

La spettroscopia gamma raccontata agli studenti (INFN LNL 274/2023)

Turbacci Stefania^[1], Persico Elisa^[2], Plebani Adelisa^[3], Sferch Laura^[4], Villani Marina^[5], Zambelli Elisabetta^[6], Zimol Mara^[7]

[1] **Liceo Scientifico Arcangelo Scacchi di Bari (BA)**

[2] **IIS E. Majorana di Cesano Maderno (MB)**

[3] **Liceo Scientifico Copernico di Brescia (BS)**

[4] **Liceo Scientifico G. Casiraghi di Cinisello Balsamo (MI)**

[5] **Liceo Scientifico Bérard di Aosta (AO)**

[6] **Liceo Scientifico San Benedetti Tommaseo di Venezia (VE)**

[7] **Liceo Statale S. Maffei di Verona (VR)**

ABSTRACT

L'INFN mette a disposizione, ormai da alcuni anni, un programma di formazione per docenti di scuole secondarie di secondo grado (PID-INFN) al fine di formare i docenti sulle tematiche inerenti alla fisica di base, della tecnologia ad essa connessa e delle sue molteplici applicazioni.

Siamo un gruppo di sette docenti che hanno ricevuto un percorso di alta formazione presso i Laboratori Nazionali di Legnaro della durata di 5 giorni. Tale percorso ha alternato lezioni teoriche ad attività sperimentali con lo scopo di fornire una panoramica sulla fisica degli acceleratori e delle relative applicazioni su svariati ambiti di ricerca. Particolare attenzione è stata data alla natura multidisciplinare di questa tipologia di ricerca così da agevolare il trasferimento delle conoscenze acquisite in ambito scolastico.

In questo articolo viene descritto un possibile percorso didattico che avvicini gli studenti alla spettroscopia gamma, andando a toccare aspetti non solo tecnici ma anche di tipo storico e metodologico.

KEYWORDS: PID-INFN, formazione, percorso didattico, fisica nucleare, rivelatori, spettroscopia gamma.

Introduzione

Il progetto didattico che proponiamo non vuole essere strettamente legato a una sola tipologia di indirizzo di studi, ma mira piuttosto a fornire delle linee guida dalle quali attingere. Sarà il livello di approfondimento che ne decreterà la tipologia di utenti finali.

La scelta di un percorso didattico di fisica della spettroscopia gamma è basata sul riconoscimento della valenza formativa di questo approfondimento moderno e coinvolgente. Tale proposta formativa permetterà di far comprendere i procedimenti caratteristici dell'indagine scientifica nell'alternanza teoria - esperimento,

facendo apprezzare l'evoluzione storica dei modelli di interpretazione della realtà e cogliendo gli opportuni collegamenti tra Fisica - Matematica - Società.

Questo approfondimento permetterà, inoltre, di acquisire una mentalità ed una preparazione flessibili, aperta al confronto ed all'analisi di situazioni diverse, stimolando l'abitudine all'approfondimento, alla riflessione personale e all'organizzazione del lavoro.

Oltre agli obiettivi formativi generali, è importante definire quelli specifici, come: rendere gli allievi capaci di analizzare e schematizzare situazioni reali, comprendere l'importanza del linguaggio matematico, sviluppare la capacità di reperire informazioni, utilizzarle in modo autonomo e comunicarle in maniera chiara, corretta e sintetica.

Non ultimo l'insegnamento deve abituare gli alunni alla lettura di testi, saggi, biografie e articoli scientifici col fine di interessare sempre più l'allievo rendendolo partecipe dell'evoluzione della disciplina e aiutandolo ad analizzare criticamente le informazioni che lo investono.

Riteniamo necessario iniziare questo approfondimento mediante l'uso di uno schema con parole chiave, anche in ordine sparso, per guidare gli studenti a concentrarsi sui concetti fondamentali di questa fisica, ancora sconosciuta a molti di loro seguito da una mappa concettuale che consenta anche, là dove è possibile, di mostrare quali siano gli orizzonti ultimi della ricerca, quali siano i temi condivisi dalle altre discipline e quale sia stata l'evoluzione storica dei concetti.

Si rende inoltre necessario dedicare uno spazio iniziale alla verifica dei prerequisiti, seguito da una sistematizzazione dei fondamentali.

Non essendo possibile partecipare attivamente ad una presa dati di decadimenti gamma, si procederà ad analizzare set di dati reali di laboratorio provenienti da esperimenti di Legnaro. Ciò consentirà di raggiungere alcuni obiettivi specifici, tra i quali:

- la capacità di analizzare i fenomeni, individuando le grandezze che li caratterizzano;
- la capacità di formulare ipotesi, dedurre conseguenze e proporre verifiche delle ipotesi formulate;
- la capacità di valutare l'attendibilità dei risultati;
- la capacità di esaminare dati attraverso l'utilizzo di programmi ad hoc in Python
- saper rielaborare in modo chiaro ciò che si è ottenuto dai grafici

La spettroscopia gamma

Prima di affrontare lo studio della spettroscopia gamma è necessario comprendere la natura e l'origine di questa radiazione elettromagnetica. Riteniamo si possa partire dagli estratti dal discorso di Henri Becquerel[1][6] durante la cerimonia dei Nobel del 1901, senza dimenticare di menzionare l'importante contributo alla scoperta dei coniugi Curie, con particolare focus su M.me Curie[6].

Dalla scoperta della radioattività si può poi affrontare un rapido excursus sulla storia dei modelli atomici, citando le più famose scoperte che hanno gettato le basi per le successive teorie[2][3][6].

Riteniamo si debba infine sottolineare agli studenti che la radioattività non è però solamente un fenomeno naturale, approdando così al 1932 con i premi Nobel Walton[4][6] e Cockcroft[5][6] per aver realizzato la prima reazione nucleare. Si sottolinea che da quel momento si apre uno scenario completamente nuovo e la fisica nucleare, grazie anche alla scoperta del neutrone ad opera di Chadwick[6] in quello stesso anno, inizia a prosperare.

Gli studenti iniziano così a comprendere la natura della radiazione gamma come conseguenza del riassetto energetico del nucleo eccitato e, una volta compresa pienamente la sua origine, si può passare allo studio dell'interazione della radiazione con la materia e della conseguente nascita dei rivelatori.

La spettroscopia gamma è un metodo di analisi che consente la determinazione qualitativa e quantitativa di nuclidi radioattivi gamma-emittenti in un materiale. L'assorbimento dei raggi gamma nella materia avviene attraverso tre processi fondamentali: l'effetto fotoelettrico, l'effetto Compton e la produzione di coppie. La modalità principale di interazione dipende dall'energia dei fotoni incidenti e dal numero atomico del materiale con il quale i raggi gamma interagiscono (Fig.1).

La produzione di coppie, in particolare, è un fenomeno a soglia dal momento che il fotone incidente deve avere un'energia di almeno 1022 keV. Diventa pertanto rilevante solo per energie superiori a 2-3 MeV.

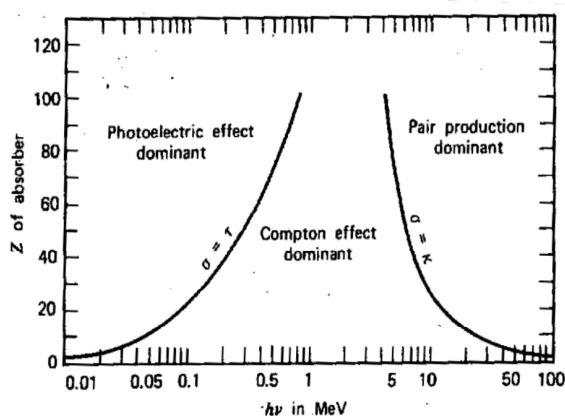


Fig. 1: Dipendenza delle modalità di interazione con la materia in relazione al numero atomico della materia e all'energia dei fotoni incidenti.

La modalità con cui la radiazione γ interagisce con la materia caratterizza la risposta di un rivelatore di radiazione. Eccetto che per l'effetto fotoelettrico, i processi descritti non comportano il completo trasferimento dell'energia della radiazione incidente al rivelatore. In altre parole un rivelatore di radiazione γ non è in grado di dare uno spettro di energia che rifletta esattamente lo spettro di energia emesso dalla sorgente. Un tipico spettro γ (Fig.2) è composto da un picco a piena energia (photopeak, corrispondente alla interazione fotoelettrica), un continuo Compton ad un'energia minore dell'energia originaria del fotone γ . Quando l'energia del raggio gamma in arrivo sul rivelatore è superiore alla massa a riposo di una coppia elettrone-positrone (1022 keV) il raggio gamma può creare spontaneamente una coppia elettrone-positrone, invece, se sia l'elettrone che il positrone perdono tutta la loro energia cinetica mentre sono ancora nel

materiale assorbitore, allora producono un impulso corrispondente a un'energia al di sotto dell'energia del raggio gamma. Se il positrone viene rallentato e si ferma nel materiale assorbitore, si annichilirà con un elettrone ed emetterà due raggi gamma, ciascuno con un'energia di 511 keV. Uno o entrambi questi raggi gamma possono essere assorbiti nel materiale e contribuire all'altezza dell'impulso di uscita. In conclusione, la produzione di coppie può produrre un picco di "energia completa" (annihilation peak), un "single escape peak" e un "double escape peak", a seconda che entrambi i fotoni di annichilazione vengano assorbiti nello nel materiale o uno o entrambi fuggano dal materiale. [7].

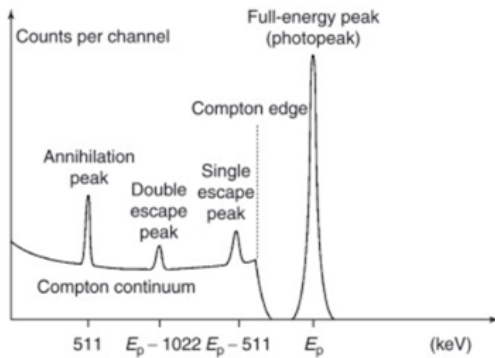


Fig. 2: Risposta di un rivelatore gamma alla radiazione incidente.

Setup sperimentale

La rilevazione dei raggi gamma viene effettuata mediante un sensore a scintillazione che, colpito dalla radiazione, emette deboli lampi di luce con intensità proporzionale al raggio gamma incidente. Il materiale scintillatore - un cristallo di Bromuro di Lantanio drogato Cerio $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ - è accoppiato ad un fotomoltiplicatore (PMT) che trasduce ogni fotone in un impulso elettrico proporzionale all'intensità luminosa. Dato che i fotomoltiplicatori sono sensibili anche alla luce ambientale, il complesso scintillatore/PMT viene racchiuso all'interno di un contenitore che schermi completamente la luce (Fig.3).

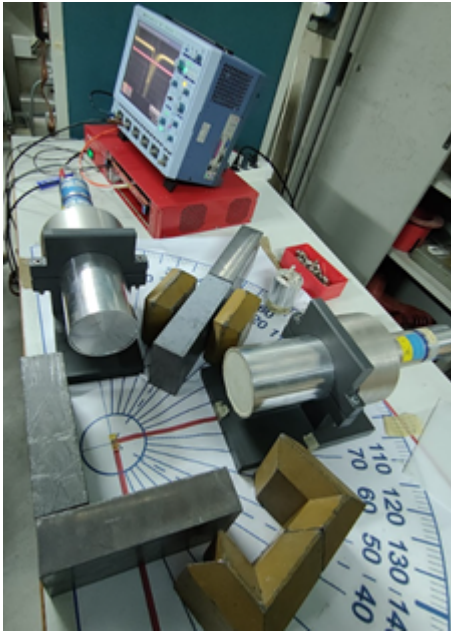


Fig.3: set up sperimentale.

Gli impulsi elettrici in uscita dal rivelatore vengono opportunamente amplificati, campionati con un convertitore analogico-digitale (ADC) a 14-bit con una frequenza di campionamento di 500 MHz, infine catalogati da un analizzatore multicanale (MCA - 16384 canali) in base alla loro ampiezza. Ogni canale rappresenta un intervallo specifico di energie nello spettro, quindi il numero di segnali per ogni canale rappresenta l'intensità spettrale del campo di radiazioni per quell'intervallo di energie. Per ottenere questa associazione tra energia e canale è necessario compiere una calibrazione in energia. L'uscita del MCA è mandata a un computer che salva, visualizza e analizza i dati (Fig.4).

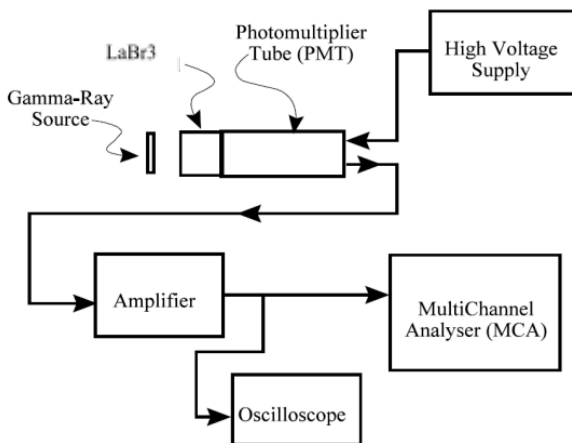
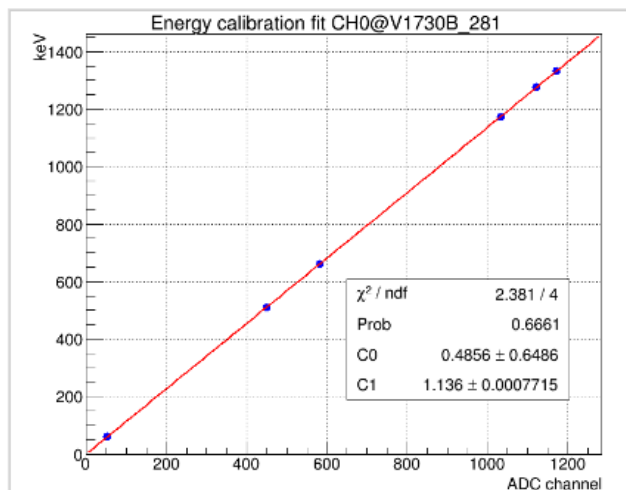


Fig.4: schema del set up sperimentale.

Calibrazione in energia

Una volta ottimizzata l'elettronica del sistema, il primo obiettivo è eseguire la calibrazione in energia dello strumento. La calibrazione in energia è effettuata con una sorgente (contenente gamma emettitori le cui emissioni consentono di coprire l'intervallo di energie d'interesse) di composizione ed attività note. Una

volta ottenuto uno spettro con sufficiente statistica di conteggio, si fitta con una gaussiana il fotopicco estraendo la posizione del centro e conoscendo l'energia del fotone, si esegue un fit lineare tra l'energia in keV e l'energia in unità arbitrarie così da ottenere i parametri di conversione. In figura 5, un esempio di fit lineare ove C_0 è l'intercetta, C_1 è la pendenza della retta. (generalmente a canale zero non si ha mai energia zero per errore di offset).



Sorgente	Posizione in ADC channel [a.u.]	Energia [keV]
^{241}Am	51.5	59.9
^{22}Na	450.0	511.0
^{137}Cs	582.6	661.7
^{60}Co	1032.4	1173.2
^{22}Na	1121.1	1274.5
^{60}Co	1172.0	1332.5

Fig.5: curva di calibrazione sperimentale $E\gamma=0.4856+1.136 \cdot \text{channel}$

La calibrazione in energia può essere influenzata da vari fattori, anche ambientali, pertanto va ripetuta periodicamente.

Attività proposta agli studenti

Si forniscono agli studenti gli istogrammi, in .txt, delle misure di alcune sorgenti (Na-22 , Ba-133 e Cs-137) eseguite con due diversi scintillatori. Gli studenti rappresentano graficamente (in Excel o in Python) gli istogrammi e provano a distinguere i picchi corrispondenti alle diverse modalità di interazione radiazione - materia (fotopicco dovuto ad effetto fotoelettrico, spalla Compton, etc...), fornendo anche delle ipotesi sulla presenza di altri picchi dovuti ad esempio alla radiazione di fondo a causa alla radioattività interna del rivelatore e a quella naturale (Th , Ra , Pb , Bi). Si potrebbe provare ad usare la scala logaritmica sull'asse verticale per vedere meglio i canali con pochi conteggi e per comprendere dove effettuare un taglio sui canali (il taglio è stato fatto a 8000 canali). Nel nostro esempio abbiamo limitato il set di dati a quelli con un valore di ADC inferiore a 8000. È possibile quindi creare un secondo array di dati filtrati e poi rifare il grafico.

In figura 6 si riportano i grafici ottenuti in Python (relativi al rivelatore LaBr indicato con Ch0) della sorgente Cs-137 su 16000 canali (a), in scala logaritmica (b) e su 8000 canali (c).

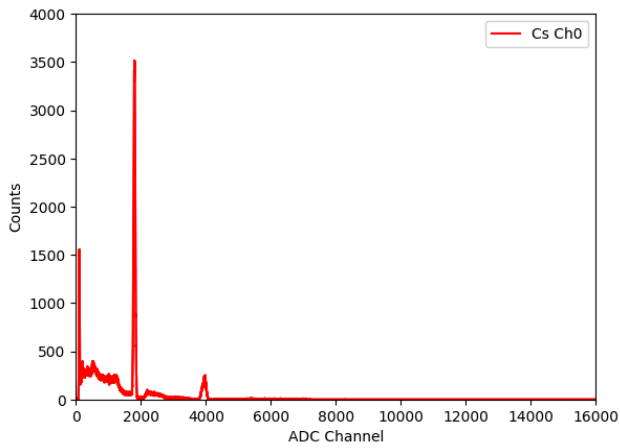
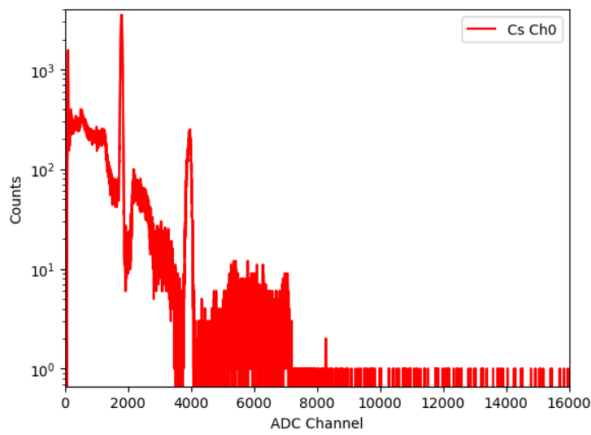
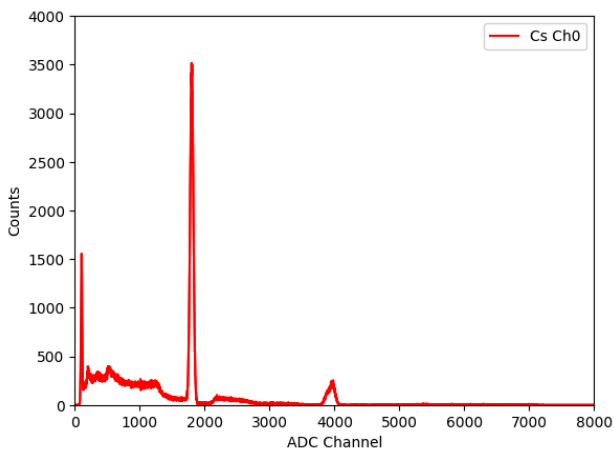


Fig.6(a): spettro completo in scala lineare su 16000 canali.



(b) spettro completo in logaritmica su 16000 canali.



(c) spettro in scala lineare con un taglio a 8000 canali.

Si determina la posizione dei diversi picchi fittando i dati con una funzione gaussiana e limitando il range del fit all'intervallo contenente il picco che ci interessa oppure si fa lo zoom sul grafico per individuare a mano il centroide del picco. Poiché le misure delle tre sorgenti sono state eseguite nello stesso giorno si potrebbe provare a costruire la retta di calibrazione in modo da associare il canale all'energia.

Gli studenti confrontano le ipotesi fatte sui picchi (ad esempio quelli presenti in Fig.6c) con i dati presenti sul database dei Laboratori LBNL di Berkeley in California (Lawrence Berkeley National Laboratory, laboratorio del Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti d'America gestito dall'Università della California, situato a Berkeley, cittadina che affaccia sulla baia di San Francisco) [8].

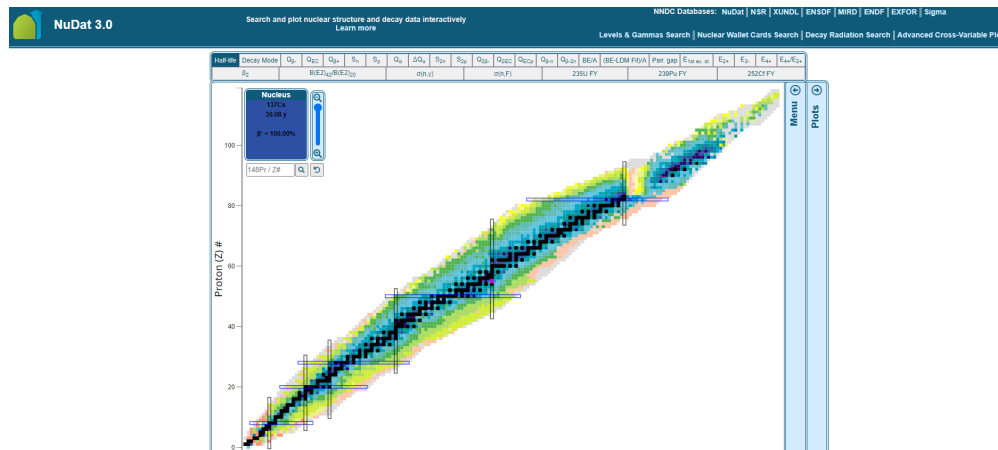
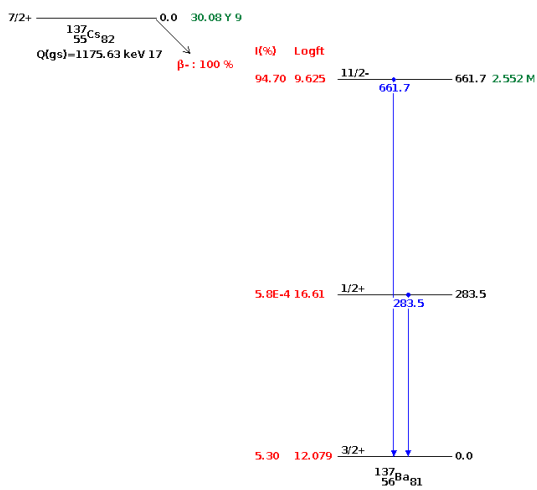


Fig.7: homepage di <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/>

Cliccando nella schermata in basso su “Decay radiation information”, si ottengono informazioni sullo schema di decadimento (Fig.8) e sull’energia del fotopicco nella tabella gamma and x-ray radiation (Fig.9)



Gamma and X-ray radiation:

	Energy (keV)	Intensity (%)	Dose (MeV/Bq-s)
XR 1	4.47	0.91 ± 4	4.09E-5 19
XR $k\alpha_2$	31.817	1.99 ± 5	6.34E-4 17
XR $k\alpha_1$	32.194	3.64 ± 10	0.00117 3
XR $k\beta_3$	36.304	0.348 ± 9	1.26E-4 3
XR $k\beta_1$	36.378	0.672 ± 18	2.44E-4 6
XR $k\beta_2$	37.255	0.213 ± 6	7.92E-5 21
	283.5 1	5.8E-4 ± 8	1.64E-6 23
	661.657 3	85.10 ± 20	0.5631 13

Fig.8: schema di decadimento del Cs-1

Fig.9: Elenco delle emissioni gamma e relativa probabilità di emissione.

Si presenta agli studenti un istogramma (Fig.10) contenente i dati degli spettri somma di Na-22, Cs-137 e una sorgente incognita (nel nostro caso Co-60).

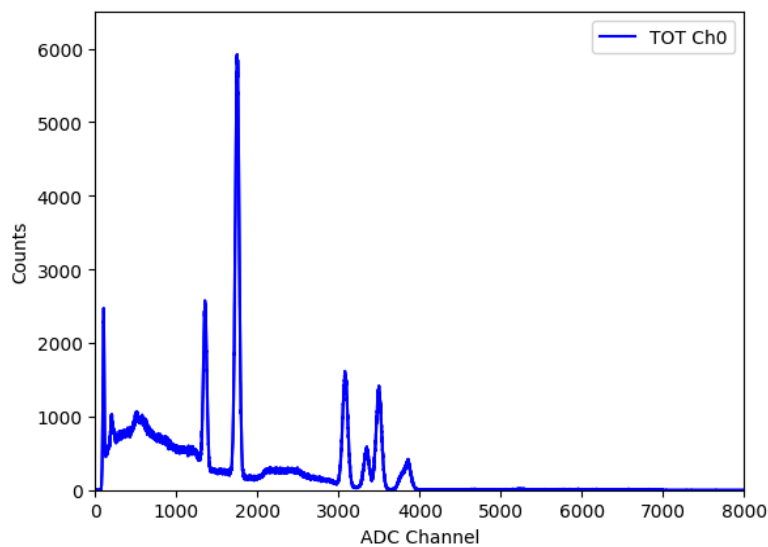


Fig.10: spettro con elemento incognito.

Conoscendo gli istogrammi delle sorgenti Na-22 e Cs-137 si potrebbe provare ad identificare la natura della terza sorgente, utilizzando il database citato in precedenza e cliccando su “Nuclear Levels and Gammas Search”.

Infine si potrebbe proporre l’analisi dei dati di una misura di coincidenza. Partendo dal file LifetimeBa.txt, si ottiene un grafico simile a quello di Fig.11.

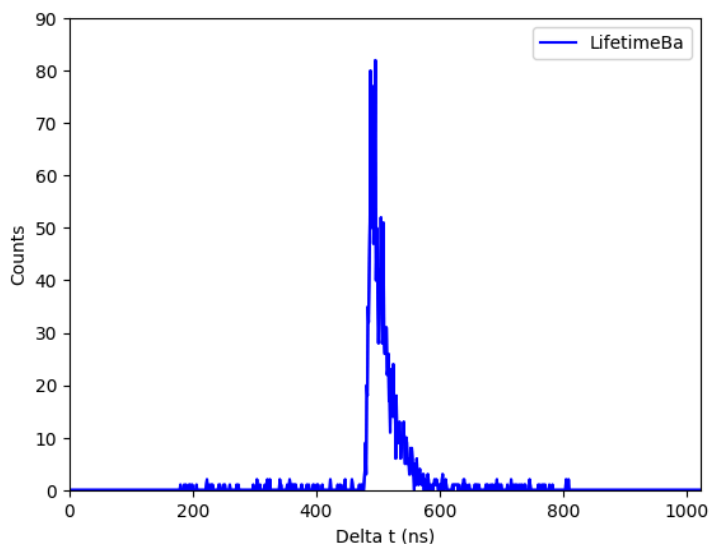


Fig.11: spettro per la misura del tempo di dimezzamento del Ba-133.

Per ottenere questo grafico due rivelatori (LaBr) devono vedere un gamma entro 128 ns (valore preimpostato dall’operatore) l’uno dall’altro (Fig.12).

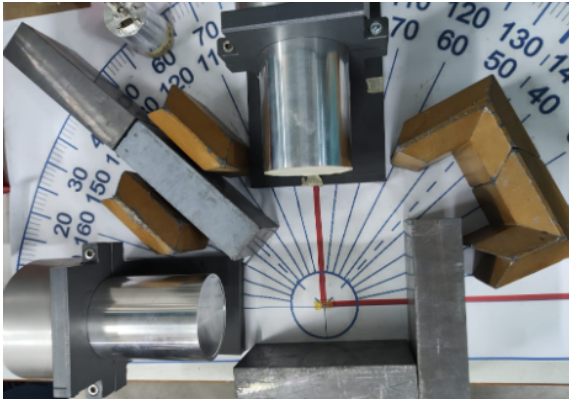


Fig.12: set up sperimentale per le misure di coincidenza.

Nel caso del Ba-133 i due gamma hanno un'energia attorno a 80 keV e 302 keV. Il digitalizzatore (digitalizer) fa la differenza di tempo fra i due eventi e la mette nell'istogramma (la risoluzione del rivelatore è di circa 1.8 ns). Si può osservare un andamento esponenziale tipico di un decadimento $N = N_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$ fittandolo con una esponenziale si dovrebbe trovare il valore del tempo di dimezzamento $T_{\frac{1}{2}} = \tau \cdot \ln 2 = 6.3 \text{ ns}$ in accordo con il valore riportato nel database.

Conclusioni

Lo studio della spettroscopia gamma non solo offre agli studenti l'opportunità di esplorare la fisica nucleare, ma anche di comprendere le sue applicazioni pratiche in altri campi disciplinari. La medicina nucleare, ad esempio, sfrutta la spettroscopia gamma per diagnosticare malattie come il cancro e trattarle tramite terapie mirate. Allo stesso modo, il monitoraggio ambientale si avvale di questa tecnica per rilevare e monitorare la presenza di sostanze radioattive nell'ambiente, garantendo così la sicurezza pubblica. Attraverso l'esplorazione, la sperimentazione e l'analisi dei dati, gli studenti vengono aiutati a sviluppare capacità di problem solving, pensiero creativo e collaborazione interdisciplinare, competenze (le famose soft skills) che potranno applicare in molteplici contesti e discipline.

Ringraziamenti

Le autrici di questo articolo ringraziano sentitamente tutto lo staff del PID 2023 e in particolare il dott. Giorgio Chiarelli, la dott.ssa Silvia Miozzi, il dott. Andrea Gozzelino, il dott. Luca Zago e la dott.ssa Luisa Pegoraro.

Riferimenti

- [1] <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1903/becquerel/lecture/>
- [2] <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1906/thomson/facts/>
- [3] <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1908/summary/>

- [4] <https://www.nobelprize.org/search/?s=walton&nonce=1706826420000>
- [5] <https://www.nobelprize.org/search/?s=cockcroft&nonce=1706826480000>
- [6] <https://scienzapertutti.infn.it/rubriche/biografie>
- [7] K. Butchtela, Encyclopedia of Analytical Science (second Edition), 2005
- [8] <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3>