

Nello Taccetti

# **RADIOATTIVITA' E DOSIMETRIA**

# Indice

<b>1</b>	<b>Sorgenti di taratura - Schemi di decadimento</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Radioattività naturale</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>Dosimetria</b>	<b>15</b>
3.1	Dose . . . . .	15
3.2	Dose equivalente . . . . .	15
3.3	Definizioni . . . . .	16
3.4	Quantità e Unità Relative alla Misura delle Radiazioni ionizzanti . . . . .	18
3.5	Camere di ionizzazione . . . . .	18

# 1 Sorgenti di taratura - Schemi di decadimento

Note le masse atomiche (vedere per esempio: Appendix C di Krane), si ottiene il  $Q$ -valore di reazione fra gli stati fondamentali dei nuclei partecipanti al decadimento come padre e figlio.

Nel caso del decadimento  $\beta$  (il più frequente nelle sorgenti di taratura impiegate in laboratorio) si hanno le seguenti situazioni:

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

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

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

Per nuclei intermedi, nel 90% dei casi è coinvolto un elettrone dell'orbita K.

Osservazioni:

Se la transizione invece che verso lo stato fondamentale del nucleo figlio è verso un suo stato eccitato di energia  $E_x$ , tale energia va sottratta nel computo dell'energia disponibile per la reazione. Le energie così ottenute sono le energie massime degli elettroni o positroni emessi nel processo di decadimento a tre corpi. Nel caso della cattura elettronica è viceversa emesso un neutrino monoenergetico e un X caratteristico dell'atomo "figlio".

Nel caso del decadimento  $\alpha$  il  $Q$ -valore di reazione fra gli stati fondamentali è subito ottenuto dalle masse dei nuclei iniziale e finale e da quella della particella  $\alpha$ . In questo caso però, in particolare nel caso di nuclei leggeri, non tutta l'energia disponibile è conferita alla particella  $\alpha$ , una frazione piccola, ma significativa, si ritrova in energia cinetica del nucleo finale.

$^{22}\text{Na}$ : positroni di decadimento e associati  $\gamma$  di annichilazione, X associati al decadimento per cattura elettronica,  $\gamma$  di decadimento del nucleo figlio. E' usata prevalentemente per tarature  $\gamma$  e per verificare il corretto funzionamento di circuiti di coincidenza.

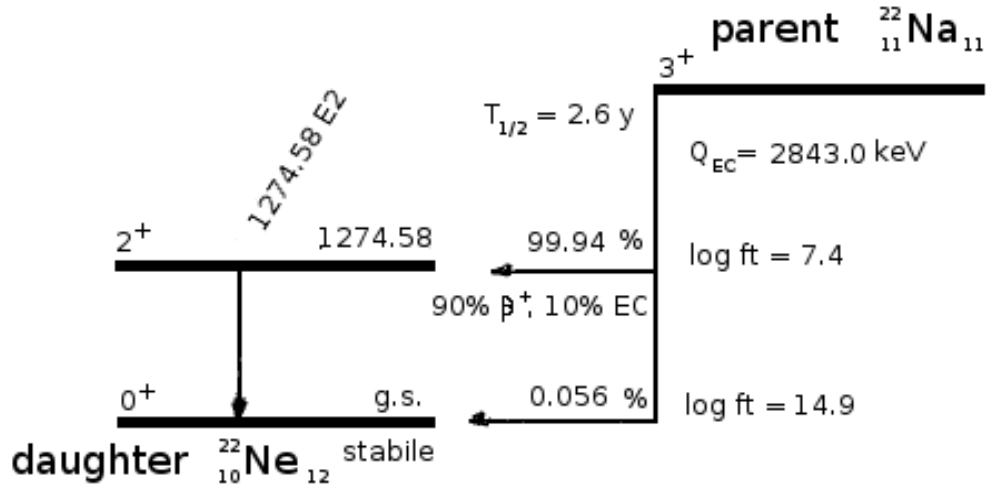


Figura 1.1: Schema di decadimento della sorgente  $^{22}\text{Na}$

Riportiamo di seguito alcune delle caratteristiche del decadimento (con  $I_{ass}$  viene indicato il numero per 100 decadimenti):

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

$^{55}\text{Fe}$ : decadimento per cattura elettronica e conseguenti X del  $^{55}\text{Mn}$ .  
 E' usata prevalentemente per tarature  $\gamma$  di bassa energia.

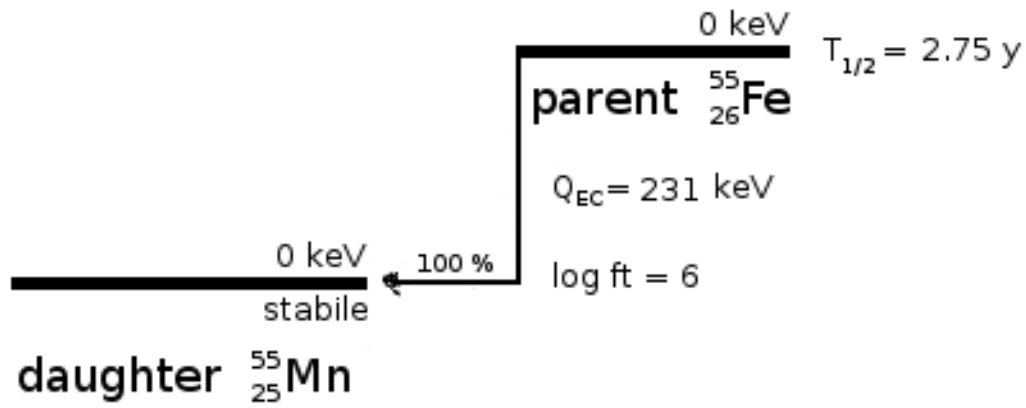


Figura 1.2: Schema di decadimento della sorgente  $^{55}\text{Fe}$

- X del Mn prodotti nel decadimento:

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

$^{57}\text{Co}$ : decadimento per cattura elettronica, X del nucleo figlio,  $\gamma$  di decadimento del nucleo figlio.

E' usata prevalentemente per tarature  $\gamma$  e X a basse energie.

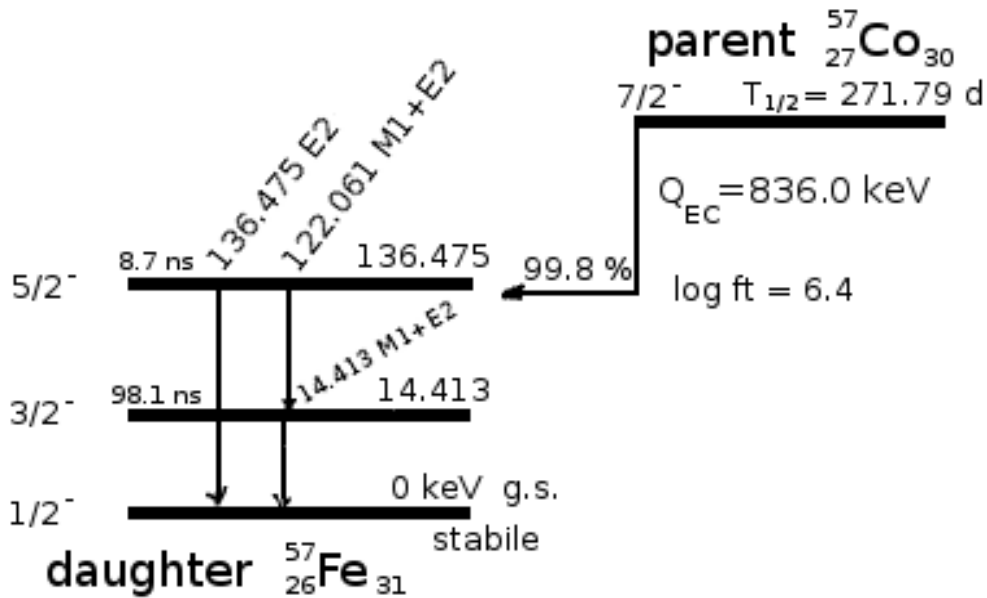


Figura 1.3: Schema di decadimento della sorgente  $^{57}\text{Co}$

Riportiamo di seguito alcune delle caratteristiche del decadimento:

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

- X del Fe prodotti nel decadimento:

$K_{\alpha_1} : 6.404\text{ keV}$  ( $I_{ass} = 33.2$ ),  $K_{\alpha_2} : 6.391\text{ keV}$  ( $I_{ass} = 16.8$ ),  $K_{\beta} : 7.06\text{--}7.11\text{ keV}$  ( $I_{ass} = 7.1$ )  $\rightarrow \bar{E}_K \sim 6.45\text{ keV}$

$^{60}\text{Co}$ : elettroni del decadimento  $\beta$ ,  $\gamma$  di decadimento del nucleo figlio.  
 In forma di sorgente spesso è usata per tarature  $\gamma$ , come sorgente sottile è usata come sorgente di raggi  $\beta$ .

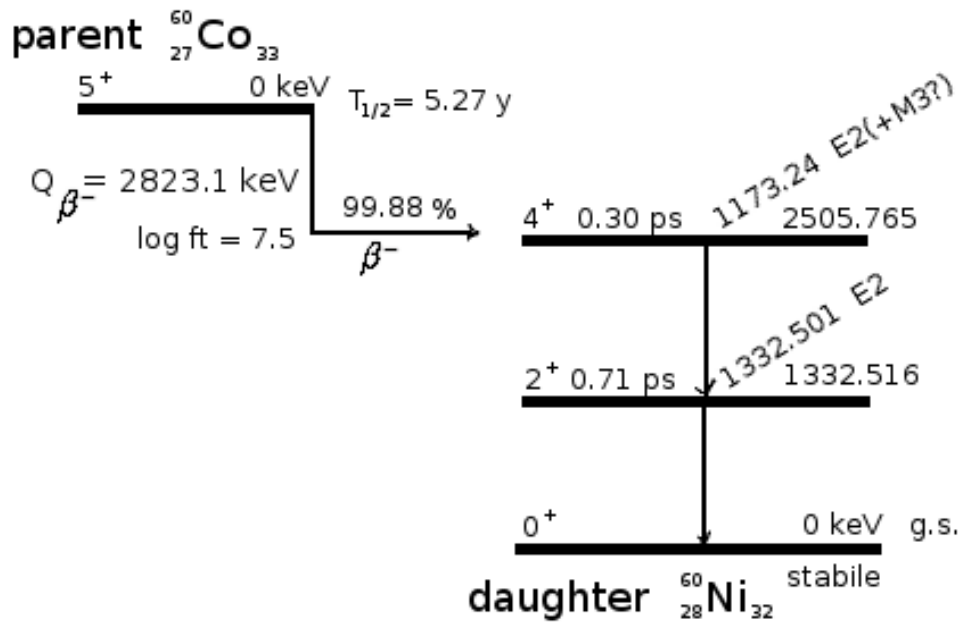


Figura 1.4: Schema di decadimento della sorgente  $^{60}\text{Co}$

Riportiamo di seguito alcune delle caratteristiche del decadimento:

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

$^{133}\text{Ba}$ : decadimento per cattura elettronica e conseguenti X del  $^{133}\text{Cs}$ .  
 $\gamma$  di decadimento del nucleo figlio.  
 E' usata prevalentemente per tarature  $\gamma$  di bassa energia.

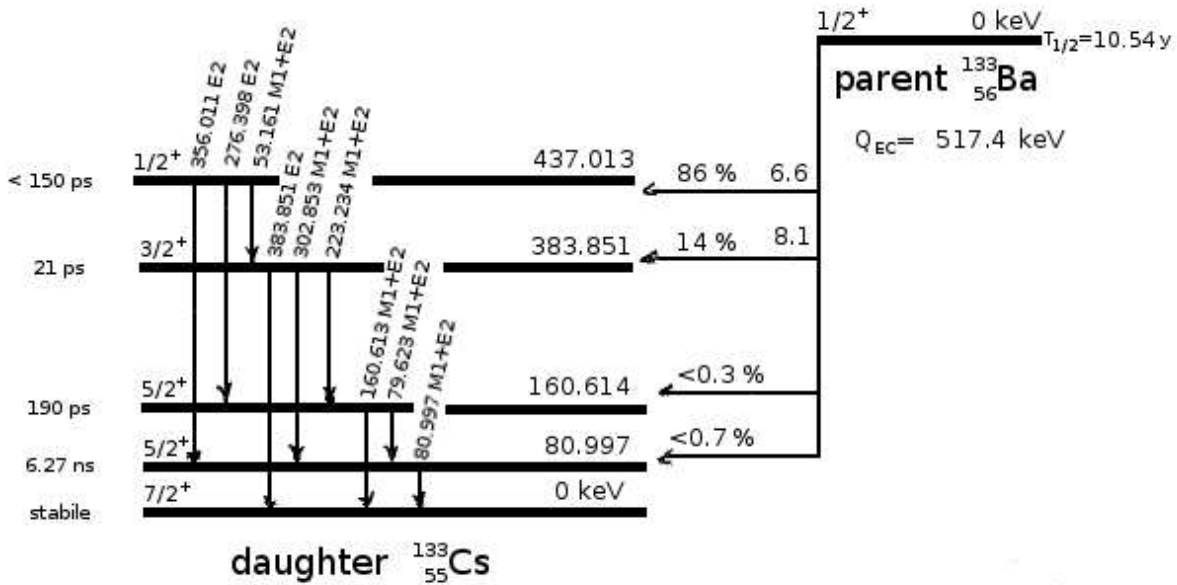


Figura 1.5: Schema di decadimento della sorgente  $^{133}\text{Ba}$

Riportiamo di seguito alcune delle caratteristiche del decadimento:

- $\gamma$  prodotti nel decadimento:  $53.16\text{ keV}$  ( $I_{ass} = 2.14$ ),  $79.62\text{ keV}$  ( $I_{ass} = 2.65$ ),  $81.00\text{ keV}$  ( $I_{ass} = 32.9$ ),  $276.40\text{ keV}$  ( $I_{ass} = 7.16$ ),  $302.85\text{ keV}$  ( $I_{ass} = 18.3$ ),  $356.01\text{ keV}$  ( $I_{ass} = 62.1$ ),  $383.85\text{ keV}$  ( $I_{ass} = 8.9$ )
- X del Cs prodotti nel decadimento:  
 $K_{\alpha_1} : 30.97\text{ keV}$  ( $I_{ass} = 62.8$ ),  $K_{\alpha_2} : 30.62\text{ keV}$  ( $I_{ass} = 34.0$ ),  $K_{\beta} : 34.9-35.3\text{ keV}$  ( $I_{ass} = 18.2$ ).



$^{137}\text{Cs}$ : elettroni del decadimento  $\beta$ ,  $\gamma$  di decadimento del nucleo figlio, elettroni di conversione del nucleo figlio, X del nucleo figlio a seguito della conversione elettronica.  
 In forma di sorgente spessa è usata per tarature  $\gamma$ ; come sorgente sottile è usata come sorgente di raggi  $\beta$  e di elettroni di conversione.

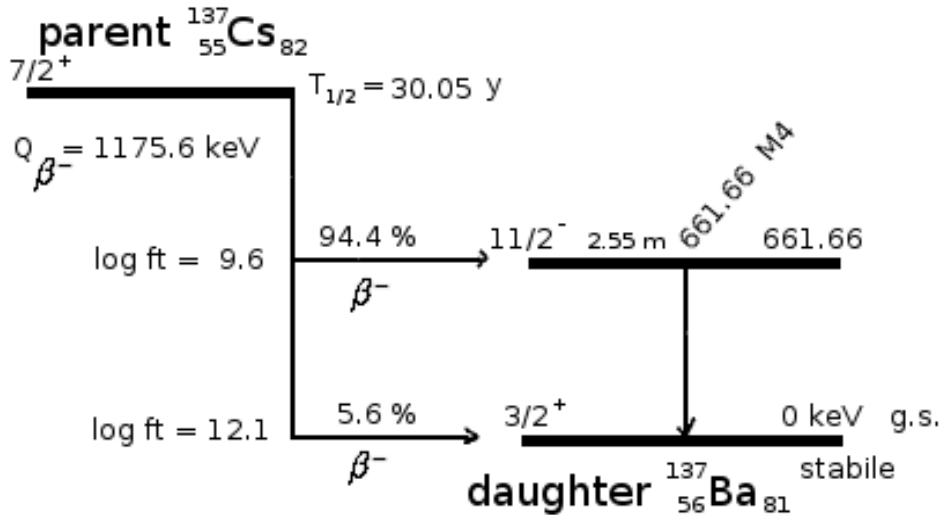


Figura 1.6: Schema di decadimento della sorgente  $^{137}\text{Cs}$

Riportiamo di seguito alcune delle caratteristiche del decadimento:

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

$^{207}\text{Bi}$ : decadimento per cattura elettronica e conseguenti X del  $^{207}\text{Pb}$ .  
 E' usata prevalentemente per misure di elettroni di bassa energia.

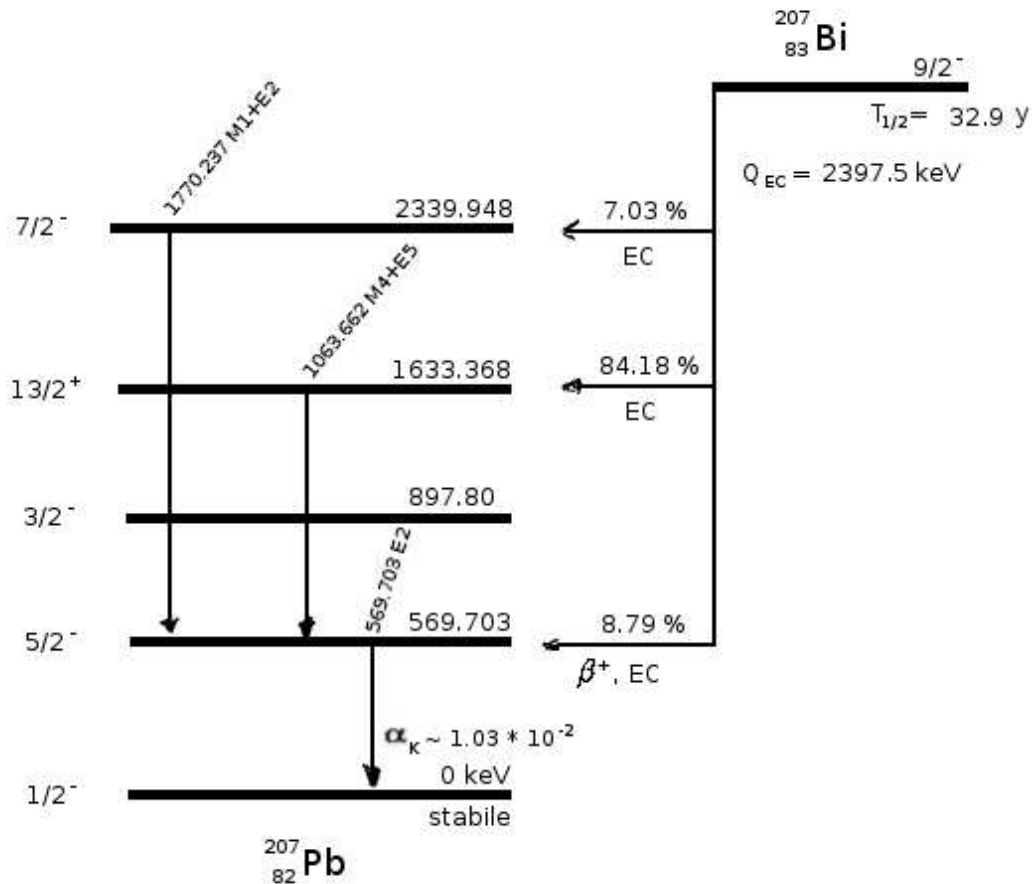


Figura 1.7: Schema di decadimento della sorgente  $^{207}\text{Bi}$

- X del Pb prodotti nel decadimento:

$K_{\alpha_1}$  : 74.97 keV ( $I_{ass} = 36.6$ ),  $K_{\alpha_2}$  : 72.80 keV ( $I_{ass} = 21.7$ ),  $K_{\beta_1}$  :  $\sim 84.5$  keV ( $I_{ass} = 12.5$ ),  $K_{\beta_2}$  :  $\sim 87.4$  keV ( $I_{ass} = 3.8$ )

-energie dei  $\gamma$  e dei corrispondenti elettroni di conversione:

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

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

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

## 2 Radioattività naturale

La Terra e gli altri pianeti sono supposti “nascere”  $\sim 5 \cdot 10^9$  anni fa, da materiali ricchi di ferro, carbonio, ossigeno, silicio ed altri elementi medio-pesanti.

Dal Big Bang alla nascita dei pianeti (condensazione del sistema solare) si suppone che siano trascorsi  $\sim 10 \cdot 10^9$  anni. In tale periodo idrogeno e elio sono stati “cotti” all’interno delle stelle originando elementi via via più pesanti. La maggior parte con vite medie molto brevi, alcuni molto lunghe e che a noi paiono come stabili, altri con vite medie lunghe ma dell’ordine di quella della Terra, per cui si comportano come naturalmente radioattivi.

Qualunque si conoscano elementi naturalmente radioattivi di varie zone nucleari, la maggior parte della radioattività che si osserva origina da elementi pesanti che non hanno isotopi stabili. Tali nuclei decadono per emissione  $\alpha$  e  $\beta$ .

Come conseguenza delle caratteristiche dei decadimenti  $\alpha$  e  $\beta$  esistono in natura delle famiglie radioattive che hanno un numero di massa esprimibile nella forma  $4n$ ,  $4n + 1$ ,  $4n + 2$ ,  $4n + 3$  con  $n$  intero; in tali serie il capostipite è in generale l’elemento a vita media più lunga. Nella successiva tabella sono riportate le principali caratteristiche delle quattro serie:

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	${}_{82}^{207}Pb$

Va notato che la serie del Nettunio, a causa della breve semi-vita, non è ai nostri giorni presente in natura, non essendo sopravvissuta al tempo trascorso dalla formazione della Terra.

Gli altri isotopi radioattivi sono rimasti inglobati nelle rocce e nei minerali a seguito della condensazione avvenuta  $5 \cdot 10^9$  anni fa. Tutte le serie sopra riportate, esclusa quella del Nettunio, producono però un elemento radioattivo gassoso, il Radon ( $Rn$ ). Esso è normalmente intrappolato nelle rocce ma può fuoriuscirne o per emissione superficiale o in caso di fratture (la sua presenza nell’aria è un sintomo precursore dei terremoti). L’inalazione di tale gas radioattivo potrebbe essere la causa di parte dei tumori ai polmoni. Nella successiva figura è riportato il dettaglio delle 4 serie radioattive.

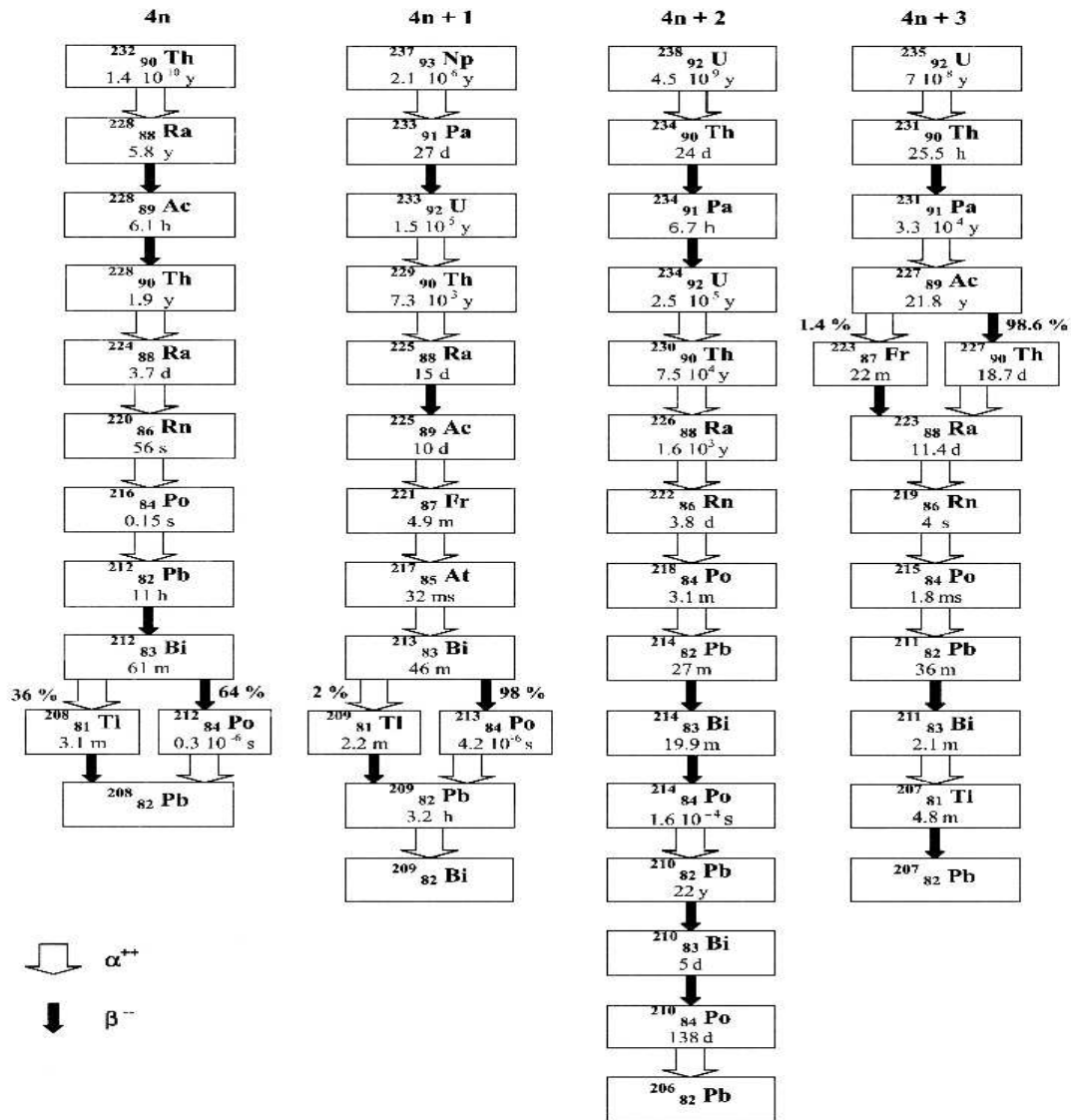


Figura 2.1: Serie radioattive naturali

Nella successiva figura è riportato lo schema di decadimento al nucleo di  $^{208}\text{Pb}$ , i cui  $\gamma$  caratterizzano la serie del Torio.

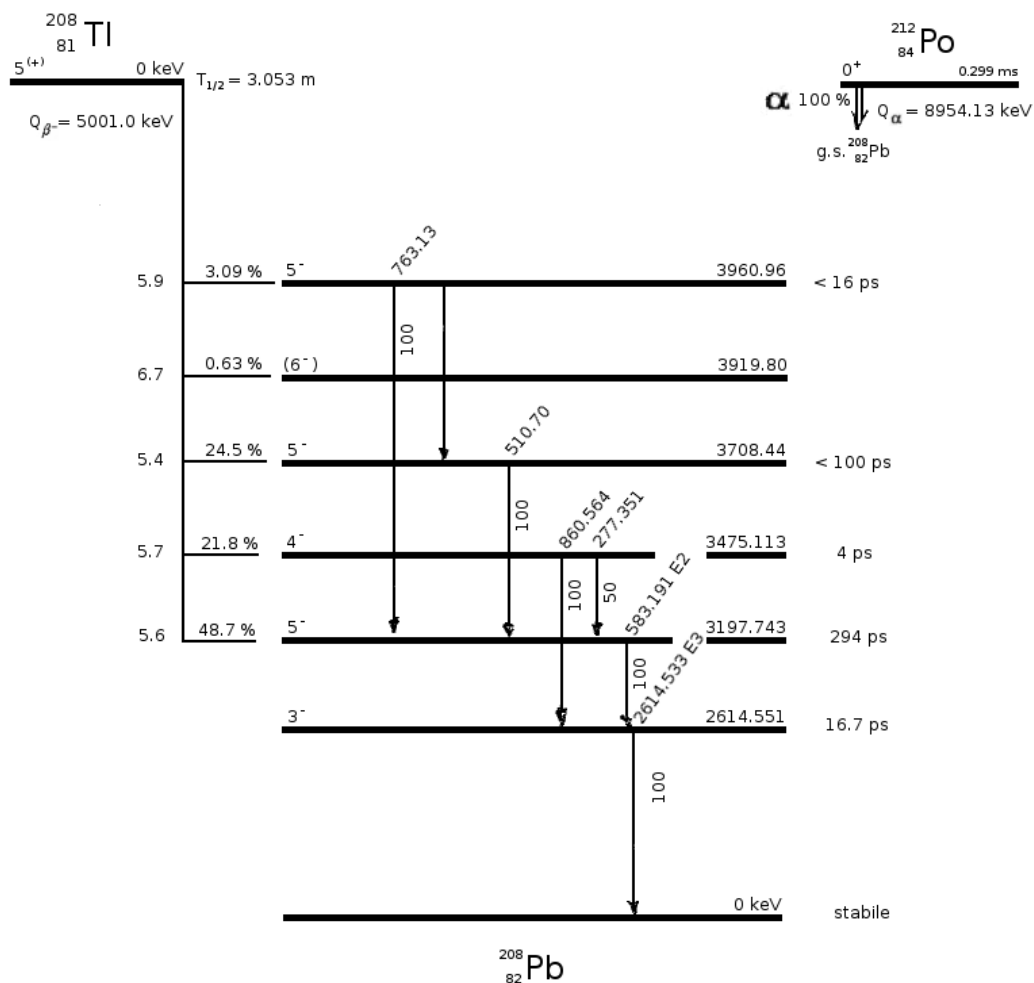


Figura 2.2: Schema di decadimento al  $^{208}\text{Pb}$

Nel decadimento sono emessi i seguenti  $\gamma$ :

$277.4\text{ keV}$  ( $I = 75$ ),  $510.7\text{ keV}$  ( $I = 26$ ),  $583.2\text{ keV}$  ( $I = 85$ ),  $763.1\text{ keV}$  ( $I = 2$ ),  $860.6\text{ keV}$  ( $I = 15$ ),  $2614.5\text{ keV}$  ( $I = 100$ ).

Oltre alle 4 serie di elementi pesanti sopra riportate esistono altre sorgenti di radioattività naturale nella materia terrestre. Nella prima parte della successiva tabella sono riportate alcune tra le più comuni, con le principali caratteristiche del corrispondente decadimento.

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

Nella seconda parte della tabella sono riportate altre sorgenti radioattive con vite medie più brevi che sono prodotte con continuità, tramite reazioni nucleari, dai raggi cosmici nell'alta atmosfera.

Riportiamo infine lo schema di decadimento del  ${}^{40}\text{K}$  che è contenuto nel  $\text{K}$  naturale in percentuale  $10^{-4}$  rispetto al  ${}^{41}\text{K}$  stabile.

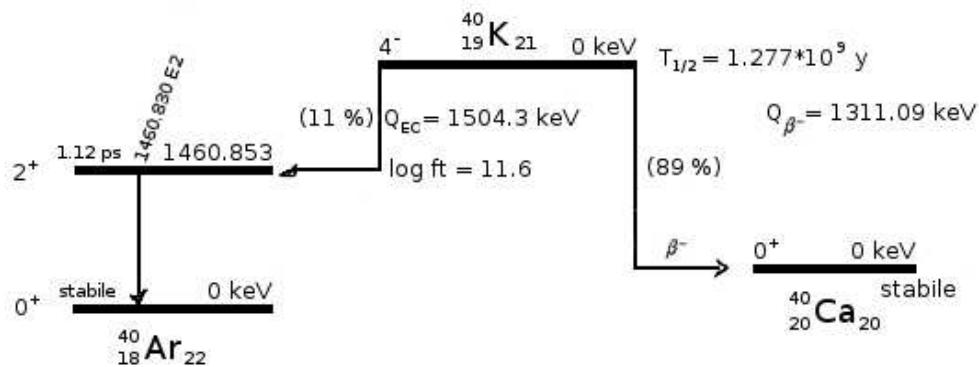


Figura 2.3: Schema di decadimento al  ${}^{40}\text{K}$

### 3 Dosimetria

Si introducono le quantità fondamentali e le unità di misura (ICRU: International Commission on Radiation Units and Measurements, Report 19: RADIATION QUANTITIES and UNITS 1971).

Due corpi, che differiscono sia per la materia che li compone che per le caratteristiche geometriche, posti alla stessa distanza media da una stessa sorgente radiogena assorbono in genere differenti quantità di energia. Siccome i cambiamenti delle proprietà fisiche e le reazioni chimiche indotte sono aspettati aumentare con l'energia assorbita per unità di massa, una unità che misuri la quantità di energia assorbita per unità di massa è fondamentale. Qualunque sia il tipo di radiazione che la provoca, l'energia assorbita per unità di massa di assorbitore è definita come la dose assorbita (si tratta quindi di una unità fisica).

#### 3.1 Dose

L'unità storica di dose assorbita è il *rad* (*radiation absorbed dose*), che era così definito:

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

attualmente è stato sostituito dall'unità del S.I., il *Gray* (*Gy*), definito come segue:

$$1 \text{ Gray} = 1 \text{ Gy} = 1 \text{ J Kg}^{-1} \quad (2)$$

Segue anche, come già evidenziato nella (1):

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}; \quad 10^{-2} \text{ Gy} = 1 \text{ rad}; \quad 10 \text{ } \mu\text{Gy} = 1 \text{ mrad} \quad (3)$$

Le misure di dose più precise ricorrono di frequente a metodi calorimetrici (per esempio tramite la conoscenza dei calori specifici e degli innalzamenti di temperatura misurati con resistenze di Pt).

#### 3.2 Dose equivalente

Quando si vogliono quantificare gli effetti della radiazione sugli organismi viventi, occorre tenere presente che l'assorbimento di uguali quantità di energia per unità di massa, provocato da radiazioni di differente natura, non garantisce che gli effetti biologici siano gli stessi. Di fatto, a parità di dose assorbita, gli effetti biologici possono differire anche di un ordine di grandezza a seconda che l'energia sia stata depositata da particelle pesanti (protoni, alfa, etc.) o da elettroni. In pratica quello che conta è il cosiddetto Linear Energy Transfer (LET) che coincide con la perdita di energia collisionale per unità di lunghezza di Bethe-Bloch.

L'unità di dose equivalente è definita come quell'ammontare, di qualunque tipo di radiazione, che, quando assorbito da un sistema biologico, risulta avere lo stesso effetto biologico di una unità di dose assorbita quando la radiazione è costituita da elettroni che lasciano nel materiale un'energia  $< 3.5 \text{ keV}$  per micron di percorso.

La dose equivalente  $H$  è il prodotto della dose assorbita  $D$  e del fattore di qualità  $Q$  che dipende dal tipo di radiazione e dalla sua energia (per definizione  $Q = 1$  per elettroni di piccolo LET).

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

Per gli elettroni delle sorgenti di taratura e per quelli prodotti dall'interazione dei raggi X e  $\gamma$  con la materia si applica il fattore di qualità  $Q = 1$  e in questo caso la dose equivalente  $H$  coincide, anche numericamente con la dose assorbita  $D$ .

Particelle cariche hanno fattori di qualità molto più grandi; per esempio, per particelle  $\alpha$  con  $E_\alpha = 1 \div 10 MeV$  si ha  $Q \sim 20$ . Simili fattori di qualità si applicano anche ai neutroni veloci che fanno principalmente scattering (n,p).

### 3.3 Definizioni

antica: se la dose assorbita  $D$  è misurata in *rad* la dose equivalente  $H$  è misurata in *rem* (*rad equivalent man*).

Oggigiorno si trovano strumenti tarati in *rad* e altri tarati in *Gray* e si passa alla dose equivalente, ossia ai *rem* e ai *Sievert(Sv)*, tramite l'appropriato fattore di qualità  $Q$ .

Per esempio:

Una dose assorbita di elettroni, X,  $\gamma$ :  $D = N \text{ rad}$  corrisponde a una dose equivalente  $H = N \text{ rem}$

Una dose assorbita di radiazione di fattore di qualità  $Q$ :  $D = N \text{ rad}$  corrisponde ad una dose equivalente  $H = QN \text{ rem}$

*NOTA: Il mrem è un'unità che è stata usata fino a poco tempo fa e un gran numero di strumenti sono tuttora tarati in mrem.*

attuale:

una dose assorbita di elettroni, X,  $\gamma$ :  $D = N \text{ Gy}$  corrisponde a una dose equivalente  $H = N \text{ Sv}$

Una dose assorbita di radiazione di fattore di qualità  $Q$ :  $D = N \text{ Gy}$  corrisponde ad una dose equivalente  $H = QN \text{ Sv}$

Si ha inoltre, come ovvio da tutte le definizioni precedenti:

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}; 10^{-2} \text{ Sv} = 1 \text{ rem} \quad (4)$$

$$10 \mu\text{Sv} = 1 \text{ mrem}$$



I limiti di esposizione alle radiazioni per le persone sono dati in dose assorbita efficace  $E$  che tiene conto della differente radiosensibilità dei differenti organi dai quali è costituito il corpo umano.

La dose efficace  $E$  è definita come la somma delle dosi equivalenti  $H$  nei diversi organi e tessuti, ciascuna moltiplicata per un peso  $P$  che tiene conto proprio della diversa radiosensibilità degli organi e dei tessuti irraggiati. Si ha cioè:

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

I pesi sono riportati nella seguente tabella.

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

Ovviamente anche la dose efficace si misura in *Sievert*.

La media mondiale della dose efficace  $E$  per esposizione alle sorgenti naturali, in 1 anno, risulta di  $2.4 \text{ mSv}$  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  $1 \text{ mSv}$  ( $0.114 \text{ } \mu\text{Sv/h}$ ).

Nell'ipotesi che solo la pelle risulti esposta (per esempio per manipolazioni di sorgenti di X molli o  $\beta$  ed esclusiva esposizione delle mani) allora il limite risulterebbe elevato a  $100 \text{ mSv/anno}$ .

### 3.4 Quantità e Unità Relative alla Misura delle Radiazioni ionizzanti

Quantità	Grandezza misurata	Unità tradizionali	Unità S.I.
Attività	n decadimenti per unità di tempo	<i>Curie (Ci)</i> $1 Ci = 3.7 \cdot 10^{10} dec s^{-1}$	<i>Becquerel (Bq)</i> $1 Bq = 1 dec s^{-1}$
Esposizione dell'aria	ionizzazione	<i>Roentgen (R)*</i> $1 R = 1 esu/0.001293 g$	$2.58 \cdot 10^{-4} C kg^{-1} **$
Dose assorbita	energia assorbita per unità di massa	<i>rad</i> $1 rad = 100 erg g^{-1}$	<i>Sievert (Sv)</i> $1 Gy = 1 J kg^{-1}$
Dose equivalente e Dose efficace	efficacia biologica	<i>rem</i>	<i>Gray (Gy)</i>

\* La definizione del Roentgen è la seguente:

1 *R* è l'esposizione che risulta in una carica per ionizzazione di una unità elettrostatica di carica in 1  $cm^3$  di aria a 0C e 760 *mmHg* (corrispondente ad una massa di 0.001293 *g*). E' evidente che questa definizione ipotizza che il  $cm^3$  di aria sia immerso in un volume di aria uniformemente irradiato molto più grande, in modo che la perdita della ionizzazione dovuta a particelle (sostanzialmente elettroni) create nel  $cm^3$  e che da esso fuoriescono sia statisticamente compensata dalla ionizzazione di altre particelle create all'esterno e che finiscono con l'attraversarlo (principio di compensazione di Bragg).

Quando si ha una camera di ionizzazione tarata in *Roentgen*, per avere un risultato significativo occorre che il campo di radiazione esplorato (e le sue variazioni significative) si svolgano su volumi molto maggiori di quello della camera.

\*\*Si ricorda che la carica dell'elettrone vale  $1.6 \cdot 10^{-19} C = 4.8 \cdot 10^{-10} esu$

### 3.5 Camere di ionizzazione

(Misura dell'esposizione ai raggi  $\gamma$ )

Molto spesso sono tarate in *mR/h*. Limitandosi ad elettroni, X e  $\gamma$  con fattore di qualità  $Q = 1$  una ragionevole trasformazione (poco puntuale perché i volumi tipici di queste camere sono di  $100 \div 200 cm^3$ ; per esempio una camera a facce piane e parallele cilindrica con diametro di 6 *cm* e altezza 4 *cm*) da esposizione a dose assorbita e a dose equivalente utilizza i risultati di una serie di misure che hanno permesso di arrivare alla conclusione che:

In aria un'esposizione di 1 *mR* corrisponde ad una dose assorbita equivalente di 0.87 *mrem* = 8.7  $\mu Sv$ .

Si consideri che in aria è  $\langle Z \rangle \sim 15$  e che in acqua (molto simile al corpo umano) è  $\langle Z \rangle = 10$ , si tratta cioè di valori relativamente prossimi.

Quindi, per fare un esempio: se si effettua una lettura di 3 *mR/h* questa corrisponde a  $\sim 26 \mu Sv/h$  e si raggiunge 1 *mSv* (limite annuo per il pubblico) dopo  $\sim 38h$ .

Molti degli strumenti di laboratorio sono tarati in *mR* (1 *mR*  $\simeq 10 \mu Sv$ )