

# Messa in opera di un rivelatore HPGe a basso fondo

Laboratorio di Radioattività Milano-Bicocca

# Spettroscopia gamma

La **spettroscopia gamma** è una tecnica radiometrica utilizzata per la determinazione della concentrazione dei radionuclidi



- Industria nucleare (Produzione di energia, Medicina...)
- Monitoraggio ambientale
- Non proliferazione
- Studio di elementi in tracce
- Neutron Activation Analysis
- Ambito scientifico (doppio beta, studio di eventi rari, astrofisica...)



Analisi di tipo **qualitativo e quantitativo** del campione in esame



# Laboratorio di Radioattività @Milano-Bicocca

*Sviluppo di tecniche per la misura di campioni a bassa attività*

Studio di matrici con piccole concentrazioni di elementi radioattivi

*Limite alla sensibilità di misura*

Fondo radioattivo ambientale



Sistema di misura ad alta sensibilità

# Le attività del gruppo di radioattività di Milano-Bicocca

## Fisica delle Particelle



- Sviluppo di rivelatori a basso fondo ad alta sensibilità per misure di radioattività
- Selezione dei materiali per esperimenti di fisica degli eventi rari

## Fisica Ambientale



- Analisi del contenuto radioattivo di campioni ambientali
- Studio di elementi in tracce

## Fisica Applicata



- Caratterizzazione sorgenti di neutroni
- Test danno da radiazione su componenti elettronici

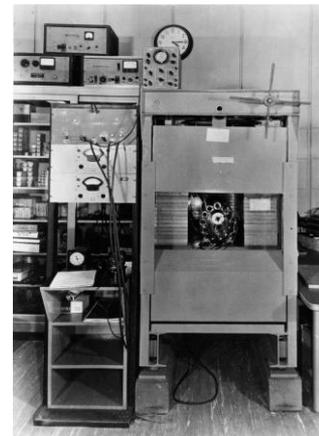
# Un cenno storico...

Williard F. Libby

1940



Radio-datazione al  $^{14}\text{C}$



Li-drifted Ge detectors

1962

Volume di 1 cc

Risoluzione 6keV @ 1332keV

High purity germanium detectors

1975

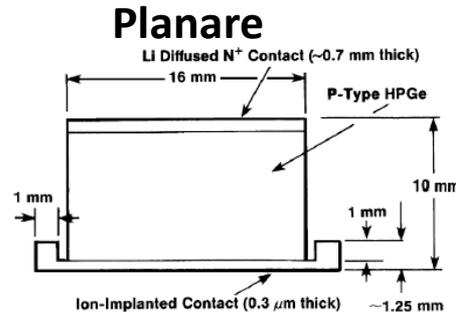
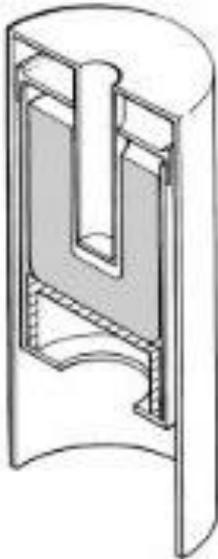


# Tipologia di rivelatori HPGe

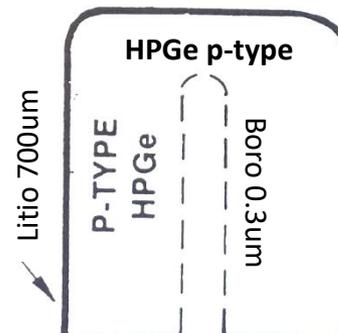
I rivelatori al germanio iperpuro sono particolarmente adatti a misure di spettroscopia gamma

Differenti geometrie e dimensioni

## Well detector



## Coassiale



## Germanio

Semiconduttore

Z= 32

$\rho = 5,3 \text{g/cm}^3$

Band gap a 300K: 0,66eV

En coppia e-h a 77K: 2,96eV

## Rivelatori HPGe

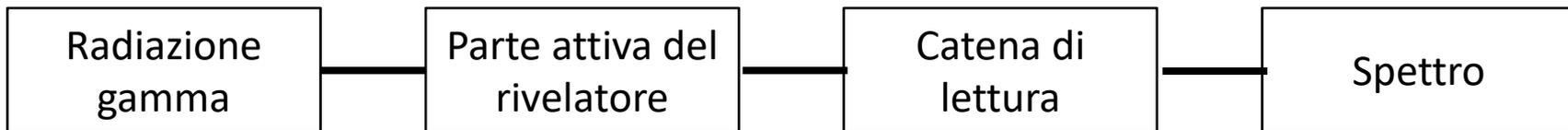
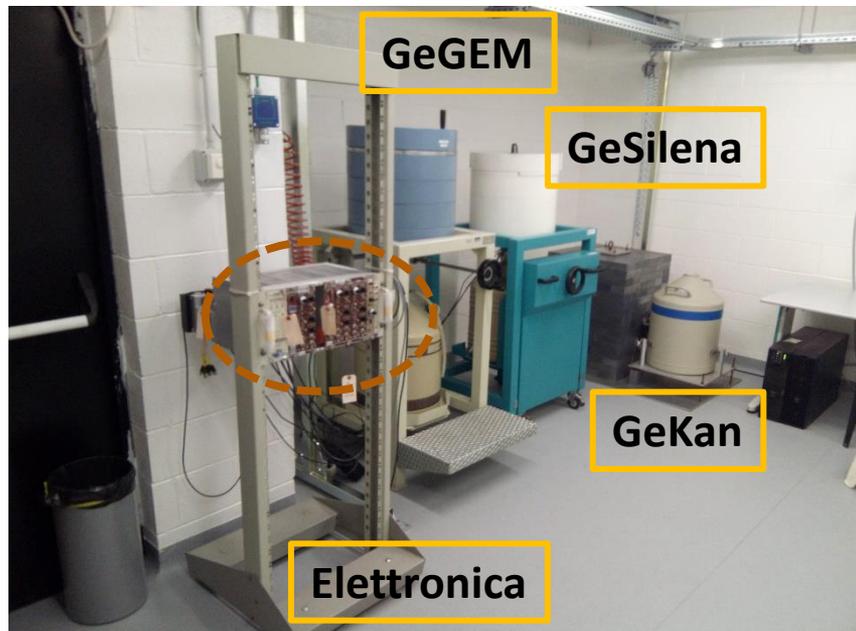
Range: ~keV ÷ 3600keV

Cristalli ad alta purezza

Volumi sensibili

Risoluzione Energetica <2keV

# Laboratorio di Radioattività U2-3i011

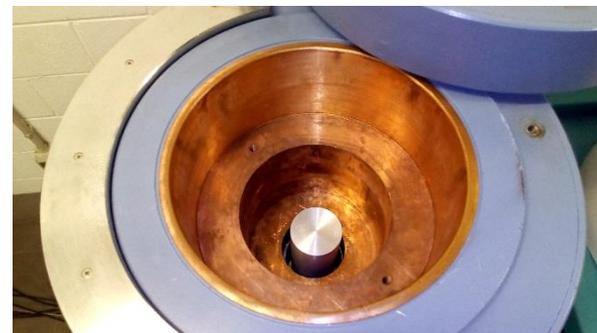


# Laboratorio di Radioattività U2-3i011



**GeSilena:**  $\epsilon_{rel}$  30%

**GeGEM:**  $\epsilon_{rel}$  30%



**GePozzetto:**  $\epsilon_{rel}$  60%



**GeKan:**  $\epsilon_{rel}$  70%



# HPGe – Componenti principali



End-cap

Pre-amplificatore

Dito freddo

Dewar

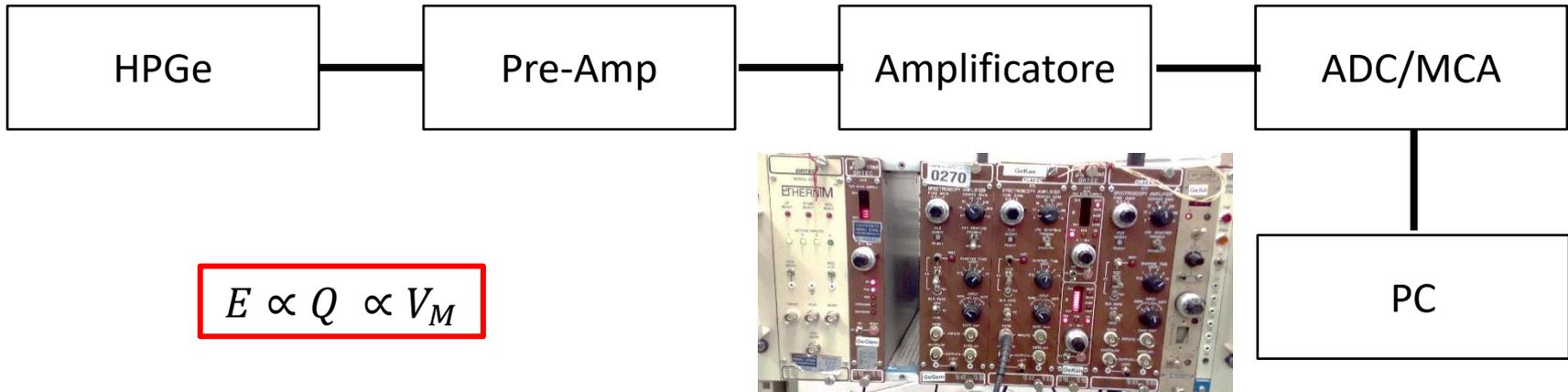
Cristallo di Germanio



Holder in rame



# Catena di lettura per il trattamento del segnale



## Ottimizzazione del sistema di misura

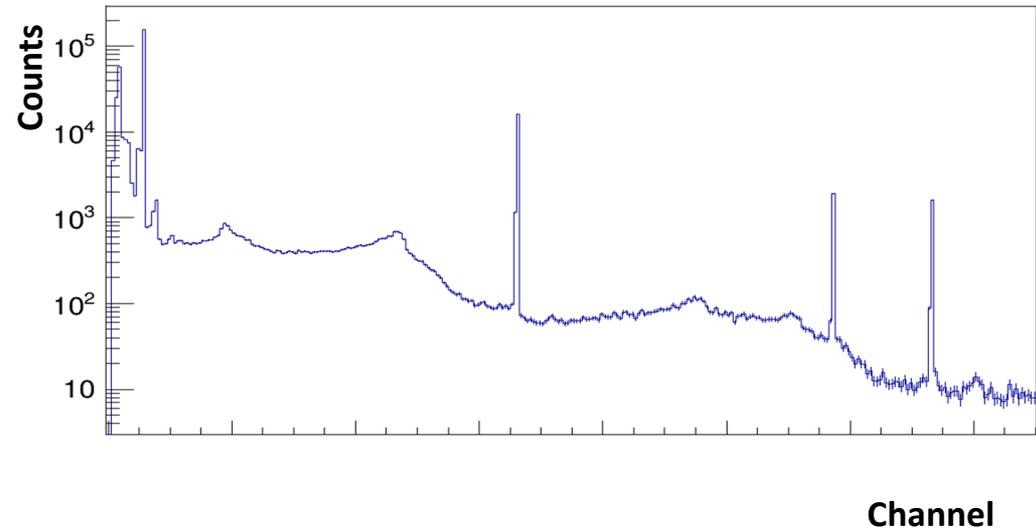
Tensione di Polarizzazione

Ottimizzazione del S/N

Calibrazione in Energia

Calibrazione in Efficienza

## Spettro Differenziale



# Tensione di polarizzazione

Scelta della corretta differenza di potenziale applicata ai capi del rivelatore



1 ÷ 5kV

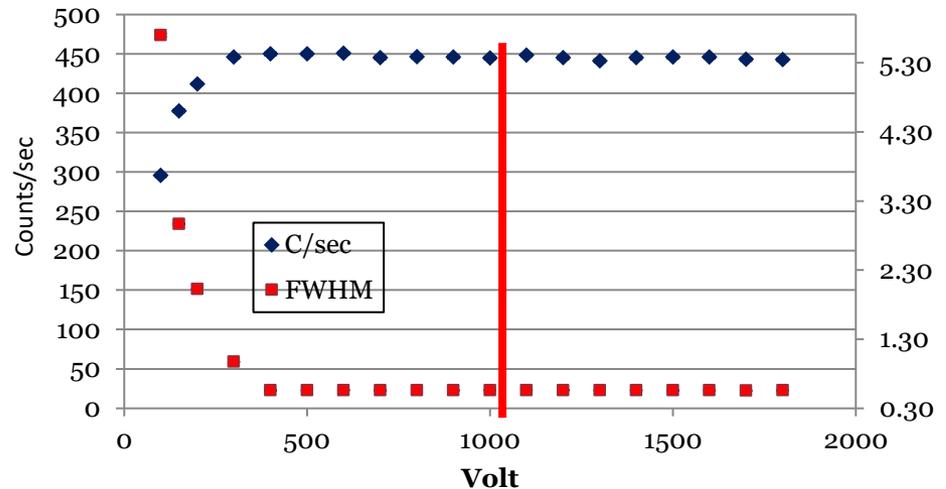
Volume attivo

$$d = \left( \frac{2eV}{eN} \right)^{1/2}$$

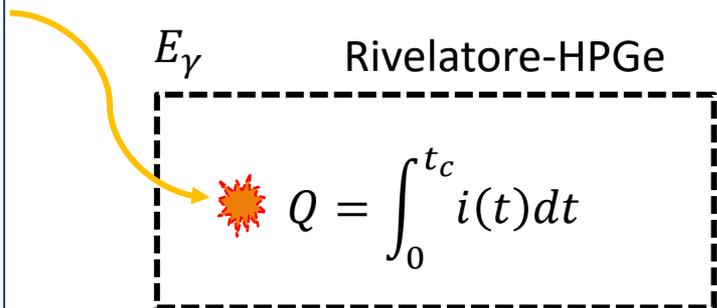
Campo Elettrico

Evita ricombinazione

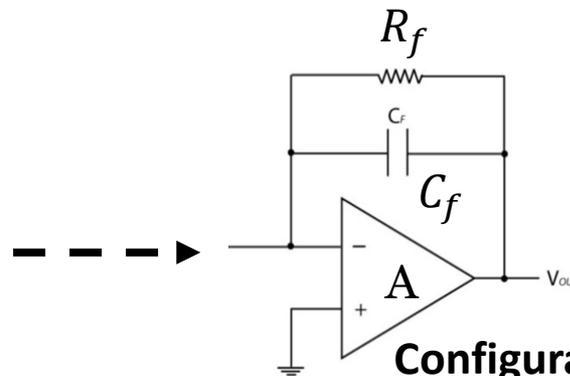
Raccolta completa



# Pre-Amplificatore di carica



La carica prodotta viene raccolta attraverso il campo elettrico agli elettrodi e inviata al pre-amplificatore

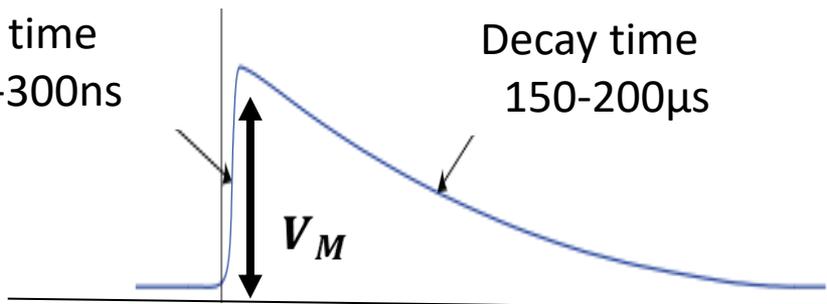


$$V_{out} \cong -\frac{Q}{C_f}$$

## Segnale preamplificato

Rise time  
100-300ns

Decay time  
150-200μs



In uscita ho un segnale a coda lunga



HPGe

Electronica

## Configurazione Low Background



HPGe

Electronica



Electronica

# Amplificatore



Ottimizzazione rapporto S/N

$$R = \frac{FWHM}{E}$$

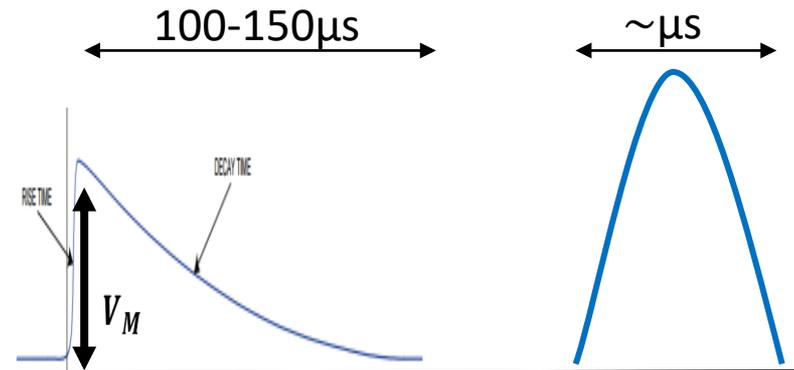
$$FWHM_{Tot}^2 = FWHM_{Stat}^2 + FWHM_{Elett}^2 + FWHM_{Drift}^2$$

$$FWHM_{Elett}^2 = 2.35 \cdot \varepsilon \cdot ENC \rightarrow ENC \propto \left( \alpha \frac{C_{tot}^2}{\tau_{sh}} + \beta \tau_{sh} I_d \right)^{\frac{1}{2}}$$

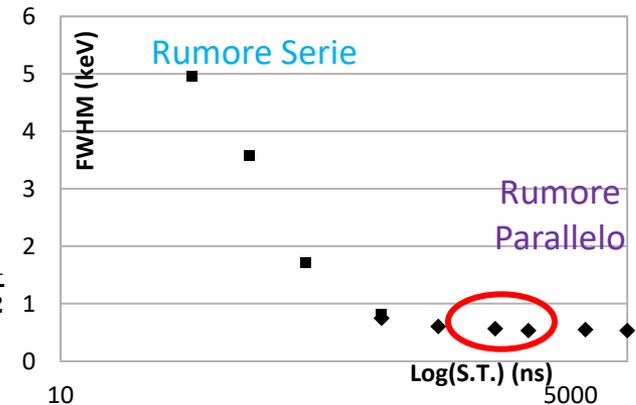
Guadagno

Pre-Amp [mV]  $\rightarrow$  Volt  
Dinamica ADC/MCA 0÷10V

Formatura del segnale

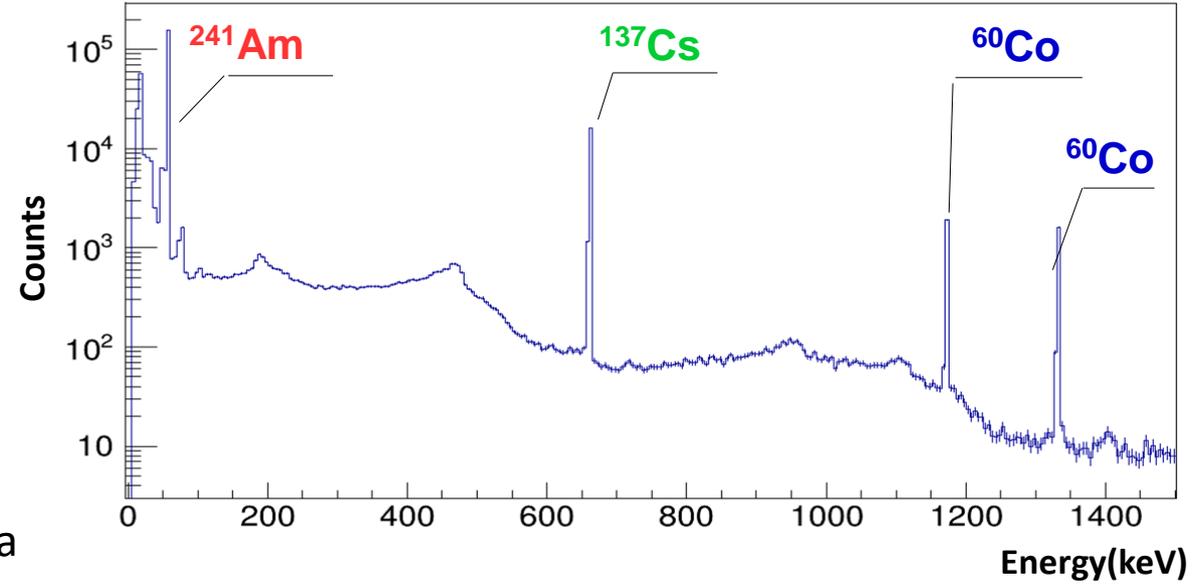


Gaussiana- CR-(RC)<sup>n</sup>



# Calibrazione in energia

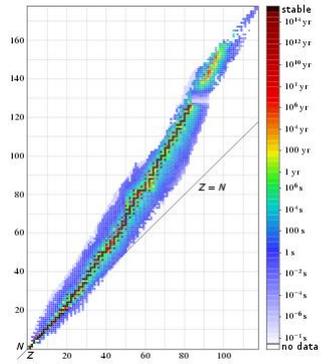
Determinazione di una relazione tra la posizione del picco nello spettro e la corrispondente energia gamma



Multi-Gamma certificata

Nuclide	$E_{\gamma}$ [keV]	BR[%]
<sup>241</sup> Am	59.5	39.9
<sup>137</sup> Cs	661.7	85.1
<sup>60</sup> Co	1173.2	99.9
<sup>60</sup> Co	1332.5	99.9

<http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/>  
<https://nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>



# Efficienza

## Efficienza di rivelazione

Parametro fondamentale per la determinazione **quantitativa** dell'attività di una sorgente incognita

$$A[Bq] = \frac{\text{Conteggi/s}}{\epsilon_{abs} \cdot BR}$$

## Efficienza assoluta

$$\epsilon_{abs} = \frac{\text{Numero di eventi registrati}}{\text{Numero di eventi emessi dalla sorgente}}$$

- Geometria del sistema rivelatore-sorgente
- Autoassorbimento della sorgente
- Materiale interposto fra sorgente e rivelatore
- Volume morto del rivelatore

# Efficienza - Metodo standard

Misura sorgenti calibrate



Curva efficienza sperimentale



Estensioni analitiche delle  
misure effettuate

Limitato range energetico

Limitato numero di geometrie

Autoassorbimento

Decadimenti complessi

Rate della sorgente

Introduzione sistematiche

Costo e gestione delle sorgenti

**Soluzione:** Simulazioni numeriche mediante Metodo Monte Carlo

# Metodo Monte Carlo

**Input**

Il sistema viene descritto con la maggiore precisione possibile



**Simulazione numerica**

Generazione di una grande quantità di numeri casuali che seguano la distribuzione di probabilità imposta dalla descrizione del problema

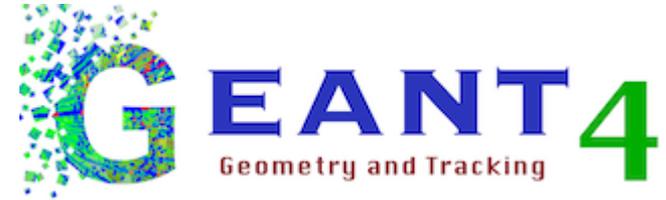


**Output**

I risultati descrivono il comportamento medio del sistema

# Software di simulazioni MonteCarlo: ARBY

Nel corso degli anni il Gruppo di ricerca di Milano-Bicocca ha sviluppato un tool di simulazioni MC chiamato ARBY.



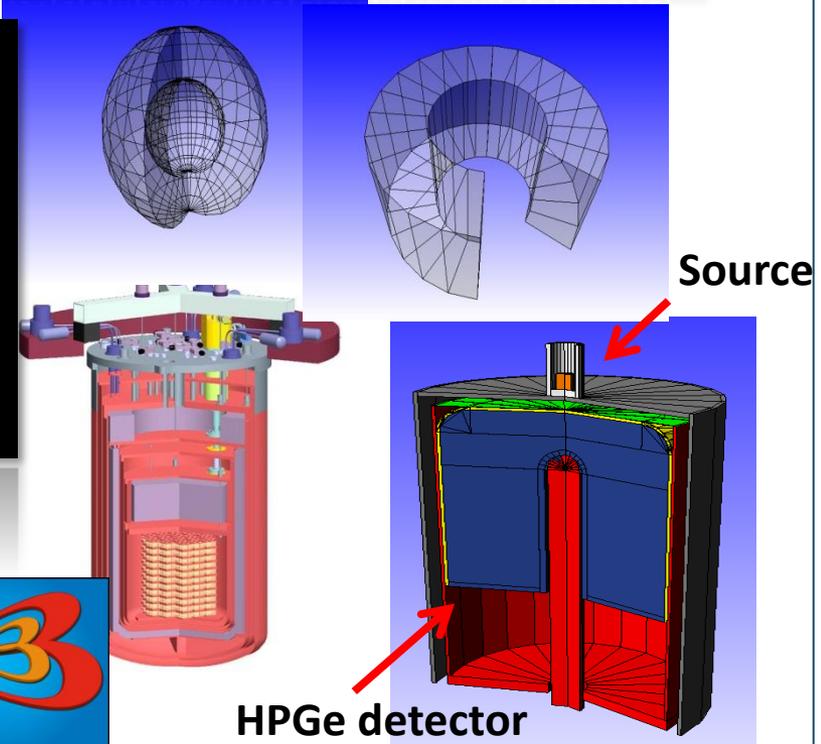
Allo scopo di generare le simulazioni l'utente deve creare un **file di configurazione** con una **semplice sintassi**

```
NewMaterial = (Ge,5.323,0,1,Germanium,Ge,32,72.59,1)
NewMaterial = (Li,5.32,0,1,Germanium,Ge,32,72.59,1)
NewMaterial = (Polietilene,0.94,1,2,Hydrogen,H,1,1.008,4,Carbon,C,6,12.01,2)
NewMaterial = (H2O,0.944,1,2,Hydrogen,H,1,1.008,2,Oxygen,O,8,16,1)
```

Solidi elementari come **Tubs**, **Cylinder**, **Sphere** permettono di creare attraverso operazioni booleane (**Union**, **Intersection**, **Subtraction**) solidi complessi

```
#Detector
SOLID Tubs
0.6 3.825 6.0 0 360
SOLID Tubs Union
0.0 3.825 0.9 0 360
0 0 0.0 0.0 3.45
SAVE GeDet
#Litio
SOLID Tubs
0 3.825 0.16 0 360
SOLID Tubs Union
3.825 3.985 7.06 0 360
0 0 0.0 0.0 -3.45
SAVE LiGe
```

I volumi assumono un ruolo indicato da specifiche keyword **Absorber**, **Source** e **Detector** definite all'interno del file di configurazione.



# Arby – Diagramma di flusso

- **Descrizione geometrica** rivelatore-sorgente
- **Numero di eventi** da generare
- **Distribuzione del radioisotopo** (uniforme, puntuale, esponenziale,...)
- **Radionuclide emettitore**
  - Singolo isotopo ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,...)
  - Catene radioattive ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ )
  - Singolo particelle (Alfa, Beta, Gamma)

## Descrizione del processo fisico

(schemi di decadimento; Br; tempi di decadimento)

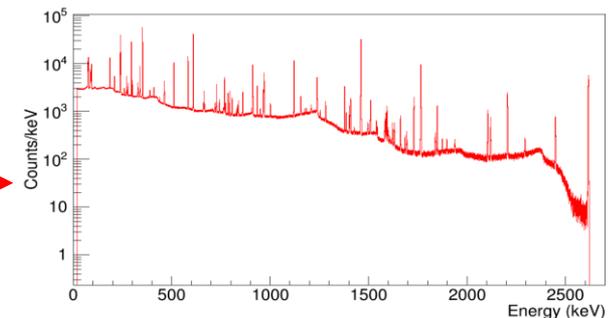
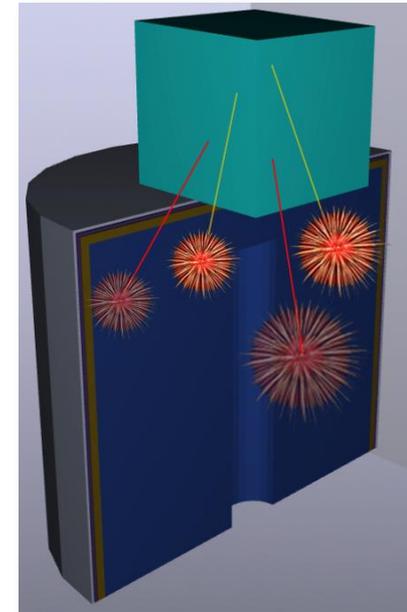
Meccanismi di **interazione radiazione-materia**

**Rate** di decadimento

**Risoluzione** del rivelatore

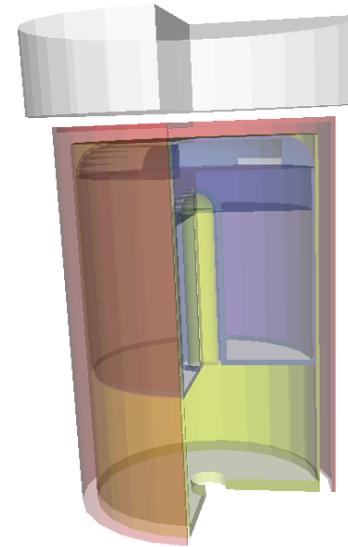
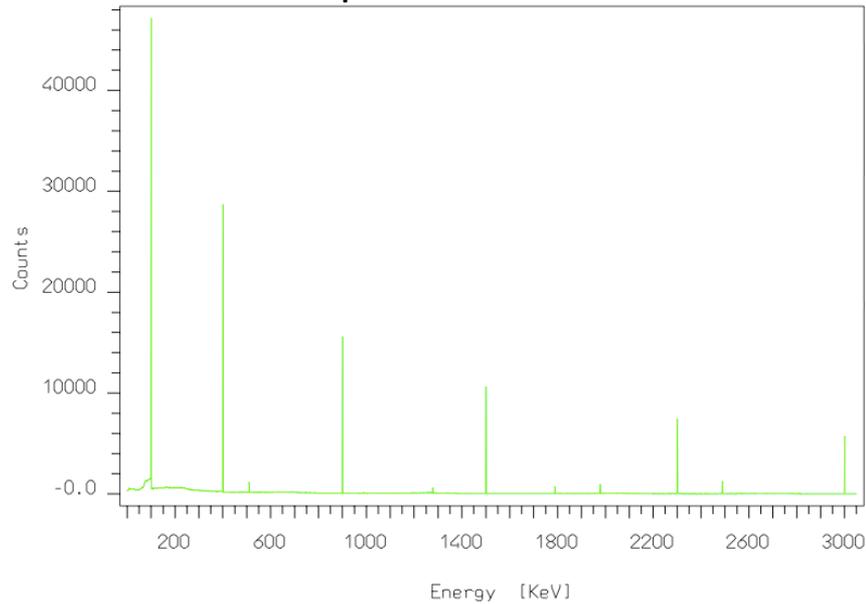
**Tempo di integrazione** del segnale

## Esperimento virtuale

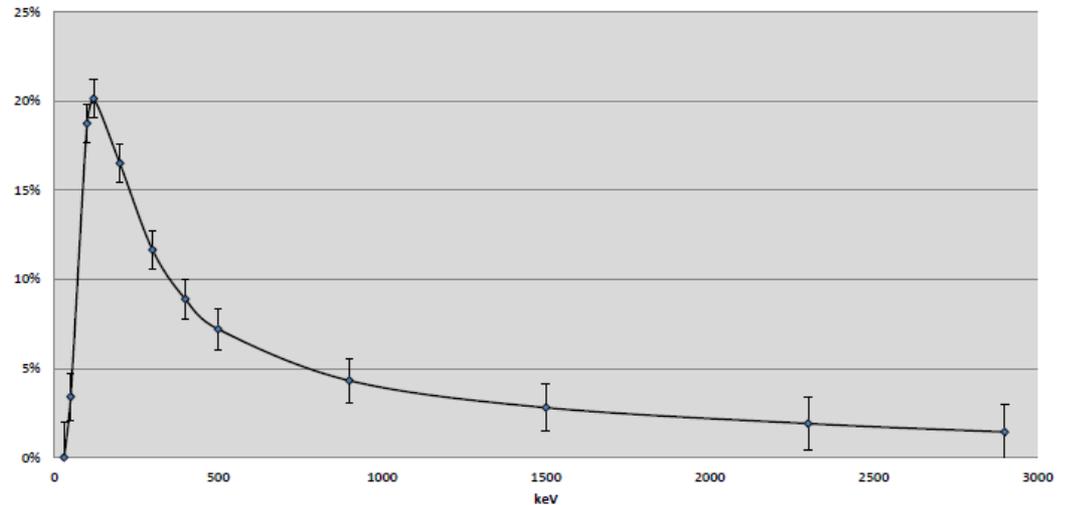


# Arby: Ricostruzione Curva di Efficienza

Spettro simulato

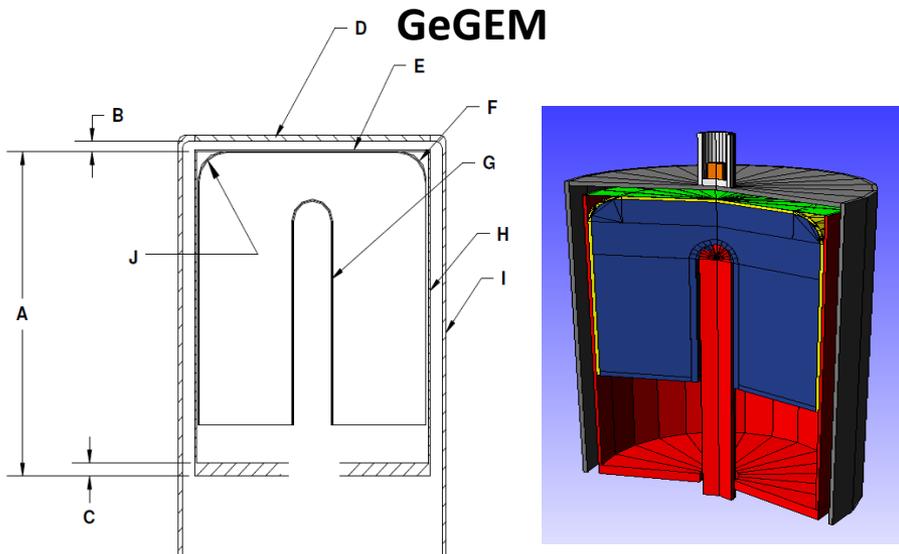


Curva di Efficienza

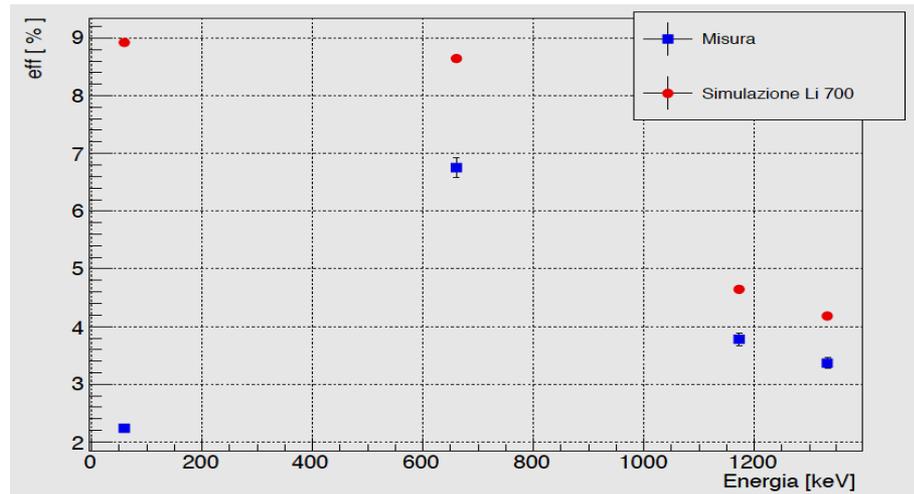


$$E_{\text{abs}} = \frac{\text{Conteggi al picco}}{\text{Nr eventi generati}}$$

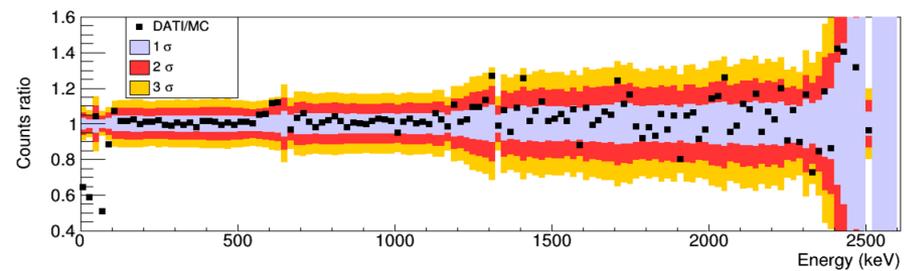
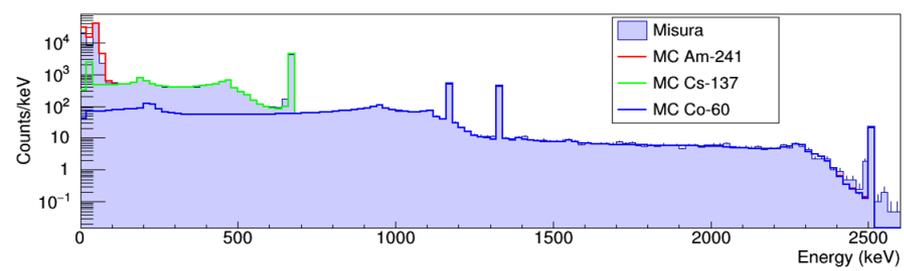
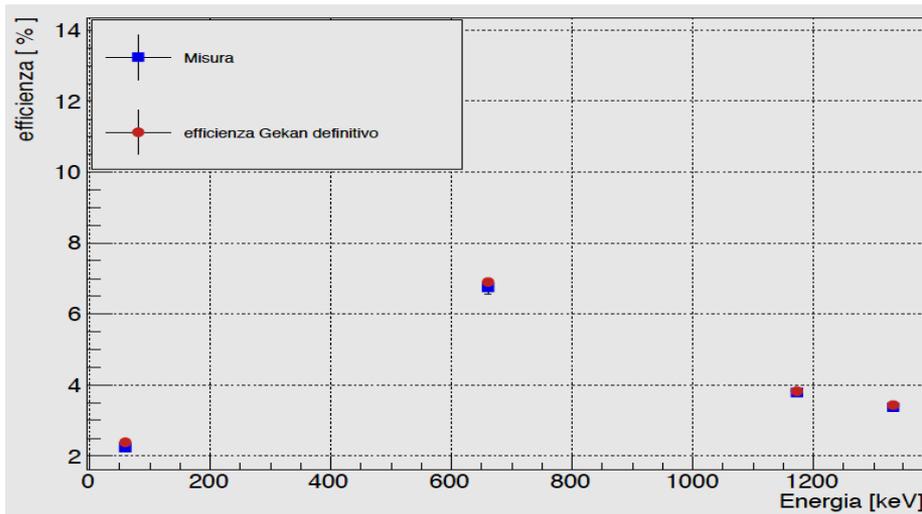
# Calibrazione in efficienza



## Parametri Nominali

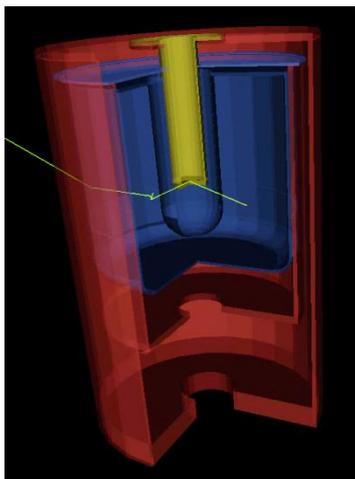


## Modello ottimizzato

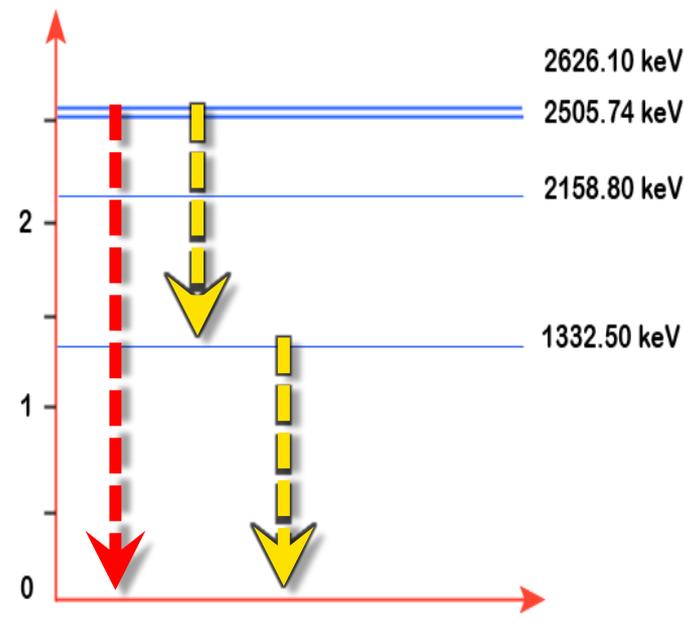
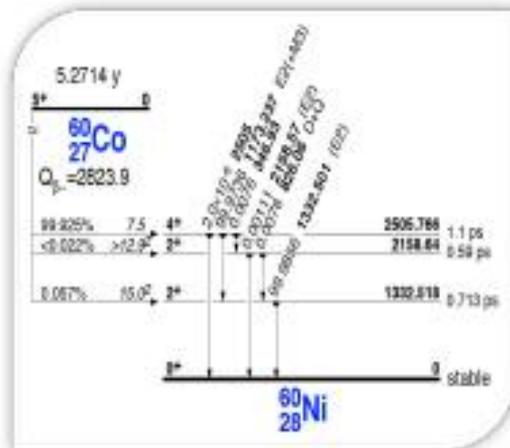


# Cascate nucleari

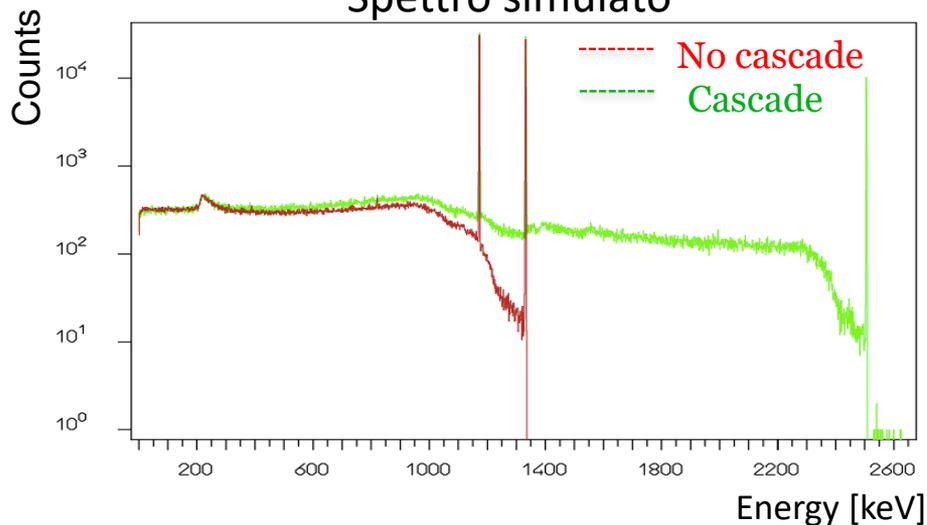
GePozzetto



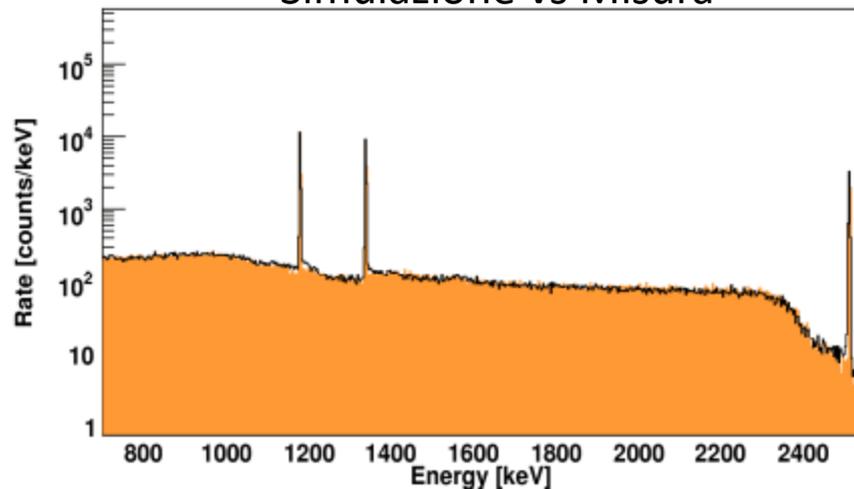
Schema di decadimento  $^{60}\text{Co}$



Spettro simulato



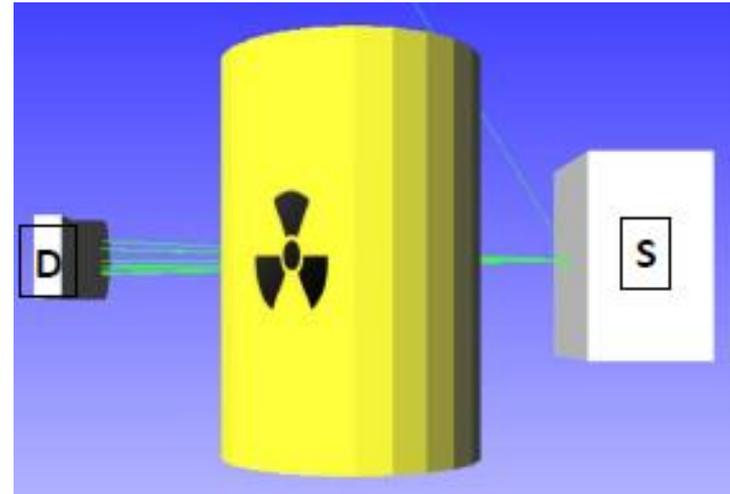
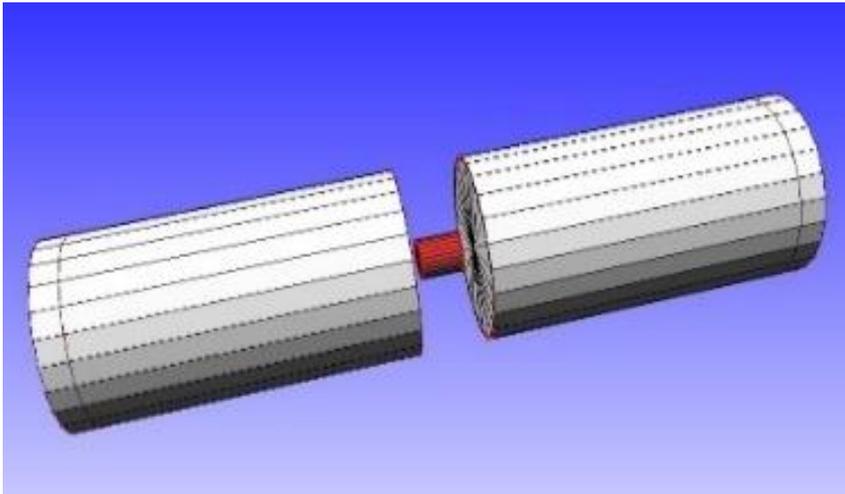
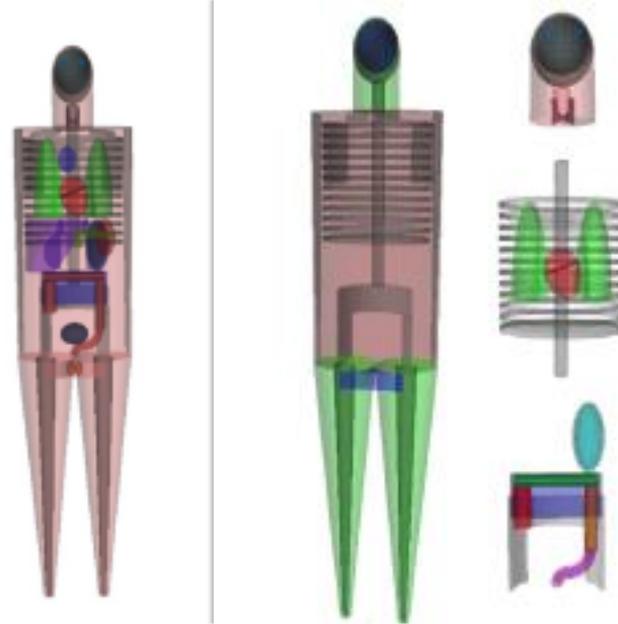
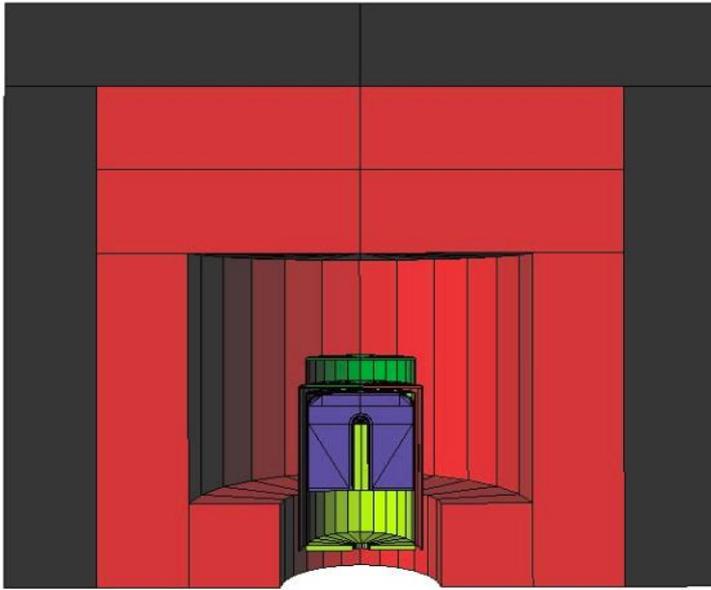
Simulazione vs Misura



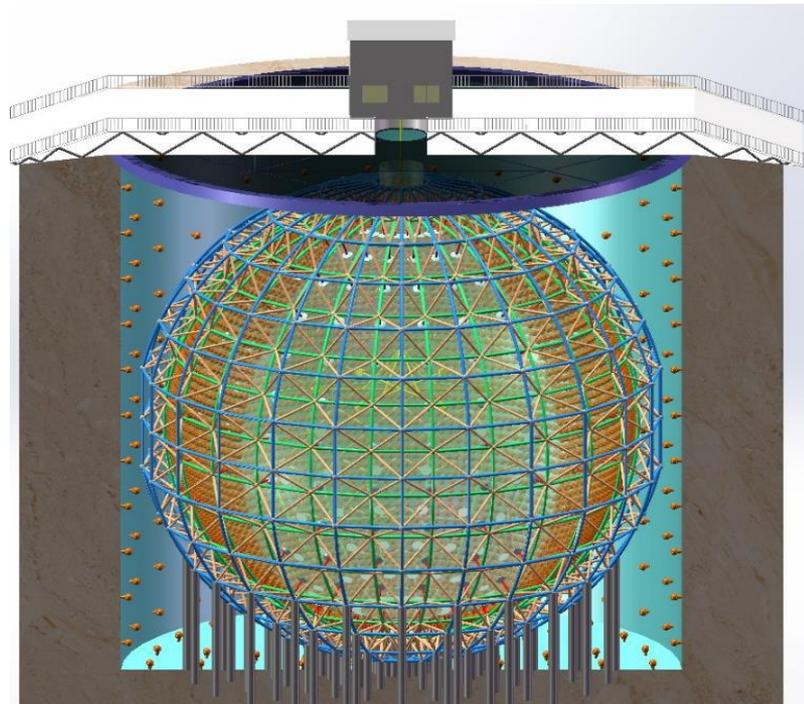




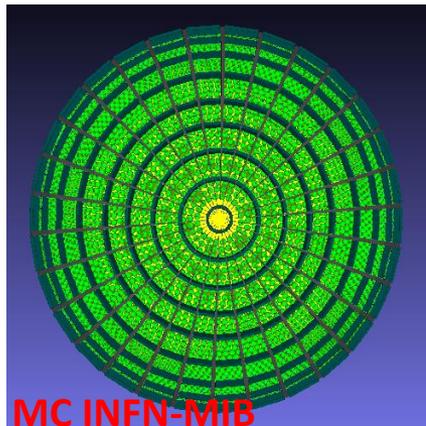
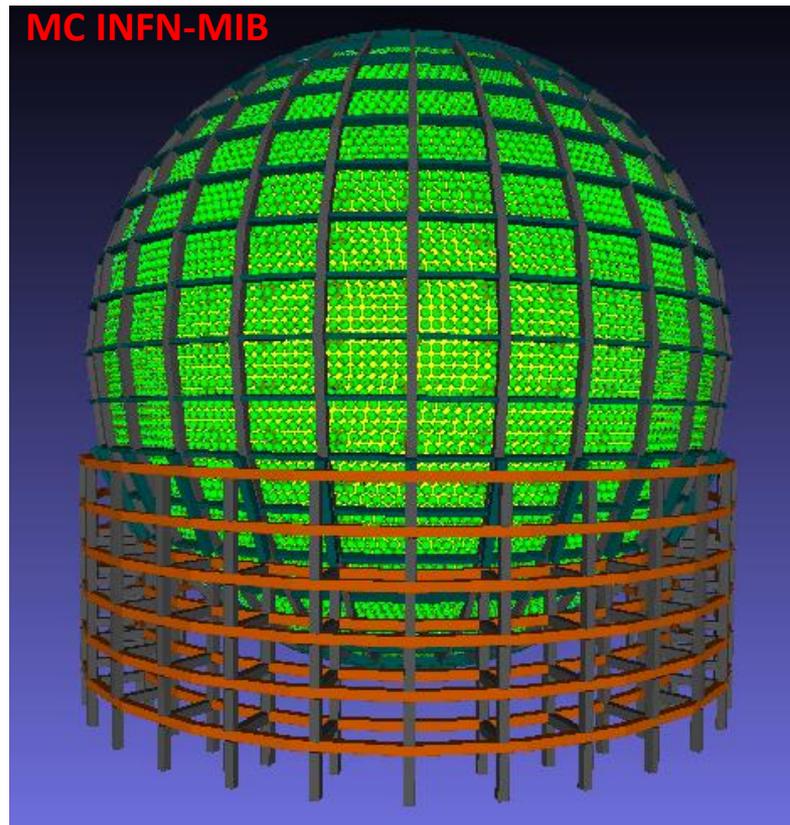
# Applicazioni specifiche



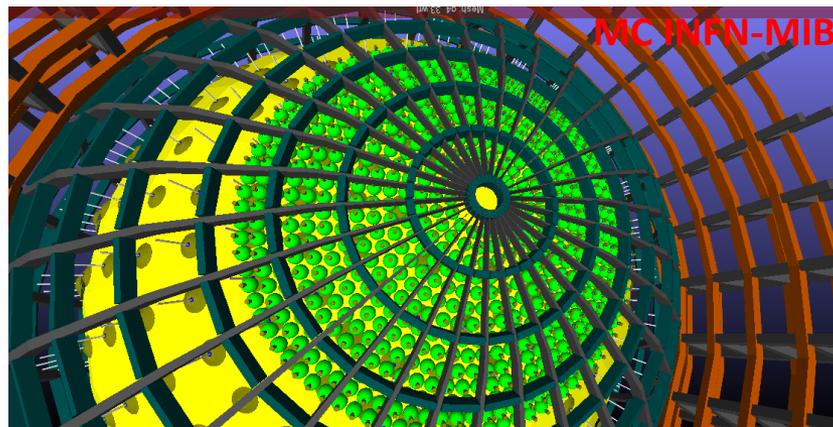
# MC- Esperimento JUNO



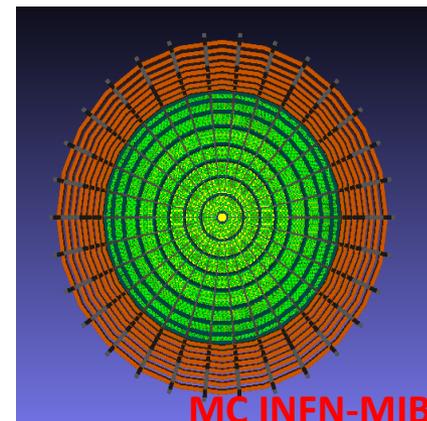
MC INFN-MIB



MC INFN-MIB

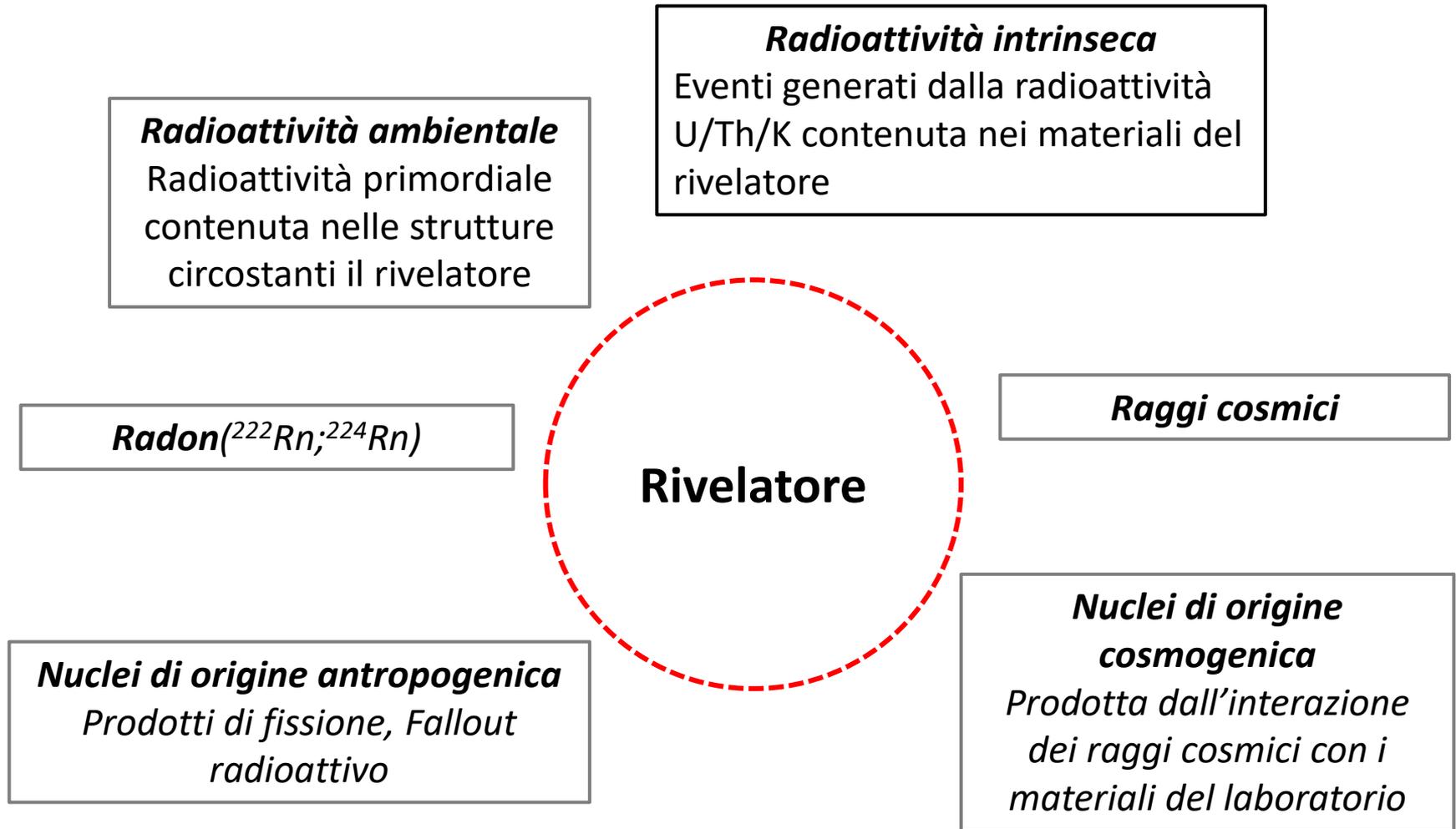


MC INFN-MIB



MC INFN-MIB

# Sorgenti del fondo radioattivo



E' necessario applicare tecniche di riduzione del fondo:

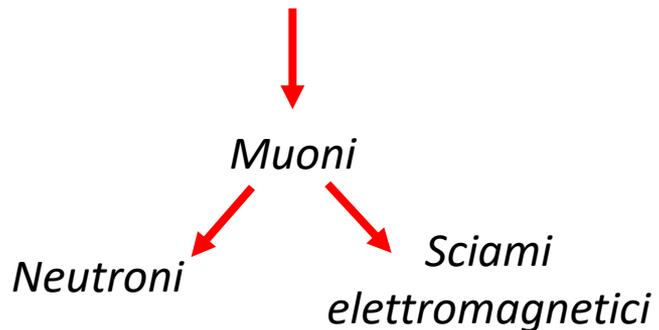
**PASSIVE**

e

**ATTIVE**

# Tecniche **passive** di riduzione del fondo

**Raggi cosmici**



**Radioattività intrinseca**

**Radioattività ambientale**

**Radon**

**Laboratorio sotterraneo**



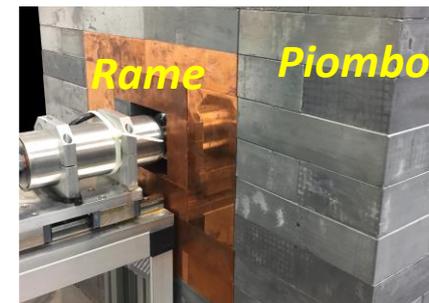
La copertura dell'edificio permette di ridurre la componente adronica, ma **non i muoni**

**Selezione dei materiali**

**Elettronica separata**



**Schermatura**

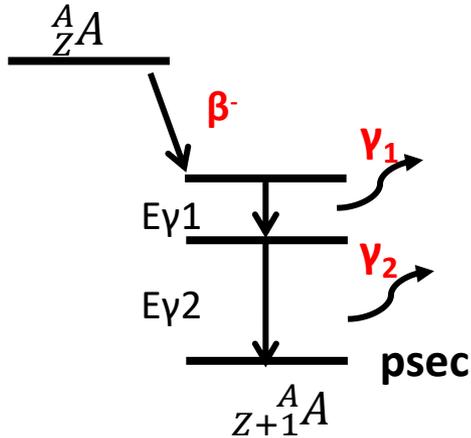


**Radon-Box**

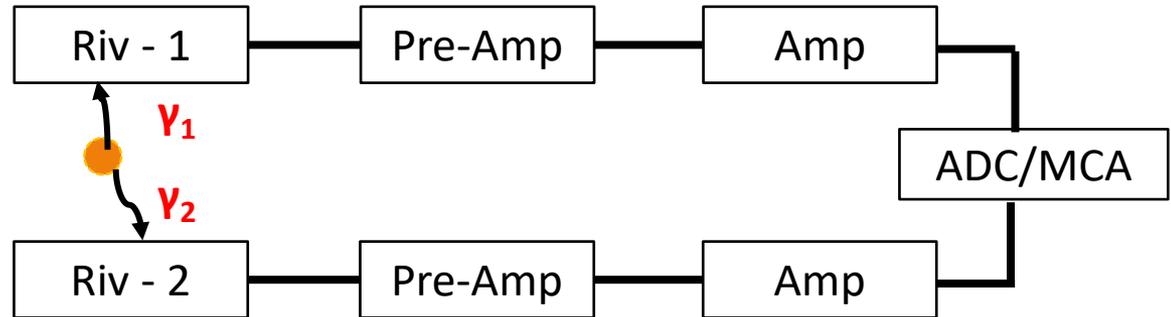
**Sensibilità:  $<10^{-2}$  Bq/kg**

# Tecniche attive di riduzione del fondo

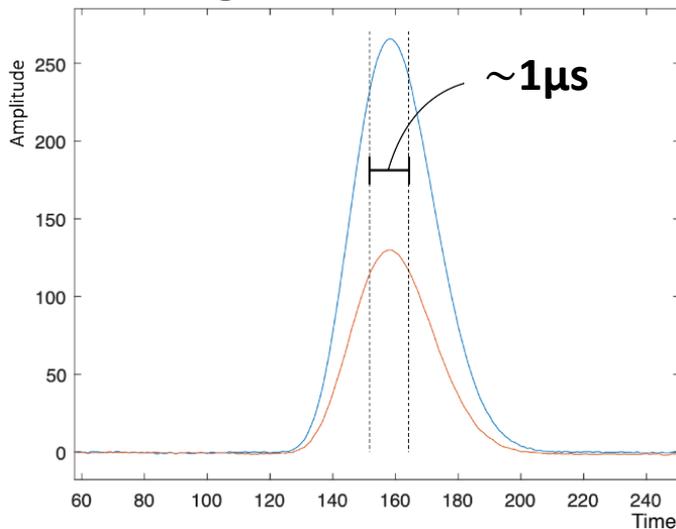
## Rivelatori operanti in coincidenza



Tempi di elaborazione del segnale  $\mu\text{sec}$



Segnali in coincidenza

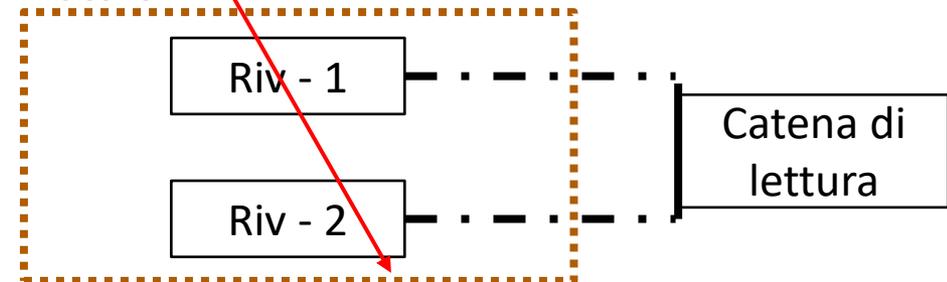


## Sistema di veto operante in anti-coincidenza

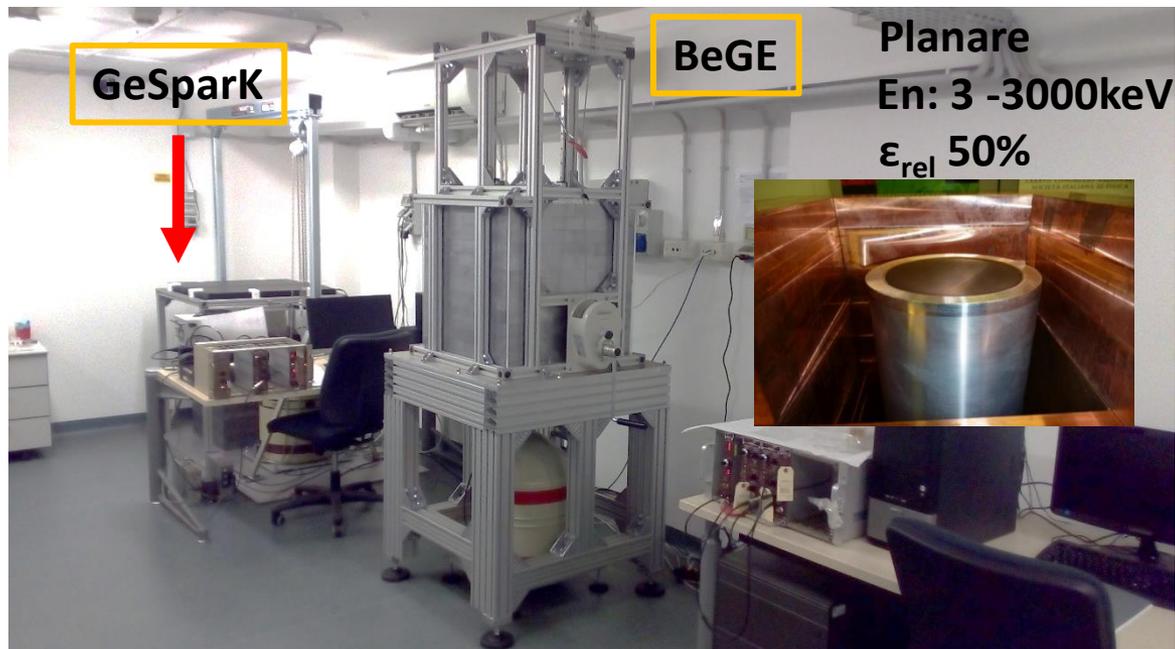


Muoni - Sciame elettromagnetici

Schermatura



# Laboratorio di Radioattività U2-3i09/010



**GeSpark – Rivelatore  $\beta$ - $\gamma$**



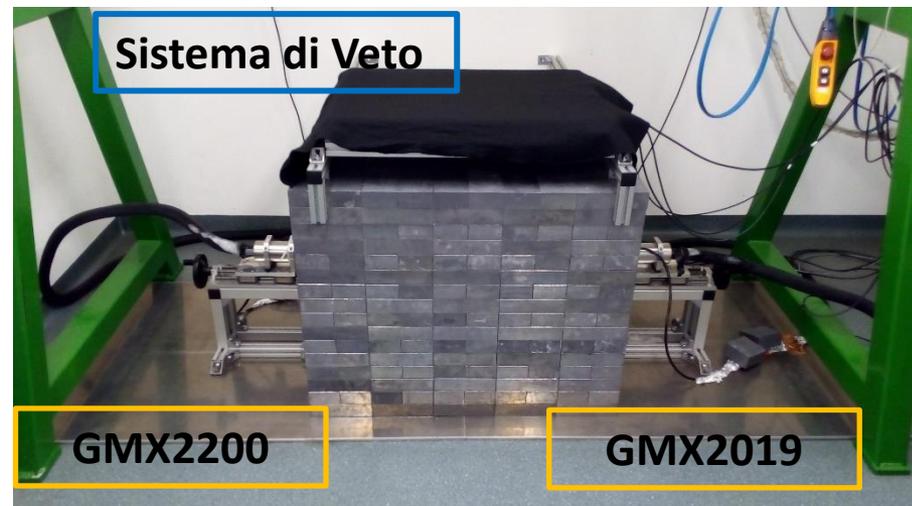
**Spettroscopia alfa**



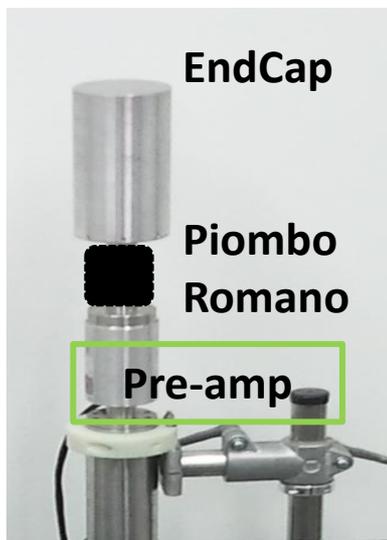
Rivelatori al silicio a  
impiantazione ionica



# GMX – Rivelatore $\gamma$ - $\gamma$



## 2x GMX detectors



Coaxial detector (n-type)

$$\epsilon_{\text{rel}} = \sim 100\%$$

Range 17-3200keV

Selezione dei materiali

Schermatura

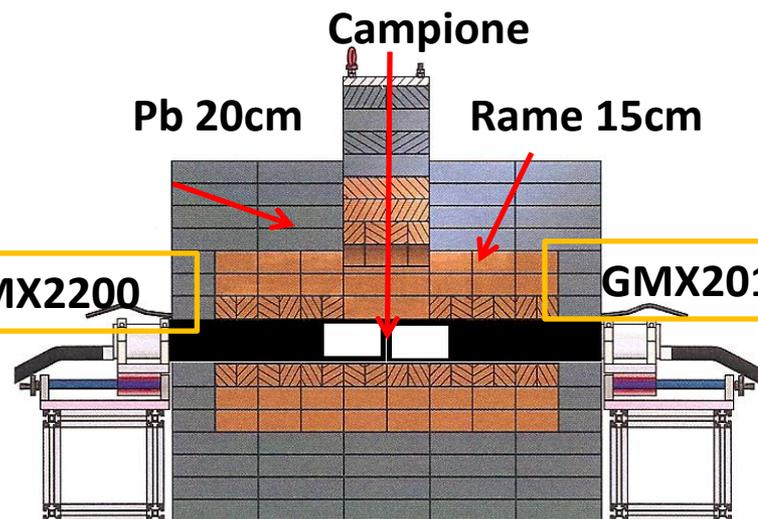
Campione

Pb 20cm

Rame 15cm

GMX2200

GMX2019

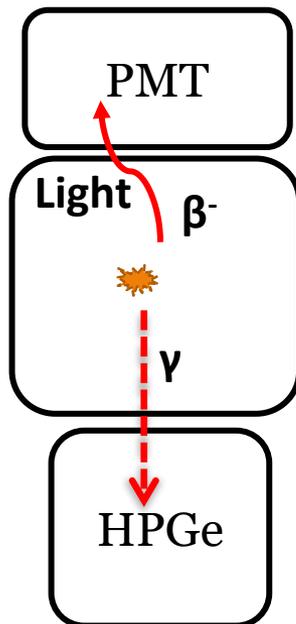
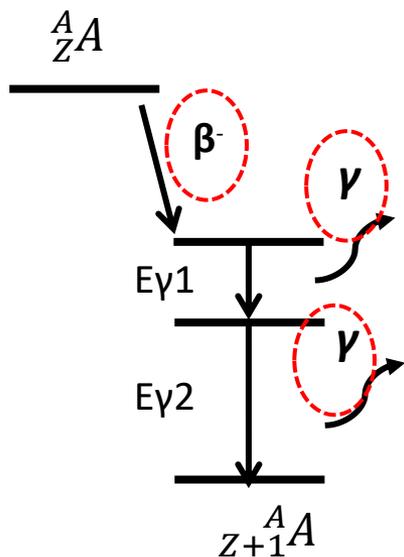
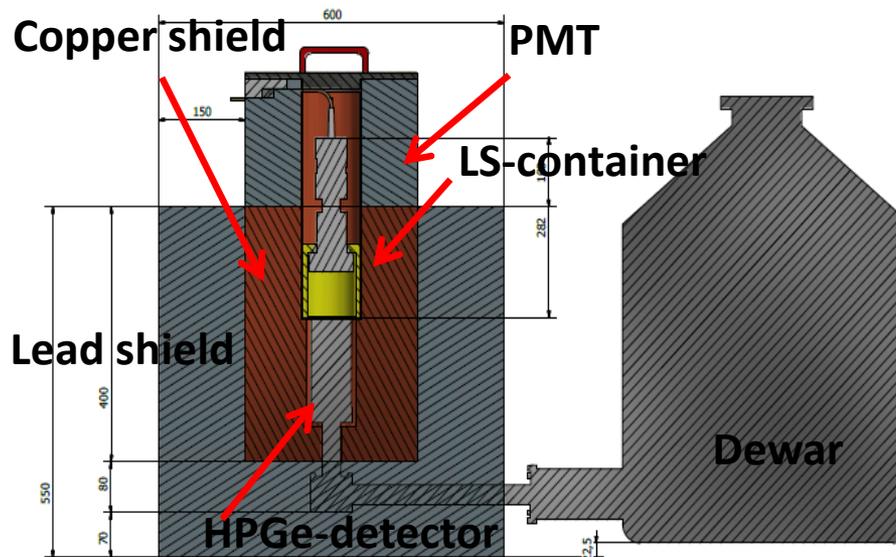


# GeSpark – Rivelatore $\beta$ - $\gamma$

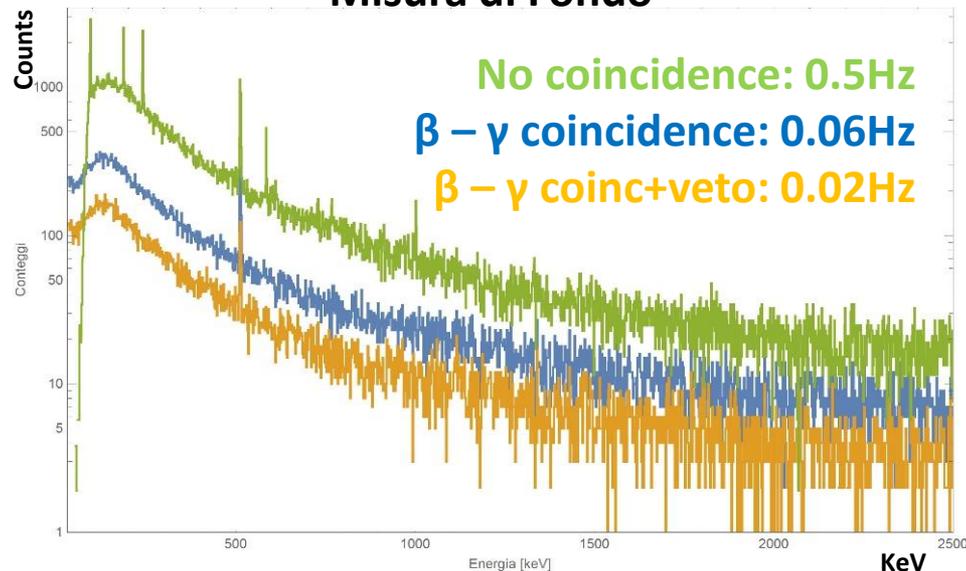
Sistema di Veto



Schermatura



## Misura di Fondo

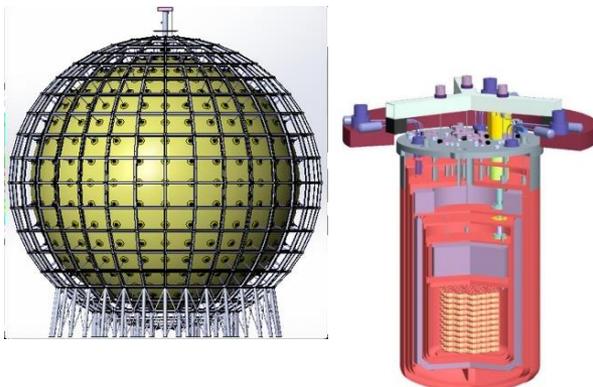


# Selezione dei materiali – Esperimenti Fisica degli Eventi Rari

Fisica delle Particelle



Selezione dei materiali

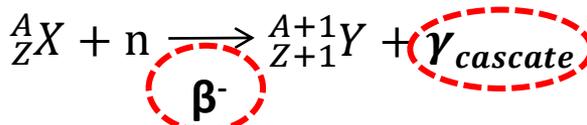


Richieste

$<10^{-12}-10^{-15} \text{ g/g (U/Th)}$



Neutron Activation Analysis



Sensibilità

$<10^{-12} \text{ g/g (U/Th)}$

Chimica/Radiochimica



Sistema di misura ad alta sensibilità



Sensibilità raggiunta

$<2 \cdot 10^{-15} \text{ g/g per } {}^{238}\text{U}$   
 $<1,5 \cdot 10^{-14} \text{ g/g per } {}^{232}\text{Th}$   
 $<8 \cdot 10^{-15} \text{ g/g per } {}^{40}\text{K}$

