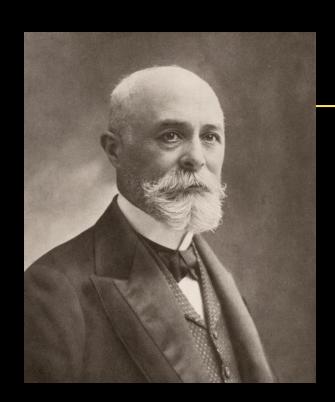
# Alfa, Beta, Gamma: alla scoperta della radioattività

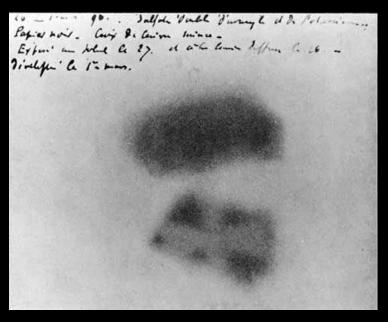
LNF – 31.3.22 | Incontri di Fisica Danilo Domenici Storia,

classificazione e definizioni

### La rivoluzione a fine '800

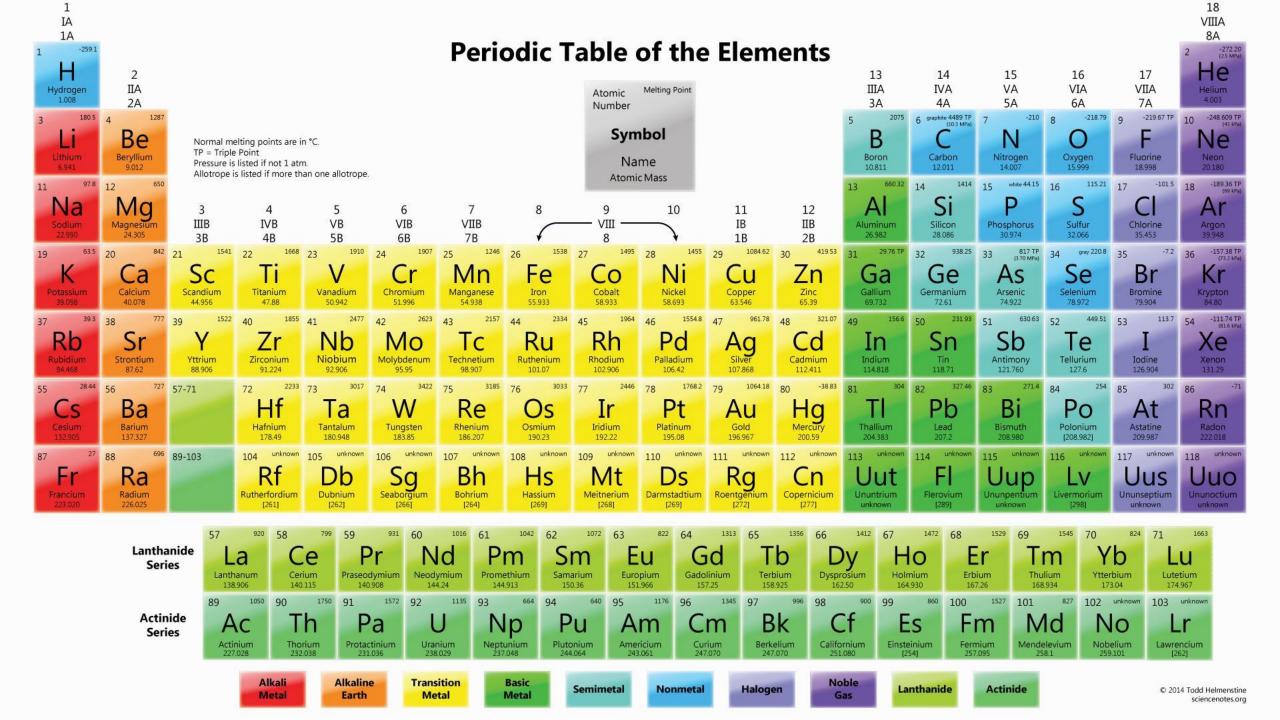


1896 – Henri Bequerel studiando la fluorescenza nei sali d'uranio scopre la radioattività naturale



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





### Classificazione di Rutherford

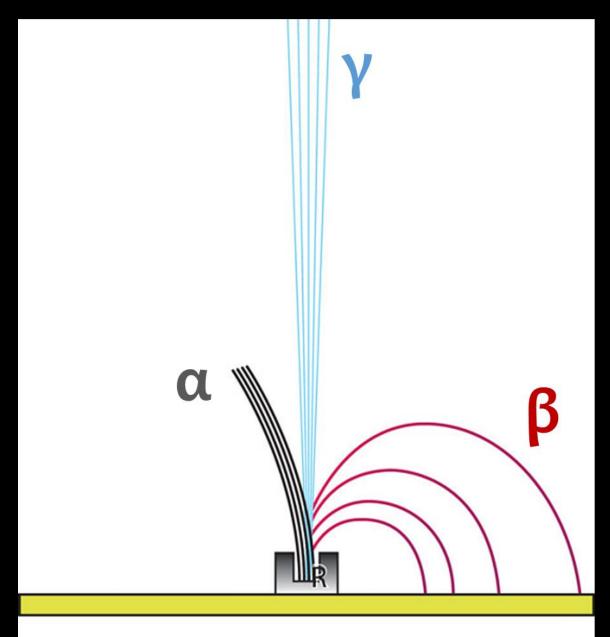
comportamento della radiazione in campo magnetico

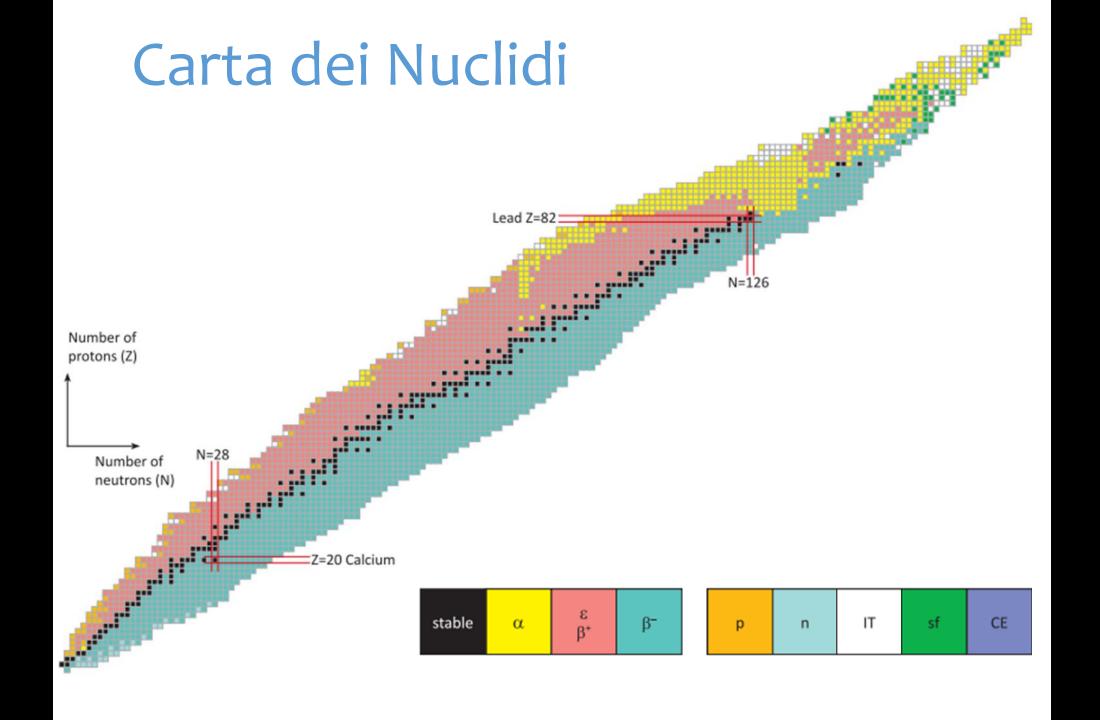
$$r = \frac{mv}{qB}$$

carica positiva, alto impulso raggi alfa

carica negativa, basso impulso raggi beta

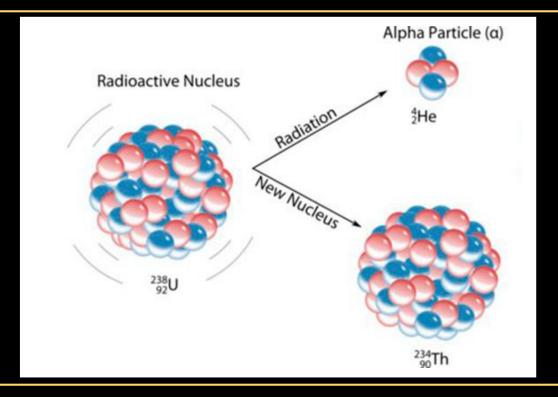
carica neutra raggi gamma





### Decadimento alfa

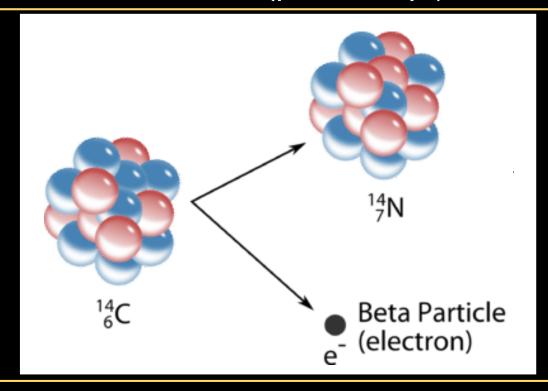
una particella alfa (2 protoni + 2 neutroni) viene emessa dal nucleo



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

### Decadimento beta

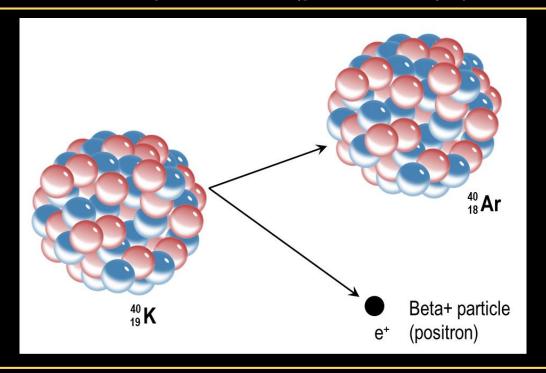
un neutrone si trasforma in un protone rimanendo nel nucleo vengono emessi un elettrone (particella  $\beta^-$ ) e un anti-neutrino



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

### Decadimento beta +

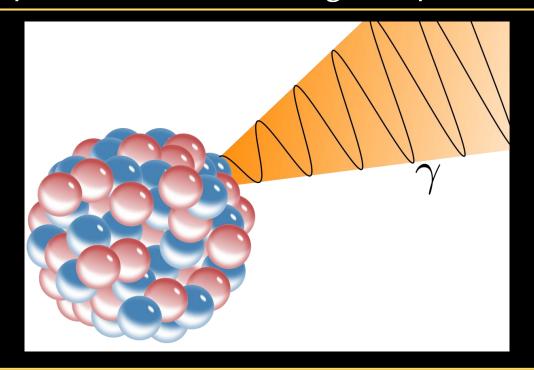
un protone si trasforma in un neutrone rimanendo nel nucleo vengono emessi un positrone (particella  $\beta^+$ ) e un neutrino



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

### Decadimento gamma

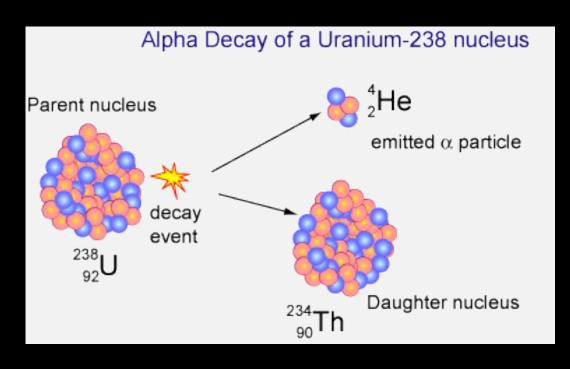
un nucleo in uno stato eccitato emette un fotone di alta energia e passa ad un livello energetico più basso

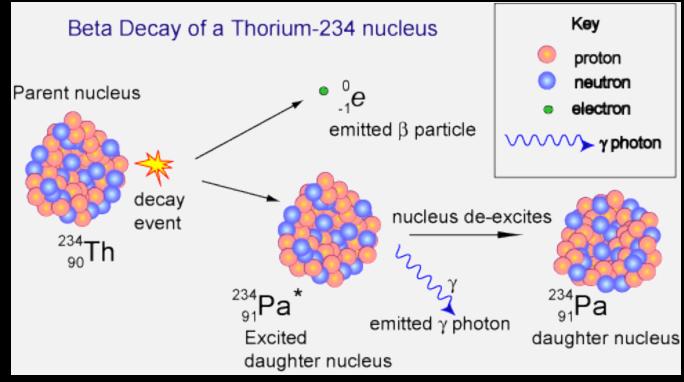


il numero atomico non cambia il numero di massa non cambia  $(Z,A) \rightarrow (Z,A)$ 

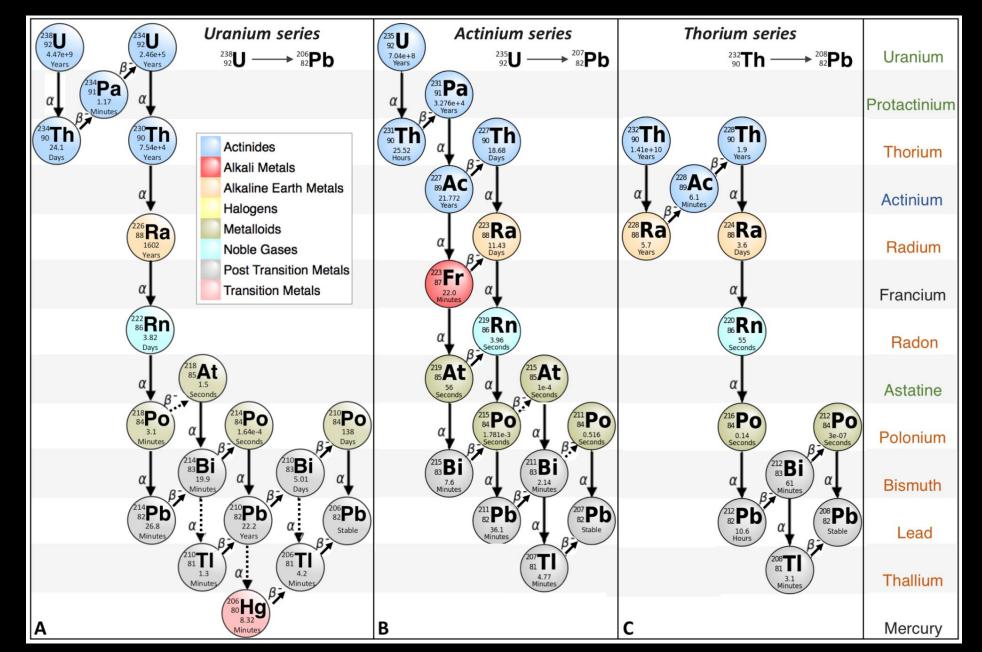
### Catena radioattiva

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

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



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

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

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

τ è la «vita media» del radionuclide

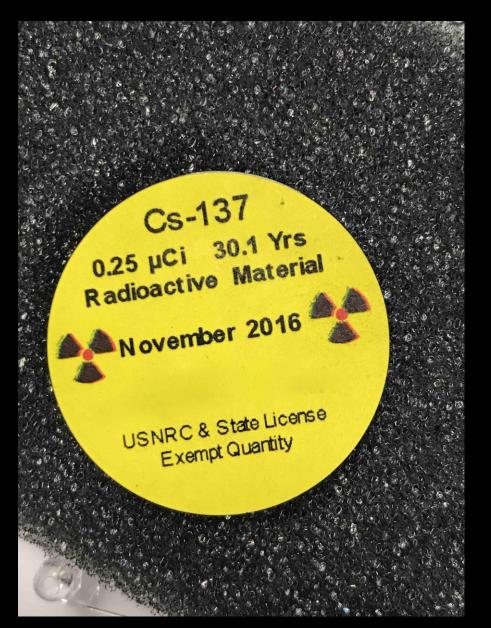
$$N(\tau) = \frac{N_0}{e} \cong 0.36 \cdot N_0$$

$$N_{\left(t_{\frac{1}{2}}\right)} = 0.5 \cdot N_0$$

 $t_{\frac{1}{2}}$  è l'«emivita» o

«tempo di dimezzamento»

### Attività della sorgente radioattiva



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

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

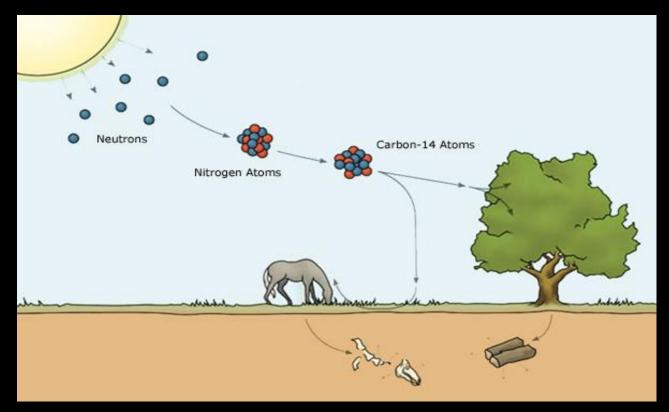
$$1Bq = \frac{1 \ decadimento}{s}$$

il Curie (Ci) è l'attività di 1 g di <sup>226</sup>Ra

$$1Ci = 37GBq$$

$$N(t) = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} = 0.25 \,\mu\text{Ci} \times e^{-\frac{4}{30.1}}$$
$$= 0.25 \,\mu\text{Ci} \times 0.88 = 0.22 \,\mu\text{Ci}$$

### Datazione al radiocarbonio



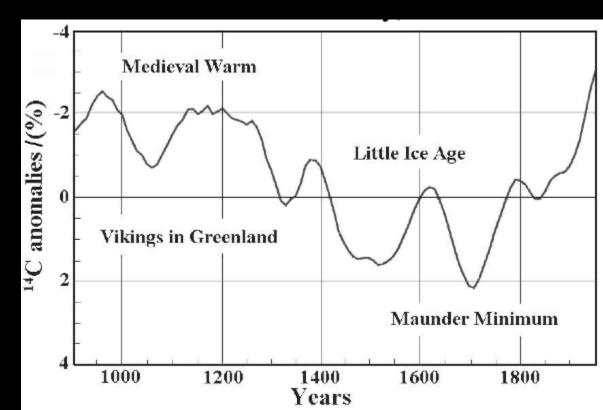
<sup>14</sup>N atmosferico si trasforma in <sup>14</sup>C dopo urto con neutroni prodotti dai raggi cosmici

<sup>14</sup>C che si combina con O<sub>2</sub> e forma CO<sub>2</sub> che entra nel ciclo vitale

il <sup>14</sup>C decade β+ in <sup>14</sup>N con vita media 5730 anni

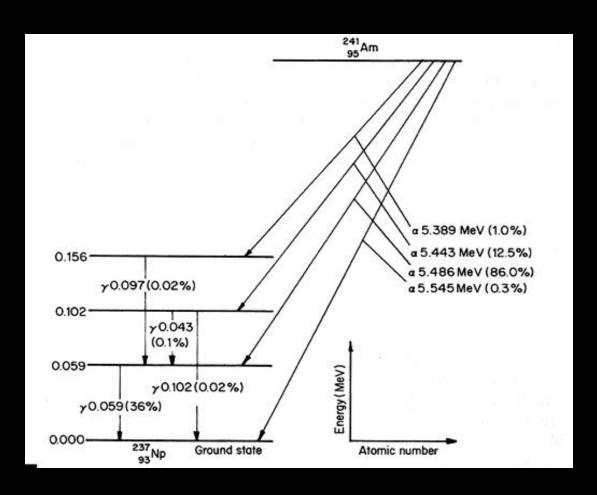
metodo inventato negli anni '40 dal chimico Libby (Nobel 1960)

bisogna conoscere la concentrazione di <sup>14</sup>C nell'atmosfera nel coorso dei secoli



# Rivelazione e applicazioni

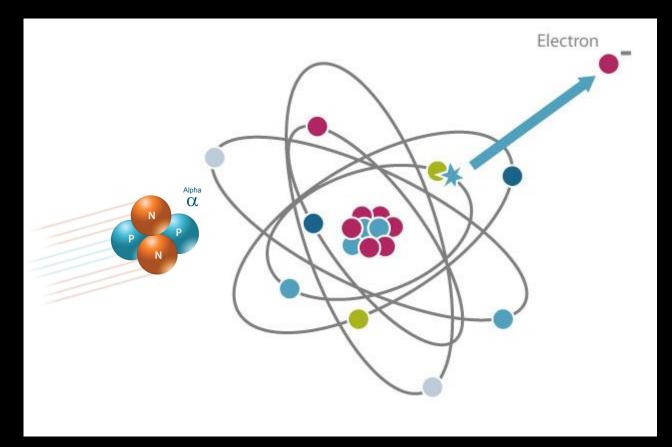
### Decadimenti alfa nella materia



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 le particelle α vengono emesse a una energia caratteristica

interagiscono nella materia attraverso la ionizzazione atomica

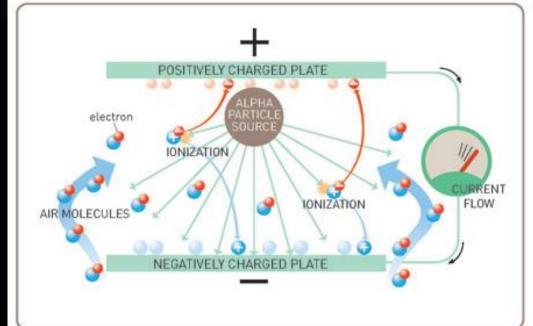


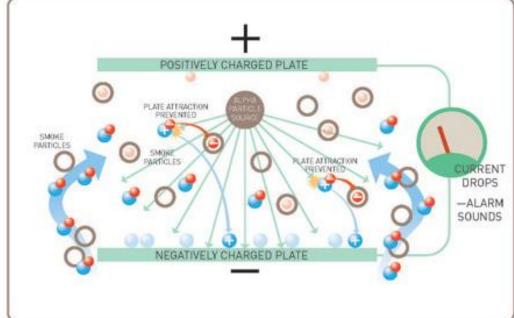
### Rivelatori di fumo

contengono una piccola sorgente di Americio-241

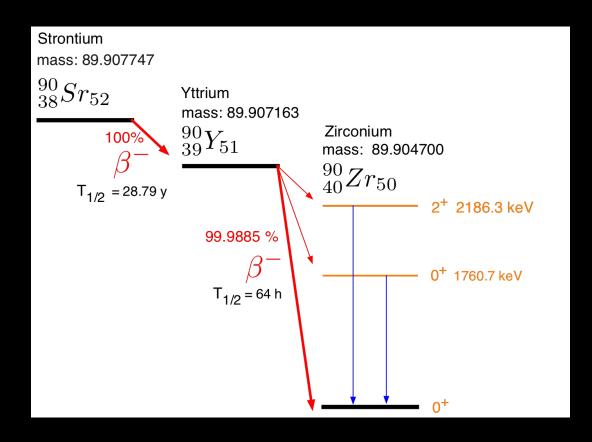
le alfa ionizzano l'aria nel condensatore scorre corrente le particelle di fumo intrappolano gli elettroni liberi

la corrente diminuisce e suona l'allarme



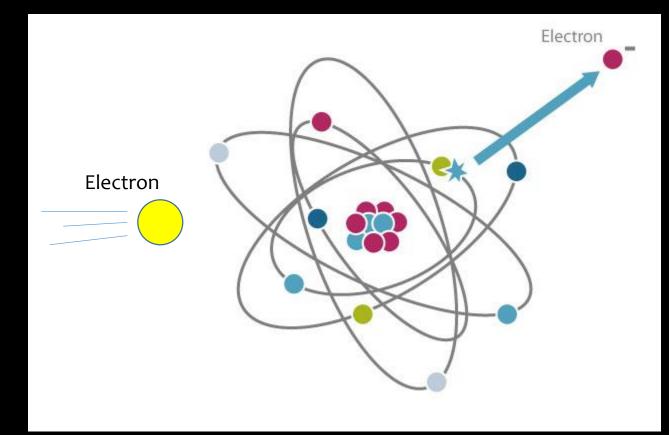


### Decadimenti beta- nella materia



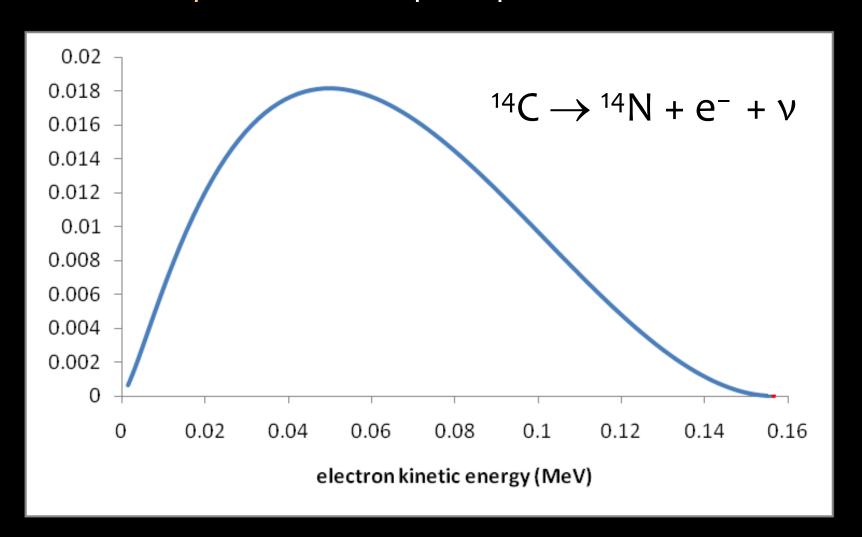
hanno basso potere ionizzante e quindi alto range

un'elettrone da pochi MeV percorre parecchi m in aria e viene fermato da una lastra metallica gli elettroni (di pochi MeV) interagiscono nella materia attraverso la ionizzazione atomica



### 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

Cari Signore e Signori radioattivi,

•

Physikalisches Institut der Eidg. Technischen Hochschule Zurich

Zürich, 4. Des. 1930 Cloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren.

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst ansuhören 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 versweifelten Ausweg verfallen um den "Wechselsats" (1) der Statistik und den Energiesats zu retten. Mämlich 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 eten von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie micht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen faste von derselben Grossenordmung wie die Elektronenmasse sein und jedenfalls nicht grosser als 0,01 Protonemasse .- Das kontinuierliche Spektrum ware denn verständlich unter der Annahme, dass beim beta-Zerfall mit dem blektron jeweils noch ein Neutron emittiert Mirde derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron konstant ist.

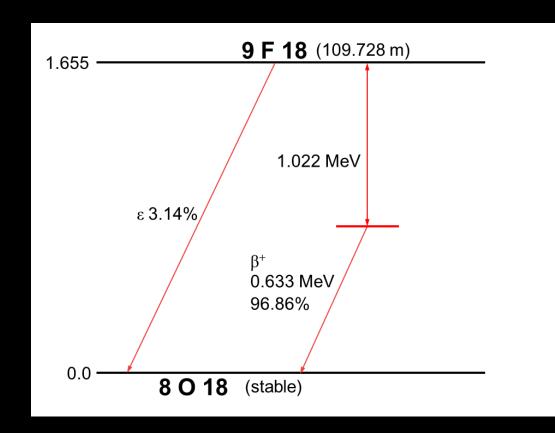
ho trovato un rimedio disperato per salvare la conservazione dell'energia.

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

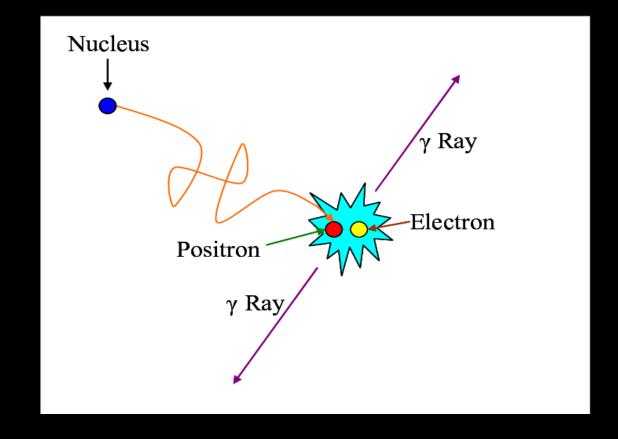
•

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 keV e direzioni opposte

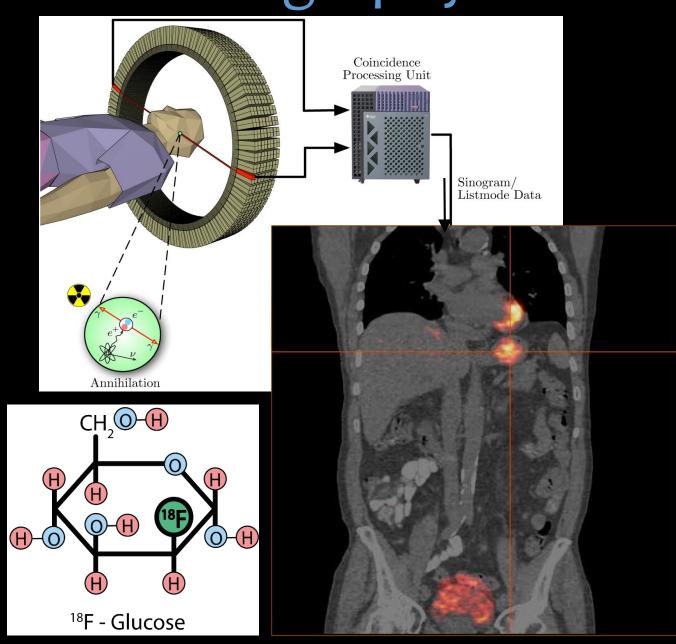


### Positron Emission Tomography

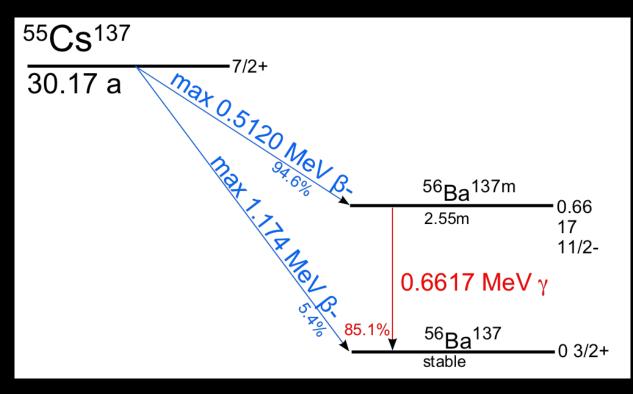


tecnica diagnostica di Medicina Nucleare

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

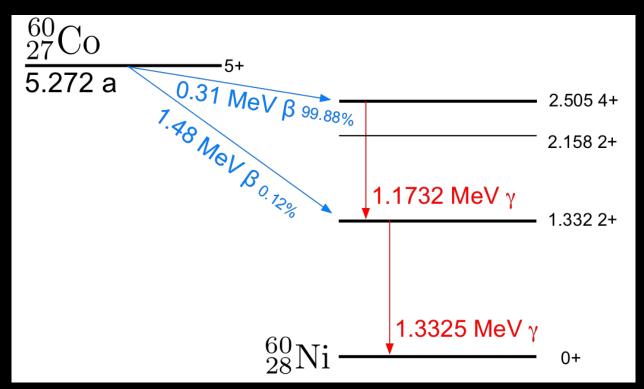


### Decadimenti gamma



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

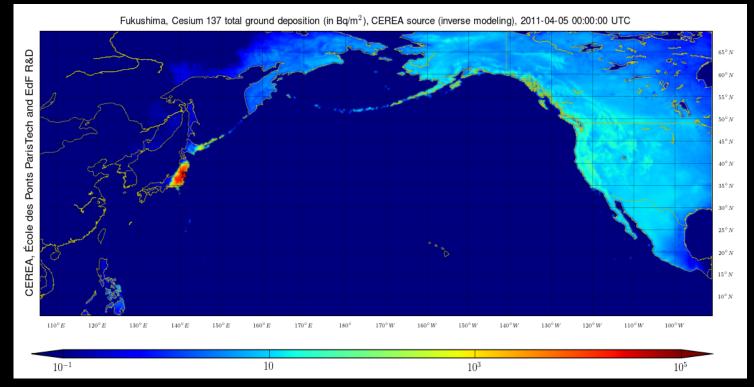
vengono fermati da spesse lastre di piombo



### il Cesio-137 nell'ambiente



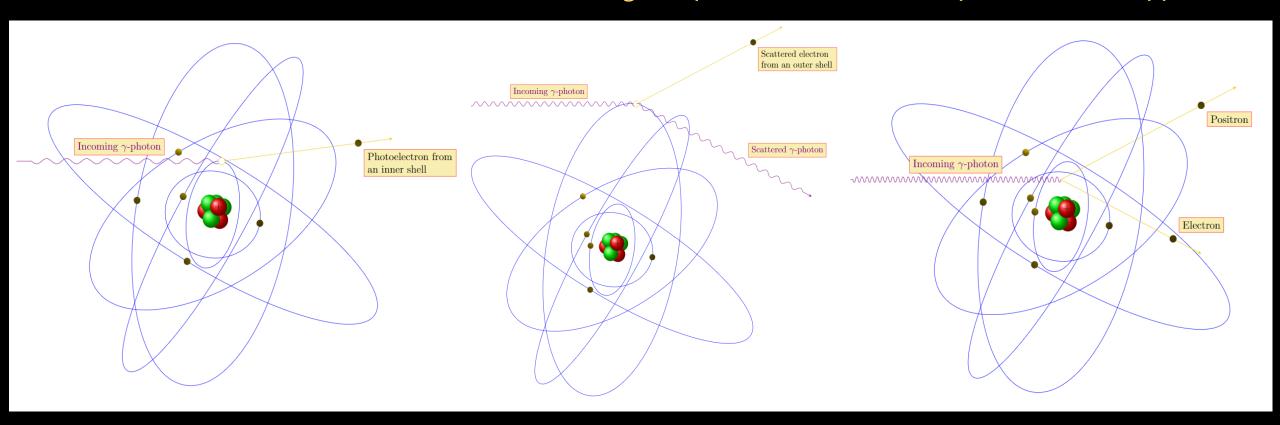
il <sup>137</sup>Cs è uno dei radioisotopi che si producono nei reattori nucleari o nelle esplosioni termo-nucleari



### 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

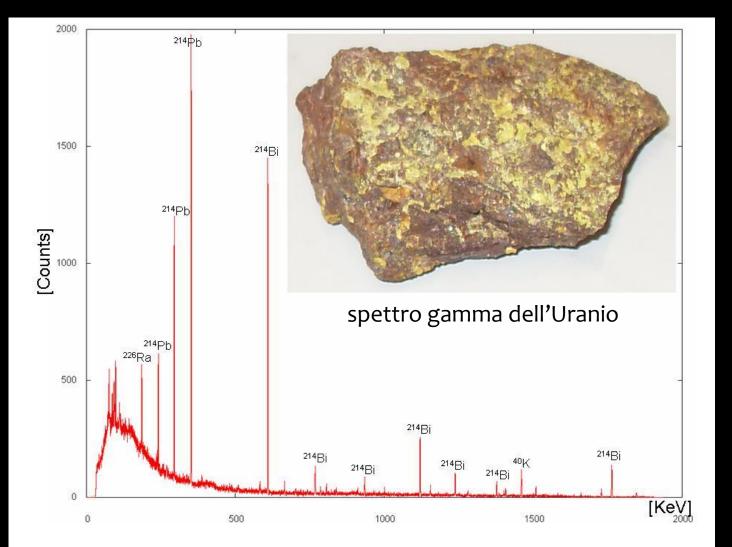


tutti questi processi diventano più probabili all'aumentare del numero atomico Z

# 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

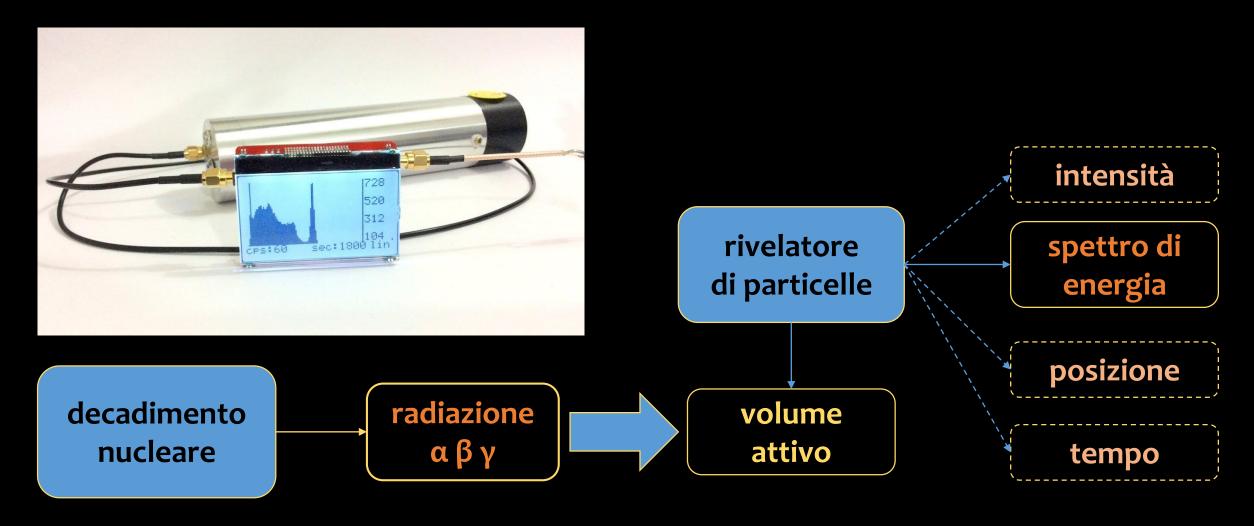


## Decadimenti e Spettri gamma



## Rivelatore

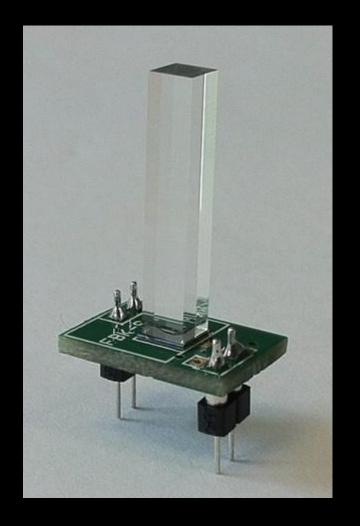
### Rivelatore di radiazione per spettroscopia

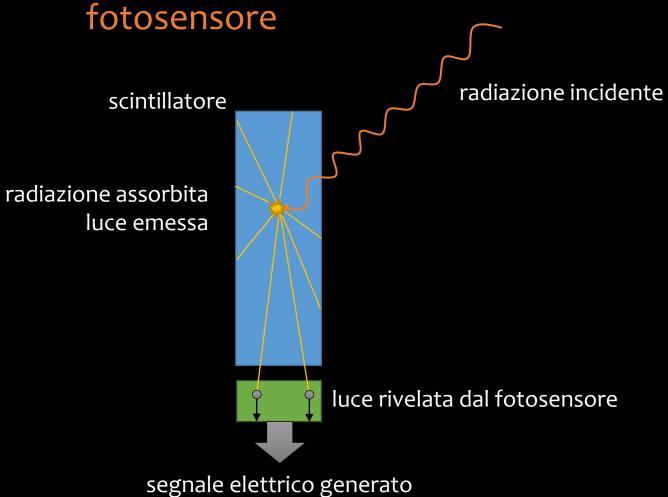


### Spettroscopio

due componenti principali

cristallo scintillante

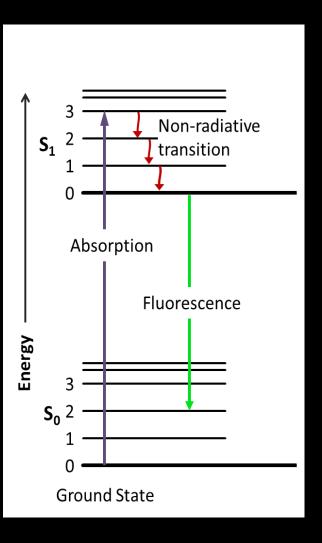




### Materiali scintillanti

Polistirene

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



 $\begin{array}{c|c} NaI(TI) & PbWO_4 \\ \hline \\ CsI(TI) & LYSO* \\ \hline \\ BaF_2 & YAP \\ \hline \end{array}$ 



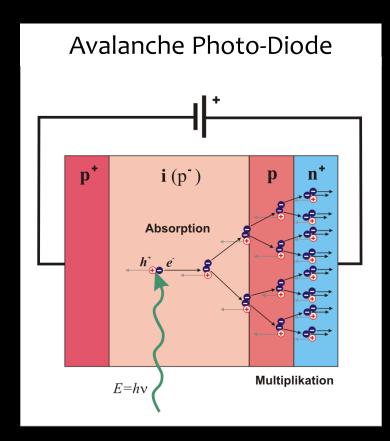
Esistono molti tipi di scintillatori (e altri si stanno inventando)

**BGO** 

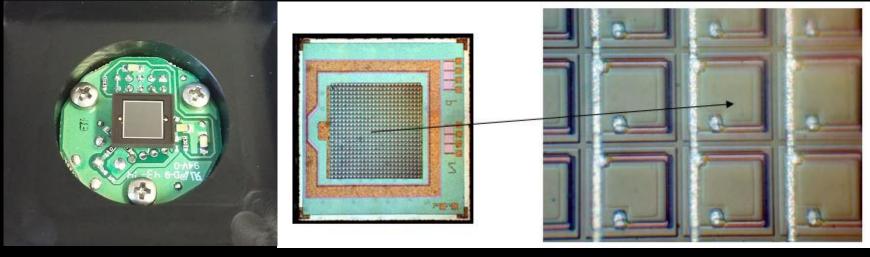
\* Lu<sub>1.9</sub>Y<sub>0.1</sub>SiO<sub>5</sub>(Ce)

### Silicon Photomultiplier (SiPM)

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



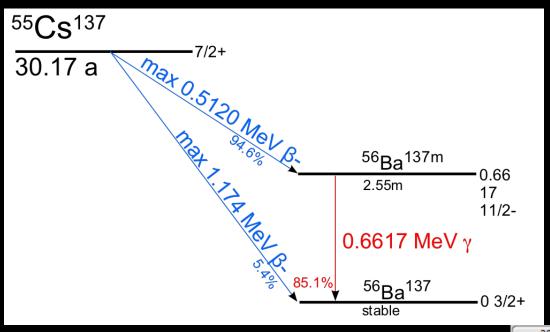
la moltiplicazione a valanga amplifica il segnale

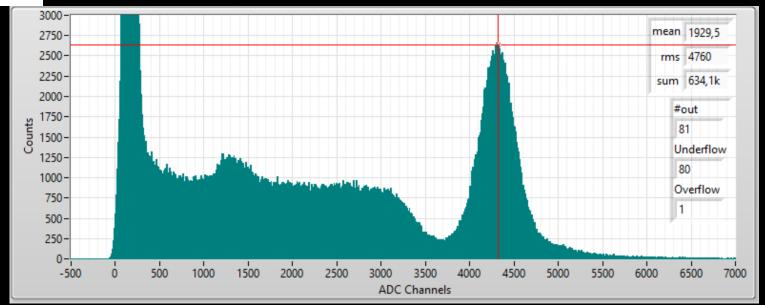


un tipico sensore 5x5 mm² è una matrice di migliaia di singoli foto-diodi di dimensioni micrometriche

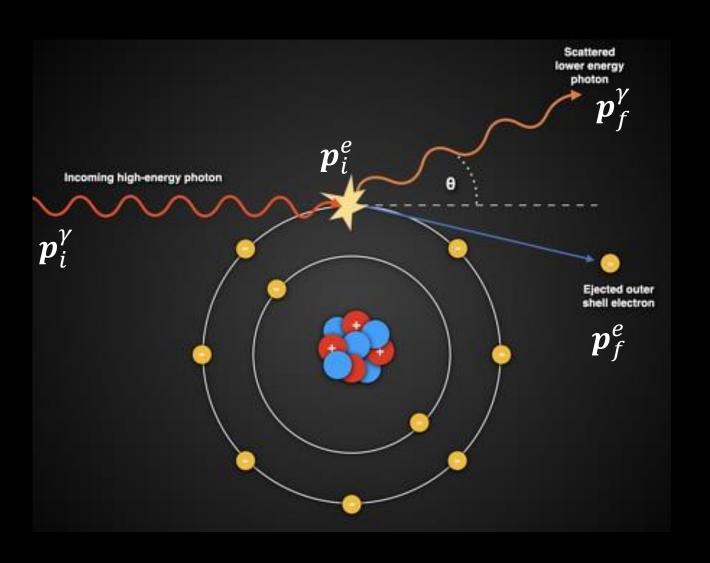
# Interpretazione degli spettri gamma proposti

### Spettro gamma del Cesio-137





### Effetto Compton: cinematica



### definizioni 4-impulsi

$$egin{aligned} oldsymbol{p}_i^{\gamma} &= (E_i, \overrightarrow{p_i}) \ oldsymbol{p}_i^e &= \left(m_e, \overrightarrow{0}
ight) \ oldsymbol{p}_f^{\gamma} &= \left(E_f, \overrightarrow{p_f}
ight) \ oldsymbol{p}_f^e &= \left(E_f^e, \overrightarrow{p_f^e}
ight) \end{aligned}$$

### conservazione 4-impulso

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

### Effetto Compton: cinematica

$$egin{aligned} oldsymbol{p}_i^\gamma + oldsymbol{p}_i^e - oldsymbol{p}_f^\gamma = oldsymbol{p}_f^e \ ig(oldsymbol{p}_i^\gamma + oldsymbol{p}_i^e - oldsymbol{p}_f^\gammaig)^2 = ig(oldsymbol{p}_f^eig)^2 \end{aligned}$$

### 4-prodotti scalari

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

$$\overrightarrow{p_i} \cdot \overrightarrow{p_f} = p_i p_f cos\theta = E_i E_f cos\theta$$

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

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

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

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

#### Energia del fotone

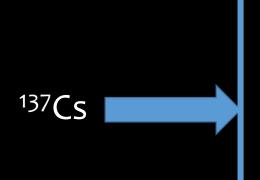
$$E_f = \frac{E_i}{1 + \frac{E_i}{m_e c^2} (1 - \cos\theta)}$$

### Effetto Compton: cinematica

Energia minima del fotone (di backscattering)

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

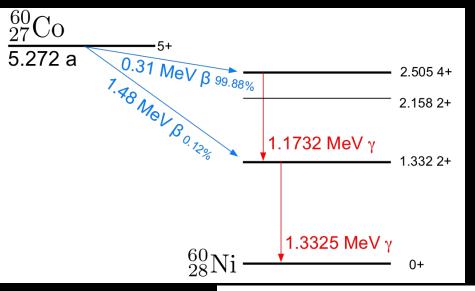
Massima energia trasferita 
$$T_e^{max} = E_i - E_f(\theta = \pi) = \frac{E_i}{1 + \frac{m_e c^2}{2E_i}}$$

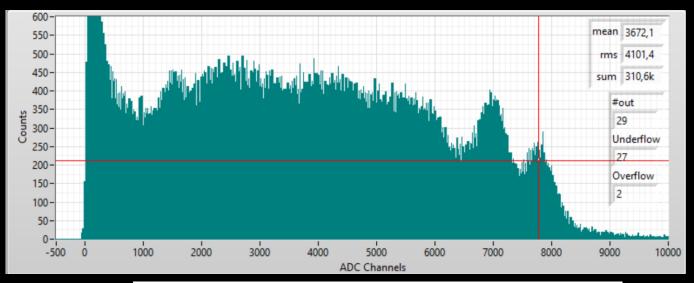


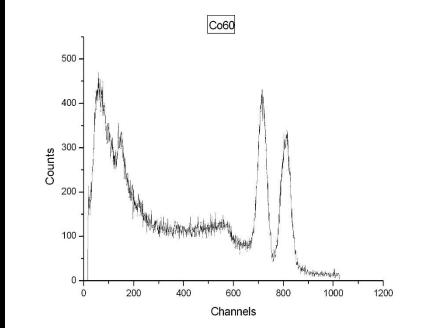
$$E_{bks}(E_i = 662 \text{ keV}) = \frac{E_i}{1 + \frac{2 \times 662}{511}} = 0.28 \times E_i = 184 \text{ keV}$$

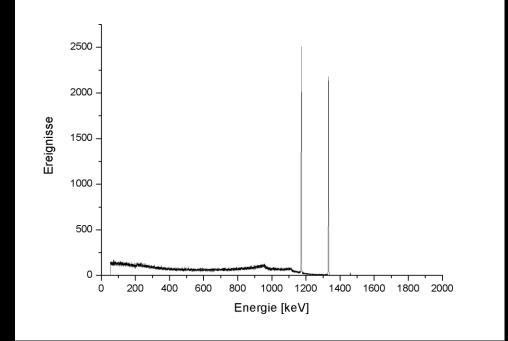
$$T_e^{max}(E_i = 662 \ keV) = \frac{E_i}{1 + \frac{511}{2 \times 662}} = 0.72 \times E_i = 478 \ keV$$

### Spettro gamma del Cobalto-60

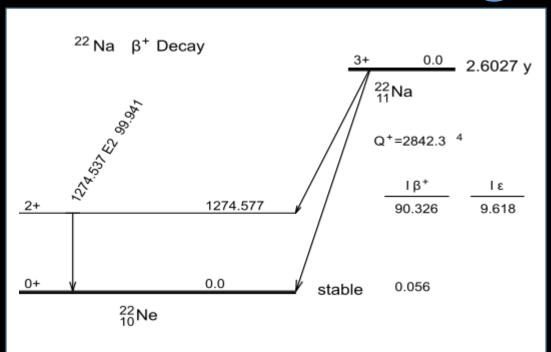


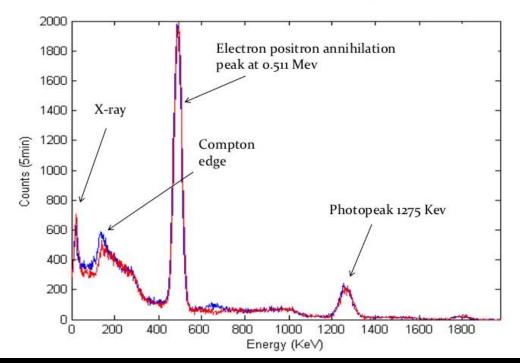


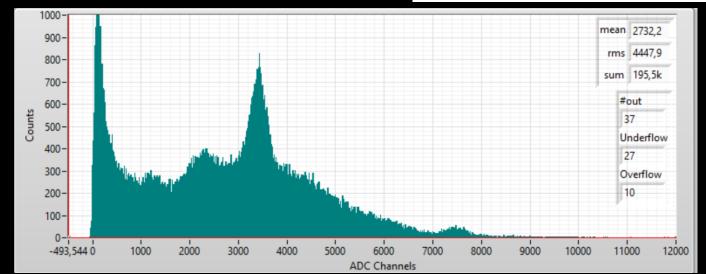




### Spettro gamma del Sodio-22







### Spettro gamma del Am-241

