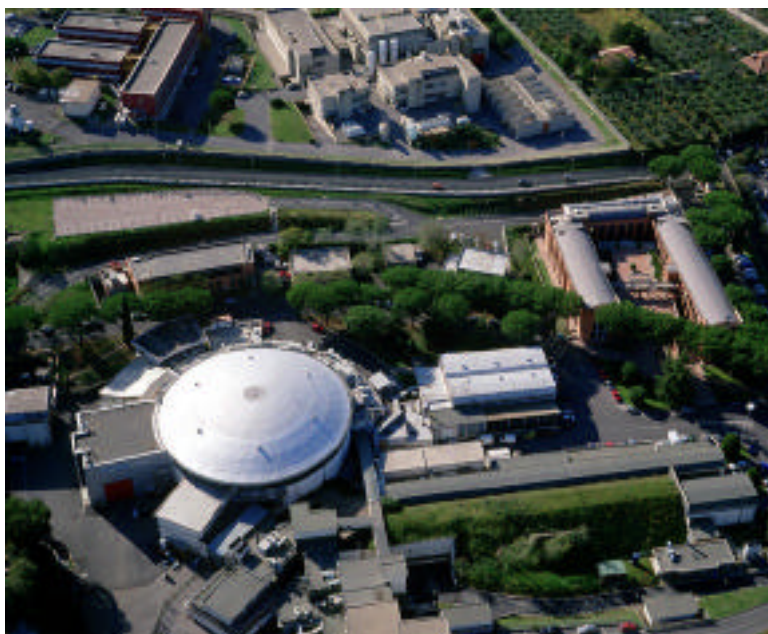


STAGE ESTIVO
Giugno - Luglio 2003

RADIOATTIVITA' AMBIENTALE

Tutor: Alfonso Gentile

Studenti: Carbini Marco, Tata Matteo



A cura di: **Marco Carbini**
Matteo Tata

Istituto tecnico industriale "E. FERMI"

Indice:

1. Interazioni delle radiazioni x e γ con la materia
 - 1.1 Accenni alla spettrometria
 - 1.2 Le onde elettromagnetiche
 - 1.3 Radiazioni x e γ
 - 1.4 Interazione dei raggi x e γ con la materia:
 - Effetto fotoelettrico
 - Effetto Compton
 - Produzione di coppie
 - 1.5 Lo spettro reale:
 - Fotopicco
 - Distribuzione Compton
 - Picchi di Fuga
 - Picchi Somma
 - Picchi di retrodiffusione

2. Strumentazione usata
 - 2.1 Lo spettrometro
 - 2.2 Rivelatori al Ge
 - 2.3 Becker di Marinelli

3. Misure e calibrazioni
 - 3.1 Calibrazione canale-energia
 - 3.2 Calcolo dell' area netta del picco
 - 3.3 Calibrazione in efficienza
 - 3.4 Analisi limature lavorazioni
 - 3.5 Analisi connettori-Da ne
 - 3.6 Analisi polveri Linac



Premessa

Stage Estivo 2003

L'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) è l'ente italiano il cui scopo principale è lo studio dei costituenti fondamentali della materia. Esso svolge attività di ricerca, teorica e sperimentale, nei campi della fisica subnucleare, nucleare e astroparticellare. La ricerca fondamentale in questi settori richiede l'uso di tecnologie e strumenti di ricerca d'avanguardia che l'Infn sviluppa nei propri laboratori e in collaborazione con il mondo dell'industria.

Lo stage si è svolto presso l'Unità Funzionale di Fisica Sanitaria dei Laboratori Nazionali di Frascati (L.N.F.), il più grande complesso di laboratori dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (I.N.F.N.).

I L.N.F. si occupano in gran parte dei campi d'interesse dell'I.N.F.N. attraverso l'utilizzo di un complesso di macchine acceleratrici nelle quali è possibile studiare la fisica subnucleare e nucleare e particolari fenomeni come la luce di Sincrotrone.

L'Unità Funzionale di Fisica Sanitaria si occupa di tutti gli aspetti di radioprotezione derivanti dalle attività poste in essere dai L.N.F.; predispone e fa attuare tutte le disposizioni necessarie per il rispetto della legislazione e delle normative vigenti in Italia, oltre a fornire azioni di studio, di rimedio e di formazione.

Durante il nostro Stage abbiamo avuto l'opportunità di interessarci e approfondire gli aspetti teorici e sperimentali e l'utilizzo di un sistema di misura per la spettrometria γ , il quale costituisce uno dei più tipici metodi di indagine nel campo della Fisica Nucleare. Ogni nostra esperienza è stata sempre supportata e visionata dai nostri due tutor, i quali ci hanno fornito le nozioni fondamentali necessarie per un'attività pratica nel campo della spettrometria γ . Principalmente le nostre esperienze si sono basate su un'analisi teorica e sperimentale derivante dallo studio dei radionuclidi naturali e artificiali. Le competenze da noi acquisite ci hanno sensibilizzato fortemente alla tematica della radioprotezione, sugli effetti sia immediati che tardivi dannosi per l'uomo e per l'ambiente.

1. Interazione delle radiazioni x e γ con la materia

1.1 Accenni alla spettrometria

La spettrometria è un metodo di analisi e di misura della radioattività che presenta notevoli vantaggi:

- rende possibili **analisi non distruttive** e senza particolari difficoltà di campioni di natura anche molto differente;
- permette la **determinazione simultanea di più radionuclidi**.

La ricerca applicata fa utilizzo molto spesso di questo metodo d'indagine, come nei campi di: Fisica Sanitaria, Radioecologia, Analisi per attivazione, Medicina Nucleare, ricerche e applicazioni in campo biologico, agrario, farmaceutico, medico ecc. che comportino l'impiego di traccianti radioattivi.

1.2 Le onde elettromagnetiche

Le radiazioni elettromagnetiche consistono in un campo elettrico e un campo magnetico oscillanti su piani perpendicolari tra loro.

Le principali caratteristiche delle onde elettromagnetiche:

- sono definite dai vettori E ed H;
- hanno una velocità c pari a 3×10^8 m/s nel vuoto;
- la loro massa a riposo uguale a zero;
- non possiedono carica elettrica;

Una grandezza caratteristica delle radiazioni elettromagnetiche è la lunghezza d'onda la quale rappresenta la distanza tra un due punti ad uguale intensità della medesima onda. Dalla lunghezza d'onda si può ricavare la frequenza dell'onda elettromagnetica, espressa matematicamente come:

$$c/\lambda \text{ (sec}^{-1}\text{)}$$

dove c è la velocità della luce.

Queste teorie non sono sufficienti ad interpretare alcuni fenomeni della fisica atomica, per questo è nata la cosiddetta “ *teoria dei quanti* ” dove le onde elettromagnetiche sono rappresentate da corpuscoli di energia, i *Fotoni*.

L'energia di un quanto e la frequenza della radiazione sono legate dalla relazione:

$$E = h\nu$$

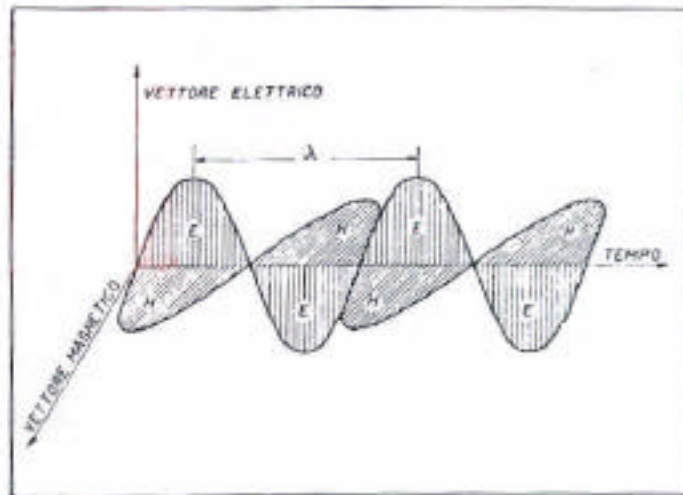


Fig. 1. — Rappresentazione schematica di un'onda elettromagnetica.

1.3 Radiazioni x e

Le radiazioni si dividono in ionizzanti e non ionizzanti; si dicono ionizzanti quelle la cui energia è perlomeno sufficiente a far diventare un atomo uno ione.

I radioelementi, durante il loro decadimento radioattivo, emettono delle radiazioni ionizzanti che possono essere di tipo α , β , γ , ognuna delle quali ha proprie caratteristiche.

Nel nostro caso la parte di spettro di interesse è quello generato da raggi x e γ .

Le differenze principali tra radiazioni x e γ sono:

Radiazioni γ

- sono emesse dal nucleo come conseguenza di un suo riassetamento energetico;
- derivano da processi di disintegrazioni radioattive α e β che lasciano il nucleo finale in uno stato eccitato, reazioni nucleari di cattura, fissione nucleare, annichilazione della materia ed interazione di una particella carica con il campo elettrostatico di un nucleo atomico.
- hanno energie ed intensità caratteristiche quando emesse da un nuclide radioattivo.

Radiazioni x

- sono prodotte in seguito a transizioni di elettroni tra orbitali di differente energia;
- derivano da processi di decadimento radioattivo (conversione interna, cattura K) oppure possono essere generate dall'accelerazioni di elettroni o particelle cariche, da macchine a raggi x o mediante l'arresto di elettroni in un assorbitore;
- hanno caratteristiche legate all'elemento che le origina.

1.4 Interazioni dei raggi x e γ con la materia

A differenza delle altre radiazioni considerate, le radiazioni x e γ , interagiscono con la materia in modo discontinuo e la loro intensità non viene mai ridotta a zero.

La **legge esponenziale di attenuazione** nasce da misure di assorbimento di un fascio collimato di raggi γ monoenergetici:

$$I = I_0 e^{-\mu t}$$

Dove I = intensità del fascio trasmesso attraverso lo spessore t di assorbitore;

t = spessore dell' assorbitore;

I_0 = intensità del fascio iniziale di raggi γ ;

e = base dei logaritmi naturali;

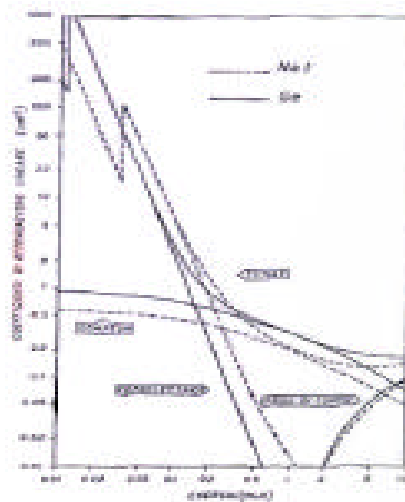
μ = coefficiente di attenuazione;

I tre diversi processi di assorbimento dei raggi γ nella materia sono:

- effetto Fotoelettrico
- effetto Compton
- produzione di coppie

In realtà esistono altri processi di interazione secondari di minore interesse, come ad esempio la deviazione coerente e la fotodisintegrazione del nucleo.

I processi d' interazione Compton e fotoelettrico predominano per energie dei fotoni inferiori a **1.02 MeV** (energia equivalente alla massa a riposo di una coppia di elettroni). Tutti e tre i processi d' interazione danno origine ad emissioni di elettroni da parte della materia.



Effetto Fotoelettrico

Questo processo avviene mediante l'interazione di un fotone avente energia $E = h\nu$ con un sistema atomico, il quale cede tutta la sua energia a uno degli elettroni più strettamente legati. L'elettrone viene quindi espulso dall'atomo con energia cinetica E_k :

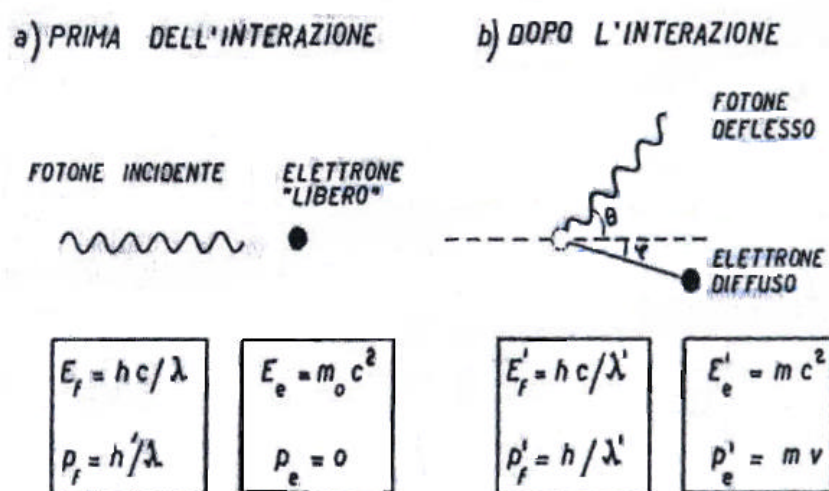
$$E_k = h\nu - E_b$$

dove E_b è l'energia di legame dell'elettrone orbitale.

La ionizzazione di un atomo per effetto fotoelettrico comporta l'emissione di raggi x.

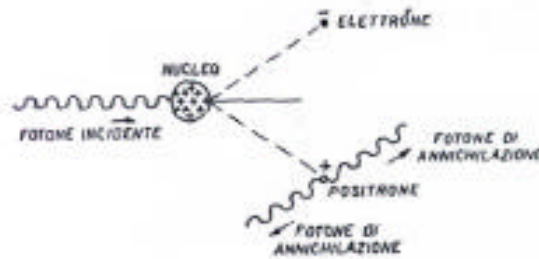
Effetto Compton

È dato da una collisione elastica tra un fotone ed un elettrone "libero", intendendo per libero che l'energia di legame posseduta dal medesimo è di molto inferiore a quella del fotone. Il fotone non può trasferire tutta la sua energia all'elettrone, poiché si parla di una collisione elastica, esso può essere solamente deflesso dalla direzione iniziale con cambiamento di lunghezza d'onda e quindi di energia.



Produzione di coppie

Quando un fotone di energia almeno doppia di quella equivalente alla massa a riposo dell'elettrone ($M_0 c^2 = 0.511 \text{ MeV}$) interagisce con il campo elettrostatico che circonda una particella carica, scompare dando origine ad una coppia di elettroni di segno opposto (un elettrone e un positrone).



1.5 Lo spettro reale

L'informazione fornita dallo spettrometro dovrebbe, in teoria, dar luogo ad una distribuzione di elettroni caratterizzata da uno o più gruppi monoenergetici e da una distribuzione continua (spettro ideale). Lo spettro che in realtà si ottiene è detto **spettro reale** avente precise caratteristiche.

Fotopicco

In questo caso c'è un completo trasferimento di energia da parte delle radiazioni al rivelatore; la distribuzione di impulsi è di tipo gaussiana, centrata attorno al valore corrispondente all'energia del fotone e non più come la "riga" rappresentata nello spettro ideale.

Distribuzione Compton

Rappresenta il trasferimento parziale di energia dei fotoni al rivelatore. Ciò è dovuto a processi d'interazione Compton singoli o multipli dopo i quali il raggio diffuso sfugge dal rivelatore. È caratterizzata da un massimo, Compton Edge, che corrisponde ai processi di interazione Compton nel rivelatore con retrodiffusione a 180° del fotone e massimo trasferimento della sua energia all'elettrone.

Picchi di fuga

Sono quelli dovuti ad interazioni con produzioni di coppie e uscita dal rivelatore della conseguente radiazione di annichilazione.

Picchi somma

Il caso tipico di picco somma si ottiene quando si ha a che fare con dei radionuclidi che emettono due o più fotoni in cascata. L'emissione di questi fotoni avviene in pratica simultaneamente per cui, l'effetto sarà quello di un fotopicco corrispondente alla somma delle energie dei diversi fotoni.

Picchi di retrodiffusione

I raggi γ emessi dal campione, interagendo mediante processi Compton con il materiale che circonda il rivelatore, vengono poi retrodiffusi nel rivelatore, dando luogo ad un picco di retrodiffusione la cui energia massima è uguale a circa 0.25 MeV.

2.Strumentazione usata

2.1 Lo spettrometro

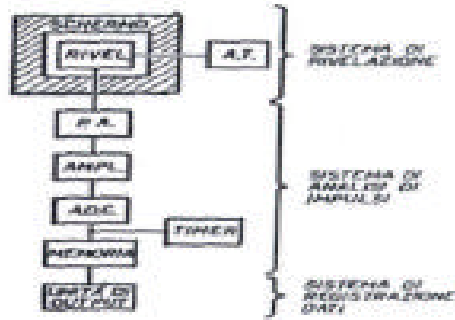
Lo spettrometro è fondamentalmente uno strumento capace di rappresentare, in forma differenziale, la distribuzione energetica dei fotoni γ . Quindi lo strumento non si limita alla sola registrazione del numero degli impulsi ma li classifica secondo la loro ampiezza in certi intervalli di energia.

I suoi componenti principali sono:

- un sistema di rilevazione, comprendente il rivelatore e lo schermo. La funzione del rivelatore è quella di trasformare l'energia ceduta dal fotone incidente in una carica elettrica ad essa proporzionale. I rivelatori a stato solido sono i più indicati per la misura dei raggi γ a causa della loro elevata efficienza;
- un sistema di analisi degli impulsi composto da preamplificatore, amplificatore, ADC, analizzatore di ampiezza ed unità di memoria i quali rendono i dati adatti alla successiva analisi, conservando la proporzionalità tra l'ampiezza degli impulsi e la energia ceduta dal fotone al rivelatore;
- un sistema di registrazione e trattamento dei dati.

Infine i dati ottenuti possono essere visualizzati ed analizzati tramite l'utilizzo di un software opportuno.

La caratteristica principale del rivelatore dello spettrometro è senz'altro l'efficienza, cioè il rapporto tra il numero di impulsi registrati dal rivelatore e il numero di fotoni emessi dal campione in esame.



2.2 Rivelatori al Ge

L' avvento dei rivelatori a Ge risale ai primi anni '60. Da allora, grazie soprattutto alla loro elevata risoluzione, questi rivelatori si diffusero rapidamente, rimpiazzando i rivelatori a NaI in quasi tutte le applicazioni avanzate della spettrometria .

Un rivelatore al Ge è un diodo a stato solido, avente struttura p- i- n costituito da un cristallo molto puro di Germanio ottenuto tramite processi molto complessi. La struttura p- i- n è costituita da tre zone con caratteristiche elettriche diverse tra loro: nella zona di tipo P, l' impurezza predominante è il Ga; nella zona di tipo I, detta intrinseca, la concentrazione di Ga è uguale a quella di Li; nella zona di tipo N, l' impurezza predominante è il Li.

La zona intrinseca è la parte del rivelatore sensibile alle radiazioni e la zona P e la zona N fungono da elettrodi.

La radiazione che colpisce il cristallo lo induce a produrre elettroni che vengono raccolti da specifici elettrodi. La corrente che si forma è proporzionale alla corrente assorbita. I rivelatori al Ge sono raffreddati tramite una barra di rame a contatto con il cristallo (*Criostato*) con l' azoto liquido, infatti per poter funzionare hanno temperature molto basse, a circa 77° K.

I componenti principali del rivelatore al Ge sono: Criostato, Alimentatore ad alta tensione e Pre- amplificatore.

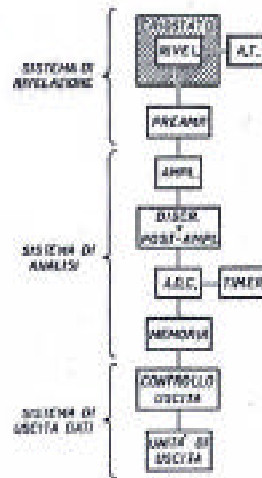
Il **Criostato** mantiene il rivelatore alla temperatura dell' azoto liquido (77° K).

L' **Alimentatore ad alta tensione** genera l' alta tensione che, applicata al rivelatore, mantiene nella zona intrinseca un campo elettrico sufficiente alla raccolta delle cariche. Il **Pre- amplificatore** converte l' impulso di carica proveniente dal rivelatore in un proporzionale impulso di tensione. Lo scopo del Pre- amplificatore è quello di trasformare i deboli impulsi prodotti dal rivelatore, in impulsi capaci di raggiungere l' amplificatore vero e proprio senza perdita di ampiezza.

Le caratteristiche principali del rivelatore al Ge sono:

La **risoluzione** è data dal rapporto tra l' ampiezza a metà altezza del fotopicco e l' energia dei fotoni stessi. Inoltre per dare un' indicazione quantitativa delle prestazioni

del rivelatore, si utilizza il rapporto **picco- Compton** che risulta come la divisione tra l' altezza del fotopicco e la massima altezza del Compton associato.



2.3 Becker di Marinelli

Il becker di Marinelli viene utilizzato per avere una maggiore efficienza di rilevazione e una riproducibilità tra sorgenti utilizzate per la calibrazione e i campioni da misurare.

3. Misure e calibrazioni

3.1 Calibrazione canale- energia

Questa esperienza è stata eseguita attraverso l' analisi di uno spettro di sorgenti radioattive note: Am-241, Co-60, Cs-137. Le misure hanno avuto una durata di 1000 sec tramite un analizzatore multicanale preimpostato. I dati ottenuti, prendendo in considerazione il primo e l' ultimo picco sullo spettro, sono:

Elemento	Canale medio	Energia associata (keV)
Am-241	107,2	59.54
Co-60	2341.97	1332.50

Si suppone la linearità tra canale ed energia e si calcola la retta mediante l' uso delle formule:

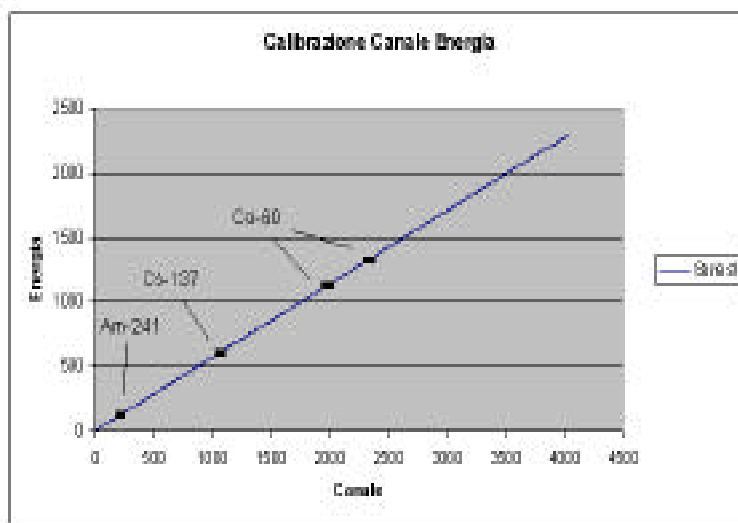
$$y = mx + q$$

$$E = y / x_{CH} + E_2 - y / x_{CH_2}$$

$$q = E_2 - y / x_{CH_2}$$

dove m è dato da: $E_2 - E_1 / CH_2 - CH_1 = E_1 - E / CH_1 - CH$

Tramite questa taratura abbiamo potuto associare ad ogni canale dello spettro la corrispondente energia. Utilizzando la curva in figura è possibile pertanto risalire all'energia dei fotopicchi presenti anche in uno spettro incognito ed associare il fotopicco al tipo di radionuclide presente.



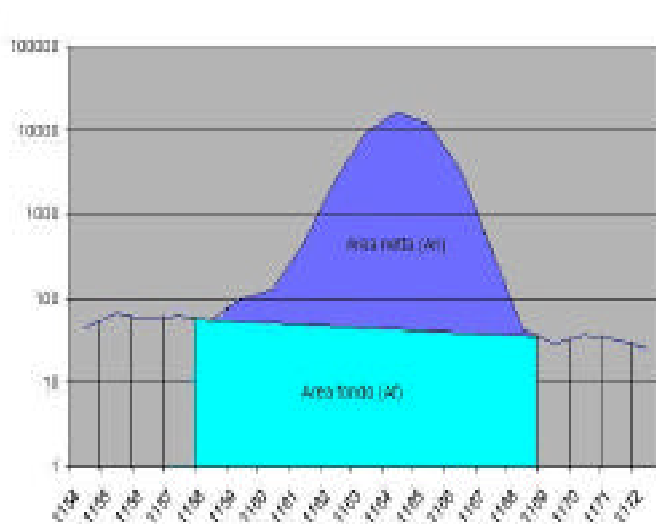
3.2 Calcolo dell' area netta del picco

Per considerare l' area netta del picco bisogna eliminare il fondo dovuto al Compton, eseguendo le seguenti operazioni:

- si somma ogni singolo canale per sapere l' area totale A_t ;
- si calcolano i conteggi dei primi cinque canali a destra e a sinistra del picco fotoelettrico (n_1 e n_2);
- si esegue la media di n_1 e n_2 ;
- si esegue la media della somma di n_1 e $n_2 = f_{fondo}$;
- ottenendo teoricamente un fondo a base rettangolare si calcola la base che equivale all' intervallo di canali inclusi nel picco, sommati di 1 data l' inclusione dell' ultimo ($CH + 1$). Si moltiplica quindi questo fattore per f_{fondo} ottenendo l'area di fondo

(A_f); - l' area di picco netta (A_n) risulterà data dalla sottrazione dell' area totale e l' area di fondo ($A_n = A_t - A_f$).

Ch	Conteggi	
1154	45	
1155	67	$V_1 = 45+67+57+63+55 = 287$
1156	57	$V_2 = 43+29+37+32+26 = 167$
1157	63	
1158	55	$V_{1M} = V_1/5 = 57.4$
1159	100	$V_{2M} = V_2/5 = 33.4$
1160	130	
1161	453	$V_{fondo} = (V_{1M} + V_{2M})/2 = 45.4$
1162	2524	
1163	9614	$CH+1 = 1172-1154+1 = 19$
1164	16146	
1165	11626	$A_f = (CH+1) * V_{fondo} = 862.6$
1166	3369	$A_n = A_t - A_f = 43944$
1167	391	
1168	43	
1169	29	
1170	37	
1171	32	
1172	26	



3.3 Calibrazione in efficienza

In questa esperienza si è tenuto conto della non corrispondenza tra conteggi e attività del radionuclide, questo perché anche il cristallo di Ge stesso ha un'efficienza. Inoltre si è tenuto conto dell'influenza dei tempi di dimezzamento dei radionuclidi partendo dall'attività misurata nella data di prova dei medesimi.

Le formule utilizzate sono:

$$\text{Eff.} = \text{cps} / (A * \text{Abb})$$

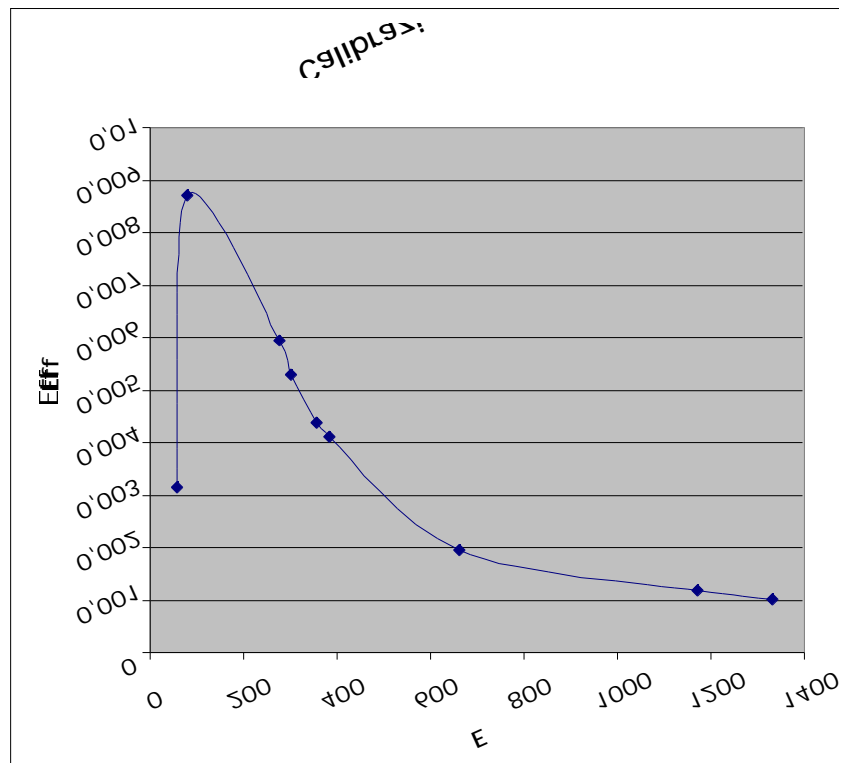
dove A= attività reale conosciuta;
 cps= conteggi per secondo;
 Eff. = efficienza dello strumento;
 Abb = abbondanza (in percentuale).

$$\text{cps} = \text{area netta} / t$$

dove t = è il tempo di conteggio

E (kev)	T 1/2	Elemento	CPS (S ⁻¹)	Incertezza	Abb (%)	A (Bq)	A (Bq)
59,5	432,7	Am241	43,785	0,297	35,9	3,99E+04	3,88E+04
81	10,5	Ba133	37,886	0,266	34,1	3,99E+04	1,27E+04
276,4	10,5	Ba133	5,376	0,128	7,1	3,99E+04	1,27E+04
303	10,5	Ba133	12,334	0,158	18,3	3,99E+04	1,27E+04
356	10,5	Ba133	34,658	0,21	62	3,99E+04	1,27E+04
384	10,5	Ba133	4,658	0,106	8,9	3,99E+04	1,27E+04
661,6	30,15	Cs137	44,565	0,217	85,2	3,99E+04	2,68E+04
1173,2	5,27	Co60	4,858	0,074	99,89	3,99E+04	4,11E+03
1332,5	5,27	Co60	4,207	0,066	99,98	3,99E+04	4,11E+03

Eff(Bq ⁻¹ S ⁻¹)	Incertezza Eff(Bq ⁻¹ S ⁻¹)
0,31%	2,132E-05
0,87%	6,120E-05
0,59%	1,414E-04
0,53%	6,774E-05
0,44%	2,657E-05
0,41%	9,344E-05
0,20%	9,500E-06
0,12%	1,803E-05
0,10%	1,607E-05

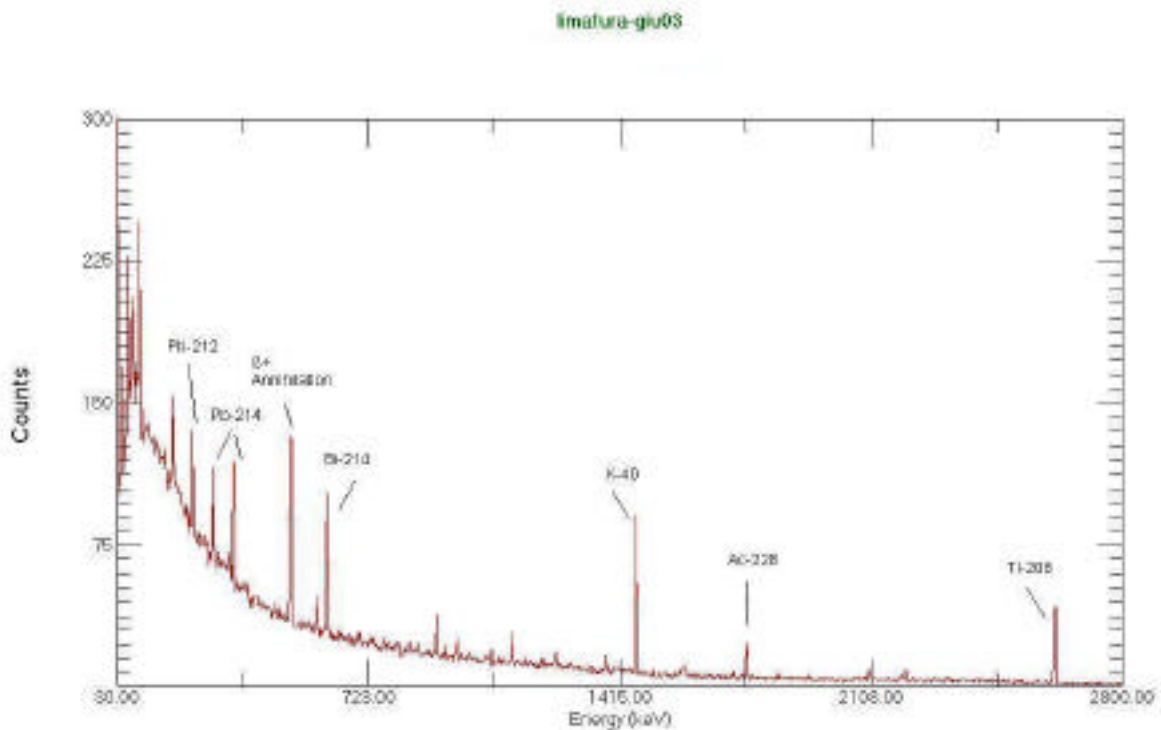


3.4 Analisi limature lavorazioni

Sulla base della curva di calibrazione è stato possibile effettuare misure su campioni di limatura di pezzi provenienti dall' acceleratore Da ne. Si riportano di seguito i risultati dell' analisi fatte:

Energia	Elemento	
46.17	Pb-210*	
63.02	Th-234*	Derivanti famiglia U-238 (*)
75.60	Pb-212+	Derivanti famiglia Th-232 (+)
91.31	Th-234*	
185.50	Ra-226/U235	
238.51	Pb-212+	
241.66	Pb-212+	
295.07	Pb-214*	
351.70	Pb-214*	

510.83	Tl-208 + Contributo eff. coppie	
583.25	Tl-208+	
609.05	Bi-214*	
911.12	Ac-228+	
968.79	Ac-228+	
1120.25	Bi-214*1377.40	Bi-214*
1461.08	K-40 Fondo primordiale	
1592,68	Picco fuga secondario (Tl-208)	
1765.08	Bi-214*	
2103.75	Picco fuga primario (Tl-208)	
2205.03	Bi-214*	
2615.48	Tl-208+	



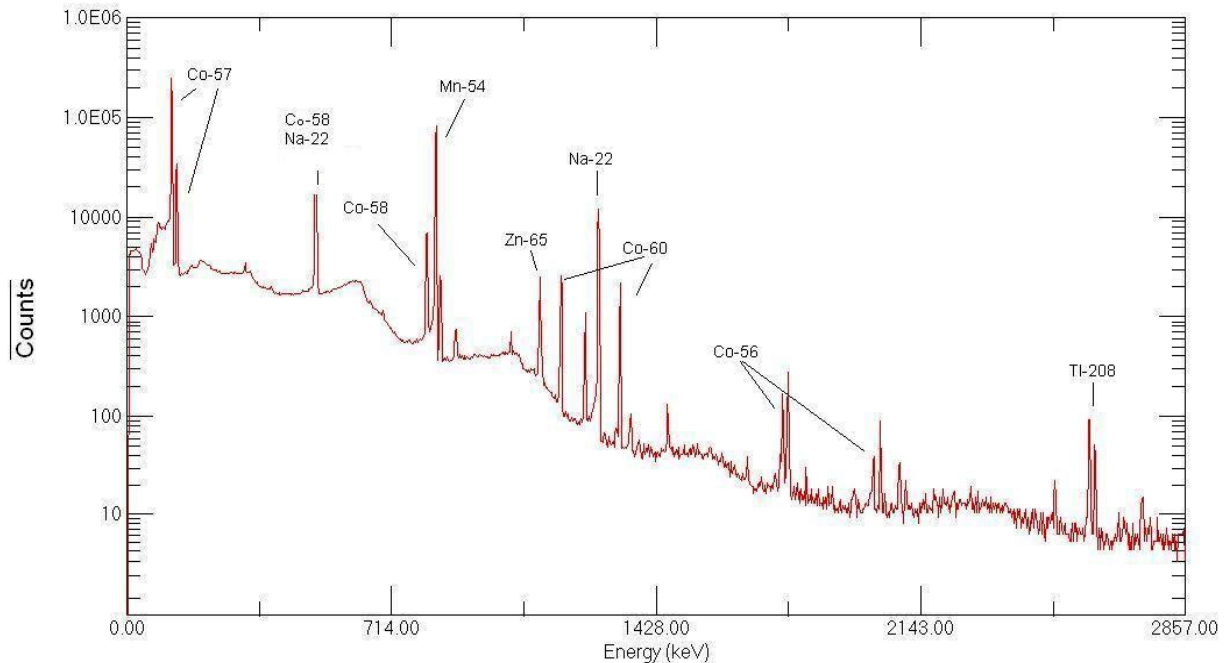
Dall' analisi spettrometrica della limatura delle lavorazioni effettuata non sono stati evidenziati picchi diversi dal fondo ambientale.

3.5 Analisi connettori Da ne

Questa esperienza è stata effettuata su dei connettori provenienti dal Damping Ring di Da ne. Vengono di seguito riportati i dati ottenuti:

Energia	Elemento
121.73	Co-57
136.26	Co-57
510.83	Co-58, Na-22 ed Eff. coppie
810.74	Co-58
834.82	Mn-54
846.74	Co-56
1038.00	Co-56
1115.66	Zn-65
1173.42	Co-60
1238.45	Co-56
1274.77	Na-22
1332.77	Co-60
1771.91	Co-56
1786.02	Picco somma (Na-22)
2035.46	Co-56
2599.40	Co-56
2615.22	Tl-208

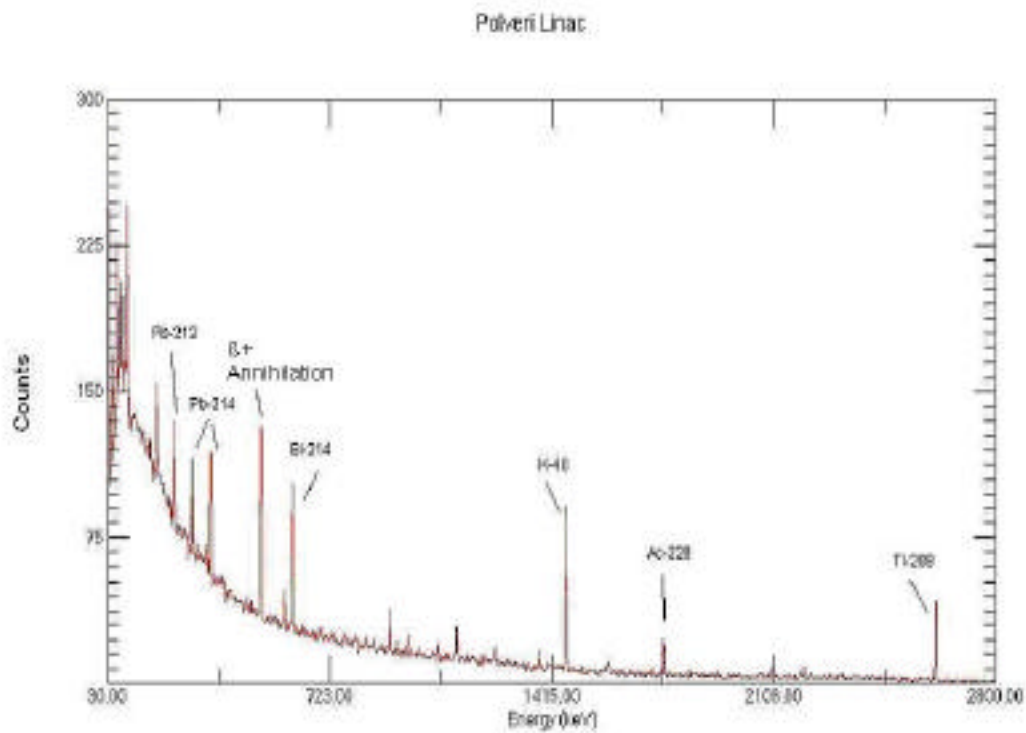
connettori-dafne-giu03



Nell' analisi spettrometrica dei connettori Da ne effettuata è stata riscontrata la presenza di vari radionuclidi artificiale: Na-22, Zn-65, Co-56, Co-57, Co-58, Co-60.

3.6 Analisi polveri Linac

Sono stati dunque prelevati ed analizzati dei campioni di polveri provenienti dagli ambienti dell' acceleratore; i risultati ottenuti sono stati riportati nel seguente grafico:



Nell' analisi spettrometrica delle polveri non sono stati riscontrati picchi diversi da quelli del fondo ambientale.