

Laboratorio Nucleare

DOCENTI

Sandro Barlini

sandro.barlini@unifi.it

Tel. 055-4572697

Andrea Stefanini

andrea.stefanini@unifi.it

Tel. 055-4572269

Sul sito Moodle dell'insegnamento sono presenti:

- Slide proiettate a lezione a.a. 2016-2017 e, via via, 2017-2018
- Dispense “Radioattività e dosimetria”, N. Taccetti
- “Appunti su sorgenti radioattive”, N. Taccetti
- Dispense “Interazione della radiazione ionizzante con la materia”, N. Taccetti
- Dispense “Rivelatori di radiazione ionizzante”, N. Taccetti
- Dispense “Digitalizzazione e analisi di segnali di rivelatori”, L. Bardelli
- Cataloghi di scintillatori e fotomoltiplicatori
- Manuali della strumentazione di laboratorio (nella cartella “Strumentazione di laboratorio”)

Altri testi consigliati:

- G. F. Knoll, “Radiation Detection and Measurement”, John Wiley & Sons
- W.R. Leo, “Techniques for nuclear and particle Physics experiments”, Springer-Verlag
- C.M. Lederer, V.S. Shirley, .. , “Table of Isotopes”, John Wiley and Sons

Laboratorio Nucleare

Modalità di esame

- Prova pratica di caratterizzazione di un rivelatore (3 ore) + discussione orale

oppure

- Studio di un rivelatore con stesura di una relazione (1 settimana) + discussione relazione

In ambedue i casi è caldamente raccomandato cimentarsi nell'esame durante la sessione estiva immediatamente successiva allo svolgimento dell'insegnamento

Lezioni:

martedì e mercoledì ore 14:30-17:30

Svolgimento esperienze in gruppi di 2/3 studenti

PROPRIETA' GENERALI DEI RIVELATORI

(Knoll)

interazione della radiazione con un assorbitore



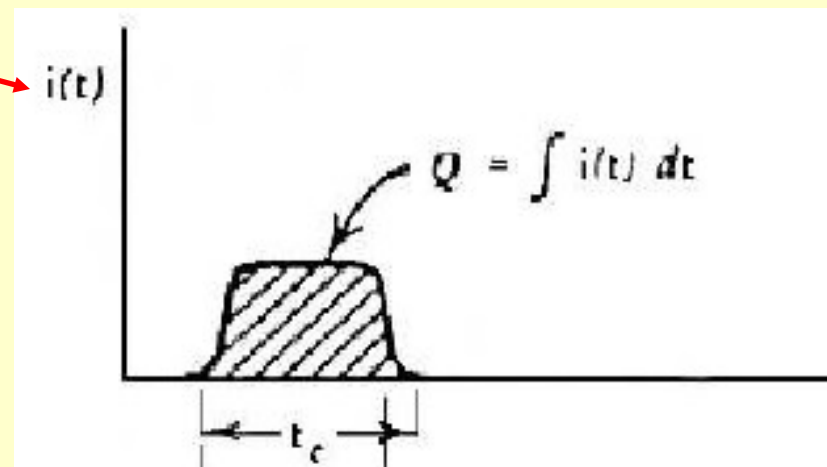
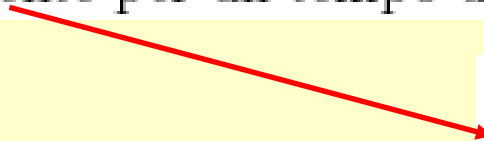
produzione di una certa quantità di carica elettrica
nel volume attivo del rivelatore

raccolta di tale carica

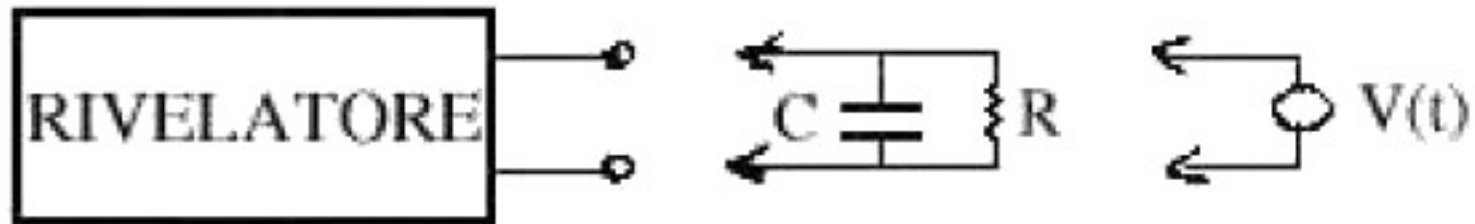


applicazione di un campo elettrico all'interno del rivelatore

flusso di corrente per un tempo uguale al tempo di raccolta



PROPRIETA' GENERALI DEI RIVELATORI

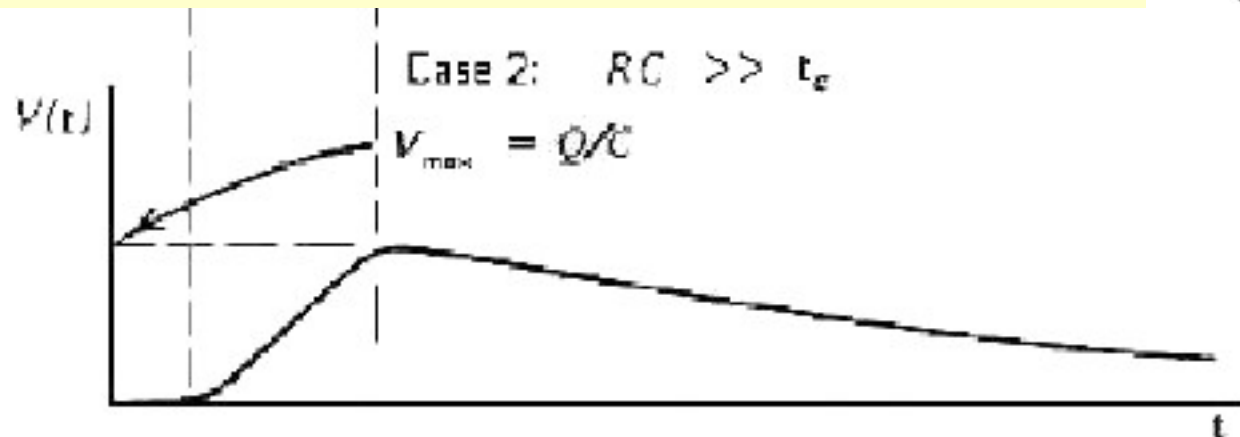
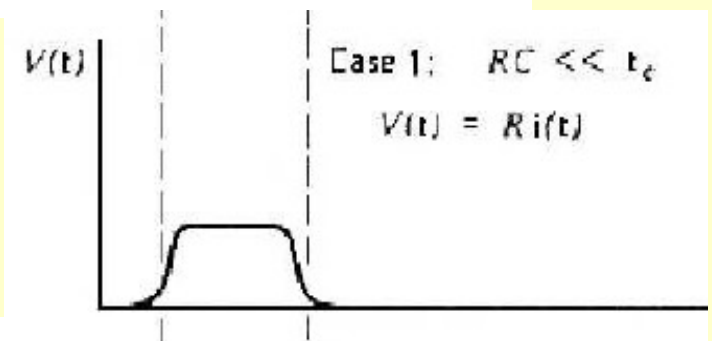


R è la resistenza di ingresso del preamplificatore

C la capacità equivalente del rivelatore e del circuito di misura

$$\tau = RC$$

$\tau \ll t_c$ (t_c = tempo di raccolta della carica)



$$\tau \gg t_c$$

PROPRIETA' GENERALI DEI RIVELATORI

distribuzione dei dN_s/dH in funzione di H

H ampiezza ed N_s numero dei segnali misurati

radiazione monoenergetica incidente sul rivelatore

picco \longrightarrow forma gaussiana \longrightarrow ampiezza H_0

risoluzione in energia R del rivelatore \longrightarrow $FWHM (= 2.35 \sigma)$

$$R = \frac{FWHM}{H_0} = \frac{2.35 \cdot k \cdot \sqrt{N}}{k \cdot N} = \frac{2.35}{\sqrt{N}} \quad N \text{ portatori di carica}$$

fattore di Fano \longrightarrow $F = \frac{\text{varianza osservata in } N}{\text{varianza prevista } (= N)}$

F assume valori	~ 0.1	rivelatori a semiconduttore
	~ 0.15	contatori proporzionali a gas
	1	rivelatori a scintillazione

PROPRIETA' GENERALI DEI RIVELATORI

- efficienza assoluta

$$\varepsilon_{abs} = \frac{\text{numero di impulsi misurati}}{\text{numero di radiazioni emesse dalla sorgente}}$$

- efficienza intrinseca

$$\varepsilon_{int} = \frac{\text{numero di impulsi misurati}}{\text{numero di radiazioni incidenti sul rivelatore}}$$

$$\varepsilon_{int} = \varepsilon_{abs} \cdot \frac{4\pi}{\Omega}$$

$$\Omega = \int_A \frac{\cos\alpha}{r^2} dA$$

asse di un rivelatore cilindrico di raggio a ad una distanza d

$$\Omega = 2\pi \left(1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + a^2}} \right)$$

- efficienza totale: si accettano tutti gli impulsi del rivelatore
- efficienza di picco: si accettano solo gli impulsi corrispondenti al deposito di tutta l'energia da parte della radiazione incidente

PROPRIETA' GENERALI DELLE SORGENTI

(Lederer)

legge del decadimento radioattivo

$$N(t_f) = N(0) e^{-\lambda t_f}$$

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

vita media (*mean lifetime* o *sole lifetime*)

attività $A(t)$

$$A(t) = \frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N(t) = \lambda N(0) e^{-\lambda t} = A(0) e^{-\lambda t}$$

Unità tradizionali

Curie (Ci)

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ dec s}^{-1}$$

Unità S.I.

Becquerel (Bq)

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ dec s}^{-1}$$

Decadimento β^- : $Q_{\beta^-} = \Delta mc^2$

Decadimento β^+ : $Q_{\beta^+} = \Delta mc^2 - 2m_e c^2$

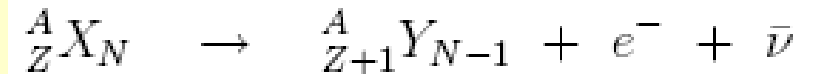
Decadimento per cattura elettronica: $Q_{EC} = \Delta mc^2 - BE_{K,L}(\text{figlio})$

con Δm differenza tra le masse atomiche iniziale e finale e $BE_{K,L}$ energia di legame elettronica nelle shell K, L, (13 eV per H, 116 keV per U)

PROPRIETA' GENERALI DELLE SORGENTI

Sorgenti di elettroni veloci

- Decadimento β^-



- Conversione interna
- Elettroni Auger

Sorgenti di particelle cariche pesanti

- Decadimento α

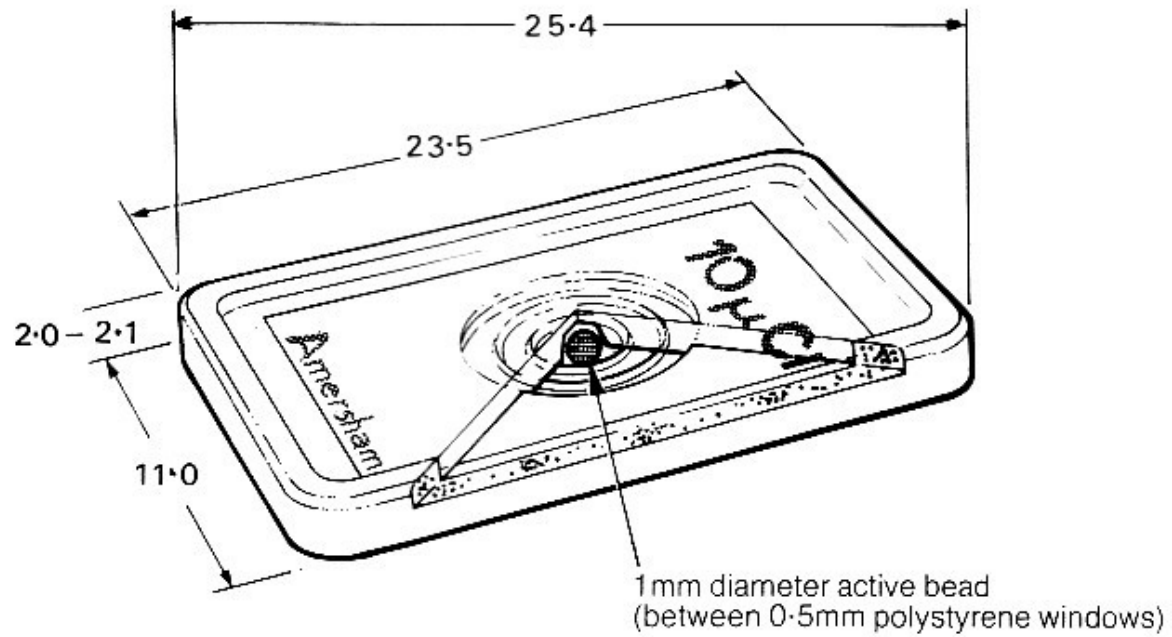


- Fissione spontanea

Sorgenti di radiazione elettromagnetica

- γ seguenti al decadimento β
- radiazione di annichilazione
- raggi X caratteristici

SORGENTI SIGILLATE



X.245

SORGENTI ALFA e ELETTRONI

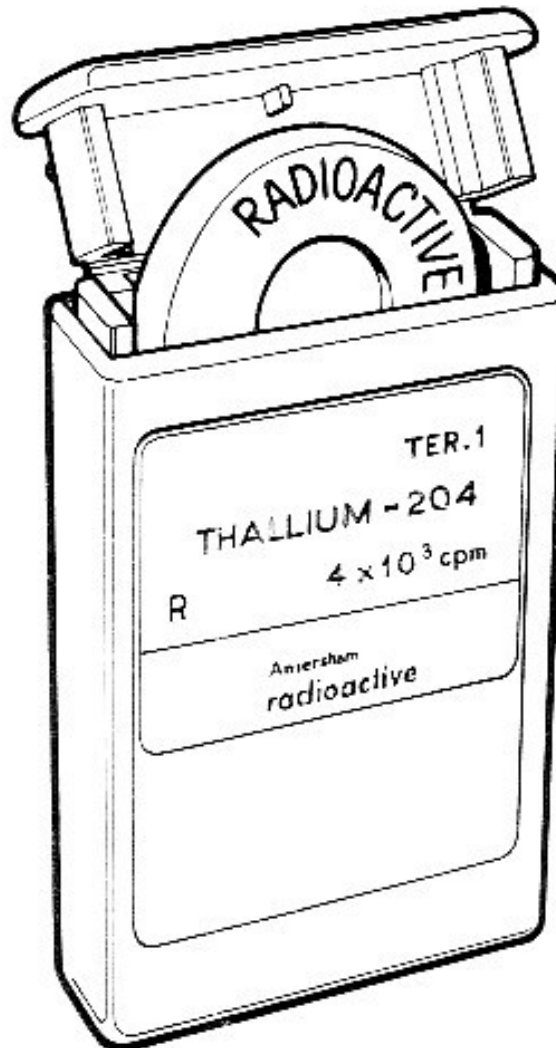
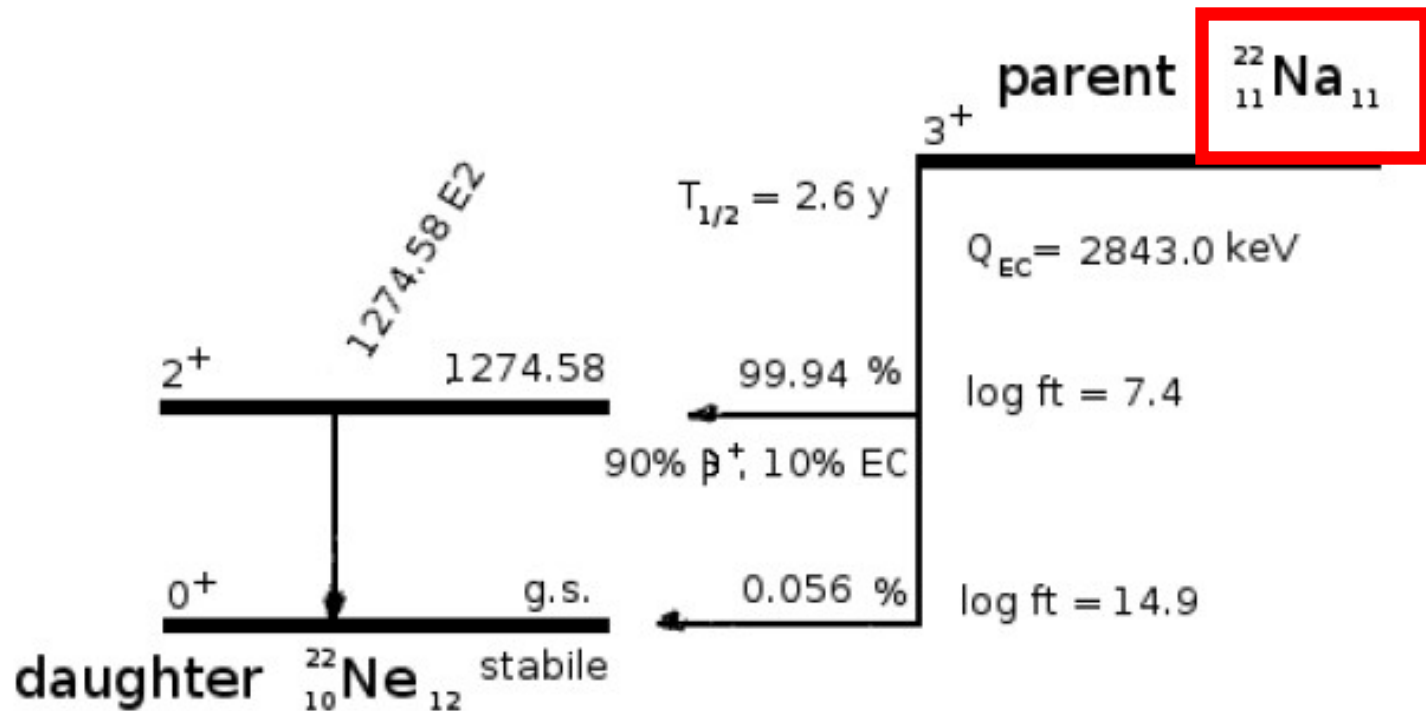


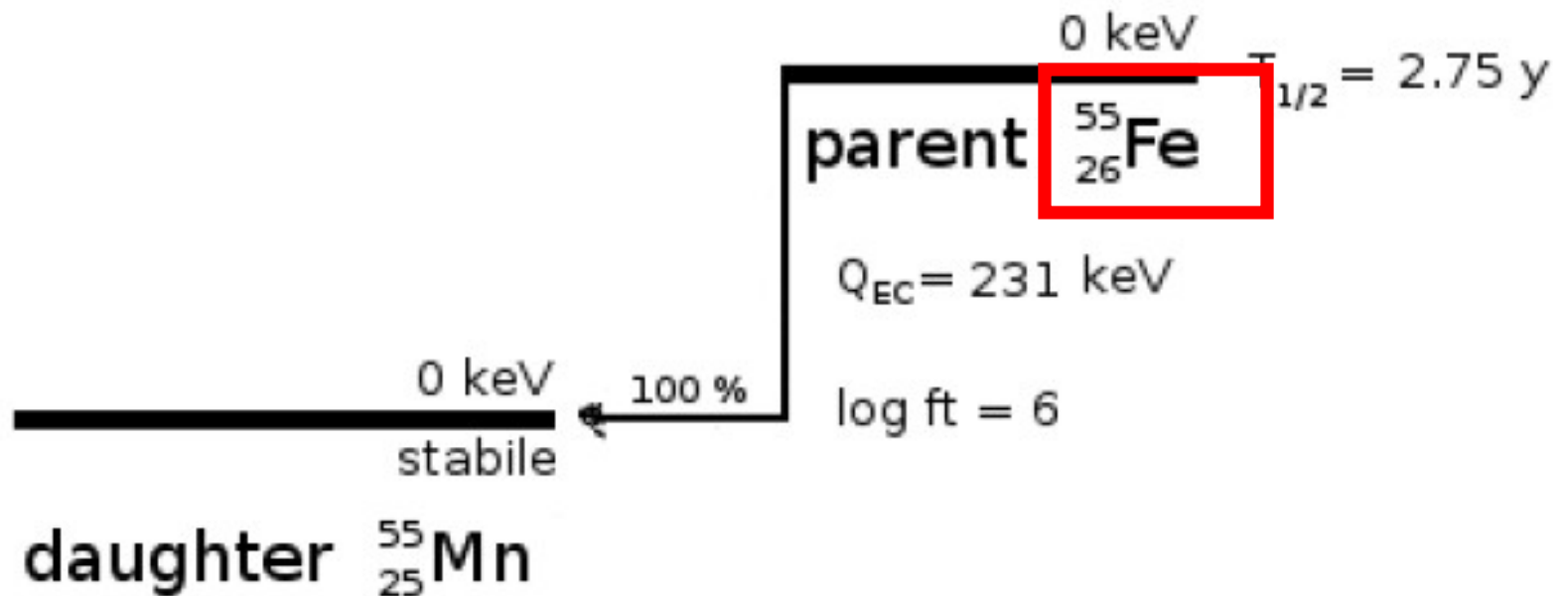
Figure 5

SORGENTI RADIOATTIVE



- end point del decadimento β^+ che popola il livello 2^+ : $Q_{EC} - 1022 - 1274.5 \sim 546 \text{ keV}$
- end point del decadimento β^+ che popola il livello 0^+ : $Q_{EC} - 1022 \sim 1820 \text{ keV}$
- γ prodotti nel decadimento: 1274.53 keV ($I_{ass} = 99.94$), 511 keV ($I_{ass} = 180.7$)
- X del Ne prodotti nel decadimento: $K_{\alpha_1} : 0.849 \text{ keV}$ ($I_{ass} = 0.090$), $K_{\alpha_2} : 0.849 \text{ keV}$ ($I_{ass} = 0.045$)

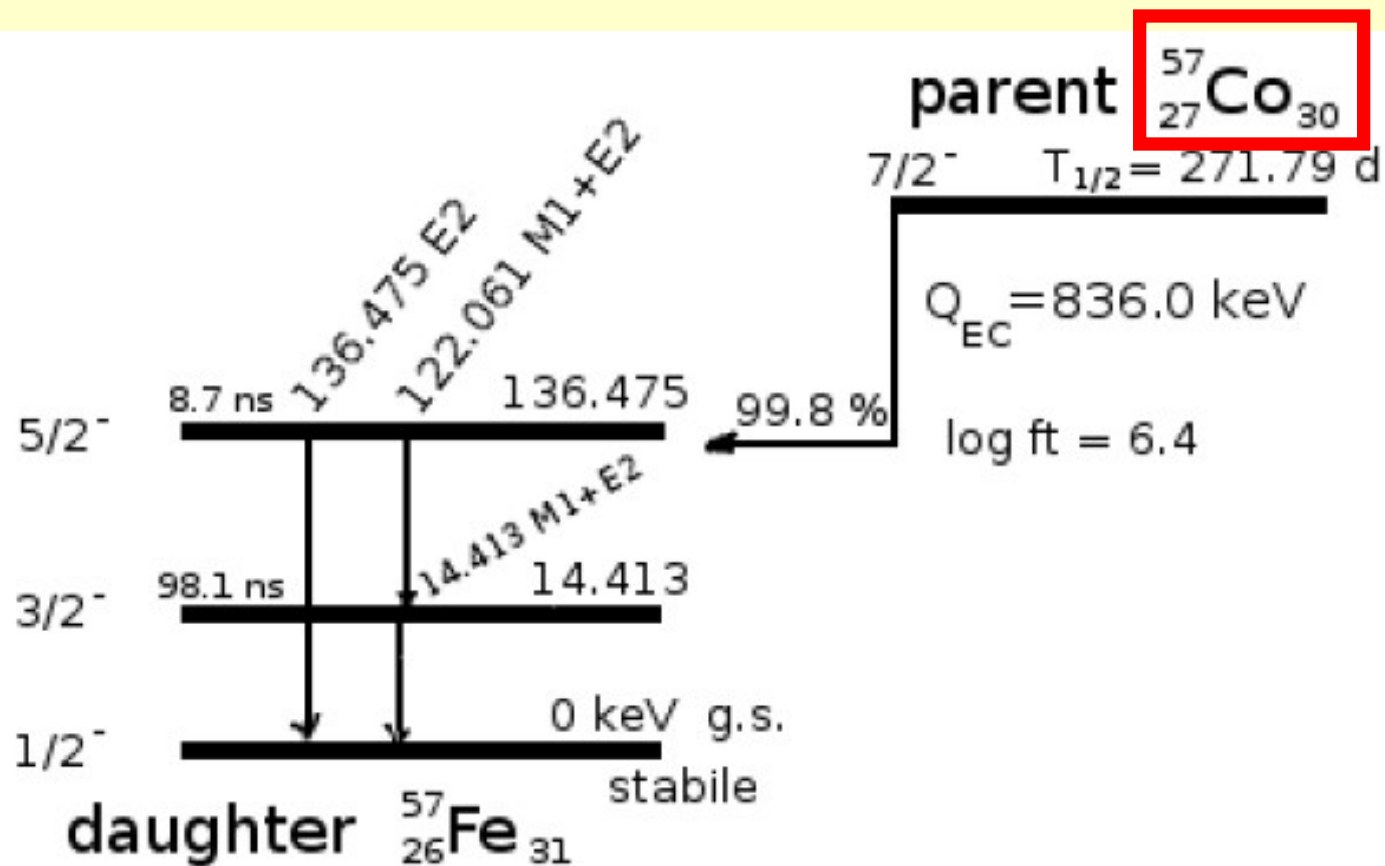
SORGENTI RADIOATTIVE



- X del Mn prodotti nel decadimento:

$K_{\alpha_1} : 5.899 \text{ keV}$ ($I_{\text{ass}} = 16.6$), $K_{\alpha_2} : 5.888 \text{ keV}$ ($I_{\text{ass}} = 8.5$), $K_{\beta} : 6.49 - 6.54 \text{ keV}$ ($I_{\text{ass}} = 3.4$)

SORGENTI RADIOATTIVE

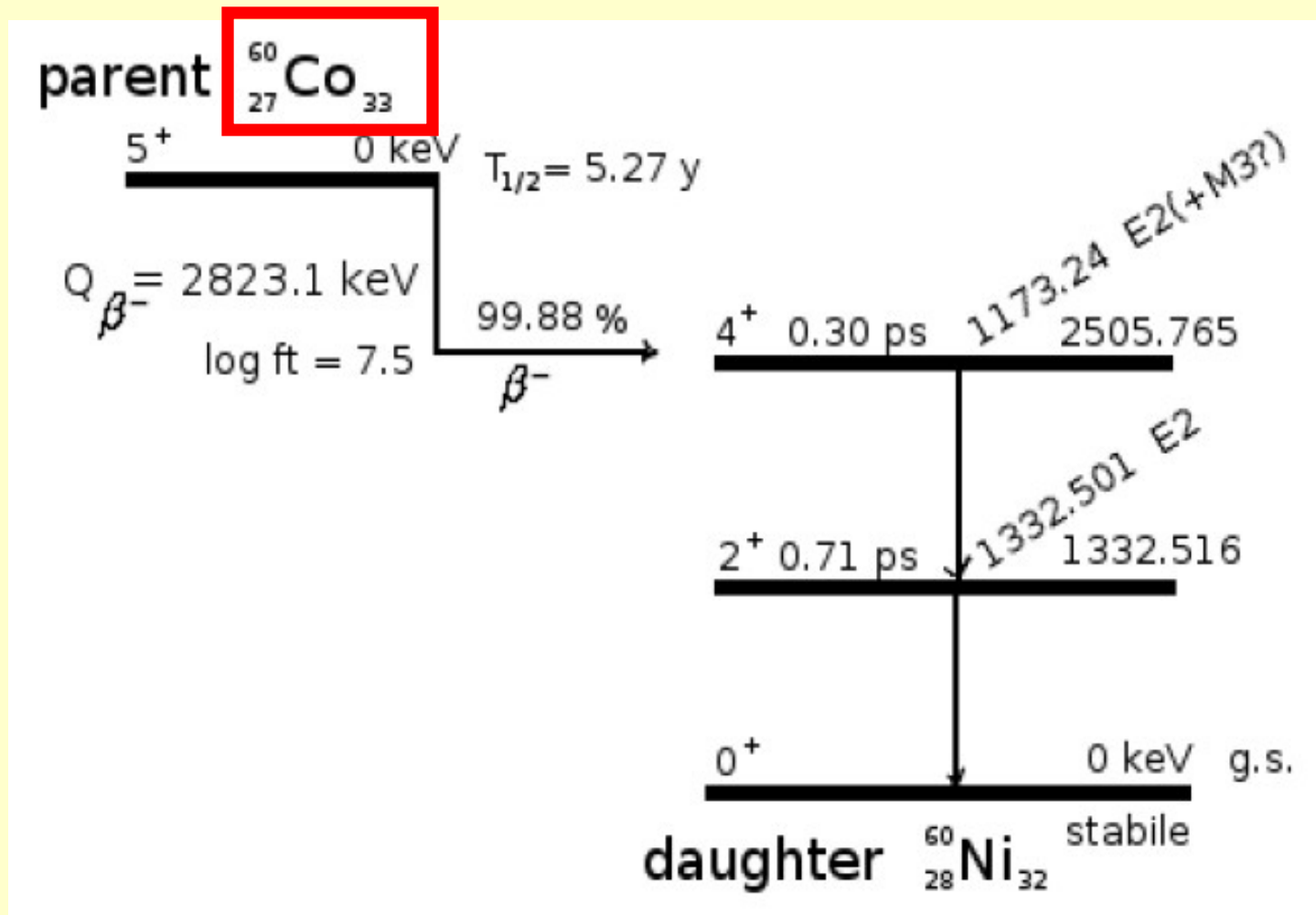


- γ prodotti nel decadimento: 136.5 keV ($I_{\text{ass}} = 10.7$), 122.1 keV ($I_{\text{ass}} = 85.5$), 14.4 keV ($I_{\text{ass}} = 9.2$)

- X del Fe prodotti nel decadimento:

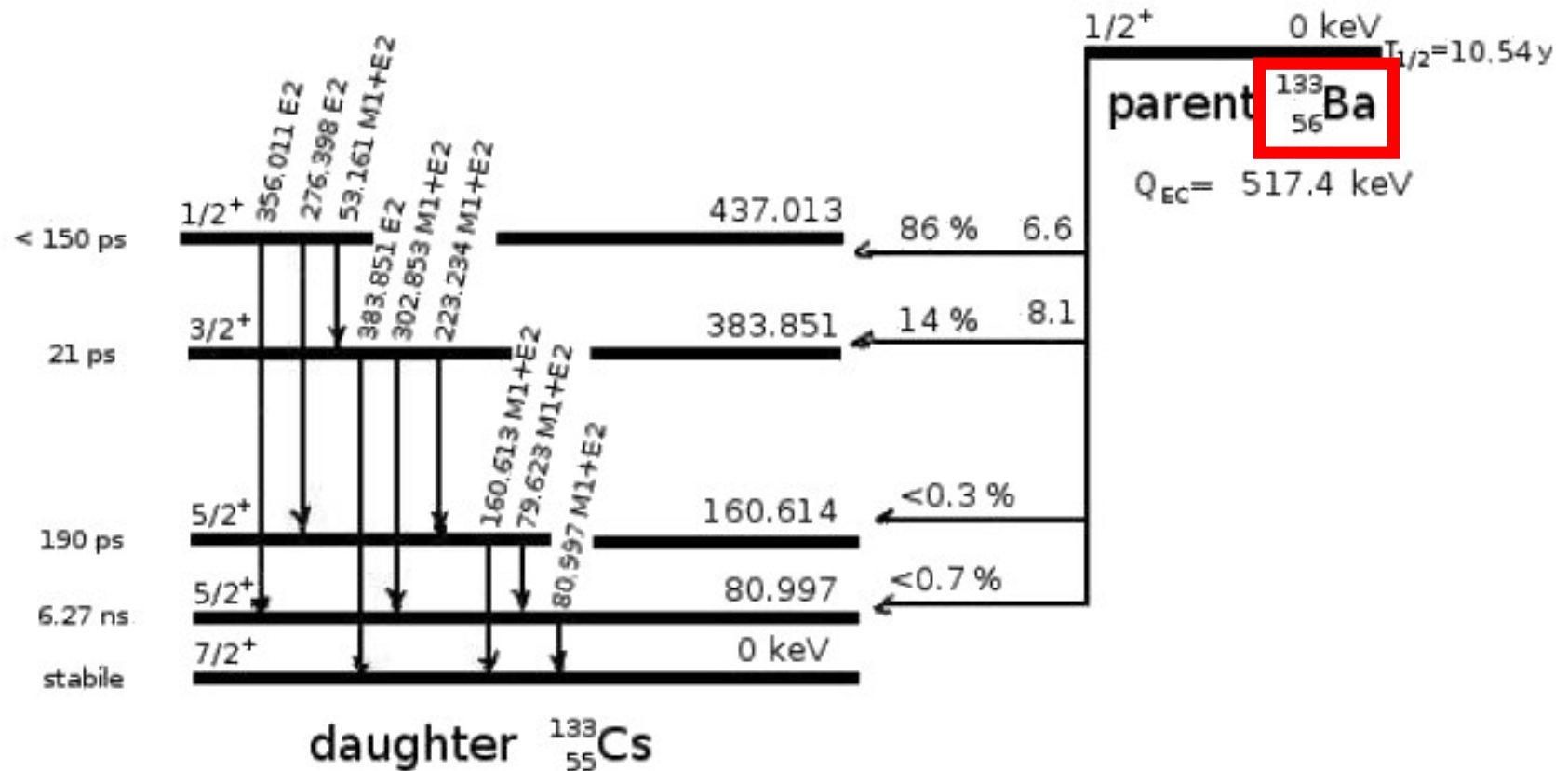
K_{α_1} : 6.404 keV ($I_{\text{ass}} = 33.2$), K_{α_2} : 6.391 keV ($I_{\text{ass}} = 16.8$), K_{β} : $7.06-7.11 \text{ keV}$ ($I_{\text{ass}} = 7.1$) $\rightarrow \bar{E}_K \sim 6.45 \text{ keV}$

SORGENTI RADIOATTIVE



- end point del decadimento β^- che popola il livello 4^+ : $Q_{\beta} - 2505.8 \sim 317.3 \text{ keV}$
- γ prodotti nel decadimento: 1173.24 keV ($I_{ass} = 99.85$), 1332.50 keV ($I_{ass} = 99.98$)

SORGENTI RADIOATTIVE



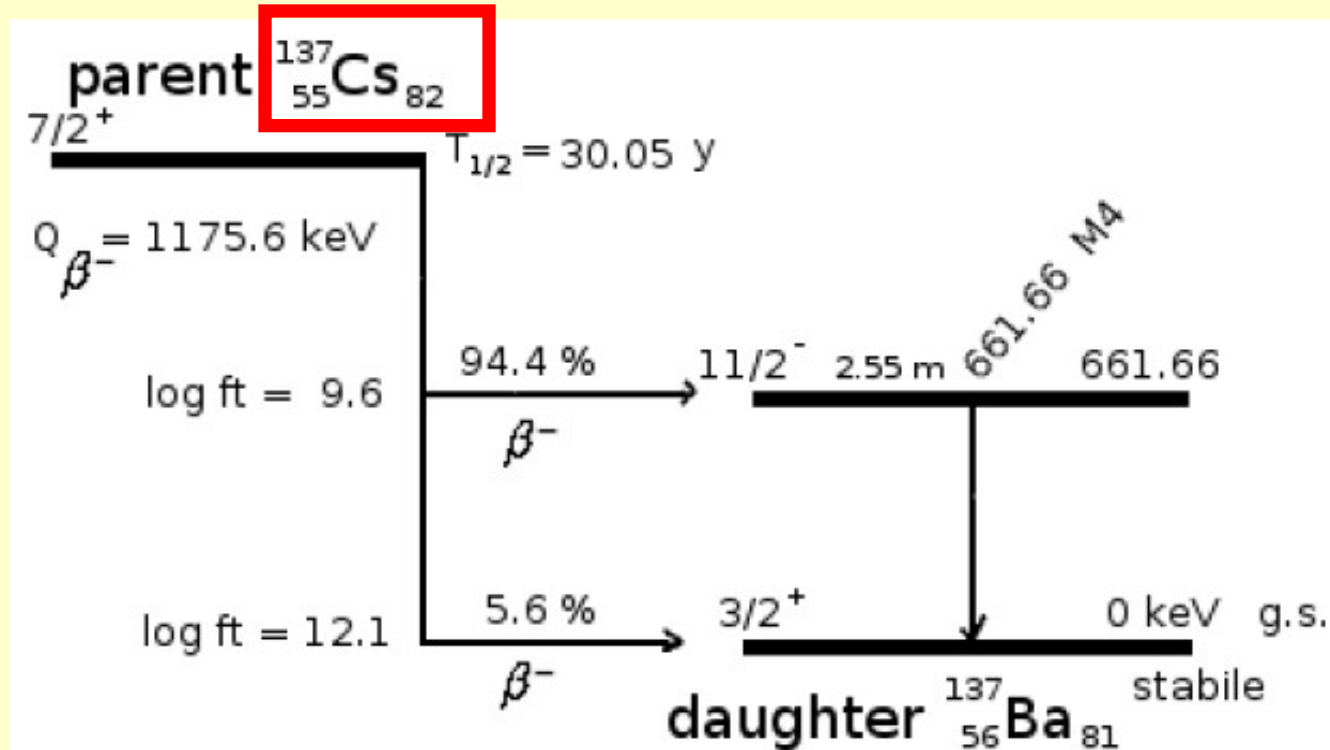
tarature γ di bassa energia.

- γ prodotti nel decadimento: 53.16 keV ($I_{ass} = 2.14$), 79.62 keV ($I_{ass} = 2.65$), 81.00 keV ($I_{ass} = 32.9$), 276.40 keV ($I_{ass} = 7.16$), 302.85 keV ($I_{ass} = 18.3$), 356.01 keV ($I_{ass} = 62.1$), 383.85 keV ($I_{ass} = 8.9$)

- X del Cs prodotti nel decadimento:

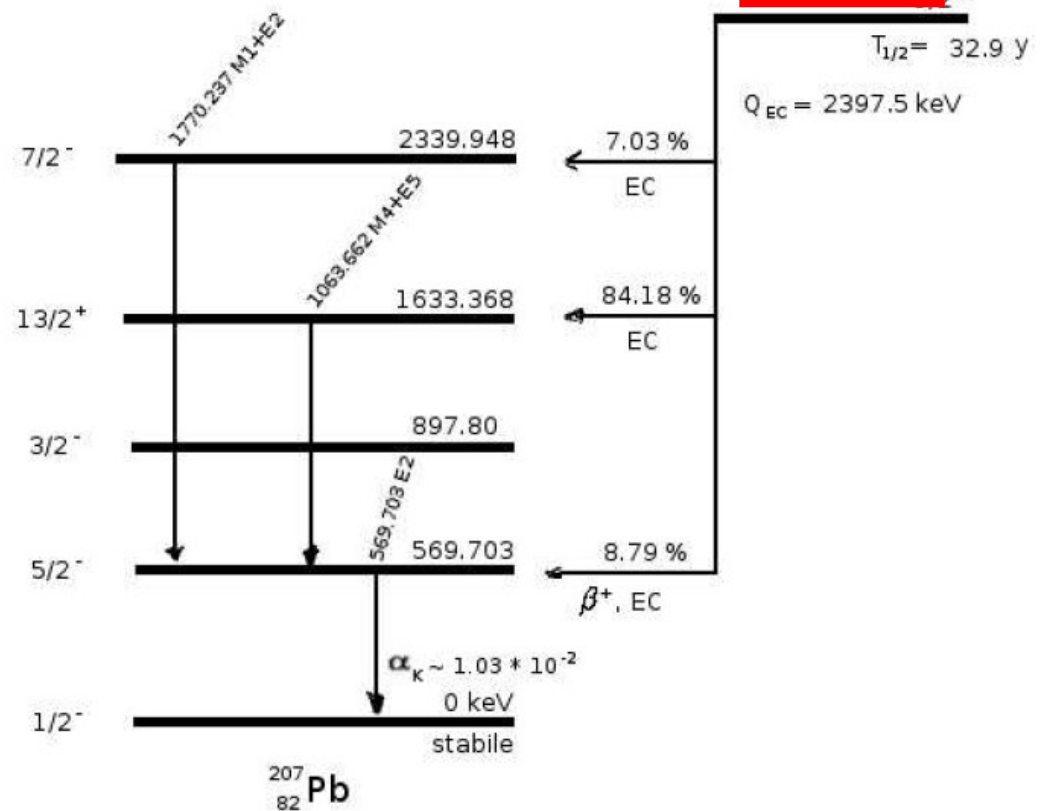
K_{α_1} : 30.97 keV ($I_{ass} = 62.8$), K_{α_2} : 30.62 keV ($I_{ass} = 34.0$), K_{β} : $34.9\text{--}35.3\text{ keV}$ ($I_{ass} = 18.2$).

SORGENTI RADIOATTIVE



- end point del decadimento β^- che popola il livello $11/2^-$: $Q_{\beta^-} - 661.7 \sim 514.9 \text{ keV}$
 - end point del decadimento β^- che popola il livello $3/2^+$: $Q_{\beta^-} \sim 1175.6 \text{ keV}$
 - γ prodotti nel decadimento: 661.66 keV ($I_{\text{ass}} = 85.0$)
 - elettroni di conversione prodotti nel decadimento: $E_K \sim 624.22 \text{ keV}$ ($I_{\text{ass}} = 7.6$), $E_L \sim 656.0 \text{ keV}$ ($I_{\text{ass}} = 1.4$), $E_M \sim 660.5 \text{ keV}$ ($I_{\text{ass}} = 0.3$)
 - X del Ba prodotti nel decadimento:
- $K_{\alpha_1} : 32.194 \text{ keV}$ ($I_{\text{ass}} = 3.59$), $K_{\alpha_2} : 31.817 \text{ keV}$ ($I_{\text{ass}} = 1.95$), $K_{\beta_1} : 36.4 \text{ keV}$ ($I_{\text{ass}} = 1.05$), $K_{\beta_2} : 37.3 \text{ keV}$ ($I_{\text{ass}} = 0.27$) $\rightarrow \bar{E}_K \sim 32.9 \text{ keV}$

SORGENTI RADIOATTIVE



- X del Pb prodotti nel decadimento:

K_{α_1} : 74.97 keV ($I_{\text{ass}} = 36.6$), K_{α_2} : 72.80 keV ($I_{\text{ass}} = 21.7$), K_{β_1} : $\sim 84.5 \text{ keV}$ ($I_{\text{ass}} = 12.5$), K_{β_2} : $\sim 87.4 \text{ keV}$ ($I_{\text{ass}} = 3.8$)

-energie dei γ e dei corrispondenti elettroni di conversione:

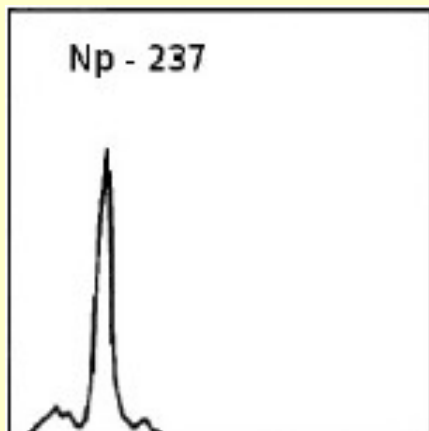
$E_{\gamma} = 569.70 \text{ keV}$ ($I_{\text{ass}} = 97.8$) \rightarrow $E_{eK} = 481.69 \text{ keV}$ ($I_{\text{ass}} = 1.52$), $E_{eL} = 553.84 - 556.67 \text{ keV}$ ($I_{\text{ass}} = 0.44$), $E_{eM} = 565.85 - 567.21 \text{ keV}$ ($I_{\text{ass}} = 0.15$)

$E_{\gamma} = 1063.66 \text{ keV}$ ($I_{\text{ass}} = 74.6$) \rightarrow $E_{eK} = 975.66 \text{ keV}$ ($I_{\text{ass}} = 7.0$), $E_{eL} = 1047.80 - 1050.63 \text{ keV}$ ($I_{\text{ass}} = 1.8$), $E_{eM+N} = 1059.8 - 1063.5 \text{ keV}$ ($I_{\text{ass}} = 0.54$)

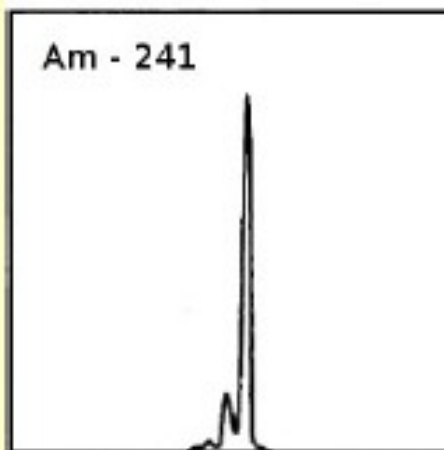
$E_{\gamma} = 1770.23 \text{ keV}$ ($I_{\text{ass}} = 6.9$) \rightarrow $E_{eK} = 1682.24 \text{ keV}$, $E_{eL} = 1754.37 - 1756.93 \text{ keV}$

SORGENTI RADIOATTIVE ALFA

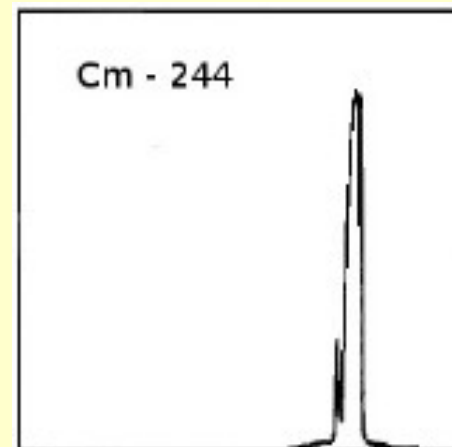
Sorgente Mista ^{237}Np + ^{241}Am + ^{244}Cm



Half-life	$2.1 \cdot 10^6$ y
Intensity	150 (Bq)
E alfa (MeV)	I alfa (%)
4.644	5.9
4.769	14.3
4.771	18.1
4.790	47.6
4.811	3.9



Half-life	432 y
Intensity	100 (Bq)
E alfa (MeV)	I alfa (%)
5.388	1.4
5.443	12.8
5.486	85.2



Half-life	18.1 y
Intensity	100 (Bq)
E alfa (MeV)	I alfa (%)
5.762	23.6
5.805	76.4

SORGENTI RADIOATTIVE AMBIENTALI

Big Bang: $10 \cdot 10^9$ y \rightarrow

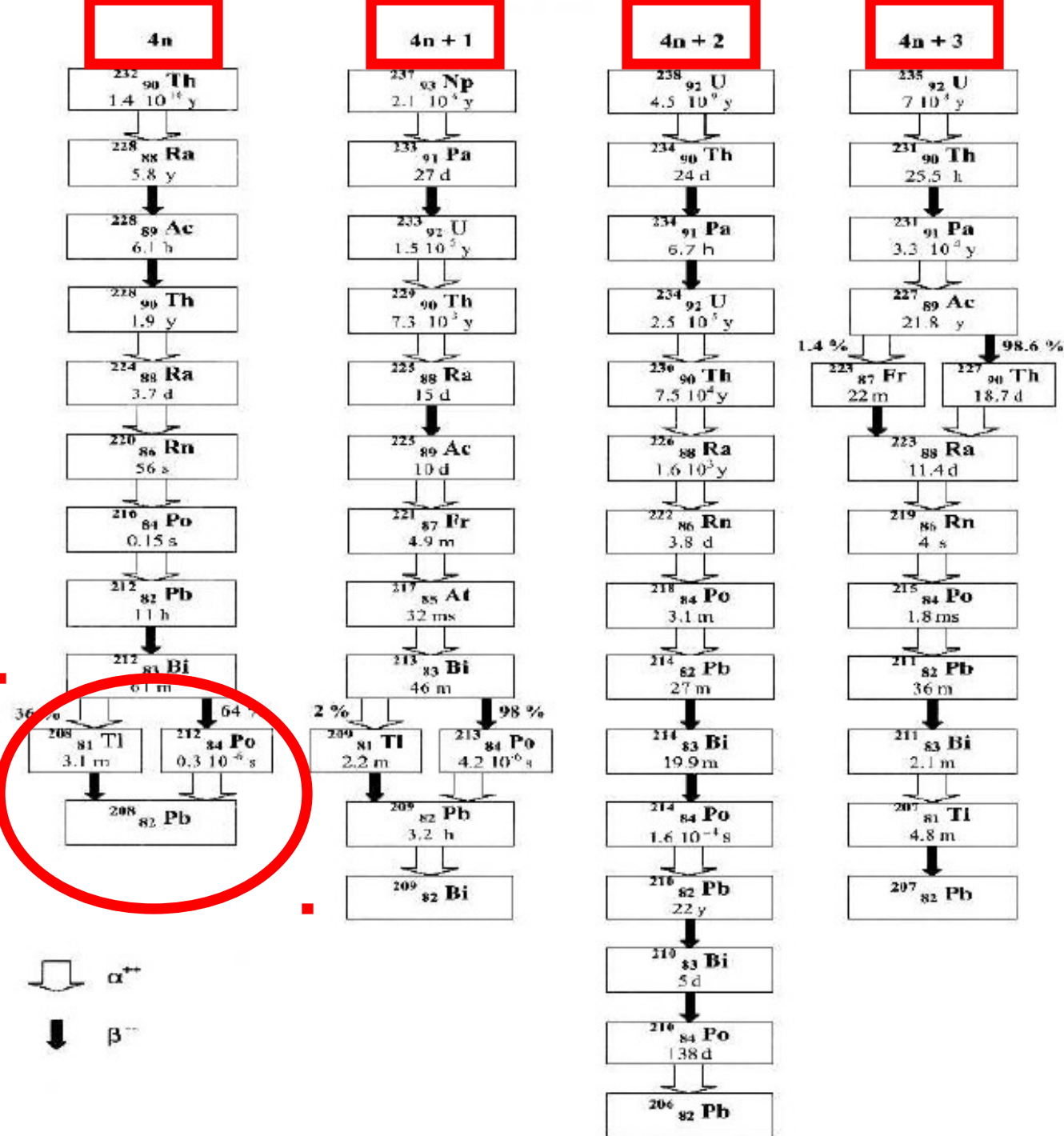
\rightarrow condensazione sistema solare (nascita pianeti): $5 \cdot 10^9$ y \rightarrow

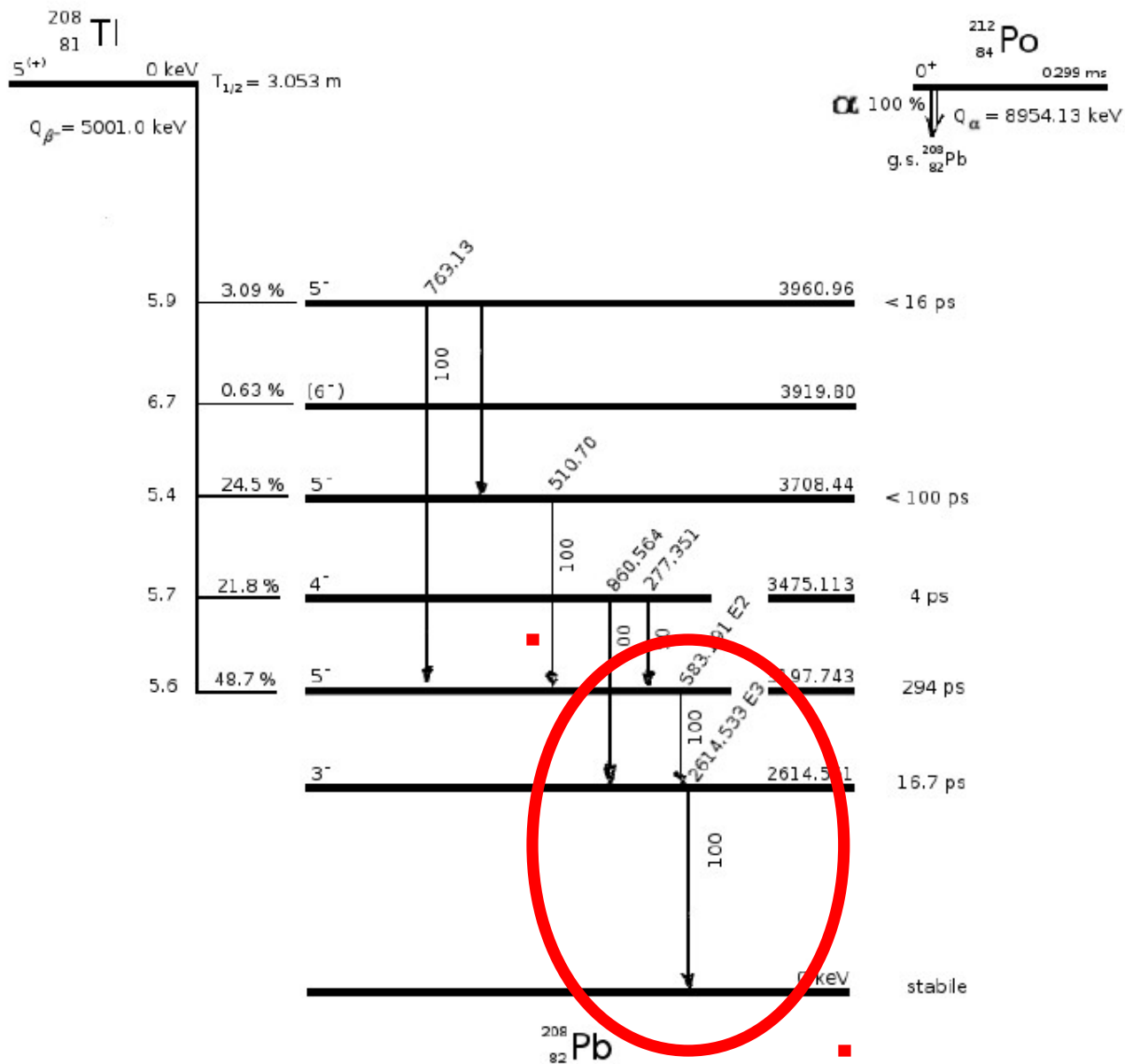
\rightarrow Oggi

Nome Serie	Classe	Capostipite		N. Nuclei nella Serie	Nucleo Finale
		Nome	$t_{1/2}$ (anni)		
Torio	$4n$	${}_{90}^{232}Th$	$1.41 \cdot 10^{10}$	11	${}_{82}^{208}Pb$
Nettunio	$4n + 1$	${}_{93}^{237}Np$	$2.14 \cdot 10^6$	12	${}_{83}^{209}Bi$
Uranio	$4n + 2$	${}_{92}^{238}U$	$4.47 \cdot 10^9$	15	${}_{82}^{206}Pb$
Attinio	$4n + 3$	${}_{92}^{235}U$	$7.04 \cdot 10^8$	12	${}_{82}^{207}Pb$

Oggi non più presente

SORGENTI RADIOATTIVE AMBIENTALI





SORGENTI RADIOATTIVE AMBIENTALI

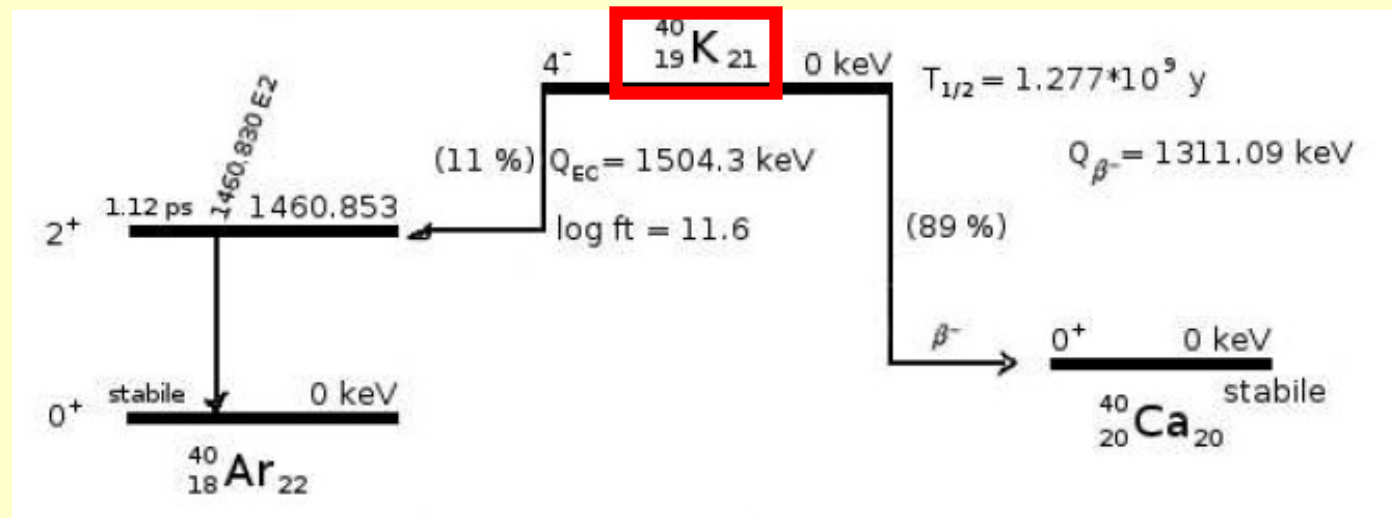
Nel decadimento sono emessi i seguenti γ :
 277.4 keV ($I = 75$), 510.7 keV ($I = 26$), 583.2 keV ($I = 85$), 763.1 keV ($I = 2$), 860.6 keV ($I = 15$), 2614.5 keV ($I = 100$).

Isotopo	Tipo di decadimento	$t_{1/2}$ (anni)
${}^{40}_{19}\text{K}$	β^- (89.3%), EC (10.7%)	$1.28 \cdot 10^9$
${}^{87}_{37}\text{Rb}$	β^-	$4.75 \cdot 10^{10}$
${}^{113}_{48}\text{Cd}$	β^-	$9.3 \cdot 10^{15}$
${}^{115}_{49}\text{In}$	β^-	$4.41 \cdot 10^{14}$
${}^{138}_{57}\text{La}$	β^- (33.6%), EC (66.4%)	$1.05 \cdot 10^{11}$
${}^{176}_{71}\text{Lu}$	β^-	$3.78 \cdot 10^{10}$
${}^{187}_{75}\text{Re}$	β^-	$4.35 \cdot 10^{10}$
${}^3_1\text{H}$	β^-	$1.23 \cdot 10^1$
${}^7_4\text{Be}$	EC	$1.46 \cdot 10^{-1}$
${}^{10}_4\text{Be}$	β^-	$1.51 \cdot 10^6$
${}^{14}_6\text{C}$	β^-	$5.73 \cdot 10^3$
${}^{35}_{16}\text{S}$	β^-	$2.4 \cdot 10^{-1}$
${}^{36}_{17}\text{Cl}$	β^- (98.1%), EC (1.9%)	$3.01 \cdot 10^5$
${}^{39}_{18}\text{Ar}$	β^-	$2.69 \cdot 10^2$

**SORGENTI
RADIOATTIVE
AMBIENTALI**

In natura
 ${}^{40}\text{K} \sim 10^{-4}$ ${}^{41}\text{K}$ stabile

**Prodotti da
raggi cosmici**



DOSIMETRIA (Taccetti)

l'energia assorbita per unità di massa di assorbitore è definita come la dose assorbita

Dose

unità storica di dose assorbita rad (*radiation absorbed dose*)

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg g}^{-1} = 10^{-5} \text{ J g}^{-1} = 10^{-2} \text{ J Kg}^{-1} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

attualmente unità del S.I. $Gray$ (Gy)

$$1 \text{ Gray} = 1 \text{ Gy} = 1 \text{ J Kg}^{-1}$$

Dose equivalente

effetti della radiazione sugli organismi viventi

dose equivalente H è il prodotto della dose assorbita D e del fattore di qualità Q

Linear Energy Transfer (LET)

D è misurata in rad
 $Gray$

H è misurata in rem
 $Sievert$ (Sv)

LET in acqua ($keV/\mu m$)	Q
< 3.5	1 X e y
7.0	2
23.0	5
53.0	10
175.0	20 α

DOSIMETRIA

limiti di esposizione alle radiazioni per le persone

dose assorbita efficace E

$$E = \sum_i P_i \cdot H_i \text{ con } \sum_i P_i = 1$$

Organo (i)	Peso (P_i)
Gonadi	0.20
Midollo osseo rosso	0.12
Colon	0.12
Stomaco	0.12
Polmone	0.12
Vescica	0.05
Mammella	0.05
Fegato	0.05
Esofago	0.05
Tiroide	0.01
Pelle	0.01
Superficie ossea	0.01
Complessivi altri 10 organi	0.09

La media mondiale della dose efficace E per esposizione alle sorgenti naturali, in 1 anno, risulta di 2.4 mSv con un intervallo tipico $1 \div 10 \text{ mSv}$, o anche $0.274 \text{ } \mu\text{Sv/h}$ con intervallo $(0.114 \div 1.14) \text{ } \mu\text{Sv/h}$.

Si intende che, escluse le pratiche mediche, l'esposizione del pubblico a sorgenti radiogene (acceleratori, sorgenti radioattive, etc.) debba comportare l'assorbimento di una dose efficace annuale (media su tutto il corpo) inferiore a 1 mSv ($0.114 \text{ } \mu\text{Sv/h}$).

Dosimetri

Dosimetro personale DIP62

- Misura raggi X e gamma
- Dotato di rivelatore Geiger-Muller compensato in energia
- Misura della dose accumulata (μGy)
- Dose rivelabile: $1 \mu\text{Gy} - 9999 \mu\text{Gy}$
- Indicazione acustica con frequenza proporzionale all'intensità di dose
- Tubo GM posizionato, all'interno dello strumento, sul lato dx con asse a circa 10 mm dalla parete, in corrispondenza del simbolo
- Risposta in energia pressoché costante tra 70 e 2000 keV
- Precisione: dose accumulata con errore max compreso in $\pm 10\%$

Dosimetri

Dosimetro INSPECTOR

- Misura alfa, beta e gamma
- Dotato di rivelatore Geiger-Muller
- Misura dei conteggi nei seguenti due modi:

a) misure dirette

conteggi per minuto (**CPM**) ↔ conteggi per secondo (**CPS**)

b) misure indirette usando il fattore di conversione ottimizzato per gamma da 661 keV da ^{137}Cs

milliRoentgen/h (**mR/hr**) ↔ $\mu\text{Sievert/h}$ (**$\mu\text{Sv/hr}$**)

1 milliRoentgen \approx 8.7 $\mu\text{Sievert}$

↔ selezionabile tramite menù (accesso a menù tenendo premuto il tasto + al momento dell'accensione del monitor)

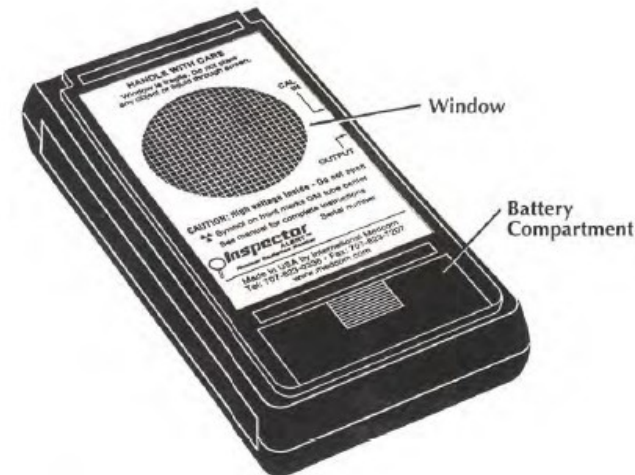
- Range misurabili:

CPM 0-300000

CPS 0-5000

mR/hr 0.001 – 100

$\mu\text{Sv/hr}$ 0.01 - 1000



Dosimetri

Dosimetro INSPECTOR - Relazione di passaggio da CPS a $\mu\text{Sv/hr}$

Nel caso di radiazione ionizzante γ di energia E_γ , la dose assorbita oraria, che indicheremo con D , può essere espressa tramite la relazione

$$D = (\phi A E_\gamma \sigma) / M$$

dove ϕ è il flusso incidente di gamma [$N_\gamma / (\text{m}^2 \text{s})$], A la superficie irradiata, σ la percentuale dei γ assorbiti dalla massa M investita dal flusso.

Tenendo conto della legge di attenuazione dei γ [$N(x) = N_0 \exp(-\mu x)$], si ricava immediatamente

$$\sigma = [N_0 - N(x)]/N_0 = [1 - \exp(-\mu x)] \approx \mu x$$

da cui, indicando con $V = A x$ il volume del corpo che assorbe la radiazione e con ρ la sua densità di massa,

$$D = (\phi E_\gamma \mu A x) / (\rho V) = (\phi E_\gamma \mu) / \rho$$

La misura di ϕ è legata ai CPS misurati dal dosimetro dalla semplice relazione $\phi = \text{CPS} / (\varepsilon A_{\text{dos}})$ dove ε è l'efficienza intrinseca di rivelazione del contatore Geiger-Muller e A_{dos} la sua superficie attiva. Concludendo

$$D \{\mu\text{Sv/hr}\} = 10^6 [3600 * \text{CPS} / (\varepsilon A_{\text{dos}} \{\text{m}^2\})] E_\gamma \{\text{J}\} \mu \{\text{m}^{-1}\} / \rho \{\text{kg/m}^3\}$$

Dosimetri

Dosimetro BICRON Surveyor 50

- Misura alfa, beta e gamma ↔ Dotato di rivelatore Geiger-Muller
- Misura diretta ↔ conteggi per minuto (CPM)
- Misure indiretta usando il fattore di conversione ottimizzato per gamma da 661 keV da ^{137}Cs
1 milliRoentgen \approx 8.7 μ Sievert

3 diversi Range misurabili:

CPM 0-600, 0-6000, 0-60000

mR/hr 0.-0.5, 0-5, 0-50

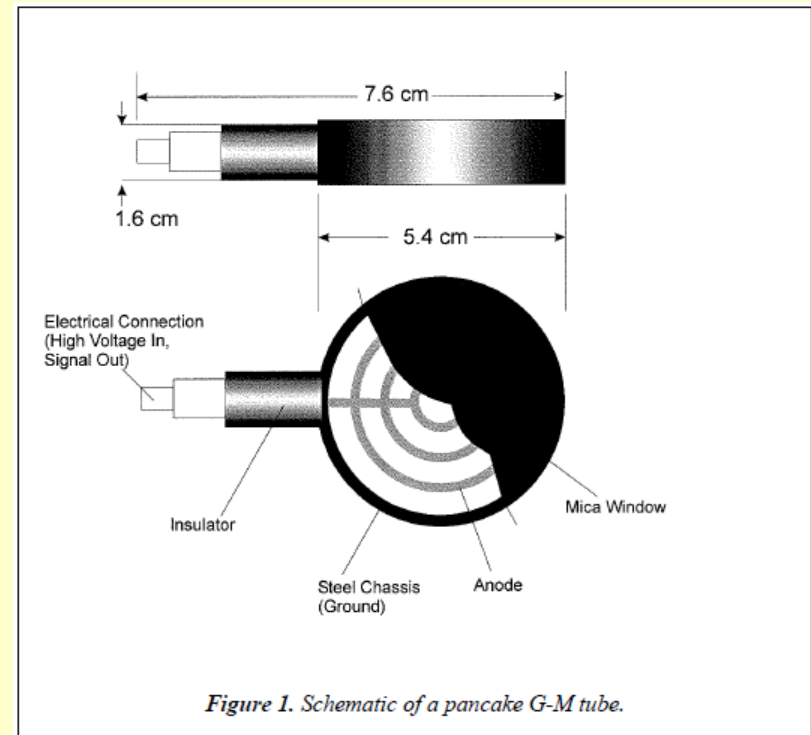
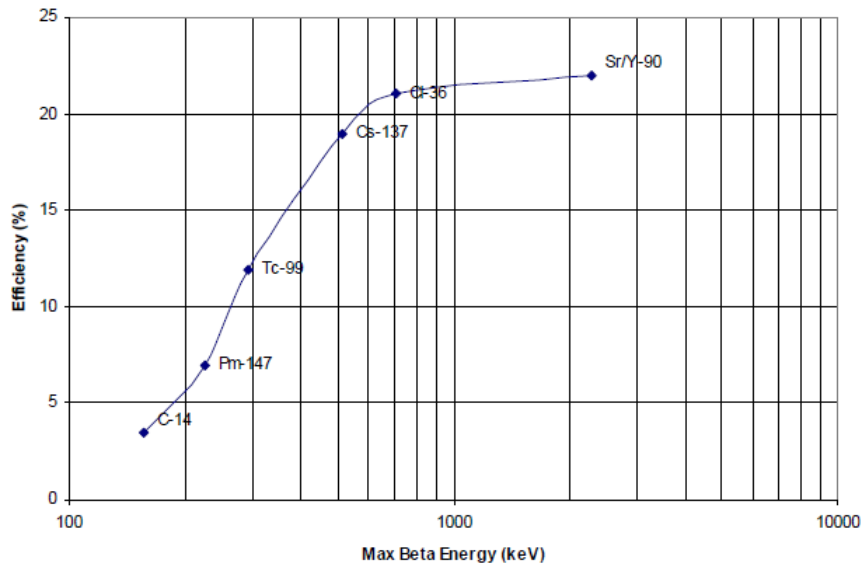
Accuratezza: entro il 10% per misure tra il 20% e l'80% del fondoscala in ogni range



Dosimetri

Dosimetro BICRON Surveyor 50

- Rivelatore Geiger-Muller “pancake”
- Finestra di mica ($1.4\text{-}2.0\text{ mg/cm}^2$): insensibile a beta con $E < 60\text{ keV}$ e alfa con $E < 3\text{ MeV}$
- Efficienza elettronica



- Conversione conteggi – esposizione dipendente dall'energia dei fotoni

