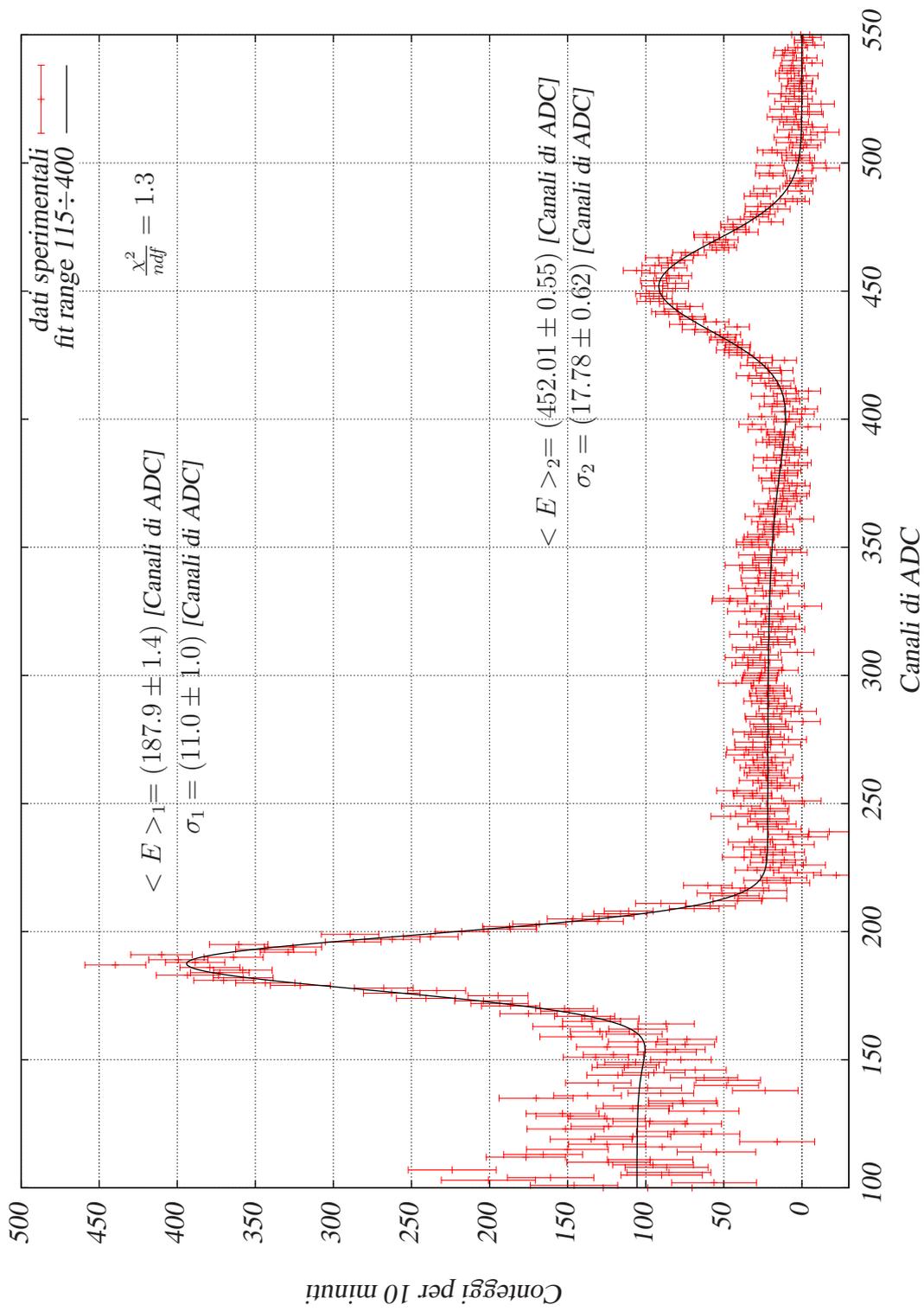


Figura 2.6: Spettro del ^{22}Na

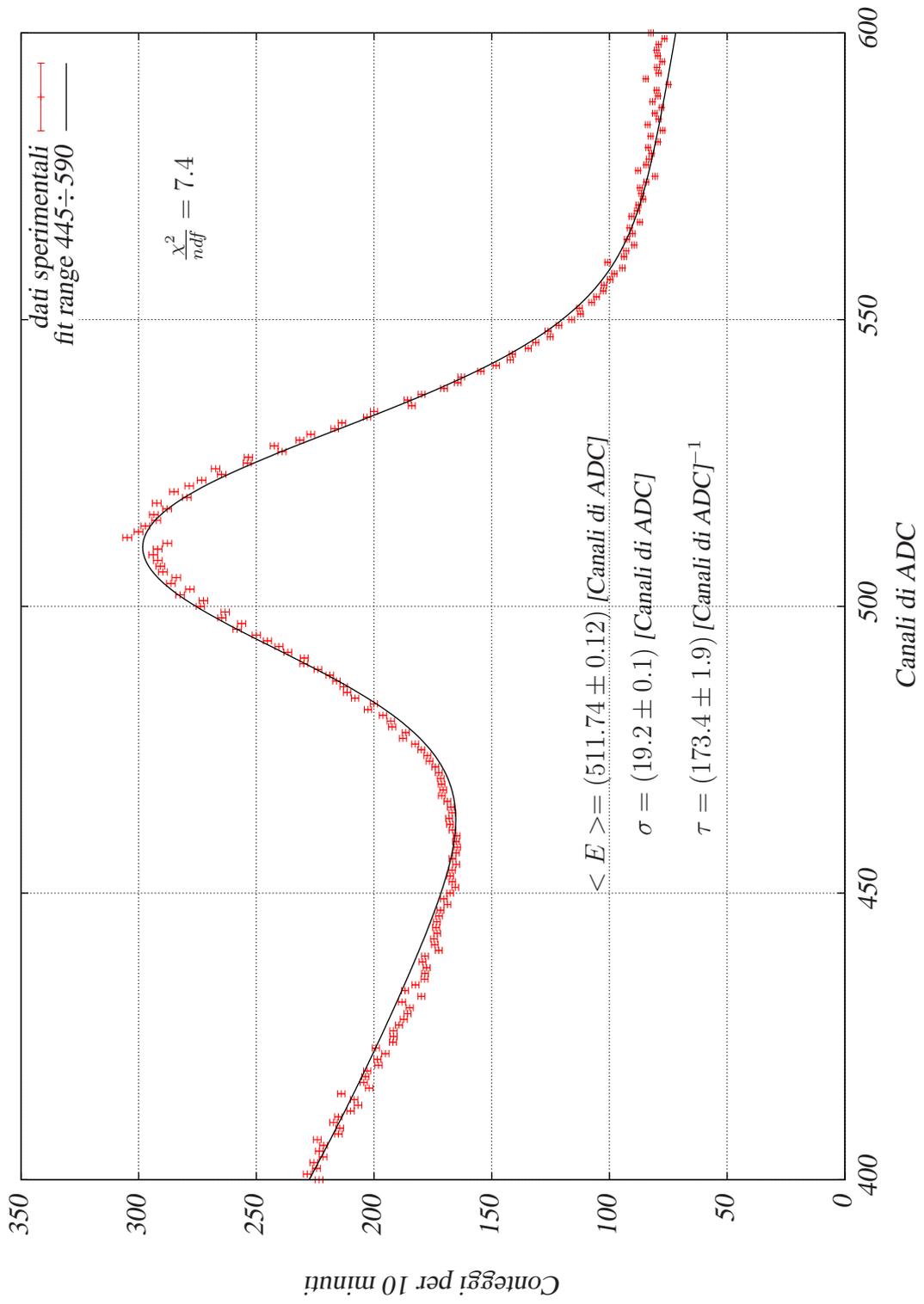


Figura 2.7: Spettro del ^{40}K

2.2 Calibrazione in energia

Allo scopo di rendere utilizzabile lo strumento per misurare, ed individuare, le sorgenti naturali di radioattività presenti in ambiente marino, si rende necessario stabilire una funzione di conversione tra la risposta dello strumento (in canali di ADC) e l'energia del fotone incidente sul cristallo (in MeV)

Si è pertanto graficato, figure 2.8 e 2.9, per ogni sorgente in analisi, la posizione, in canali di ADC, del “centro” dei singoli *fotopicchi* individuati sperimentalmente, in funzione dell' energia della sorgente, in MeV. In tabella 2.2 riportiamo i risultati dei vari fit; in particolare per ogni sorgente si dà l'energia *nominale* dei fotoni, il valore centrale e la σ delle relative distribuzioni gaussiane identificate.

Se cerchiamo di parametrizzare l'andamento dei punti sperimentali con un'unica retta, (figura 2.8), otteniamo un valore di $\frac{\chi^2}{ndf}$ molto alto, pari a 136.

E [MeV]	Sorgente	$\langle E \rangle$ [Canali di ADC]	\pm	ϵ	σ [Canali di ADC]	\pm	ϵ
0.356017	^{133}Ba	132.87	\pm	0.16	10.96	\pm	0.15
0.510999	^{22}Na	187.9	\pm	1.4	11.0	\pm	1.0
0.6616573	^{137}Cs	240.949	\pm	0.080	12.308	\pm	0.095
1.173237	^{60}Co	420.5	\pm	5.8	17.1	\pm	3.0
1.274532	^{22}Na	452.01	\pm	0.55	17.78	\pm	0.62
1.332501	^{60}Co	473.86	\pm	0.43	17.31	\pm	0.30
1.460830	^{40}K	511.74	\pm	0.12	19.17	\pm	0.14

Tabella 2.2: Tabella riassuntiva dei parametri degli spettri

Si è cercato perciò di verificare se l'andamento dei dati sperimentali sia descritto in modo più soddisfacente da due rette di calibrazione. Dalle figure 2.9 e 2.10 è evidente come sia effettivamente presente un fenomeno di

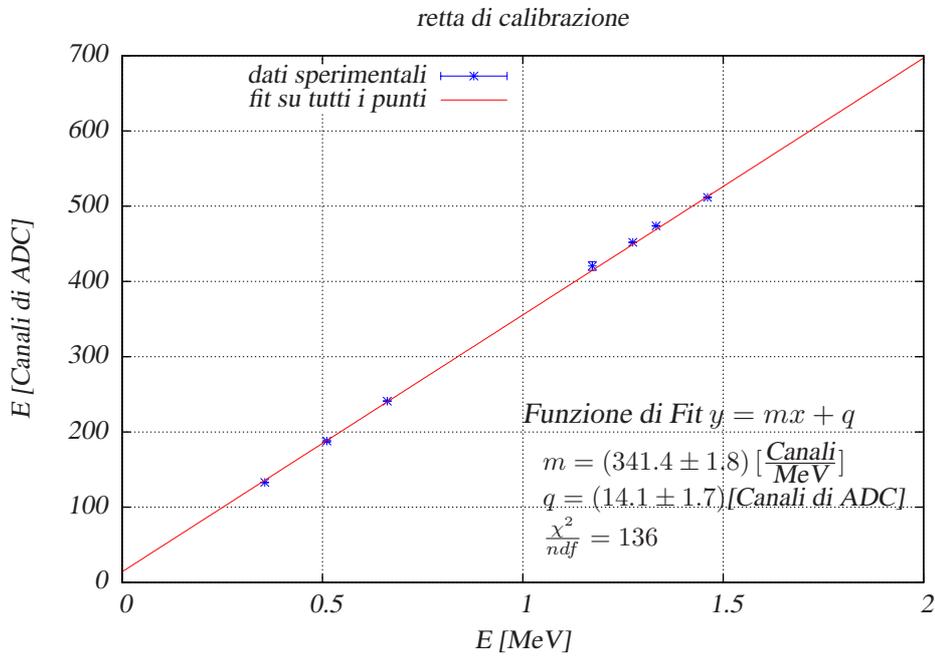


Figura 2.8: Retta di calibrazione

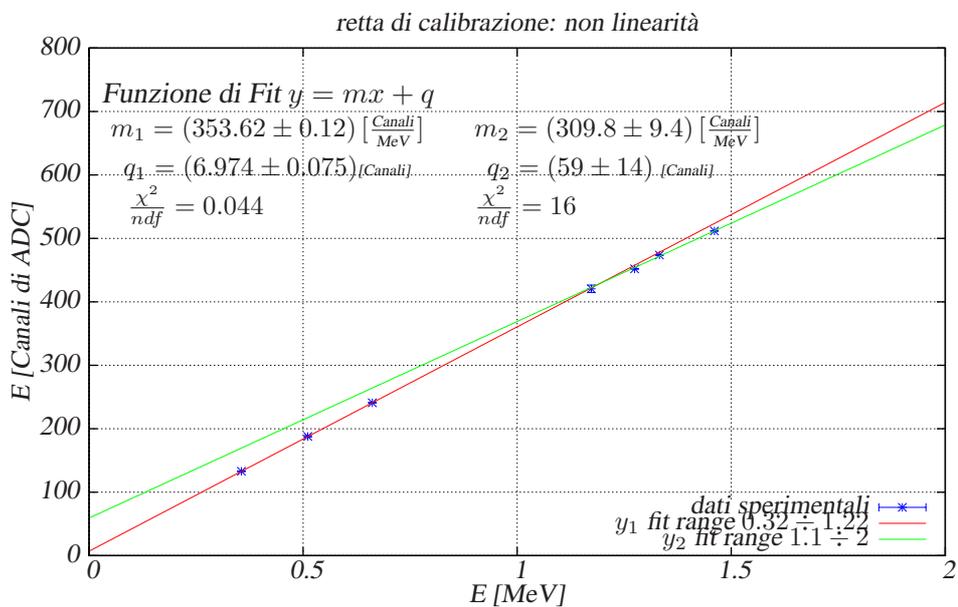


Figura 2.9: Retta di calibrazione, non linearità

non linearità e come l'introduzione di due rette ci porti ad ottenere valori del $\frac{\chi^2}{ndf}$ più soddisfacenti. Il grafico dei residui, riportato in figura 2.10, tra la prima delle due rette (y_1) e tutti i punti sperimentali, evidenzia proprio un andamento, sbilanciato al disopra dello zero, caratteristico di un set di dati che, all'aumentare dell'energia, perdono in linearità, giustificando ulteriormente la necessità di utilizzare almeno due rette per la calibrazione.

Resta da sottolineare, infine, l'incompatibilità dei dati sperimentali con una retta di termine noto nullo, che ci porta ad assumere la presenza di un *pedistallo* nello strumento pari a (6.974 ± 0.075) [Canali di ADC], come risulta dal fit riportato in figura 2.9 e in tabella 2.3

Nel grafico 2.11 riportiamo infine la parametrizzazione della calibrazione in energia (E[MeV] vs E[Canali di ADC]) mediante una funzione polinomiale di secondo ordine, al fine di ricavare un'unica funzione che tenga conto della non linearità, per la conversione dei canali di ADC in energia

La tabella 2.3 riporta tutti i parametri riassuntivi della calibrazione, i coefficienti angolari delle rette ed i termini noti. I parametri della funzione di conversione sono invece riportati direttamente in figura 2.11

Retta	grafico	$m \pm \epsilon$ [$\frac{\text{Canali}}{\text{MeV}}$]	$q \pm \epsilon$ [Canali]	$\frac{\chi^2}{ndf}$
y	2.8	341.4 \pm 1.8	14.1 \pm 1.7	136
y_1	2.9	353.62 \pm 0.12	6.974 \pm 0.075	0.044
y_2	2.9	309.8 \pm 9.4	59 \pm 14	16

Tabella 2.3: Riassunto dei parametri di calibrazione

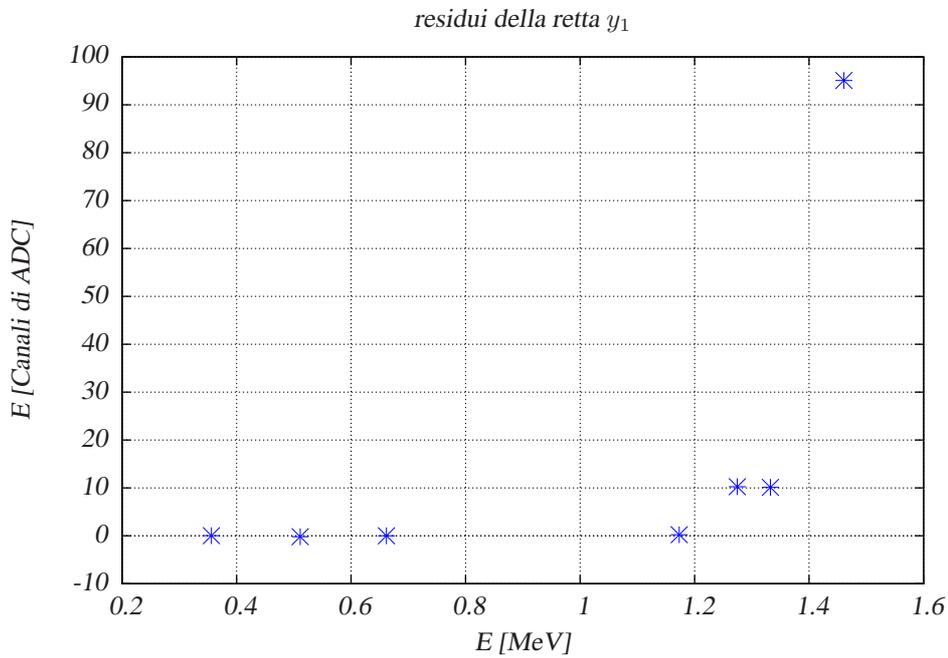


Figura 2.10: Residui della retta y_1 in figura 2.9

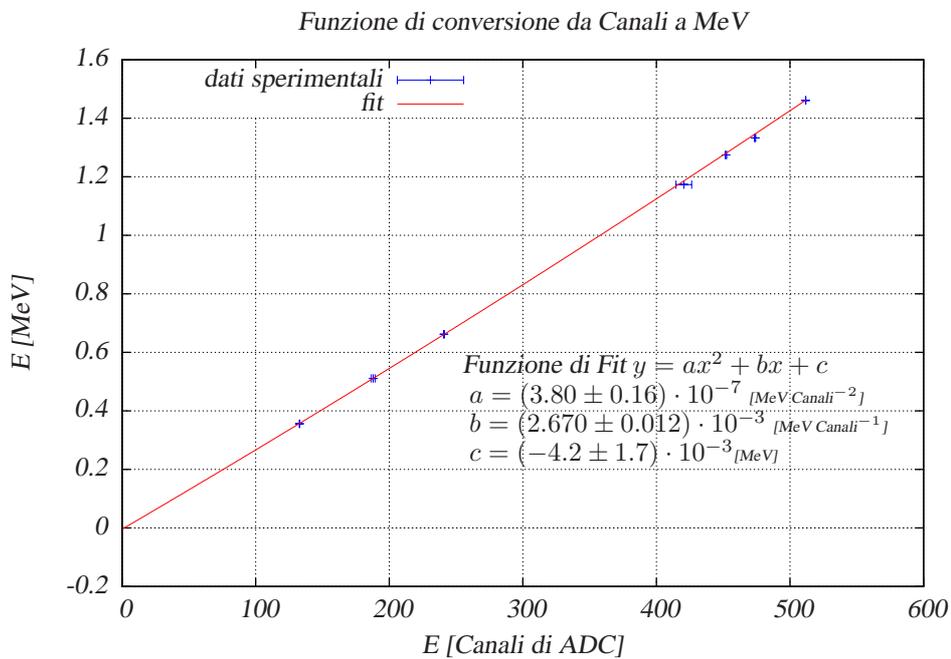


Figura 2.11: Funzione di conversione da Canali a MeV

2.3 Studio della risoluzione energetica

Si definisce risoluzione energetica [9]

$$R_E = \frac{FWHM}{E} = \frac{2.35 \sigma}{E} \quad (2.3)$$

dove E e σ^2 sono rispettivamente il valore medio e varianza della gaussiana che descrive il *fotopicco*.

Lo studio dell'andamento della risoluzione energetica dello strumento in funzione dell'energia stessa rappresenta una ulteriore caratterizzazione delle proprietà del rivelatore. Infatti, la sua parametrizzazione permette di prevedere la capacità di *GEMS*, in funzione dell'energia, di risolvere fotoni energeticamente vicini,

Al fine di tener conto della non linearità della produzione di fotoni in funzione dell'energia del γ incidente, i parametri degli spettri (tabella 2.4, $\langle E \rangle$ e σ) sono stati computati nuovamente, tramite fit, dopo aver convertito i canali di ADC in MeV mediante la funzione quadratica di conversione stimata nel grafico 2.11 della sezione precedente. In figura 2.12 riportiamo, come unico esempio, lo spettro in *energia calibrata* della sorgente di ^{137}Cs così ottenuto. Si è pertanto graficata in figura 2.13 R_E , stimata dal rapporto tra σ e $\langle E \rangle$ misurate in MeV, in funzione dell'energia nominale dei fotoni. Tra i dati sperimentali è stato inserito anche un *fotopicco* osservato in tutte le misure effettuate, anche in assenza di sorgenti. È evidente che tale segnale è dovuto ad elementi radioattivi interni allo strumento. Non siamo riusciti ad identificare tale elemento: il segnale corrisponde ad una energia rilasciata nel cristallo di NaI(Tl) pari a (2.733 ± 0.012) MeV.

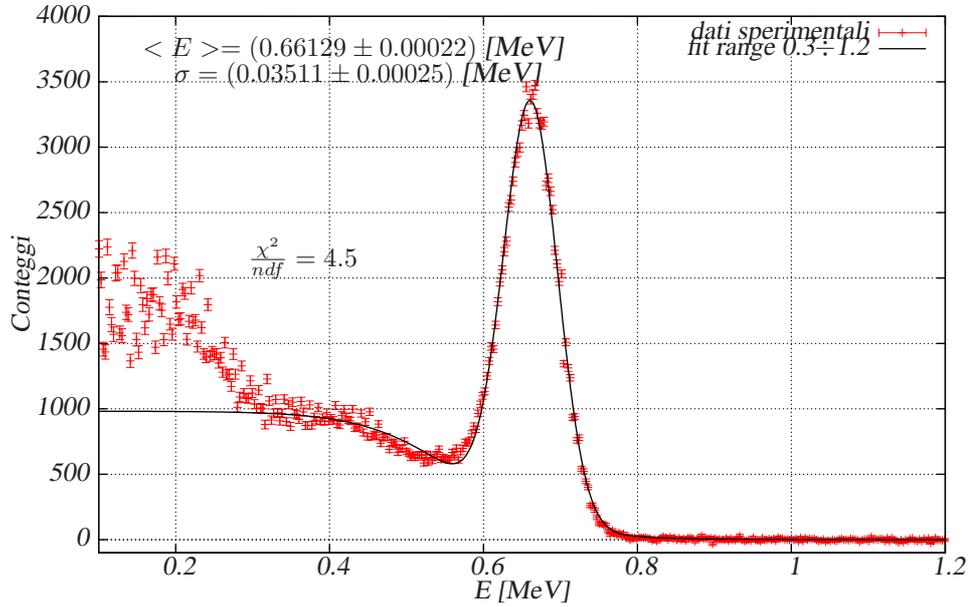


Figura 2.12: Spettro del ^{137}Cs in *energia calibrata*

L'andamento dei dati sperimentali è stato parametrizzato attraverso la funzione (2.4)

$$y = \sqrt{\left(\frac{a}{\sqrt{E}}\right)^2 + c^2} \quad (2.4)$$

Dove il termine inversamente proporzionale a \sqrt{E} stima il contributo poissoniano alla σ , legato alle fluttuazioni sul numero di fotoni di scintillazione prodotti nel processo di conversione dell'energia nel cristallo, ed il termine costante c caratterizza la risoluzione intrinseca dello scintillatore [9]. I due contributi sono statisticamente indipendenti, dunque vengono sommati quadraticamente. Dai risultati dell'analisi, la risoluzione energetica segue l'andamento previsto. Ciononostante, il valore di risoluzione tipico di un rivelatore per il ^{137}Cs (0.66 MeV) è dell'8% [13], mentre *GEMS* si attesta su una risoluzione del 12%.

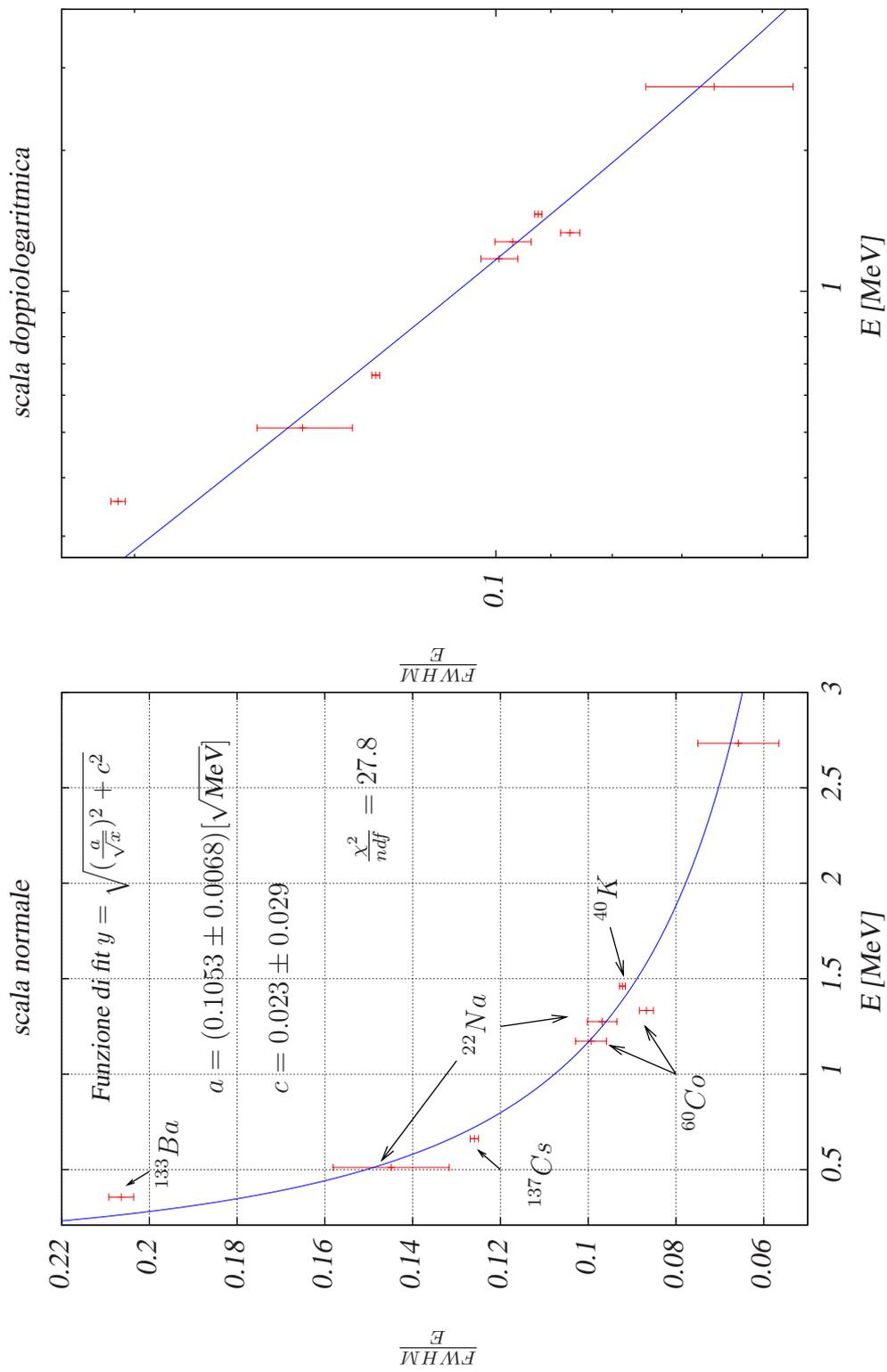


Figura 2.13: Risoluzione Energetica

E [MeV]	sorgente	$\langle E \rangle \pm \epsilon$ [MeV]	$\sigma \pm \epsilon$ [MeV]	$R_E \pm \epsilon$
0.356017	^{133}Ba	0.35902 \pm 0.00046	0.03153 \pm 0.00043	0.2064 \pm 0.0028
0.510999	^{22}Na	0.5182 \pm 0.0041	0.0319 \pm 0.0029	0.145 \pm 0.013
0.6616573	^{137}Cs	0.67310 \pm 0.00022	0.03607 \pm 0.00026	0.12592 \pm 0.00092
1.173237	^{60}Co	1.2130 \pm 0.0032	0.0513 \pm 0.0018	0.0994 \pm 0.0035
1.274532	^{22}Na	1.3001 \pm 0.0017	0.0536 \pm 0.0019	0.0968 \pm 0.0034
1.332501	^{60}Co	1.3663 \pm 0.0012	0.05043 \pm 0.00093	0.0867 \pm 0.0016
1.460830	^{40}K	1.48058 \pm 0.00037	0.05810 \pm 0.00041	0.09221 \pm 0.00065
-	incognita	2.733 \pm 0.012	0.077 \pm 0.011	0.0658 \pm 0.0092

Tabella 2.4: Parametri degli spettri in MeV

2.4 Spettro del ^{22}Na : anomalia nel funzionamento di GEMS

Il procedimento di correzione, in ogni acquisizione dati, del coefficiente di calibrazione ad opera del microprocessore, è causa di una instabilità nel funzionamento di *GEMS*.

Da una analisi indipendente delle quattro serie di dati del ^{22}Na , infatti, si è scoperto che la presenza di un *fotopicco* di energia prossima a quella del ^{40}K può indurre nel microprocessore un errore nella definizione del valore della calibrazione, legata al posizionamento del *picco* del potassio sul canale 511, producendo 4 serie di misure leggermente diverse. I *fotopicchi* delle varie misure hanno la stessa forma, ma i valori centrali differiscono leggermente, come si può constatare dalla tabella 2.5. Dai punti sperimentali risulta difficile l'individuazione visiva di questo sfasamento delle serie, che ammonta comunque a pochi canali, pertanto sono state riportate in figura 2.14 le funzioni di fit risultanti dall'analisi delle 4 serie senza sottrazione del fondo. In tale figura si distingue nettamente lo sfasamento delle 4 serie, evidenziando come lo strumento modifichi di volta in volta la calibrazione, “*disorientato*” dai conteggi dovuti al decadimento del ^{22}Na .

I parametri dei fit risultati dall'analisi delle serie di ^{22}Na , riportati in tabella 2.5, hanno confermato il leggero spostamento del *picco* del ^{40}K (e conseguentemente anche di quello del sodio). In conclusione, per il ^{22}Na , alla risoluzione in energia misurata contribuisce anche un piccolo termine strumentale, che però resta non quantificato.

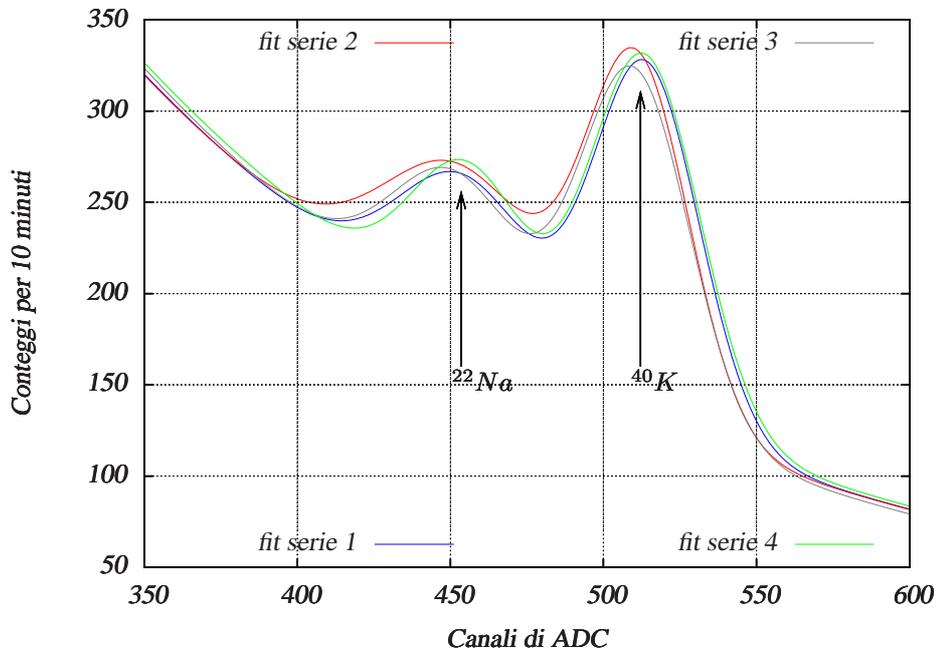


Figura 2.14: Studio delle serie di ^{22}Na

n_{serie}	^{40}K		^{22}Na			$\frac{\chi^2}{ndf}$
	$\langle E \rangle$	$\pm \epsilon$	$\langle E \rangle$	$\pm \epsilon$	$\sigma \pm \epsilon$	
1	514.11	± 0.67	455.5	± 1.7	22.0 ± 1.8	1.25
2	511.14	± 0.79	454.4	± 2.2	25.2 ± 2.3	1.29
3	510.2	± 0.7	452.0	± 1.6	20.7 ± 1.7	1.30
4	513.72	± 0.61	456.2	± 1.3	18.5 ± 1.4	1.26

Tabella 2.5: Risultati dei fit delle 4 serie di ^{22}Na

Capitolo 3

Risultati finali e conclusioni

Dal lavoro di caratterizzazione di *GEMS*, mediante 5 sorgenti di riferimento, è stata ricavata una funzione di conversione della risposta numerica del rivelatore in energia (MeV). Poichè tale risposta ha presentato una non linearità, è necessario tenere in considerazione 2 rette di calibrazione ($y = mx + q$), con i seguenti parametri:

	m [Canali/MeV]	q [Canali]
y_1	(353.62 ± 0.12)	(6.974 ± 0.075)
y_2	(309.8 ± 9.4)	(59 ± 14)

oppure una funzione polinomiale di secondo grado ($y = ax^2 + bx + c$)

$$a = (3.80 \pm 0.16) \cdot 10^{-7} [\text{MeV Canali}^{-2}]$$

$$b = (2.670 \pm 0.012) \cdot 10^{-3} [\text{MeV Canali}^{-1}]$$

$$c = (-4.2 \pm 1.7) \cdot 10^{-3} [\text{MeV}]$$

È inoltre necessario assumere un *pedistallo* nello strumento pari a (6.974 ± 0.075) [Canali di ADC].

La risoluzione energetica di *GEMS* segue l'andamento atteso,

$$y = \sqrt{\left(\frac{a}{\sqrt{E}}\right)^2 + c^2}.$$

$$a = (0.1053 \pm 0.0068) \cdot [\sqrt{\text{MeV}}] \qquad c = (2.3 \pm 2.9) \cdot 10^{-2}$$

Il valore di risoluzione energetica a 0.66 MeV (sorgente di ^{137}Cs) è del 12.5%. Il microprocessore di *GEMS* provvede ad effettuare, ad ogni acquisizione di misure, una correzione del coefficiente di calibrazione, posizionando il picco attribuibile al ^{40}K in una posizione ben determinata della scala in Canali di ADC (Canale 511). Tale processo di autocalibrazione può introdurre nelle misure di *GEMS* un ulteriore contributo strumentale alla risoluzione energetica, nel caso in cui siano presenti nella misura sorgenti di energia prossima a quella del ^{40}K . In tal caso, infatti, i conteggi di ampiezza vicina a quella attesa per il ^{40}K generano una “instabilità” nella definizione del coefficiente di calibrazione da parte dello strumento, fornendo serie di dati leggermente differenti fra di loro.

Si ritiene necessario sottolineare il fatto che linearità ed alta risoluzione energetica non sono essenziali ai fini dell'individuazione delle sorgenti radioattive nella caratterizzazione dei siti di rivelazione di neutrini astrofisici. Riteniamo quindi ininfluyente, al fine di utilizzare *GEMS* per tale scopo, che lo strumento non goda di una buona linearità, né abbia una risoluzione energetica eccessivamente alta.

Bibliografia

- [1] Lund nuclear data service. <http://nucleardata.nuclear.lu.se/nucleardata/>.
- [2] Report on evaluation of existing water, oceanographic, biological and geological data from candidate sites. Deliverable 5.1. <http://www.roma1.infn.it/exp/nemo/KM3NeT/KM3NeT.htm>.
- [3] Laboratorio di fisica medica. Presentazione, aa 2006/07. <http://df.unife.it/laureescientifiche/docs/aa0607/fismed/PresFisMed.ppt>.
- [4] C. Amsler et al. *Review of Particle Physics (PDG)*. Physics Letters B, 2006.
- [5] G. Etiope, G. Marinaro, A. Grubich, A. Lobko, and F. Gasparoni. Development of a sensor for underwater radioactivity measurement. Ingv-tecnomare internal report for km3net project, INGV, Istituto Nazionale di Geologia e Vulcanologia, March 2007.
- [6] INGV. *needs of radioactivity measurements in seawater*, Novembre 2007. contribution to CDR.
- [7] INP, Research Institute for Nuclear Problems, Belarus State University. *GEMS user's manual*, Gennaio 2008.

- [8] JSC TIMET. *RUBY software user's manual*, 2008.
- [9] Glenn F. Knoll. *Radiation Detection and Measurement*. John Wiley & Sons, 2nd edition, 1989.
- [10] F. Massa. Optical radiation background from 40k decays in undersea neutrino telescopes. *European Physical Journal C*, 22(4):749–756, 2002.
- [11] prof. Mario Mattioli. *Rivelatori di particelle*. dispense per il corso di laboratorio di rivelatori di radiazioni, 2002.
- [12] Francesco Simeone. *Caratterizzazione del rumore di fondo ottico in un apparato sottomarino per la rivelazione dei neutrini*. Master's thesis, Sapienza, università di Roma, 2002.
- [13] S.Sasaki and H.Tawara. Average energies required per scintillation photon and energy resolutions in NaI(Tl) and CsI(Tl) crystals for gamma rays. *Japanese Journal of Applied Physics*, 45(8A):6420–6430, August 2006.

Indice

1	Introduzione e descrizione degli strumenti	2
1.1	Gli obiettivi di GEMS	2
1.2	Finalità del lavoro	3
1.3	Descrizione degli strumenti	4
1.3.1	Apparato sperimentale	4
1.3.2	Procedura sperimentale	9
2	Analisi dei dati	11
2.1	Procedura di analisi dei dati	11
2.1.1	Sottrazione del fondo	11
2.1.2	Anatomia degli spettri	15
2.2	Calibrazione in energia	22
2.3	Studio della risoluzione energetica	26
2.4	Spettro del ^{22}Na : anomalia nel funzionamento di GEMS . . .	31
3	Risultati finali e conclusioni	33
	Bibliografia	34

Elenco delle tabelle

1.1	Sorgenti di riferimento per la calibrazione [1,4]. EC indica la cattura elettronica	4
2.1	Fattore di “normalizzazione” del fondo	13
2.2	Tabella riassuntiva dei parametri degli spettri	22
2.3	Riassunto dei parametri di calibrazione	24
2.4	Parametri degli spettri in MeV	30
2.5	Risultati dei fit delle 4 serie di ^{22}Na	32

Elenco delle figure

1.1	Schema del rivelatore <i>GEMS</i>	5
1.2	<i>GEMS</i> , prototipo del radiometro dell'INGV	6
1.3	Rappresentazione schematica di uno spettro tipico di una sorgente di fotoni monoenergetici [3].	7
2.1	Spettro del ^{137}Cs e della serie di fondo	12
2.2	Confronto ad alti canali tra ^{137}Cs e fondo	14
2.3	Spettro del ^{137}Cs dopo la sottrazione del fondo	14
2.4	Spettro del ^{137}Cs	18
2.5	Spettro del ^{60}Co	19
2.6	Spettro del ^{22}Na	20
2.7	Spettro del ^{40}K	21
2.8	Retta di calibrazione	23
2.9	Retta di calibrazione, non linearità	23
2.10	Residui della retta y_1 in figura 2.9	25
2.11	Funzione di conversione da Canali a MeV	25
2.12	Spettro del ^{137}Cs in <i>energia calibrata</i>	27
2.13	Risoluzione Energetica	29

2.14 Studio delle serie di ^{22}Na 32