

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI
BOLOGNA

Scuola di Scienze
Corso di Laurea in Fisica

Test di nuovi rivelatori per misure di cattura neutronica radiativa

Relatore:
Prof. Gianni Vannini

Presentata da:
Simone Amaducci

Correlatore:
Dott. Cristian Massimi

Sessione III
Anno Accademico 2012/2013

Abstract

Gli scintillatori organici contenenti C_6D_6 sono ampiamente utilizzati per misure ad alta precisione di sezioni d'urto di cattura neutronica presso le facility che sfruttano la tecnica del tempo di volo. In particolare il loro uso nell'ambito della facility n_ToF al CERN di Ginevra ha richiesto la costruzione di nuovi rivelatori con una minore sensibilità ai neutroni di quelli presenti in commercio.

In questa tesi si è studiato il nuovo prototipo di C_6D_6 realizzati dal gruppo italiano di n_ToF descrivendone la struttura e confrontandolo con i precedenti rivelatori realizzati nell'ambito del progetto n_ToF e le controparti commerciali evidenziandone i miglioramenti. Inoltre viene presentato lo studio, effettuato alla facility GELINA, della sensibilità ai neutroni del nuovo C_6D_6 e la ricerca di difetti costruttivi.

Infine è mostrato come i nuovi rivelatori hanno una sezione d'urto per la cattura di neutrone molto bassa e una presenza minima di contaminanti dovuti ai materiali che li compongono.

A Maria, Bice e Giuliana

Indice

Introduzione	9
1 Reazioni nucleari indotte da neutroni presso la facility n_ToF	11
1.1 Le reazioni indotte da neutroni	11
1.2 Motivazioni fisiche	12
1.3 Illustrazione della facility	14
1.4 La tecnica del tempo di volo	15
2 Il rivelatore C_6D_6	17
2.1 Caratteristiche generali	17
2.2 Struttura dei nuovi rivelatori C_6D_6	18
2.3 Vantaggi e svantaggi del C_6D_6	19
3 Analisi dati	21
3.1 La facility GELINA	21
3.2 Grandezze misurate e selezione dati	22
3.3 Calibrazione energetica dei rivelatori C_6D_6	23
3.4 Studio della sensibilità ai neutroni	26
4 Conclusioni	31
Bibliography	33

Introduzione

Lo studio dell'interazione dei neutroni con la materia è sempre stato di grande interesse sia teorico che pratico.

Sino ad ora la maggior parte dei dati sperimentali riguarda lo studio delle basse energie, indicativamente nell'ordine di grandezza del termico. Per ovviare a questa mancanza di dati sperimentali è stata messa a punto presso il CERN di Ginevra la facility n_ToF (acronimo di neutron time of flight) che studia l'interazione di un fascio di neutroni pulsato, con energie comprese fra il termico ed 1 GeV, con i nuclei di un materiale bersaglio. L'energia dei neutroni incidenti è misurata attraverso la tecnica del tempo di volo.

Le misure sono svolte da una collaborazione internazionale costituita da 31 istituzioni di 15 paesi diversi. Il gruppo italiano che partecipa a tale collaborazione è formato da 14 ricercatori delle Sezioni dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) e delle università di Bologna, Catania e Trieste, dei Laboratori Nazionali di Legnaro dell'INFN e dell'agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA).

Nell'ambito delle misure di cattura neutronica radiativa è di fondamentale importanza che i rivelatori utilizzati siano estremamente insensibili ai neutroni, in modo da non dare luogo ad eventi di cattura o di diffusione anelastica a seguito di diffusione elastica sul campione che difficilmente possono essere riconosciuti. Già da 40 anni sono utilizzati rivelatori privi di idrogeno in particolare i C_6D_6 (dove D è il deuterio, il composto è detto benzene deuterato). In questa tesi si studia il nuovo prototipo del rivelatore C_6D_6 che è stato espressamente costruito dal gruppo italiano di n_ToF prestando particolare attenzione alla sua sensibilità ai neutroni.

Una breve illustrazione della facility n_ToF è esposta nel primo capitolo, nel secondo capitolo è presente un'illustrazione degli scintillatori liquidi organici ed in particolare del nuovo C_6D_6 . Nel terzo capitolo sono presentate le misure effettuate presso la facility GELINA dei laboratori dell'IRMM situati a Geel (Belgio) a cui seguono le conclusioni da esse tratte.

Capitolo 1

Reazioni nucleari indotte da neutroni presso la facility n_ToF

In questo capitolo viene brevemente illustrata la facility n_ToF ubicata al CERN di Ginevra, presentando uno schema sintetico degli obiettivi del progetto, delle misure possibili e della fisica coinvolta. Per descrizioni dettagliate si rimanda ad un articolo di tipo generale pubblicato dal gruppo n_ToF[1].

1.1 Le reazioni indotte da neutroni

I neutroni non posseggono carica elettrica, per questo motivo non sono soggetti all'interazione Coulombiana con protoni ed elettroni, quindi le reazioni con la materia avvengono essenzialmente attraverso l'interazione forte. A causa del corto raggio di questa forza (nell'ordine di 10^{-13} cm) e del fatto che la materia è costituita in gran parte da spazio vuoto non è una sorpresa che queste interazioni siano molto rare e di conseguenza il neutrone sia una particella molto penetrante.

Ci sono due tipi principali di reazioni indotte: *diffusione* e *cattura*. Nelle reazioni di diffusione il neutrone può variare energia e velocità ma lascia invariato il numero di protoni e neutroni del nucleo bersaglio, è detta elastica quando si conserva l'energia cinetica totale di neutrone e nucleo bersaglio mentre è detta anelastica quando il nucleo dopo l'interazione risulta essere in uno stato eccitato ed emette un γ , in quest'ultimo caso la somma dell'energia cinetica finale di neutrone e nucleo risulta inferiore a quella iniziale.

La cattura del neutrone da parte del nucleo bersaglio può portare a vari tipi di emissioni: fotoni, particelle cariche o altri neutroni oppure può anche portare alla fissione del nucleo.

Per nuclei leggeri risultano predominanti fenomeni di diffusione e di cattura radiativa o con emissione di particelle (principalmente protoni o particelle α) mentre per nuclei pesanti la fissione è l'effetto dominante. Dal momento che la sezione d'urto della cattura dipende, a basse energie, dall'inverso della velocità anche l'energia del neutrone incidente risulta rilevante per determinare il tipo di reazione.

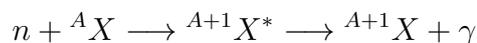
Il fascio utilizzato nell'ambito della facility n_ToF è costituito da neutroni con un ampio spettro energetico (dal termico al GeV), ciò permette di indagare su un gran numero di fenomeni che sono di importanza cruciale per l'astrofisica nucleare e le tecnologie connesse alla produzione di energia nucleare.

1.2 Motivazioni fisiche

Nucleosintesi stellare

Lo studio delle emissioni elettromagnetiche delle stelle giganti rosse già a metà del ventesimo secolo ha evidenziato la presenza di elementi pesanti con vita media molto inferiore a quella della stella, le linee di emissione si spiegano solo con la formazione degli elementi all'interno della gigante stessa.

I processi che portano alla formazione degli elementi nelle stelle sono essenzialmente due: la *fusione nucleare* e la *cattura neutronica*. La fusione nucleare è il processo che porta alla nucleosintesi di tutti elementi con numero atomico inferiore al ferro, dal momento che la fusione risulta energeticamente svantaggiosa tutti gli elementi successivi sono prodotti essenzialmente tramite processi di cattura di neutroni seguiti da decadimenti β . Il processo di cattura neutronica consiste nell'urto di un neutrone con un nucleo durante il quale il neutrone viene assorbito e si forma un isotopo in uno stato eccitato che decade emettendo raggi γ caratteristici dell'isotopo stesso:



l'isotopo, se instabile, può poi decadere β in un nuovo nucleo formando quindi un nuovo elemento.

I due maggiori processi di cattura che portano alla formazione di elementi fra ferro e bismuto sono la *rapid-capture* e la *slow-capture*. Il processo di *slow-capture* è caratteristico delle giganti rosse dove il flusso di neutroni è ridotto e il tempo che intercorre fra due catture successive è sufficiente perché il nucleo decada β , la formazione dei vari nuclidi dipenderà quindi dalla sezione d'urto di cattura neutronica comparata al rate di decadimento β . La *rapid-capture* si verifica in scenari esplosivi come le supernove quando il flusso di neutroni

è elevato e il tempo fra due catture successive è troppo breve perché il nucleo decada, si ottengono quindi nuclei ricchi di neutroni.

Alla facility n_ToF si possono misurare le sezioni d'urto di cattura studiando le reazioni dei neutroni con vari nuclei rivelando i γ emessi, i dati ottenuti potranno quindi essere usati per completare i modelli di evoluzione stellare e spiegare l'abbondanza di elementi pesanti nel nostro universo.

Struttura nucleare

La cattura di neutroni porta alla formazione di nuclei eccitati, lo studio delle loro emissioni di γ durante il loro decadimento offre la possibilità di indagare la struttura interna dei nuclei, i loro livelli energetici e le loro densità attraverso l'analisi delle risonanze.

Inoltre lo studio dei raggi γ emessi fornisce informazioni riguardo alla probabilità delle transizioni con energia anche inferiore a quella di separazione del neutrone.

Applicazioni tecnologiche

La fissione nucleare può essere una risposta alla crescente domanda energetica mondiale ma con i reattori attualmente in funzione rimane irrisolto il problema delle scorie prodotte dalle centrali. Una soluzione possibile per lo smaltimento delle scorie è la trasformazione degli elementi radioattivi a lunga vita media in elementi stabili o a vita media breve attraverso la cattura di neutroni. Tale processo, chiamato trasmutazione, consiste nella reazione di cattura dei neutroni con i nuclei degli elementi che costituiscono le scorie ed è efficiente se le sezioni d'urto per la reazione hanno valori adeguati. Risulta chiaro la necessità di conoscere le sezioni d'urto di cattura per gli elementi che costituiscono le scorie.

Un altro campo di indagine è la possibilità di far fissionare elementi transuranici nei reattori di quarta generazione al fine sia di aumentare l'efficienza del combustibile sia di ridurre le scorie prodotte.

1.3 Illustrazione della facility

La facility n_ToF del CERN di Ginevra (vedi figura 1.1) è stata costruita per produrre un fascio di neutroni pulsato ad alta intensità e con uno spettro energetico che vada dalle energie termiche (~ 26 meV) ad energie molto alte (~ 1 GeV). I neutroni sono prodotti attraverso un processo di spallazione di un impulso di $7 \cdot 10^{12}$ protoni accelerati fino a 20 GeV incidente su un elemento con elevato numero di massa. Tale processo determina un impulso di neutroni molto intenso. Poiché questo processo non produce direttamente l'intero spettro energetico richiesto ma neutroni di alta energia, viene interposto un moderatore che aumenta il numero di neutroni a bassa energia attraverso urti successivi. Tale moderatore è in generale è un materiale molto ricco di idrogeno (nell'ambito di n_ToF viene utilizzato $H_2O + 1.28\%$ di H_3BO_3).

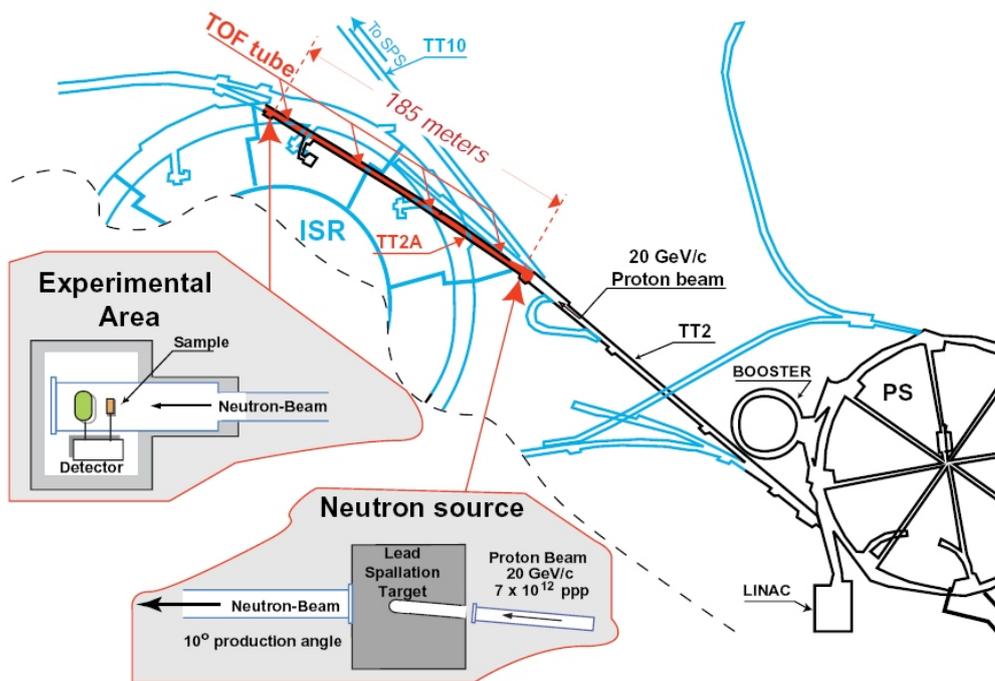


Figura 1.1: Schema della facility n_ToF al CERN

Uno dei grossi vantaggi della produzione per spallazione è l'elevato flusso istantaneo di neutroni che comporta una breve durata delle misure. Ciò rende questo metodo molto adatto per misure con elementi radioattivi con vita media anche breve, molto importanti nell'ambito dello studio sulla fissione, in quanto il contributo dovuto alla radioattività del bersaglio è largamente

ridotto rispetto ad altre facility. Il fascio di protoni è pulsato con frequenza di 1,2 Hz (o multipli) e durata di 7 nanosecondi, questo fatto porta alla possibilità di eseguire misure di tempi di volo per i neutroni prodotti con precisioni molto alte e quindi alla conoscenza delle loro energie.

Lungo la linea del fascio è posto un magnete che devia le particelle cariche generatesi nella spallazione che inquinerebbero i risultati e anche due collimatori. Di quello situato a 178 metri dal punto di spallazione è possibile scegliere il diametro (18mm per esperimenti di cattura o 80mm per esperimenti di fissione). L'area sperimentale inizia a 182 metri dal punto di produzione del fascio, i neutroni che arrivano in tale zona (percorrendo un tubo sottovuoto) colpiscono un bersaglio producendo le reazioni desiderate. I prodotti delle reazioni sono rivelati da diversi tipi di rivelatori: solidi come il BaF_2 , gassosi per esperimenti di fissione o liquidi contenenti C_6D_6 (dove D sta per deuterio).

1.4 La tecnica del tempo di volo

La tecnica del tempo di volo viene usata per determinare la velocità di un neutrone misurando il tempo che impiega a percorrere una distanza nota, quindi si ha:

$$v = L/ToF$$

dove L è la base di volo e ToF è il tempo impiegato per percorrerla (Time of Flight).

Il tempo viene misurato fra l'istante T_0 in cui il fascio di neutroni è prodotto e l'istante T_s in cui colpisce il bersaglio, viene inoltre considerato un offset dovuto per la maggior parte a differenze della lunghezza dei cavi che viene valutato con l'utilizzo di γ prodotti durante la spallazione.

Una volta trovata la velocità si può risalire all'energia cinetica attraverso la formula:

$$E_n = mc^2(\gamma - 1)$$

dove γ è il fattore di Lorentz $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$

La risoluzione energetica è data in prima approssimazione da:

$$\frac{\Delta E_n}{E_n} = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2}$$

dove Δt e ΔL sono le incertezze delle misure del ToF e della base di volo. È chiaro quindi come sia preferibile avere basi di volo grandi a parità di Δt e ΔL .

In fig. 1.2 è presente il rapporto $\frac{\Delta E_n}{E_n}$ in funzione dell'energia per la facility n_ToF al CERN.

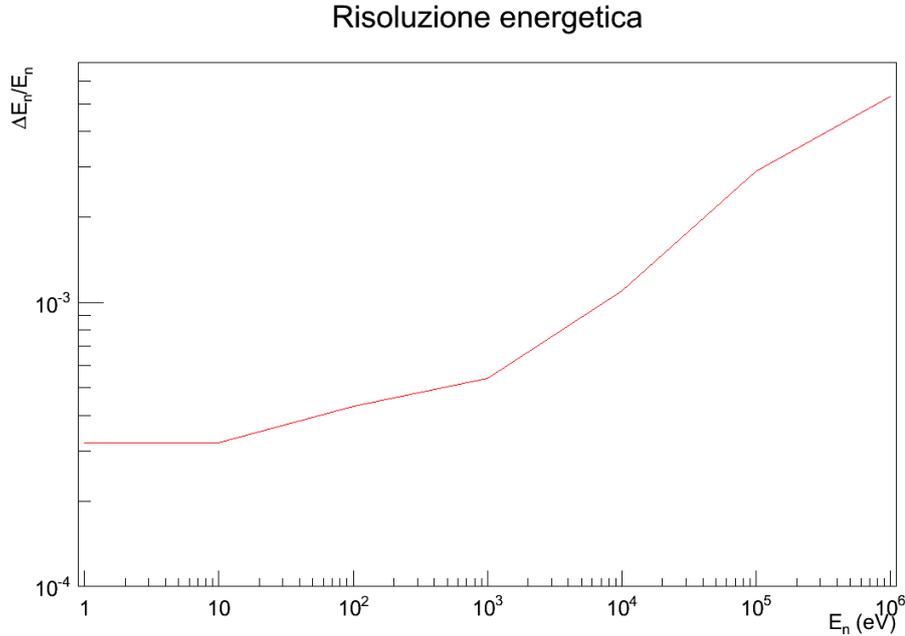


Figura 1.2: Risoluzione energetica della facility n_ToF

I γ prodotti durante la spallazione dopo aver percorso la base di volo in un tempo t_γ vanno a colpire i rivelatori accecandoli per un tempo durante il quale chiaramente qualsiasi segnale viene perso, questo fenomeno ha il nome di γ -flash. I segnali persi sono quelli relativi ai neutroni ad alte energie, in quanto sono quelli più veloci, questo pone quindi una soglia energetica massima per i neutroni, l'impiego dei nuovi scintillato contenenti C_6D_6 ha visto la riduzione di questo tempo permettendo quindi un innalzamento della soglia di energia misurabile.

Il γ -flash può altresì essere utilizzato per ricostruire il ToF reale, correggendo la discrepanza fra il segnale di trigger e la produzione dei neutroni, a partire da quello misurato ponendo:

$$ToF_{reale} = ToF_{misurato} - t' + t_\gamma$$

dove t' è l'istante in cui si ha il γ -flash nel rivelatore con il ToF misurato, $t_\gamma = L/c$ con L base di volo e c velocità della luce. In questo modo si ottiene un nuovo istante di start del tempo di volo che avrà il γ -flash nel punto corretto.

Capitolo 2

Il rivelatore C_6D_6

Nell'ambito della facility n_ToF si è interessati a rivelare i fotoni prodotti dall'interazione fra i neutroni ed il bersaglio, i rivelatori utilizzati nello specifico sono: un *Total Absorption Calorimeter* (TAC) costituito da 40 rivelatori di BaF_2 coprenti un angolo solido di quasi 4π e due scintillatori liquidi contenenti C_6D_6 (benzene deuterato) [2]. In questo lavoro ci si è concentrati sul nuovo C_6D_6 , per maggiori dettagli a proposito del TAC si rimanda all'articolo[3].

2.1 Caratteristiche generali

La rivelazione di γ in uno scintillatore organico avviene attraverso tre passaggi:

- il γ attraversa il liquido scintillatore, nel nostro caso il C_6D_6 , producendo tramite una serie di interazioni successive, per effetto Compton e per produzione di coppie, degli elettroni secondari (per energie inferiori ai 2MeV la produzione di coppie risulta trascurabile, per energie maggiori assume sempre maggiore importanza)
- gli elettroni prodotti cedono la loro energia cinetica al materiale eccitando atomi e molecole i quali diseccitandosi emettono a loro volta fotoni
- i fotoni sono trasmessi ad un fotomoltiplicatore nel quale sono convertiti in una corrente poi amplificata da un sistema di moltiplicazione di elettroni

La difficoltà principale riguardo alla realizzazione di rivelatori per reazioni (n,γ) è la necessità che siano idealmente insensibili ai neutroni diffusi dal ber-

saglio che possono anche superare di un fattore 10^4 quelli assorbiti dallo stesso, in modo da non dare luogo a dei falsi positivi[4]. Recentemente i risultati migliori sono stati ottenuti con scintillatori liquidi hydrogen-free dapprima con quelli contenenti C_6F_6 successivamente con i C_6D_6 in questione.

Durante la costruzione particolare cura è stata data alla scelta dei materiali che compongono il nuovo rivelatore per evitare catture di neutroni nelle sostanze che li compongono. Oltre alle caratteristiche tecniche durante la costruzione del nuovo rivelatore si è mirato altresì alla durata nel tempo e alla sicurezza in quanto il C_6D_6 è altamente infiammabile. Visto l'uso di voltaggi elevati applicati al fotomoltiplicatore è stato necessario costruire il rivelatore in modo che tutte le componenti fossero resistenti al benzene. I prototipi costruiti dal gruppo italiano di n_ToF sono in funzione dal 2012 e non si sono ancora verificate perdite del liquido [5].

2.2 Struttura dei nuovi rivelatori C_6D_6

Il nuovo rivelatore è realizzato interamente in fibra di carbonio (a differenza dei rivelatori commerciali che hanno parti in alluminio), la cella contenente il liquido ha forma cilindrica che termina con un cono a 45° che ha funzione sia di volume attivo sia di guida per la luce. Il volume del liquido è di 1 litro più un 4% aggiuntivo che permette l'espansione termica. Internamente le pareti sono dipinte con una vernice riflettente per limitare la fuoriuscita dei fotoni attraverso di esse.

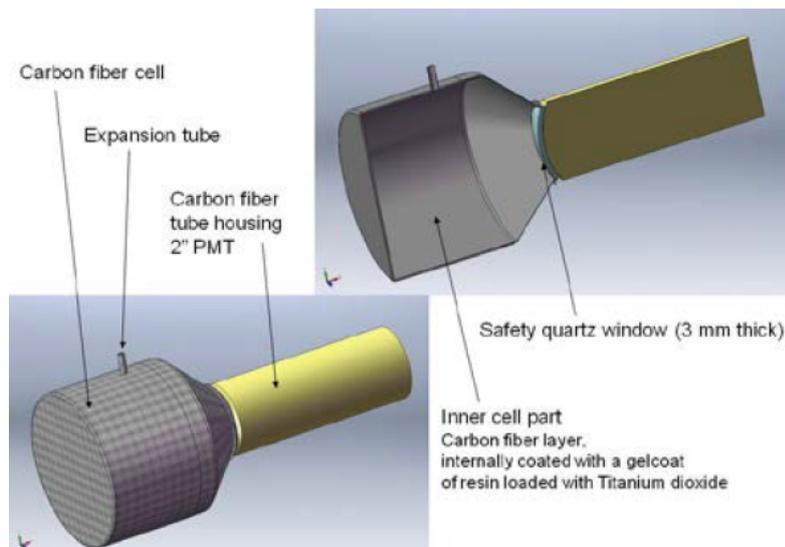


Figura 2.1: Schema sintetico del nuovo rivelatore C_6D_6 .

Sono state realizzate due versioni per quanto riguarda la finestra di quarzo che porta al fotomoltiplicatore, una con spessore di 2 mm e una più recente da 0.8 mm, entrambe più sottili delle finestre dei precedenti rivelatori (che presentavano spessori superiori ai 3mm). Dal momento che parte della sensibilità ai neutroni dipende dalle dimensioni della finestra ci si attende una significativa riduzione. Il fotomoltiplicatore usato è un 9829QB ET Enterprises.

2.3 Vantaggi e svantaggi del C_6D_6

Uno dei problemi principali di questo tipo di rivelatori è il dead time dovuto al γ -flash, ovvero ai fotoni prodotti assieme ai neutroni nel bersaglio di spallazione che si sovrappone al segnale dei neutroni più energetici e che quindi restringe il range energetico ponendo un limite massimo all'energia dei neutroni misurabili. Da esperienze in laboratorio è risultato che il recovering time del nuovo C_6D_6 risulta essere decisamente inferiore rispetto ai suoi predecessori, inoltre può essere migliorato ulteriormente lavorando ad un voltaggio minore. Ciò comporta la possibilità di effettuare analisi su neutroni di energie più elevate.

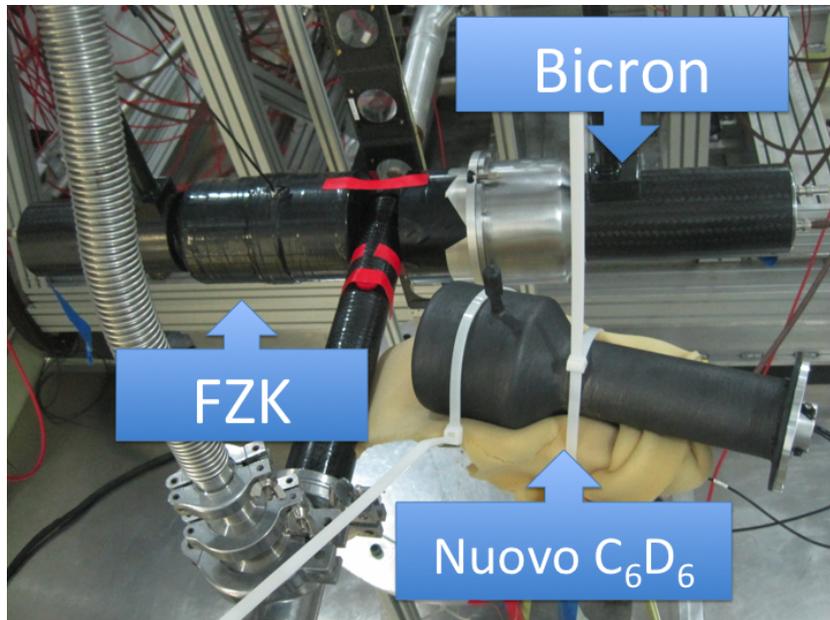


Figura 2.2: Nella foto si può osservare il rivelatore C_6D_6 durante l'allestimento della facility di analisi a GELINA assieme al precedente prototipo FZK realizzato dal gruppo tedesco ed un rivelatore commerciale della Bicron.

La risoluzione energetica si è studiata attraverso l'esposizione ad una fonte di γ nota ovvero ^{88}Y ($E_\gamma = 898$ e 1836 keV), la risoluzione del nuovo C_6D_6 è risultata leggermente inferiore rispetto a quella del rivelatore commerciale Bicron a causa del maggior volume del liquido. In fig. 2.3 è mostrato lo spettro energetico della sorgente γ per il nuovo prototipo (INFN-Legnaro) insieme a quello dei due rivelatori usati in passato (il FZK costruito da una collaborazione tedesca e il rivelatore commerciale della Bicron).

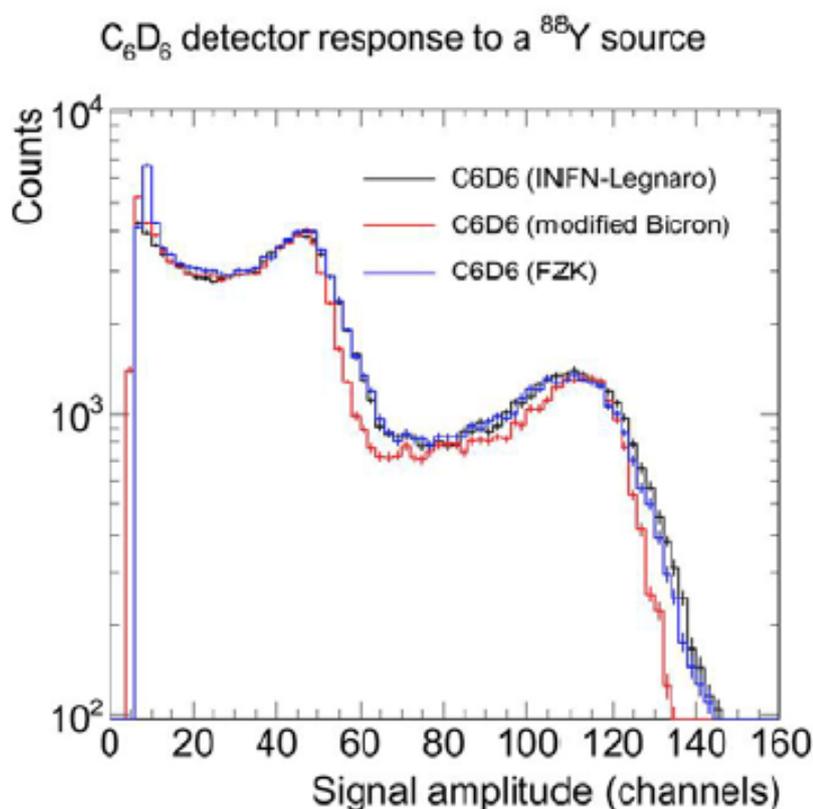


Figura 2.3: Segnali ottenuti dall'esposizione dei differenti rivelatori a ^{88}Y .

Per ricercare difetti di costruzione ma soprattutto eventuali impurità contenute nelle componenti che possano dare una sensibilità indesiderata ai neutroni sono state svolte ulteriori misure, di questo si occupa questa tesi.

Capitolo 3

Analisi dati

Questa ulteriore analisi sul rivelatore è stata svolta a Geel (Belgio) presso il IRMM (Institute for Reference Materials and Measurements) nell'ambito della facility GELINA bersagliando il nuovo rivelatore C_6D_6 con un fascio di neutroni e sfruttando sempre la tecnica del tempo di volo usata in n_ToF per la determinazione dell'energia. Tali misure servono per capire se nel rivelatore e nei materiali che lo compongono sono presenti elementi che catturando neutroni possono produrre fondi indesiderati.

3.1 La facility GELINA

La produzione di neutroni di GELINA si basa su un acceleratore lineare che produce un fascio pulsato di elettroni. Un tipico impulso di elettroni ha energia media di 100MeV e frequenza di 800 Hz, un successivo sistema di compressione porta la riduzione dell'impulso ad 1 ns. Gli elettroni accelerati incidono su un bersaglio di uranio producendo Bremsstrahlung, i γ ottenuti vanno incontro ad ulteriori reazioni, tipicamente (γ, f) , che producono i neutroni. Ciascun impulso di elettroni produce $4,3 \cdot 10^{10}$ neutroni.

Nella stanza dove il flusso è prodotto sono presenti due rivelatori di neutroni di BF_3 indicati con CM1 e CM3. Alla facility GELINA sono disponibili diverse basi di volo, per le prove in questione è stata usata quella da 10 metri in quanto non era richiesta una misura ad alta risoluzione energetica. Prima del bersaglio è posizionato un rivelatore di flusso che misura appunto il flusso di neutroni incidenti, dietro al bersaglio sono posizionati due C_6D_6 (rivelatori commerciali prodotti dalla Bicron) a 135° rispetto alla direzione del fascio che misurano i γ prodotti (sono indicati come ADC1 e ADC2).

La risoluzione energetica per la facility GELINA è riportata in fig. 3.1:

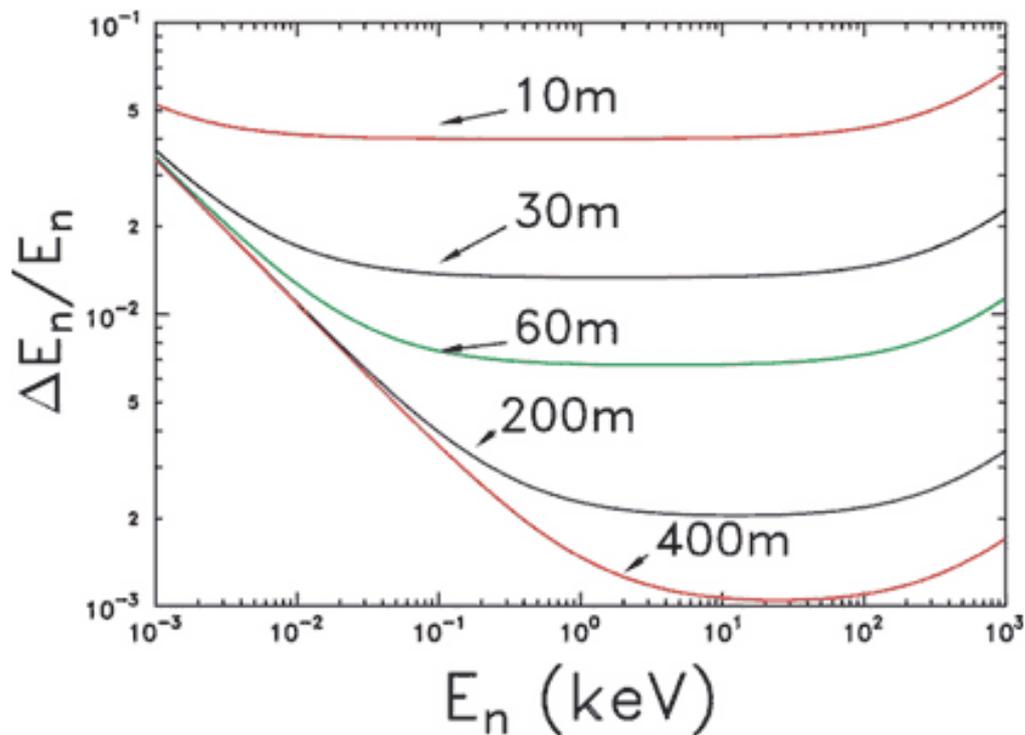


Figura 3.1: Risoluzione energetica della facility GELINA a seconda della lunghezza della base di volo utilizzata.

3.2 Grandezze misurate e selezione dati

In un primo momento sono state effettuate misure sul fascio di neutroni prodotto al fine di valutarne la stabilità ed eventualmente rigettare i periodi di misura in cui si sono evidenziate anomalie in esso. In ogni periodo di misura si sono rivelate le grandezze riportate in tabella 3.1.

Grandezza misurata	Descrizione
RunT	durata totale della misura
ADC1 e ADC2	conteggi dei γ sui C_6D_6 a 135°
TotC	somma dei conteggi sui due rivelatori
CM1 e CM3	conteggio sui due rivelatori BF_3 per neutroni
AcoF	conteggi del rivelatore di flusso
T_0	numero di pacchetti registrati

Tabella 3.1: Grandezze misurate per il rigetto dati

Il controllo sulla stabilità del flusso è stato svolto valutando una serie di rapporti riportati nella tabella 3.2. Si è assunta una distribuzione gaussiana, in quanto dovrebbero essere costanti, e si è valutata la deviazione standard rispetto alla media. In tabella è inoltre riportata la deviazione standard massima oltre alla quale la misura è stata rigettata.

Rapporto	Descrizione	Max dev.
T_0/RunT	frequenza degli impulsi	1%
TotC/T_0	conteggi sui due rivelatori per ogni impulso	3%
$\text{CM3}/T_0$	conteggi sul rivelatore CM3 per ogni impulso	3%
$\text{CM1}/\text{CM3}$	rapporto fra i conteggi sui due rivelatori per neutroni	3%
$\text{ADC1}/\text{ADC2}$	rapporto fra i conteggi sui due rivelatori	2%
$\text{ADC1}/\text{CM3}$	rapporto fra il rivelatori 1 e il rivelatore CM3	5%
$\text{CM1}/\text{CM3}$	evidenzia la forma del fascio	3%
$\text{AcoF}/\text{CM3}$	conteggi del flusso rispetto al rivelatore CM3	3%

Tabella 3.2: Rapporti presi in esame per il rigetto delle misure

Durante la prova sono stati considerati per completezza altri rapporti qui non riportati in quanto concettualmente equivalenti.

3.3 Calibrazione energetica dei rivelatori C_6D_6

La calibrazione energetica è stata effettuata attraverso l'esposizione a diverse sorgenti γ note sfruttando il Compton edge ovvero l'energia massima che il γ può cedere all'elettrone per la conservazione dell'impulso, che è data da:

$$T_{max} = \frac{2E_\gamma^2}{m_e c^2 + 2E_\gamma}$$

Per maggiori dettagli si rimanda a libri di testo di fisica nucleare[6].

Sono stati usati gli isotopi in tabella, di cui sono riportati l'energia del γ emesso e l'energia del Compton edge associato:

Isotopo	E_γ (keV)	$E_{C.edge}$ (keV)
^{137}Cs	662	478
^{54}Mn	835	639
^{65}Zn	1116	908
^{232}Th	2614	2382
$^{238}\text{Pu} + ^{13}\text{C}$	6130	5885

Tabella 3.3: Isotopi usati per la calibrazione

Dal momento che le prove sono state effettuate in un arco di tempo piuttosto ampio ad ogni misura è stato associato un fattore di guadagno ricavato sfruttando il Compton edge del ^{232}Th ($t_{1/2}(\text{Th}) = 1,40 \cdot 10^{10}$ years). Sono state prese come riferimento le misure effettuate il 6 maggio 2013 e si è imposta la sovrapposizione dei Compton edge ottenendo così dei fattori di guadagno in base alla data in cui sono state svolte le misure. In fig. 3.2 e 3.3 sono riportati i grafici prima e dopo la correzione per l'ADC1 (per l'ADC2 i grafici sono analoghi non sono stati riportati per evitare ripetizioni).

I fattori di guadagno ottenuti sono riportati in tabella:

Data	Gain ADC1	Gain ADC2
6 maggio	1	1
8 maggio	1,013	1,035
17 maggio	1,000	0,948
21 maggio	1,005	0,954
24 maggio	0,953	0,951
27 maggio	0,945	0,951

Tabella 3.4: Fattori di guadagno rispetto alla data

A seconda della data della misura presa in considerazione si ha un fattore di guadagno per ogni ADC. Per misure che durano diversi giorni si è fatta una media aritmetica fra i fattori dei giorni considerati.

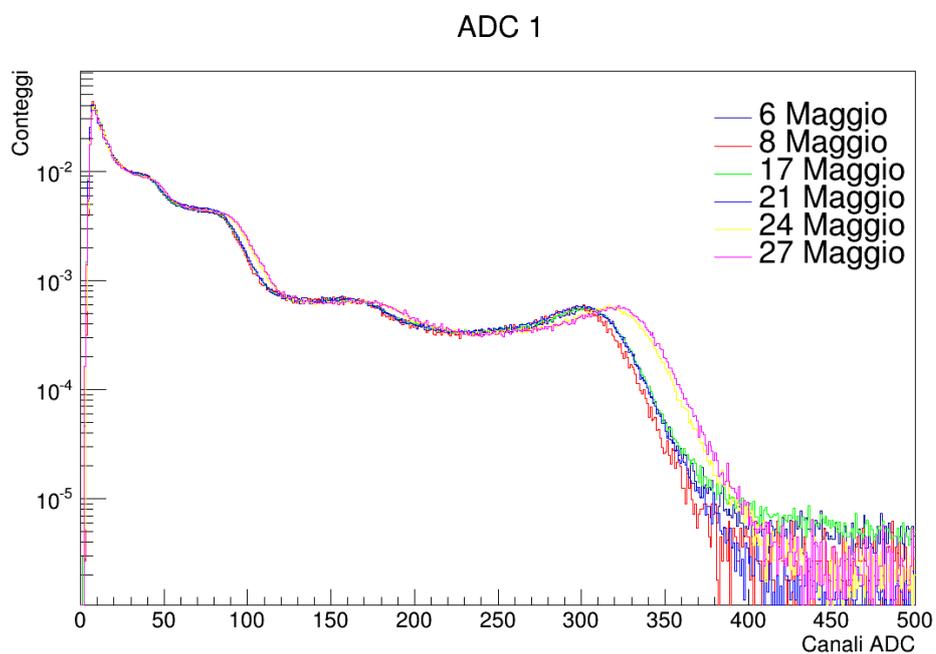


Figura 3.2: Compton edges prima della calibrazione

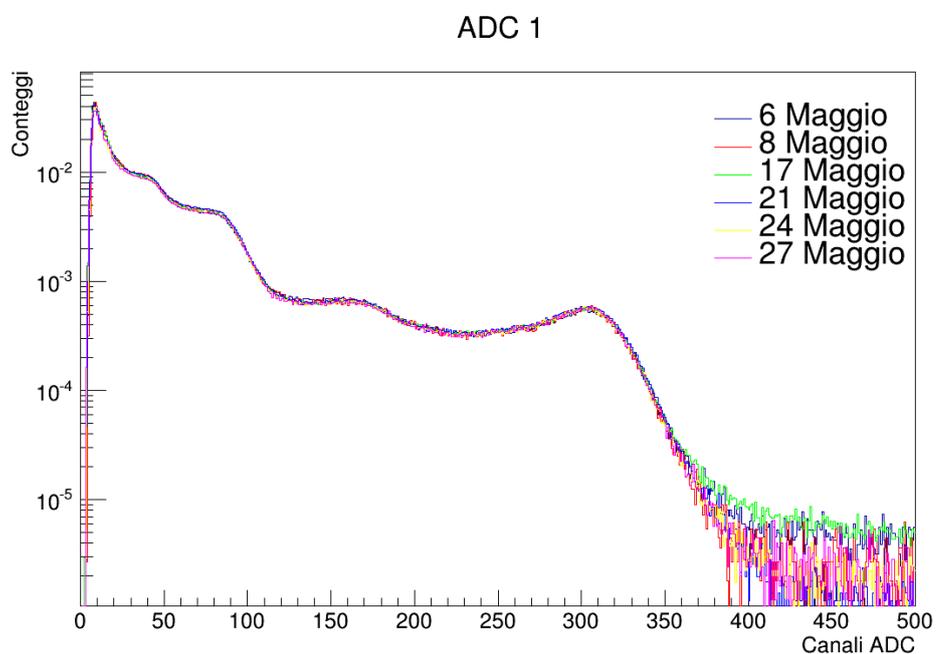


Figura 3.3: Compton edges dopo la calibrazione

Per quanto riguarda la correzione sul ToF utilizzando il γ -flash si è calcolato il rapporto L/c utilizzando la base di volo presa in esame ovvero $L=12,9484$ ottenendo un $t_\gamma=43$ ns mentre t' si è ricavato dallo spettro dei tempi di volo essere $t'=74$ ns. Esprimendo le grandezze in nanosecondi la correzione è riassunta dalla formula seguente:

$$ToF_{reale} = ToF_{misurato} - 31ns$$

3.4 Studio della sensibilità ai neutroni

La sensibilità ai neutroni della struttura del nuovo rivelatore C_6D_6 è un parametro fondamentale in quanto progettato per misurare γ frutto di cattura radiativa e lavorare in ambienti con un alto numero di neutroni diffusi. Risulta necessario quindi che la sezione d'urto per la cattura dei neutroni diffusi sia molto bassa, nella facility GELINA è stata studiata appunto questa sezione d'urto attraverso il confronto fra il prototipo di rivelatore privo del benzene deuterato e un bersaglio di piombo e la ricerca di risonanze.

Sono stati conteggiati i γ sui rivelatori ADC1 e ADC2 in tre situazioni:

- Open Beam senza alcun bersaglio, per ottenere una misura dei fondi ambientali quando è presente il fascio, indipendentemente dal bersaglio considerato
- utilizzando un bersaglio di ^{208}Pb come esempio di elemento con bassa sezione d'urto di cattura neutronica e per indagare l'effetto della presenza di un bersaglio sul fascio
- utilizzando come bersaglio il nuovo rivelatore C_6D_6 privo del benzene, per misurare la cattura neutronica data dalla struttura del rivelatore

quindi sono stati normalizzati rispetto al numero di neutroni misurati dal rivelatore CM3.

In fig. 3.4 sono riportati i conteggi effettuati con il bersaglio piombo ed il nuovo C_6D_6 in funzione dell'energia dei neutroni, ad entrambi è stato sottratto l'open beam.

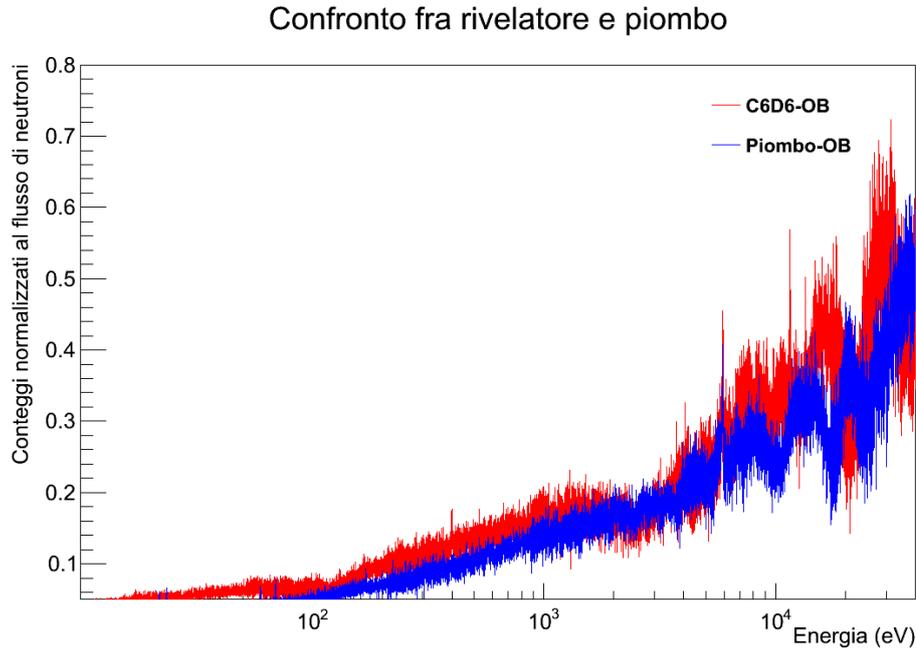


Figura 3.4: Si può notare come gli spettri di volo dei due bersagli siano comparabili.

Il passo successivo è stato ricercare eventuali contaminanti del rivelatore che diano sensibilità ai neutroni indesiderata, si sono ricercate quindi risonanze che comparissero nei dati della misura con il nuovo prototipo di C_6D_6 come bersaglio, ma non in quelli con il bersaglio di piombo.

Sono state individuate 4 risonanze di cui sono riportate le energie in tabella 3.5.

Nome	Energia (eV)
Ris1	400 ± 2
Ris2	11510 ± 60
Ris3	13450 ± 40
Ris4	24000 ± 200

Tabella 3.5: Risonanze

Si è quindi proceduto ricercando quali materiali inducono tali risonanze concentrandosi su nuclei relativamente leggeri in quanto nuclei pesanti produrrebbero un numero di risonanze elevato mentre quelle riscontrate sono poche, la ricerca è stata effettuata tramite il software JANIS[7]. Inoltre vista

l'alta probabilità che questi elementi siano contaminanti delle colle usate per sigillare il benzene si è orientata la ricerca verso le sostanze utilizzate per la produzione di colle in particolare il cloro.

Una volta individuati i candidati possibili si sono confrontate le risonanze individuate sui grafici con le sezioni d'urto per le reazioni (n,γ) disponibili sul National Nuclear Data Center[8] ricercando una corrispondenza con le risonanze del materiale in esame.

Le figure 3.5, 3.6 e 3.7 mostrano i dati di cattura in funzione dell'energia dei neutroni incidenti. Si osservano le quattro risonanze elencate in precedenza insieme alle risonanze dei possibili candidati inquinanti: cloro, titanio e potassio.

La possibilità della presenza di cloro nelle colle utilizzate per sigillare la camera contenente il benzene ha spinto a confrontare le risonanze con quelle del ^{35}Cl che rappresenta il 75,77% del cloro presente in natura. Dal grafico 3.5 si può notare come vi sia una corrispondenza con la prima risonanza individuata a 400 eV.

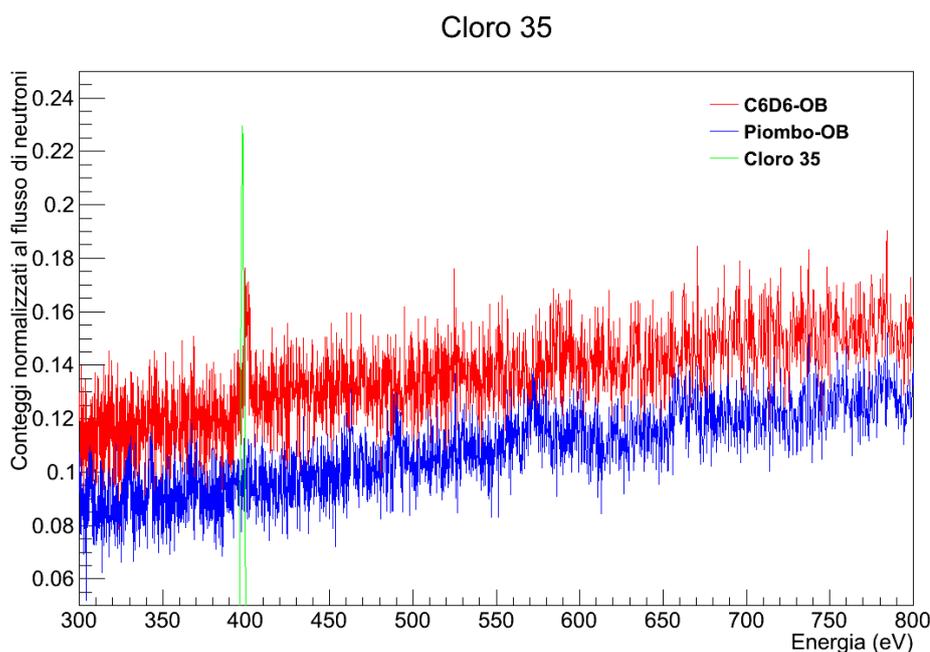


Figura 3.5: Il ^{35}Cl , tipico contaminante delle colle, spiega la risonanza 1 a 400 eV.

Il ^{48}Ti rappresenta il 73,72% del titanio presente in natura, come si può notare dalla fig. 3.6 la sua presenza spiega a meno di un leggero shift energetico le risonanze 2,3,4. Il titanio è comunemente usato come pigmento bianco, è presente nella forma di biossido di titanio nella vernice che riveste internamente la cella in fibra di carbonio che contiene il benzene.

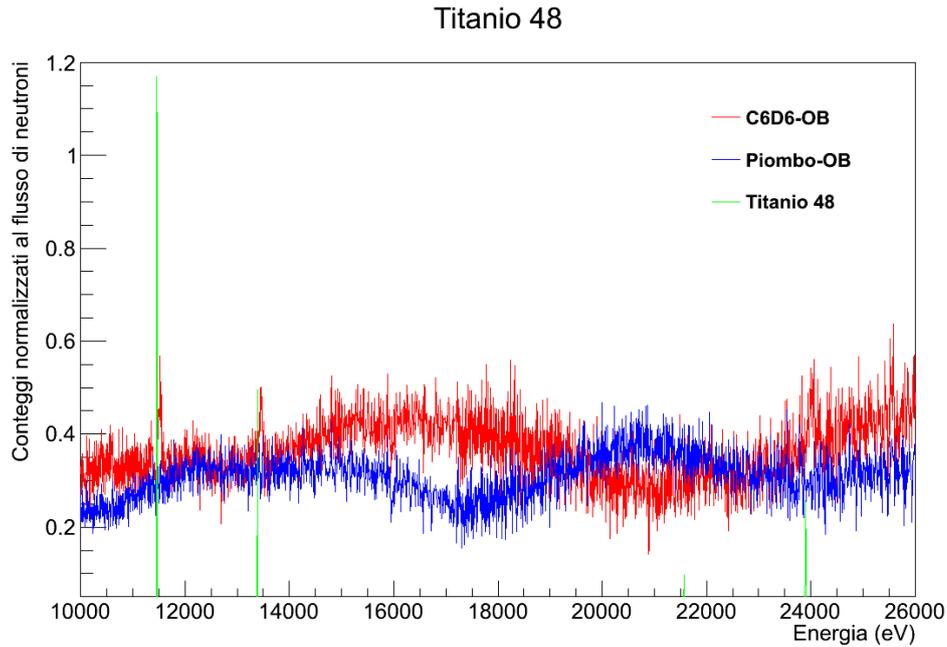


Figura 3.6: Confronto con il ^{48}Ti .

Nella grafico 3.7 è proposto un esempio di isotopo preso in considerazione, il ^{41}K (potassio), ma scartato seppur presenti una buona corrispondenza con una risonanza (nel suo caso è la terza a 13,450 eV). Il potassio è stato scartato in quanto non compaiono diverse risonanze con sezione d'urto più alta di quella dove si riscontra la corrispondenza, la più evidente è ad energia di 8500 eV.

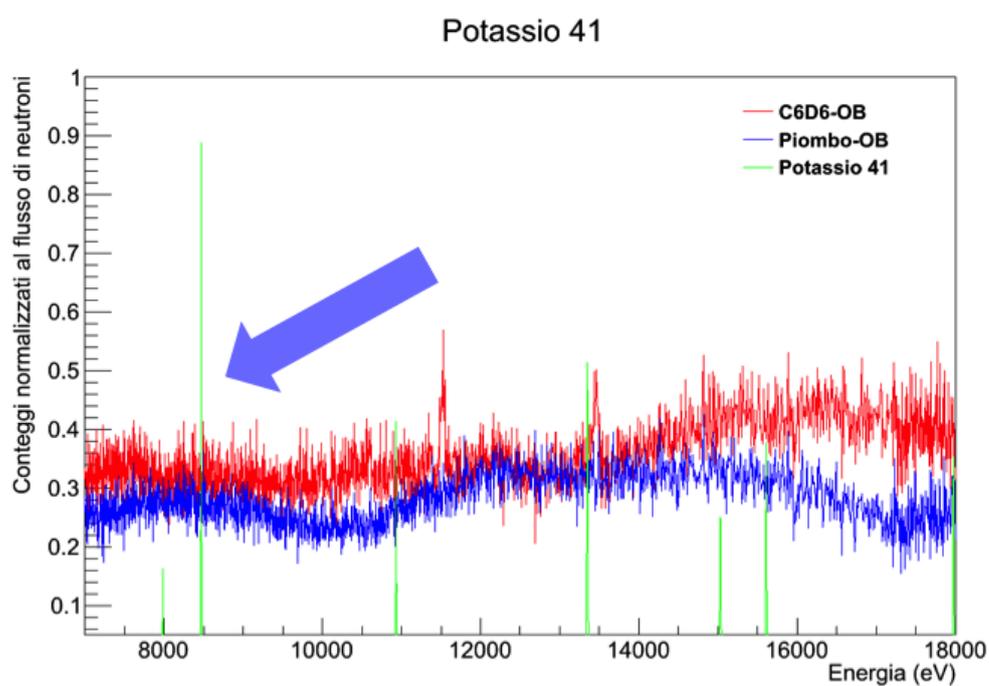


Figura 3.7: Confronto con il ^{41}K , esso è un esempio di isotopo che è stato scartato a causa della mancanza di risonanze con un'alta sezione di cattura (la freccia evidenzia la risonanza mancante).

Capitolo 4

Conclusioni

Le misure effettuate presso la facility GELINA sulla sensibilità ai neutroni della struttura dei nuovi rivelatori C_6D_6 costruiti dalla collaborazione n_ToF confermano la bassa sezione d'urto di questo tipo di rivelatore per reazioni di cattura neutronica radiativa. Come si può notare in fig. 3.4 la cattura da parte dei componenti del rivelatore risulta molto simile a quella del piombo che è un esempio di materiale avente bassa sensibilità ai neutroni.

I dati raccolti hanno rivelato la presenza di impurità nella struttura del rivelatore costituite da ^{35}Cl e ^{48}Ti con ogni probabilità presenti nelle colle e nella vernice usate, la loro quantità è comunque minima. Queste analisi possono essere utilizzati in primo luogo per correggere le future misure effettuate con il nuovo rivelatore C_6D_6 presso la facility n_ToF, in secondo luogo per migliorare la procedura costruttiva e la scelta dei materiali utilizzati per i futuri rivelatori.

In definitiva nuovi rivelatori hanno mostrato una bassa sensibilità ai neutroni, inoltre vista la migliore risposta al γ -flash rispetto ai rivelatori commerciali della Bicron e ai prototipi precedenti FZK è giustificato il loro utilizzo nella facility n_ToF ed in generale per le misure di cattura neutronica radiativa.

Attualmente lo studio sui nuovi rivelatori non è ancora terminato ma i buoni risultati hanno spinto alla produzione di altri rivelatori basati sul prototipo per le prossime campagne di raccolta dati presso n_ToF ed in altri laboratori.

Bibliografia

- [1] C.Guerrero et al. *Performance of the neutron time-of-flight facility n_ToF at CERN*. The European Physical Journal A (2013) 49:27.
- [2] A. Borella et al. *The use of C_6D_6 detectors for neutron induced capture cross-section measurements in the resonance region*. Nuclear instruments & methods in physics research A 577 (2007) 626-640.
- [3] C.Guerrero et al. *The n_TOF Total Absorption Calorimeter for neutron capture measurements at CERN*. Nuclear instruments & methods in physics research A 608 (21 settembre 2009) 424-433.
- [4] R.Plug et al. *An optimised C_6D_6 detector for studies of resonance-dominated (n,γ) cross-section*. Nuclear instruments & methods in physics research A 496 (2003) 425-436.
- [5] P.F. Mastinu et al. *New C_6D_6 detectors: reduced neutron sensitivity and improved safety*. n_TOF-PUB-2013-002 (26 giugno 2013).
- [6] W.R. Leo *Techniques for nuclear and particle physics experiments* 53-62 . Springer-Verlag (1994).
- [7] www.oecd-nea.org/janis/
- [8] M.B. Chadwick et al. *ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data*. Nuclear Data Sheets vol. 112 (Dicembre 2011) 2887-2996.

