

Esperienza con rivelatori NaI(Tl) per misure
Compton in coincidenza

Contents

1	Valutazione di rischio da radiazioni	3
2	Programma di acquisizione	4
3	Parte I: Caratterizzazione della strumentazione	4
3.1	Accensione dell'NaI(Tl)	4
3.2	Ottimizzazione degli NaI(Tl)	4
3.2.1	Scelta della tensione di alimentazione V_{bias}	5
3.3	Caratterizzazione della catena di lettura	5
3.3.1	Forma del segnale	5
3.3.2	Ottimizzazione della formatura per il rivelatore da 2"	5
4	Impostazione della coincidenza e caratterizzazione dei rivelatori	6
4.1	Coincidenza del rivelatore <i>trigger</i> con se stesso	6
4.2	Coincidenza tra i due NaI(Tl)	7
4.3	Calibrazione energetica	8
4.4	Controllo per eventuali derive temporali	8
4.5	Misura delle efficienze intrinseche a 511 keV e degli angoli solidi	8
4.6	Andamento dell'efficienza con l'energia per il rivelatore 2"	10
5	Misura dell'Effetto Compton	11

Abstract

In questa esperienza si lavorerà con due rivelatori a scintillazione inorganici **NaI(Tl)**. Nella prima parte si caratterizza ed ottimizza il rivelatore NaI(Tl). Nella seconda parte si utilizza la tecnica di coincidenza tra i due rivelatori per studiare l'effetto Compton: l'andamento dell'energia del fotone diffuso e della sezione d'urto al variare dell'angolo di scattering, sfruttando la coincidenza tra i due γ da 511 keV emessi in coincidenza da una sorgente di ^{22}Na .

PREMESSA

Basi fondamentali per qualunque misura di fisica sperimentale sono:

- conoscerne lo scopo;
- conoscere le basi fisiche;
- farsi un'idea di come effettuare la misura e di quali strumenti possono essere necessari (rivelatore e catena elettronica di lettura del segnale);
- farsi un'idea di come funzionano gli strumenti che si utilizzeranno, chiedendosi prima di tutto che tipo di segnale/i vogliono in ingresso e che segnale/i rilasciano in uscita (analogico, digitale NIM/TTL). Guardare i manuali;
- ove possibile, prima di far partire la misura, **servirsi dell'oscilloscopio per osservare si segnali** e fare considerazioni preliminari;
- effettuare la misura, prendendo nota di tutte le grandezze che possono servire nell'analisi dei dati successiva;
- analizzare i dati, cercando confronti con previsioni e servendosi di grafici, eventualmente da fittare se esistono relazioni note a priori di cui si vogliono trovare i parametri;
- trarre conclusioni qualitative e quantitative.

1 Valutazione di rischio da radiazioni

Durante il laboratorio utilizzerete diverse sorgenti di radiazione. Provate a valutare, partendo dall'attività nota delle varie sorgenti che userete, a quale dose complessiva potrete essere esposti. Valutate anche eventuali accorgimenti per ridurla.

2 Programma di acquisizione

L'acquisizione è operata dal modulo **CAEN N957**.

Il programma per avviare l'acquisizione è **N957Demo** che produce in uscita il file *histo.dat*, ovvero un file di testo che riporta il contenuto di ciascun bin. Questo file costituirà quindi il dato da salvare e da analizzare per ciascuna misura, sviluppando programmi:

- per la visualizzazione del relativo spettro energetico;
- per l'analisi del medesimo (posizione, area, risoluzione energetica dei vari picchi).

3 Parte I: Caratterizzazione della strumentazione

Utilizzerete due rivelatori a scintillazione inorganici NaI(Tl), uno da 2", ed uno da 1", letti tramite PMT e collegati rispettivamente ad un amplificatore e ad un Amp&TiSCA (capirete poi perchè). Guardatevi i principi di funzionamento dei rivelatori ed il manuale dei vari strumenti.

3.1 Accensione dell'NaI(Tl)

Provate a farvi un'idea di come accenderlo, e, prima di farlo, chiedete conferma, per non danneggiare il rivelatore con mosse sbagliate. Le seguenti domande possono darvi suggerimenti.

1. Che tensione di alimentazione devo fornirgli? Positiva/negativa? Quanto?
2. Con cosa lo alimento (leggere il manuale dello strumento)? Che procedura devo seguire per accenderlo?
3. Che altri cavi ci sono in uscita dal rivelatore? Servono?
4. Posso guardare il segnale di uscita? come?
5. Il rivelatore ha bisogno di un preamplificatore esterno?

Una volta impostato tutto quello che serve per accenderlo e per guardarne il segnale, chiedete conferma, e poi accendetelo.

3.2 Ottimizzazione degli NaI(Tl)

Per utilizzare al massimo delle sue potenzialità questo strumento per misure di spettroscopia, va scelta una tensione di alimentazione ottimale.

3.2.1 Scelta della tensione di alimentazione V_{bias}

Per scegliere V_{bias} ottimale vanno svolte alcune misure, provate a pensare quali. Le seguenti domande vi possono aiutare.

- Perché la V_{bias} influisce sulle prestazioni del rivelatore?
- Su quali parametri in particolare?

Una volta scelta la tensione ottimale, impostare anche l'amplificatore in modo ottimale (in modo anche da non doverlo più cambiare in seguito).

3.3 Caratterizzazione della catena di lettura

Da quali strumenti è costituita la catena di lettura? Provate a fare uno schema...

3.3.1 Forma del segnale

Potete osservare la forma del segnale in punti diversi della catena di lettura.

1. In quanti e quali punti?
2. Che differenza vi aspettate tra i vari segnali?
3. Osservateli e prendete nota dei loro tempi t_{rise} e t_{decay} . Gli andamenti tornano con le aspettative?
4. Cambia qualcosa nel segnale in uscita dall'amplificatore al variare dei parametri di quest'ultimo?

3.3.2 Ottimizzazione della formatura per il rivelatore da 2"

La formatura del segnale è un punto importante perché influenza la qualità delle misure. Dovrete ottimizzare i parametri del formatore (amplificatore) in modo tale da:

1. riuscire a vedere nel vostro spettro energetico anche i fotoni di più alta energia che utilizzerete nella misura (che energia hanno?);
2. sfruttare al meglio la dinamica del vostro ADC per gli scopi di questa misura (cosa significa? A che energie sarete interessati?);
3. ridurre il contributo del rumore elettronico alla risoluzione energetica;
4. permettere di ottenere una buona coincidenza tra i rivelatori.

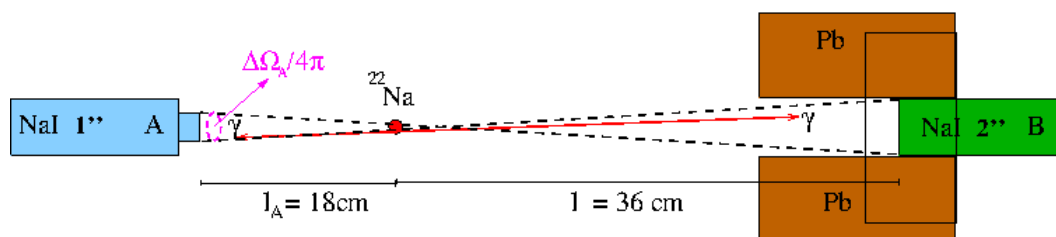


Figure 1: Disposizione sperimentale per l'impostazione della coincidenza tra i due rivelatori

Quali sono i parametri del formatore che influenzano i punti sopra? Esiste una relazione nota tra la risoluzione energetica e i parametri del formatore?

Svolgere misure e analizzarle per trovare la formatura ottimale, concentrandosi per il momento sui primi tre punti. Che sorgente di impulsi è meglio usare per poter isolare la sola componente elettronica alla risoluzione?

Una volta terminata questa parte, fissare i parametri del formatore a quelli ritenuti ottimali.

OSSERVAZIONE: è possibile che in seguito, per garantire il punto 4, qualcosa vada modificato. Si tratterà a quel punto di trovare il miglior compromesso tra una buona formatura dal punto di vista del rivelatore singolo, e l'esigenza di effettuare una misura in coincidenza.

4 Impostazione della coincidenza e caratterizzazione dei rivelatori

Il processo fisico che si vuole andare a studiare è lo scattering Compton subito da un fotone di 511 keV che incide su un bersaglio di piombo. Questo fotone, nella sorgente di ^{22}Na viene emesso simultaneamente e back-to-back ad un altro fotone da 511 keV. Per farlo si utilizza la tecnica di coincidenza tra due rivelatori NaI(Tl), in cui uno dei due viene usato come "trigger" e l'altro per rivelare il fotone scatterato. Perché e cosa significa fare una misura in coincidenza allo scopo della vostra esperienza?

Disporre i rivelatori secondo la Figura 1.

4.1 Coincidenza del rivelatore *trigger* con se stesso

Scopo: selezionare col rivelatore *trigger* la finestra energetica corrispondente al segnale che si vuole usare per "triggerare" la coincidenza. In questo modo, nel punto successivo, il gate aprirà l'acquisizione del secondo rivelatore solo quando il primo avrà rivelato un segnale con l'energia che avete

selezionato. La finestra energetica, una volta impostata, non dovrà più essere cambiata. Tutte le operazioni da fare qui riguardano solo il ramo di catena relativo al rivelatore *trigger*.

ATTENZIONE: quando si parla di misure di “coincidenza” il tempo di acquisizione dei due segnali cercati è fondamentale. I due γ sono emessi in simultanea, ma **le catene di elettronica possono introdurre ritardi**. Per altro i ritardi possono essere **diversi se osservati all’oscilloscopio o quando si passa attraverso il gate dell’MCA**.

Vi consiglio quindi, prima di tutto, di farvi un’idea preliminare della situazione e di eventuali accorgimenti da adottare osservando i due segnali all’oscilloscopio, ma di ottimizzare in modo fine la simultaneità controllando che la posizione del picco selezionato nello spettro non cambi. Se la sincronia tra il segnale di gate e quello da acquisire non è perfetta, succederà infatti che quest’ultimo verrà acquisito in modo non ottimale, e quindi la sua ampiezza sarà valutata in modo non corretto, causando uno spostamento del picco nello spettro).

4.2 Coincidenza tra i due NaI(Tl)

Scopo: ora che avete impostato la catena di lettura del rivelatore *trigger* tale che apra il gate solo in corrispondenza della finestra energetica selezionata, siete pronti ad impostare la **coincidenza col secondo rivelatore**.

ATTENZIONE: anche qui la **sincronia dei segnali è fondamentale** e le impostazioni/accorgimenti potrebbero essere diversi da prima, visto che si utilizza un secondo rivelatore con un suo ramo di catena elettronica, e quindi i ritardi potrebbero essere diversi. Potrebbe rendersi necessario utilizzare strumenti addizionali per manipolare i tempi....Quali? Come funzionano?

OSSERVAZIONE: una volta che l’MCA apre il gate, siete sicuri che il segnale acquisito dal secondo rivelatore sia solo quello voluto? Esiste possibilità di spurie? Mettete in atto eventuali accorgimenti e in seguito, osservando lo spettro acquisito, fate considerazioni ed eventuali correzioni.

Effettuare serie di misure variando l’angolo ed analizzarle per:

- verificare se la correlazione angolare osservata torna con quella attesa;
- ricavare l’andamento della risoluzione angolare.

4.3 Calibrazione energetica

Scopo: valutare la relazione tra la grandezza osservata nello spettro acquisito (CH) e l'energia (E), utilizzando quante più coppie (CH,E) possibile (ci sono più sorgenti a disposizione). Svolgere questa parte per entrambi i rivelatori.

Riflettere sui seguenti punti:

- Cosa riporta sull'asse x lo spettro misurato?
- Come potete fare per legare questa grandezza a quella fisicamente rilevante, ovvero l'energia rivelata?

Svolgere misure e analizzarle. Esistono righe aggiuntive (ad esempio dovute alla radioattività ambientale) che potete utilizzare?

*Al termine di questo punto avrete trovato la **curva di calibrazione**, che, in teoria, dovrebbe rimanere la stessa per tutte le misure successive.*

ATTENZIONE: questo è vero se non cambierete tensione di alimentazione e formatura, e ammesso che il guadagno del sistema rimanga stabile nel tempo, cosa che non è scontata.

4.4 Controllo per eventuali derive temporali

La presenza di eventuali derive nel tempo del segnale va verificata per tenere conto sulla valutazione di sistematiche e per apportare correzioni alle misure.

Svolgere misure e analizzarle per verificare la presenza di derive temporali su scale di tempi dell'ordine di qualche giorno. Provare a trovare motivazioni ed eventuali soluzioni se possibile (ad esempio: ripetere calibrazioni veloci prima di ogni misura potrebbe servire? Si possono apportare correzioni? Come?)

4.5 Misura delle efficienze intrinseche a 511 keV e degli angoli solidi

Scopo: Misura delle efficienze intrinseche a 511 keV ϵ_A e ϵ_B dei due rivelatori e delle frazioni di angolo solido di accettazione $\frac{\Delta\Omega_A}{4\pi}$, $\frac{\Delta\Omega_B}{4\pi}$ nella configurazione di Fig.1 e $\frac{\Delta\Omega_B}{4\pi}$ nella configurazione di Fig.2.

Riflettere sui seguenti punti:

- Che relazione c'è tra il numero di fotoni emessi dalla sorgente e quelli che incidono sul rivelatore?

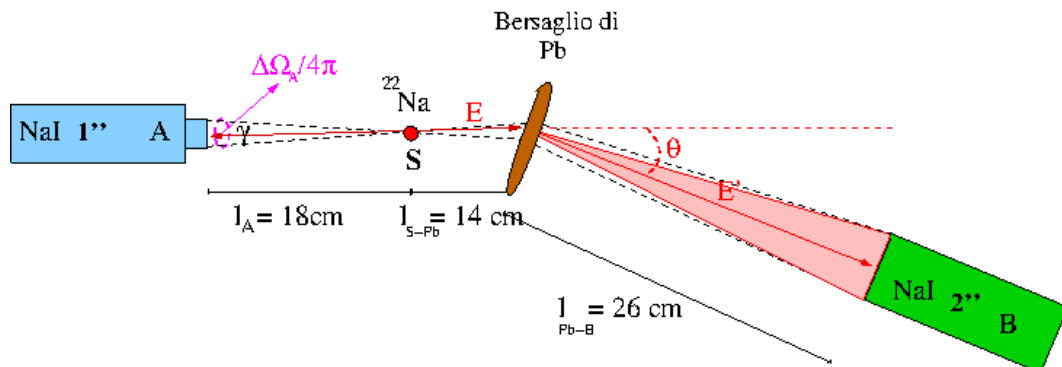


Figure 2: Disposizione sperimentale per la misura Compton

- Cosa si intende per efficienza assoluta e efficienza intrinseca e che relazione c'è tra le due?
- Nella configurazione di Fig.1, che relazione c'è tra la frazione di angolo solido $\Delta\Omega/4\pi$ sotteso tra la sorgente e il rivelatore 1' e quello sotteso tra la sorgente e il rivelatore 2'?
- Esprimere il rate letto da ciascun rivelatore ad una determinata riga in funzione dell'attività della sorgente, del BR di quella riga, dell'efficienza intrinseca e dell'angolo solido tra sorgente e rivelatore;
- Esprimere il rate letto dal rivelatore A quando in coincidenza con B in funzione degli stessi parametri di cui al punto precedente;
- Che relazione c'è tra l'efficienza intrinseca di A quando in coincidenza con B $\epsilon_{A\cap B}$, e l'efficienza intrinseca di A (ϵ_A) e B (ϵ_B) presi singolarmente?
- A partire dalle considerazioni sopra dimostrare che:

$$\frac{rate_{B\cap A}}{rate_A} = \epsilon_B$$

$$\frac{rate_{B\cap A}}{rate_B} = \epsilon_A$$

$$\frac{\Delta\Omega_A}{4\pi} = \frac{rate_{B\cap A}}{2 \cdot A[Bq] \cdot BR \cdot \epsilon_A(E) \cdot \epsilon_B(E)}$$

dove $A[Bq]$ è l'attività della sorgente e BR il Branching Ratio della riga presa in considerazione.

Svolgere misure e analizzarle:

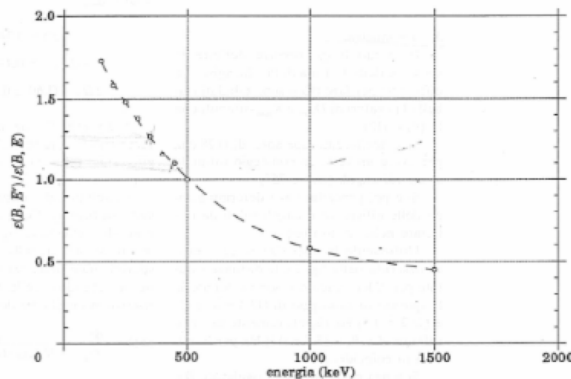


Figure 3: Andamento dell'efficienza intrinseca con l'energia per un rivelatore NaI (normalizzato all'efficienza ricavata a 511 keV.)

1. mettendosi nella configurazione di Fig.1 ricavare per gamma da 511 keV: ϵ_A , ϵ_B , $\epsilon_{A \cap B}$ e $\frac{\Delta\Omega_A}{4\pi}$;
2. mettendosi nella configurazione di Fig.2 (che sarà la configurazione finale per le misure Compton) ricavare $\frac{\Delta\Omega_B}{4\pi}$.

Confrontare i valori degli angoli solidi così ricavati con quelli valutabili a partire dai parametri geometrici.

4.6 Andamento dell'efficienza con l'energia per il rivelatore 2''

La capacità del rivelatore di assorbire tutta l'energia di una particella dipende dalla sua energia, e questo aspetto inevitabilmente influenza i risultati delle misure. Dal momento che questo rivelatore verrà utilizzato per rivelare il fotone scatterato, che potrà assumere diverse energie a seconda dell'angolo, la variazione dell'efficienza potrebbe diventare importante.

Quale range energetico sarà importante andare a studiare ai fini della vostra misura finale?

Utilizzando misure svolte in precedenza, o svolgendone di nuove, ricavare la curva di efficienza del rivelatore da 2''. Ragionare su efficienza assoluta o intrinseca e sull'opportunità o meno di fare la valutazione in una o entrambe le configurazioni (Fig. 1 e Fig. 2).

Graficare nuovamente la curva riportando in ordinata l'efficienza normalizzata a quella ricavata per la riga a 511 keV. Confrontare questo grafico con quello riportato in letteratura, mostrato in Fig. 3.

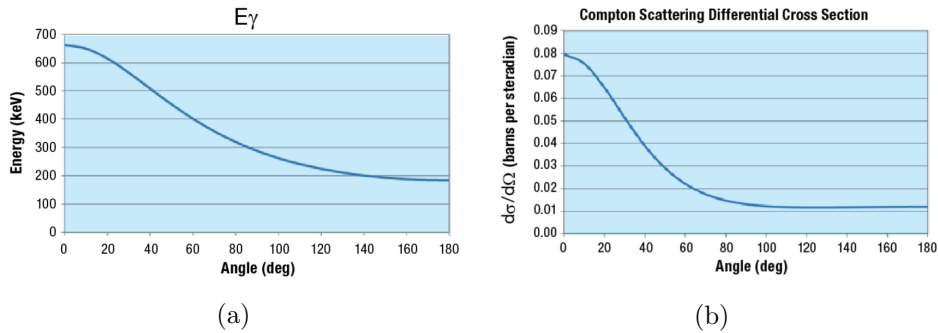


Figure 4: (a) Andamento dell'energia E' del fotone scatterato e (b) andamento della sezione d'urto differenziale Compton $d\sigma/d\Omega$, in funzione dell'angolo di scattering θ .

5 Misura dell'Effetto Compton

L'effetto Compton consiste nello scattering elastico di un fotone incidente su un bersaglio da parte degli elettroni del bersaglio. Parte dell'energia del fotone viene ceduta all'elettrone. Il fotone diffuso se ne andrà quindi con un'energia differente da quella iniziale, con valore dipendente dall'angolo di diffusione.

Scopo: misura dell'effetto Compton su gamma da 511 keV emessi dalla sorgente di ^{22}Na , sfruttando la tecnica della coincidenza nella configurazione di Fig.2. L'obiettivo è ricavare:

1. l'andamento dell'energia del fotone scatterato in funzione dell'angolo di scattering $E'(\theta)$;
2. l'andamento della sezione d'urto Compton in funzione dell'angolo di scattering (Legge di Klein-Nishina): $d\sigma/dW(\theta)$;
3. ricavare da queste misure il raggio atomico r_e , la massa dell'elettrone m_e , la carica dell'elettrone e .
4. confrontare i vari risultati con le attese.

Suggerimenti:

- Relazione che lega l'energia E' del fotone scatterato all'angolo θ di scattering:

$$\frac{1}{E'} - \frac{1}{E} = \frac{1}{m_e c^2} (1 - \cos\theta)$$

- Relazione di Klein-Nishina che esprime la sezione d'urto differenziale Compton per fotoni non polarizzati in funzione dell'energia del fotone prima (E) e dopo (E') lo scattering Compton e dell'angolo θ di scattering:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2} \left(\frac{E'}{E}\right)^2 \left(\frac{E}{E'} + \frac{E'}{E} - \sin^2\theta\right)$$

- Relazione che esprime la sezione d'urto differenziale Compton in funzione dei parametri sperimentali:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_B} = \frac{\Delta n(\theta)}{nN\Delta\Omega_B \cdot \epsilon_B(E')K(E')}$$

dove

- n il numero di fotoni 511 keV incidenti sul bersaglio di Pb (in coincidenza con i fotoni triggerati dal rivelatore A) ed è pari a:

$$2A\epsilon_A(E)\frac{\Delta\Omega_A}{4\pi}$$

dove A = attività della sorgente al tempo della misura;

- N il numero di elettroni per unità di volume nel bersaglio di Pb, dato da:

$$\rho_{Pb} \cdot N_{Av} \frac{Z_{Pb}}{A_{Pb}}$$

- K lo spessore efficace del bersaglio, che tiene conto dell'assorbimento sia dei fotoni in entrata che di quelli in uscita nel bersaglio di Pb. Per lo spessore di 0.28 cm i valori di K sono:

θ	K [cm]
0	0.165
15	0.165
30	0.159
45	0.149
60	0.131
75	0.111
90	0.117
120	0.076
130	0.075

Eeguire misure: al variare dell'angolo di scattering θ per ricavare l'andamento di E' vs. θ e di $d\sigma/d\Omega$ vs. θ , ricordandosi delle incertezze.

- Confrontare con gli andamenti teorici;
- ricavare m_e e r_e e confrontare con quelli attesi.