

ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE

Sezione di Genova

INFN/BE-78/2
12 Gennaio 1978

P. Corvisiero, L. Fossati e M. Sanzone: USO DI UN RIVELATORE
GE(Li) PER MISURE DI BASSE ATTIVITA' E DI CONCENTRAZIONI

P. Corvisiero, L. Fossati e M. Sanzone: USO DI UN RIVELATORE GE(Li) PER MISURE DI BASSE ATTIVITA' E DI CONCENTRAZIONI.

1. - INTRODUZIONE. -

Scopo di questo report è quello di mostrare che un rivelatore di radiazione gamma Ge(Li) può essere usato per misure di contaminazione radioattiva potendo raggiungere sensibilità confrontabili con quelle di un rivelatore a scintillazione NaI(Tl) grazie soprattutto alla sua alta risoluzione e alle dimensioni oggi ottenibili.

Un ulteriore vantaggio della risoluzione appare evidente quando occorre discriminare tra più isotopi contaminanti. Una ottima risoluzione energetica è essenziale per misure assolute di contaminazione da parte di un determinato isotopo quando si è in presenza di parecchi elementi contaminanti.

Nel paragrafo 2 vengono mostrate le caratteristiche di efficienza, risoluzione e sensibilità misurate per un rivelatore Ge(Li) di 17 cm^3 in dotazione al laboratorio attualmente.

Un'altra applicazione molto importante di questo tipo di rivelatore è la misura di concentrazione di elementi naturali presenti in campioni di natura biologica e no, mediante il metodo della attivazione residua. Una applicazione di questo tipo è presentata nel paragrafo 3.

Infine nel paragrafo 4 vengono discusse le prestazioni che si pensa di poter ottenere mediante un rivelatore analogo, ma con caratteristiche di risoluzione ed efficienza nettamente migliori, che sarà tra breve in dotazione al laboratorio, e attraverso un sistema di anticoincidenza che permette l'eliminazione del fondo ambiente e un miglior rapporto picco-fondo Compton.

2. - APPARATO SPERIMENTALE. -

Il rivelatore di cui sono state studiate le caratteristiche è un cristallo di germanio "lithium drifted" di tipo coassiale della Princeton gamma. Tech inc. di volume attivo 17 cm^3 , le cui dimensioni sono mostrate in Fig. 1. Il sistema elettronico di analisi è realizzato con moduli NIM disponibili commercialmente. Il diagramma a blocchi è presentato in Fig. 2.

L'alimentatore ORTEC 428 provvede una tensione di alimentazione fino a 1000 Volts che sono le condizioni sperimentali del nostro rivelatore. Il preamplificatore ORTEC 118A è un preamplificatore di carica che utilizza un transistor ad effetto di campo nello stadio di ingresso, selezionato per avere basso rumore. L'amplificatore ORTEC 440A è un amplificatore a filtro attivo e a basso rumore che presenta inoltre un'alta stabilità. Inoltre presenta incorporato un circuito di cancellazione di polo zero aggiustabile che ha lo scopo di rimuovere le code sotto la linea di base degli impulsi unipolari, permettendo quindi di ottenere buone risoluzioni anche in presenza di alte velocità di conteggio. L'amplificatore polarizzato ORTEC 408 è usato per espandere una particolare regione dello spettro pur utilizzando un limitato numero di canali nell'analizzare multicanali di altezza d'impulso. Esso presenta una alta stabilità sia in soglia che in guadagno.

La stabilità di tutto il sistema elettronico può essere verificata durante le misure usando il generatore d'impulsi ORTEC 419 che fornisce impulsi di uscita che simulano i segnali dovuti alla

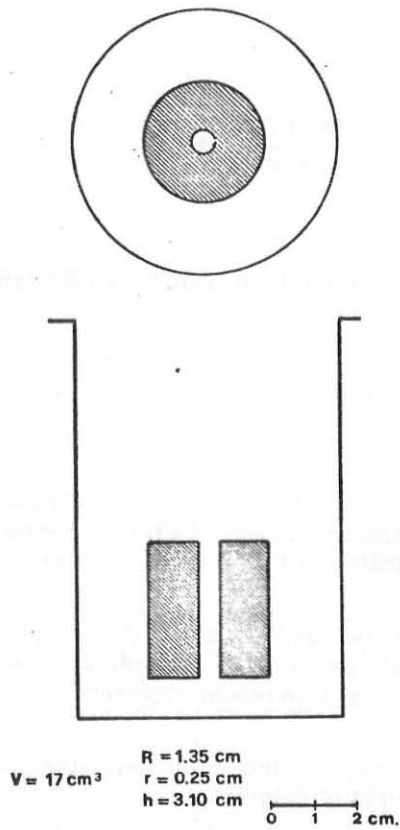


FIG. 1 - Dimensioni del volume attivo e del volume di ingombro del rivelatore Ge(Li).

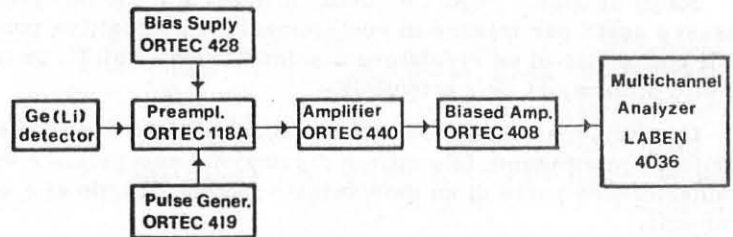


FIG. 2 - Schema a blocchi dell'elettronica associata al rivelatore Ge(Li).

radiazione nel rivelatore .

Il vantaggio di un rivelatore a stato solido sta principalmente nella eccezionale risoluzione energetica. In Fig. 3 è presentato il confronto di questo rivelatore Ge(Li) rispetto ad un rivelatore a

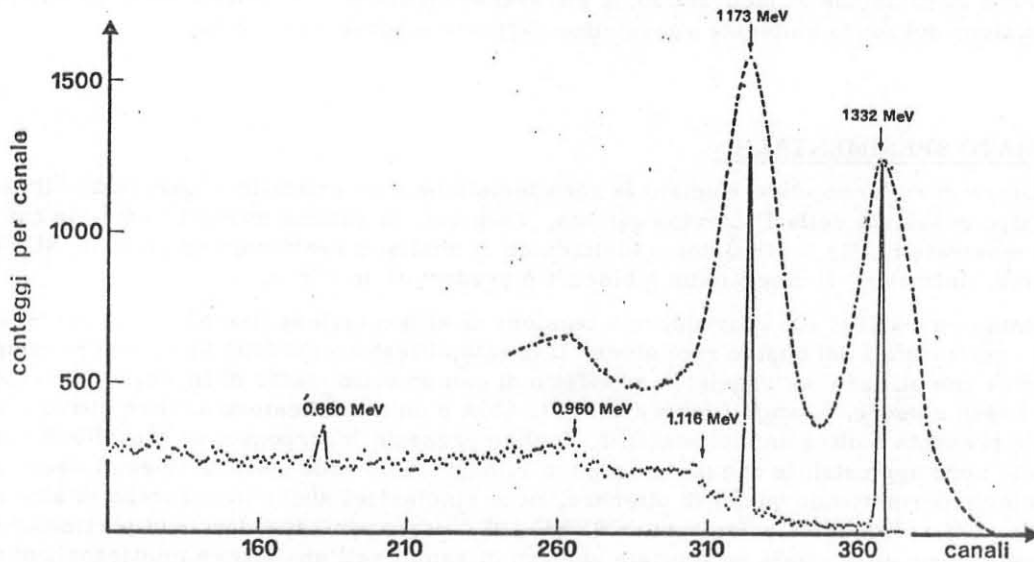


FIG. 3 - Spettri energetici del Co⁶⁰. Linea continua: spettro ottenuto con il rivelatore Ge(Li). Linea tratteggiata: spettro ottenuto con un rivelatore NaI(Tl).

scintillazione NaI(Tl) di diametro 11 cm e spessore 5 cm, per fotoni di 1.1732 MeV e 1.3325 MeV emessi da una sorgente di Co^{60} . La FWHM per il rivelatore Ge(Li) è un ordine di grandezza minore che la FWHM per il rivelatore NaI(Tl). In termini semplici questo significa che il rivelatore Ge(Li) può risolvere venti energie di fotoni nello spazio occupato da un fotopicco nel NaI(Tl).

La risoluzione energetica del rivelatore in esame è stata misurata usando anche l'amplificatore polarizzato e il risultato è riportato in Fig. 4. La risoluzione risulta 3.6 ± 0.7 keV per i due

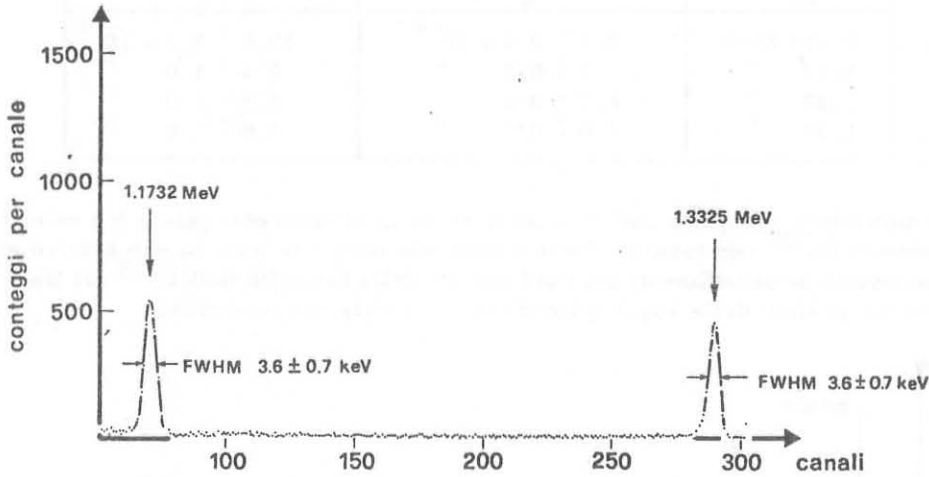


FIG. 4 - Risoluzione del rivelatore Ge(Li) per i fotoni del Co^{60} $E_\gamma = 1.1732$ MeV e $E_\gamma = 1.3325$ MeV.

picchi di fotoni del Co^{60} a 1.1732 MeV e 1.3325 MeV.

L'efficienza del rivelatore è stata misurata usando due sorgenti tarate, rispettivamente una sorgente di Na^{22} la cui attività era $0.08 \mu\text{Ci} \pm 8\%$ il 20/1/75 ($0.06 \mu\text{Ci}$ al momento della misura) e una sorgente di Co^{60} la cui attività era $99 \mu\text{Ci} \pm 5\%$ l'1/10/63 ($19.5 \mu\text{Ci}$ al momento della misura). Le condizioni geometriche di collimazione delle sorgenti, la cui area attiva era in entrambi i casi 1 mm^2 e spessore confrontabile, sono mostrate in Fig. 5.

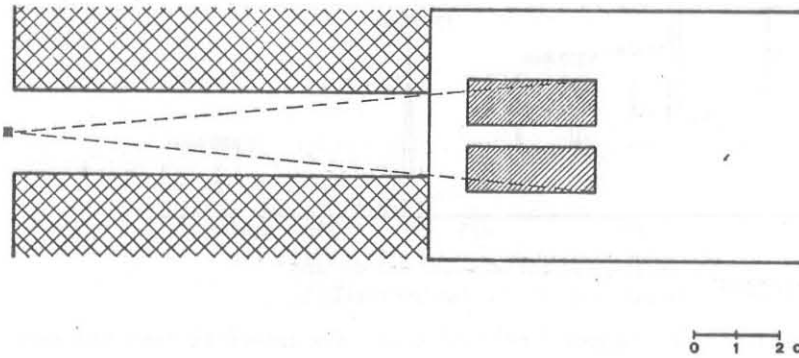


FIG. 5 - Geometria utilizzata per il calcolo dell'efficienza totale del rivelatore Ge(Li).

E' opportuno ricordare che quando si collimano sorgenti di radiazioni γ occorre calcolare l'angolo solido effettivo visto dalla radiazione a partire dall'angolo solido geometrico e tenendo conto della apertura di penetrazione $P(E)$ funzione della energia della radiazione e della apertura geometrica⁽¹⁾.

Nelle condizioni geometriche particolari in cui la efficienza è stata misurata, poichè tutta la parte sensibile del rivelatore veniva investita dalla radiazione, l'angolo solido effettivo differisce molto poco da quello geometrico ed è quindi indipendente dall'energia ($\Delta\Omega = 3 \times 10^{-2}$ sterad; $\Delta\Omega / 4\pi = 2.5 \times 10^{-3}$).

In Tabella I sono riportati i valori della efficienza totale $\eta = \epsilon \Delta\Omega / 4\pi$ misurata e dell'efficienza intrinseca ϵ da essa dedotta per i quattro valori dell'energia della radiazione gamma corrispondenti alle due sorgenti.

TABELLA I

E_γ	η	ϵ
0.511 MeV	$3.2 \pm 0.6 \times 10^{-4}$	$12.8 \pm 3.2 \times 10^{-2}$
1.17 "	1.2 ± 0.2 "	4.8 ± 1.0 "
1.28 "	1.2 ± 0.2 "	4.8 ± 1.0 "
1.33 "	1.0 ± 0.2 "	4.0 ± 1.0 "

Per avere l'andamento completo dell'efficienza in un intervallo energetico più esteso si è utilizzata una sorgente di Ra^{226} non tarata. Come è noto tale sorgente mostra uno spettro energetico molto complesso dovuto ai decadimenti dei vari isotopi della famiglia dell' U^{238} dal Ra^{226} in poi come si può vedere dal grafico della Fig. 6 ottenuto con il rivelatore descritto.

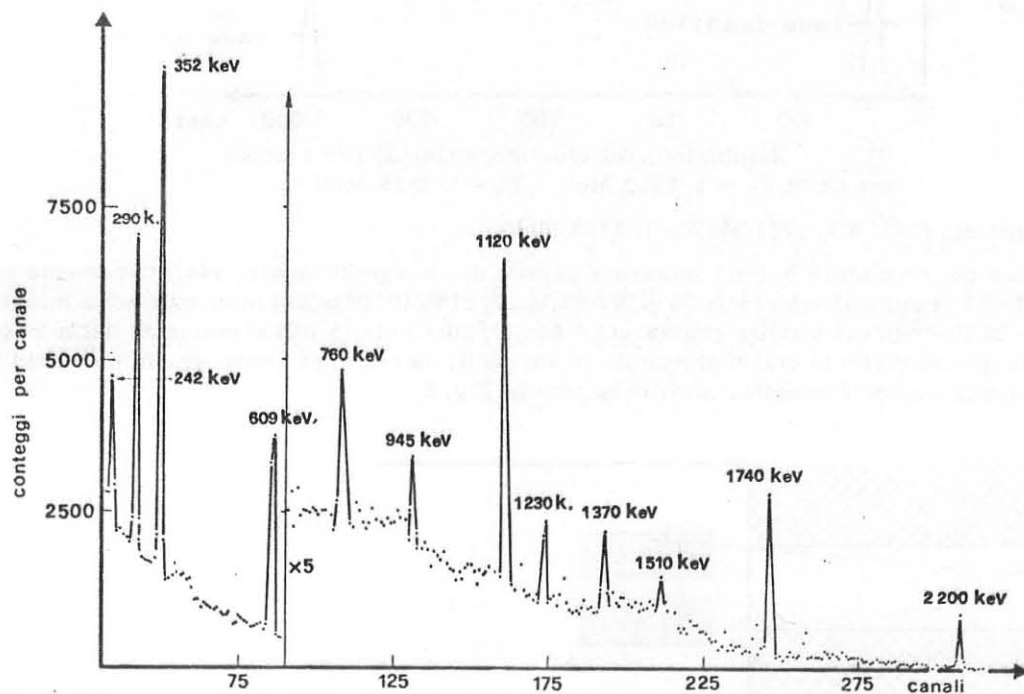


FIG. 6 - Spettro energetico dei fotoni emessi da una sorgente di Ra^{226} ottenuto con il rivelatore $Ge(Li)$.

I valori delle diverse energie dei fotoni e i rapporti relativi delle loro intensità sono ben note e sono riportati in Tabella II⁽²⁾.

Conoscendo quindi l'efficienza η_0 del rivelatore all'energia 1.23 MeV (nota attraverso le sorgenti tarate di Co^{60} e Na^{22} $\eta_0 = 1.2 \pm 0.2 \times 10^{-4}$) si può risalire alla efficienza η_n relativa ad un generico picco di energia E_n nell'intervallo tra 0.242 MeV e 2.2 MeV attraverso la formula

$$\eta_n = \frac{N_n f_o}{N_o f_n} \eta_o$$

dove N_n e N_o sono il numero di conteggi nei picchi corrispondenti all'energia E_n e $E_o = 1.23$ MeV rispettivamente e f_n e f_o sono il numero di fotoni di energia E_n e E_o rispettivamente emessi in

TABELLA II

Nucleo emettitore	Energia dei gamma (MeV)	Numero di gamma emesso in media per ogni disintegrazione di un nucleo.
$^{222}_{86}\text{Rn}$	0,187	0,05
$^{214}_{83}\text{Bi}$	0,053	0,11
	0,242	0,12
	0,295	0,25
	0,352	0,42
$^{214}_{84}\text{Po}$	0,609	0,42
	0,76	0,04
	0,93	0,03
	1,12	0,15
	1,13	0,08
	1,23	0,05
	1,37	0,07
	1,51	0,02
	1,74	0,19
2,20	0,05	

media per ogni disintegrazione di un nucleo di Ra^{226} . Si sono così ottenuti i valori della efficienza totale η relativa alle particolari condizioni geometriche sopra descritte, riportati in Fig. 7.

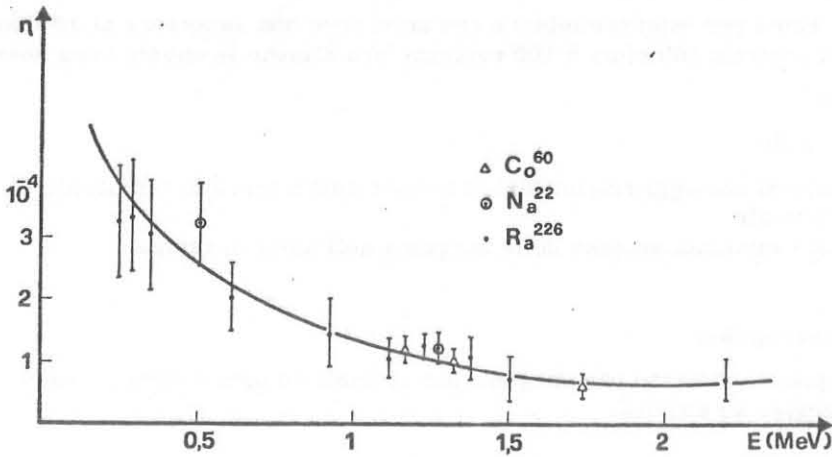


FIG. 7 - Efficienza totale η del rivelatore in funzione dell'energia nelle condizioni geometriche di di Fig. 5.

Per valutare la sensibilità massima raggiungibile con tale rivelatore si deve innanzi tutto tener conto che l'angolo solido può essere aumentato di un fattore circa dieci. L'efficienza totale diventa così dell'ordine di 10^{-3} .

In Fig. 8 è mostrato lo spettro energetico del fondo ambiente misurato in un intervallo di tempo di 6 ore. Oltre ai picchi caratteristici del Cs^{137} e del K^{40} si notano altri picchi dovuti sia al decadimento del piombo usato per la schermatura, sia ai prodotti di fissione presenti nella rica-

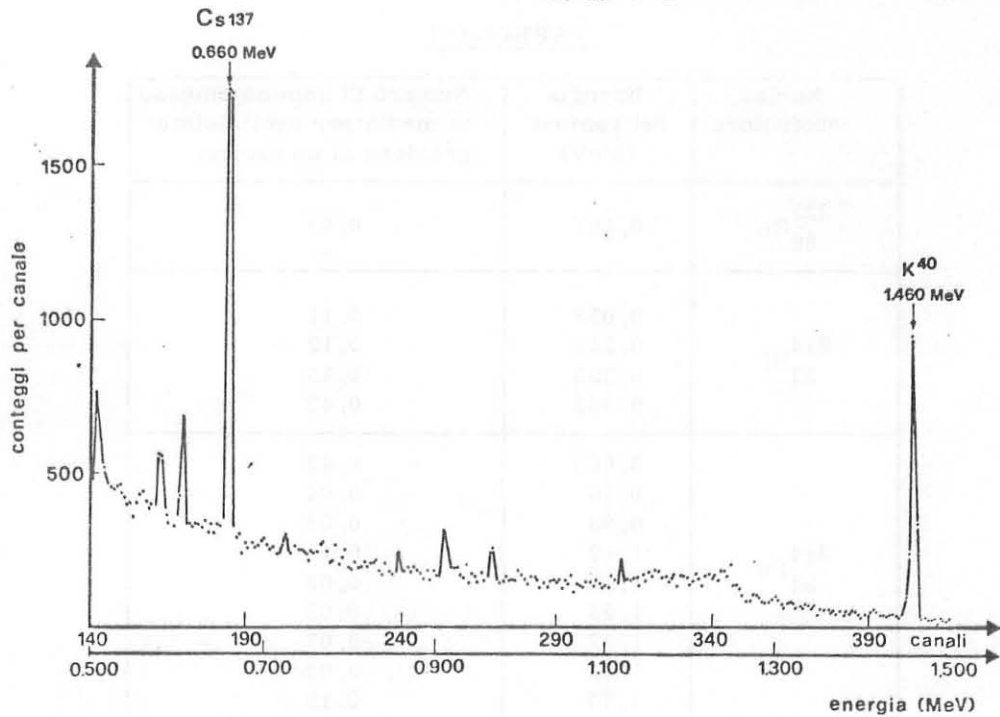


FIG. 8 - Spettro energetico del fondo ambiente misurato con il rivelatore Ge(Li). Durata della misura 6 ore.

duta radioattiva. Dal grafico appare che il contributo del fondo ambiente ad energie intorno ad 1 MeV è di ~ 25 conteggi/canale ora.

Questo mostra come per ottenere misure con un errore non superiore al 10% non si possa scendere a velocità di conteggi inferiori a 100 conteggi/ora almeno in questa zona energetica.

Dalla relazione

$$N = \eta \times N_0 \times \Delta t$$

dove N è il numero di conteggi rivelati dal contatore nell'intervallo temporale Δt

η efficienza totale

N_0 numero di radiazioni emesse dalla sorgente nell'unità di tempo

si ottiene

$$N_0 \approx 30 \text{ radiazioni/sec}$$

Questo corrisponde, almeno per sorgenti per le quali ad ogni disintegrazione viene emesso un γ di quella energia, ad attività

$$A \approx 10^{-3} \mu\text{C}$$

3. - MISURE DI CONCENTRAZIONE. -

Misure di concentrazione di un elemento stabile in una sostanza possono essere fatte misurando le radiazioni caratteristiche emesse da isotopi radioattivi risultanti dalla transizione nucleare dell'elemento stabile attraverso una opportuna reazione nucleare, cioè mediante il metodo della attivazione residua.

Le principali considerazioni nella scelta della reazione nucleare più adatta sono:

- produrre radionuclidi che siano trattenuti nel campione ed abbiano appropriati tempi di dimezzamento;
- le sezioni d'urto del processo siano abbastanza grandi che, tenuto conto della sensibilità dello apparato di rivelazione, possano essere misurate concentrazioni di quel dato elemento anche molto basse;
- ridurre al minimo possibili reazioni di interferenza che producano o consumino il prodotto di attivazione desiderato.

Generalmente la reazione più opportuna e più semplice è la cattura radiativa di neutroni ad energie termiche.

La velocità di formazione di un particolare prodotto di attivazione R_F in un dato campione è data da⁽³⁾:

$$R_F = f \cdot n \cdot \sigma = \frac{f m N_0 \theta \sigma}{M}$$

dove

- f flusso di neutroni ($\frac{\text{neutroni}}{\text{cm}^2 \text{ sec}}$)
- σ sezione d'urto di reazione (cm^2)
- n numero di atomi nel bersaglio dell'isotopo precursore
- m massa del bersaglio (gr)
- M peso atomico del bersaglio (gr)
- θ frazione di abbondanza isotopica dell'isotopo precursore
- N_0 numero di Avogadro

Il numero di radionuclidi ottenibili dopo un tempo t_a di irradiazione è dato da

$$N(t_a) = \frac{f m N_0 \theta \sigma (1 - e^{-\lambda t_a})}{M \lambda}$$

dove

- λ costante di decadimento del nuclide considerato (sec^{-1})

Il numero di disintegrazioni al sec che si possono rivelare dopo un tempo t_d dalla fine della irradiazione è dato da

$$\left. \frac{dN}{dt} \right]_{t_d} = \frac{f m N_0 \theta \sigma (1 - e^{-\lambda t_a})}{M} A \eta e^{-\lambda t_d}$$

dove

- η è l'efficienza totale di rivelazione dell'apparato sperimentale corrispondente alla energia del fotone considerato
- A è la frazione di fotoni di quella energia emessi per ogni disintegrazione del nuclide in esame

Tale formula può essere trasformata nella seguente di più immediata utilizzazione⁽⁴⁾

$$\mathcal{N}^\circ \left(\frac{\text{conteggi}}{\text{minut. } \mu\text{g}} \right) = 3.6 \times 10^{-5} \frac{f \theta \sigma}{M} A \eta \left[1 - \exp \left(-0.693 \frac{t_a}{T_{1/2}} \right) \right] \exp \left(-0.693 \frac{t_d}{T_{1/2}} \right)$$

dove

- \mathcal{N}° è il numero di conteggi per minuto per μgr di elemento precursore che cadono nel fotopico corrispondente al fotone di energia considerata
- $T_{1/2}$ il tempo di dimezzamento del radionuclide
- σ la sezione d'urto in barns

Tale formula non tiene conto ovviamente di possibili reazioni di interferenza e deve essere quindi corretta di volta in volta a seconda del caso specifico.

Le misure preliminari di concentrazione eseguite con il rivelatore descritto riguardano la misura della quantità di sodio, potassio e cloro presente nelle unghie di bambini sani e malati di mucoviscidi o fibrosi cistica del pancreas, allo scopo di mettere in evidenza alterazioni delle concentrazioni di tali elementi dovute alla malattia. La mucoviscidosi infatti provoca una disfunzione di quasi tutte le ghiandole esocrine per cui una delle manifestazioni cliniche principali è l'altissima concentrazione di elettroliti nel sudore⁽⁵⁾. Partendo appunto da questa considerazione uno dei metodi fondamentali di diagnosi della malattia si basa sulla misura di conducibilità eseguite direttamente sul sudore⁽⁶⁾. Un metodo più comodo appare quello della misura di concentrazione degli elettroliti quali ad esempio sodio, potassio e cloro nel sudore contenuto nelle unghie o nei capelli (v. ref. 7).

Nel nostro caso le misure riguardano le unghie. Lo studio preliminare sulla manipolazione di campioni e il trattamento particolare di essi⁽⁸⁾ ha permesso di verificare che le quantità di Na, K e Cl erano effettivamente contenute nel sudore.

Sono state misurate le concentrazioni di tali elementi in 24 campioni, di circa 20 mgr ciascuno, messi a disposizione soprattutto dal Centro Studi riguardante tale malattia dell'Ospedale Gallini di Genova. Tali campioni riguardavano bambini malati e no. In Tabella III sono mostrati gli

TABELLA III

	SODIO	POTASSIO	CLORO
Tipo di reazione	$n + Na^{23} \rightarrow Na^{24}$ $Na^{24} \rightarrow Mg^{24} + \gamma$	$n + K^{41} \rightarrow K^{42}$ $K^{42} \rightarrow Ca^{42} + \gamma$	$n + Cl^{37} \rightarrow Cl^{38}$ $Cl^{38} \rightarrow Ar^{38} + \gamma$
M (gr)	23	41	37
θ	100%	6.77%	24.47%
σ (barns)	0.53	1.20	0.40
$T_{1/2}$	15.0 ore	12.4 ore	37.3 min.
Energie dei γ principali emessi	$\left\{ \begin{array}{l} 1.368 \text{ MeV} \\ 2.754 \text{ MeV} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 0.313 \text{ MeV} \\ 1.524 \text{ MeV} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 1.633 \text{ MeV} \\ 2.167 \text{ MeV} \end{array} \right.$
Energia del γ utilizzato in misura	1.368 MeV	1.524 MeV	2.167 MeV
$A^{(*)}$	100%	18%	47%
$\eta^{(*)}$	10^{-4}	$0.75 \cdot 10^{-4}$	$0.5 \cdot 10^{-4}$

(*) valori relativi all'energia del fotone utilizzati per la misura.

schemi di reazione e di decadimento presi in considerazione nonchè i valori dei parametri che compaiono nella formula dell'attivazione residua, relativamente ai tre elementi detti.

Le irradiazioni dei campioni con neutroni sono state fatte utilizzando il reattore dell'Università di Pavia. I campioni irradiati venivano ritrasportati in sede e la loro attività misurata ivi.

Le misure di concentrazione di sodio e di potassio sono state fatte scegliendo come valori del tempo di irradiazione $t_a = 3$ ore e come tempo di attesa t_d valori variabili tra 2 e 24 ore allo scopo di migliorare la precisione delle misure attraverso la conoscenza del tempo di dimezzamento. Sono stati eseguiti conteggi in tempi Δt variabili tra 15 e 30 minuti.

In Figg. 9 e 10 sono mostrati due spettri tipo più significativi per mettere in evidenza i due elementi.

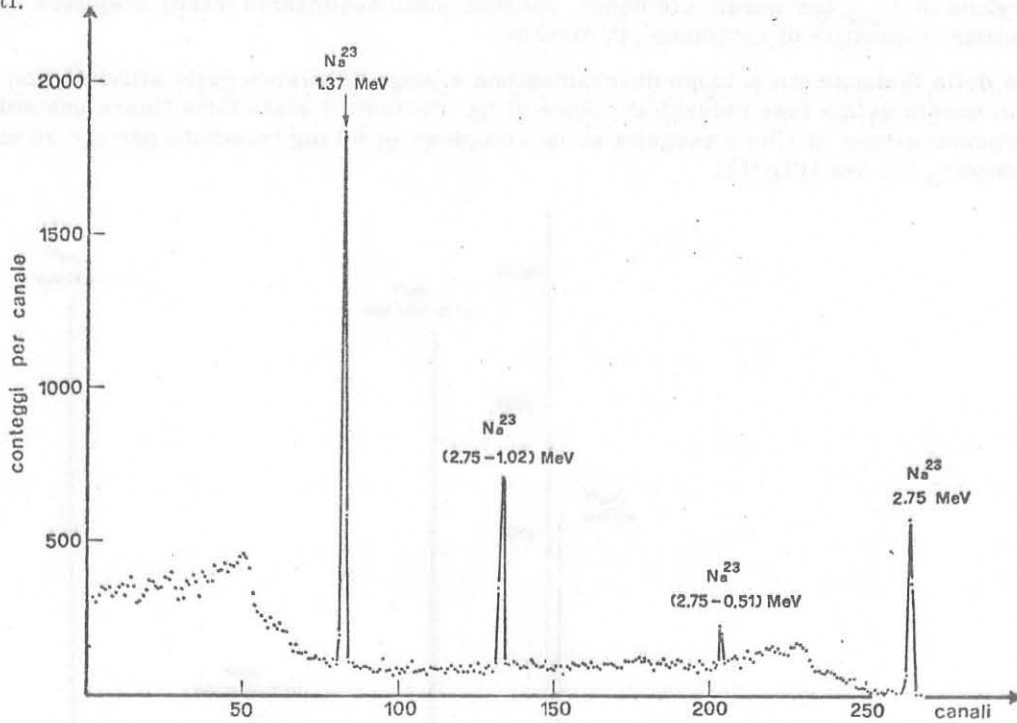


FIG. 9 - Spettro energetico ottenuto dall'attivazione di campioni di unghie per la misura della concentrazione di Sodio, come descritto nel testo.

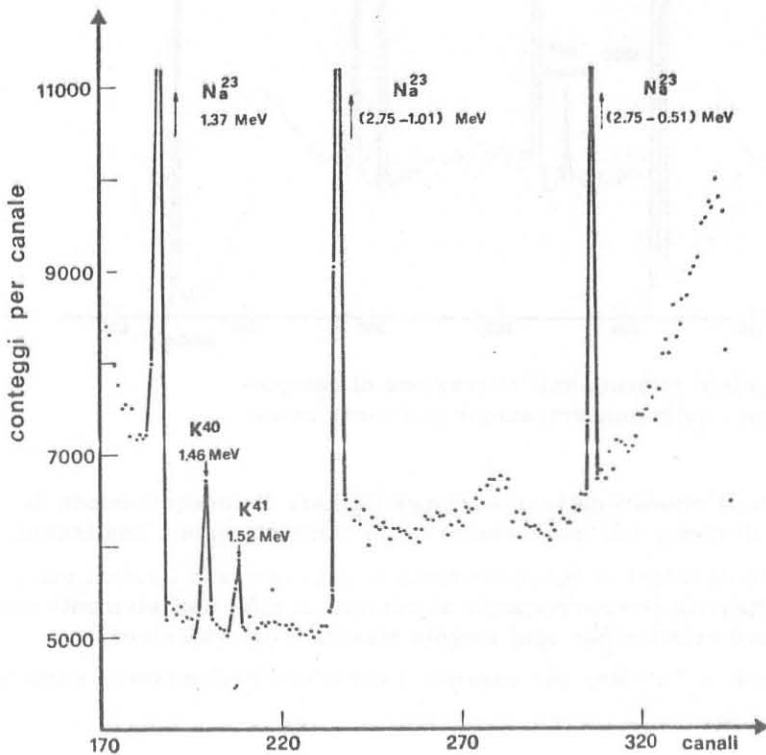


FIG. 10 - Particolare di uno spettro energetico ottenuto dall'attivazione di campioni di unghie per la misura della concentrazione di Potassio, come descritto nel testo.

Queste misure non hanno permesso di ricavare il valore della percentuale di Cloro a causa soprattutto del valore di $T_{1/2}$ per questo elemento. Sarebbe stato necessario infatti scegliere valori di t_d molto minori o quantità di campione più elevate.

A causa della distanza tra il luogo di irradiazione e luogo di misura delle attività, non è stato possibile in questa prima fase ridurre il valore di t_d . Pertanto è stata fatta finora una sola misura della concentrazione di Cloro eseguita su un campione di 60 mg irradiato per $t_a = 30$ minuti e misurato dopo $t_d = 1$ ora (Fig. 11).

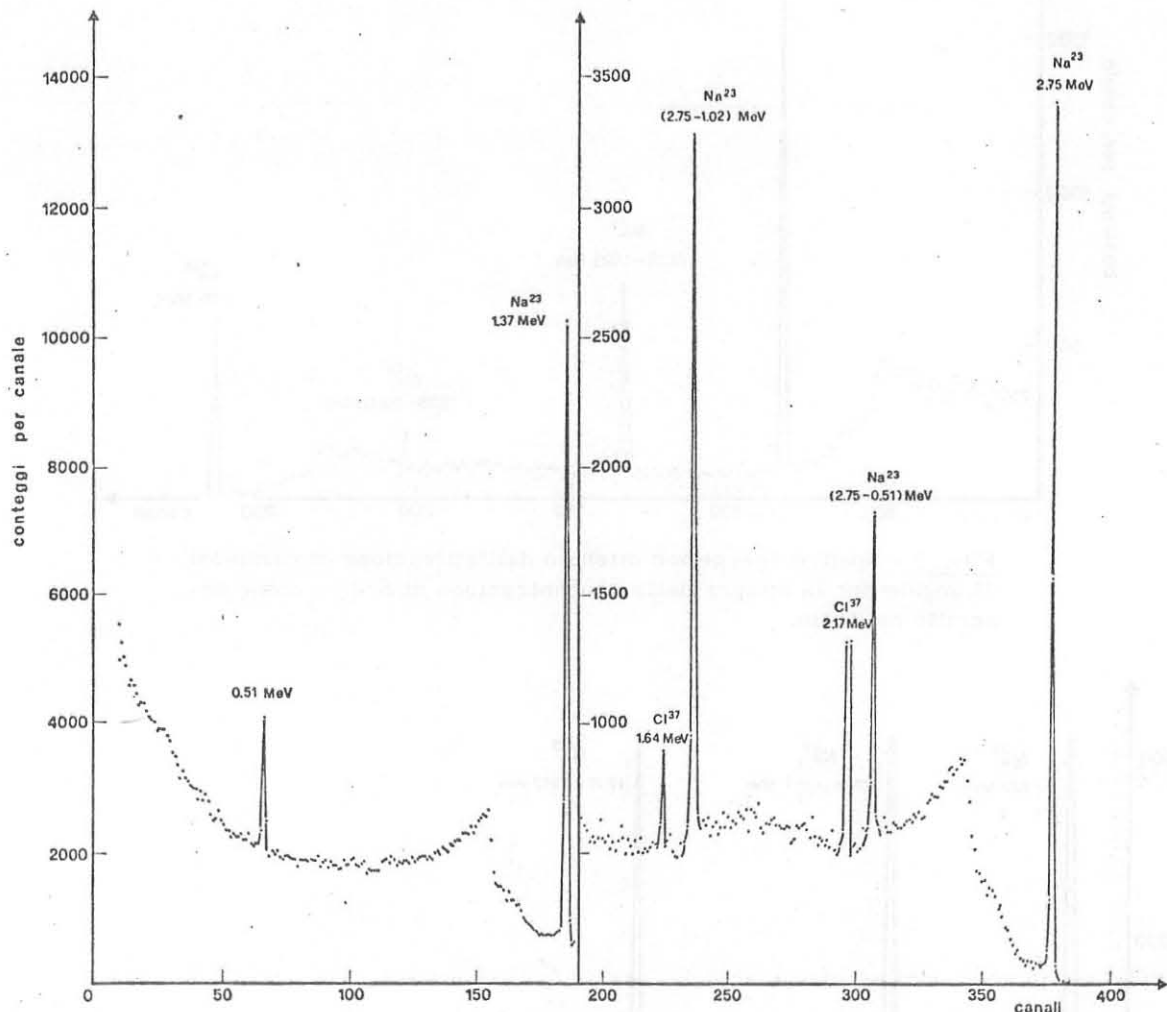
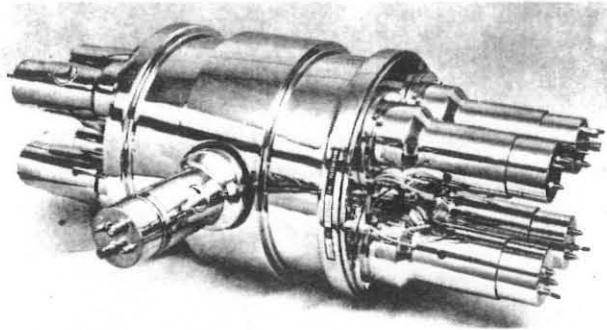


FIG. 11 - Spettro energetico ottenuto dall'attivazione di campioni di unghie per la misura della concentrazione di Cloro, come descritto nel testo.

In Tabella IV sono riassunti i risultati ottenuti dalle misure preliminari di concentrazione di Sodio e di Potassio nei 24 campioni e di Cloro nell'unico campione di bambino malato analizzato.

In Tabella IV è riportato l'intervallo di valori di concentrazione in cui rientrano i valori misurati. La concentrazione è data in millieq/Kg che corrisponde al numero di moli dell'elemento considerato per gr del campione. L'errore relativo per ogni singola misura è del 10% circa.

I risultati riportati schematicamente in Tabella, pur essendo a carattere preliminare, sono di interesse in quanto mostrano



Bicron Model 9HSW 10/(8)3L

Bicron 9" dia x 10" thick NaI(Tl) (22.8 dia x 25.4 cm) crystal with 8 each 3" PMT's, with a thru-side well 3" ID. Crystal is split into 2 optically isolated halves each 9" dia x 5" thick for Compton suppression and pair spectrometry. Pulse height resolution is 8.5% for ^{137}Cs .

FIG. 12 - Caratteristiche del rivelatore a NaI(Tl) da utilizzare in anticoincidenza con il rivelatore Ge(Li) per la soppressione della parte Compton nello spettro energetico.

TABELLA IV

<u>SANI</u>		<u>MALATI</u>
	SODIO	
15 ÷ 55 $\frac{\text{millieq}}{\text{Kg}}$		60 ÷ 300 $\frac{\text{millieq}}{\text{Kg}}$
	POTASSIO	
35 ÷ 50 $\frac{\text{millieq}}{\text{Kg}}$		150 ÷ 250 $\frac{\text{millieq}}{\text{Kg}}$
	CLORO	
non misurata		233 ± 25 $\frac{\text{millieq}}{\text{Kg}}$

- Gli intervalli di valori in cui cadono le concentrazioni nel caso di bambini malati o sani sono ben distinti tra loro.
- I valori di concentrazione relative a bambini malati sono superiori di fattori 3-4 a quelle relative a casi di bambini sani.
- Le concentrazioni di Sodio, Potassio e Cloro sembrano essere equivalenti.
- E' possibile fare una statistica accurata delle concentrazioni di tutti e tre gli elementi avendo a disposizione campioni in quantità sufficiente e eseguendo le misure di attività in luogo molto prossimo a quello delle irradiazioni.

4. - CONCLUSIONI. -

Il rivelatore sarà presto sostituito da uno analogo ma con prestazioni molto maggiori (Harshaw tipo ACO 104). Infatti la risoluzione ottenibile sarà 2.0 keV invece che 3.6 keV e l'efficienza (relativa ad un cristallo NaI(Tl) 3" x 3" a 25 cm) 15% invece che 2.2%. Ricordando come era stata calcolata la sensibilità massima le caratteristiche del nuovo rivelatore permettono di raggiungere migliori sensibilità per un ordine di grandezza cioè di misurare attività $A \approx 10^{-4} \mu\text{Ci}$.

Questo miglioramento è però effettivo solo se si riduce contemporaneamente anche il contributo continuo allo spettro energetico. Il che è in parte ottenuto avendo guadagnato nel rapporto piccolo-Compton mediante le dimensioni del rivelatore. Per diminuire ulteriormente il contributo della parte continua dello spettro e nello stesso tempo il contributo al fondo ambiente si può utilizzare un sistema di anticoincidenza cioè contornare il rivelatore Ge(Li) con un rivelatore a scintillazione NaI(Tl). La geometria più opportuna per tale rivelatore è quella mostrata in Fig. 12 cioè un cilindro con un foro passante di dimensioni opportune per contenere il rivelatore Ge(Li). Lo schermaggio viene poi completato anteriormente mediante un altro scintillatore cilindrico NaI(Tl) più piccolo che si comporta da "tappo". Tale geometria ha il vantaggio di poter variare lo spazio tra i due rivelatori e cioè lo spazio a disposizione per la sorgente. Le dimensioni più adatte per il rivelatore Ge(Li) in dotazione nel prossimo futuro al laboratorio sono date in Fig. 12.

In Fig. 13 infine è mostrato lo schema a blocchi dell'elettronica da associare a tale sistema di anticoincidenza e di analisi lineare per il rivelatore Ge(Li). L'uso di tale sistema per il rivelatore le cui caratteristiche di efficienza e risoluzione sono state riportate all'inizio di questo paragrafo, permetterebbe di raggiungere sensibilità $A \approx 10^{-4} - 10^{-5} \mu\text{Ci}$ cioè confrontabili con quelle di un rivelatore a NaI(Tl) a pozzetto⁽⁹⁾ ma con l'enorme vantaggio presentato dall'alta risoluzione per il riconoscimento e l'isolamento del contributo di più isotopi.

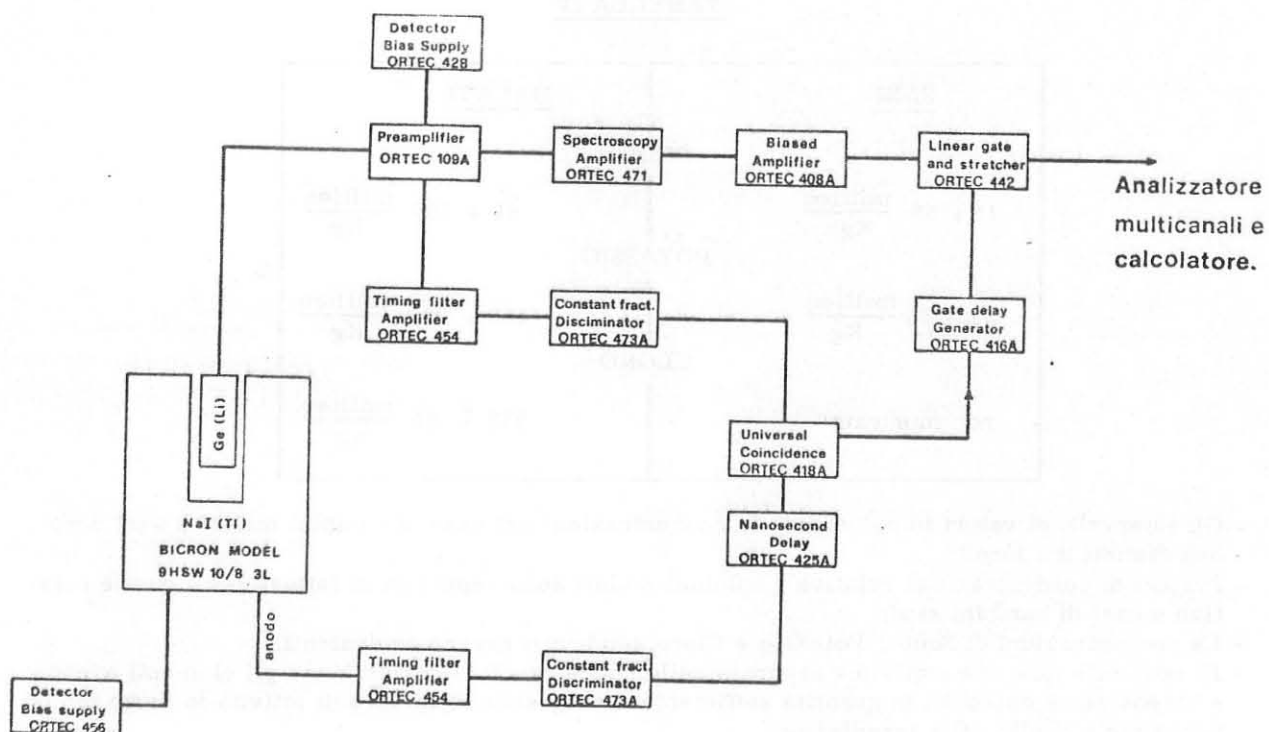


FIG. 13 - Schema a blocchi dell'elettronica associata al rivelatore Ge(Li) con anticoincidenza a NaI(Tl).

REFERENZE.

- (1) Mather, Journ. Appl. Phys. 28, 1200 (1957).
- (2) Amaldi, Fisica delle radiazioni (Boringhieri, 1971), pag. 274.
- (3) Koch, Activation Analysis Handbook (Academic Press, 1960).
- (4) Parr, Report IAEA - 122-151 (1970) Vienna.
- (5a) Bowen, Report IAEA - 122-145 (1970) Vienna.
- (5b) Kollberg and Landstrom, Acta. Paediatr. Scand. 63, 405 (1974).
- (6) (Prof. Romano) "Centro Studi - Fibrosi Cistica" Ospedale Gaslini.
- (7a) Kopito, Mahmoodian and Tawnley, The New Eng. Journal Med. 272, 504 (1965).
- (7b) Antonelli, Ballati and Annibaldi, Arch. Dis. Childh. 44, 218 (1969).
- (8) Fossati, Lavoro di tesi di laurea (1976).
- (9) P. Corvisiero, M. Costantini e L. Fossati, Report INFN/BE-78/1 (1978).