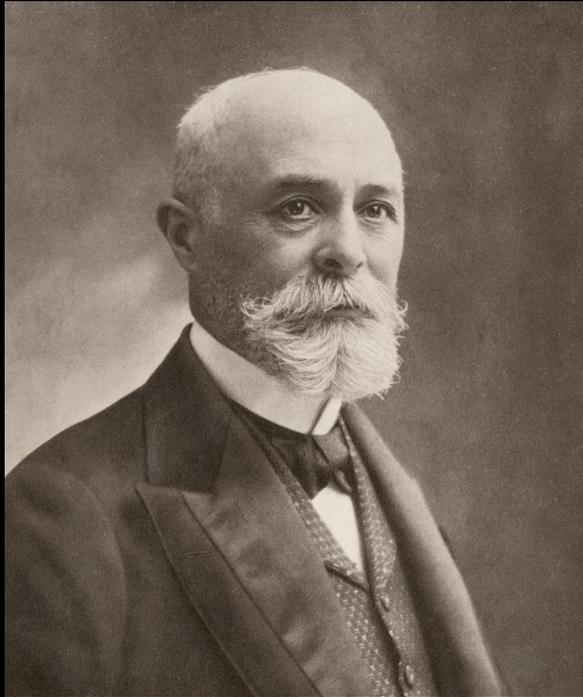


Alfa, Beta, Gamma: alla scoperta della radioattività

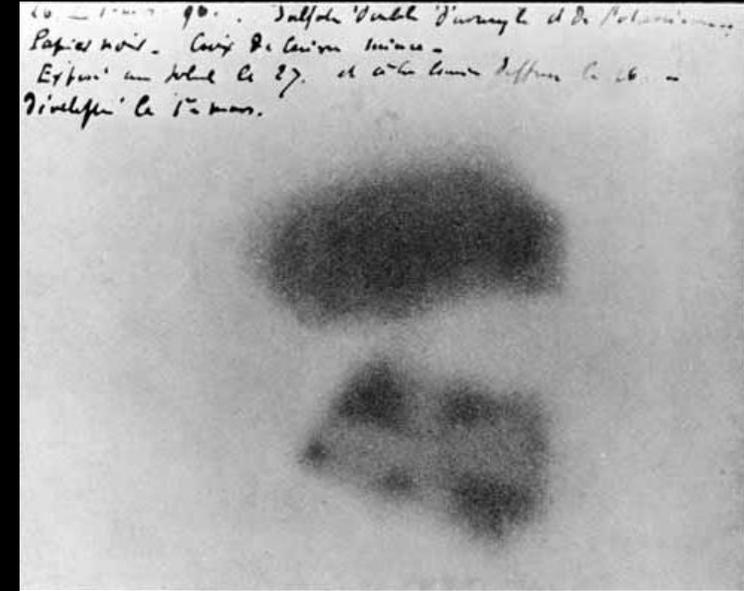
LNF - Incontri di Fisica
Danilo Domenici

Storia,
classificazione
e
definizioni

La rivoluzione a fine '800



1896 – Henri Bequerel studiando la fluorescenza nei sali d'uranio scopre la radioattività naturale



1898 – Marie e Pierre Curie scoprono gli elementi radioattivi del radio e del polonio



Classificazione di Rutherford

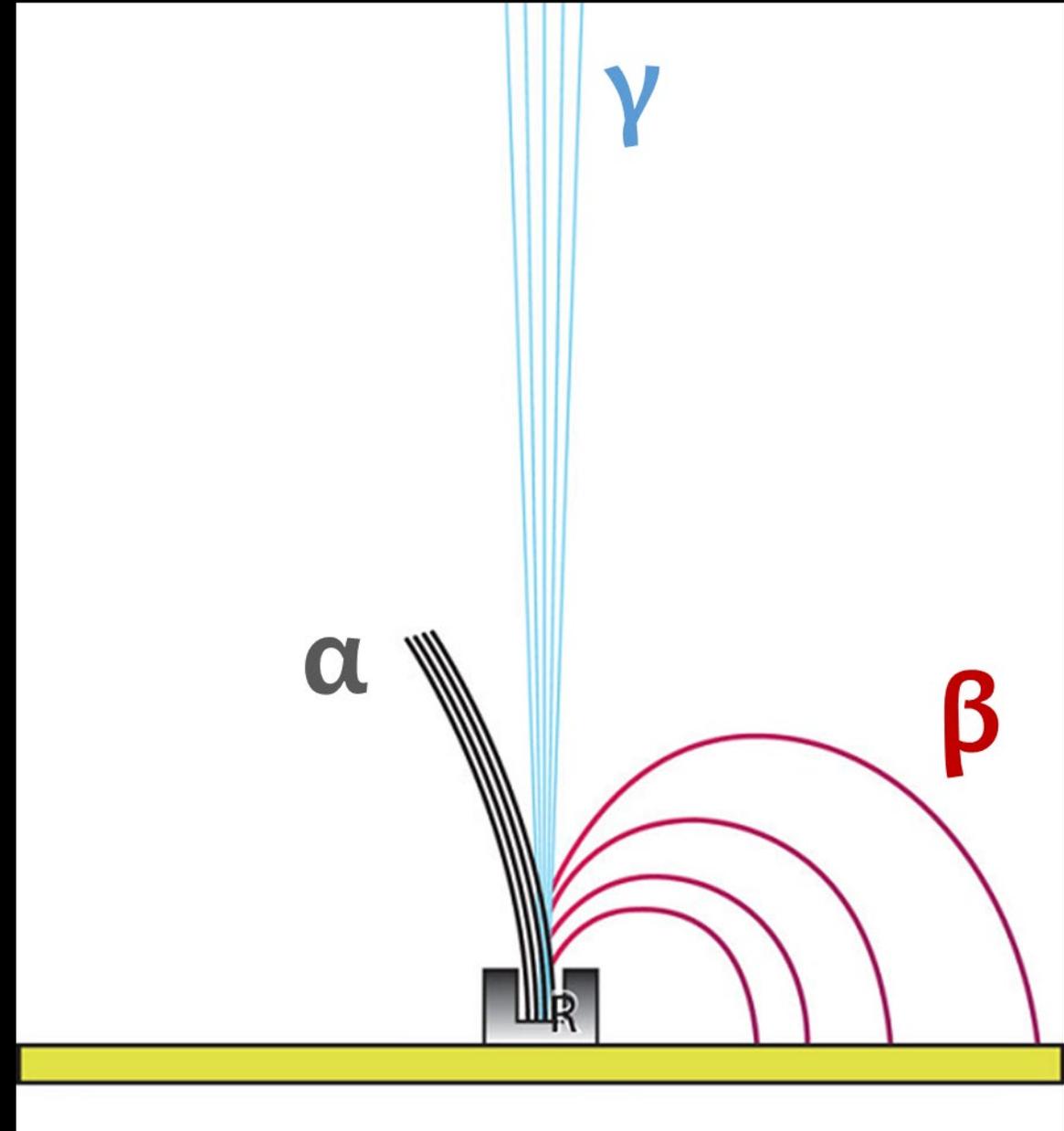
comportamento della radiazione in
campo magnetico

$$r = \frac{mv}{qB}$$

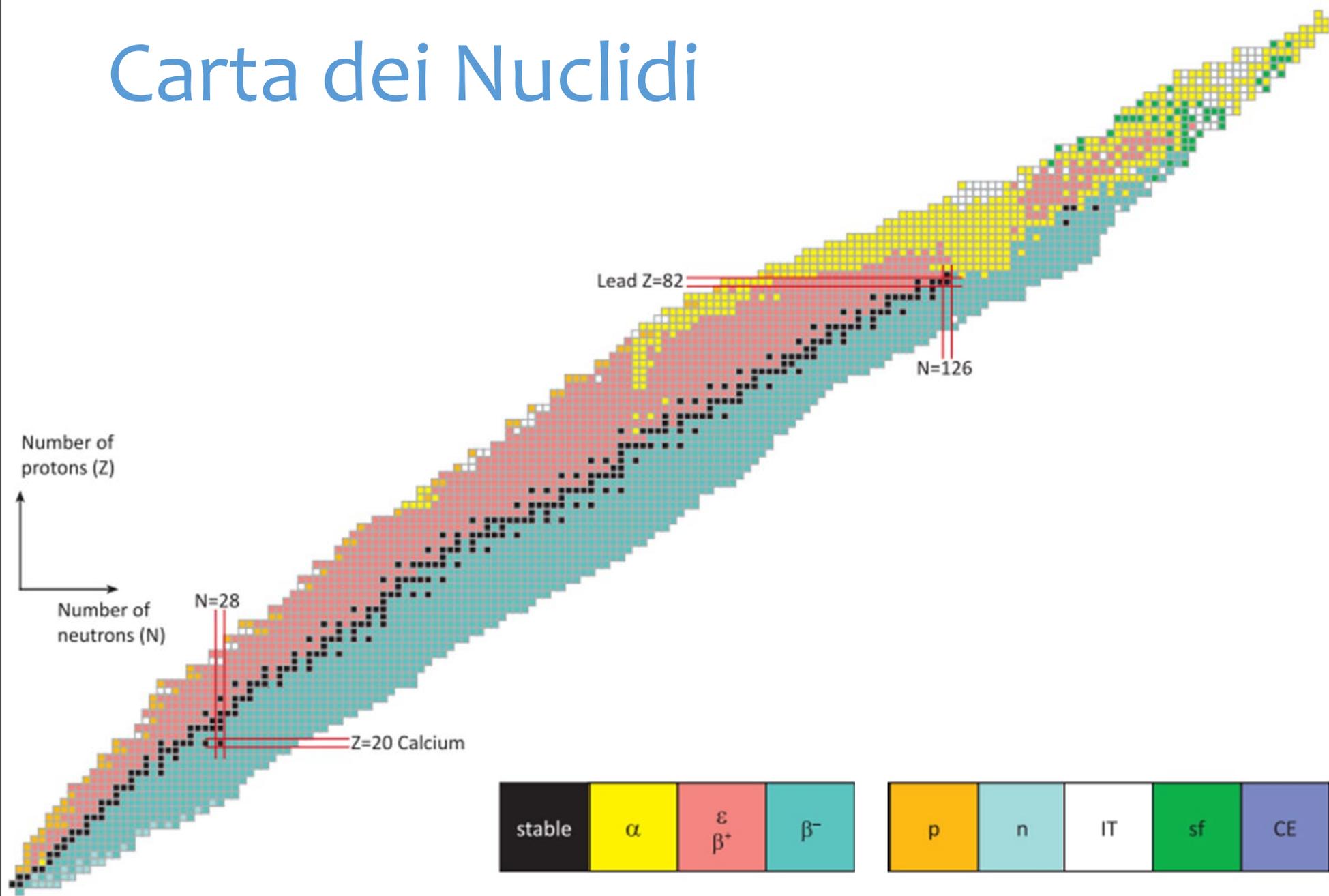
carica positiva, alto impulso
raggi alfa

carica negativa, basso impulso
raggi beta

carica neutra
raggi gamma

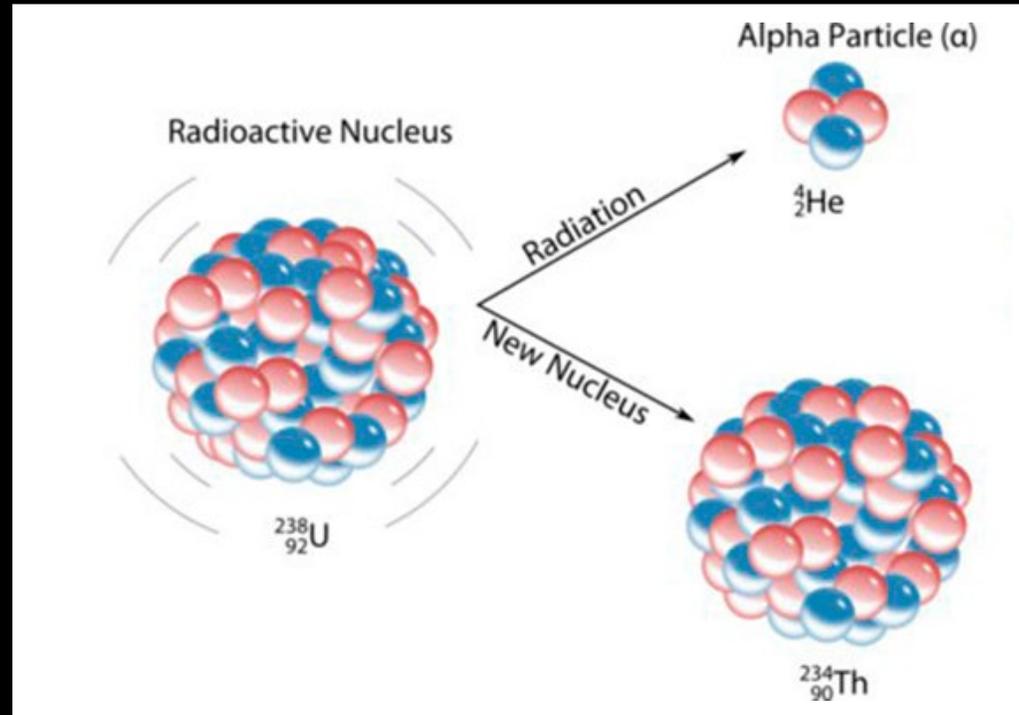


Carta dei Nuclidi



Decadimento alfa

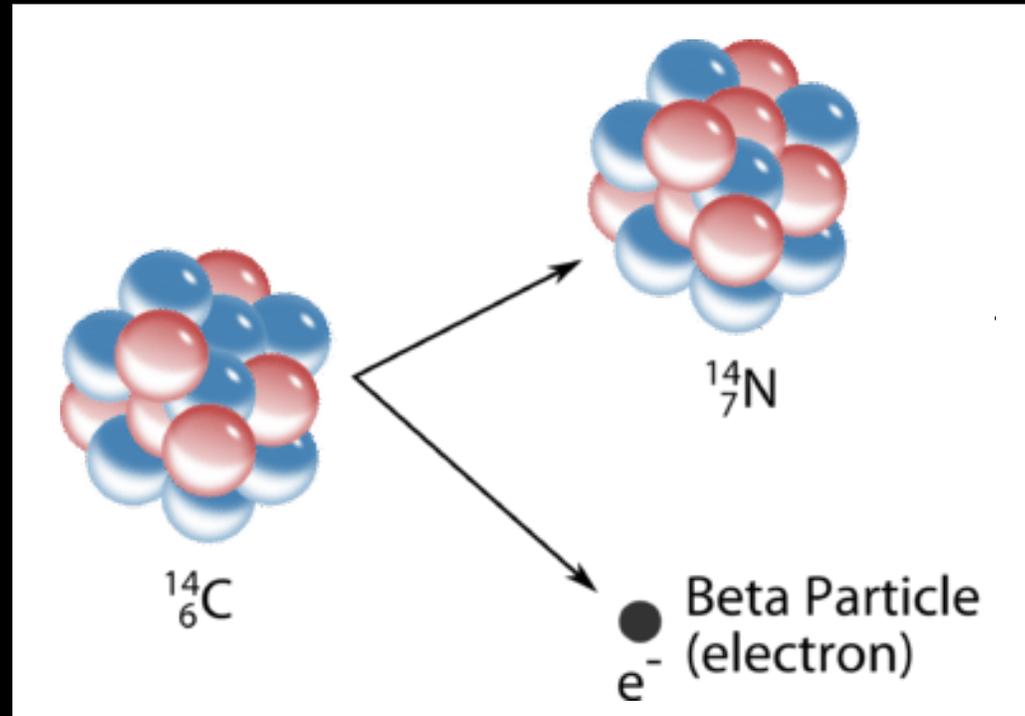
una particella alfa (2 protoni + 2 neutroni)
viene emessa dal nucleo



il numero atomico diminuisce di 2
il numero di massa diminuisce di 4
 $(Z,A) \rightarrow (Z-2,A-4)$

Decadimento beta

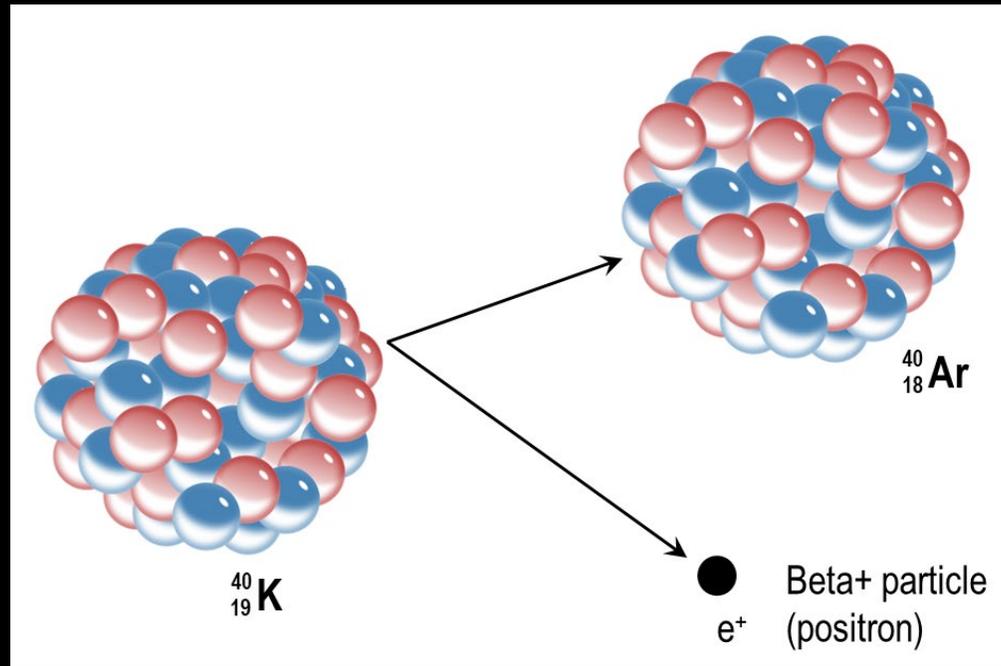
un neutrone si trasforma in un protone rimanendo nel nucleo vengono emessi un elettrone (particella β^-) e un anti-neutrino



il numero atomico aumenta di 1
il numero di massa non cambia
 $(Z,A) \rightarrow (Z+1,A)$

Decadimento beta +

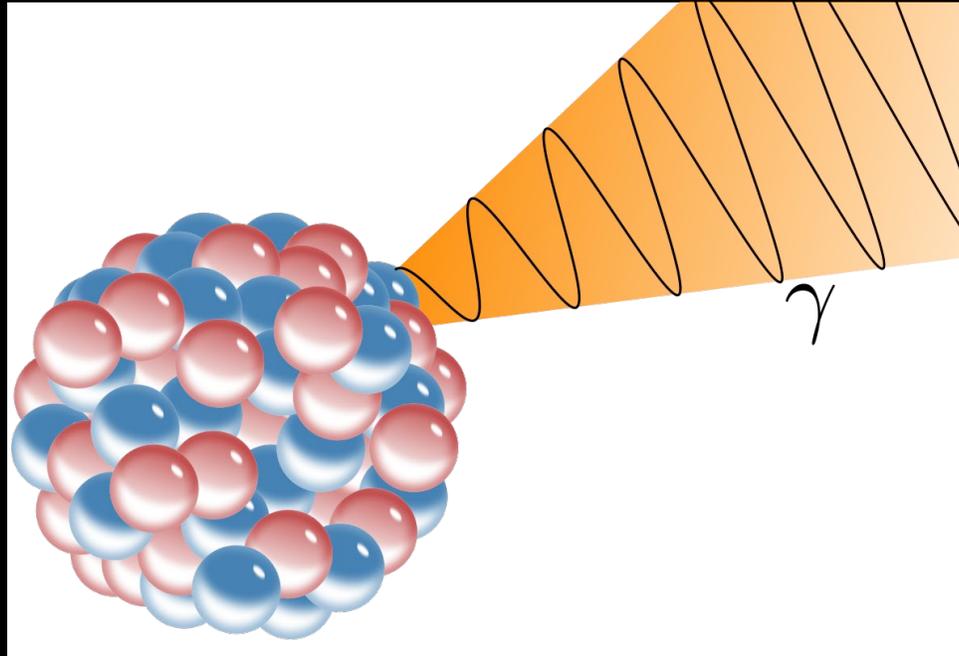
un protone si trasforma in un neutrone rimanendo nel nucleo
vengono emessi un positrone (particella β^+) e un neutrino



il numero atomico diminuisce di 1
il numero di massa non cambia
 $(Z,A) \rightarrow (Z-1,A)$

Decadimento gamma

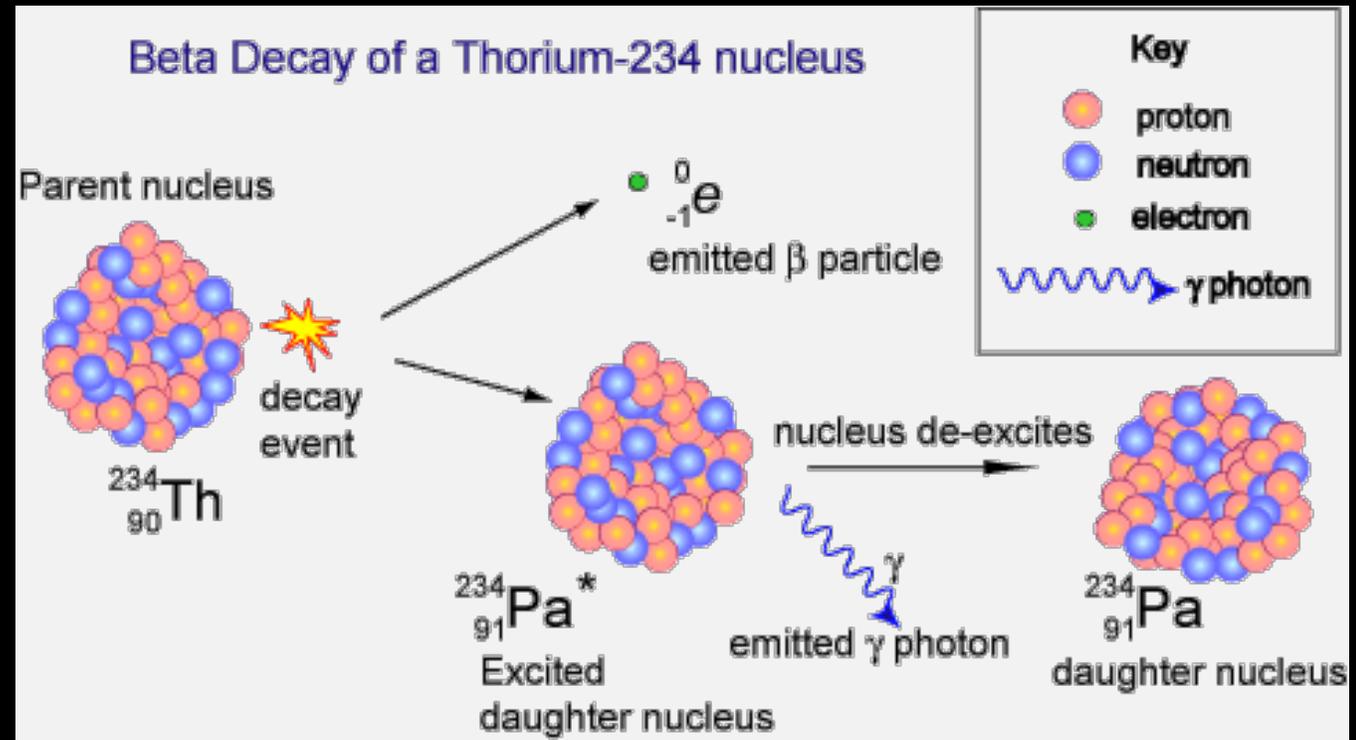
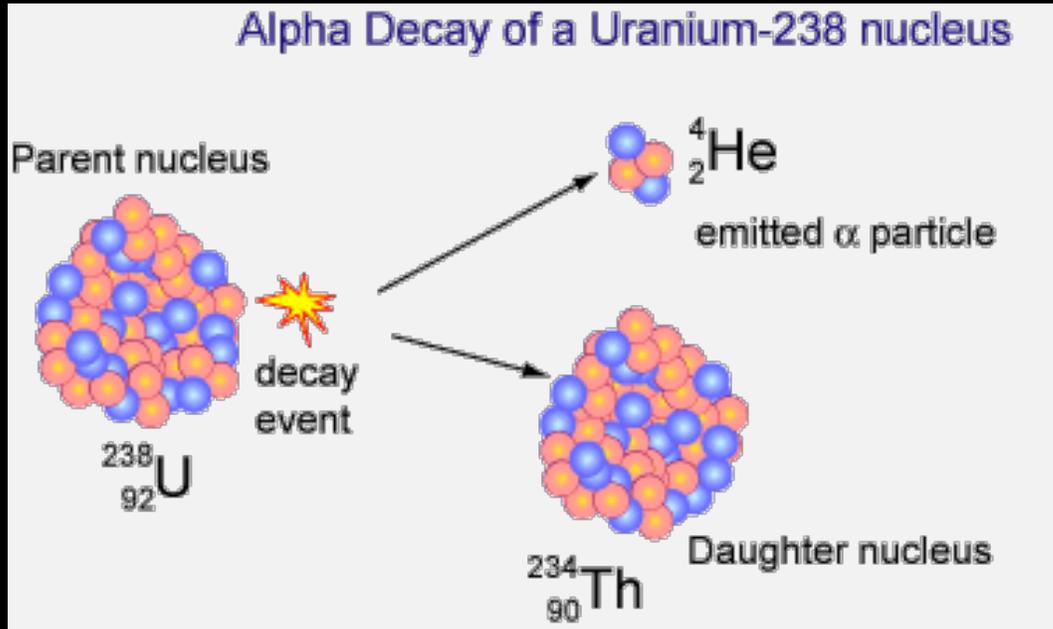
un nucleo in uno stato eccitato emette un fotone di alta energia e passa ad un livello energetico più basso



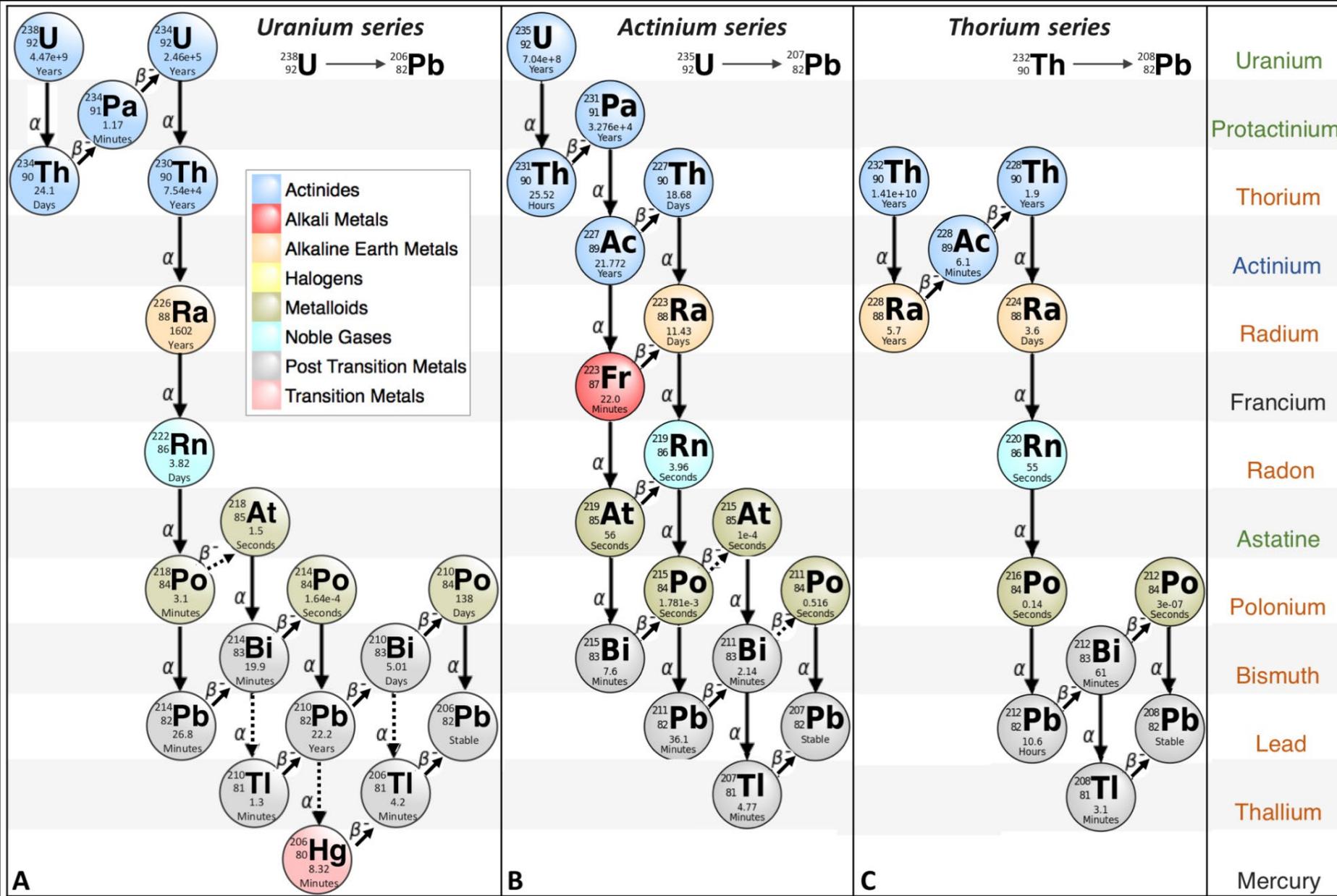
il numero atomico non cambia
il numero di massa non cambia
 $(Z,A) \rightarrow (Z,A)$

Catena radioattiva

spesso i 3 decadimenti avvengono in successione



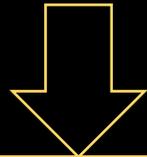
Catene di decadimento



Tempo di decadimento e emivita

il numero di decadimenti nell'unità di tempo è proporzionale al numero di radionuclidi

$$A(t) = \frac{dN}{dt} = -\lambda N$$



$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \quad \int \frac{dN}{N} = -\lambda \int dt$$

$$\ln \frac{N(t)}{N_0} = -\lambda t$$

$$N(t) = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

τ è la «vita media» del radionuclide

$$N(\tau) = \frac{N_0}{e} \cong 0.36 \cdot N_0$$

$$N\left(\frac{t_1}{2}\right) = 0.5 \cdot N_0$$

$t_{\frac{1}{2}}$ è l'«emivita» o «tempo di dimezzamento»

Attività della sorgente radioattiva



l'unità di misura dell'attività nel
Sistema Internazionale è
il Bequerel (Bq)

$$1Bq = \frac{1 \text{ decadimento}}{s}$$

il Curie (Ci) è l'attività di 1 g di ^{226}Ra

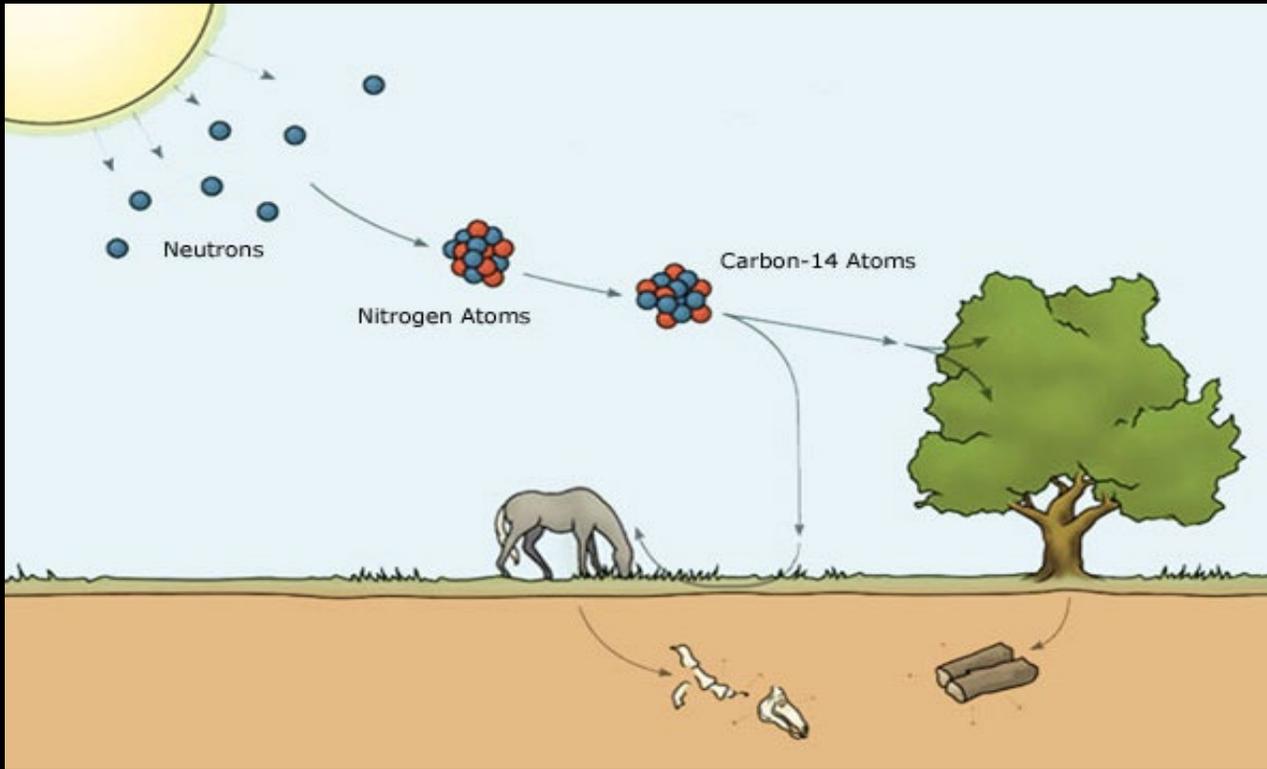
$$1Ci = 37GBq$$

$$\frac{N(t)}{N_0} = e^{-\frac{t}{\tau}} = e^{-\frac{4}{30.1}} = 0.79$$

$$A(2016) = 0.25 \mu Ci$$

$$A(2023) = 0.25 \mu Ci \times 0.79 = 0.20 \mu Ci$$

Datazione al radiocarbonio



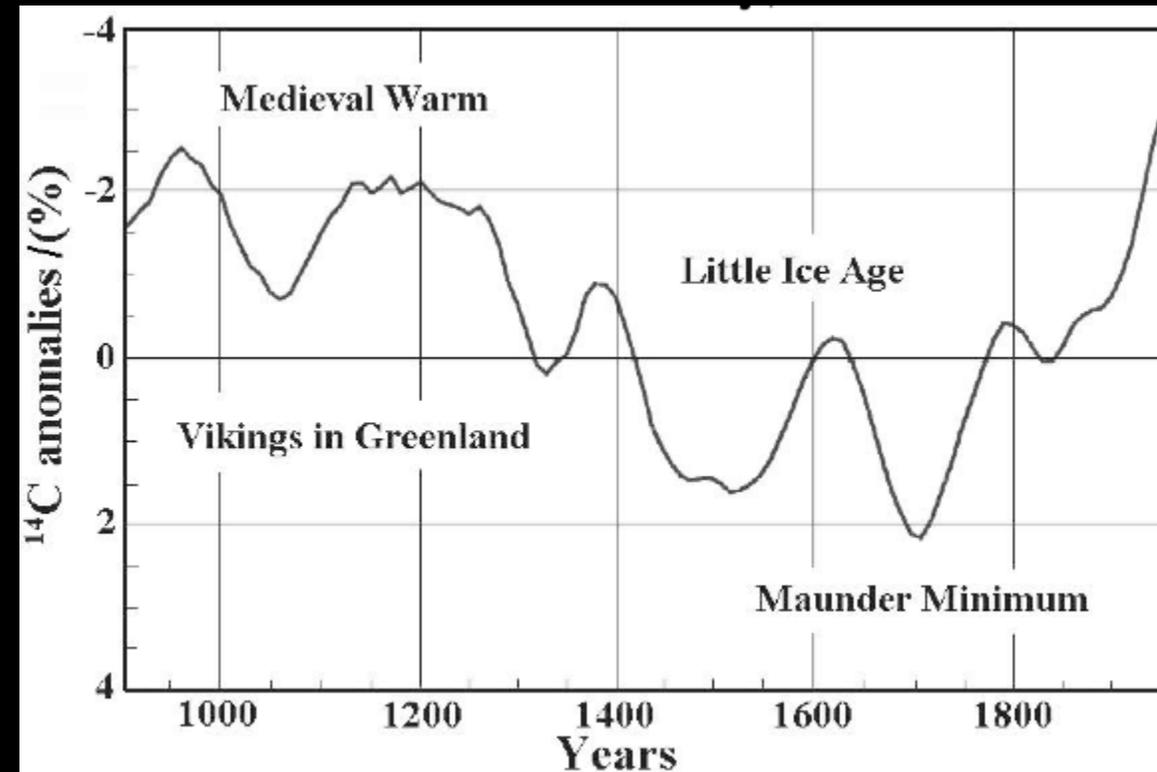
^{14}N atmosferico si trasforma in ^{14}C dopo urto con neutroni prodotti dai raggi cosmici

^{14}C che si combina con O_2 e forma CO_2 che entra nel ciclo vitale

il ^{14}C decade β^+ in ^{14}N con vita media 5730 anni

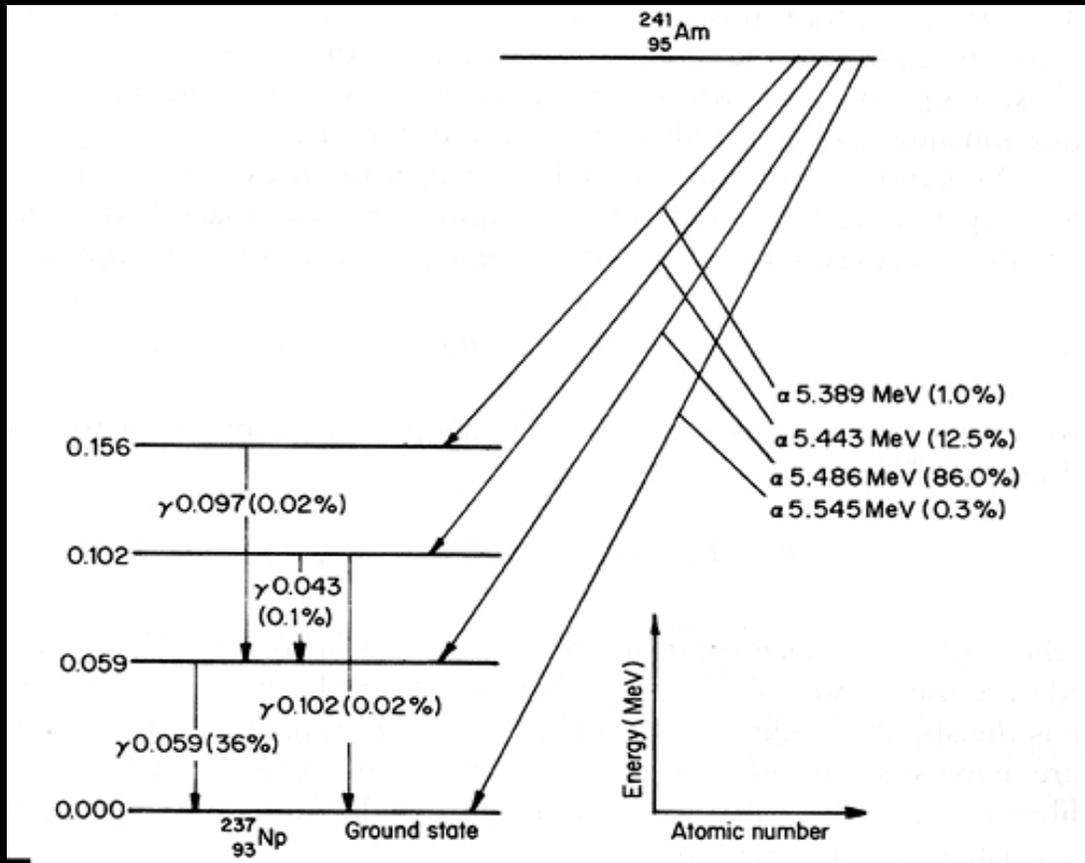
metodo inventato negli anni '40 dal chimico Libby (Nobel 1960)

bisogna conoscere la concentrazione di ^{14}C nell'atmosfera nel corso dei secoli



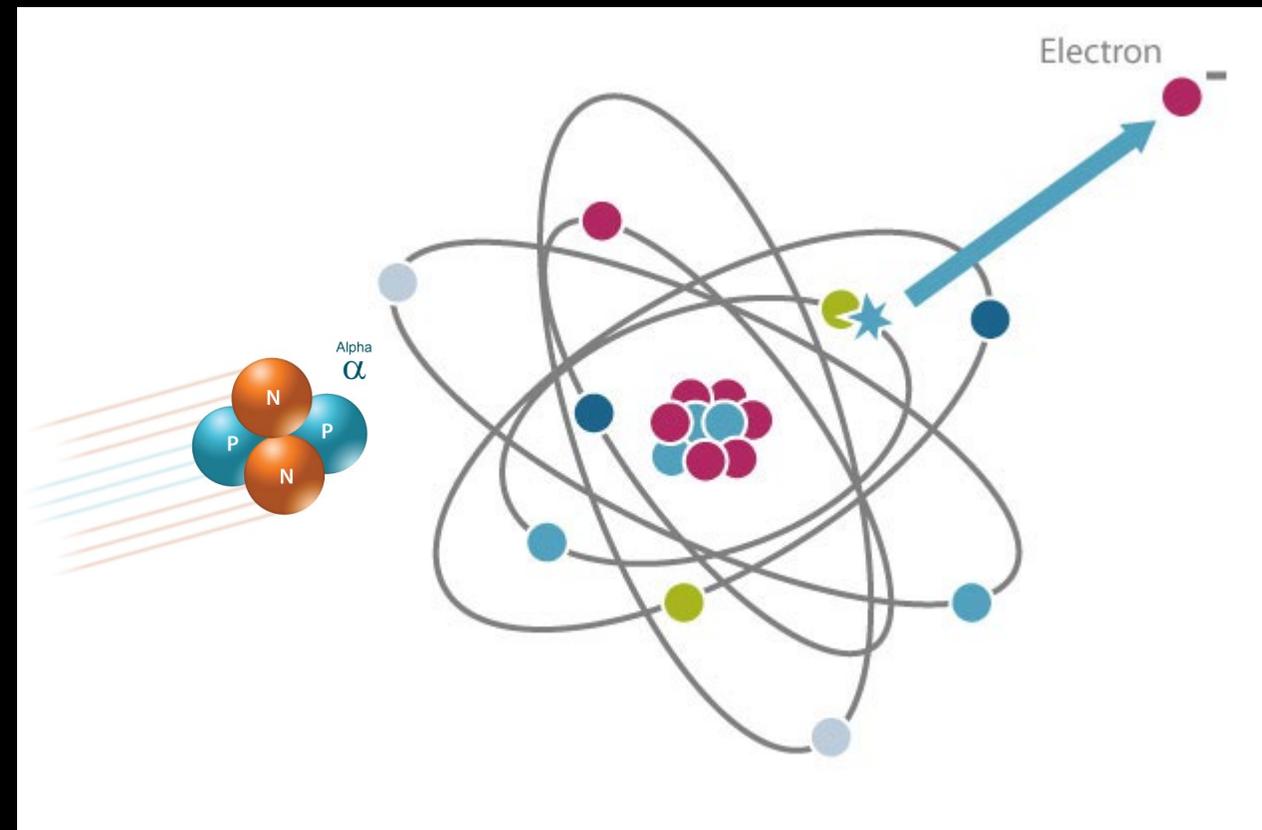
Rivelazione
e
applicazioni

Decadimenti alfa nella materia



le particelle α vengono emesse a una **energia caratteristica**

interagiscono nella materia attraverso la **ionizzazione atomica**



hanno **alto potere ionizzante** e quindi **piccolo range**

una alfa da pochi MeV percorre **pochi cm in aria** e viene fermata da un foglio di carta o dalla pelle

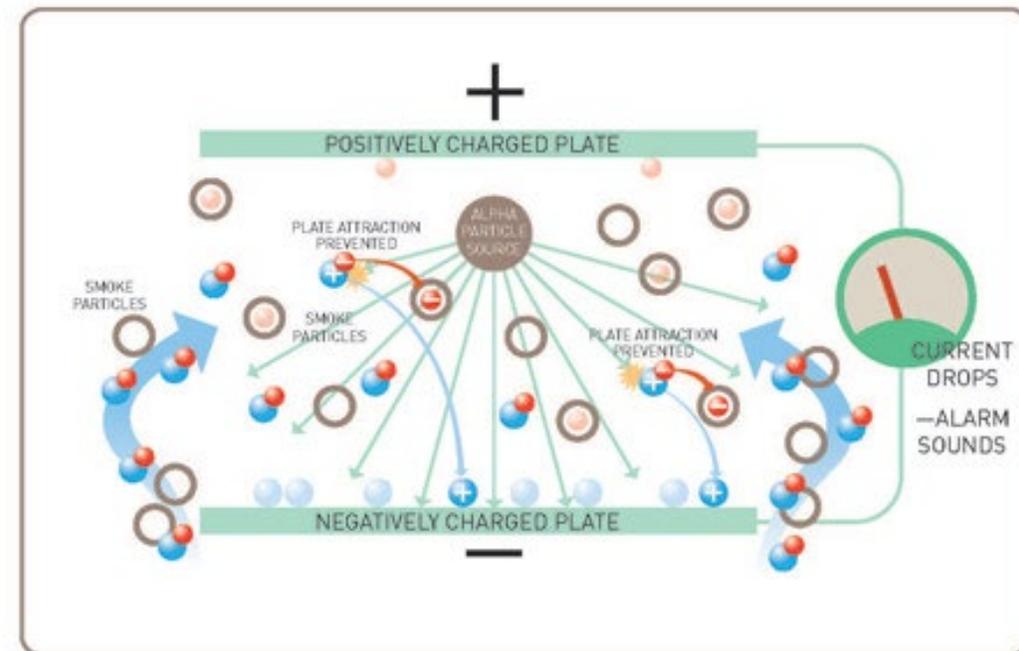
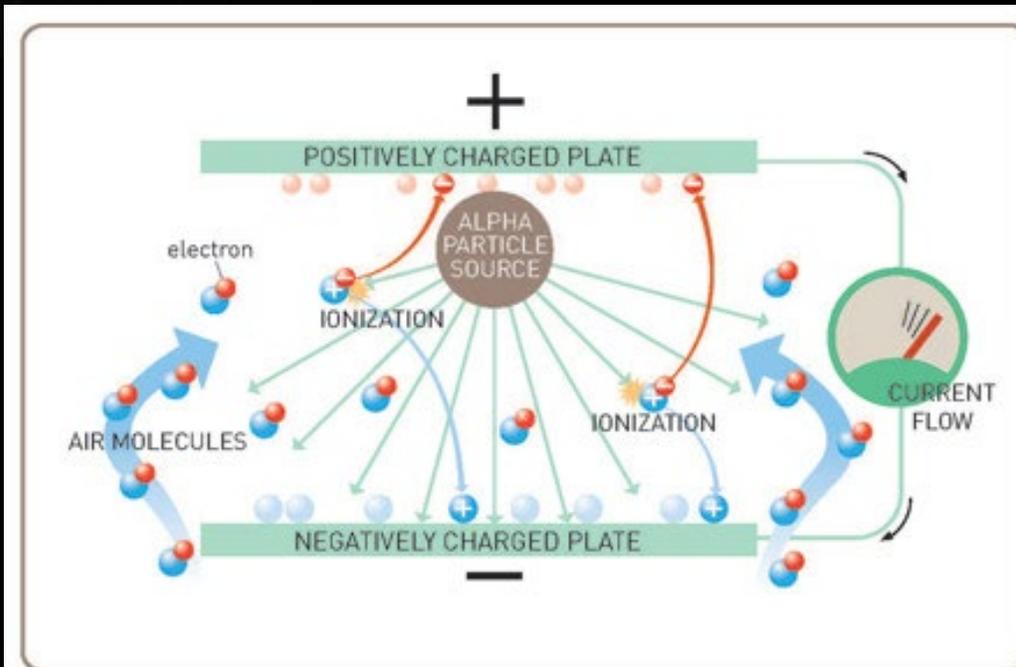
Rivelatori di fumo

contengono una piccola sorgente di Americio-241

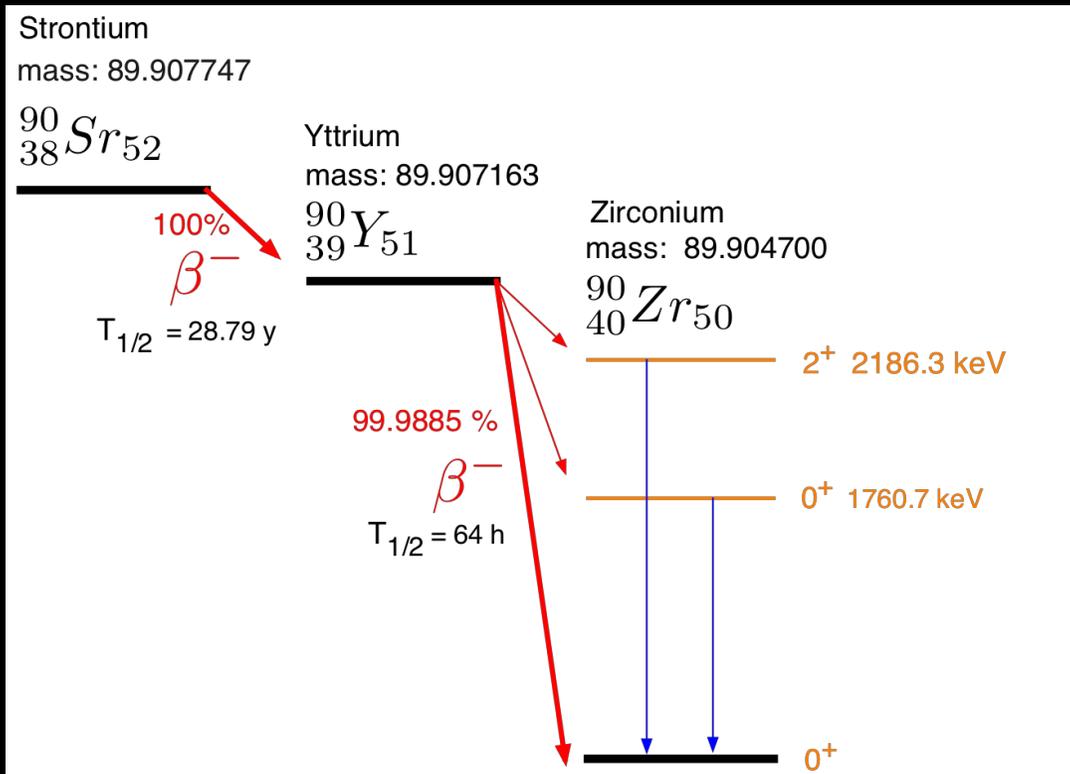


le alfa ionizzano l'aria
nel condensatore scorre corrente

le particelle di fumo intrappolano
gli elettroni liberi
la corrente diminuisce e suona l'allarme



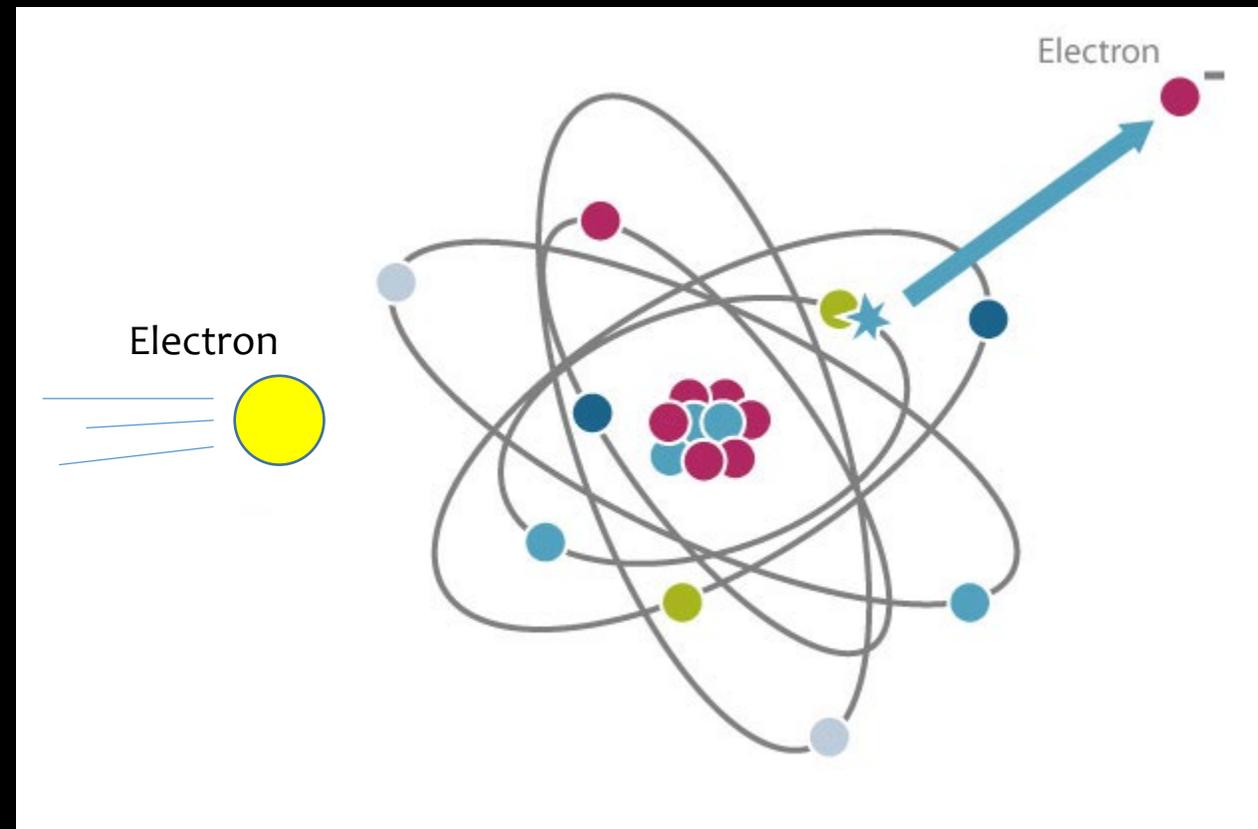
Decadimenti beta- nella materia



gli elettroni (di pochi MeV) interagiscono nella materia attraverso la **ionizzazione atomica**

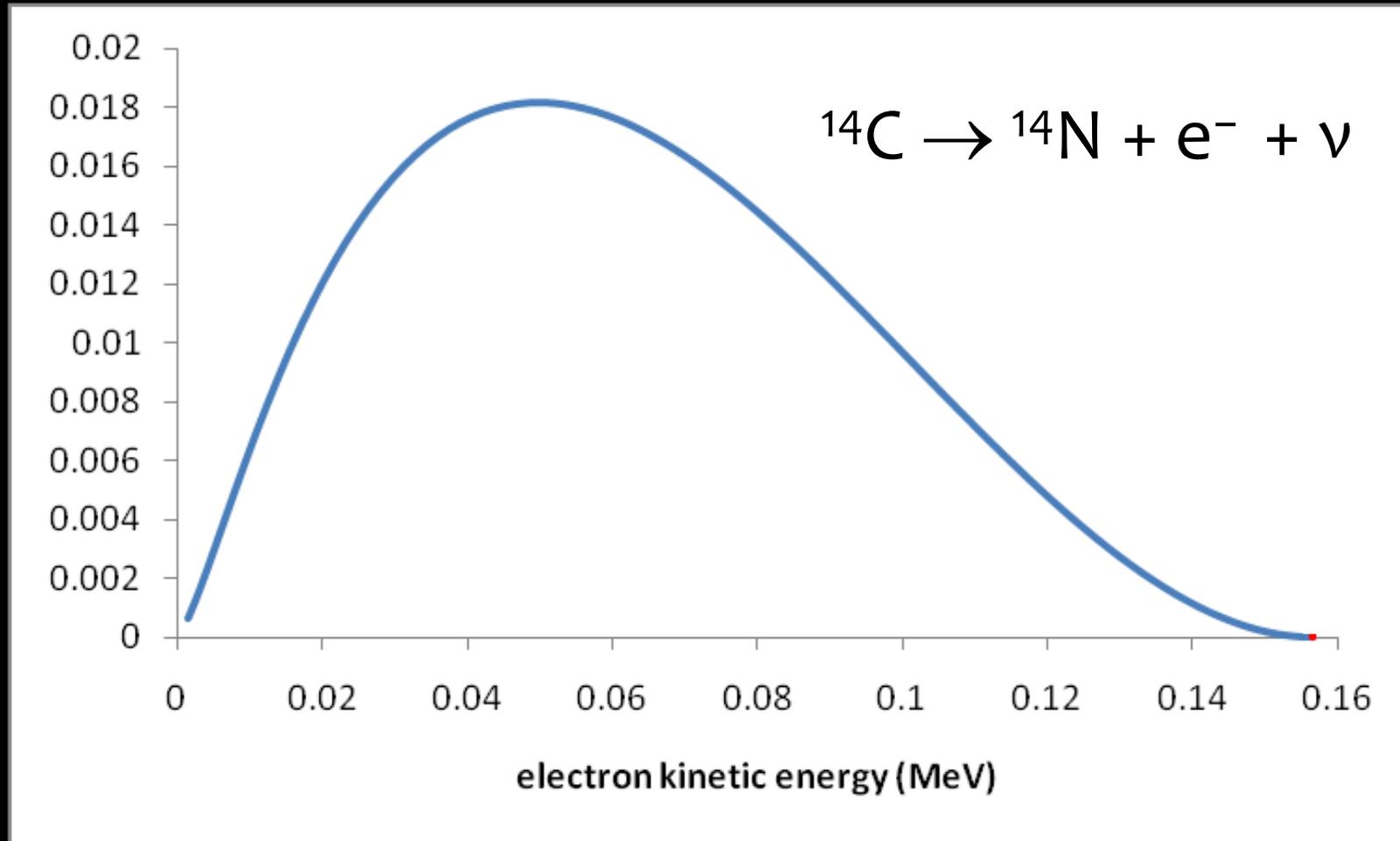
hanno **basso potere ionizzante** e quindi **alto range**

un'elettrone da pochi MeV
percorre **parecchi m in aria**
e viene fermato da una lastra metallica



Lo spettro β continuo

gli elettroni β non vengono emessi a una energia caratteristica,
ma con **spettro continuo** per la presenza del **neutrino**





Pauli e l'ipotesi del neutrino

Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich kuldvollst anzuhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich angesichts der "falschen" Statistik der N- und Li-6 Kerne, sowie des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg verfallen um den "Wechselsatz" (1) der Statistik und den Energiesatz zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren, welche den Spin $1/2$ haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen müsste von derselben Grossenordnung wie die Elektronenmasse sein und jedenfalls nicht grösser als $0,01$ Protonenmasse.- Das kontinuierliche beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron konstant ist.

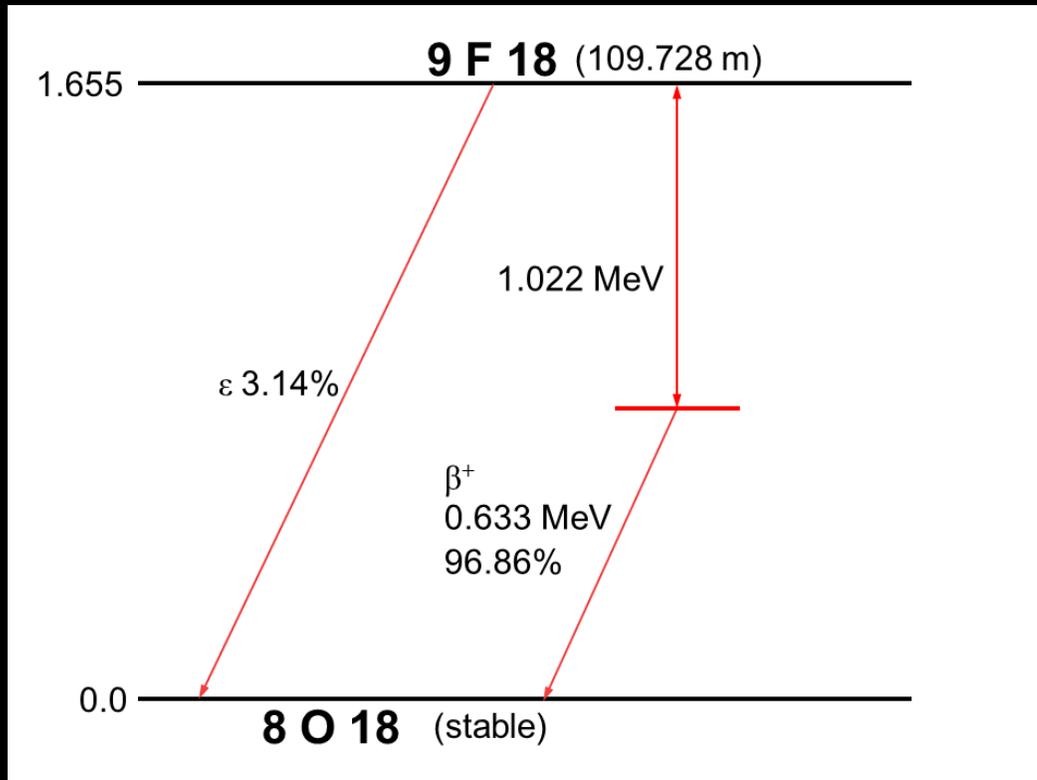
Cari Signore e Signori radioattivi,

ho trovato un rimedio disperato per salvare la conservazione dell'energia.

Cioè la possibilità che nei nuclei esistano particelle elettricamente neutre, che desidero chiamare neutroni

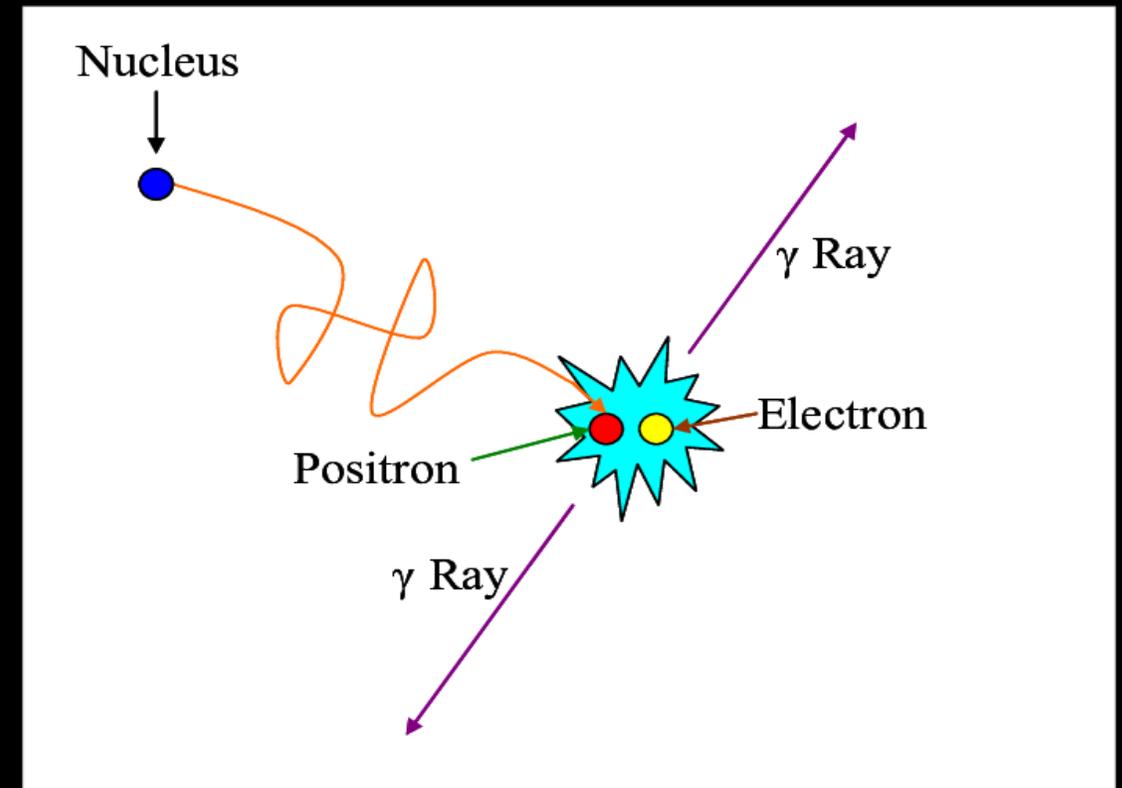
Lo spettro beta continuo diventerebbe comprensibile con l'assunzione che nel decadimento beta un neutrone è emesso insieme all'elettrone tale che la somma delle energie del neutrone e dell'elettrone è costante

Decadimenti beta+ nella materia

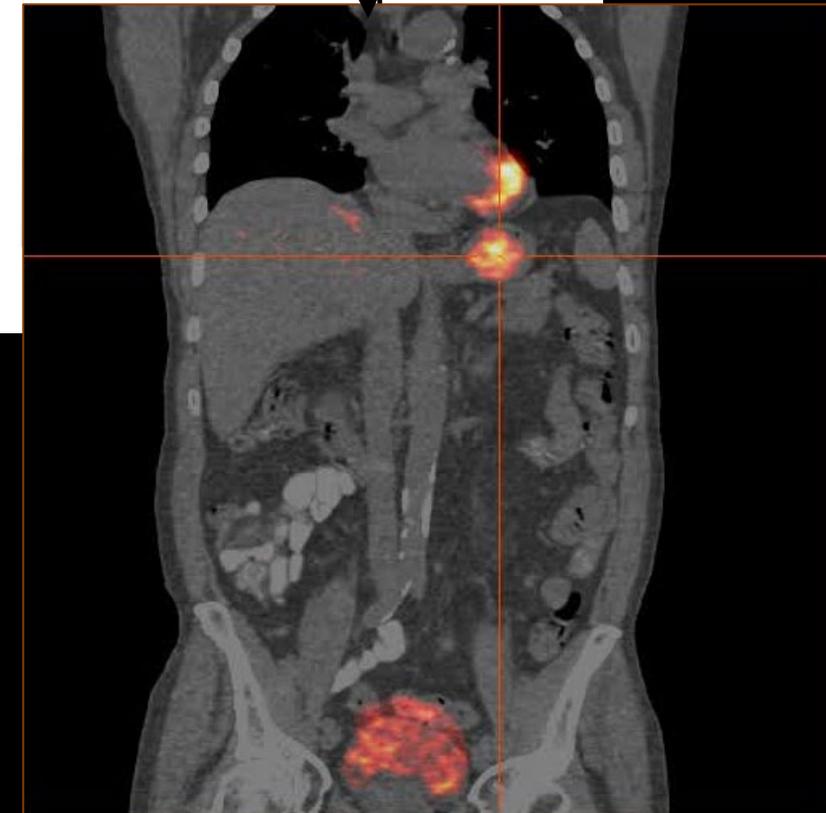
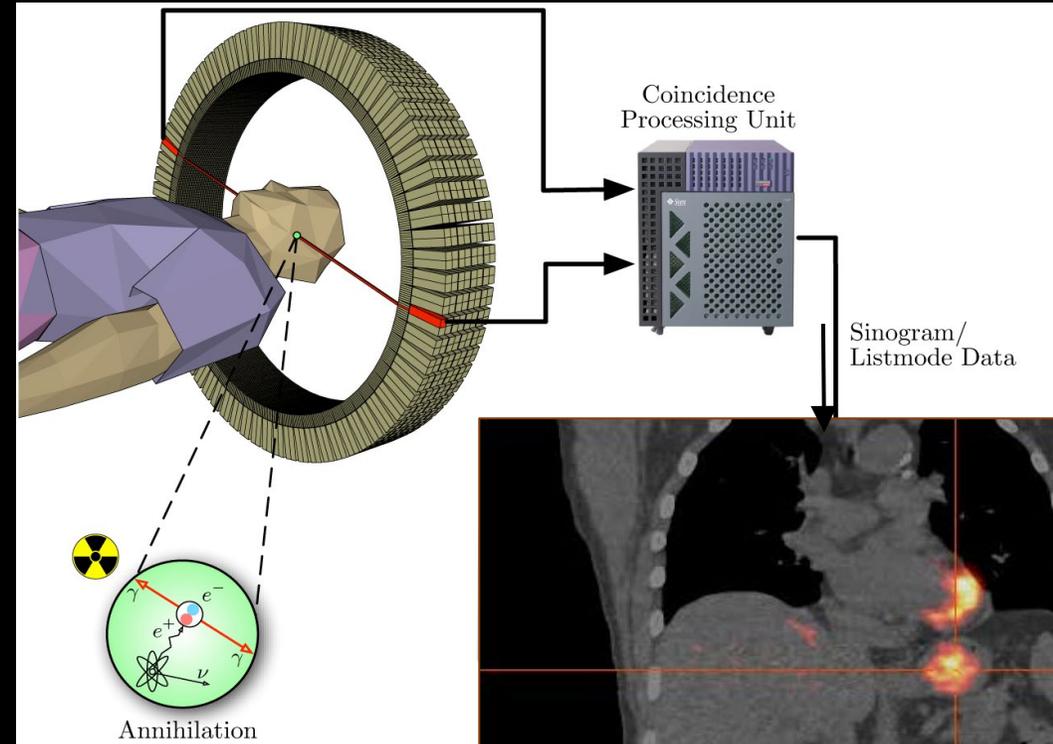


i positroni hanno un **range inferiore al mm** e poi **annichilano a riposo con un elettrone**

per conservare energia e quantità di moto
i 2 fotoni prodotti hanno
ognuno **$E = 511 \text{ keV}$** e **direzioni opposte**

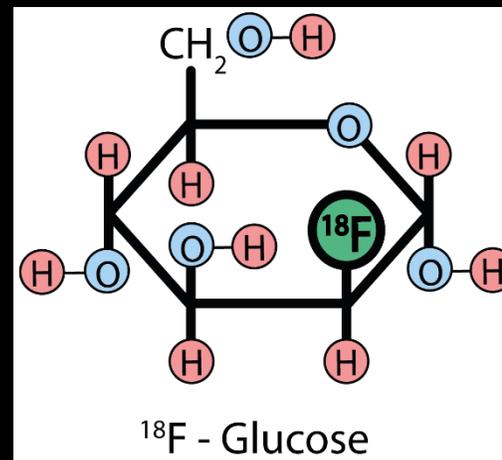


Positron Emission Tomography

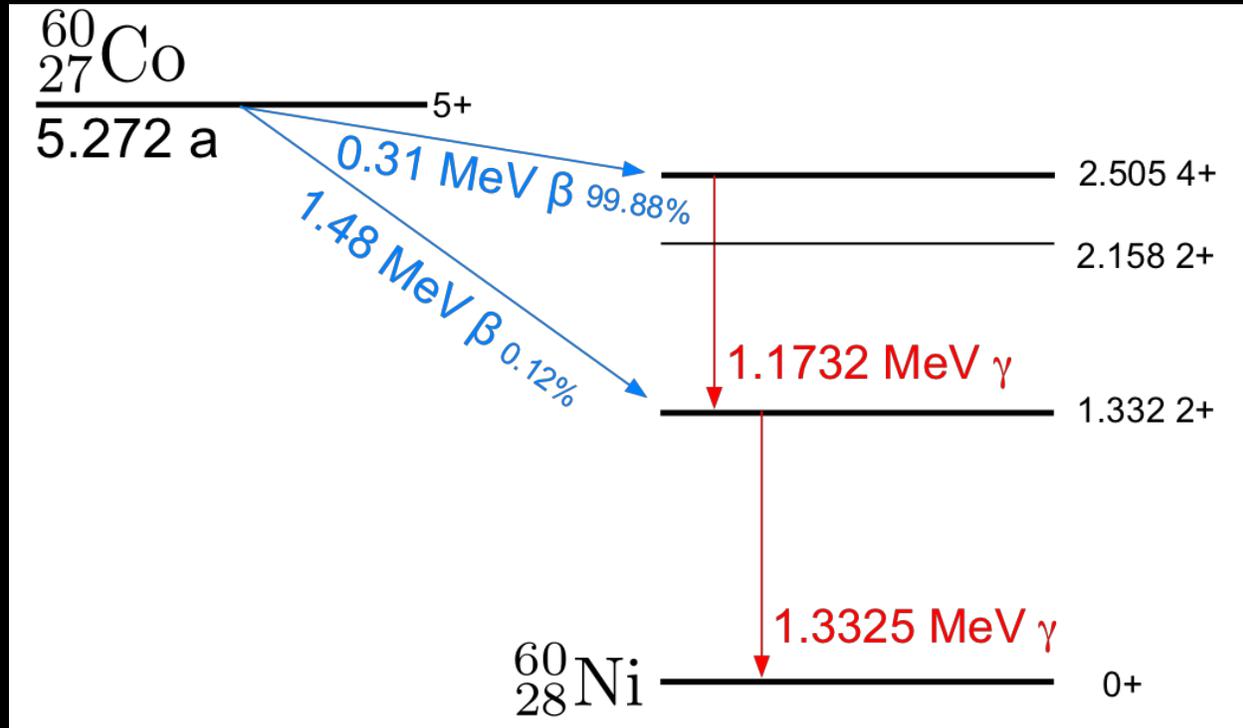
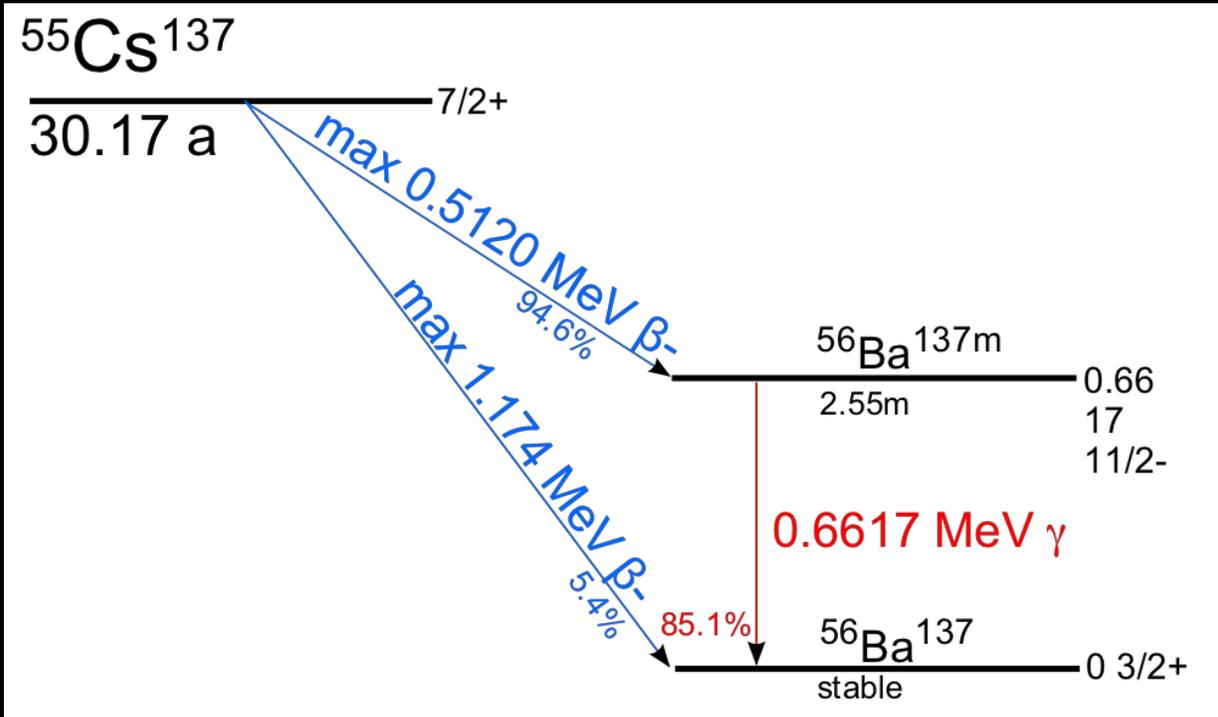


tecnica diagnostica di **Medicina Nucleare**

un radiofarmaco beta emettitore (**18-fluorodesossiglucosio**) viene iniettato nel paziente e tramite la rivelazione dei 2 fotoni emessi si ricostruisce un'immagine anatomica e funzionale



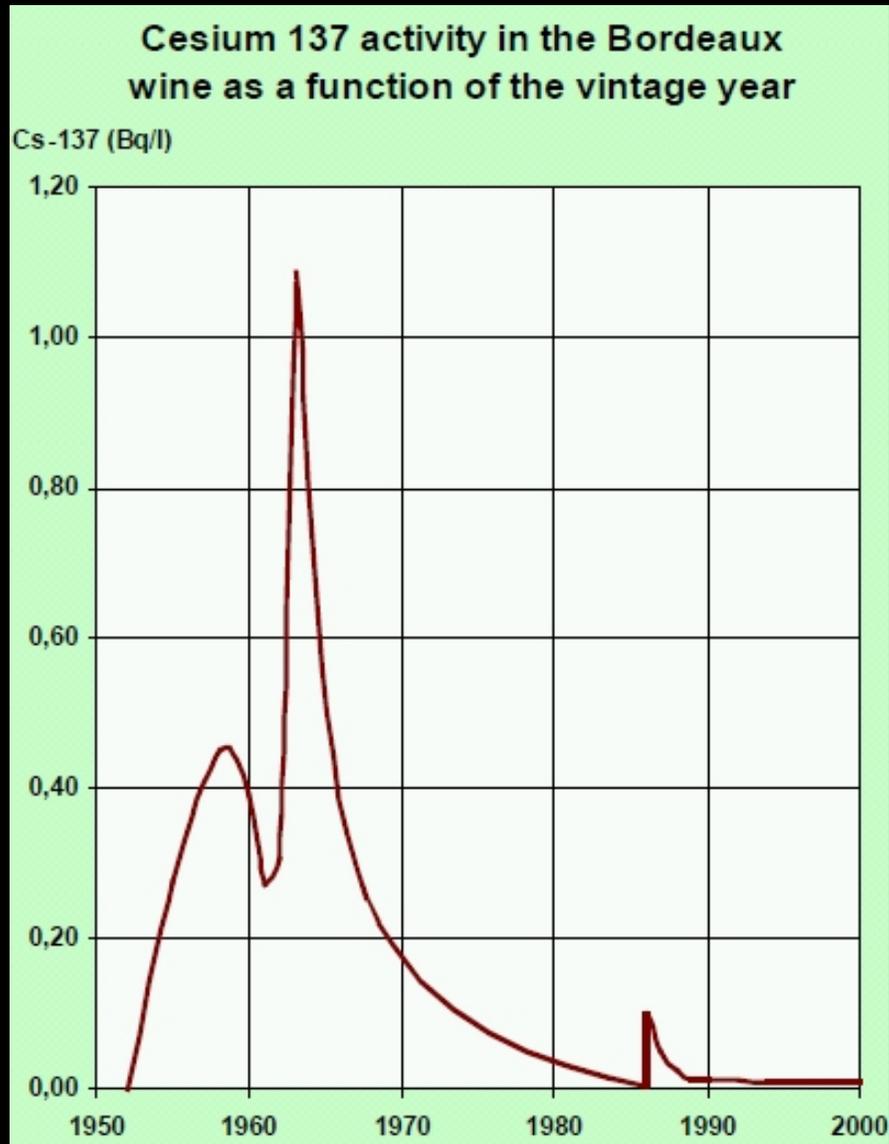
Decadimenti gamma



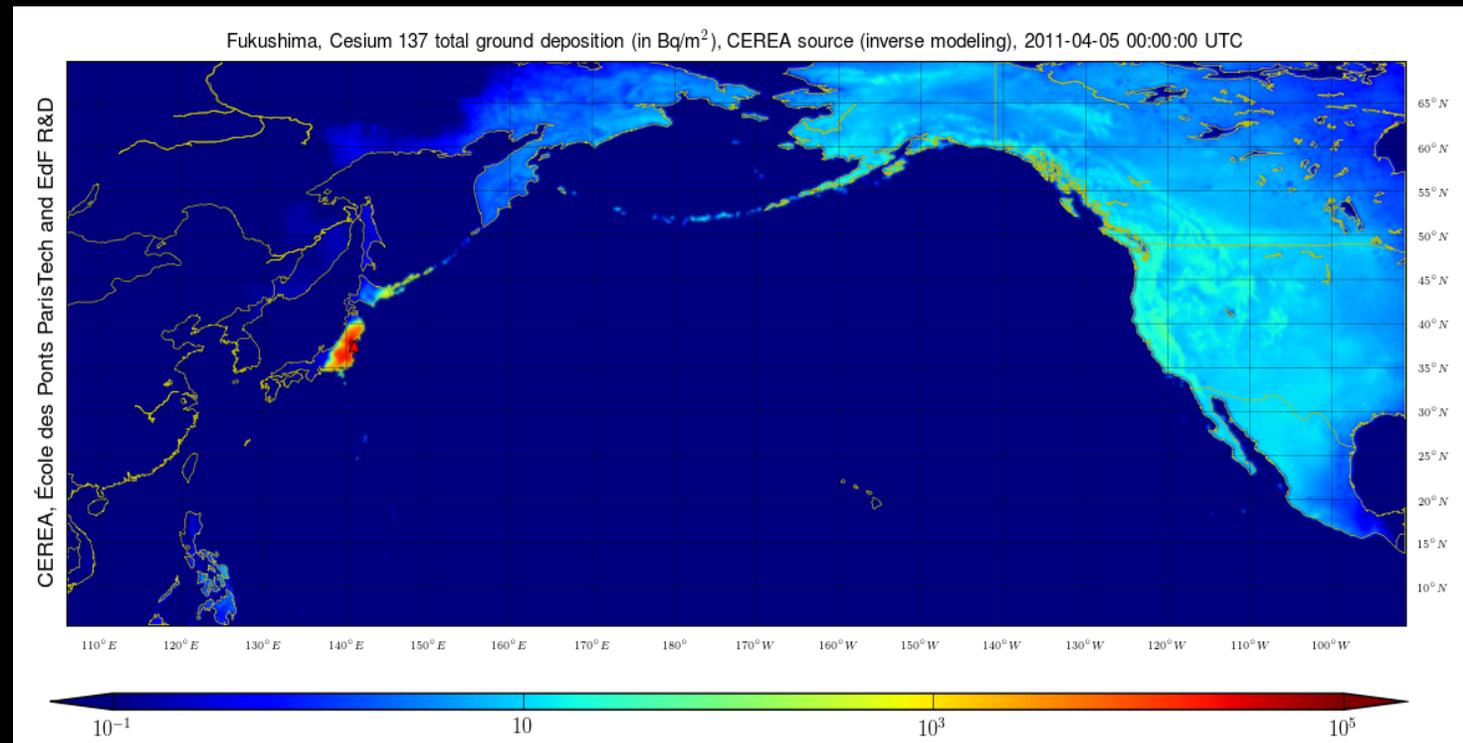
i fotoni gamma **ionizzano solo indirettamente** e hanno quindi un range di **centinaia di m in aria**

vengono fermati da spesse lastre di piombo

il Cesio-137 nell'ambiente



il ^{137}Cs è uno dei radioisotopi che si producono nei reattori nucleari o nelle esplosioni termo-nucleari



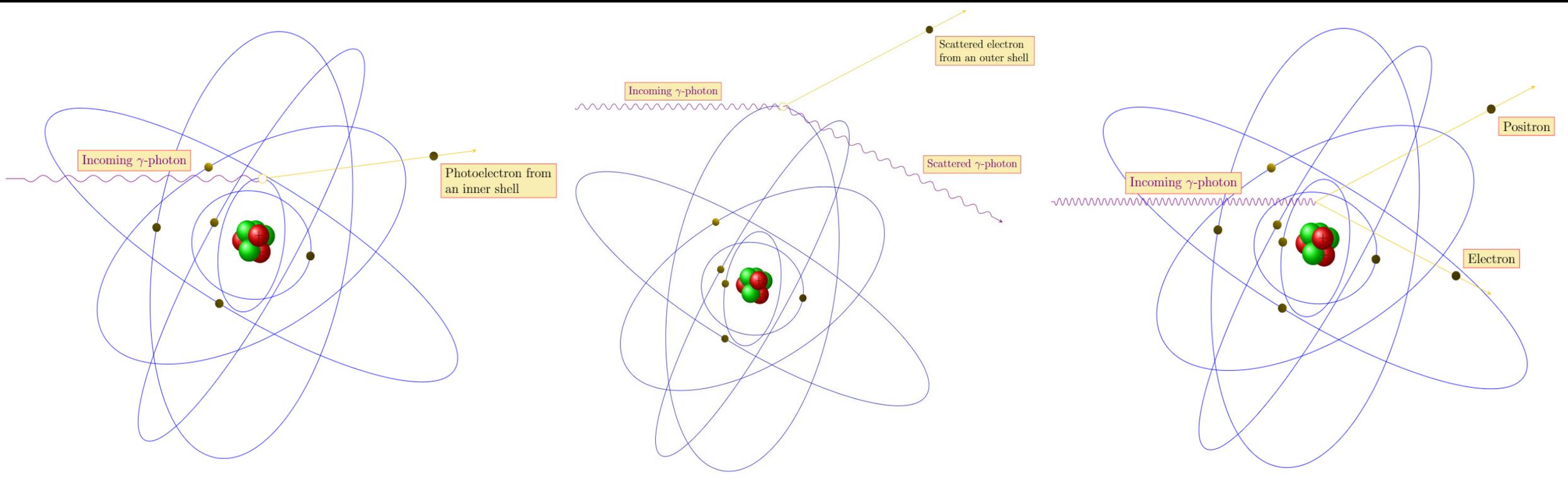
Decadimenti gamma nella materia

la radiazione gamma interagisce nella materia in 3 modi

bassa energia (< 100 keV)
effetto fotoelettrico

energia intermedia (100 keV – 1022 keV)
scattering Compton

alta energia (> 1022 keV)
produzione di coppie

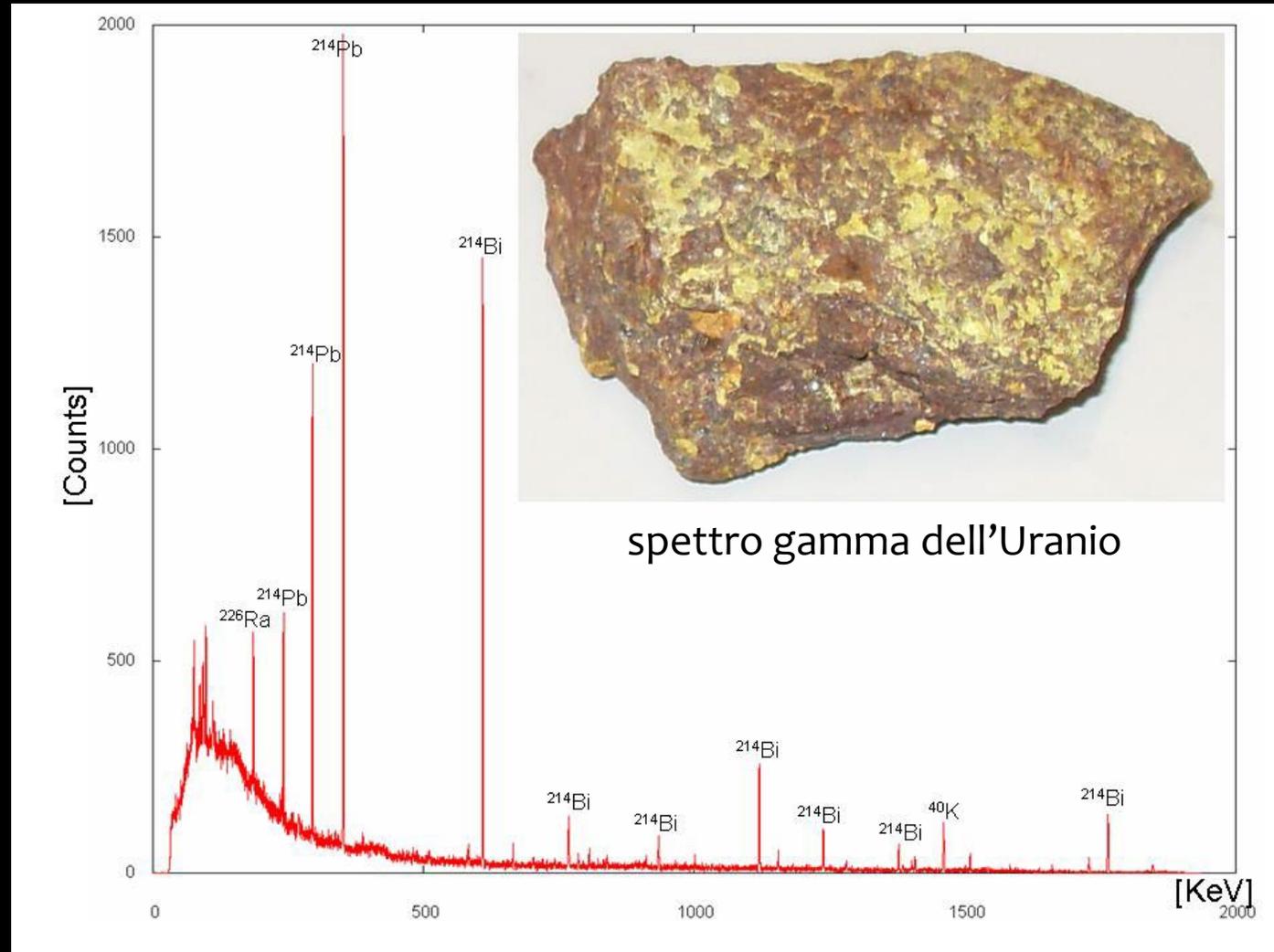


tutti questi processi diventano più probabili all'aumentare del numero atomico Z

Spettroscopia gamma

Spettroscopia gamma

vogliamo misurare l'energia dei fotoni gamma prodotti da un campione radiattivo
lo spettro gamma è l'istogramma di distribuzione dell'energia dei fotoni gamma



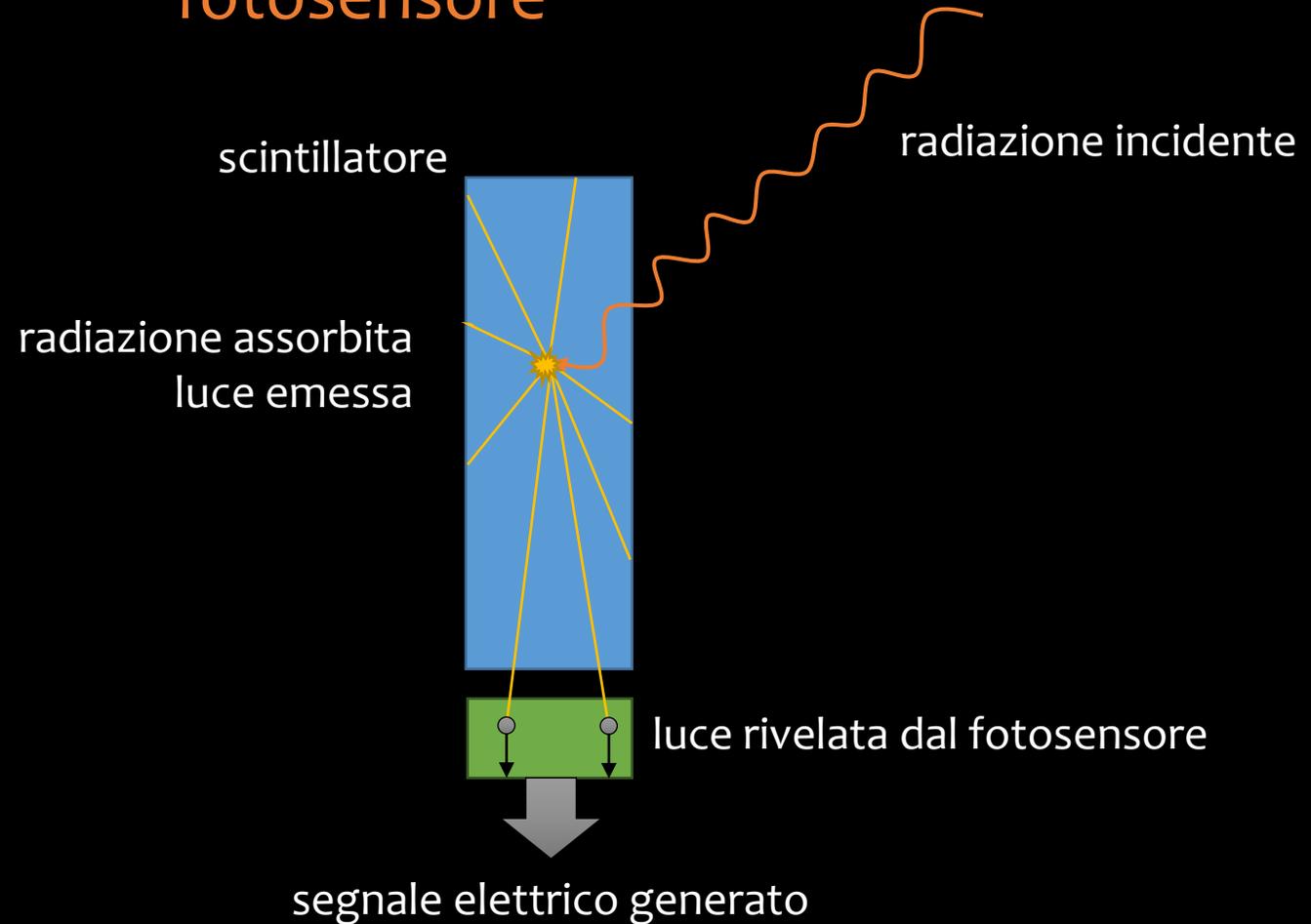
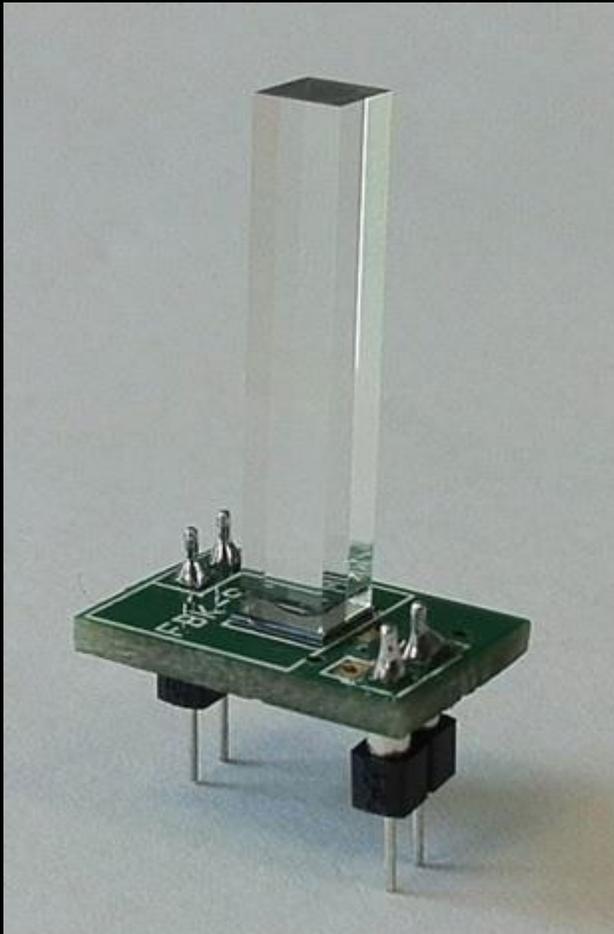
Decadimenti e Spettri gamma

decadimento	radiazione prodotta	interazione nel rivelatore	spettro risultante
alfa	particella alfa monocromatica	non entra nel rivelatore	niente
beta-	elettrone con energia continua	entra nel rivelatore	spettro continuo
beta+	positrone che annichila producendo 2 gamma	1 solo fotone entra nel rivelatore	picco a 511 keV
gamma	fotone monocromatico	entra nel rivelatore	picco ben definito (e...)

Rivelatore

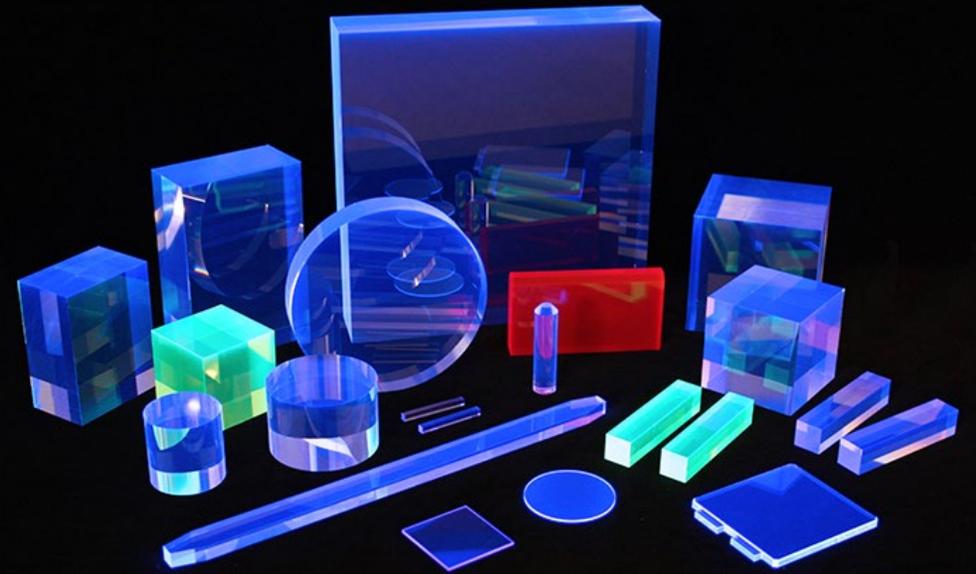
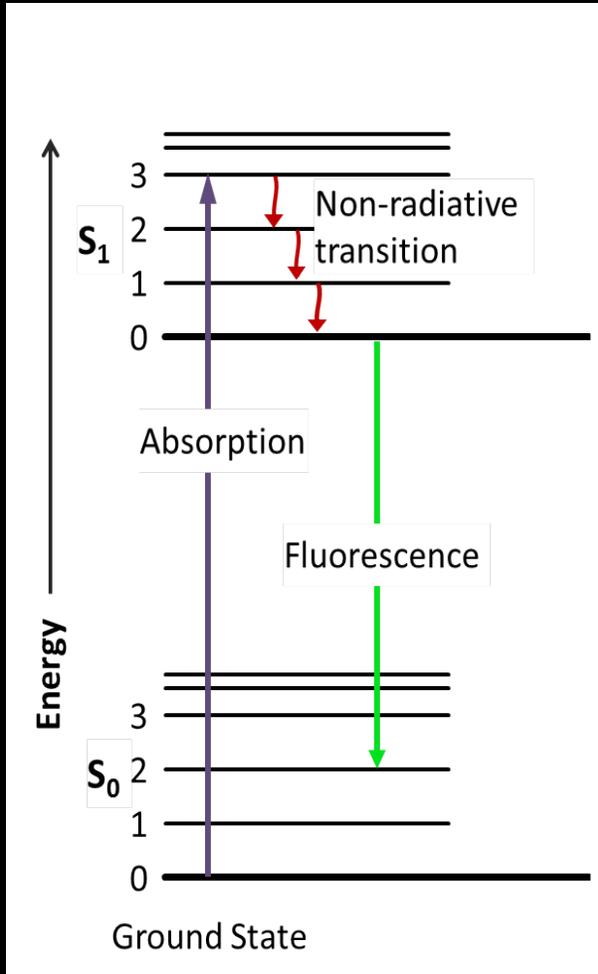
Spettroscopio

due componenti principali
cristallo scintillante
fotosensore



Materiali scintillanti

Gli scintillatori sono materiali che hanno la proprietà di emettere luce visibile (tipicamente blu) se colpiti da una radiazione ionizzante, mediante processi di **fluorescenza**



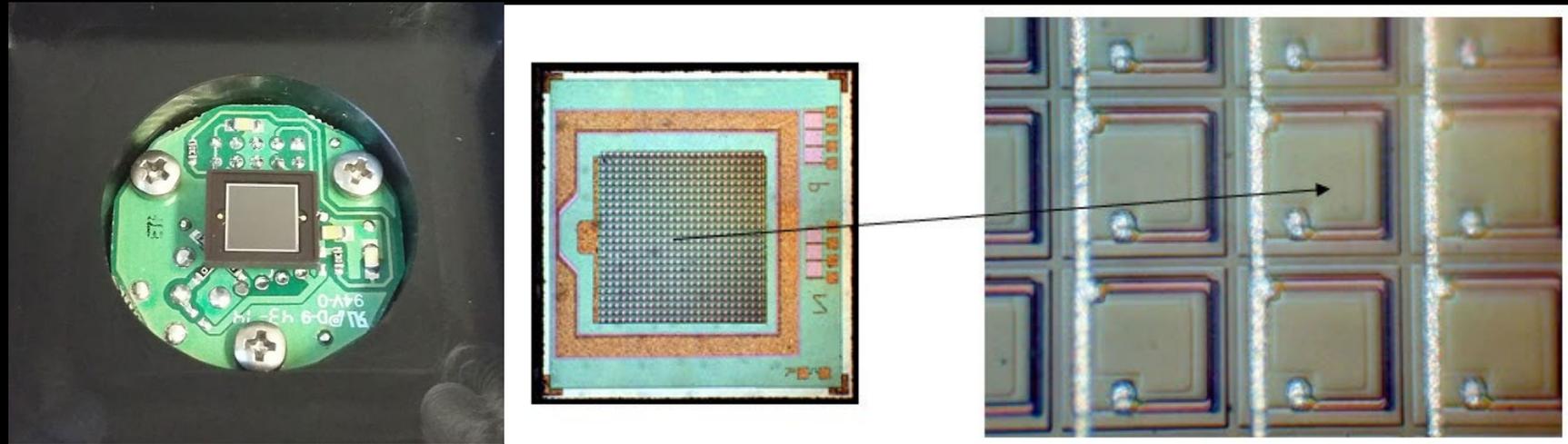
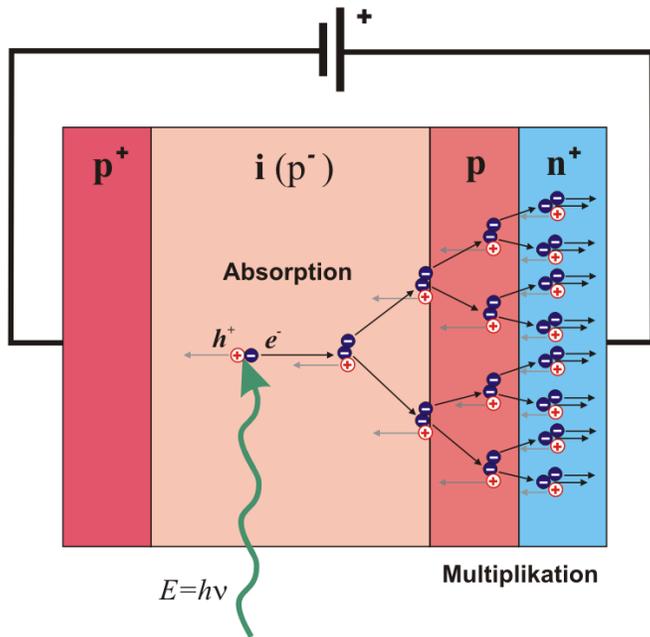
Esistono molti tipi di scintillatori
(e altri si stanno inventando)



Silicon Photomultiplier (SiPM)

inventato nel 2000 per sostituire i fototubi a vuoto (Photomultiplier Tubes - PMT)
i SiPM sono micro-sensori di luce a stato solido basati su un substrato di silicio

Avalanche Photo-Diode

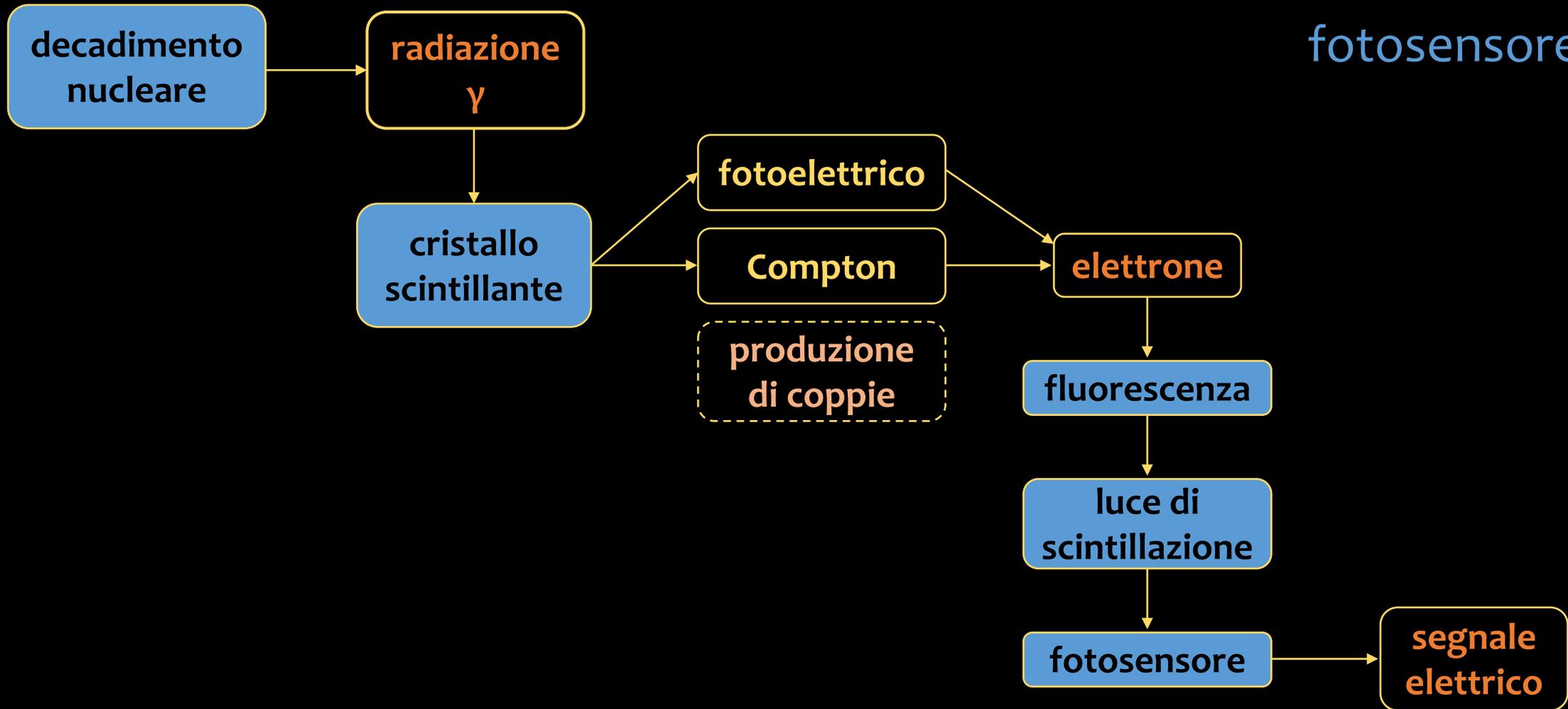


un tipico sensore $5 \times 5 \text{ mm}^2$ è una matrice di migliaia di singoli foto-diodi di dimensioni micrometriche

la moltiplicazione a valanga
amplifica il segnale

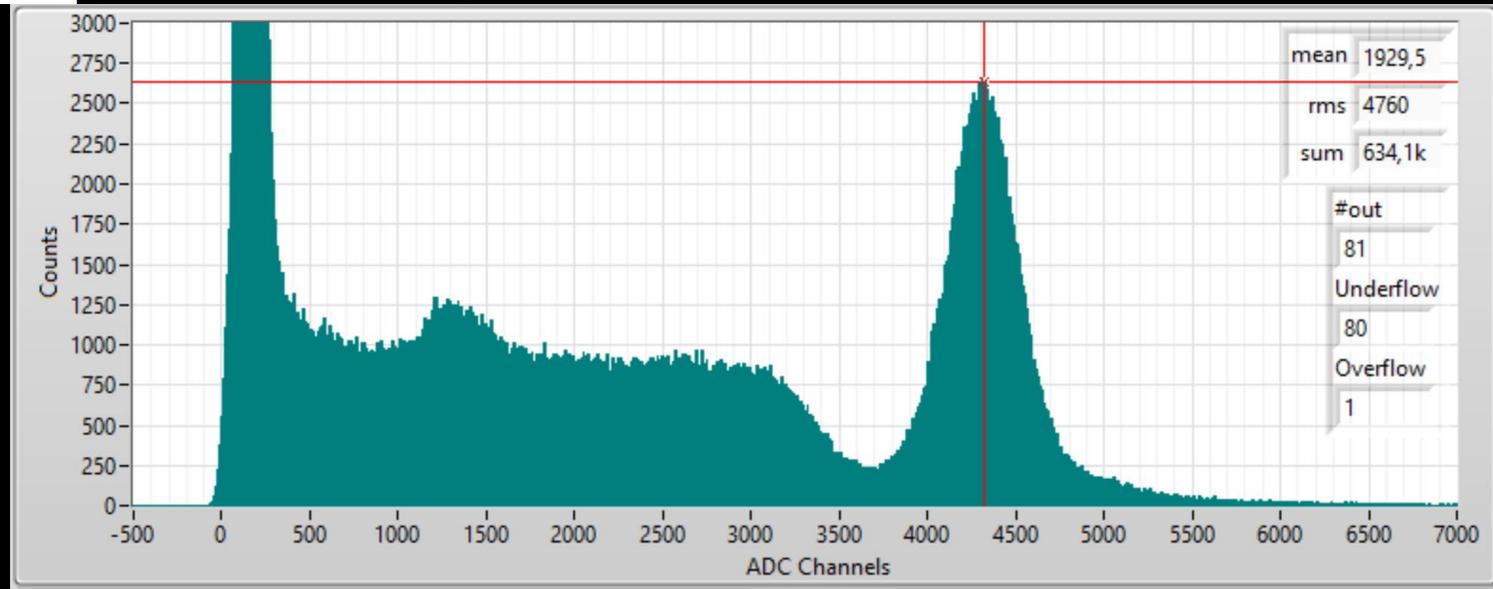
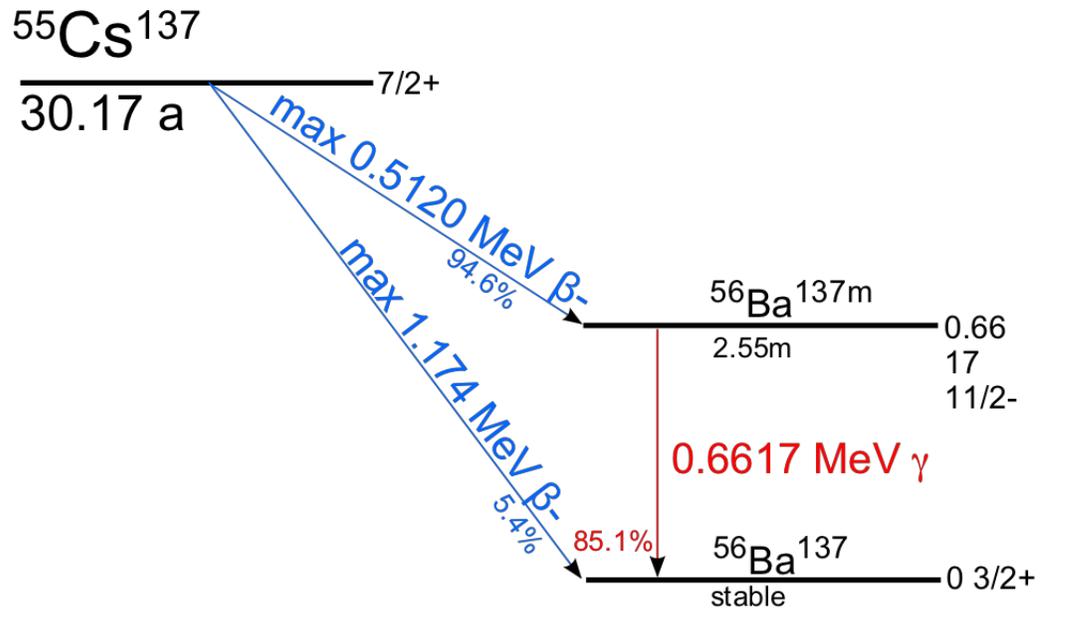
Rivelazione di radiazione Gamma

con scintillatore e
fotosensore

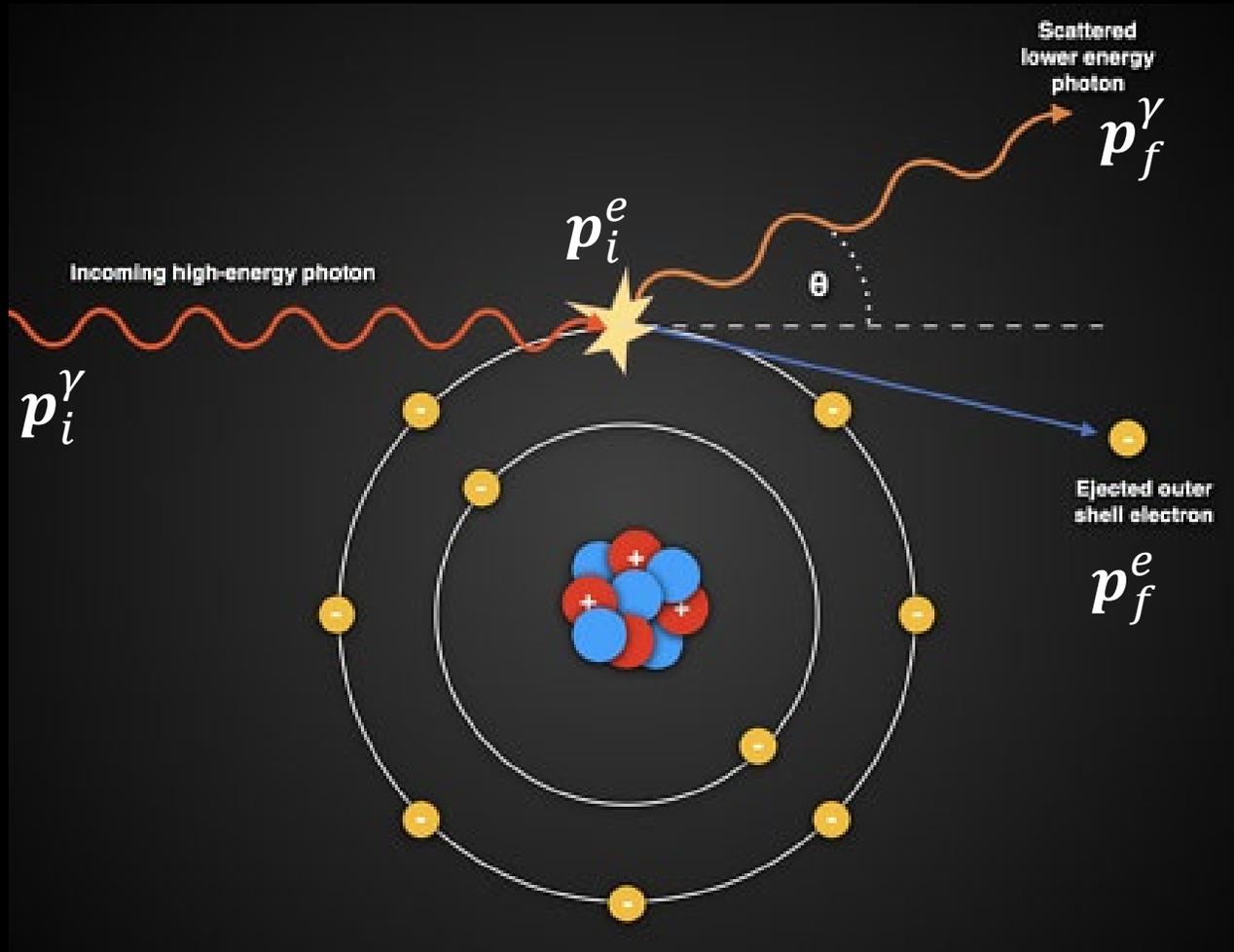


Interpretazione degli spettri gamma proposti

Spettro gamma del Cesio-137



Effetto Compton: cinematica



definizioni 4-impulsi

$$p_i^\gamma = (E_i, \vec{p}_i)$$

$$p_i^e = (m_e, \vec{0})$$

$$p_f^\gamma = (E_f, \vec{p}_f)$$

$$p_f^e = (E_f^e, \vec{p}_f^e)$$

conservazione 4-impulso

$$p_i^\gamma + p_i^e = p_f^\gamma + p_f^e$$

Effetto Compton: cinematica

$$\mathbf{p}_i^\gamma + \mathbf{p}_i^e - \mathbf{p}_f^\gamma = \mathbf{p}_f^e$$

$$\left(\mathbf{p}_i^\gamma + \mathbf{p}_i^e - \mathbf{p}_f^\gamma\right)^2 = \left(\mathbf{p}_f^e\right)^2$$

4-prodotti scalari

$$|\mathbf{p}|^2 = E^2 - |\vec{p}|^2 = m^2$$

$$E^2 = m^2 + |\vec{p}|^2$$

$$\vec{p}_i \cdot \vec{p}_f = p_i p_f \cos\theta = E_i E_f \cos\theta$$

$$m_e^2 + 2\mathbf{p}_i^\gamma \cdot \mathbf{p}_i^e - 2\mathbf{p}_i^\gamma \cdot \mathbf{p}_f^\gamma - 2\mathbf{p}_i^e \cdot \mathbf{p}_f^\gamma = m_e^2$$

$$E_i m_e - E_i E_f + E_i E_f \cos\theta - m_e E_f = 0$$

$$E_i - \frac{E_i E_f}{m_e} (1 - \cos\theta) - E_f = 0$$

$$E_f \left[1 + \frac{E_i}{m_e} (1 - \cos\theta) \right] = E_i$$

Energia del fotone

$$E_f = \frac{E_i}{1 + \frac{E_i}{m_e c^2} (1 - \cos\theta)}$$

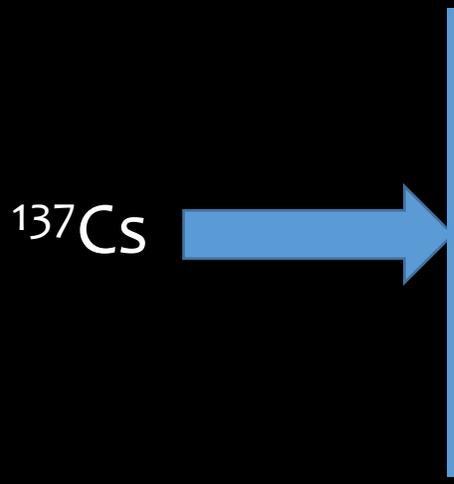
Effetto Compton: cinematica

Energia minima del fotone
(di backscattering)

$$E_{bks} = E_f(\theta = \pi) = \frac{E_i}{1 + \frac{2E_i}{m_e c^2}}$$

Massima energia trasferita
all'elettrone

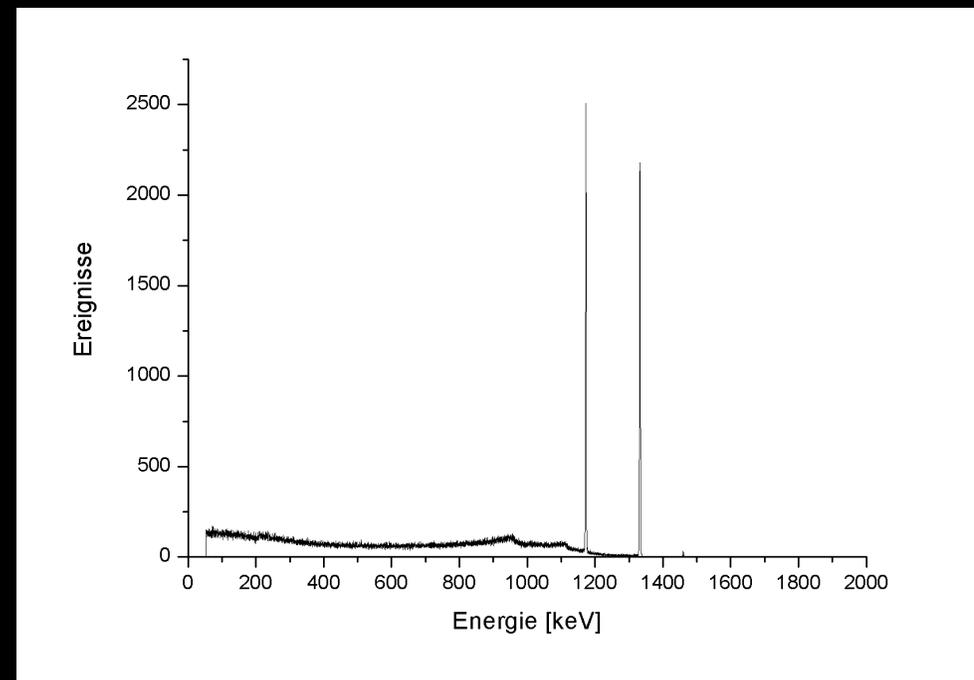
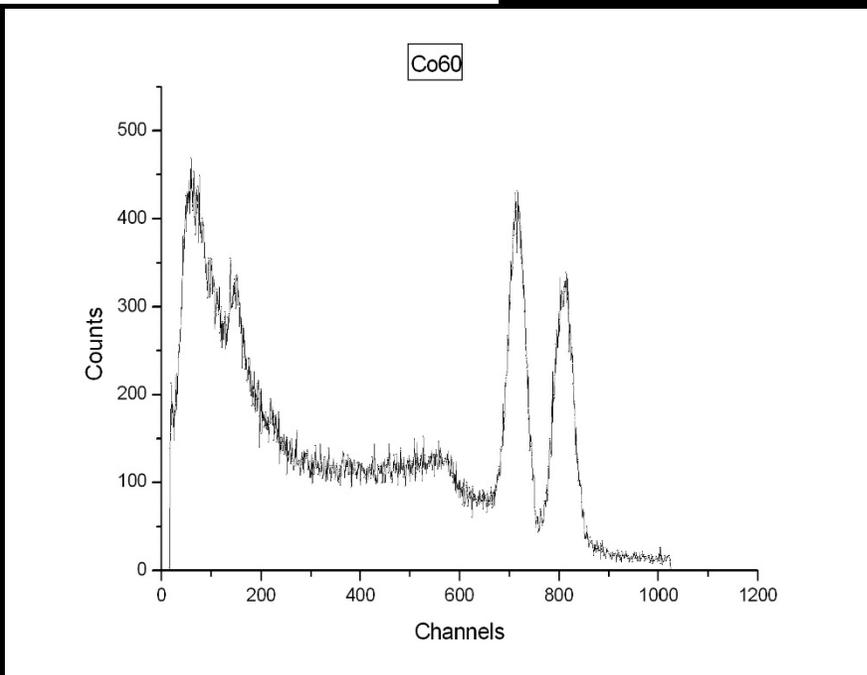
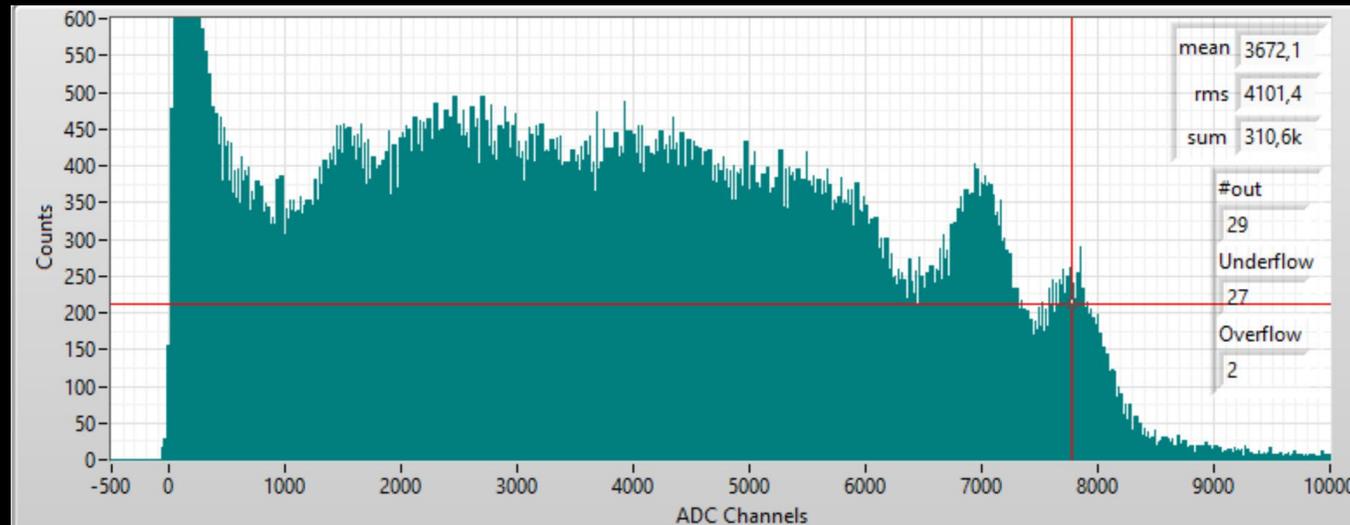
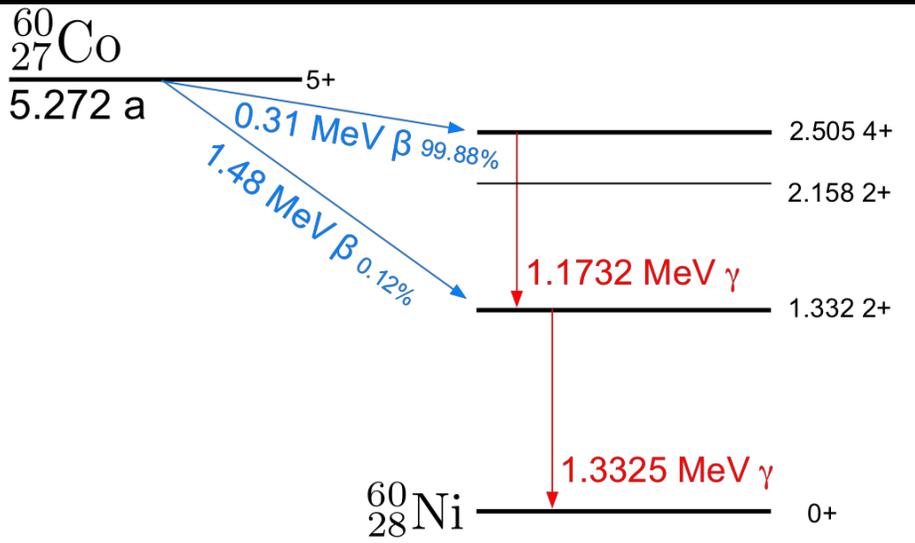
$$T_e^{max} = E_i - E_f(\theta = \pi) = \frac{E_i}{1 + \frac{m_e c^2}{2E_i}}$$



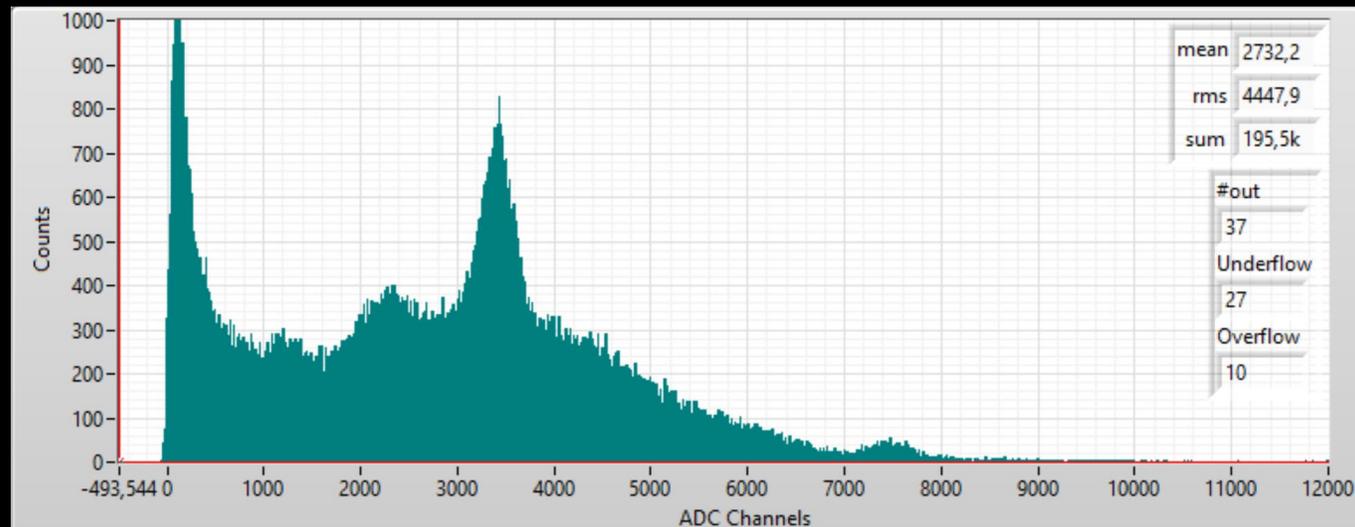
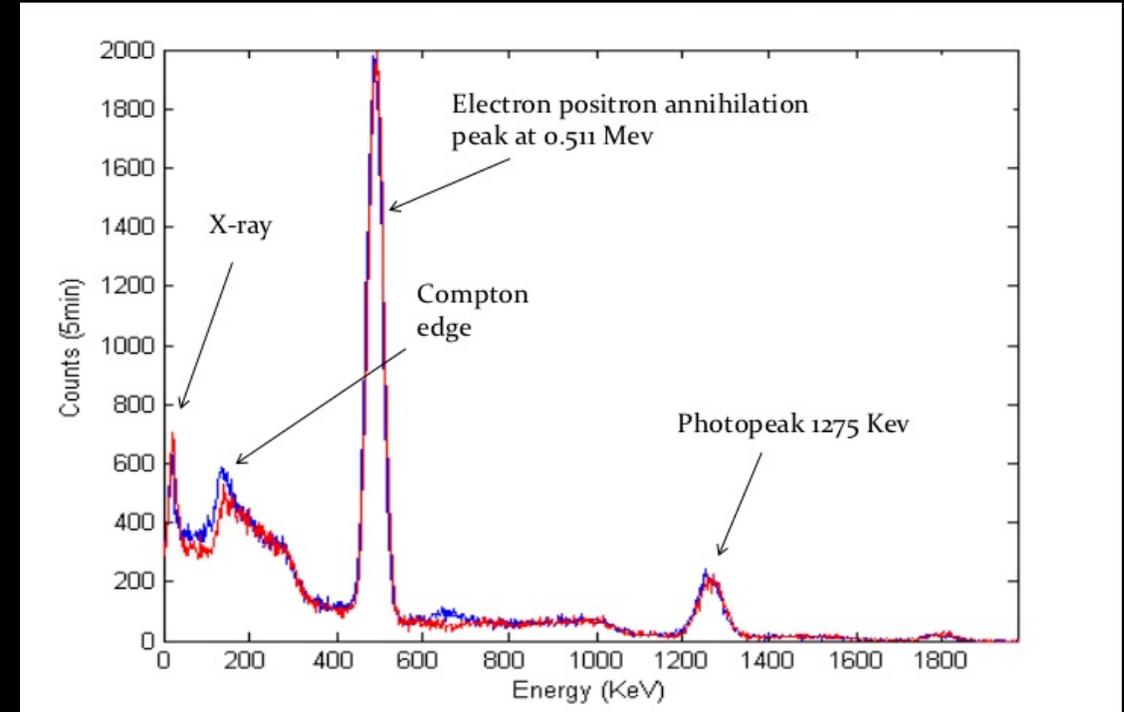
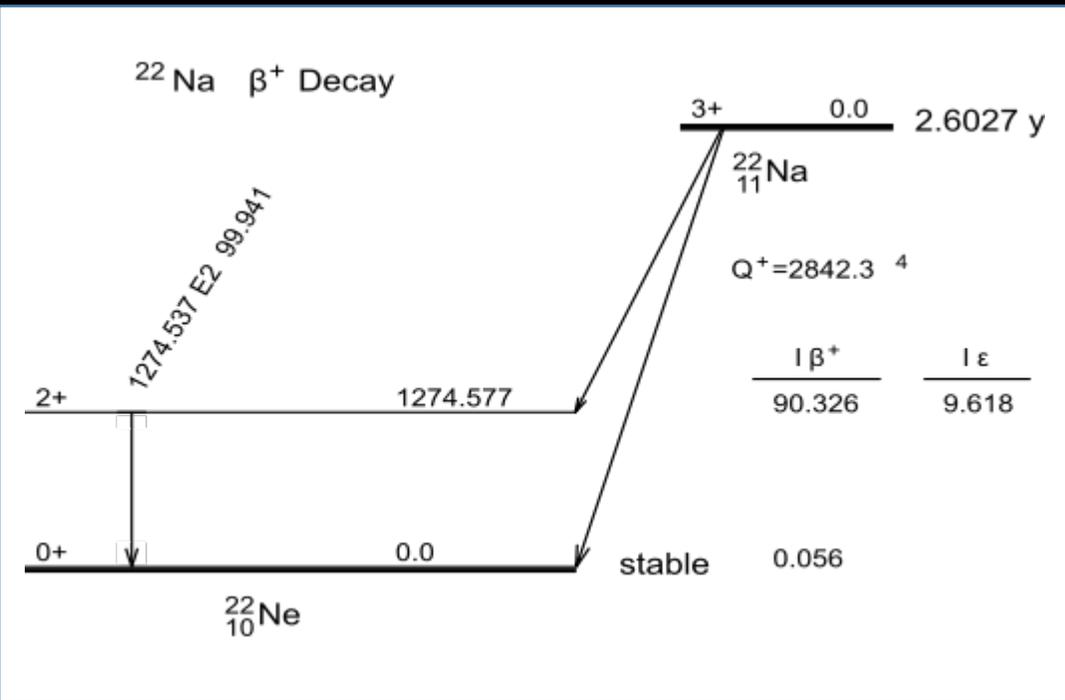
^{137}Cs

$$E_{bks}(E_i = 662 \text{ keV}) = \frac{E_i}{1 + \frac{2 \times 662}{511}} = 0.28 \times E_i = 184 \text{ keV}$$
$$T_e^{max}(E_i = 662 \text{ keV}) = \frac{E_i}{1 + \frac{511}{2 \times 662}} = 0.72 \times E_i = 478 \text{ keV}$$

Spettro gamma del Cobalto-60



Spettro gamma del Sodio-22



Spettro gamma del Am-241

