

Cenni su radioattività e radioprotezione

per Laboratorio III anno:
Esperimentazioni di Fisica Nucleare e Subnucleare

Docenti: S. Capelli, A. Giachero, A. Nucciotti

Cosa si fa in laboratorio

- Sorgenti radioattive

particelle α, β, γ

- Studio di processi elementari di interazione radiazione - materia
- Caratterizzazione di rivelatori
- Spettroscopia d'ampiezza
- Coincidenze e correlazioni (energia, tempo, posizione)

- Raggi cosmici

- Caratterizzazione dei rivelatori
- Misura del flusso dei muoni al suolo vs. theta
- Misura del tempo di volo e della velocità dei muoni

La Radioattività naturale - storia

“Nel 1896 il fisico francese Henri Becquerel si accorse casualmente che i sali di uranio, posti in vicinanza di una lastra fotografica, anche racchiusa in un involucro opaco, la impressionano, mostrando così di emettere radiazioni capaci di attraversare anche i corpi che non sono attraversati dalla luce. Questa osservazione aprì un nuovo capitolo della fisica, quello della radioattività”.

(E. Persico Gli atomi e la loro energia)

La Radioattività naturale - storia

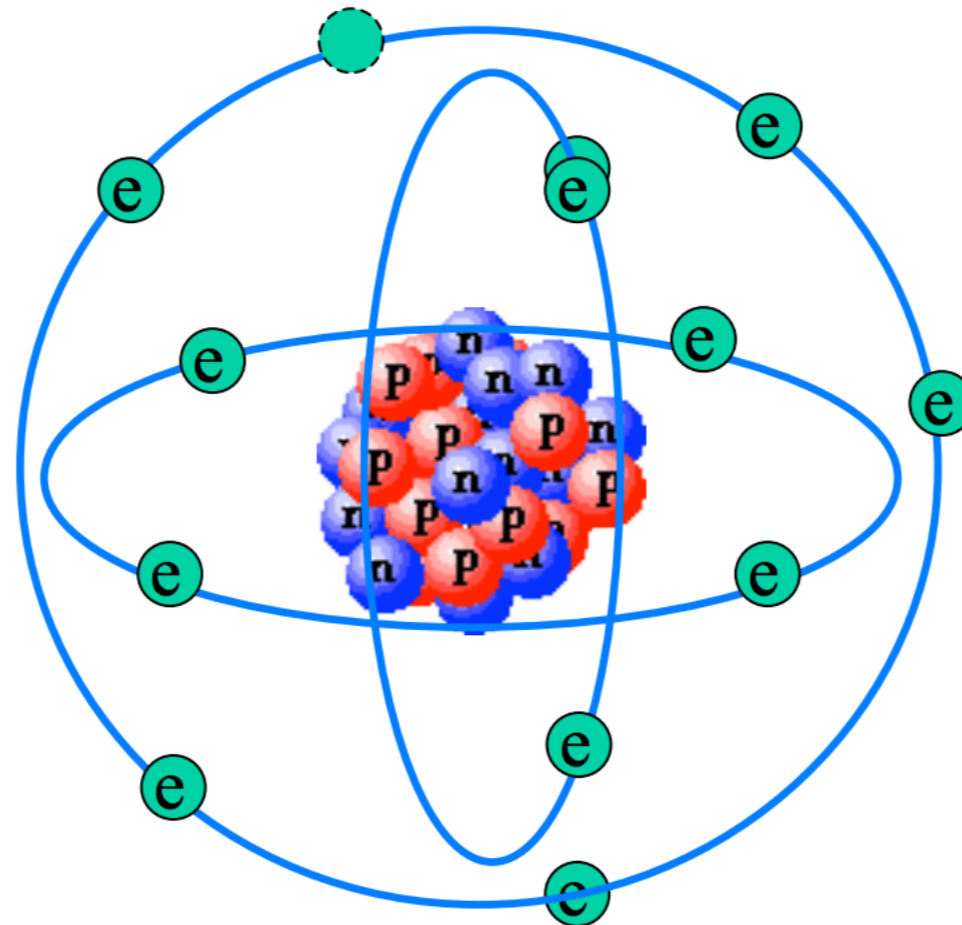
1897: J.J. Thompson scopre l'elettrone.

1898: Marie Curie scopre il Polonio ed il Radio

Proseguendo gli studi iniziati da Becquerel, M. Curie scoprì che anche altre sostanze godevano della stessa proprietà (radioattive, radium = raggio). Notò che la pechblenda (contenente piccole quantità di sali di uranio) manifestava più radioattività dei sali di uranio: ne dedusse la presenza di una specie chimica ignota. Riuscì a separare il polonio e il radio.

Utilizzando il radio, con un semplice esperimento riuscì a stabilire la natura dei raggi emessi scoprendo che trattava di 3 tipi di radiazioni: la prima elettricamente carica positivamente, la seconda negativamente e la terza neutra. **Associò a tali raggi le prime tre lettere dell'alfabeto greco α (alfa), β (beta), γ (gamma).**

La struttura dell'atomo



L'atomo viene simbolicamente rappresentato da $\begin{matrix} A \\ Z \end{matrix} X$

X = Specie fisica

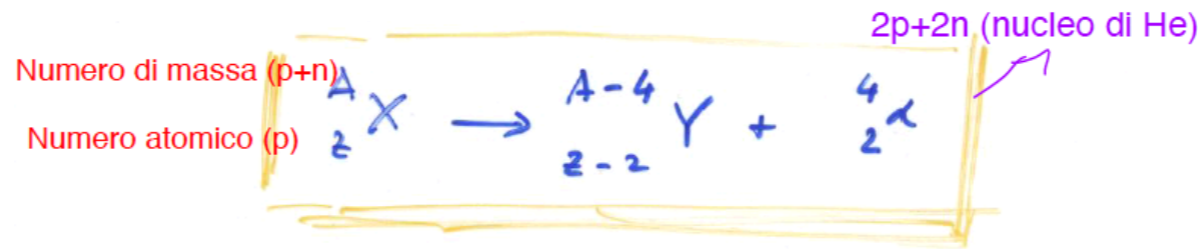
A = Numero di massa = numero di p + numero di n

Z = Numero atomico = numero di p

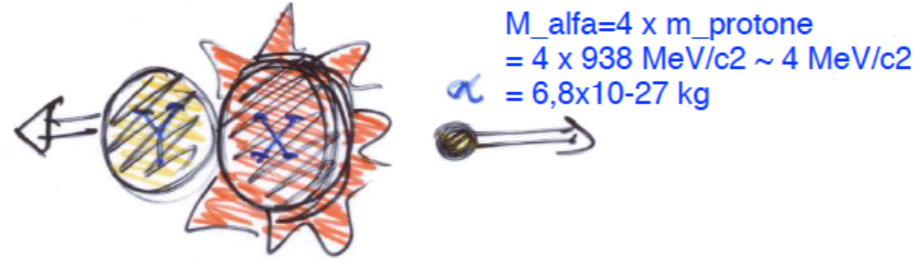
N = **A - Z** = Numero di neutroni

Decadimento α

Avviene per nuclei pesanti ($A > 209$)



decadimenti a due corpi con energia di transizione $Q = (M_X - M_Y - m_\alpha) c^2$



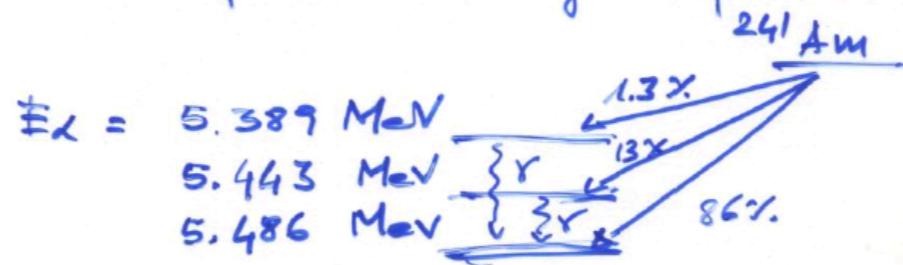
particelle α monoenergetiche

$$E_\alpha = Q \left(\frac{A-4}{A} \right)$$

Tipicamente E_α tra 4 e 8 MeV

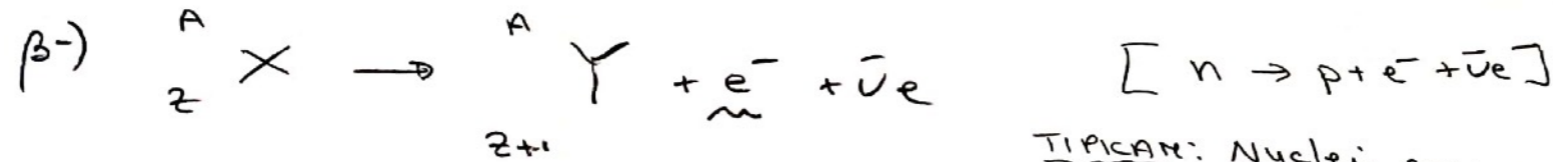
$$\approx 98\% Q \quad (\text{poich\'e } A \gtrsim 150 \text{ per nuclei } \alpha\text{-attivi})$$

Decadimenti su diversi stati eccitati del nucleo possono dar luogo a spettri di righe

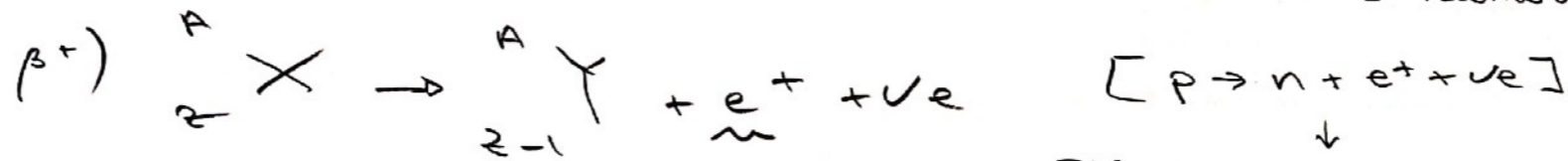


Decadimento β

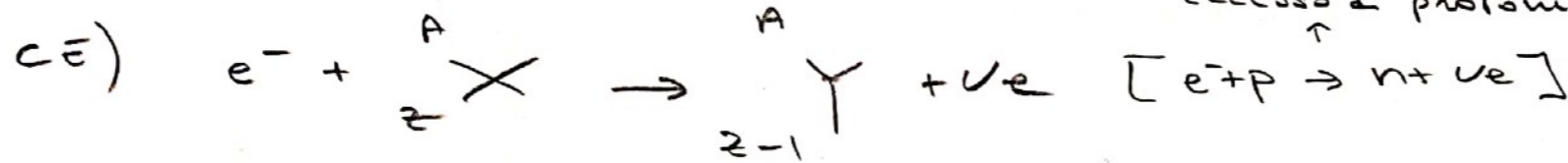
Può avvenire in 3 canali:



TIPICAM: Nuclei con eccesso di neutroni

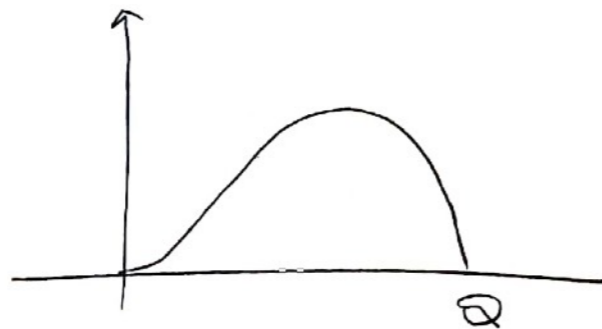


TIPICAM: Nuclei con eccesso di protoni



È decadimento a 3 corpi \rightarrow spettro continuo

$E_{e^\pm} \in [0 \rightarrow Q]$, il resto E_0 parte ν_e
 \downarrow
 $Q - m_\nu$



$m_\beta = m_{e^+} \approx \frac{m_p}{2000}$
 $\approx \frac{m_d}{8000}$

$m_\beta c^2 = 511 \text{ KeV}$
 $m_\beta = 9.11 \times 10^{-31} \text{ Kg}$

- Anche per γ^*

Decadimento γ

- Diseccitazione di livelli nucleari tramite emissione di radiazione e.m.

$$E_\gamma \in \text{KeV} \div 10 \text{ MeV}$$

- Livelli eccitati popolati in seguito a
 - decadimenti radioattivi α, β, \dots
 - processi nucleari (~~fat~~ reazioni)

- Legge di decadimento esponenziale con tempi molto brevi ($\sim 1 \text{ ns}$)
 \Rightarrow costante di tempo del processo "primario"

- Radioattività naturale

$$E_{\text{max}} = 2.614 \text{ MeV}$$



- * γ da annichilazione di positroni
- * γ da bremsstrahlung e δ - caratteristici

Catene radioattive naturali

In natura esistono catene radioattive, costituite da una serie di decadimenti successivi in cui ogni nucleo (instabile) decade α o β in un nucleo figlio, fino al raggiungimento di un nucleo stabile. Ogni decadimento (padre-figlio) ha la sua vita media caratteristica.

Si osservano sono tre principali catene naturali i cui capostipiti esistono sin dalla comparsa della terra: ^{232}Th ($1.4 \times 10^{10}\text{y}$), ^{238}U ($4.46 \times 10^9\text{y}$), ^{235}U ($7.04 \times 10^8\text{y}$). Il numero di massa A di ciascun isotopo delle tre catene è: $A=4n$ (^{232}Th), $A=4n+2$ (^{238}U), $A=4n+3$ (^{235}U). Terminano su tre diversi isotopi stabili del piombo.

La quarta catena (^{237}Np : $A=4n+1$) è quasi completamente estinta (rimane il passaggio terminale) per la corta emivita del capostipite.

Esistono anche numerose catene più corte, ad esempio quella del ^{14}C . Sulla terra la maggior parte dei capostipiti di queste catene più corte sono generati dai raggi cosmici.

Decadimenti Radioattivi Nucleari

Decadimenti radioattivi nucleari

- Processo spontaneo (esotermico) di trasformazione di un nucleo in un nucleo meno massivo ($E = mc^2$) accompagnato dall'emissione di una o due particelle
- Decadimento α - nuclei di He
- β - e^\pm + neutrino
- γ - fotoni

Legge di decadimento

$$dN = -\lambda N dt$$

nuclei scomparsi in dt

costante di dec.
Probabilità che un atomo decada nell'unità di tempo

Numero di atomi presenti al tempo t

$$\lambda N \equiv \text{Attività}$$

Numero di decadimenti nell'unità di tempo
(UM: Bq = bequerel)



$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ disintegrazione / secondo}$$

$$= N / \tau$$

$\tau =$ Vita media

Legge di decadimento

$$N(t) = N(0) e^{-\lambda t} \equiv N(0) e^{-t/\tau}$$

τ = vite media

$$\tau = \frac{1}{N(0)} \int_0^{\infty} t N(t) \frac{dt}{\tau}$$

Si trovano tabulati i tempi di dimezzamento:

$$\tau_{1/2} = \ln 2 \cdot \tau \approx 0.693 \tau$$

È un esecizio matematico ricavare la descrizione di situazioni complicate come i decadimenti in cascata

$$dN_1 = -\lambda_1 N_1 dt$$

$$dN_2 = (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) dt$$

$$dN_3 = (\lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3) dt$$

⋮

⇒ Equilibrio radioattivo

Legge di decadimento

$$dN_1 = -\lambda_1 N_1 dt$$

$$dN_2 = (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) dt$$

...

Integrazione:

$$N_1(t) = N_1(0) e^{-\lambda_1 t}$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -\lambda_2 N_2 + \lambda_1 N_1(0) e^{-\lambda_1 t} \quad (*)$$

↳ SOLUZIONE = integri generali dell'omof associata (1)
+
integrale particolare (2)

$$(1) N_2(t) = A e^{-\lambda_2 t}$$

$$(2) N_2(t) = B e^{-\lambda_1 t}$$

Sostituisci (2) in (*):

$$-B \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} = -\lambda_2 B e^{-\lambda_1 t} + \lambda_1 N_1(0) e^{-\lambda_1 t}$$

$$\rightarrow B = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0)$$

$$\Rightarrow N_2(t) = A e^{-\lambda_2 t} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0) e^{-\lambda_1 t}$$

$$\text{COND. CONT. } N_2(0) = 0 \rightarrow A = -\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0)$$

$$\Rightarrow \boxed{N_2(t) = N_1(0) \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})}$$

Legge di decadimento

Siamo interessati all'attività:

$$A_2(t) = \lambda_2 N_2(t) = N_1(0) \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t} \right)$$

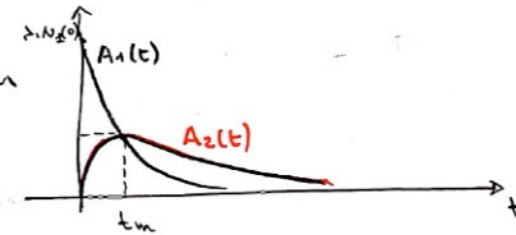
- È una funzione che $\rightarrow 0$ x $t \rightarrow 0$ $\rightarrow \exists$ MAX $\rightarrow t_m$

- l'aumento relativo di $A_2(t)$ e $A_1(t)$ dipende dalle relative λ_1 e λ_2

1) $\lambda_2 < \lambda_1$ (figlio decade + lento del padre)

• $A_2(t) = A_1(t)$ quando $t = t_m$

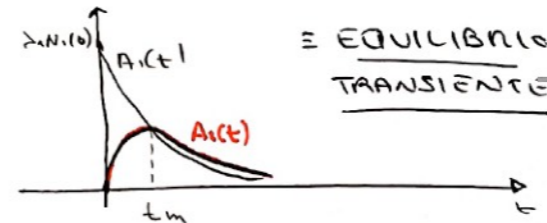
• $A_2(t) > A_1(t)$ per $t > t_m$



2) $\lambda_2 > \lambda_1$ (figlio decade + veloce del padre)

• $A_2(t) = A_1(t)$ quando $t = t_m$

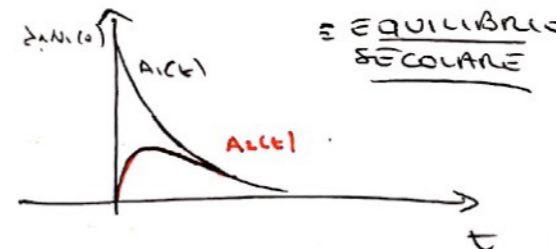
$$\frac{A_2(t)}{A_1(t)} \xrightarrow{t > t_m} \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} > 1$$



≡ EQUILIBRIO TRANSIENTE

3) $\lambda_2 \gg \lambda_1$ (figlio decade molto + veloce del padre)

$$\frac{A_2(t)}{A_1(t)} \xrightarrow{t \gg t_m} \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \approx 1$$



≡ EQUILIBRIO SECOLARE

Proteggersi dalle radiazioni

Radiazione α

- Essendo dotate di **carica** elettrica, le particelle α **interagiscono DIRETTAMENTE** con la materia: cedono energia al mezzo attraversato ionizzandone gli atomi e le molecole.
- L'elevata massa (circa $8000m_e$) fa sì che il loro **percorso** sia **rettilineo**.
- Il percorso (range) di una **particella alfa** è di **qualche cm in aria e di qualche μm in tessuto**. Per **schermare** le particelle alfa basta un **foglio di carta**
- Le particelle alfa da sorgenti **esterne al corpo non possono penetrare** lo strato corneo della pelle, ma sorgenti **interne al corpo** producono un **notevole danno biologico**.
- La **manipolazione** di sorgenti alfa non sigillate è un'operazione ad elevato rischio (inalazione, ingestione, ferita).
- L' **inalazione di ^{222}Rn** comporta l'esposizione del tratto respiratorio alle radiazioni alfa del Rn e della progenie.
- Da ricordare: gli emettitori α sono **anche emettitori di γ** !

Radiazione β

- Le particelle β , essendo dotate di **carica** elettrica, sono **direttamente ionizzanti**.
- Il loro **percorso** in un mezzo è estremamente **frastagliato** (a zig-zag) a causa delle innumerevoli diffusioni (rimbalzi) con gli elettroni orbitali degli atomi del mezzo.
- Sono molto **più penetranti delle particelle α** ma possono essere **fermati** da sottili strati di materiali (es. **mm ÷ cm di plastica, mm di metallo**).
- I β da sorgenti **esterne al corpo** (Energia > 70 keV) possono essere importanti per la dose alla **pelle**.
- L'introduzione nel corpo di materiali β -emettitori può essere pericolosa ma molto meno di quella degli α -emettitori.

Radiazione γ

- I raggi X e γ sono radiazioni elettromagnetiche simili alla luce e alle onde ma di lunghezza d'onda più corta.
- Sono **neutre**, e quindi **INDIRETTAMENTE ionizzanti** (sono le particelle cariche prodotte dal loro passaggio a ionizzare gli atomi del materiale)
- I raggi X e γ sono **molto più penetranti dei raggi α e β** . Soltanto materiali ad alta densità quali il **piombo** sono in grado di fermarli.
- La pericolosità dei raggi X e γ , specialmente nel caso di **irraggiamento esterno**, è strettamente connessa con l'**elevata capacità di penetrazione** che essi hanno nei vari materiali, tessuti viventi compresi.
- La radiazione **γ accompagna quasi sempre il decadimento beta.**

L'energia delle radiazioni

Una **radiazione** viene identificata dal suo **tipo** (alfa, beta, gamma,...) e dalla sua **energia**.

L'energia delle radiazioni **si misura in eV** (multipli e sottomultipli): 1 eV = energia acquisita da un elettrone quando viene accelerato da una d.d.p. di 1 V.

Gli **effetti** delle radiazioni sono dovuti alla **cessione della loro energia** (direttamente o indirettamente) alla materia attraversata.

Il **danno** subito dai tessuti biologici è relazionabile all'**energia assorbita per unità di massa**, chiamata **DOSE**.

Definizioni di radioprotezione

Unità di misura (utili nelle festioni delle sorgenti radioattive)

• Attività di una sorgente : $\boxed{dN(t)}$

\equiv disintegrazioni nell'unità di tempo

$$\boxed{1 \text{ Bq} = 1 \text{ disintegrazione/s}}$$

$$1 \text{ Ci} = \text{attività di } 1 \text{ g di } {}^{226}\text{Ra} \\ = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

Sorgenti tipiche: $1 \mu\text{Ci} - 1 \text{ mCi}$
 $37 \text{ KBq} - 37 \text{ MBq}$

• Dose assorbita \equiv energia depositata / unità di massa

S.I. $\boxed{1 \text{ Gy} = 1 \text{ joule/kg}}$

$$= 100 \text{ rad} \quad (1 \text{ erg/g})$$

Dose equivalente

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy} * \underline{\underline{W}}$$

Fattore di ponderazione associato al danno biologico indotto dalle radiazioni

$W = 1$ γ, X , elettroni veloci, μ
 $W = 20$ α

Limite precauzionale: 1 mSv/anno

Esposizione media annuale = 2.4 mSv

0.5 mSv raggi cosmici
0.5 mSv sorgenti naturali esterne
(Rn inalato)
0.4 mSv ^{40}K

Es. Banana 0.1 microSv,
Es. Dormire 1y con qualcuno 0.05 microSv

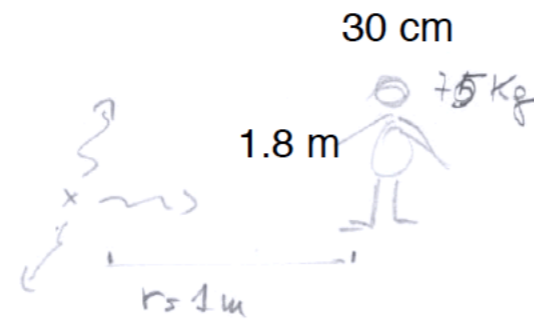
Esposizioni diagnostiche:

Rx torace 20 microSv
Rx denti 5 microSv
TAC. 3-4 mSv

Esempio sorgente γ

Sorgente γ con $E_\gamma = 1 \text{ MeV}$
e attività 100 kBq

- Assumiamo che tutti i γ che investono un uomo ad una distanza di 1 m dalla sorgente siano convertiti e rilascino la propria energia all'interno del corpo



$$\begin{aligned} \text{Fotoni incidenti} &= \frac{\text{Attività} \cdot \text{Superficie}}{4\pi r^2} \\ &= \frac{10^5 \text{ s}^{-1} \cdot 0,5 \text{ m}^2}{4\pi \text{ m}^2} \\ N_\gamma &\approx 5 \times 10^3 \text{ s}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Energia assorbita in un anno} &\leq N_\gamma \cdot \pi 10^7 \text{ s} \cdot E_\gamma = \\ &= 5 \times 10^3 \cdot \pi \times 10^7 \text{ s} \times 1,6 \times 10^{-19} \frac{\text{joule}}{\text{eV}} \approx 25 \times 10^{-3} \text{ J} \end{aligned}$$

Dose equivalente (per un uomo di 75 kg)

$$D = \frac{E}{M} = \frac{25 \times 10^{-3} \text{ joule}}{75 \text{ kg}} \approx 0,3 \text{ mSv} \ll 5 \text{ mSv}$$

Non c'è rischio per gli studenti !

Esempio sorgente α



Facoltà di Medicina e Chirurgia – A.A. 2006/07
TTF - Corso di Fisica e Tecnologia Medica

Un caso di cronaca

- Avvelenamento da 1 μg di ^{210}Po ($\tau = 130 \text{ d}$):
 - $N = 10^{-6} \text{ g} \times 6 \times 10^{23} \text{ atomi/mole} / (210 \text{ g/mole}) = 3 \times 10^{15} \text{ atomi}$
 - $A = 3 \times 10^{15} / (130 \text{ d} \times 84600 \text{ s/d}) = 2.7 \times 10^8 \text{ Bq}$
- Esposizione di 1 giorno (ciclo biologico):
 - N. decadimenti = $2.7 \times 10^8 \text{ Bq} \times 84600 \text{ s} = 2.3 \times 10^{13}$
- Energia depositata:
 - $E_{\text{tot}} = N. \text{ decadimenti} \times E_{\alpha} = 2.3 \times 10^{13} \times 5 \text{ MeV}$
 $= 2.3 \times 10^{13} \times 5 \times 10^6 \text{ eV} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV}$
 $= 16 \text{ J}$
- Dose e dose efficace
 - $D = dE/dM = 16 \text{ J} / 80 \text{ kg} = 0.2 \text{ Gy}$
 - $D_{\text{eff}} = D \times QF = 0.2 \text{ Gy} \times 20 = 4 \text{ Sv}$ **DOSE LETALE = 10 Sv**

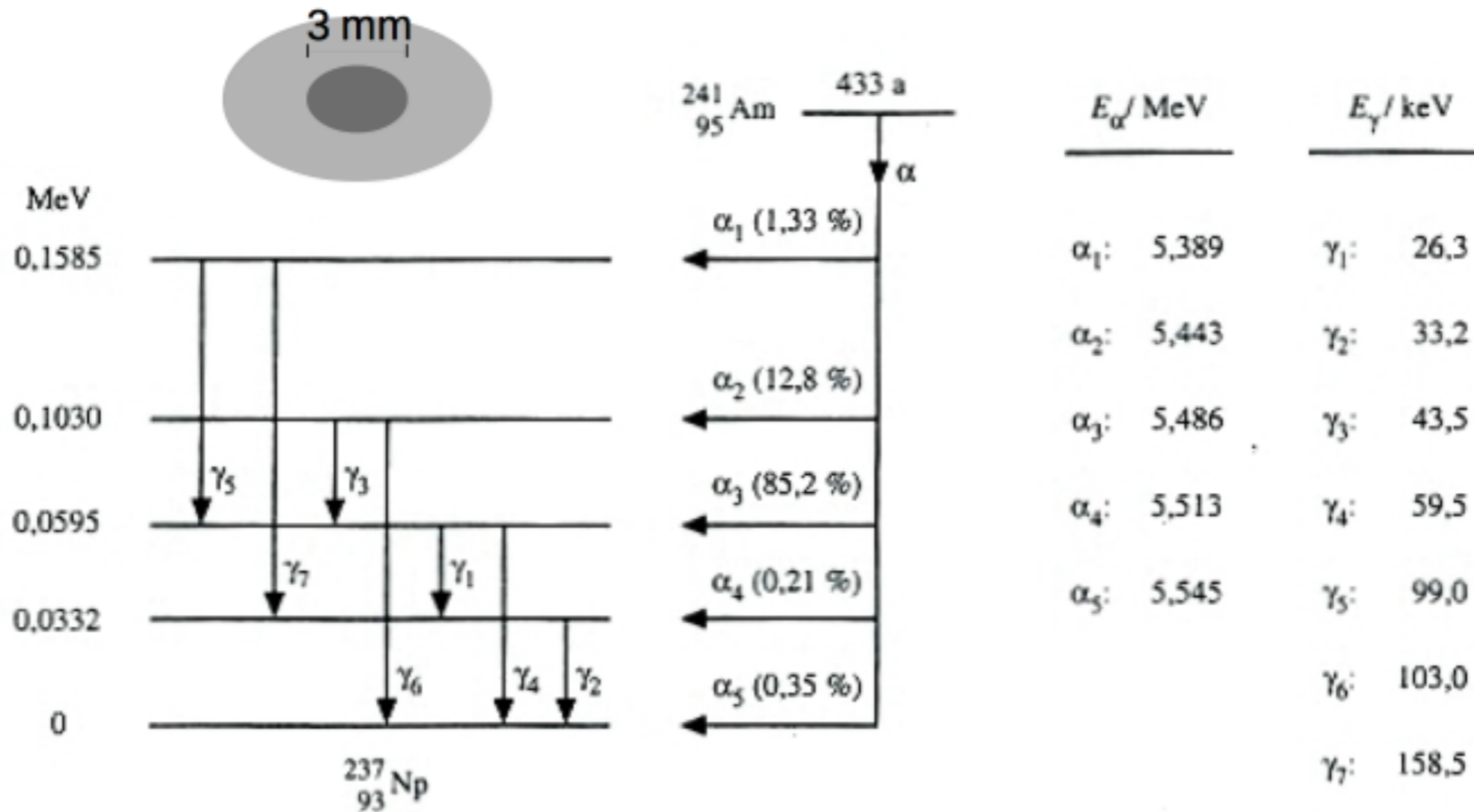
NON MANGIATE SORGENTI α

Sorgenti di particelle nel laboratorio

Esperienze alfa - Sorgente alfa di ^{241}Am

Attività ~ 4kBq, $T_{1/2} = 432 \text{ y}$

Il materiale radioattivo è elettrodepositato su un disco di acciaio ossidato **senza nessuno strato di materiale che la incapsuli**. Sono sorgenti MOLTO FRAGILI. Vanno manipolate con cura prestando attenzione a **NON TOCCARE la parte attiva CENTRALE** ($\varnothing \sim 3 \text{ mm}$). MANIPOLARE DAI BORDI! Usare pinzetta verde dai bordi larghi e piatti.

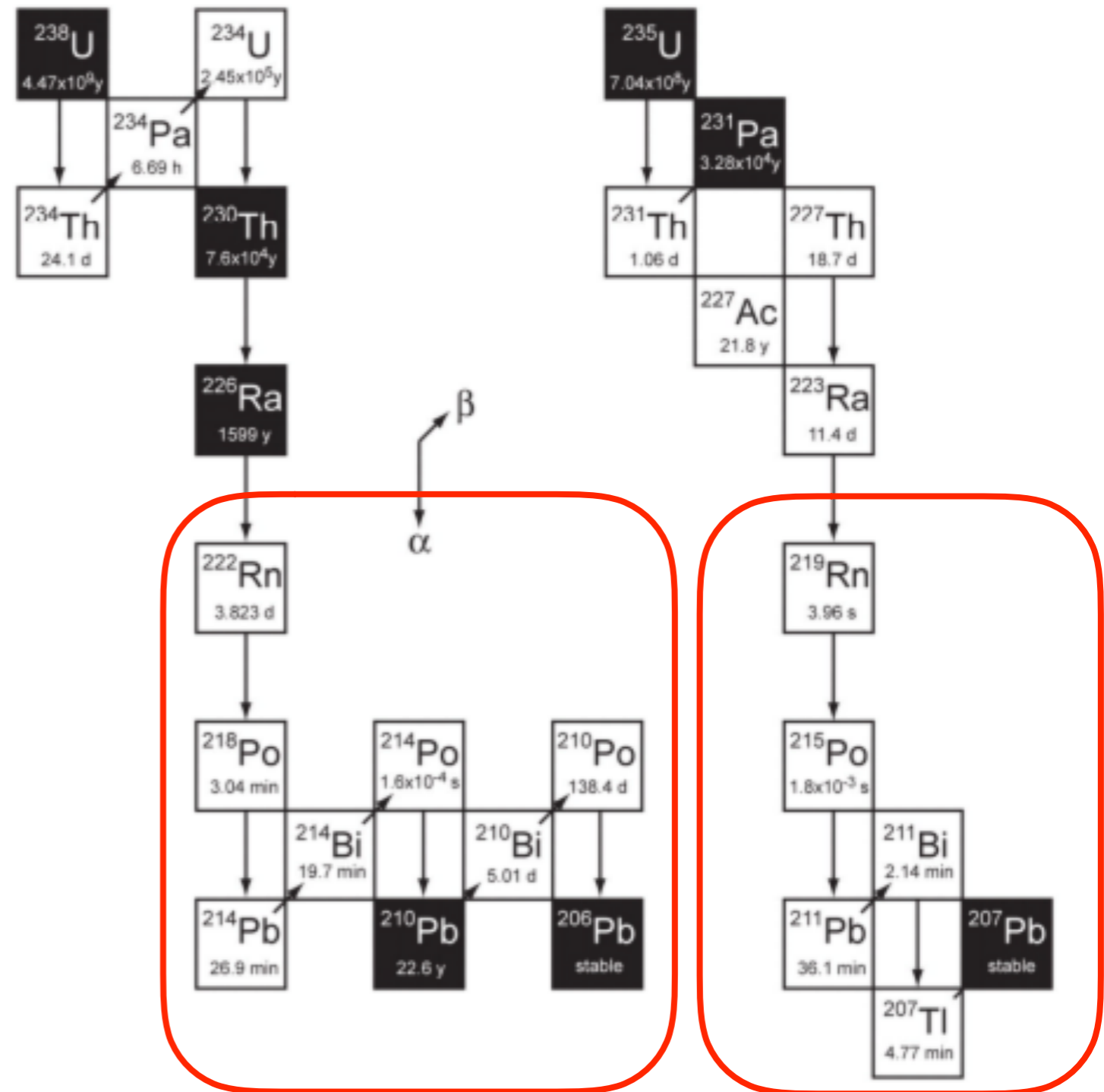


Esperienze alfa – Minerale di uranio

99.27% ^{238}U + 0.72% ^{235}U
 $t = 4.46 \times 10^9 \text{y}$ $t = 7.1 \times 10^8 \text{y}$

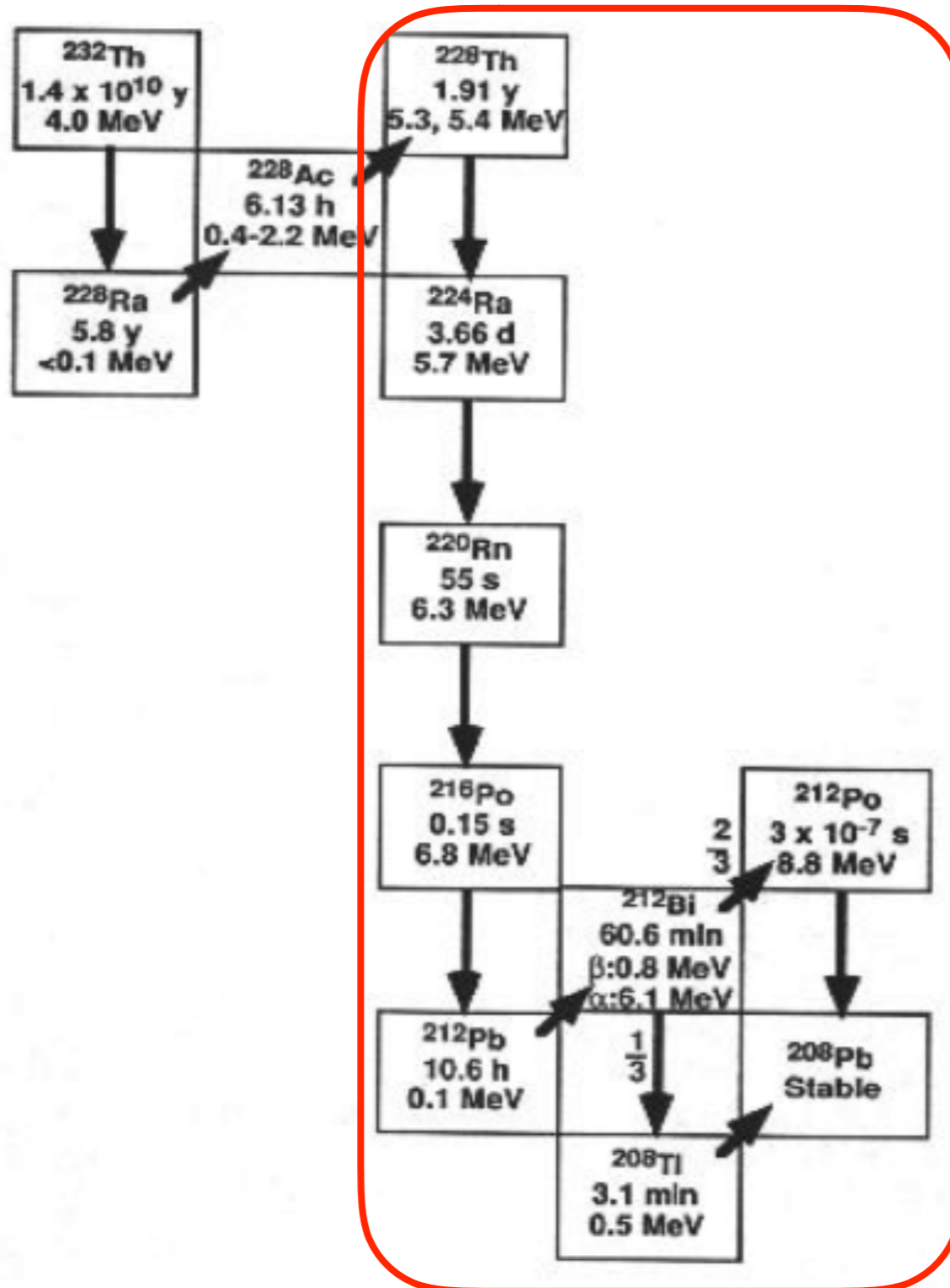
Barattolo contenente pezzetti di minerale di uranio naturale con sopra una spugnetta che permette la fuoriuscita solo dei gas di Rn (^{222}Rn e ^{219}Rn). Saranno quindi visibili solo le alfa dei figli del Rn.

NON TOCCARE con le mani il minerale. Se avviene LAVARE SUBITO LE MANI per evitare di spargere in giro pezzi di sorgente e di mangiarla!



Esperienza gamma – Sorgente di ^{228}Th

$T_{1/2} = 1.9 \text{ y}$



Main gamma lines:

^{212}Pb (b @100% Q= 574 keV)

- 238.6 keV (43.3%)
- 300.1 keV (3.28%)

^{212}Bi (b @64% Q= 2254 keV)

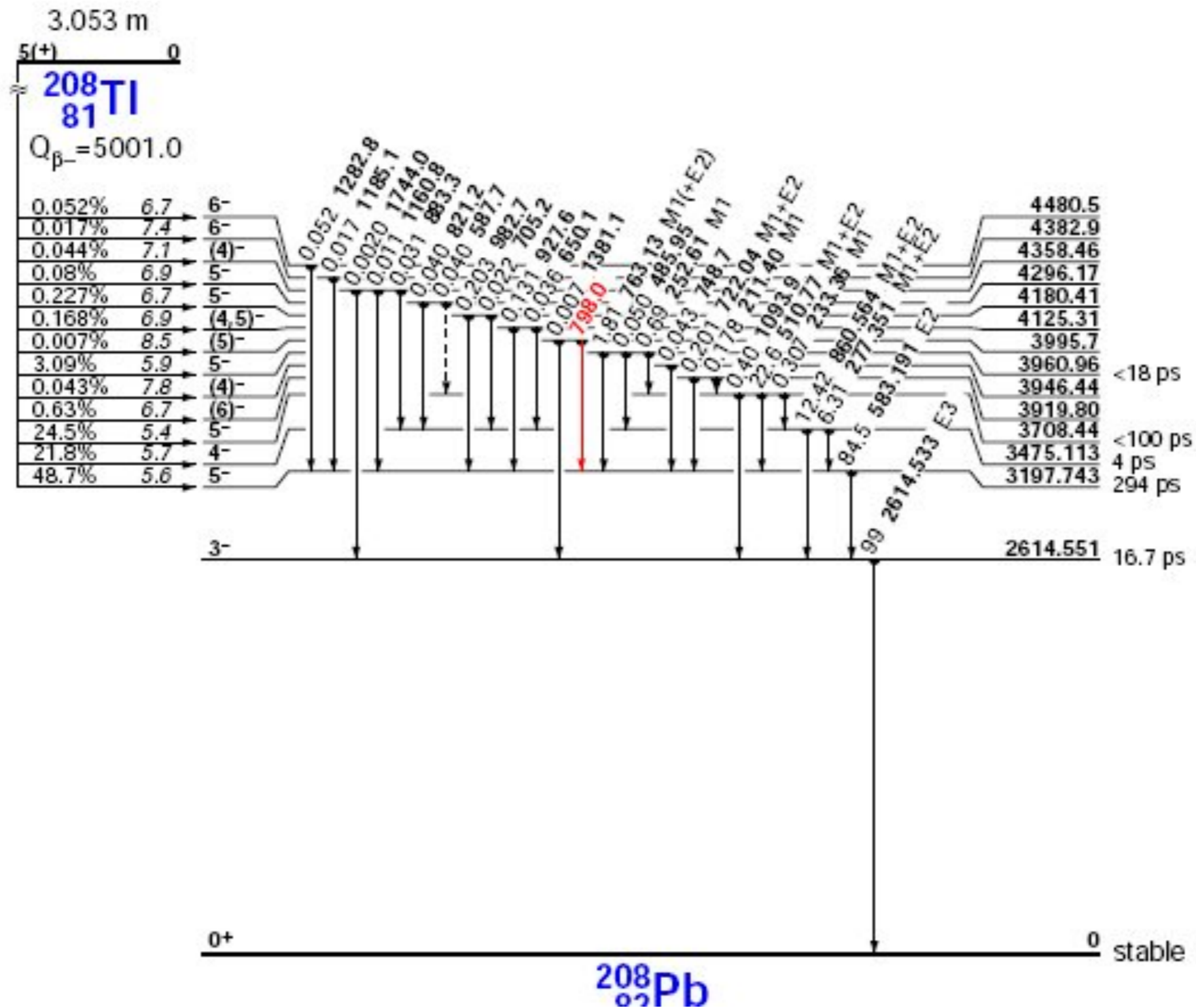
- 727 keV (6%)

Nel 36% dei casi decade a in ^{208}Tl

^{208}Tl (b @100% Q= 5000 keV)

- 2615 keV (36%)
 - 583 keV (9%)
 - 511 keV (2.4%)
 -
- (molte cascate)

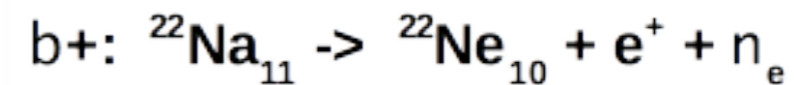
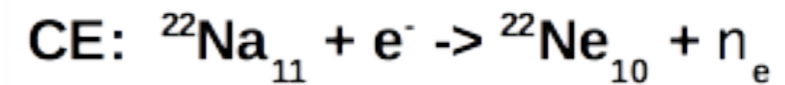
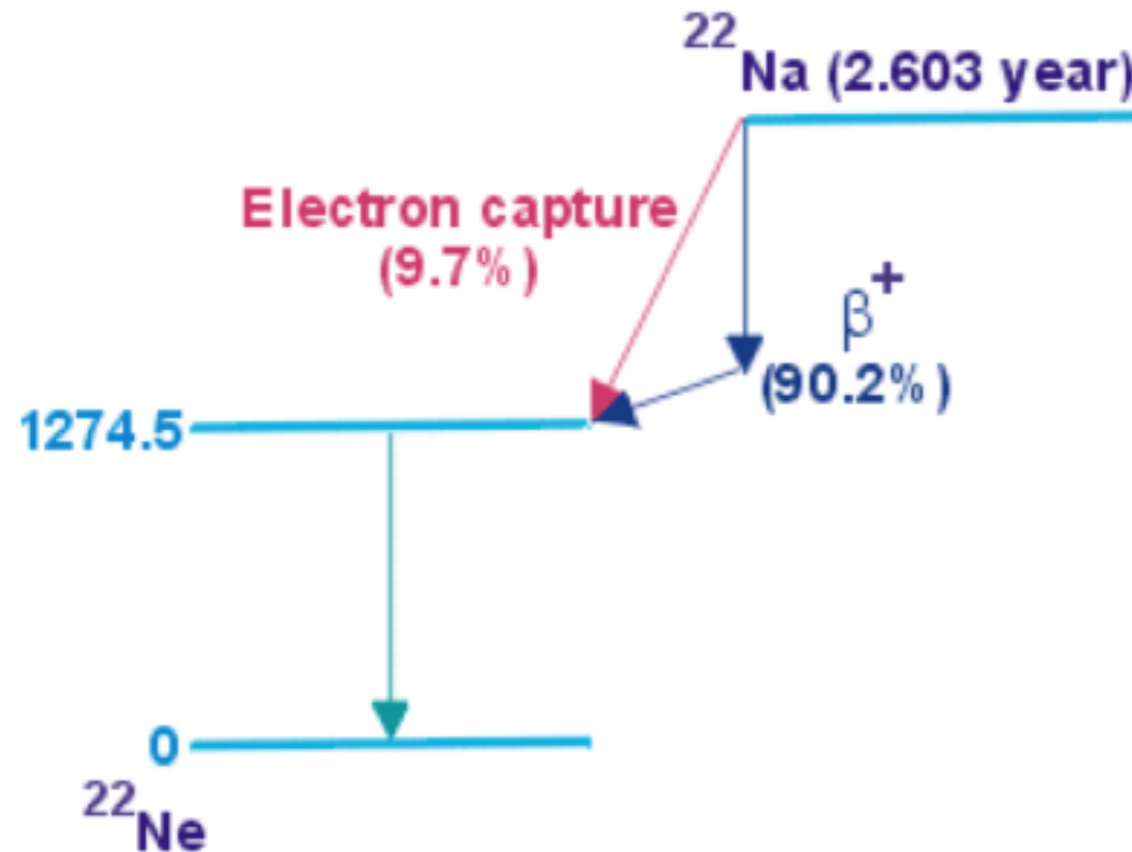
Decadimento del ^{208}Tl



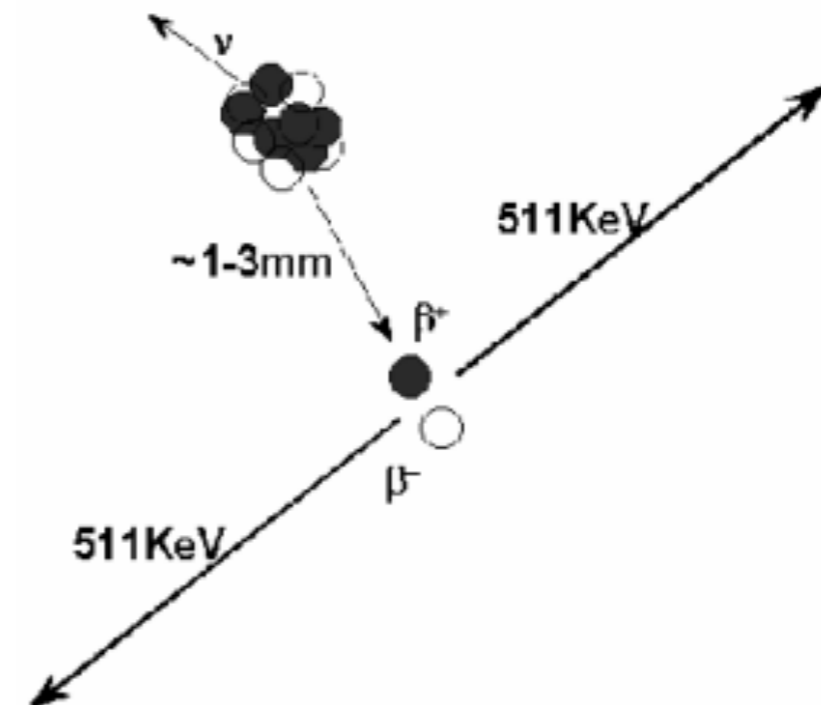
Esperienza gamma – Sorgente di ^{222}Na

$T_{1/2} = 2.6 \text{ y}$

Decade per EC(9.4%) + β^+ (90.6%) con $Q = 2842.2 \text{ keV}$



Il positrone prodotto dal decadimento β^+ rapidamente annichila con un elettrone del materiale emettendo due γ da 511 keV back-to-back.

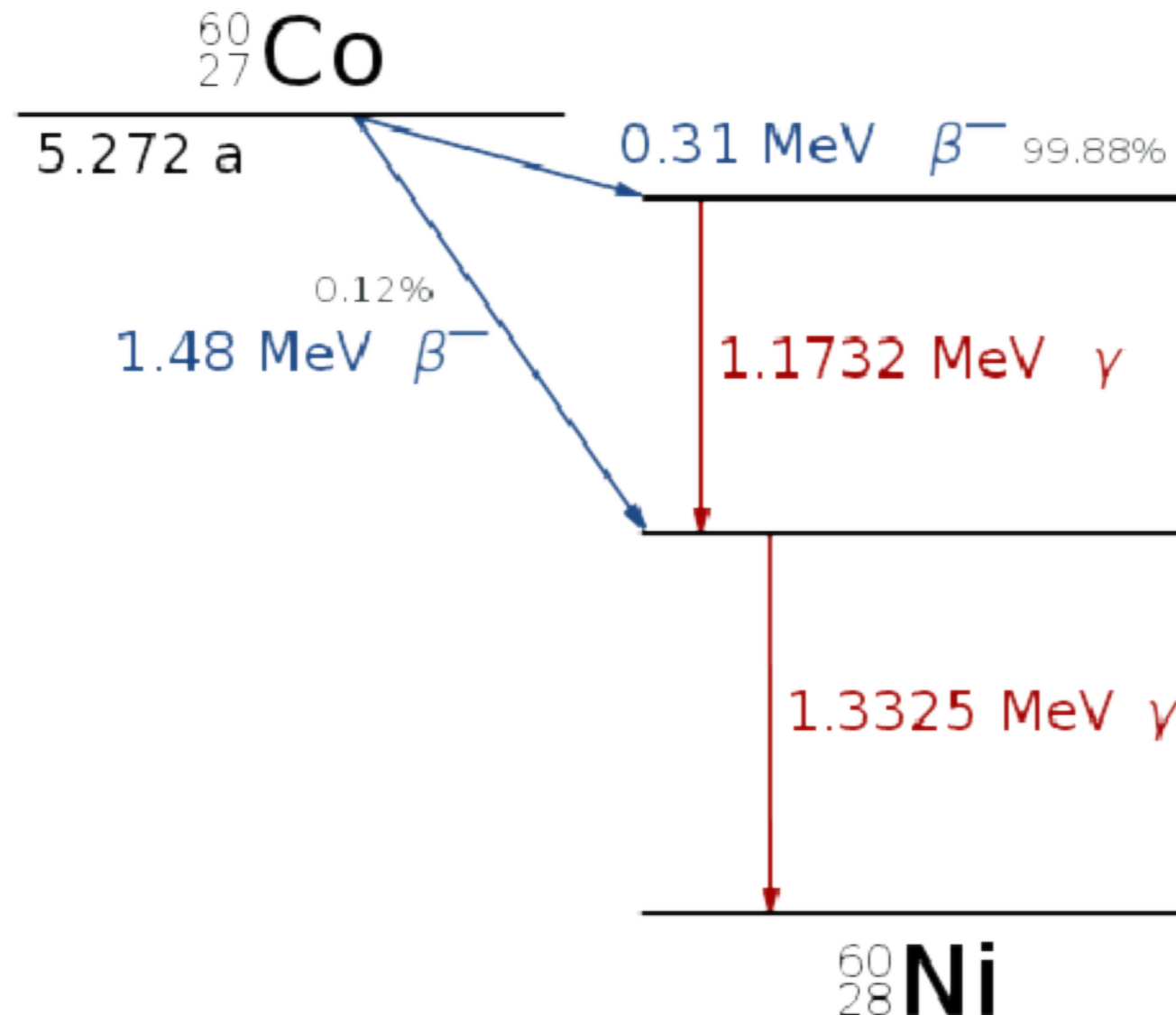


Esperienza gamma – Sorgente di ^{60}Co

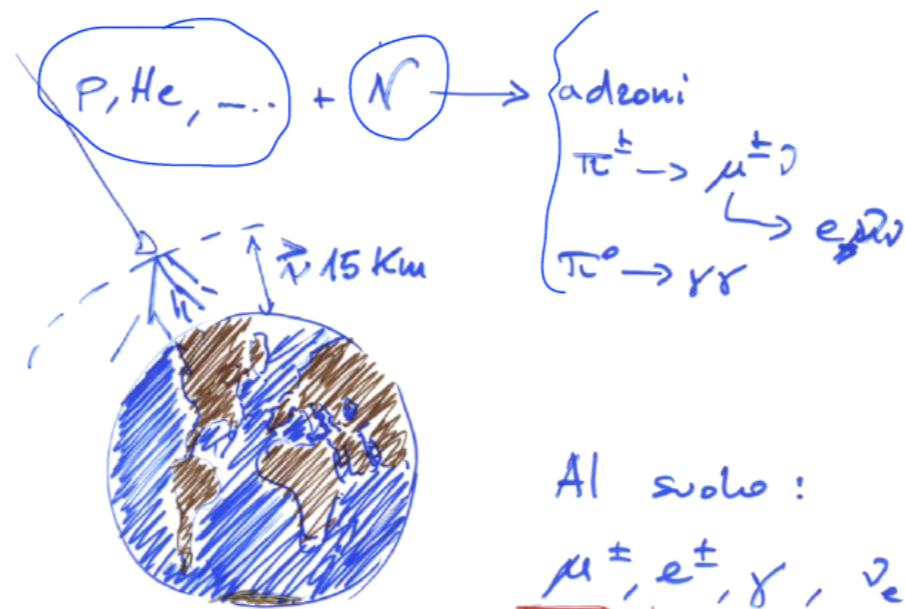
$$T_{1/2} = 5.27 \text{ y}$$

Decade per β^- (~100%) con $Q = 2823.9 \text{ keV}$

Nel 99.88% dei casi emette due γ in cascata da 1173.2 keV e 1332.5 keV



Raggi cosmici

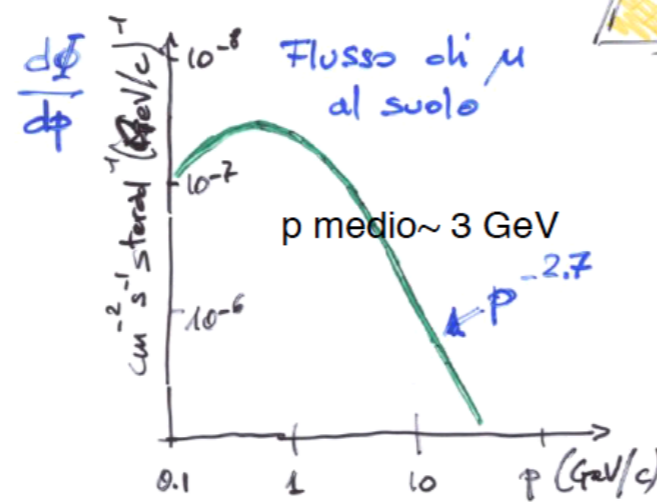


Al suolo:

$\mu^{\pm}, e^{\pm}, \gamma, \nu_e, \nu_{\mu}$

Penetranti (underlined)
"soft-component"

$M_{\mu} = 105.6 \text{ MeV}/c^2$
 $\tau = 2.2 \times 10^{-6} \text{ s}$



$c\tau \approx 660 \text{ m} \ll 1 \text{ km}$

dilatazione relativistica

$L = \gamma \beta c \tau =$
 ≈ 30
 $= \frac{p}{m} c \tau \sim 20 \text{ Km}$

Variazione del flusso con angolo zenitale:

$I(\theta) = I_v \cos^2(\theta)$ con $I_v = 1 \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$