



**Andrea Gottardo**

10/11/2022

Programma INFN per Docenti 2022

# Cenni di Fisica Nucleare

# Summary

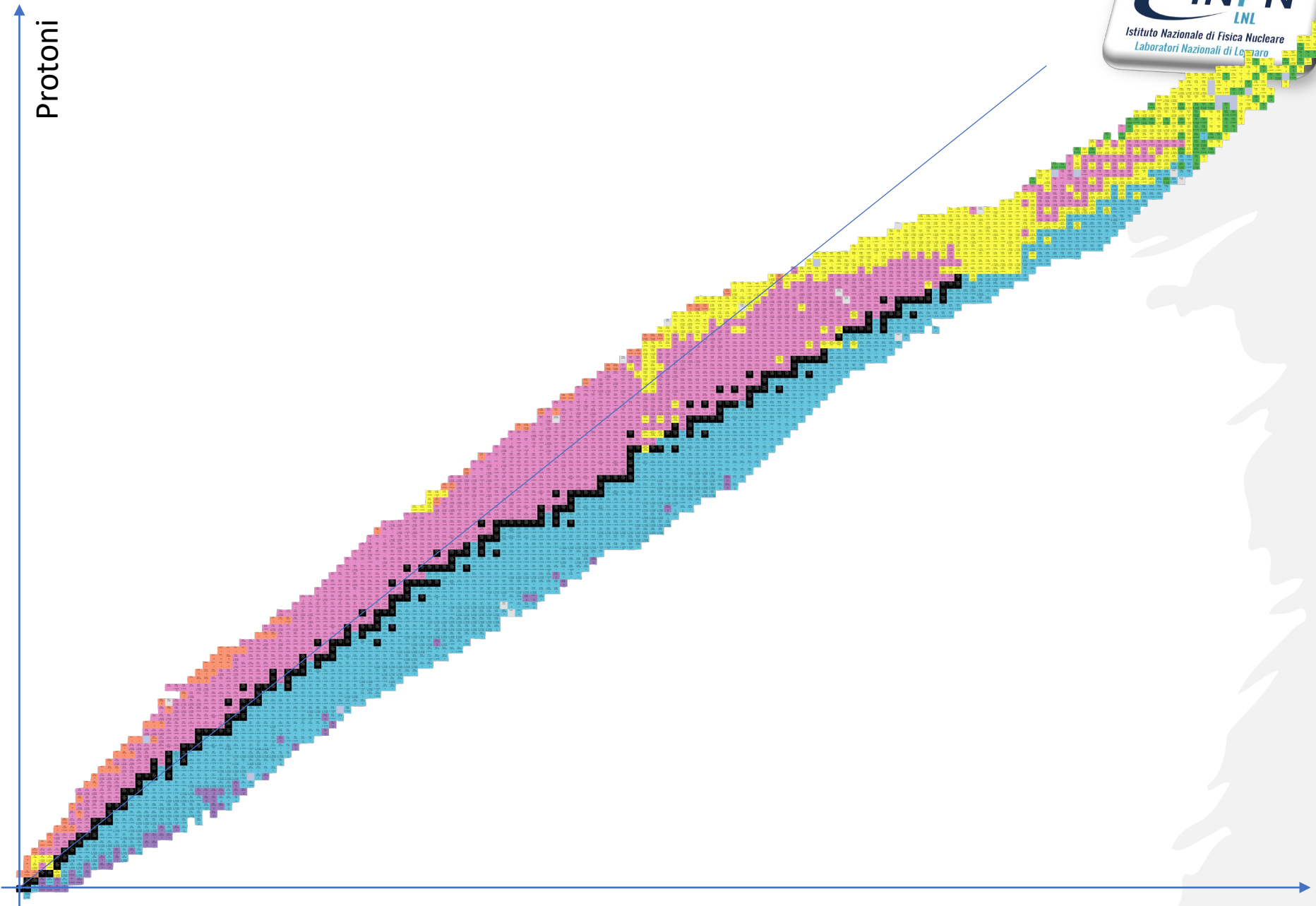
## Prima parte:

- Il nucleo atomico;
- Radioattività;
- Interazione radiazione-materia;

## Seconda parte:

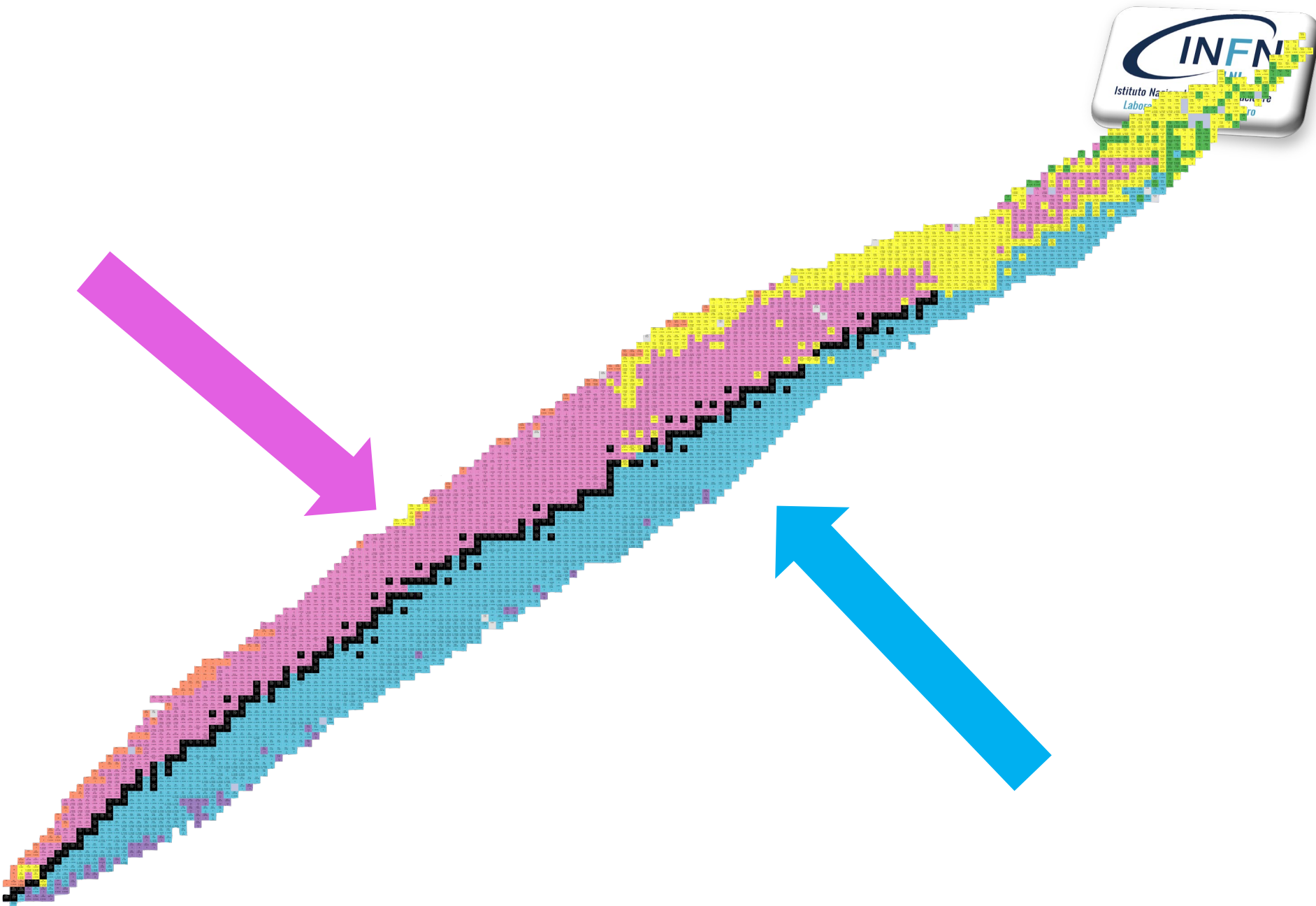
- L'esperimento;
- I detector.

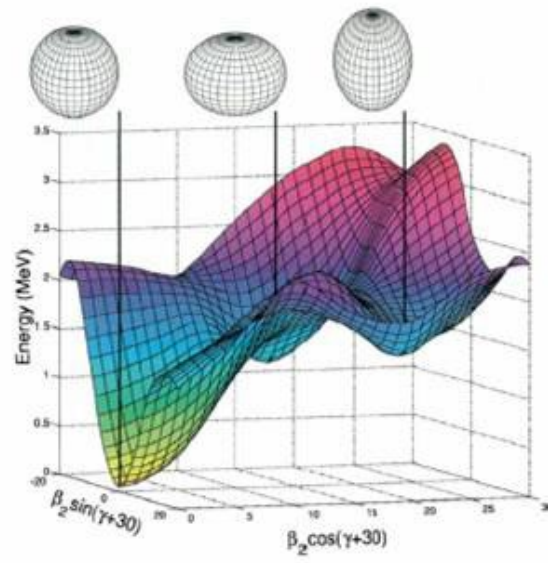
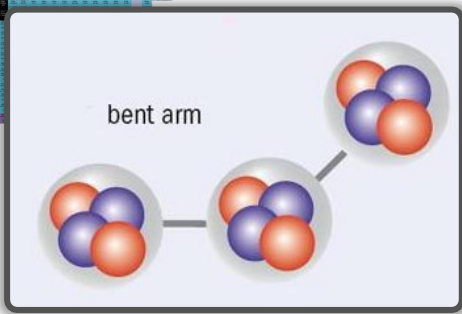
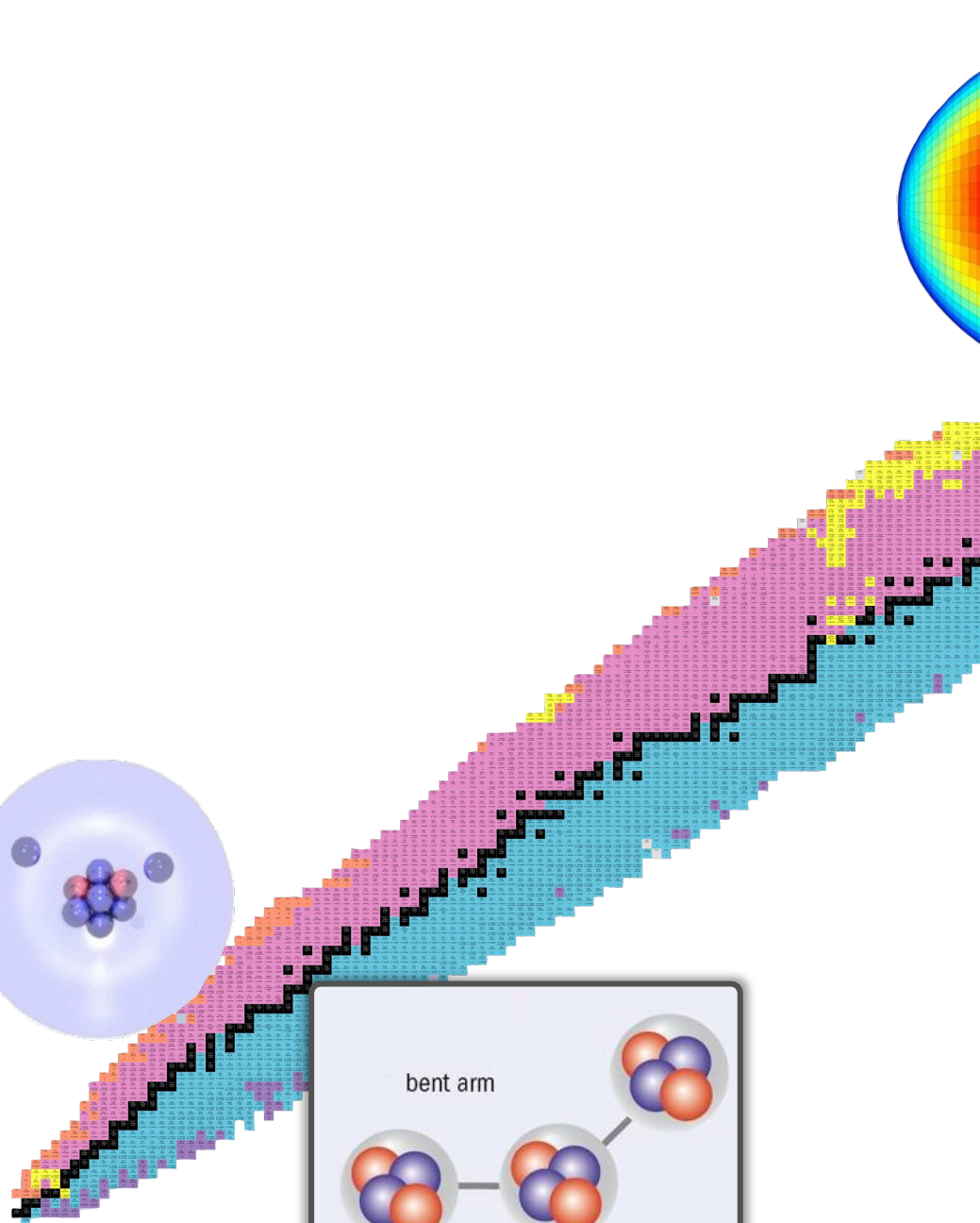
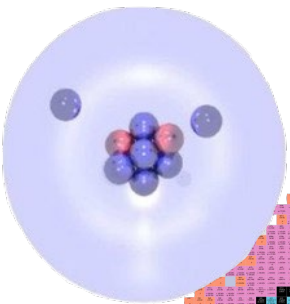
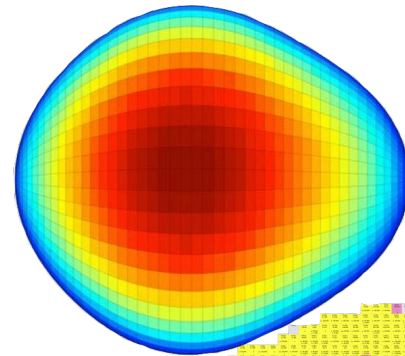


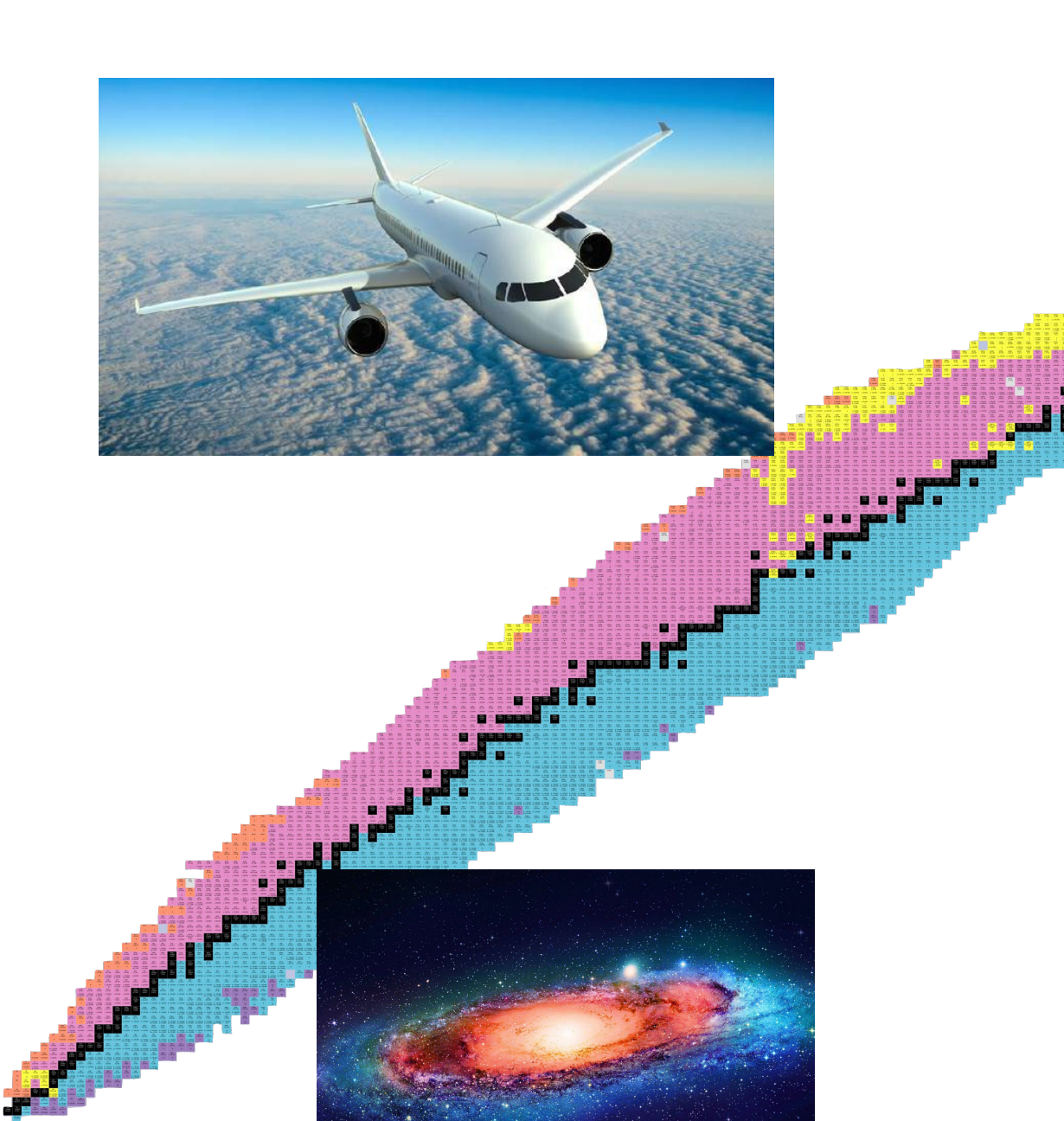
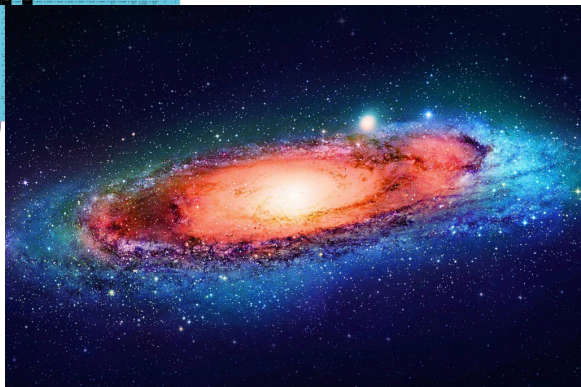


Protoni

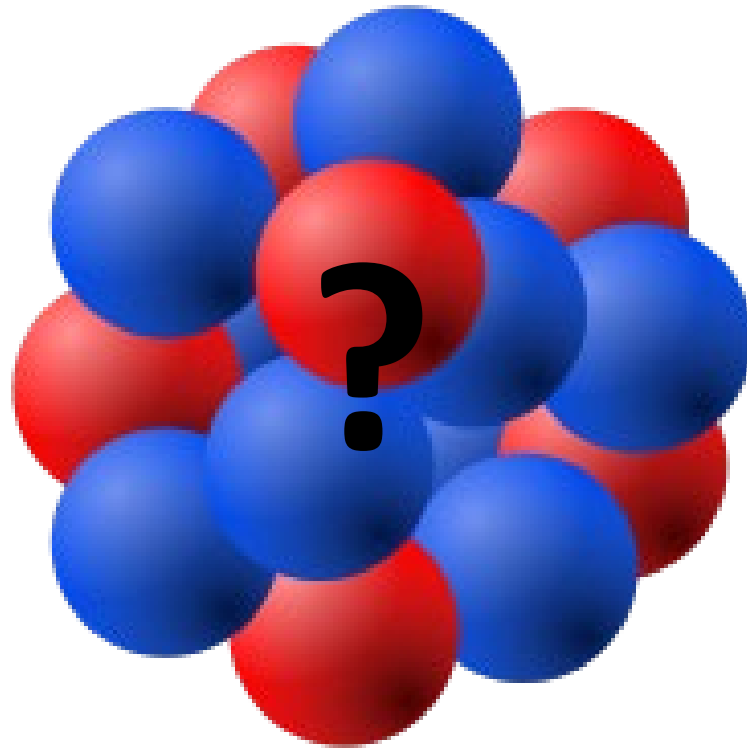
Neutroni







La struttura invisibile agli occhi

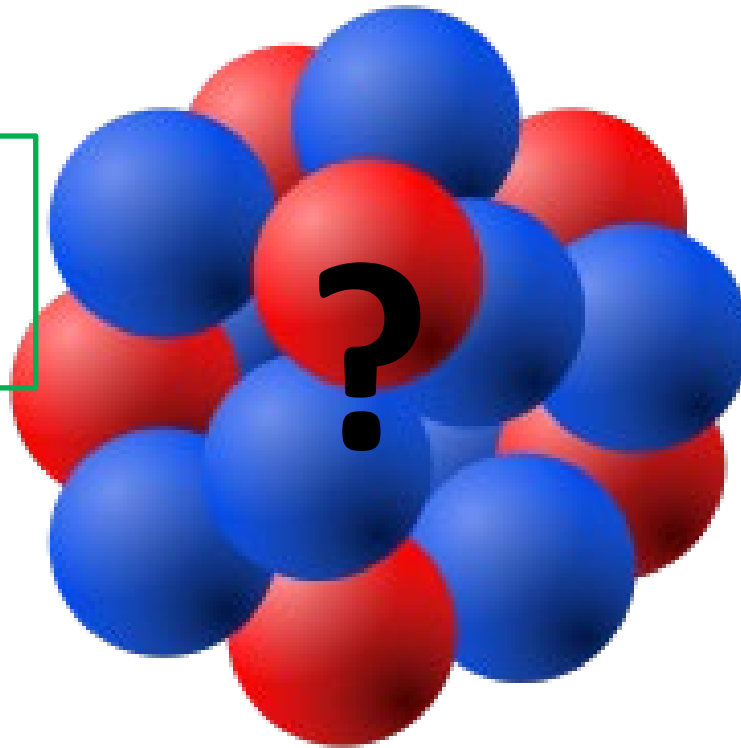




# La struttura invisibile agli occhi

Sistema a molti corpi  
formato da fermioni  
interagenti: protoni e  
neutroni (nucleoni)

Principio di  
esclusione di Pauli



# I numeri magici

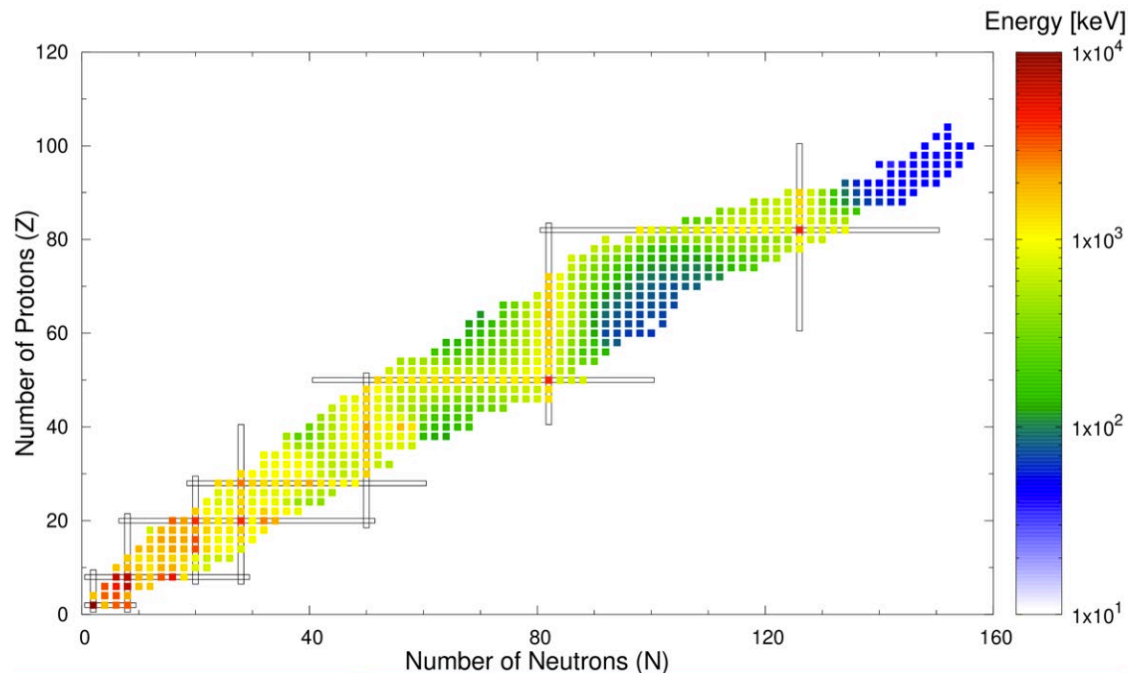
Nuclei con un numero specifico di protoni e neutroni sono più stabili:

**2, 8, 20, 28, 50, 82**

Originano dalla forza nucleare, ma la loro derivazione da principi primi è ancora un problema aperto



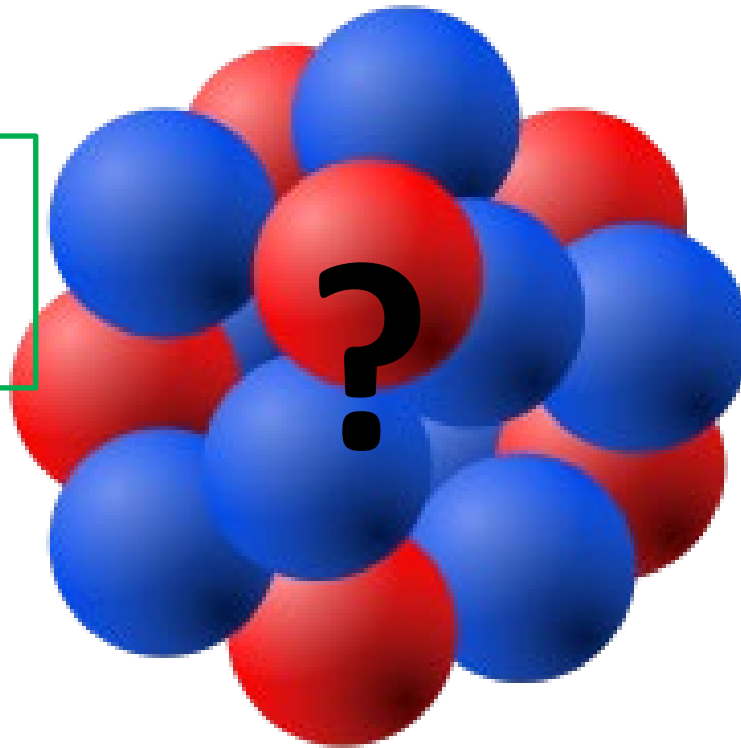
**SHELL MODEL**



Lo stesso concetto in chimica vale per i gas nobili...

# La struttura invisibile agli occhi

Sistema a molti corpi  
formato da fermioni  
interagenti: protoni e  
neutroni



Protoni e neutroni non  
sono particelle  
fondamentali.



L'interazione non è  
fondamentale!

# La struttura dei nucleoni

I nucleoni sono a loro volta formati da particelle fondamentali: i quark.



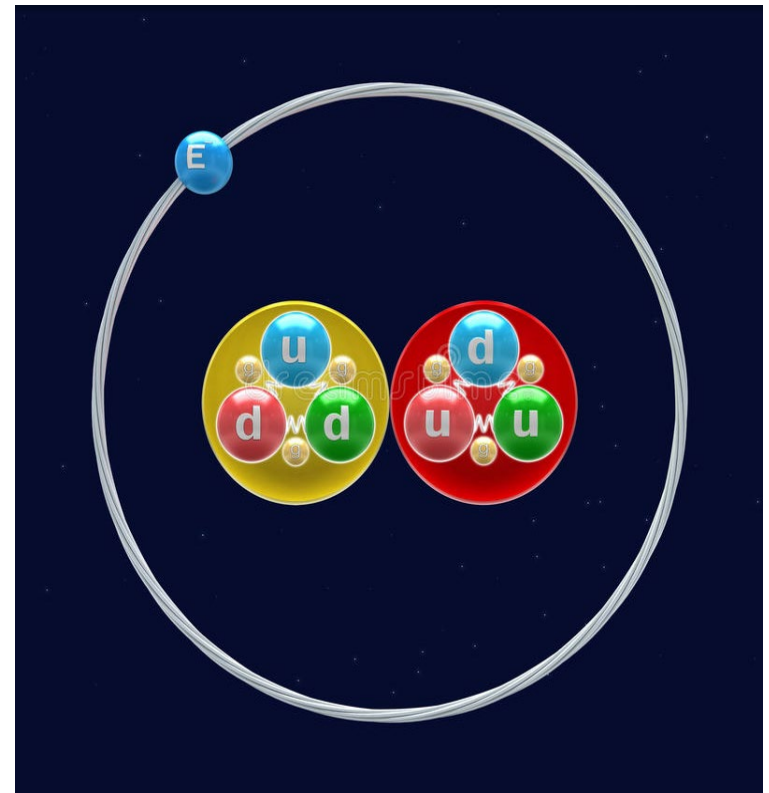
I nucleoni non sono particelle fondamentali!



I nucleoni creano un campo e loro stessi interagiscono con quel campo.



L'interazione nucleare non è semplice  
(non è nemmeno centrale !)



# Atomo VS Nucleo

## Atomo

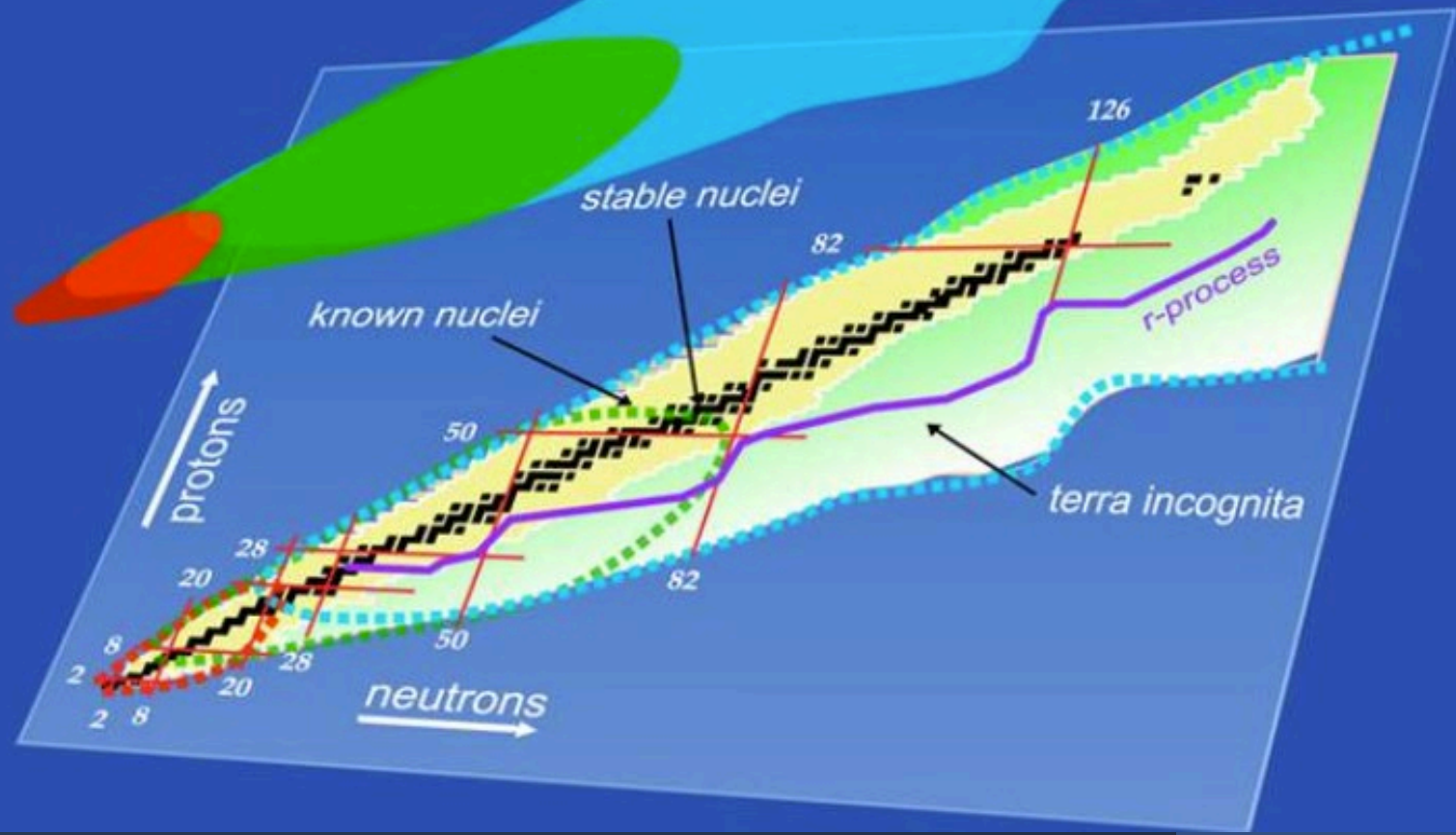
- Sistema di fermioni
- Struttura a shell
- Interazione elettromagnetica
- Particelle elementari

## Nucleo

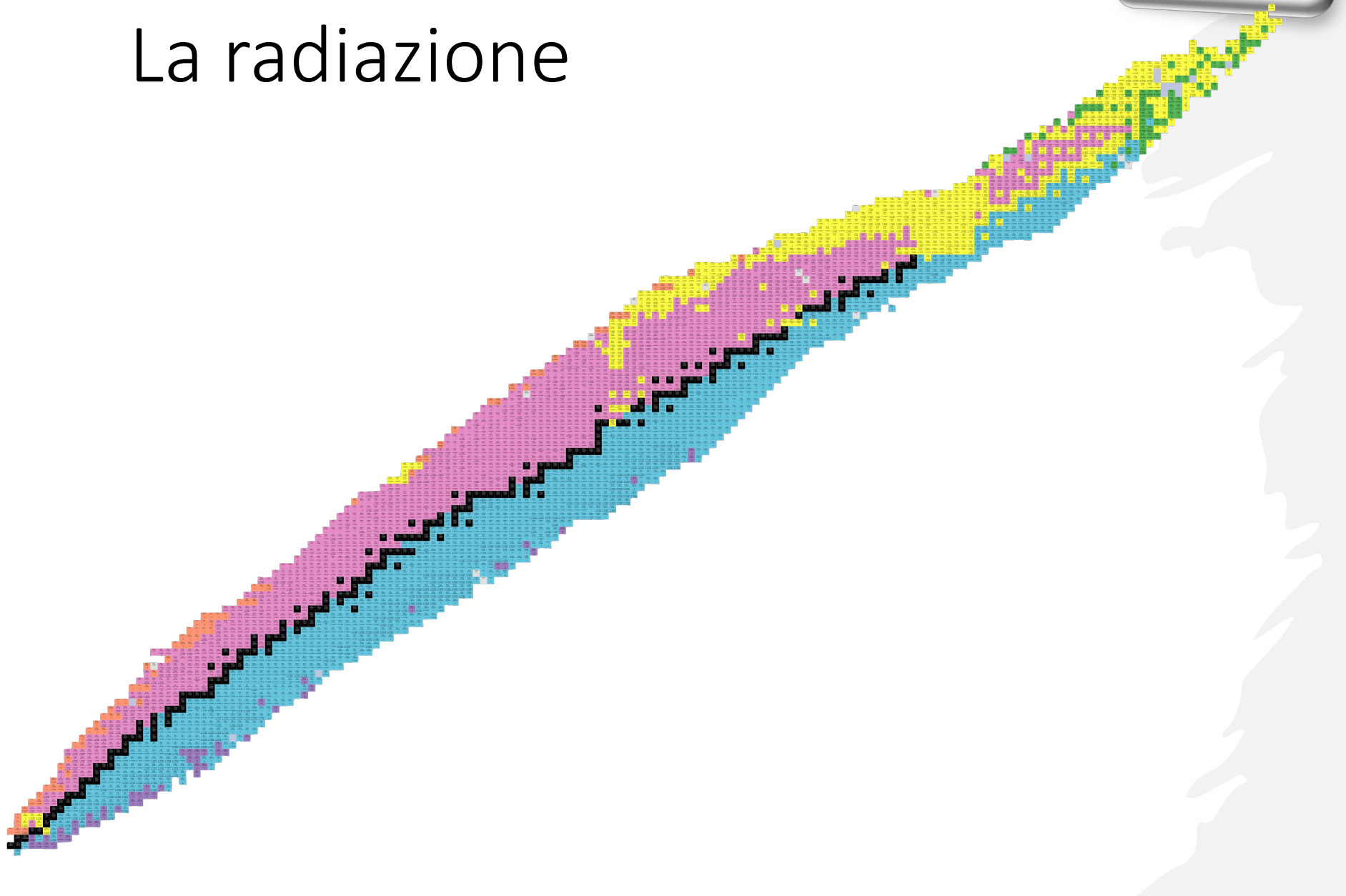
- Sistema di fermioni
- Struttura a shell
- Interazione elettromagnetica +  
Interazione nucleare
- Particelle complesse

# Nuclear Landscape

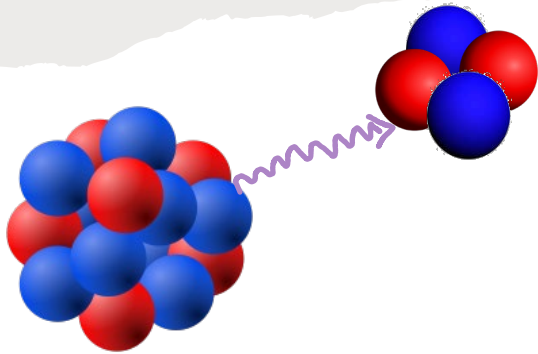
- Ab initio
- Configuration Interaction
- Density Functional Theory



# La radiazione

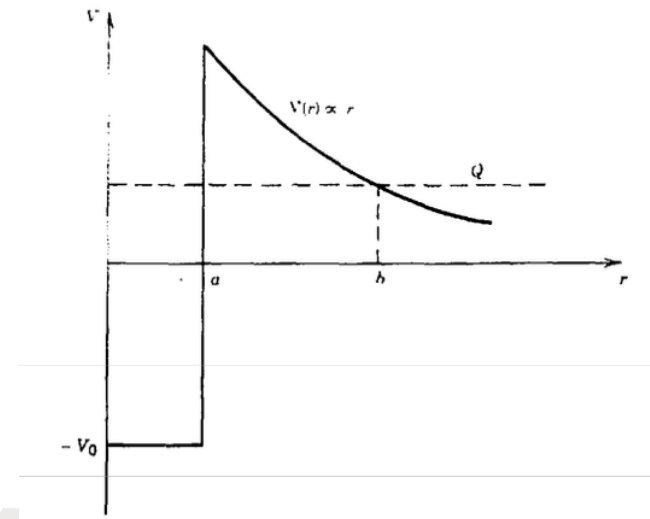


# Il decadimento alfa



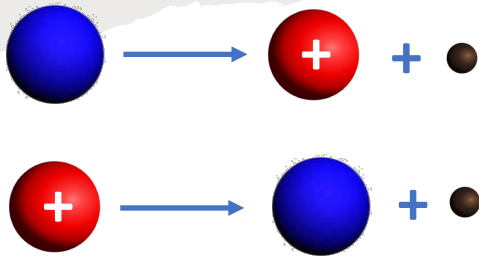
- Il nucleo espelle una particella alfa, riducendo la sua massa di quattro unità;
- Il decadimento alfa è «proibito» dalla barriera Coulombiana, ma avviene per effetto tunnel.

Z	228Pu	229Pu	230Pu	231Pu	232Pu	233Pu	234Pu	235Pu	236Pu	237Pu	238Pu	239Pu	240Pu	241Pu	242Pu	243Pu	244Pu
	227Np	228Np	229Np	230Np	231Np	232Np	233Np	234Np	235Np	236Np	237Np	238Np	239Np	240Np	241Np	242Np	243Np
92	226U	227U	228U	229U	230U	231U	232U	233U	234U	235U	236U	237U	238U	239U	240U	241U	242U
	225Pa	226Pa	227Pa	228Pa	229Pa	230Pa	231Pa	232Pa	233Pa	234Pa	235Pa	236Pa	237Pa	238Pa	239Pa	240Pa	
90	224Th	225Th	226Th	227Th	228Th	229Th	230Th	231Th	232Th	233Th	234Th	235Th	236Th	237Th	238Th	239Th	
	223Ac	224Ac	225Ac	226Ac	227Ac	228Ac	229Ac	230Ac	231Ac	232Ac	233Ac	234Ac	235Ac	236Ac	237Ac		
88	222Ra	223Ra	224Ra	225Ra	226Ra	227Ra	228Ra	229Ra	230Ra	231Ra	232Ra	233Ra	234Ra				
	221Fr	222Fr	223Fr	224Fr	225Fr	226Fr	227Fr	228Fr	229Fr	230Fr	231Fr	232Fr	233Fr				
86	220Rn	221Rn	222Rn	223Rn	224Rn	225Rn	226Rn	227Rn	228Rn	229Rn	230Rn	231Rn					
	134	136	138	140	142	144	146	148	N								



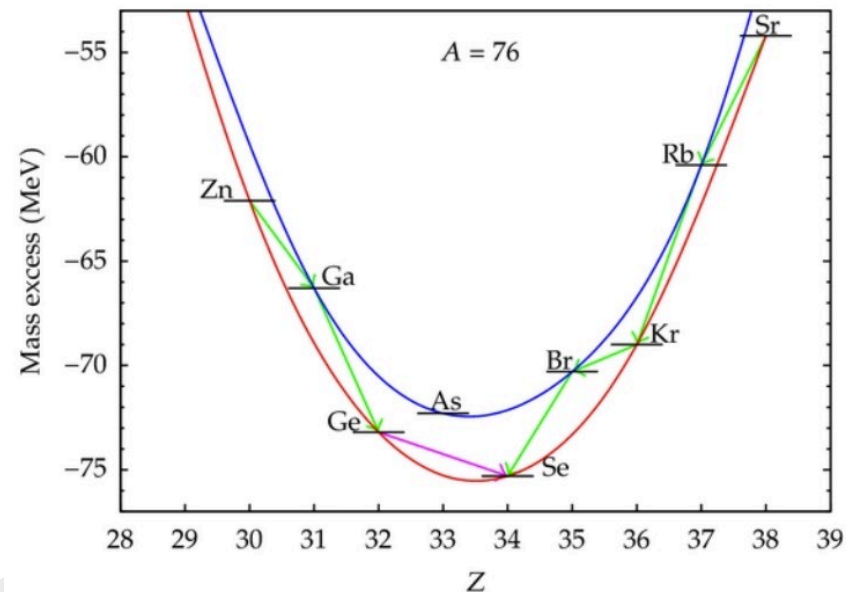
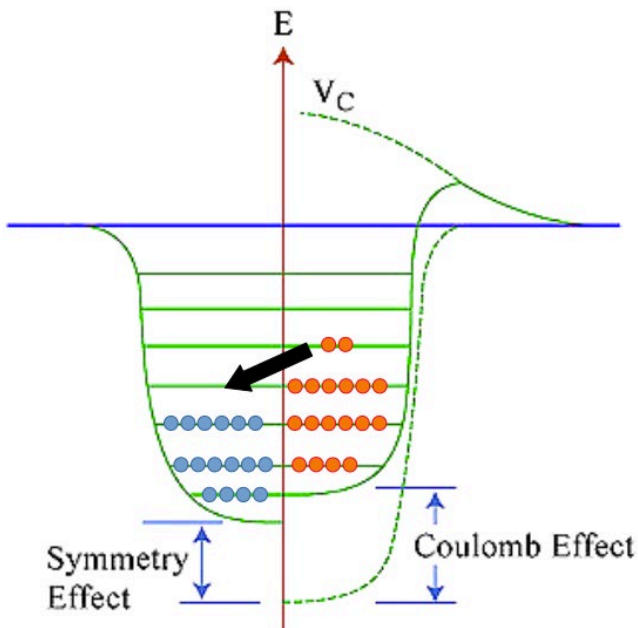


# Il decadimento beta



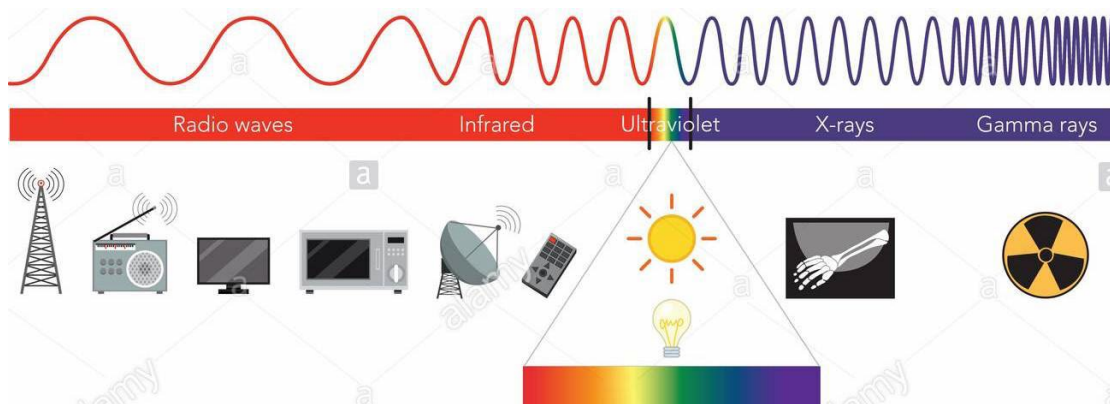
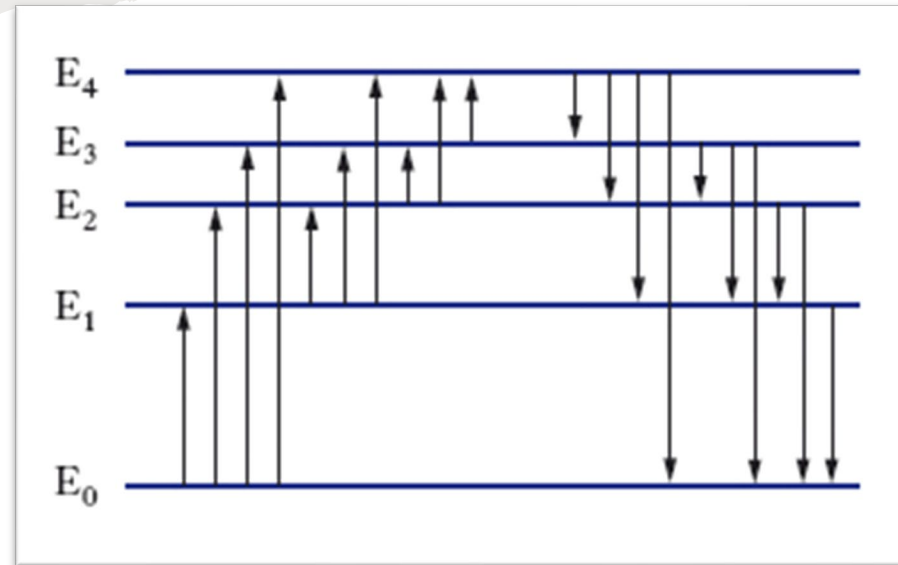
Uno dei neutroni del nucleo si trasforma in un protone ed un elettrone, oppure un protone si trasforma in un neutrone ed un positrone.

La massa del nucleo non cambia.



# Il decadimento gamma

Il nucleo ha una struttura interna con stati eccitati e decade allo stato fondamentale emettendo raggi gamma.



I gamma sono fotoni ad alta energia

# Interazione radiazione-materia

- **Interazione elettromagnetica:**

- Particelle cariche (elettroni, protoni, alfa...);
- Fotoni;

- **Interazione nucleare:**

- Protoni, alfa, ioni...
- Neutroni.

# Particelle cariche

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = \frac{4\pi}{m_e c^2} \cdot \frac{n z^2}{\beta^2} \cdot \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \cdot \left[ \ln \left( \frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)} \right) - \beta^2 \right]$$

Electron number density:

$$n = \frac{N_A Z \rho}{A}$$

Impinging charged-particle  
atomic number

Relativistic  
correction

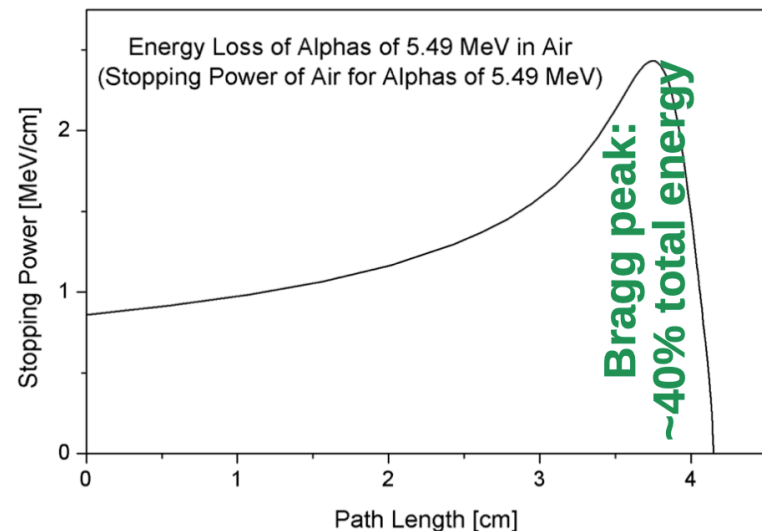
Mean excitation potential:  
 $I \sim (10 \text{ eV}) z$

Le particelle cariche (p, alfa, ioni...) interagiscono con la materia tramite interazioni elettromagnetiche.

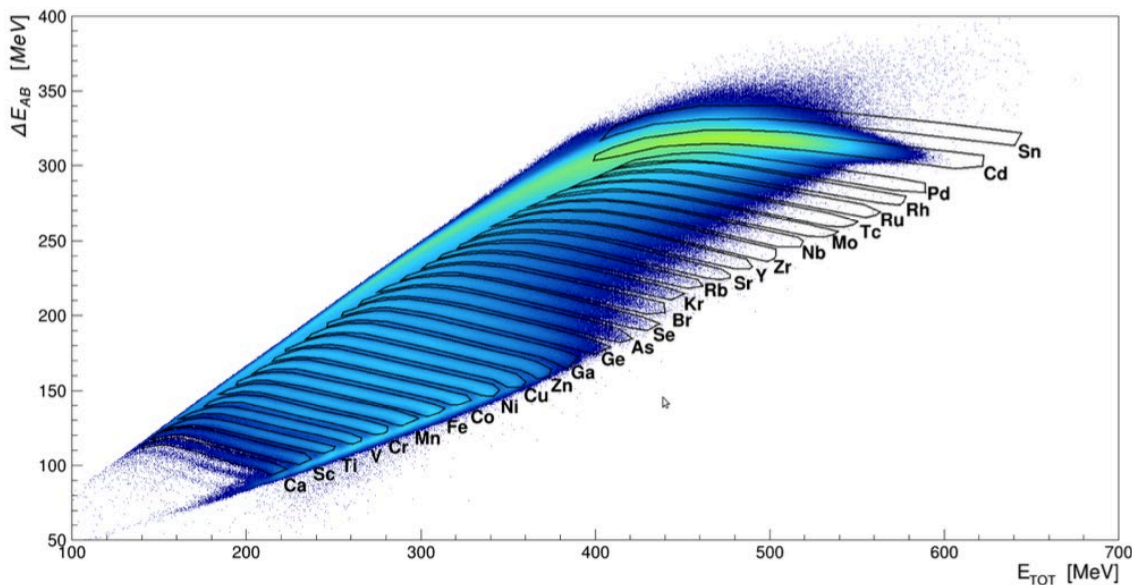
La perdita di energia dipende dal numero atomico Z della particella e dalla densità del materiale.

# Particelle cariche

Le particelle non perdono energia in modo uniforme: la perdita di energia dipende dalla velocità.



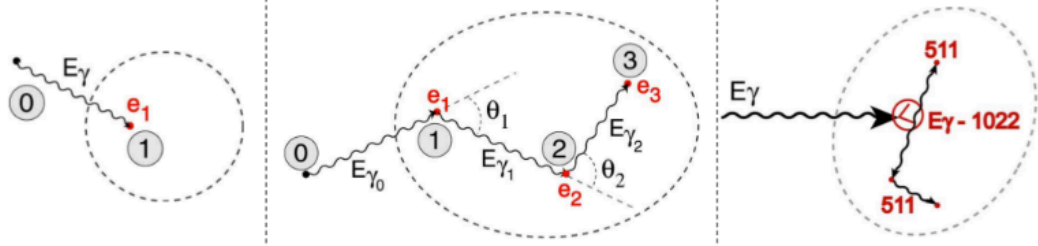
Queste caratteristiche ci permettono di identificare le particelle rispetto al loro numero atomico.



# Radiazione elettromagnetica

~ 100 keV      ~1 MeV      ~ 10 MeV       $\gamma$ -ray energy

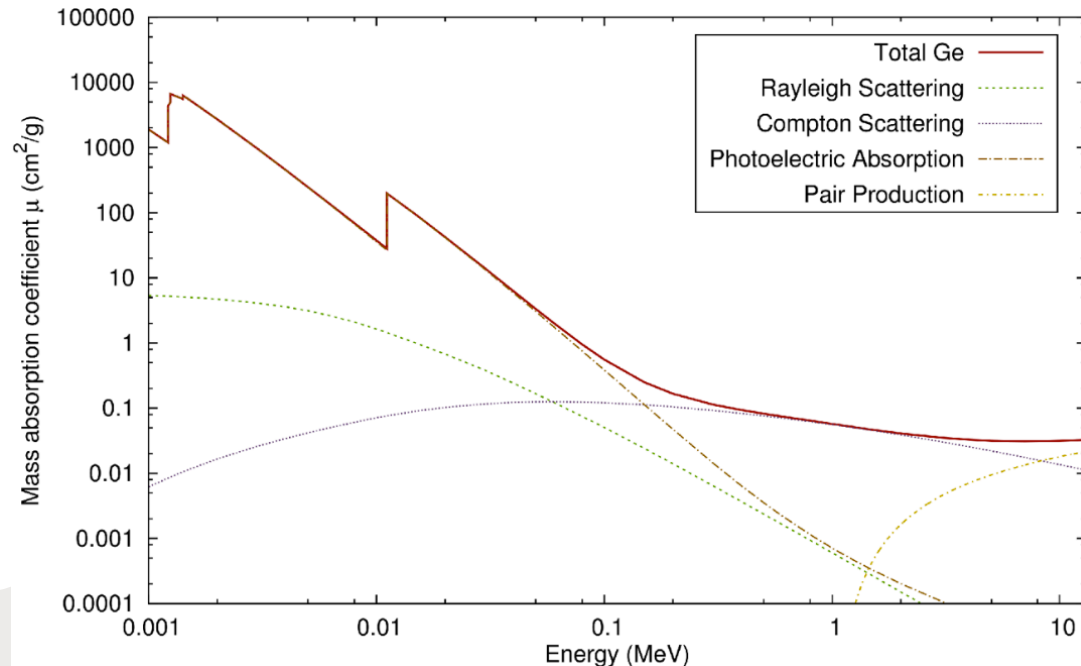
**Photoelectric**      **Compton Scattering**      **Pair Production**



Tre meccanismi:

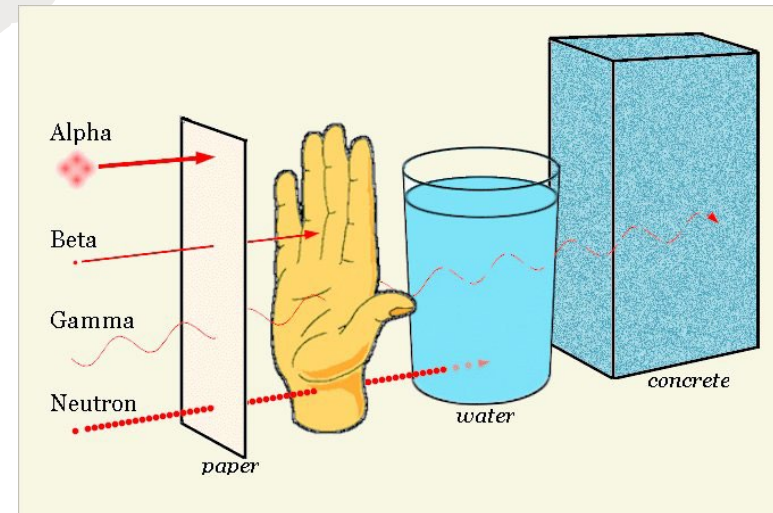
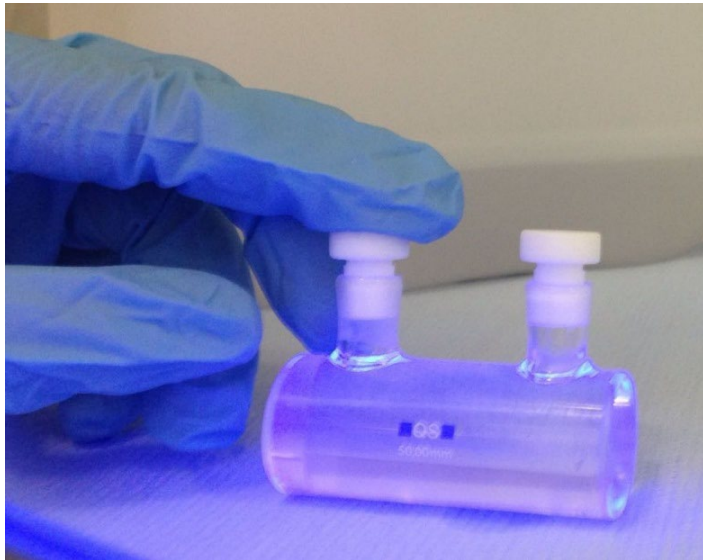
- Effetto fotoelettrico
- Scattering Compton
- Produzione di coppie

Questi meccanismi hanno probabilità diverse a seconda dell'energia del fotone!



# Neutroni

I neutroni non hanno carica: non interagiscono elettromagneticamente!  
Solo interazioni nucleari.



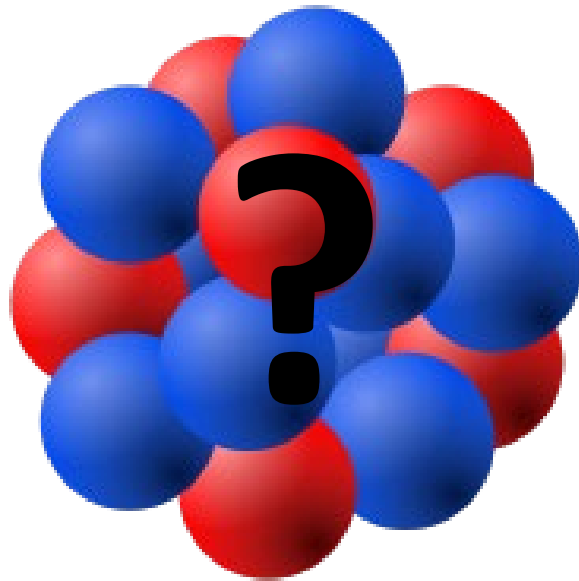
Esistono molti tipi diversi di rivelatori a seconda dello scopo.



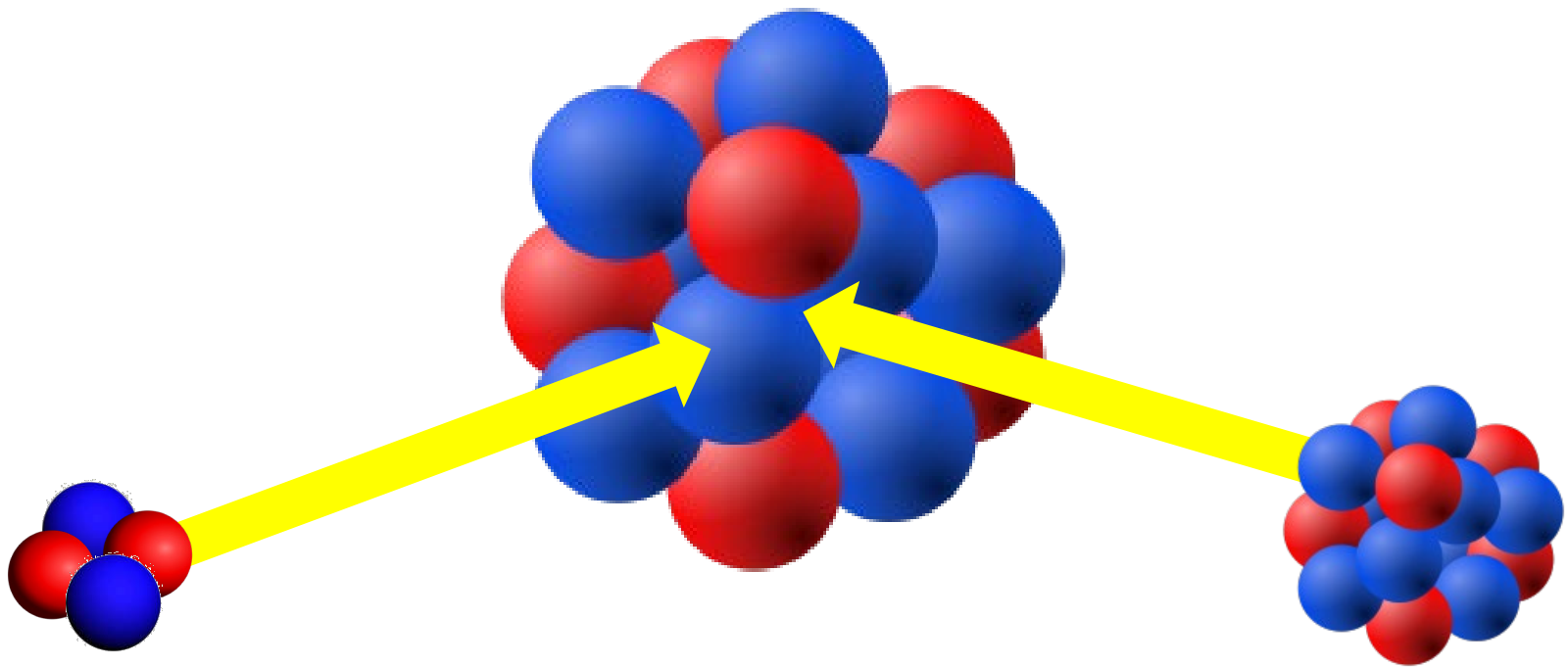
Domande?



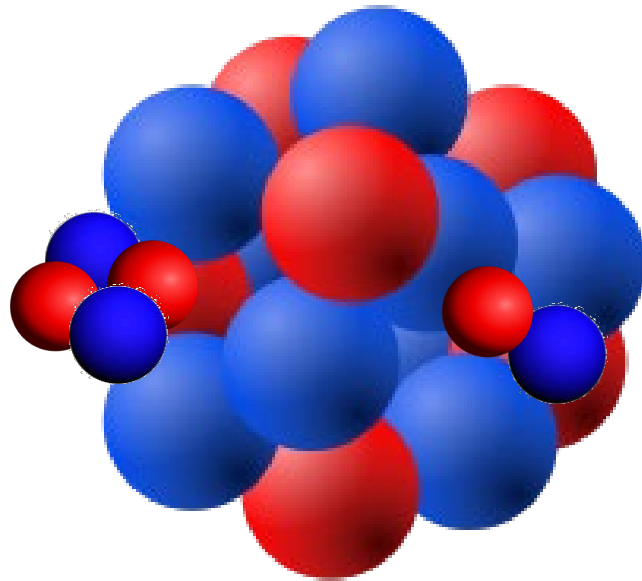
Come studiare un nucleo



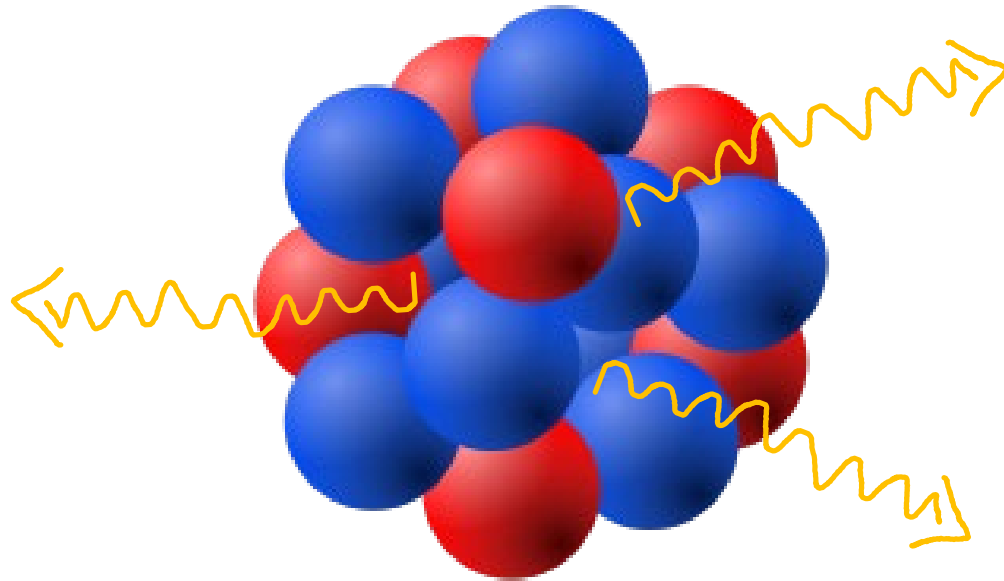
# Come studiare un nucleo



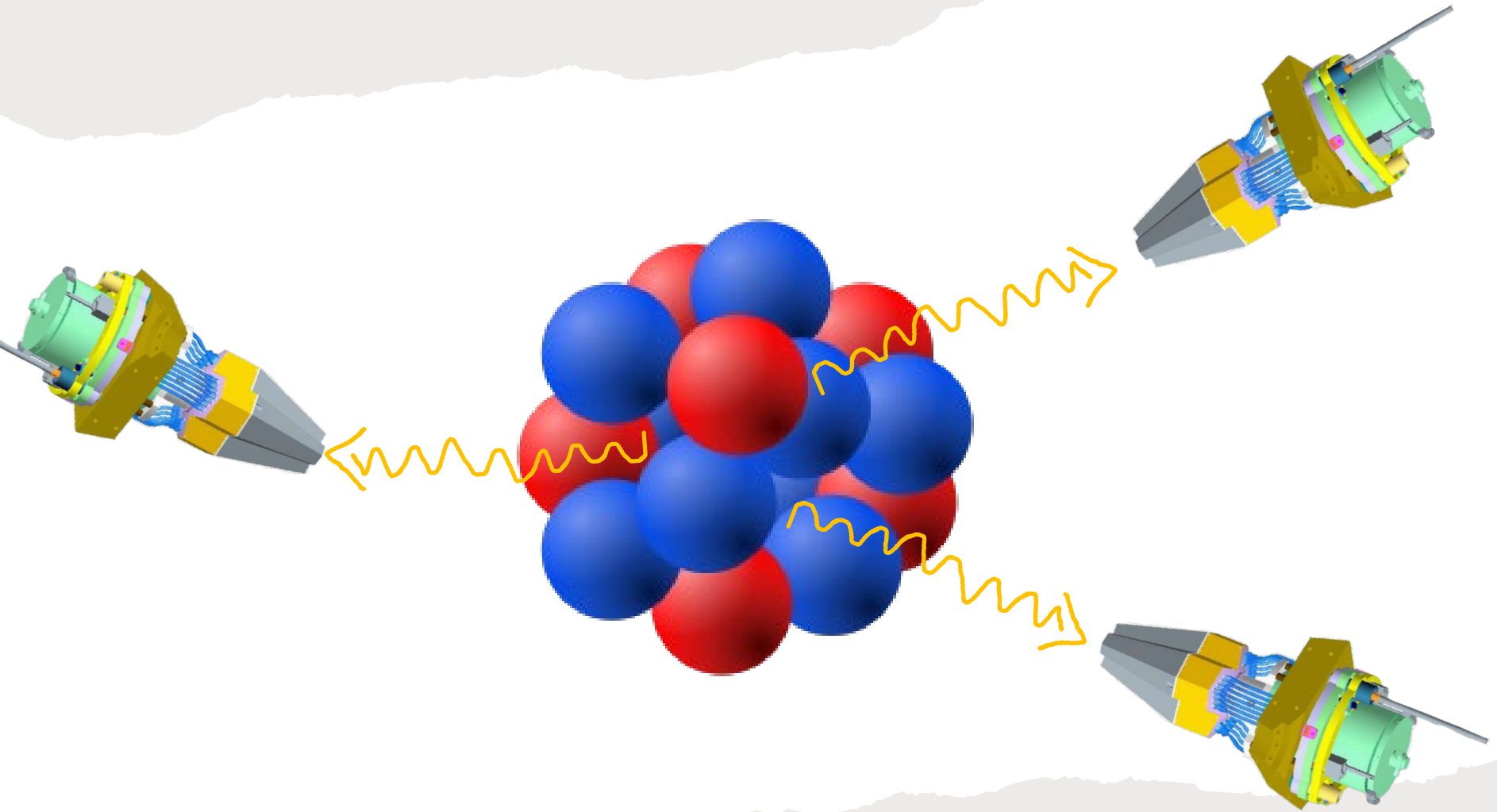
# Come studiare un nucleo



# Come studiare un nucleo



# Come studiare un nucleo



# Come studiare un nucleo

**Il rivelatore perfetto NON ESISTE!**

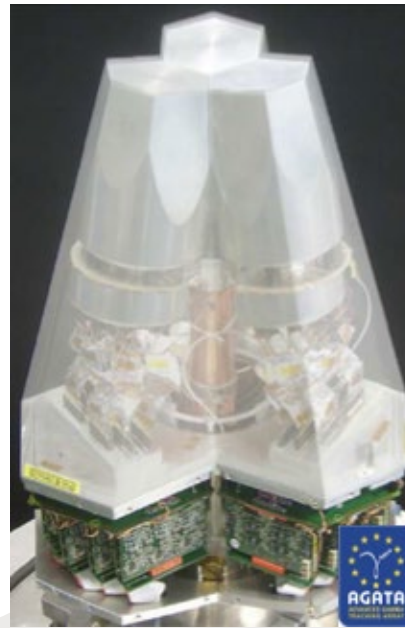
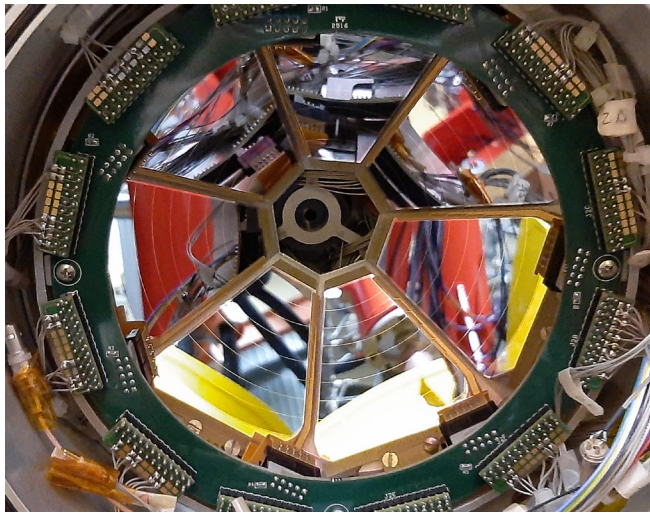
Dobbiamo saperci porre le giuste domande:

- Particelle da rivelare;
- Energia (range, risoluzione...);
- Efficienza;
- Risposta veloce;
- Resistenza alle radiazioni;
- Prezzo...

# I rivelatori

I rivelatori possono essere divisi in tre categorie:

- Semiconduttori (Ge, Si...)
- Scintillatori (organici vs inorganici, solidi vs liquidi);
- Rivelatori a gas...



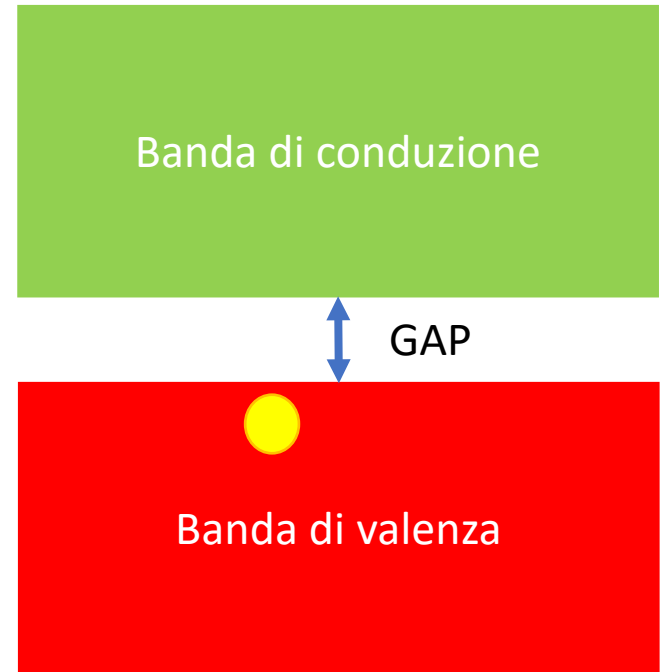
# Semiconduttori

Nei semiconduttori l'energia necessaria per estrarre un elettrone è molto bassa!

La radiazione interagisce con gli elettroni del materiale.

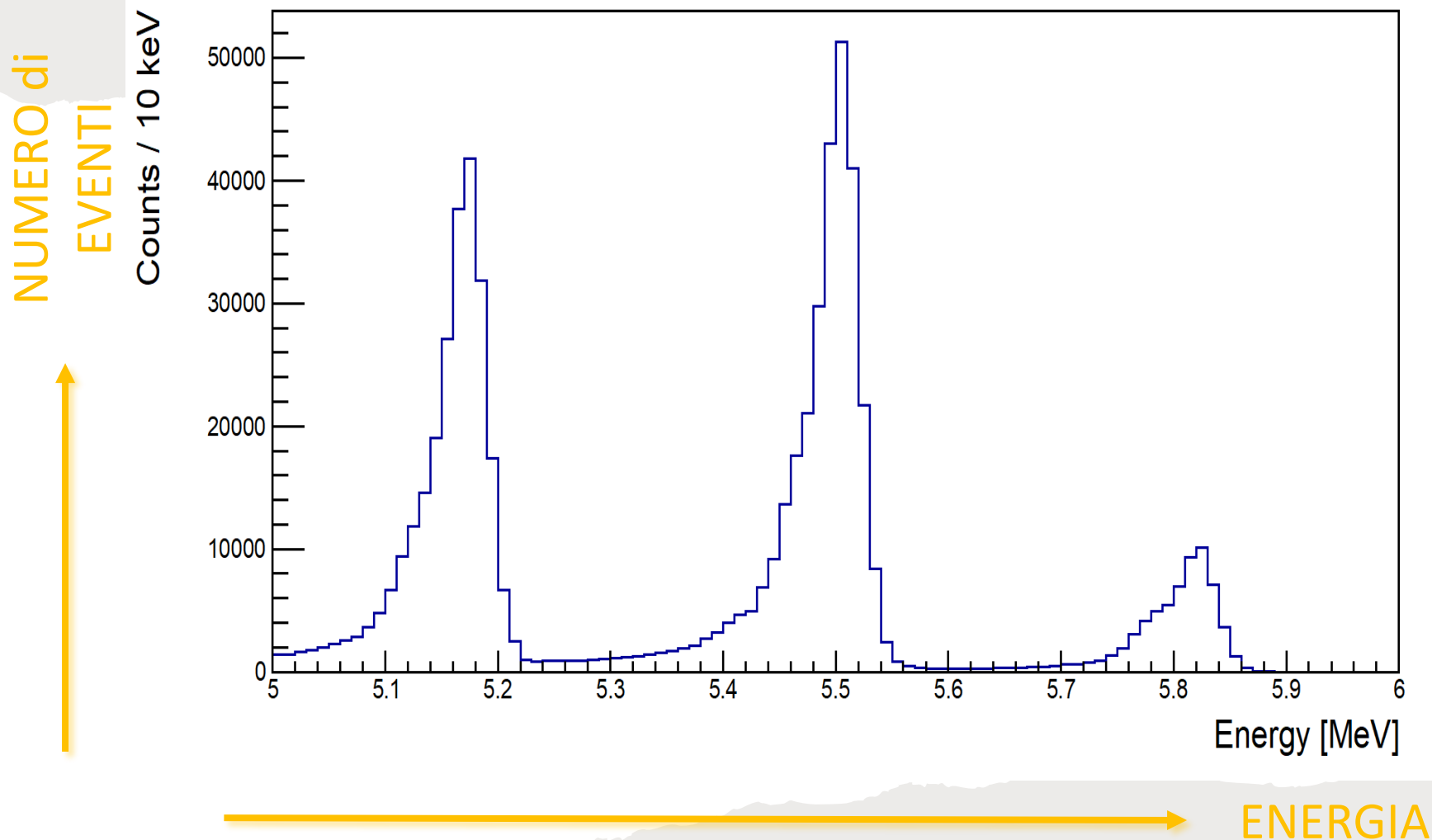


Gli elettroni vengono accelerati e raccolti per formare un segnale elettrico





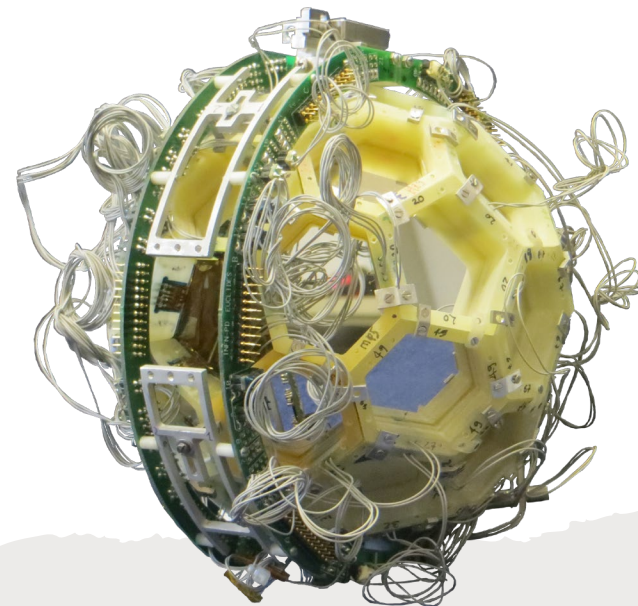
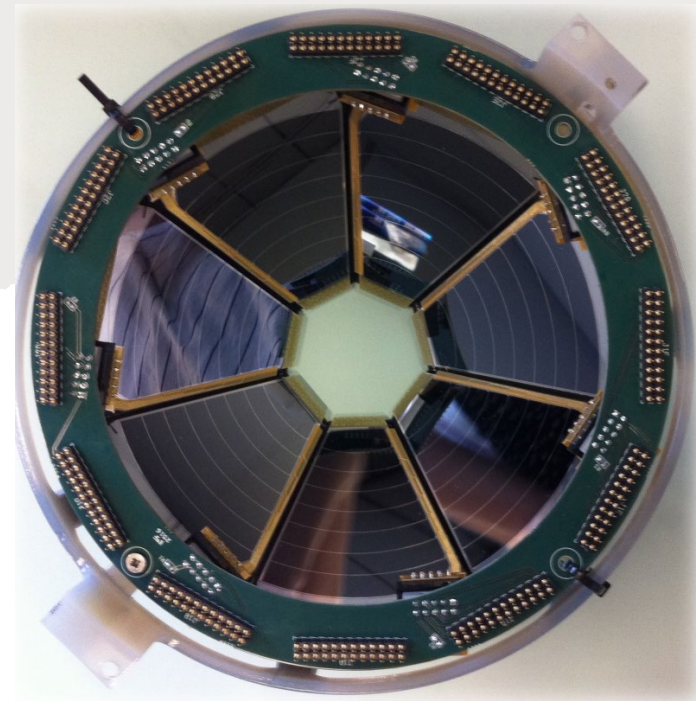
# Lo spettro di energia



# Rivelatori al silicio

- Adatti a rivelare particelle cariche;
- Buona risoluzione energetica e temporale;
- Possibilità di identificare la particella incidente tramite PSA;
- Possibilità di assemblarli in array per coprire un maggiore angolo solido.

Tre array di rivelatori al silicio a LNL:  
SPIDER, EUCLIDES, TRACE



# Rivelatori al germanio

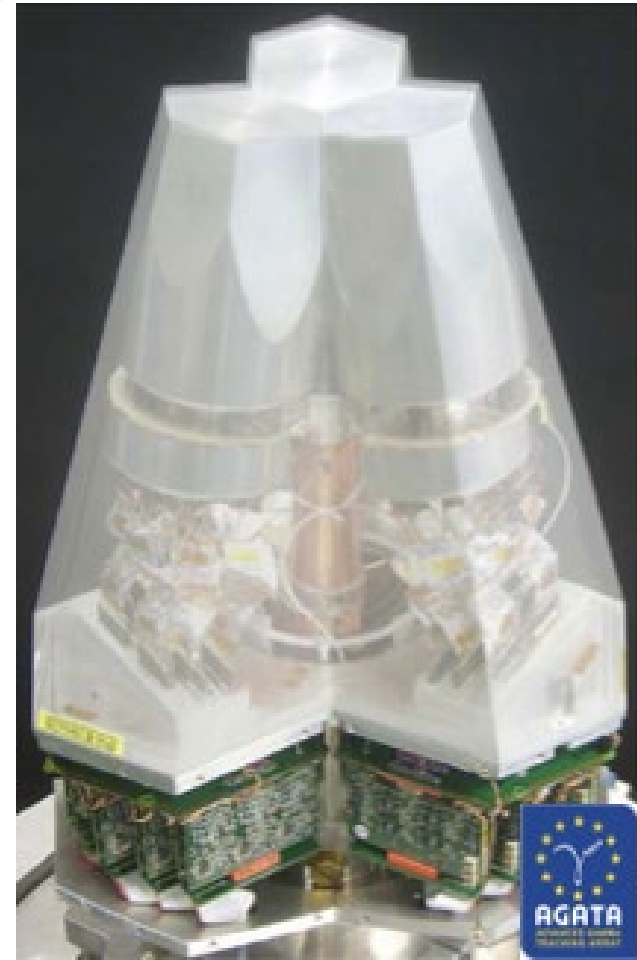
Nei semiconduttori l'energia necessaria per estrarre un elettrone è molto bassa!



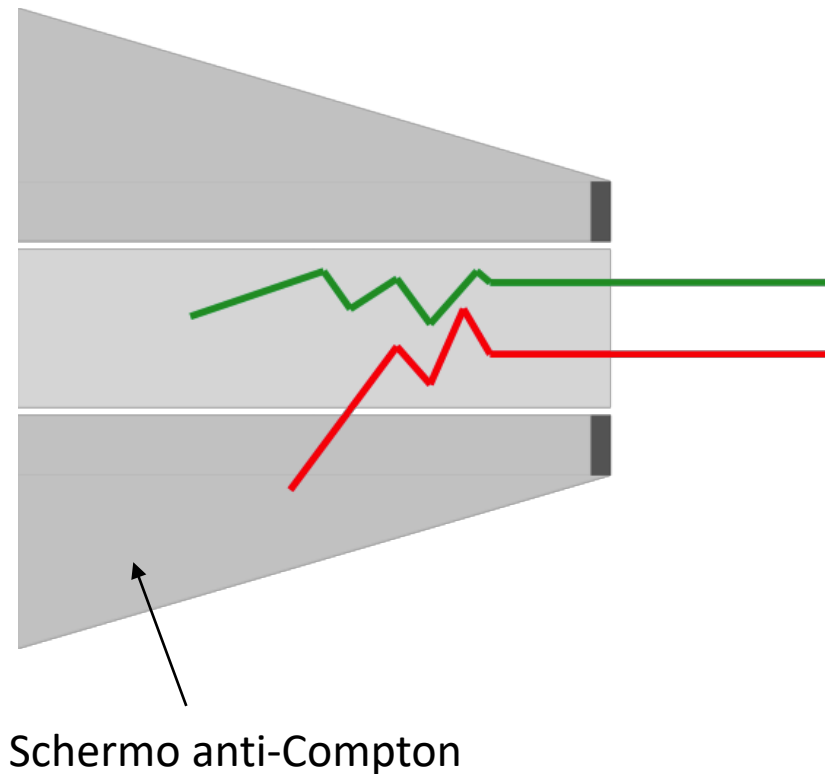
Necessità di  
mantenerli a bassa  
temperatura



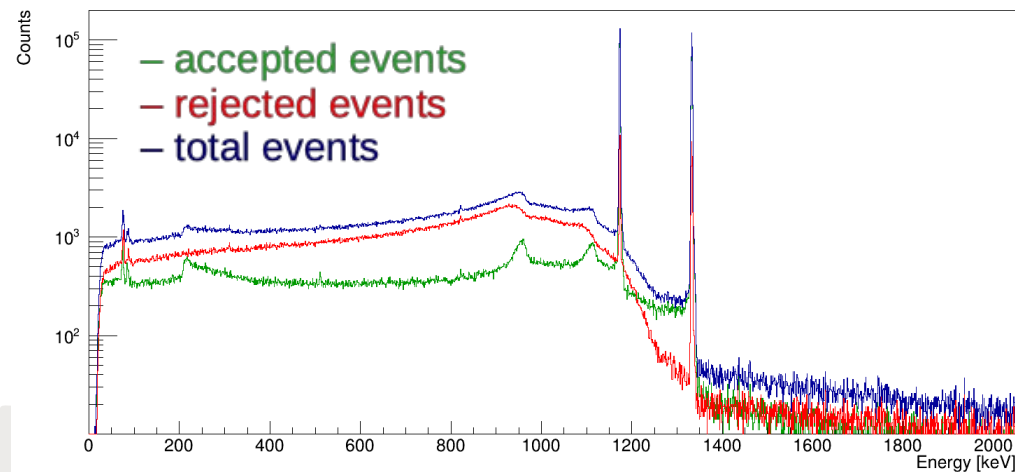
Ottima risoluzione  
energetica!



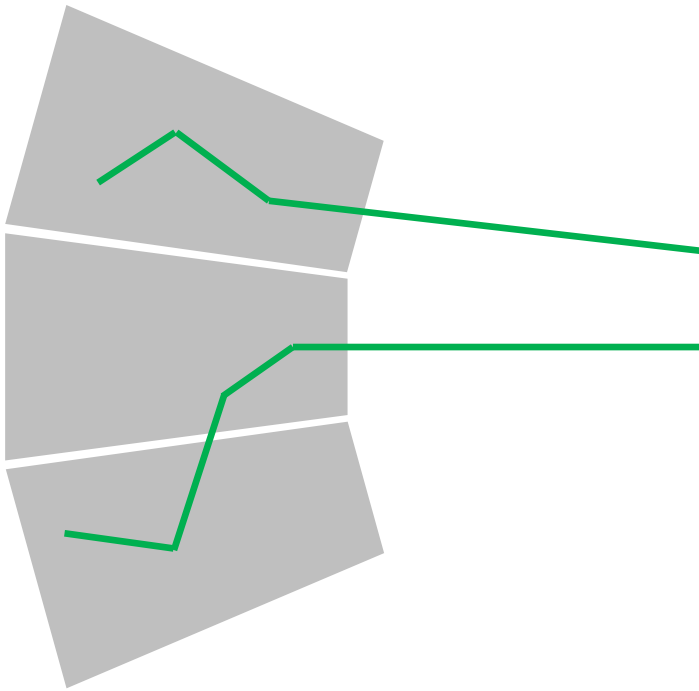
# Rivelatori al germanio



- I fotoni interagiscono col materiale principalmente tramite scattering Compton.
- Se un fotone esce dal germanio viene rivelato dallo scintillatore;
- Elimina la «spalla Compton»
- Riduce l'efficienza.

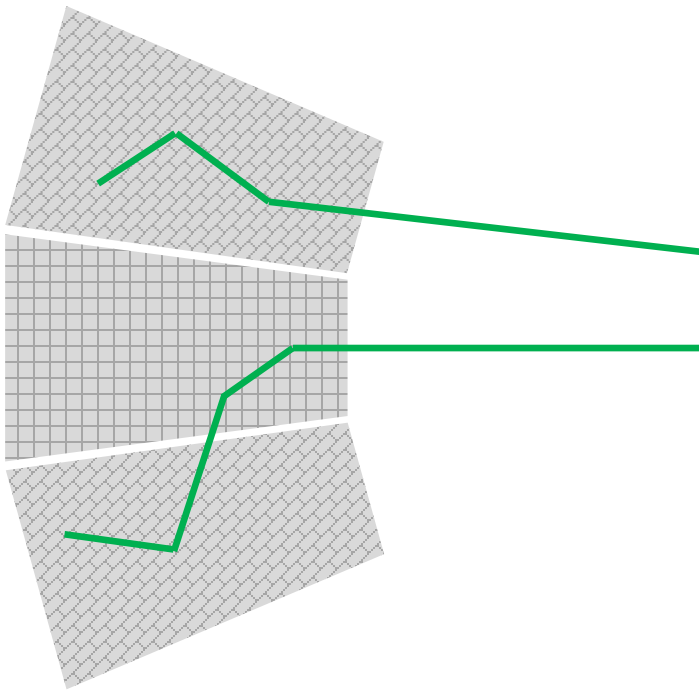


# Rivelatori al germanio



- Se un fotone «esce» dal germanio viene rivelato da un altro germanio;
- L'energia iniziale della particella viene ricostruita;
- L'efficienza dell'array (angolo solido) aumenta.

# Rivelatori al germanio



- Se un fotone «esce» dal germanio viene rivelato da un altro germanio;
- L'energia iniziale della particella viene ricostruita;
- L'efficienza dell'array (angolo solido) aumenta.
- Il punto di ingresso del fotone è ricostruito con migliore precisione;
- Migliore risoluzione angolare;
- (Migliore risoluzione energetica per gamma emessi da nuclei in volo).

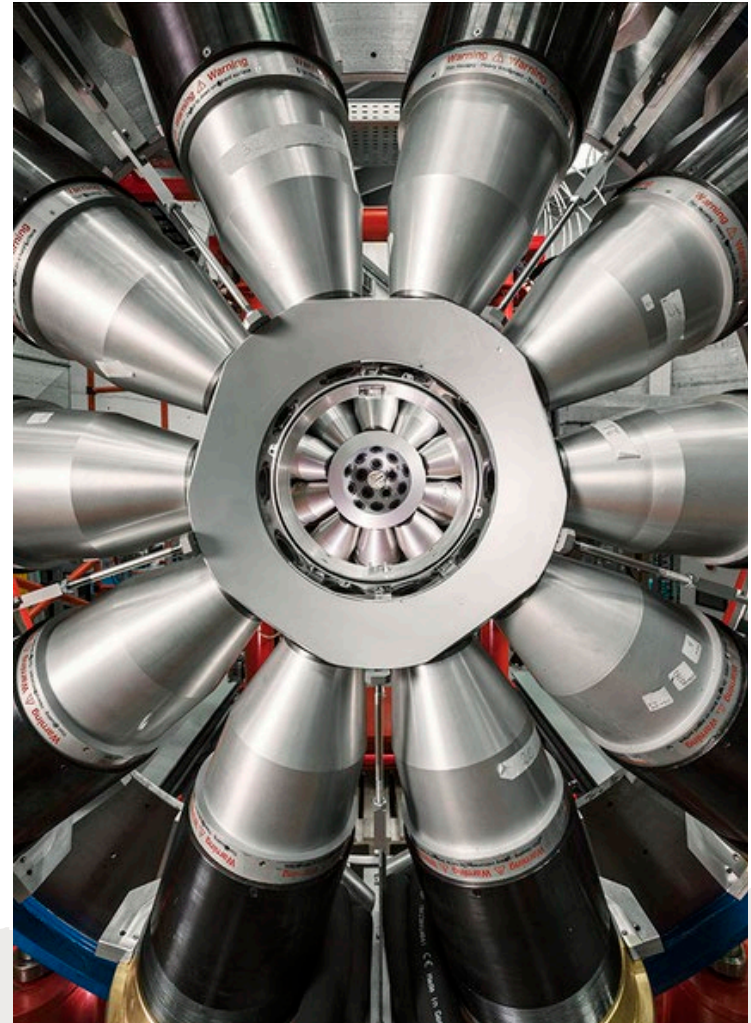
# L'array GALILEO a LNL

## Fase 1

- 25 rivelatori singoli + schermi AC;
- Efficienza 2.4% a 1.3 MeV;
- Risoluzione 2.4 keV a 1.3 MeV

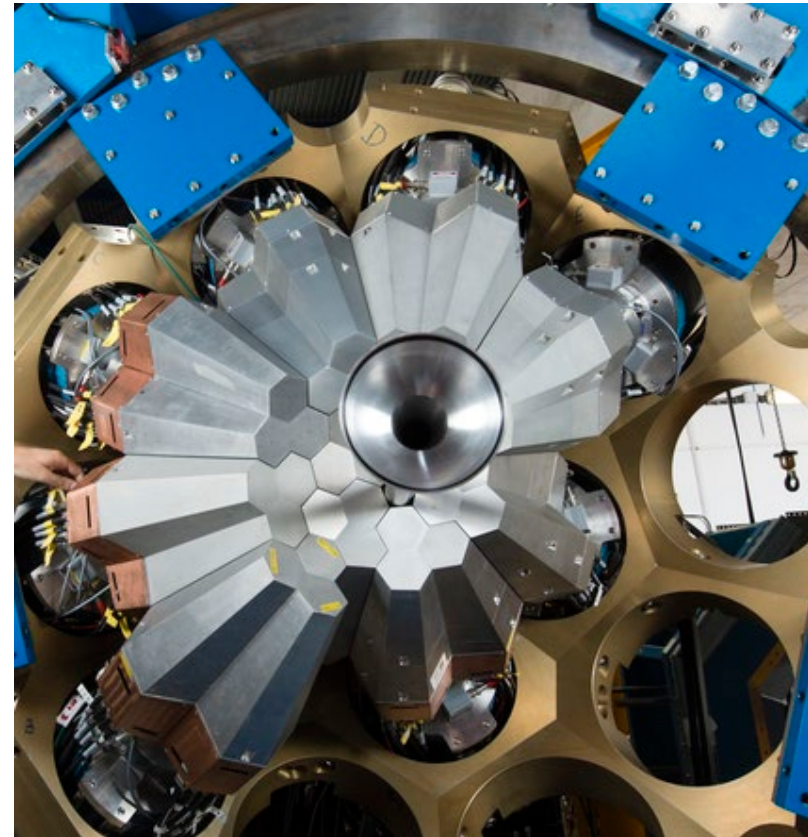
## Fase 2

- 25 rivelatori singoli + schermi AC;
- 10 rivelatori tripli + schermi AC;
- Efficienza 4.5% a 1.3 MeV;



# L'array AGATA a GANIL (ora è qui !)

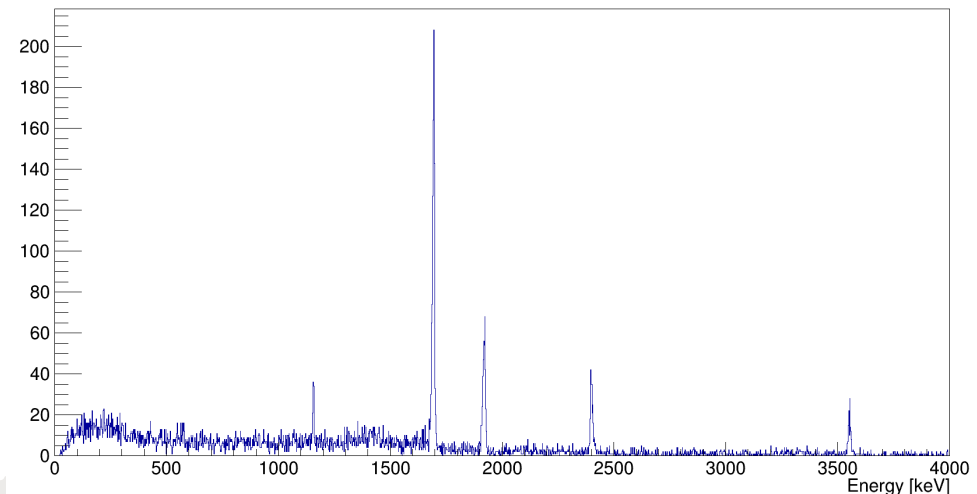
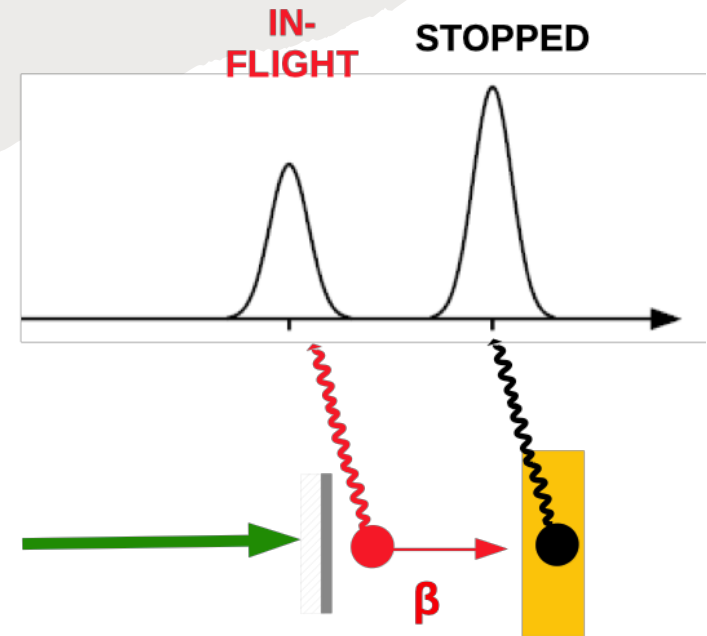
- 45 rivelatori segmentati;
- Efficienza 13% a 1.3 MeV;
- Risoluzione 3.5 keV a 1.3 MeV;
- Risoluzione spaziale 5 mm;
- Stato dell'arte dei rivelatori al germanio.





# La correzione Doppler

- Se il raggio gamma è emesso dal nucleo in volo, l'energia rivelata cambierà a seconda dell'angolo e della velocità;
- Conoscendo la velocità e l'angolo è possibile correggere lo spettro e ricostruire l'energia iniziale del fotone.



# Scintillatori

La radiazione interagisce con gli atomi del materiale scintillatore.



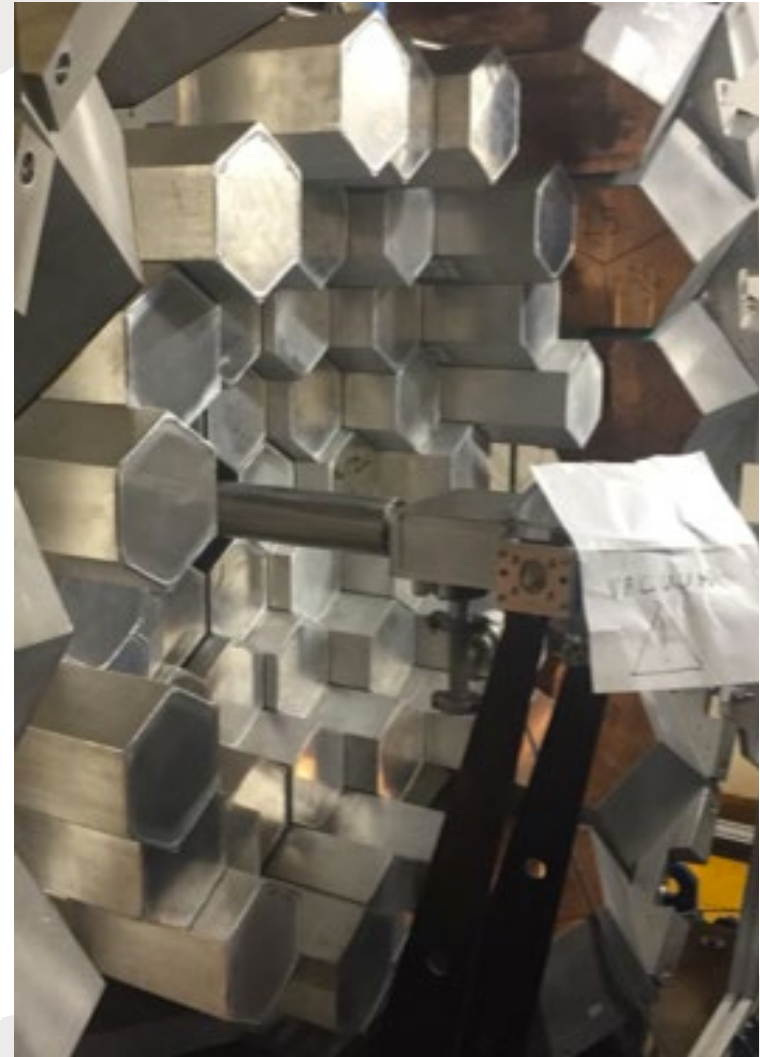
Gli elettroni, nel diseccitarsi, rilasciano luce nel visibile.



La quantità fotoni prodotti è proporzionale all'energia.

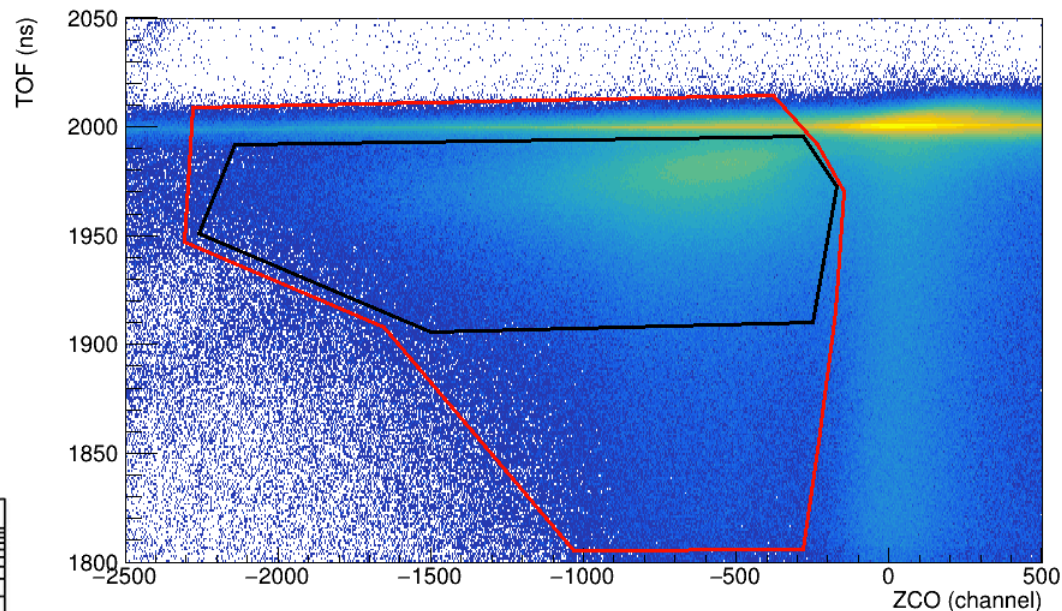
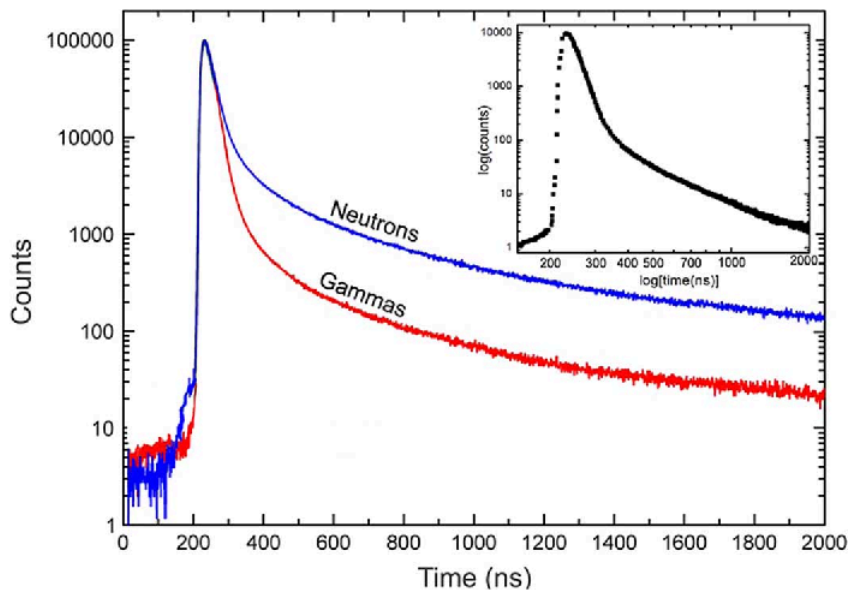


I fotoni arrivano al fotomoltiplicatore che genera un segnale elettrico.



# Scintillatori

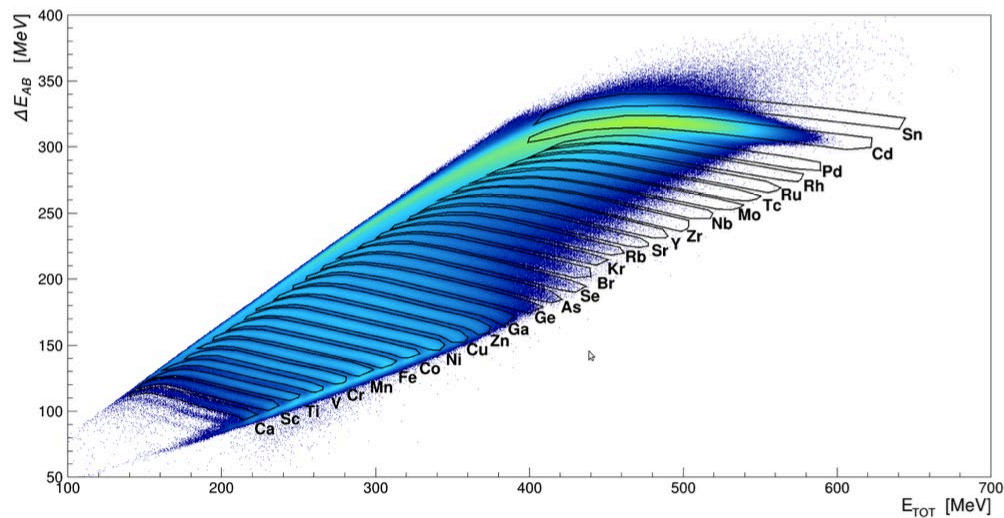
- Buona efficienza;
- Buona risposta temporale;
- Discriminazione neutroni-fotoni (velocità, forma del segnale);



In esperimenti con fasci di ioni, la neutron-gamma discrimination (NGD) è utilizzata per selezionare eventi emessi in coincidenza con neutroni per ridurre il fondo

# Rivelatori a gas

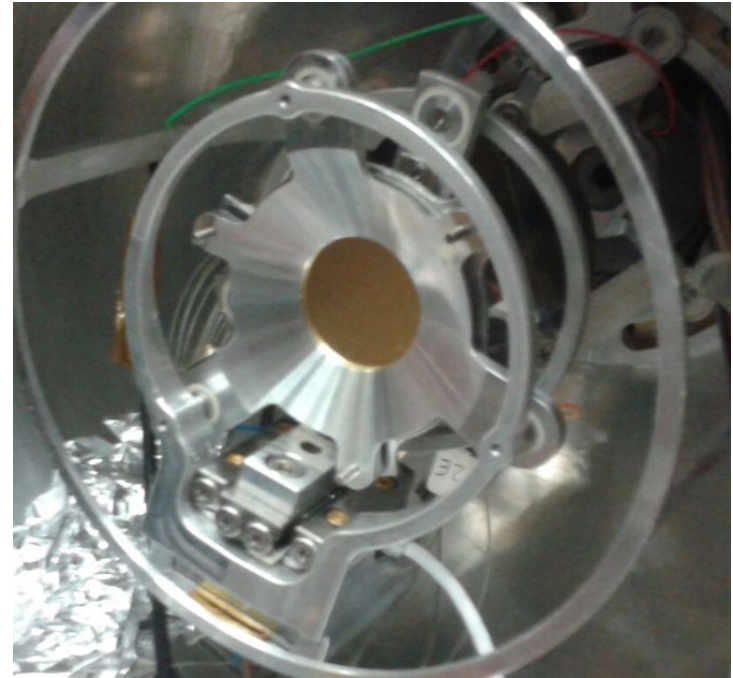
- Usati per la rivelazione di particelle cariche;
- Identificazione in massa e numero atomico;
- Buona risposta temporale.



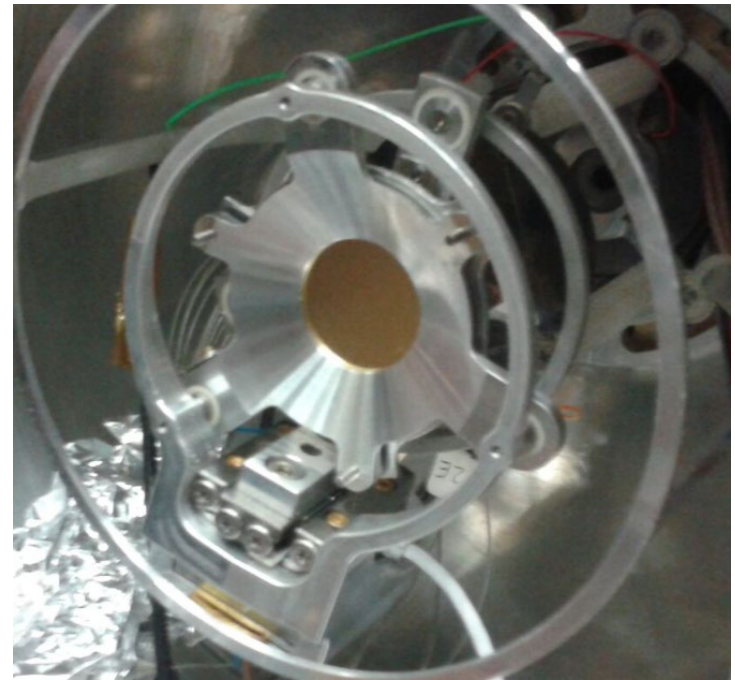
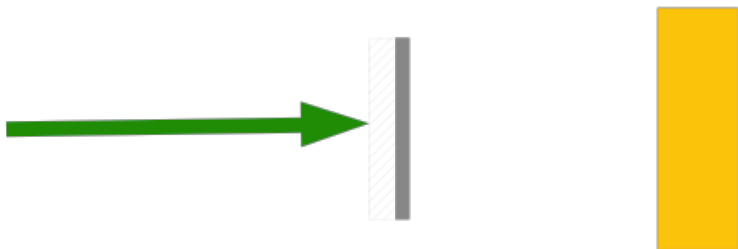
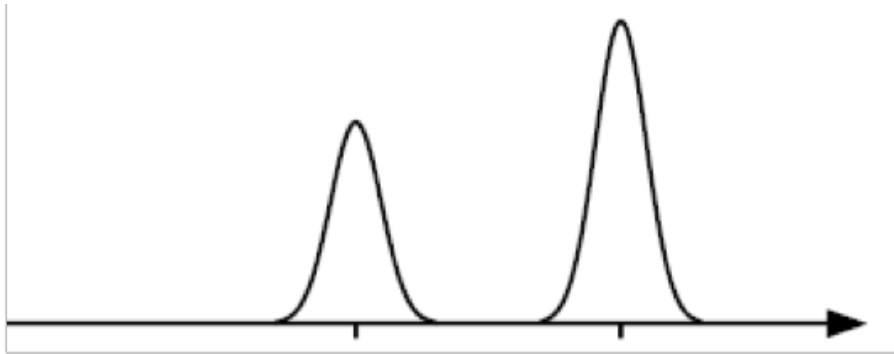
Utilizzati insieme ai rivelatori al germanio o al silicio permettono di selezionare i canali di interesse e pulire lo spettro, ma anche conoscere l'energia e la velocità dello ione.

# Il plunger

- Il motore sposta la distanza tra bersaglio e stopper tra  $10\ \mu\text{m}$  – 1 cm;
- Precisione 150 nanometri;
- Feedback sotto i  $100\ \mu\text{m}$ ;
- Utilizzato per misurare vite medie di stati eccitati nel range dei ps.

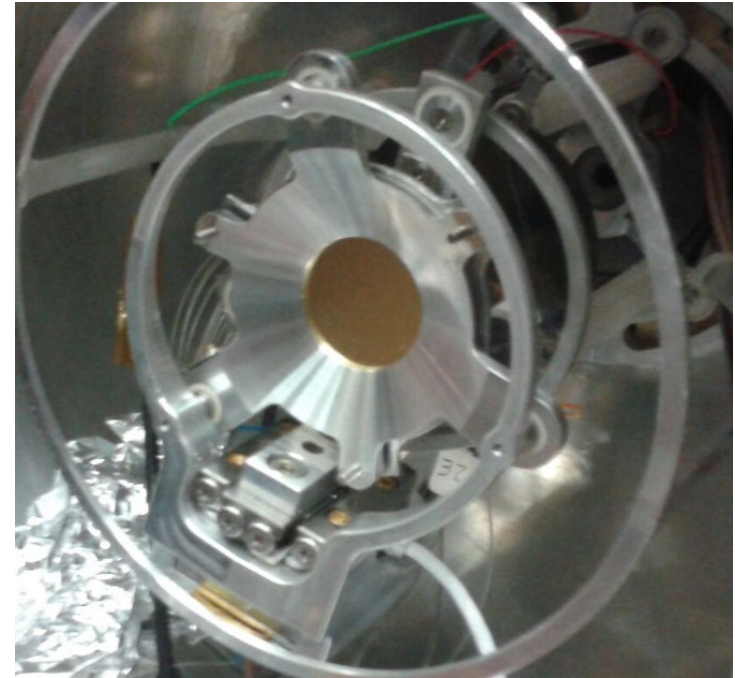
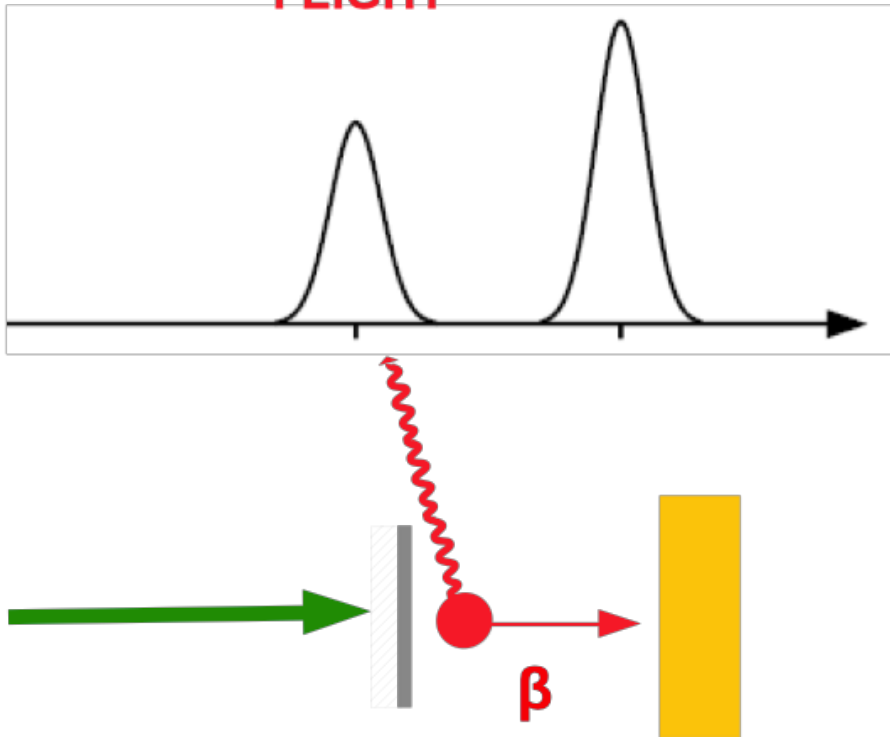


# Il plunger

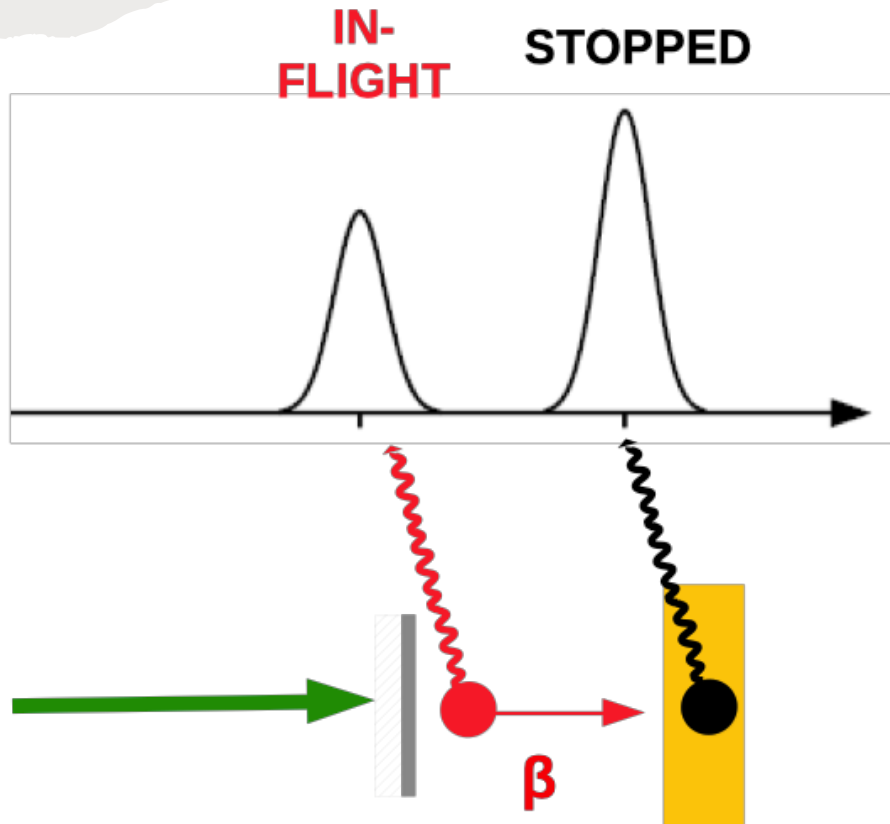


# II plunger

IN-FLIGHT



# Il plunger

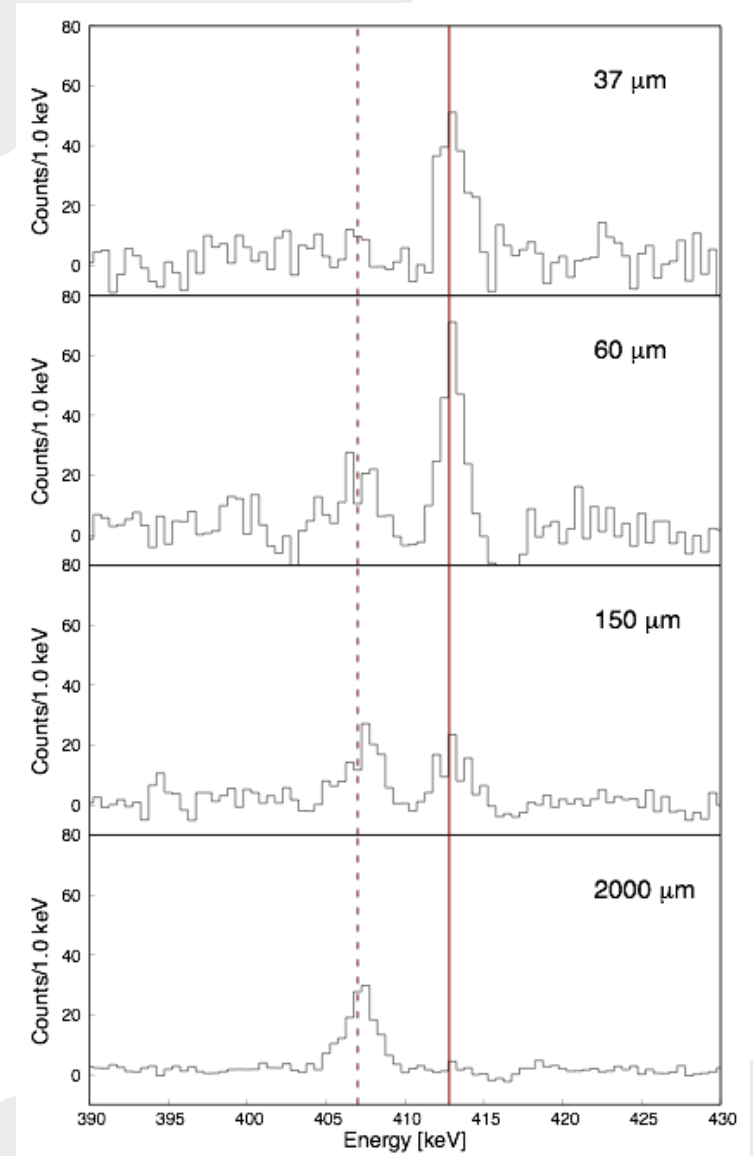
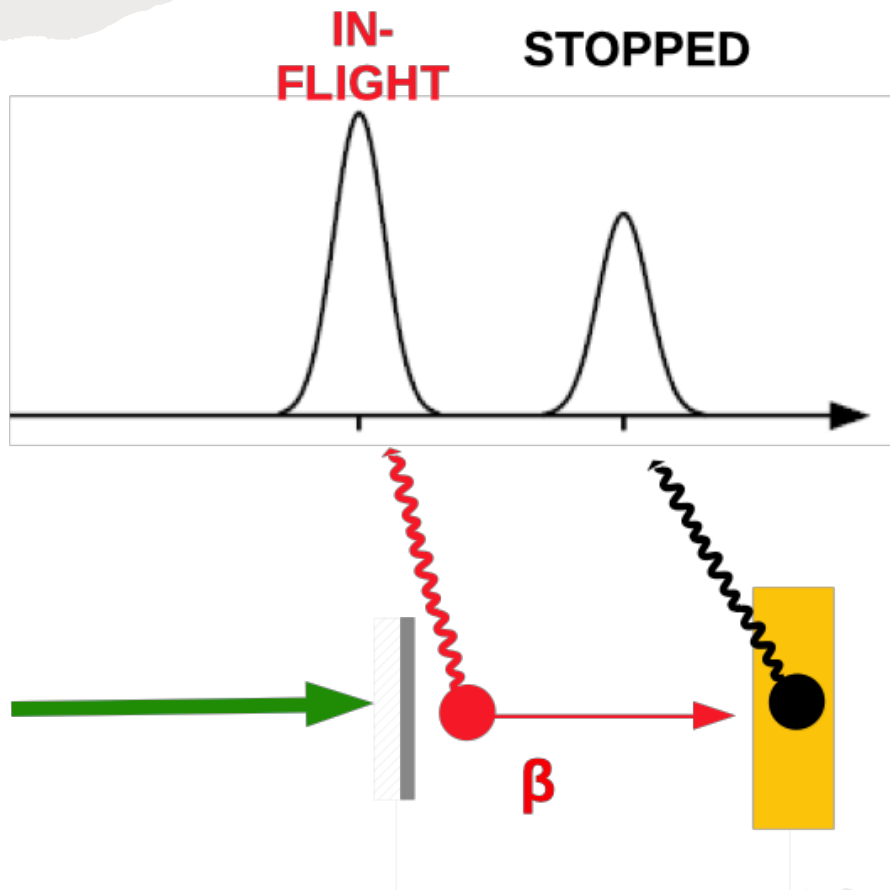


Il rapporto tra le due componenti dipende da:

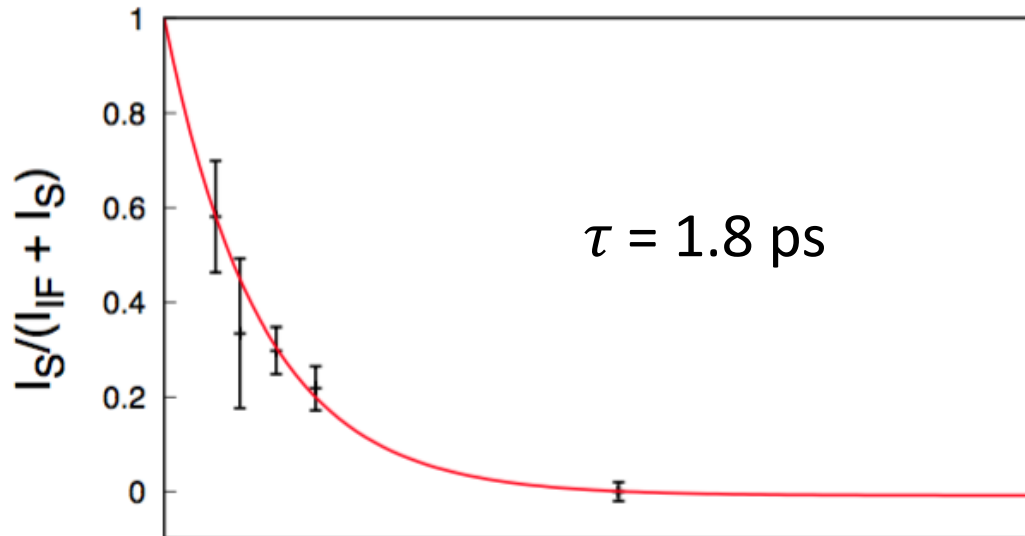
- Distanza tra i due fogli;
- Velocità del nucleo;
- Vita media dello stato.



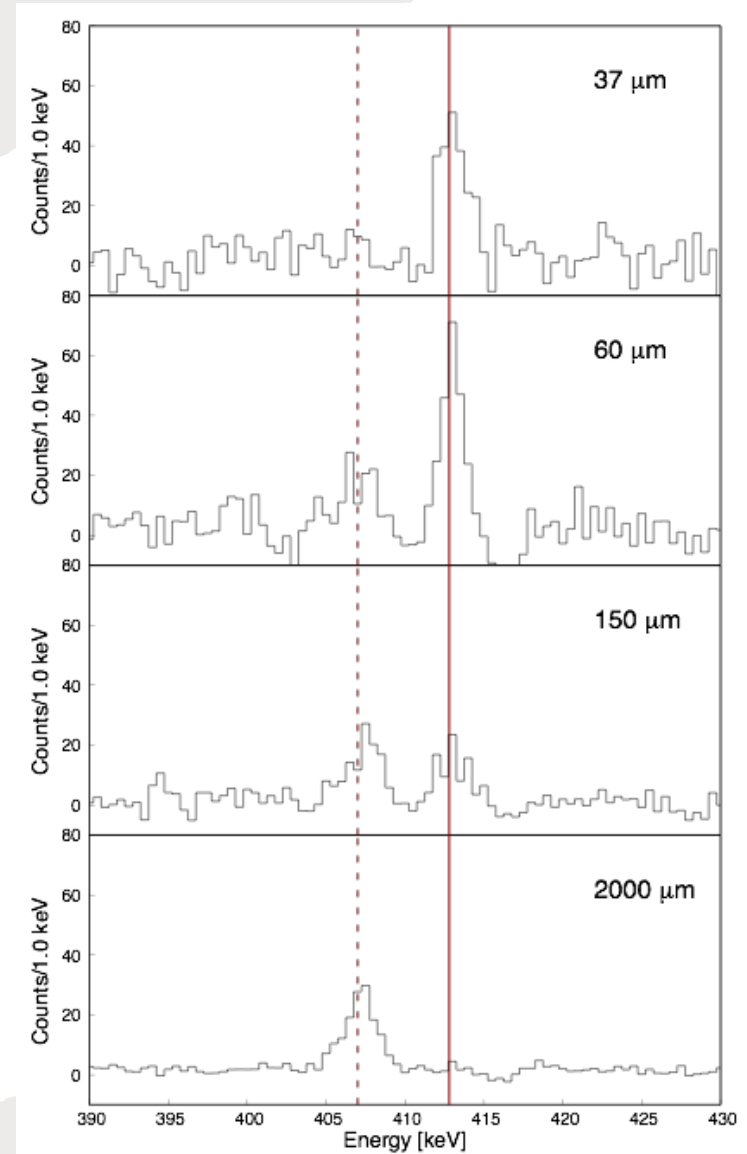
# II plunger



# Il plunger



Conoscendo la legge dei decadimenti nucleari, è possibile estrarre la vita media





Domande?