

Edizione 2015

dal 15 al 26/06/2015

LEZIONE DI MERCOLEDI' 17 giugno

Gerti Xhixha xhixha@fe.infn.it

I decadimenti dei nuclei atomici

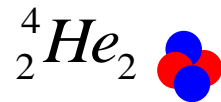
- **I decadimenti α e le loro applicazioni**
- **I decadimenti β e le loro applicazioni**
- **I decadimenti γ e le loro applicazioni**
- **Radiazione γ indotta da neutroni**
- **La radioattività naturale**
- **La radioattività del corpo umano**

Le particelle prodotte dal decadimento radioattivo

La radioattività è un fenomeno fisico naturale che si verifica quando il nucleo di un atomo instabile raggiunge un nuovo stato di equilibrio emettendo radiazioni

Esistono tre classi di decadimenti radioattivi, caratterizzati dalle particelle prodotte:

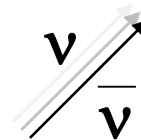
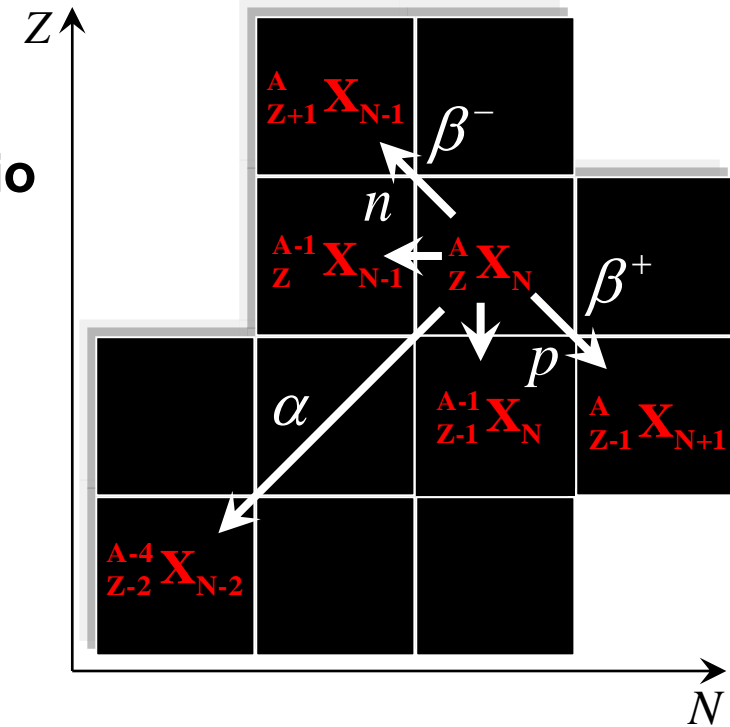
Alpha (α)



Beta (β)



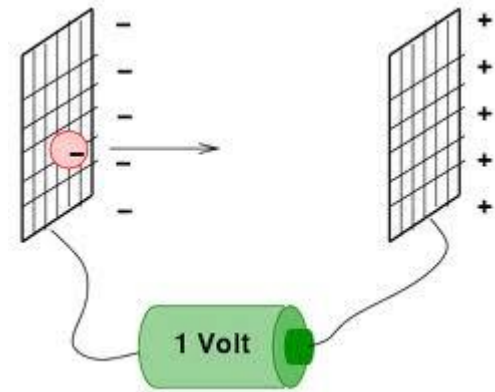
Gamma (γ)



Il MeV: una grandezza conveniente per misurare le energie dei decadimenti radioattivi

Comunemente viene usato il Joule (J) come unità di misura per misurare l'energia. Durante i processi di decadimento l'energia rilasciata è trasportata dalle particelle è tipicamente dell'ordine di grandezza di 10^{-13} J.

E' comodo introdurre una unità di energia chiamata elettro-volt (eV) definita come l'energia guadagnata da un elettrone che attraversa una differenza di potenziale 1V.



$$1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} \times 1 \text{ V} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joule}$$

ossia, anche

$$1 \text{ Joule} = 0.6 \times 10^{19} \text{ eV}$$

Questa unità non è casuale: nei processi nucleari le energie in gioco, dell'ordine di 10^{-13} J, sono dunque dell'ordine di

$$1 \text{ MeV (mega elettro-volt)} = 10^6 \text{ eV}$$

La radiazione α

Diagram illustrating the general alpha decay process and a specific example of Uranium-235 decay.

General Alpha Decay:

$${}^A_Z X \longrightarrow {}^4_2 \text{He} + {}^{A-4}_{Z-2} Y$$

Specific Example: Uranium-235 Decay:

$${}^{235}_{92} \text{U} \longrightarrow {}^4_2 \text{He} + {}^{231}_{90} \text{Th}$$


The diagram shows the decay of a Uranium-235 nucleus into a Helium-4 nucleus (alpha particle) and a Thorium-231 nucleus. The alpha particle is shown as a cluster of 2 protons (red) and 2 neutrons (blue).

Decay Scheme:

The diagram includes a decay scheme showing the sequence of decays. The initial state is ${}^{A-4}_{Z-2} X_{N-2}$. It branches into α (alpha decay) and β^- (beta minus decay). The β^- decay leads to ${}^{A-1}_{Z-1} X_{N-1}$, which then decays via β^+ (beta plus decay) to ${}^{A-1}_{Z-1} X_{N-1}$. The α decay leads to ${}^{A-4}_{Z-2} X_{N-2}$.

Legend:

- neutroni
- protoni



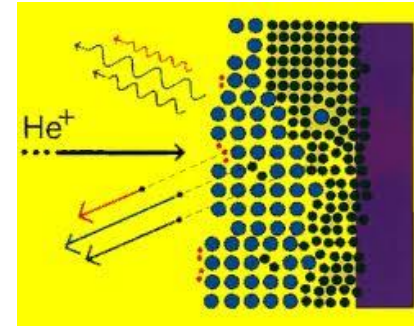
Il tempo di dimezzamento è $T_{1/2} = 7.04 \times 10^8$ anni.

L'energia rilasciata nel processo è trasportata dalla particella α , e vale $Q_\alpha = 4.7 \text{ MeV}$

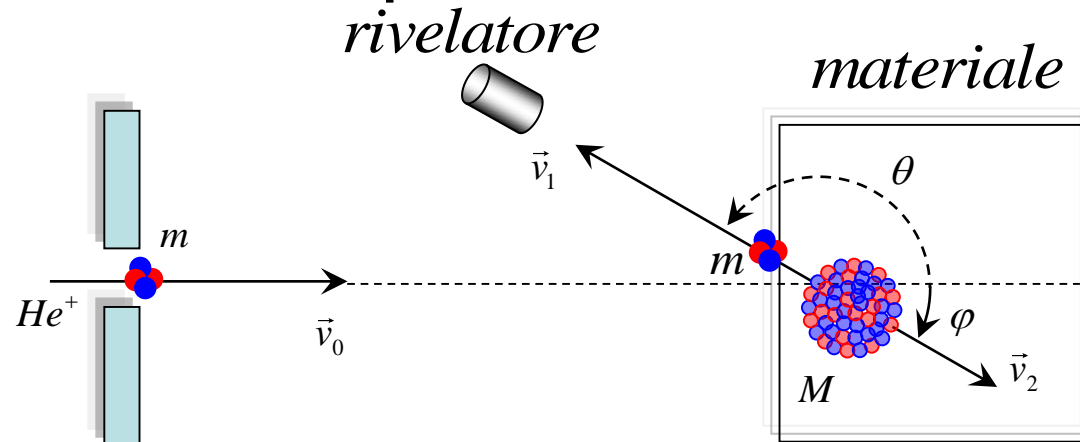
La capacità di penetrazione delle particelle α è bassissima: basta un foglio di carta per fermarle

Un'applicazione del decadimento α : RBS

Rutherford Backscattering Spectrometry (RBS) è un metodo utilizzato per determinare la composizione della superficie di un materiale, utilizzando una sorgente di ioni, quale ad esempio particelle α con energia dell'ordine del MeV.



Le particelle che rinculano cedono energia ai nuclei contro cui urtano elasticamente, conservando l'energia e il momento, secondo una legge che dipende dalla massa di questi ultimi.



per $\theta = 180^\circ$

$$\frac{T_1}{T_0} = \left(\frac{M - m}{M + m} \right)^2 \quad (1)$$

Esercizio: usando la conservazione dell'energia e dell'impulso dimostrare (1).

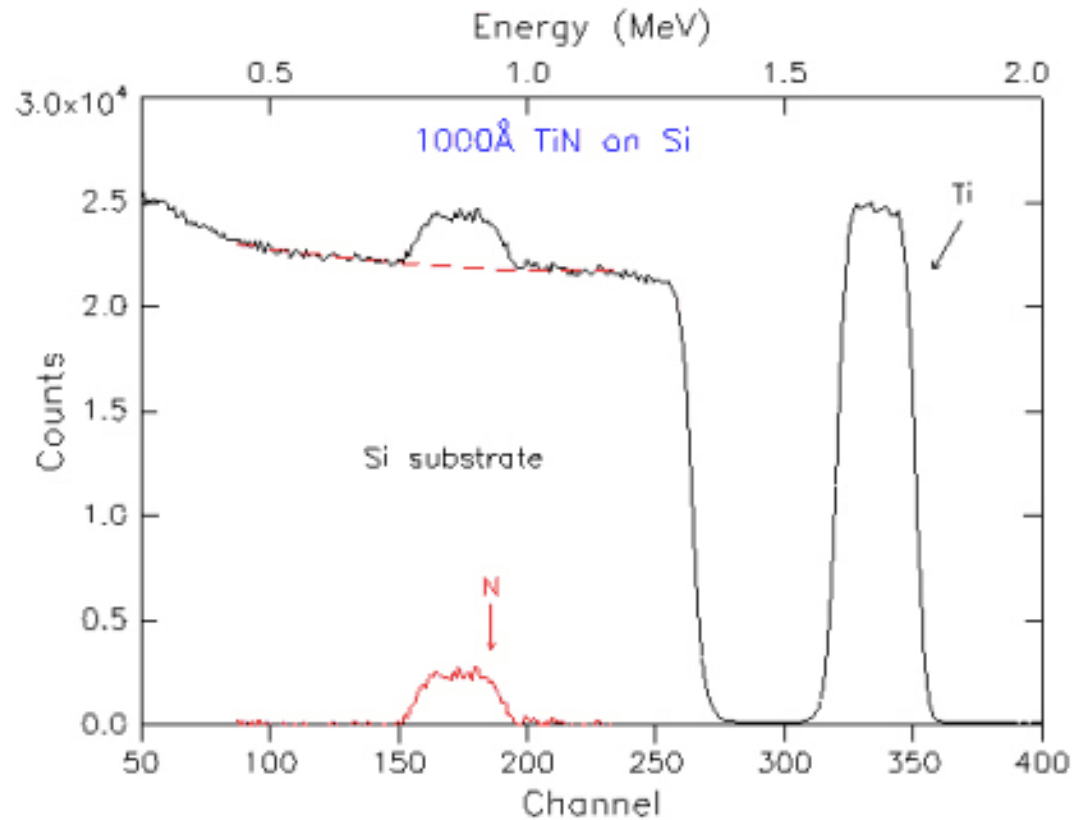
Applicazione del decadimento α : RBS

Dalla misura si ricava la massa del nucleo contro cui è avvenuto l'urto. Il numero dei conteggi osservati in funzione dell'energia permette di risalire alle abbondanze dei vari elementi.

È un metodo di analisi non distruttiva delle superfici, ampiamente utilizzato (materiali per l'elettronica, superfici di opere d'arte.)

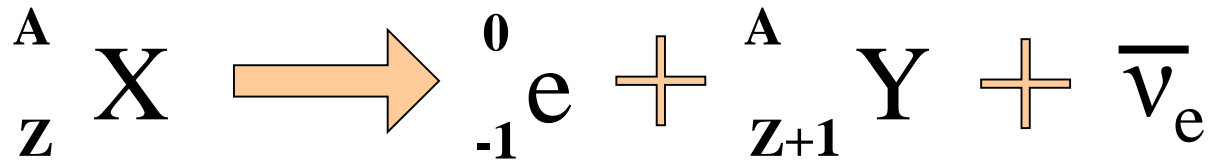


Ragazzo con canestro di frutta

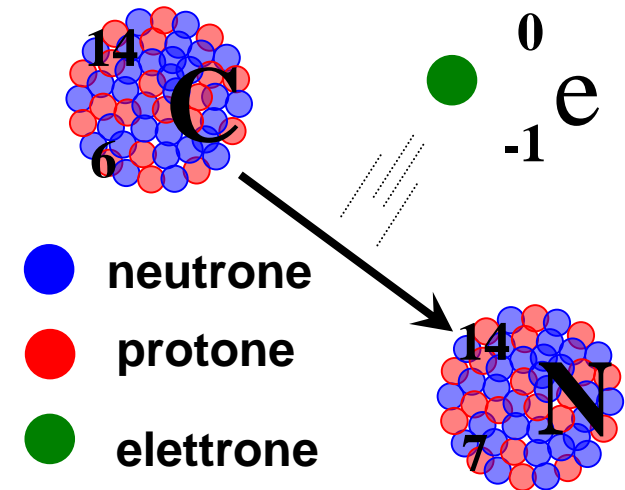
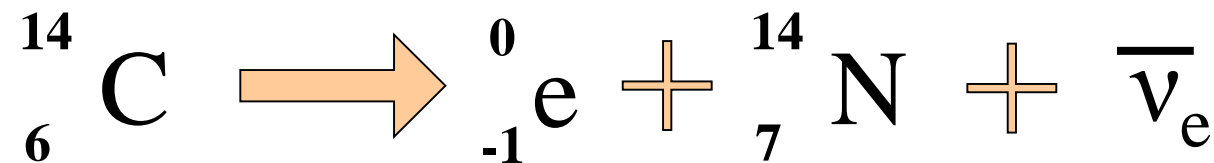


Lo spettro mostra la presenza di TiN sopra un substrato di Si di uno spessore di 10^{-13} m.

La radiazione β^-



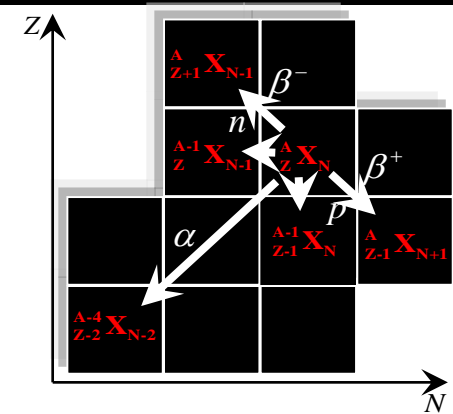
Il Carbonio nell'atmosfera è presente nei suoi isotopi stabili (^{12}C : 98.9%, ^{13}C : 1.1%) e in piccolissima parte ($r_0=10^{-12}$) sotto forma di ^{14}C , un nucleo instabile.



Il tempo di dimezzamento è $T_{1/2} = 5730$ anni.

L'energia rilasciata nel processo è trasportata dalla particella β , ed ha un valore massimo $Q_{\beta(\max)} = 0.156$ MeV.

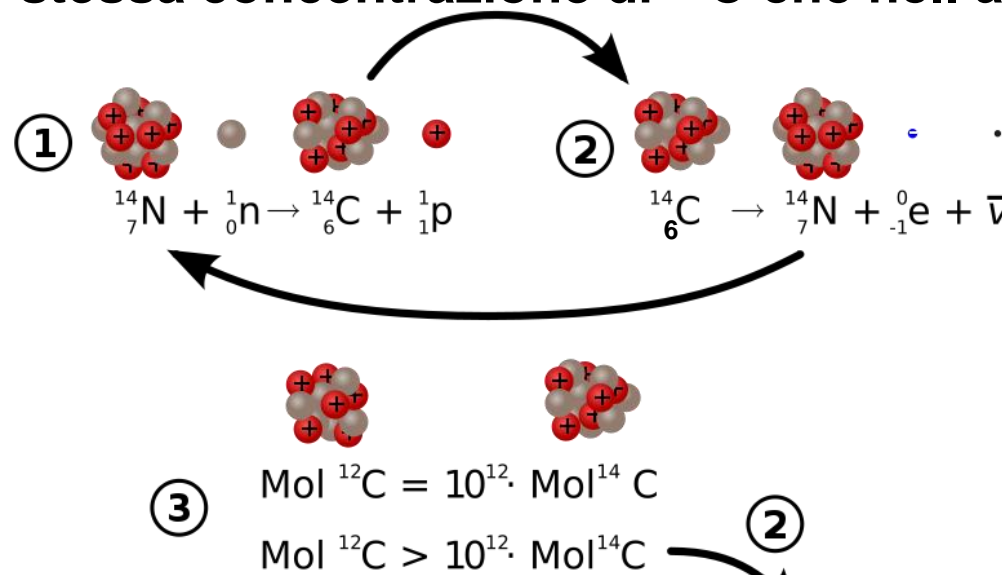
La capacità di penetrazione delle particelle β è bassa: basta 1mm di piombo per fermarle.



Applicazione della radiazione β^- : la datazione col radiocarbonio

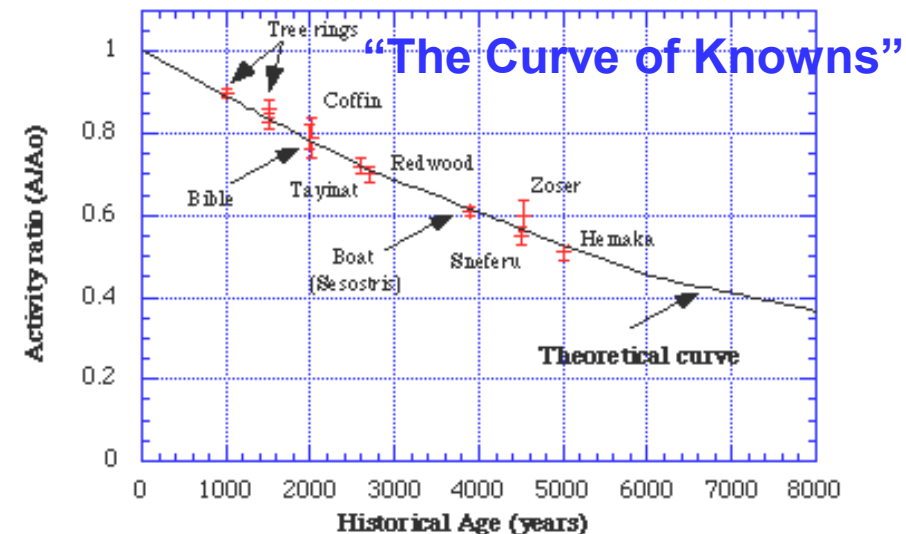
Il ^{14}C formato nell'atmosfera si ossida in $^{14}\text{CO}_2$ ed entra nel ciclo biologico attraverso la fotosintesi e la catena alimentare.

Poiché la chimica non distingue gli isotopi, negli organismi viventi si ha la stessa concentrazione di ^{14}C che nell'atmosfera.



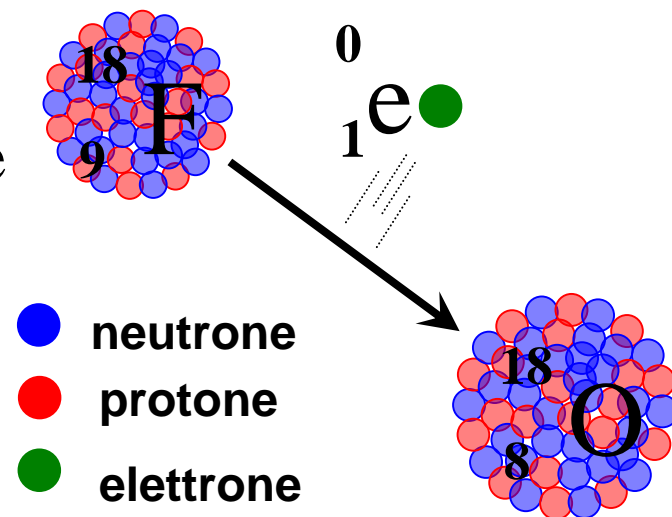
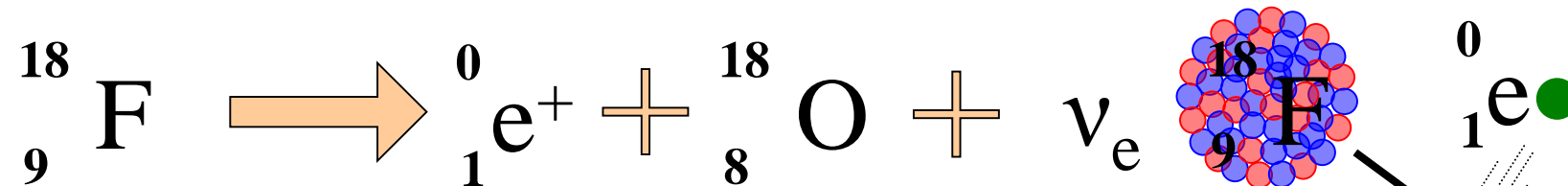
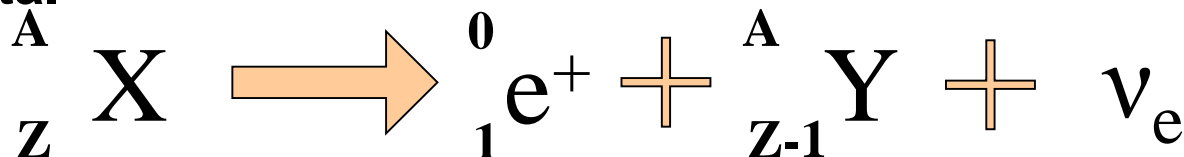
- Da quando l'organismo muore ($t = 0$) il ^{14}C può solo decadere, e la sua concentrazione diminuisce nel tempo.
- Dato un campione, si determina l'abbondanza residua di ^{14}C e da questo si risale all'età.

- (1) La formazione del ^{14}C ,
- (2) Il decadimento del ^{14}C ,
- (3) Il segno "uguale" vale per gli organismi vivi, e il segno "non-uguale" vale per i organismi morti, nei quale il ^{14}C decade (vedi 2).



La radiazione β^+

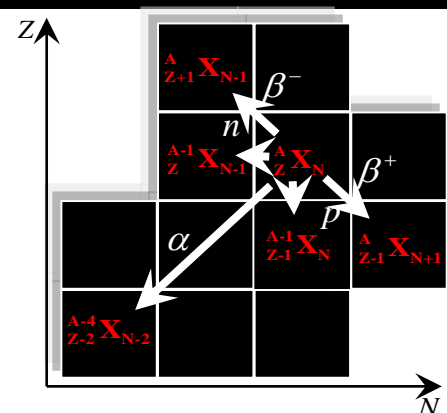
Oltre ai nuclei che decadono emettendo elettroni (β^-) ci sono nuclei che decadono emettendo positroni (β^+), particelle con la stessa massa dell'elettrone ma carica opposta.



Il tempo di dimezzamento è $T_{1/2} = 109.77 \text{ min.}$

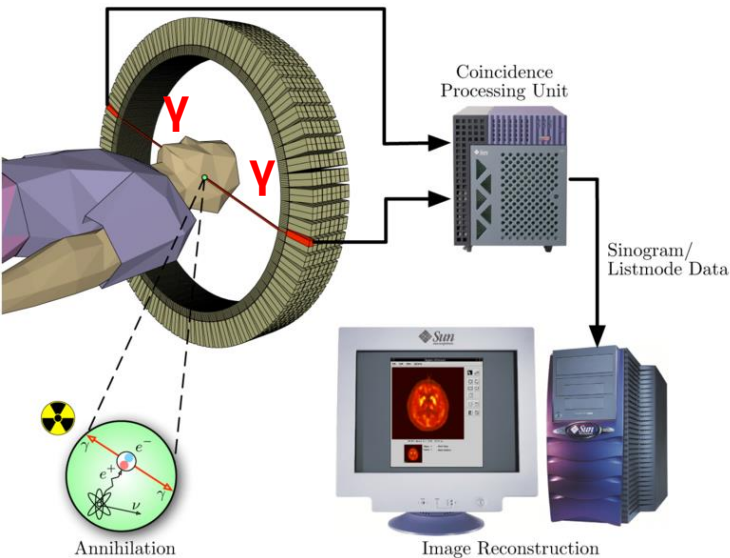
L'energia rilasciata nel processo è trasportata dalla particella β , ed ha un valore massimo $Q_{\beta(\text{max})} = 1.656 \text{ MeV.}$

La capacità di penetrazione delle particelle β è bassa: basta 1mm di piombo per fermarla.



Applicazione della radiazione β^+ : PET

La PET (Positron Emission Tomography): è una tecnica d'immagine di medicina nucleare che produce immagini 3D dei processi funzionali dei organismi.

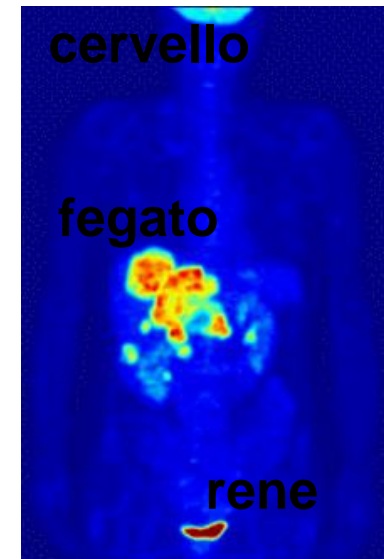


Vengono iniettati composti (es. glucosio, acqua) contenenti nuclei che decadono con emissione di positroni (es. ^{18}F). Il composto, messo in circolazione, si localizza nell'organo in relazione alle sue proprietà chimiche.

Se ne può determinare la localizzazione dal decadimento del nucleo instabile, mediante l'annichilazione dei positroni sugli e^- degli atomi circostanti.



Si rivelano i 2γ da 0.512 MeV in coincidenza e se ne ricostruisce la direzione di provenienza. Esaminando successivamente i vari piani, si può ricostruire in 3D la distribuzione del composto nell'organo di interesse (tomografia). Si può determinare **quando e quanto** il composto viene metabolizzato nell'organismo. In questo modo si può verificare la funzionalità dell'organo.

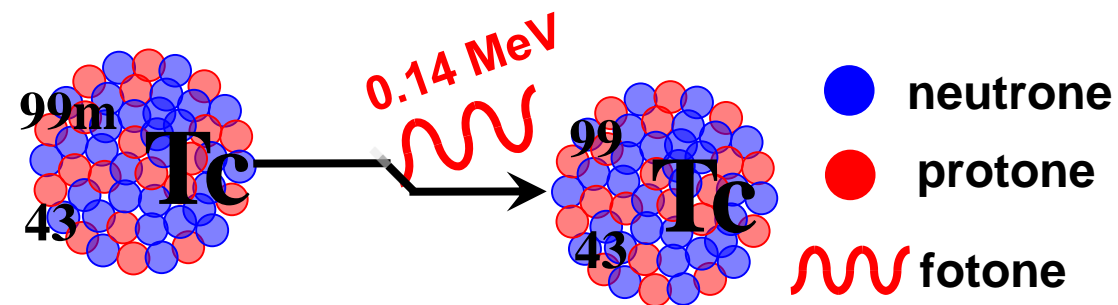
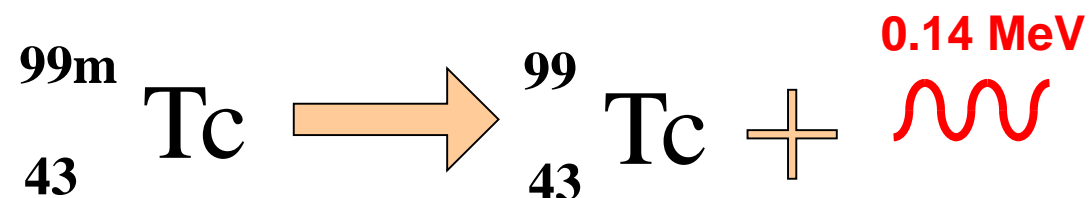
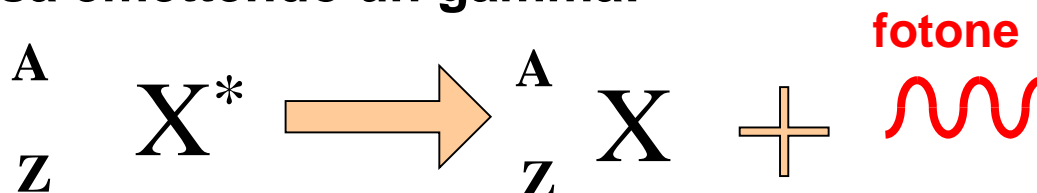


Acquisizione PET

La radiazione gamma

Non esistono nuclei stabili con $Z = 43$. L'elemento con questo numero atomico, prodotto artificialmente nella fissione dell'uranio, fu scoperto da Carlo Perrier ed Emilio Segrè in Sicilia nel 1937 e battezzato Tecnezio (dal greco *technetos*, artificiale).

Questo nucleo ha un livello eccitato (Tc-m) che decade nello stato di energia più bassa emettendo un gamma:



Il tempo di dimezzamento è
 $T_{1/2} = 6.01 \text{ h.}$

L'energia rilasciata nel processo è trasportata dalla particella gamma, ed ha un valore $Q_\gamma = 0.14 \text{ MeV.}$

La capacità di penetrazione delle particelle gamma è molto alta: servono 10cm di piombo per fermarla.

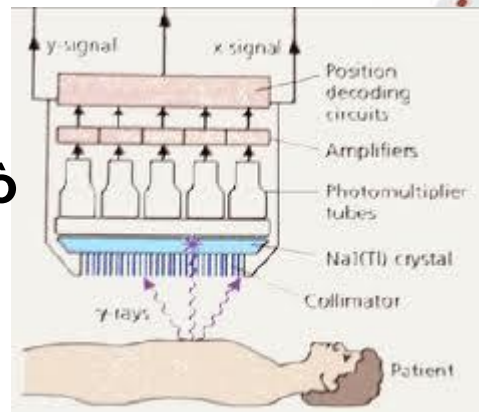
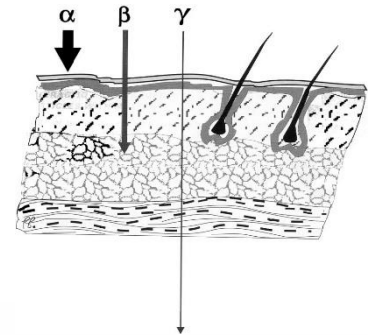
Applicazione della radiazione γ : La gamma camera

La Gamma Camera è l'apparecchiatura utilizzata in medicina nucleare, per l'acquisizione delle immagini della distribuzione, nel corpo umano, dei radiofarmaci usati per la diagnosi.

Il tecnezio è il radioisotopo più usato in medicina nucleare, in quanto:

- La sue proprietà chimiche permettono il legame con svariati composti, che si localizzano negli organi diversi da studiare.

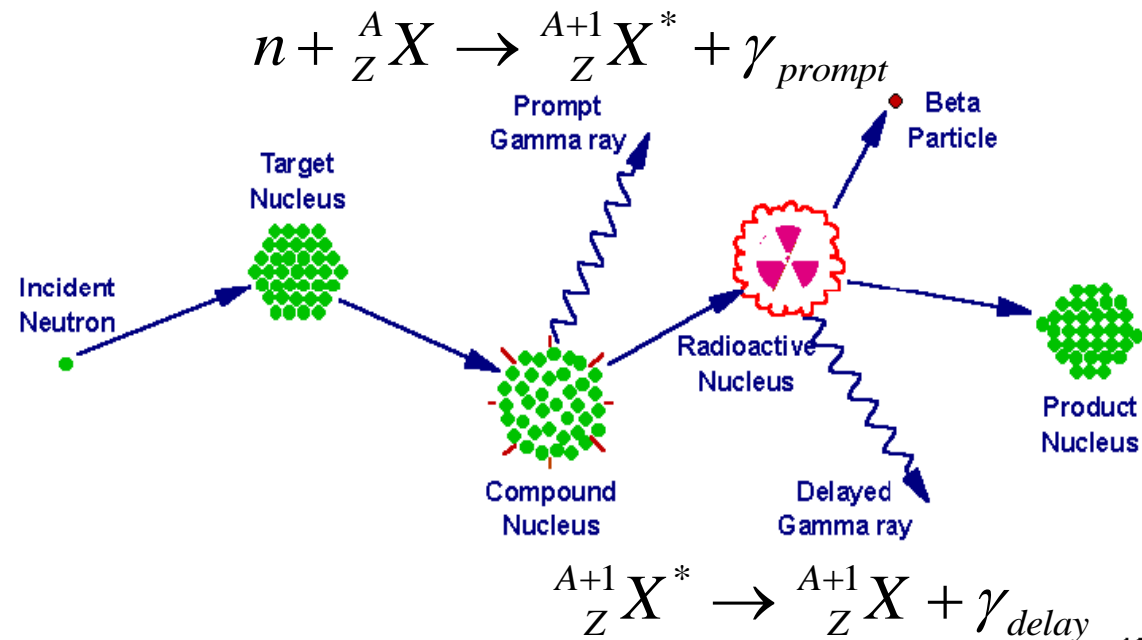
- L'alta capacità di penetrazione dei gamma permette loro di attraversare il corpo umano e di essere rivelati, ricostruendo la zona dove il tecnezio si è accumulato nell'organismo.
- Poiché il tempo di dimezzamento è breve, può essere rapidamente eliminato dall'organismo



Gamma Camera

Radiazione gamma indotta da neutroni

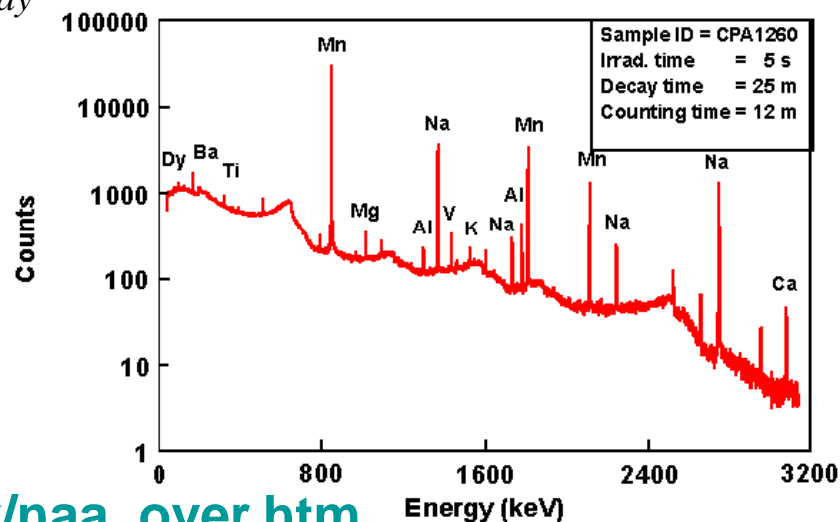
Mediante cattura neutronica, nuclei non radioattivi possono esser attivati, cioè trasformati in nuclei radioattivi.



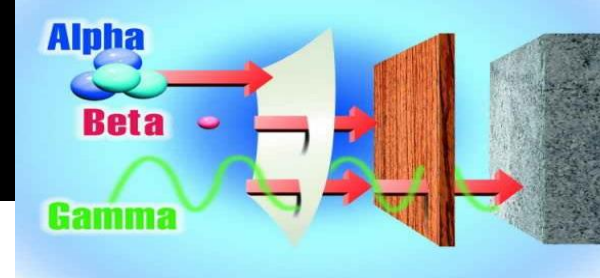
La cattura di neutroni su nuclei dà radiazioni specifiche del nucleo composto che viene prodotto; Inoltre questo può essere formato in uno stato eccitato dal quale decade con emissione di fotoni verso lo stato di energia più bassa.

Questo è un metodo per studiare sperimentalmente i livelli dei nuclei (neutron spectroscopy). Inoltre è un metodo efficiente per l'analisi degli elementi presenti in una sostanza (Neutron Activation Analysis, NAA)* anche in piccole tracce.

*Vedi http://www.missouri.edu/~glascock/naa_over.htm



Caratteristiche principali delle radiazioni α , β e γ



Emissione α

Particella: $2p + 2n$

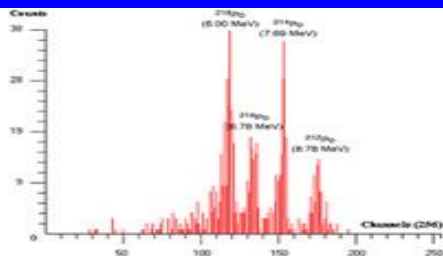
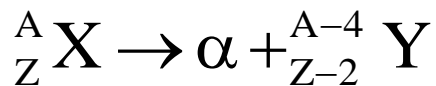
Massa: $6.68 \cdot 10^{-27}$ Kg

Carica: positiva

Penetrazione: bassa
[foglio di carta]

Ionizzazione: alta
[$\sim 10^5$ coppie prod.]

Processo:



Emissione β

Particella: e

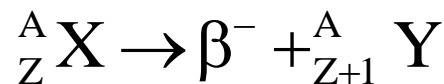
Massa: $9.1 \cdot 10^{-31}$ Kg

Carica: negativa/positiva

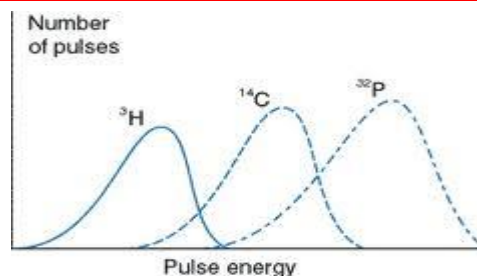
Penetrazione: media
[1 mm di Pb]

Ionizzazione: media
[$\sim 10^4$ coppie prod.]

Processo:



...



Emissione γ

Particella: fotone

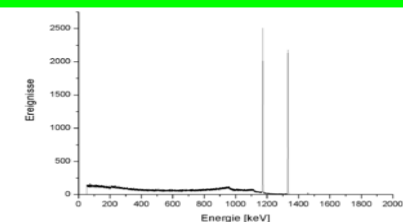
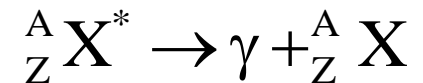
Massa: 0

Carica: neutra

Penetrazione: alta
[10 cm di Pb]

Ionizzazione: bassa
[~ 1 coppie prod.]

Processo:

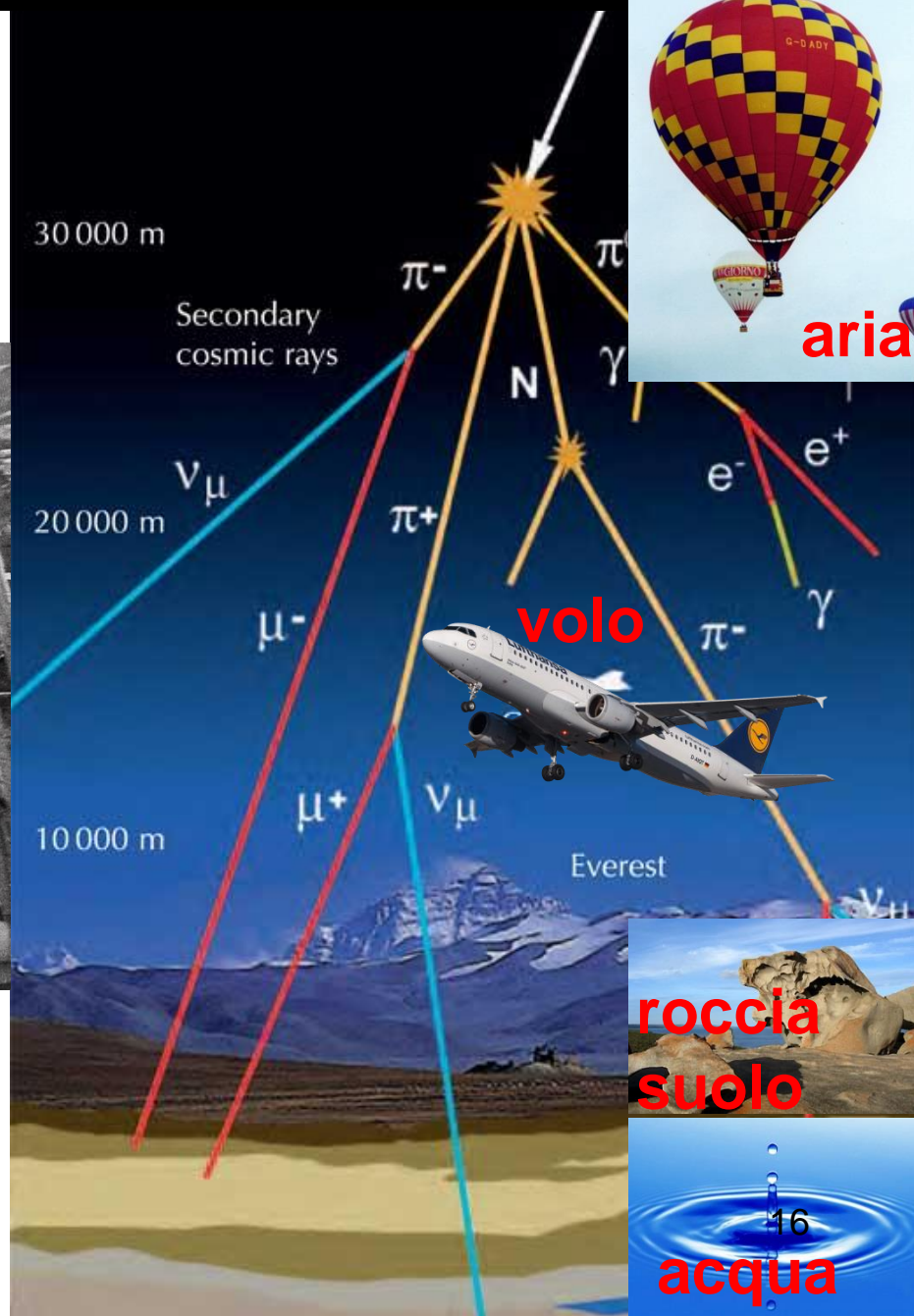


La radioattività: una faccia della natura

L'ambiente in cui viviamo tutti i giorni è naturalmente radioattivo.



Gli esseri umani contaminano l'ambiente e generano sorgenti artificiali di radioattività.



Nothing in life is to be feared, it is only to be understood. Now is the time to understand more, so that we may fear less.

Marie Curie

La radioattività naturale

La radioattività naturale (natural background) si può classificare secondo l'origine in due categorie generali:

- Primordiale – da prima della creazione della Terra

Nuclide	Half-life	Abbondanza isotopica naturale
^{235}U	$7.04 \times 10^8 \text{ yr}$	0.7% dell' uranio totale
^{238}U	$4.47 \times 10^9 \text{ yr}$	99.3% dell' uranio totale
^{232}Th	$1.41 \times 10^{10} \text{ yr}$	100% dell'torio totale
^{40}K	$1.28 \times 10^9 \text{ yr}$	0.012% dell' potassio totale
^{87}Rb	$4.75 \times 10^{10} \text{ yr}$	27.8% dell'rubidio totale

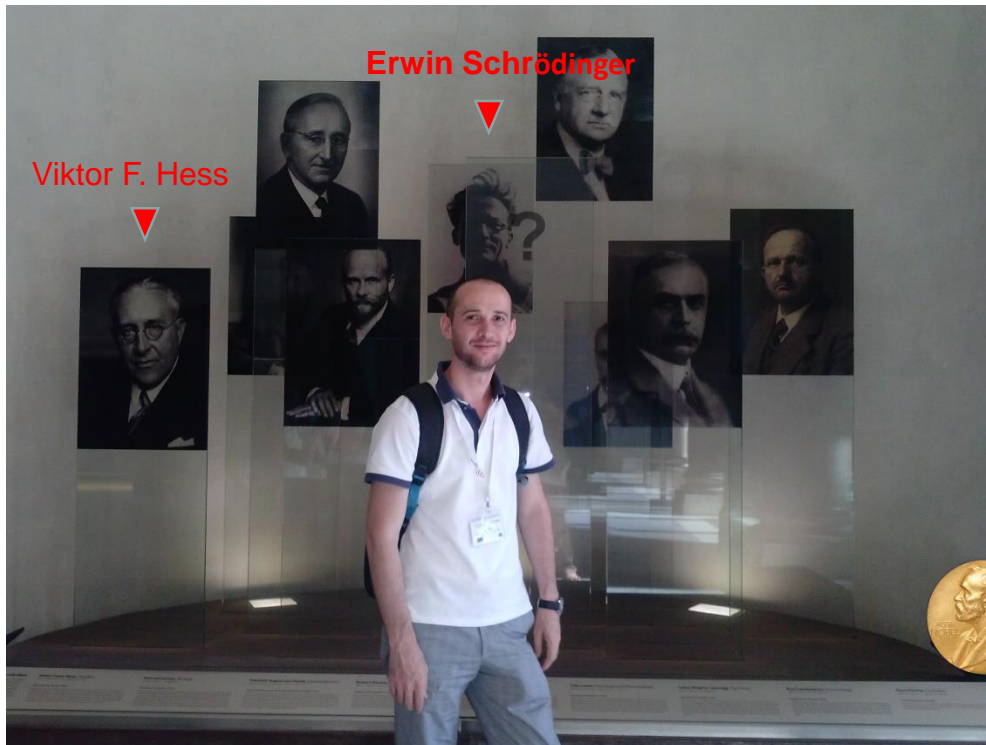
- Cosmogenico – dai raggi cosmici provenienti dallo spazio

Nuclide	Half-life	Source
^{14}C	5730 yr	Cosmic-ray interactions, $^{14}\text{N}(\text{n},\text{p})^{14}\text{C}$
^3H	12.3 yr	Cosmic-ray interactions with N and O, spallation from cosmic-rays, $^6\text{Li}(\text{n}, \alpha)^3\text{H}$
^7Be	53.28 days	Cosmic-ray interactions with N and O

La storia sulla scoperta dei raggi cosmici

Victor Hess, ritorno dal suo volo (raggiunto 5350 m) decisivo in 1912, mostrando che le radiazioni aumentano per altezze sopra 2500m.

“Victor Hess in 1912 determined that essentially, the sun could not be the source of cosmic rays, at least as far as the undeflected (by the solar eclipse) rays were concerned.”



1936 Hess:
Radiazione cosmica



Università di Vienna

La radiazione cosmica: origine e composizione

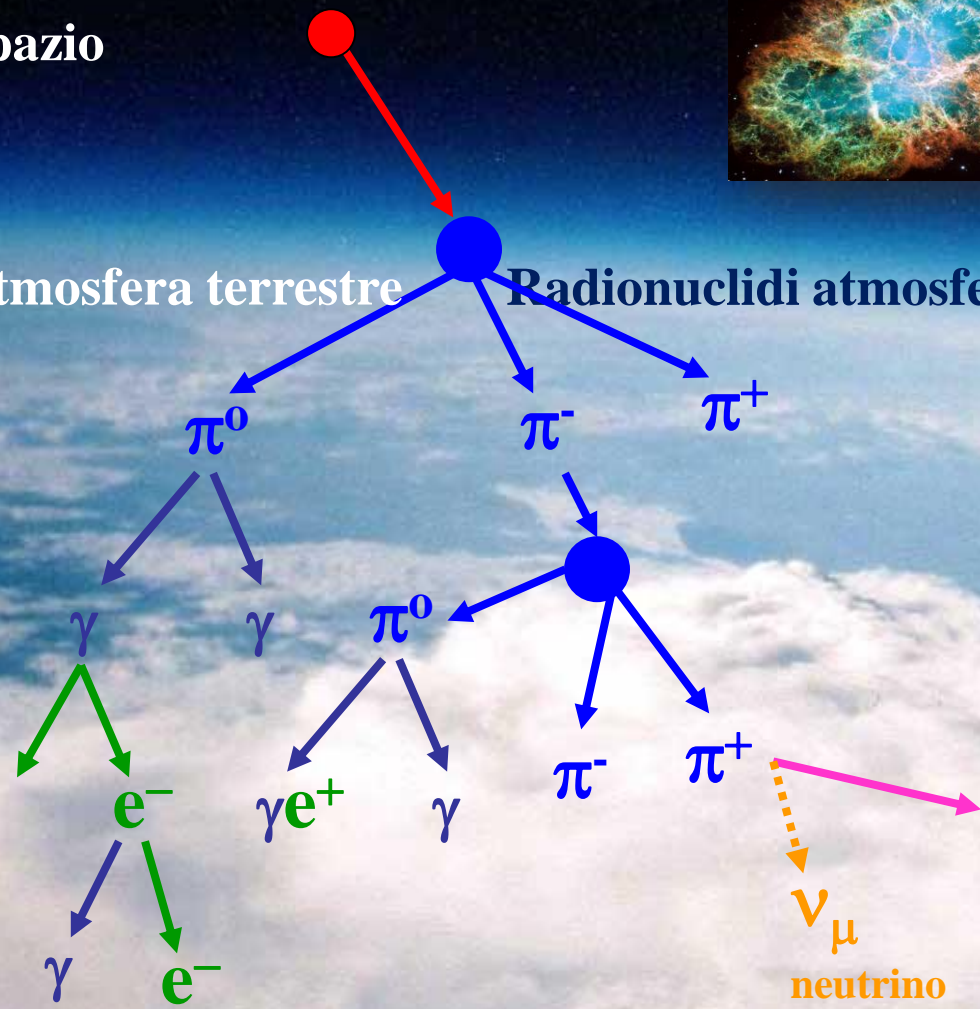
Spazio



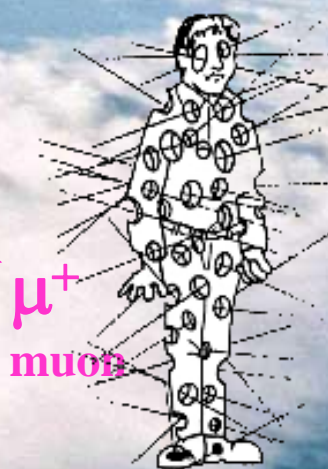
Raggi Cosmici Galattici sono i raggi cosmici extrasolari che provengono da esplosione di una supernova

Atmosfera terrestre

Radionuclidi atmosferici



Raggi Cosmici “Primari” Cosmic
85% protons
12,5% alpha
1% heavy elements
1,5% electron



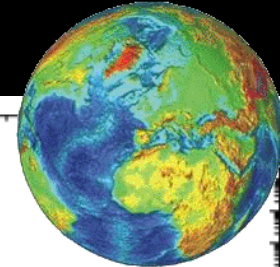
Raggi cosmici bombardano continuamente la Terra. Infatti, circa 100.000 raggi cosmici passeranno attraverso una persona ogni ora!

Electromagnetic Shower:
principalmente raggi gamma

Hadronic Shower:
principalmente muoni e neutrini

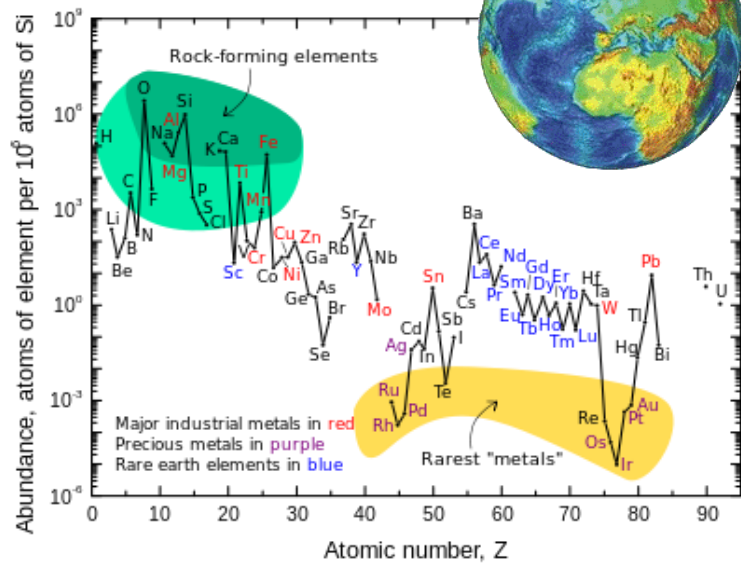
Heavy Nuclide	decay mode	half life
^{14}C	β^-	5700 y
^3H	β^-	12.32 y
^{22}Na	β^+ , EC	$2.6^{+0.2}_{-0.1}$ y
^7Be	EC	53.22 d

La radioattività naturale primordiale



Esempio di concentrazioni di U, Th, K in alcune rocce e minerali.

Parti per milione (ppm) è una notazione che indica i rapporti tra quantità misurate omogenee, (es. mg/kg = 10⁻⁶).

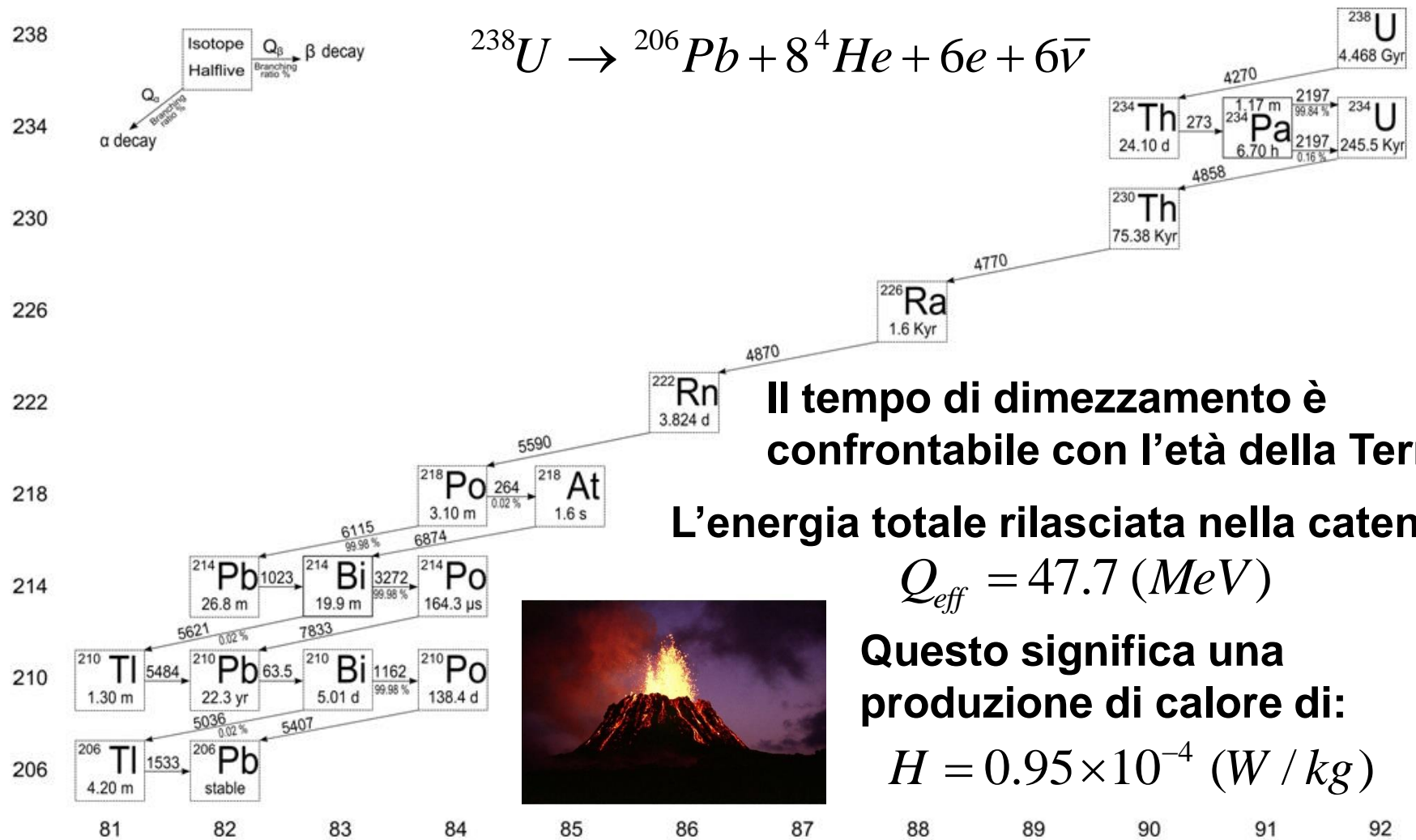
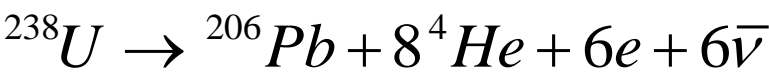


Concentrazioni e rapporti di U, Pb, Th e K in alcune rocce e minerali

Roccia o minerale	Concentrazione dell'elemento in ppm (parti per milione)			Rapporto U-Th
	Uranio	Torio	Potassio	
<i>Rocce sedimentarie</i>				
calcare	2	2	3 000	1,6
arenaria	2	11	27 000	0,35
argilla (shale)	4	12	25 000	0,27
<i>Rocce ignee e metamorfiche</i>				
andesite	2	6	25 000	0,3
basalto	1	3	10 000	0,28
gabbro	0,05	0,15	800	0,33
granito	4	25	40 000	0,25
pegmatite	10-100			
scisto	3	11	27 000	0,35
ultrabasiche	0,001	0,004	30	0,26

Esempio: La catena di decadimento dell'uranio ^{238}U

L'isotopo più abbondante dell'uranio, ^{238}U , decade attraverso una serie di decadimenti α e β , che può essere riassunta come:



Il tempo di dimezzamento è confrontabile con l'età della Terra.

L'energia totale rilasciata nella catena è:

$$Q_{eff} = 47.7 \text{ (MeV)}$$

Questo significa una produzione di calore di:

$$H = 0.95 \times 10^{-4} \text{ (W / kg)}$$

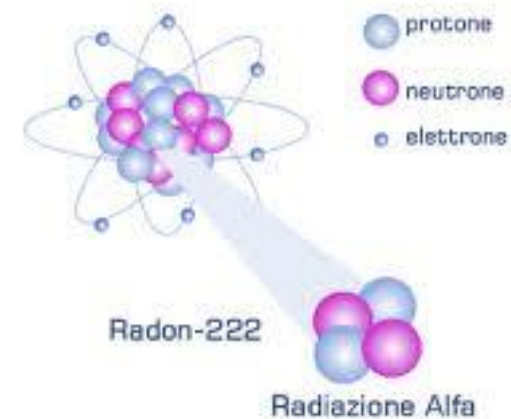
L'energia liberata nei decadimenti dell'U, Th e ^{40}K all'interno della Terra è la principale origine del calore terrestre.

Il radon

Il radon è un gas nobile radioattivo che si produce principalmente dal decadimento dell'uranio.

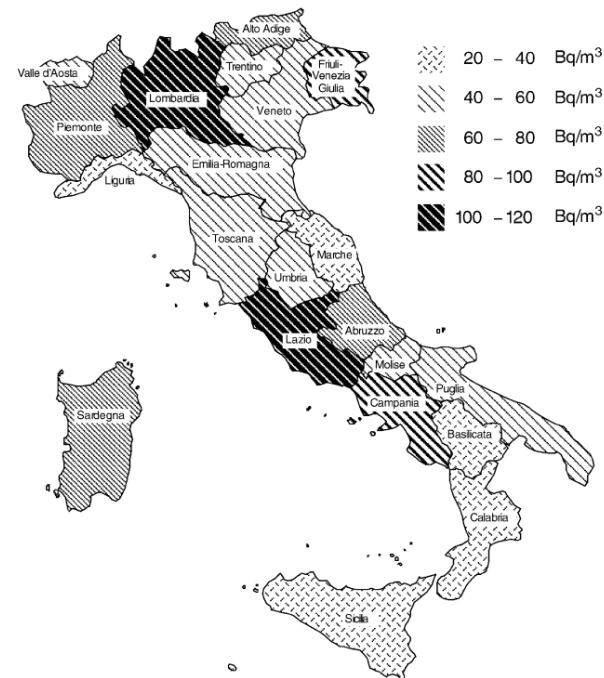
Essendo un gas nobile, non rimane intrappolato nelle rocce, ma si immette nell'aria, viene respirato e si accumula nei polmoni.

Il ^{222}Rn ha un tempo di dimezzamento di 3.8 giorni e decade emettendo particelle α , che danneggiano le cellule circostanti.



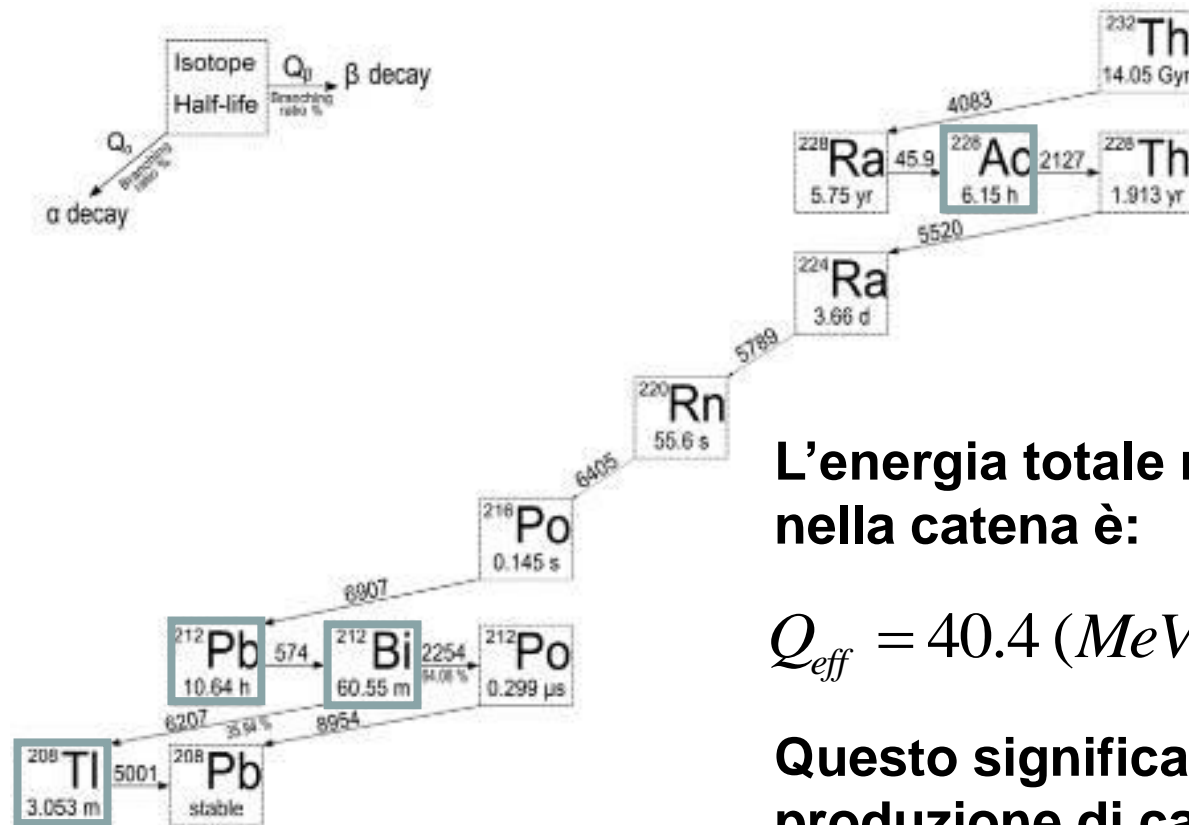
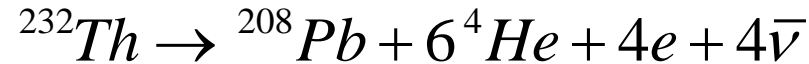
Il radon è inquadrato al secondo posto, dopo il fumo, come causa per l'insorgenza di tumori polmonari.

(foto: Radon, Ufficio federale di sanità pubblica di Berna, CH).



La catena di decadimento dell'uranio ^{232}Th

^{232}Th è l'unico isotopo di torio (100%), decade attraverso una serie di decadimenti α e β , che può essere riassunta come:



L'energia totale rilasciata nella catena è:

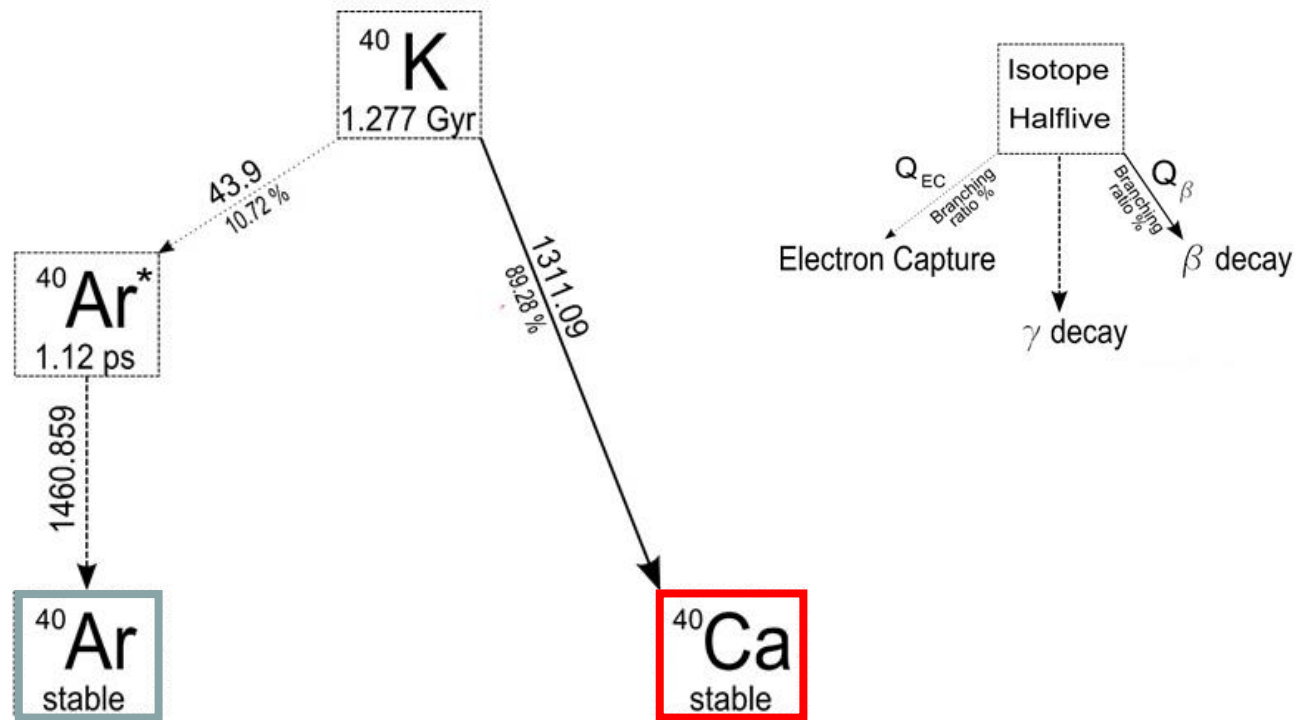
$$Q_{\text{eff}} = 40.4 \text{ (MeV)}$$

Questo significa una produzione di calore di:

$$H = 0.27 \times 10^{-4} \text{ (W / kg)} \quad 23$$

Schema di decadimenti del potassio (^{40}K)

Abbondanza isotopica naturale del ^{40}K è 0.0117%

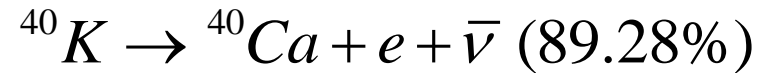


Valore Q:

$$Q_{eff} = 1.461 \text{ (MeV)}$$

Produzione di calore:

$$H = 0.65 \times 10^{-5} \text{ (W / kg)}$$



Valore Q:

$$Q_{eff} = 0.590 \text{ (MeV)}$$

Produzione di calore:

$$H = 0.22 \times 10^{-4} \text{ (W / kg)}$$

La radiazione interna del corpo umano

Alcuni elementi costituenti del corpo umano, principalmente potassio e carbonio hanno dei isotopi radioattivi come K^{40} and C^{14} .



Nel corpo di un uomo ($m = 100\text{kg}$) ci sono circa 200 g di Potassio e 18 kg di Carbonio.

Sapendo che l'abbondanza relativa del ^{40}K e' di circa 10^{-4} , si ricava che ci ci sono 0.02 g di ^{40}K .

Su questa base si puo' calcolare l'attività de potassio presente nel corpo umano.

$$M_{^{40}\text{K}} = 39.098 \text{ (g / mol)}$$

$$t_{1/2}(^{40}\text{K}) = 1.28 \times 10^9 \text{ (anni)}$$

$$N_A = 6.02 \cdot 10^{23} \text{ (atomi / mol)}$$



Esercizi:

Esercizio 1: Si consideri una sorgente da 1 mCi che produca particelle α con energia di 1 MeV. Quanto è il calore prodotto da tale sorgente?

Esercizio 2: La Terra emana, oltre al calore fornito dal sole, una quantità aggiuntiva di calore, detto calore terrestre, di circa 40 TW. Se questo calore fosse interamente ai decadimenti dell' ^{238}U , quale dovrebbe essere la massa di uranio contenuta all'interno della Terra?

Esercizio 3: Calcolare l'attività del ^{14}C all'interno del corpo umano.

$$M_{^{14}\text{C}} = 14.003 \text{ (g / mol)}$$

$$t_{1/2}(^{14}\text{C}) = 5730 \text{ (anni)}$$

$$N_A = 6.02 \cdot 10^{23} \text{ (atomi / mol)}$$