



Test and calibration of hard X-ray detectors

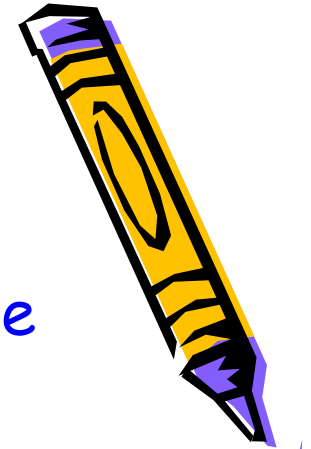
IASF Bologna / INAF



Bologna, 28 Ottobre 2014

IN CHE COSA CONSISTE

- Illustrazione della catena spettroscopica e delle sue componenti.
- Analisi del segnale in uscita dall'amplificatore tramite l'impiego di un oscilloscopio.
- Acquisizione dello spettro di sorgenti di calibrazione: ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{57}Co e ^{137}Cs .
- Analisi dello spettro.
- Calibrazione in energia.
- Calcolo della risoluzione energetica.
- Calcolo dell'efficienza di rivelazione.
- Studio della risposta di un rivelatore a stato solido

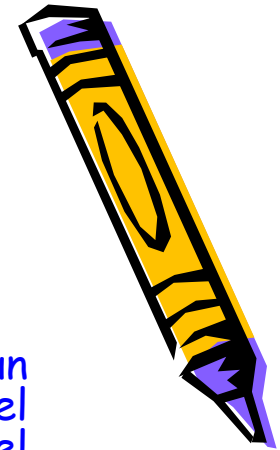


INTERAZIONE DEI RAGGI X E GAMMA CON LA MATERIA

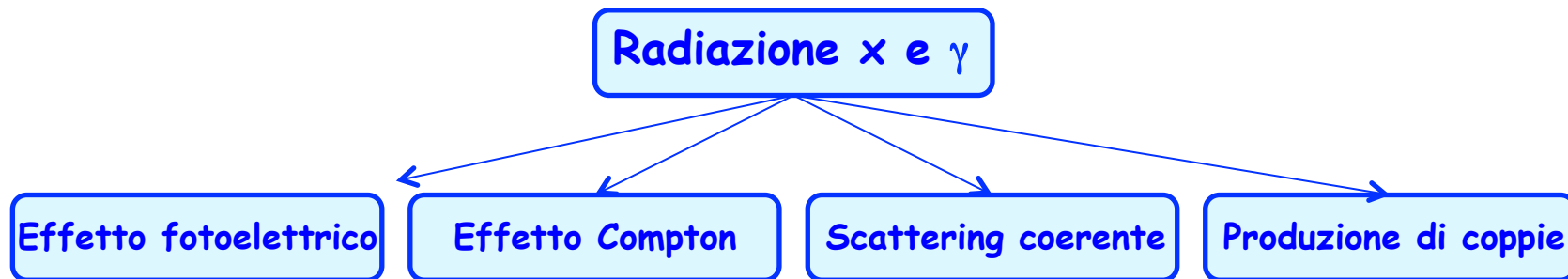
- Le sorgenti radioattive sono nuclei instabili che decadono emettendo radiazioni di diverso tipo, tra cui i raggi gamma.
- Le sostanze sono sempre trasparenti ai raggi gamma anche se in misura molto diversa a secondo della energia dei fotoni e della sostanza assorbente.
- **INTERAZIONE DELLE RADIAZIONI FOTONICHE**
 - I fotoni X e gamma sono radiazioni che hanno la stessa natura elettromagnetica della luce e delle onde radio. Differiscono per la frequenza e per l'origine, nucleare per i gamma, atomica per i raggi X.
 - I raggi gamma generalmente hanno energie dell'ordine dei MeV, i raggi X hanno energie comprese fra 0.1 keV e qualche centinaia di keV.
 - Interagendo con la materia i raggi X e gamma producono **ionizzazione indiretta o secondaria**. Gli elettroni secondari prodotti dalla interazione fotonica primaria sono i maggiori responsabili della ionizzazione della materia.



INTERAZIONE DEI RAGGI X E GAMMA CON LA MATERIA (2)

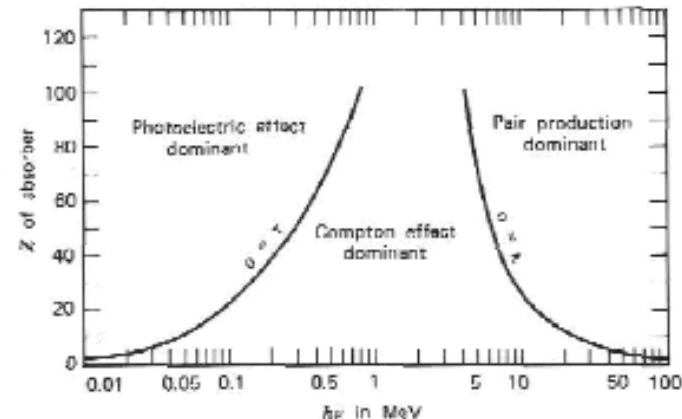


L'interazione può riguardare l'intero atomo (effetto Fotoelettrico), o un singolo elettrone atomico (effetto Compton e produzione di coppie nel campo elettronico) oppure il nucleo atomico (Produzione di coppie nel campo nucleare).



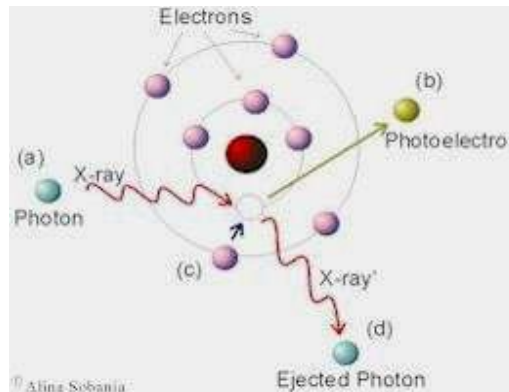
Le tre interazioni principali dominano in tre regioni diverse definite da:

- energia dei fotoni incidenti
- numero atomico del materiale assorbitore

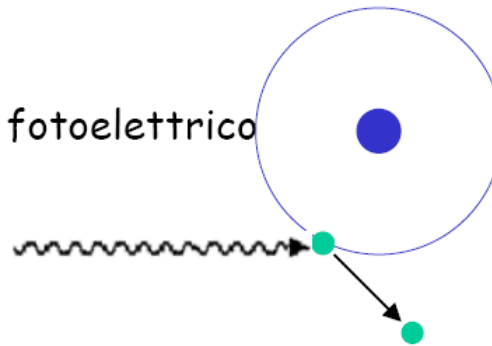


I principali meccanismi di interazione

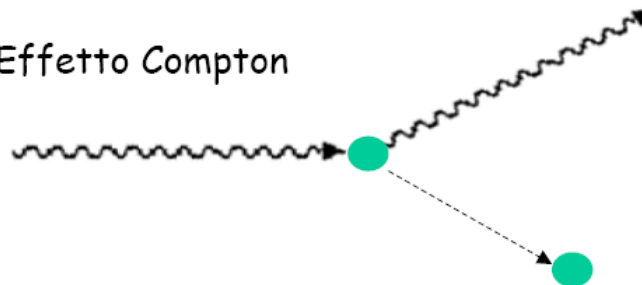
- **Effetto fotoelettrico** : il fotone strappa un elettrone dalle orbite più interne.
- **Effetto Compton** : urto diretto fotone X-elettrone libero. Il fotone in genere non viene assorbito ma diffuso anche all'indietro.
- **Creazione di coppie** : ad energie superiori ad 1 MeV è possibile la creazione della coppia elettrone-positrone.



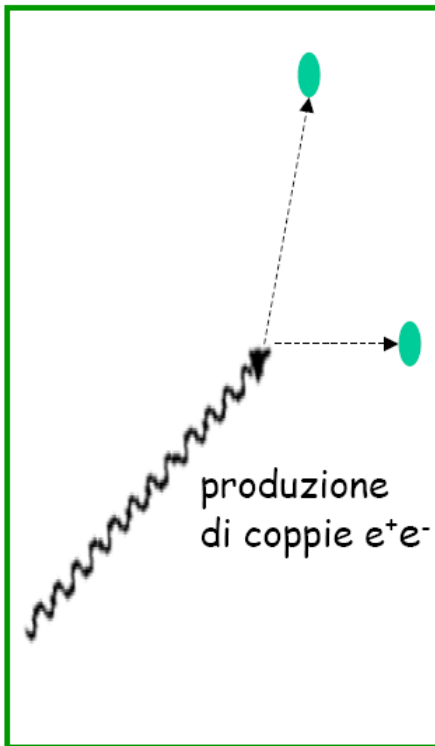
Effetto fotoelettrico



Effetto Compton



produzione di coppie e^+e^-

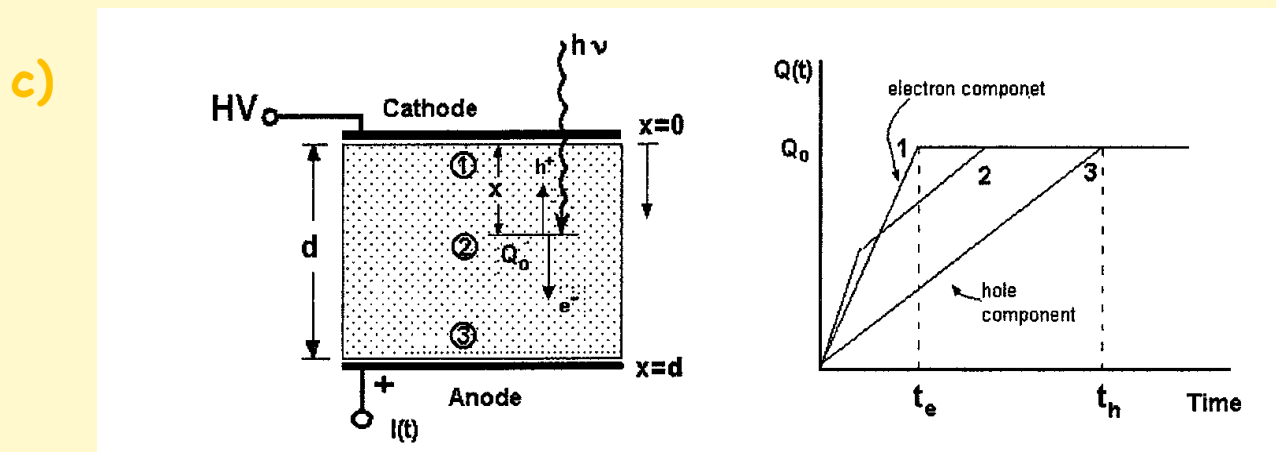
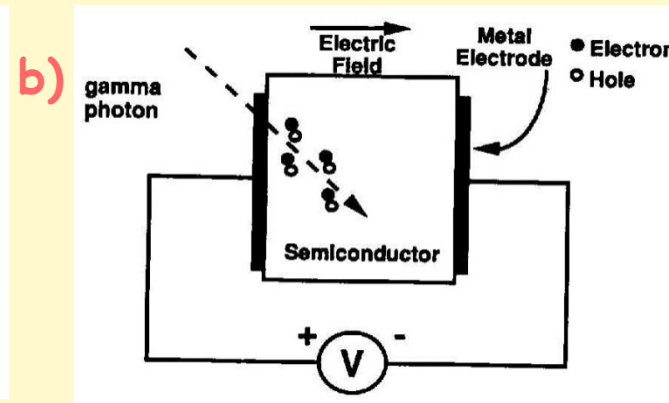
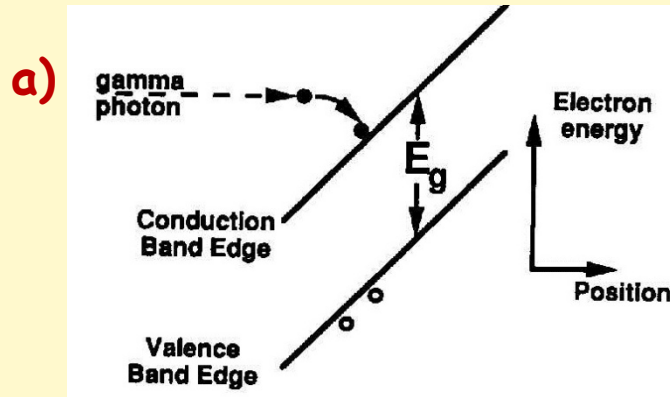


Rivelazione con rivelatori a semiconduttore per raggi X duri

- Un fotone X o gamma di energia E , che attraversa il volume sensibile di un rivelatore a semiconduttore, produce i processi di **assorbimento fotoelettrico, diffusione Compton e creazione di coppie**, elevando elettroni dalla banda di valenza a quella di conduzione **(a)**.
- Si formano, così, coppie elettrone-lacuna che vengono derivate ai rispettivi elettrodi grazie all'azione di un campo elettrico applicato **(b)**: il teorema di Ramo stabilisce che un portatore che derivi per un tratto dx verso il proprio elettrodo di raccolta origina un impulso corrispondente ad una carica indotta dq **(c)**.
- Il numero delle coppie generate dal fotone è: $N = E_\gamma / \varepsilon$ dove ε è l'energia di ionizzazione, cioè l'energia media spesa dal fotone primario per creare una coppia elettrone-lacuna.
- L'impulso viene acquisito dall'elettronica di lettura ed inviato ad un analizzatore multicanale.

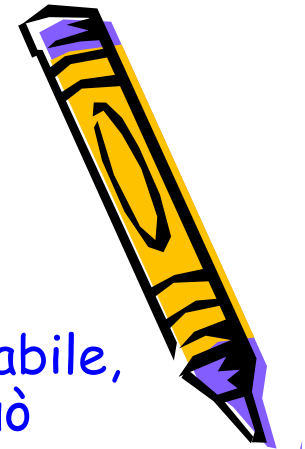
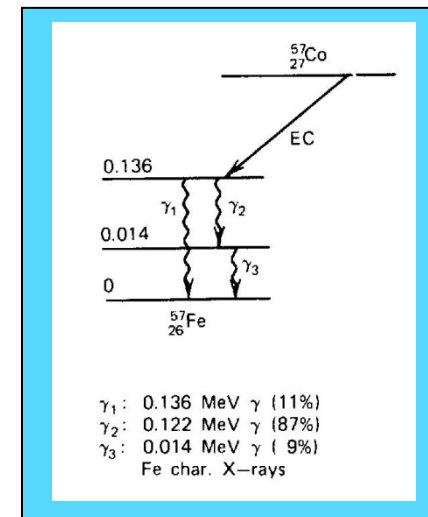
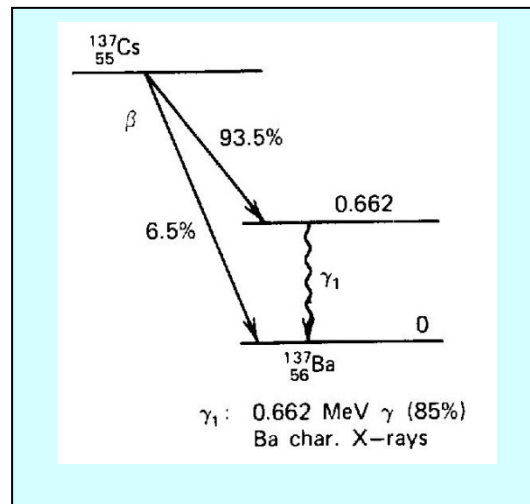


Rivelazione con rivelatori a stato solido per raggi X duri (2)



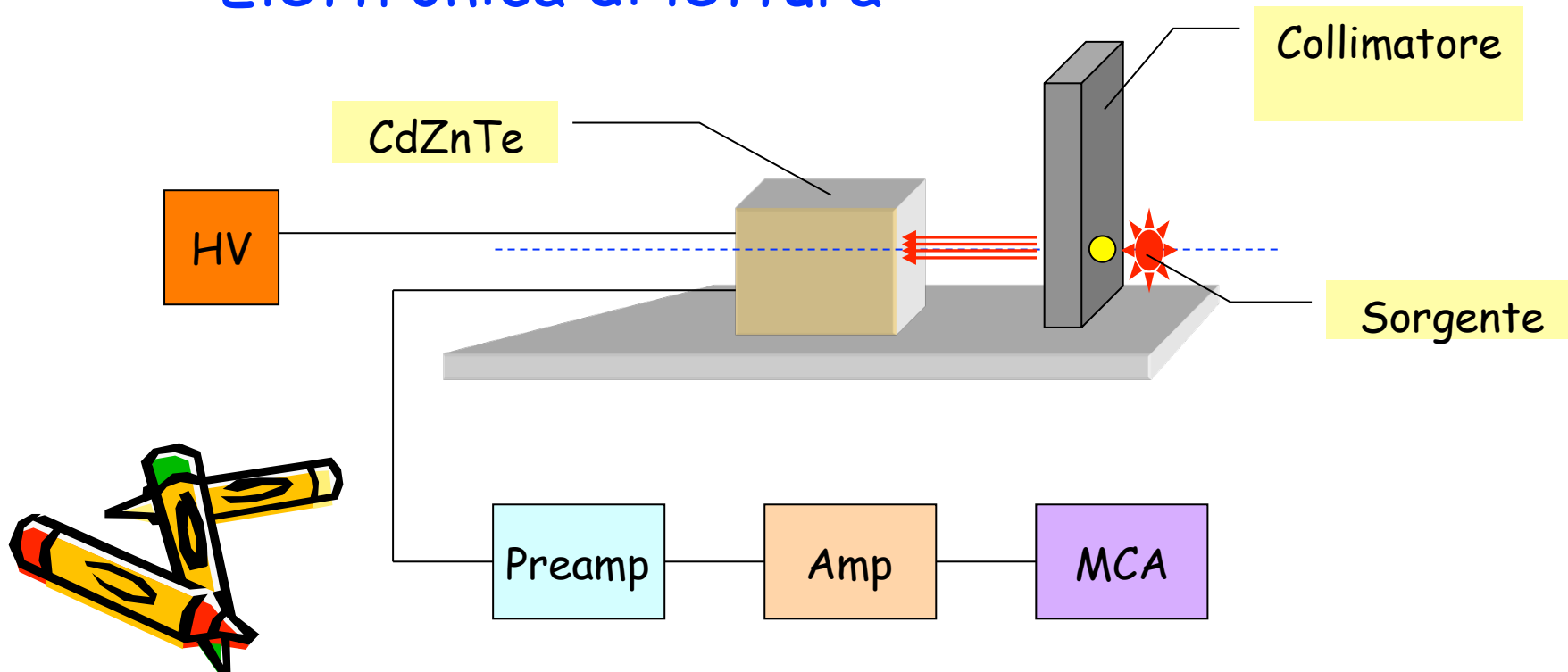
SCHEMI DI DECADIMENTO

- ❖ Come esempio consideriamo il ^{137}Cs che decade nel ^{137}Ba stabile, $t_{1/2}$ di 30 anni, tramite decadimento β^- : il decadimento può essere diretto tramite l'emissione di un β^- oppure può avvenire in cascata tramite un β^- e un raggio γ di energia pari a 661.6 keV (raggi X caratteristici del ^{137}Ba).



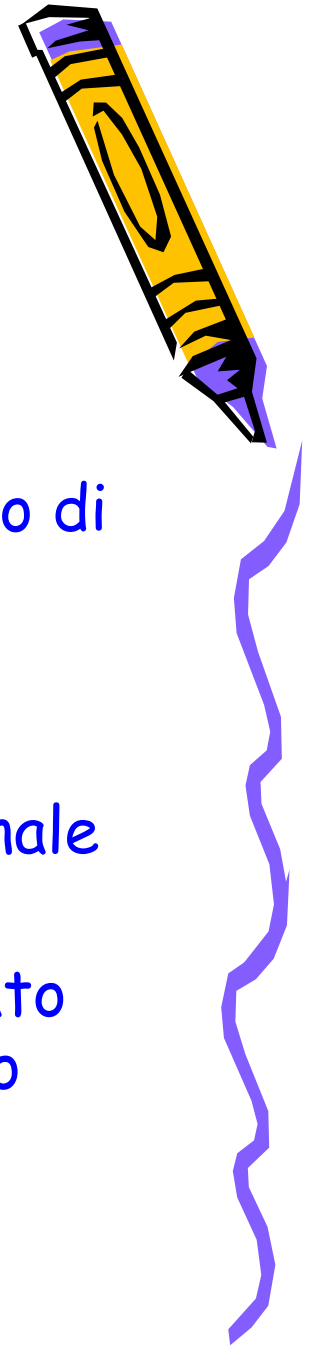
APPARATO SPERIMENTALE

- Sorgenti collimate di calibrazione
- Collimatore di Piombo ($\phi = 3.5\text{mm}$)
- Rivelatore di CZT sensibile alla posizione
- Elettronica di lettura



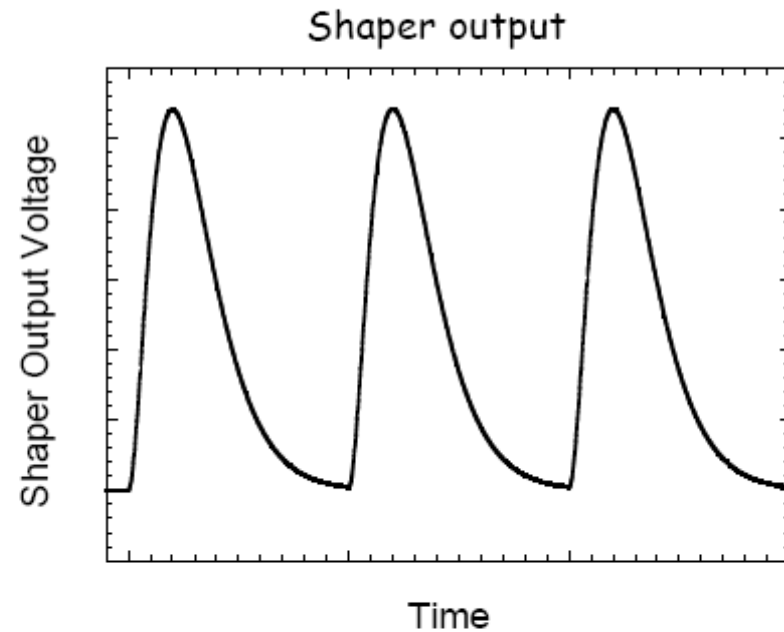
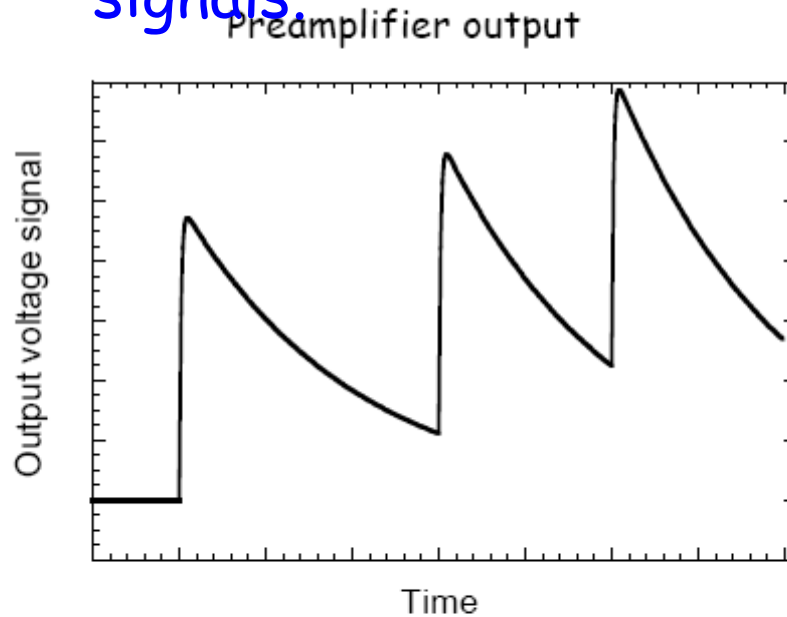
Elettronica di lettura standard

- **Charge sensitive preamplifier**: conversione dell'impulso di carica raccolto agli elettrodi all'interno del rivelatore in un segnale analogico di tensione con guadagno generalmente unitario.
- **Shaper amplifier**: formatura gaussiana e amplificazione del segnale di tensione.
- **Analog Digital Converter**: conversione del segnale da analogico a digitale.
 - **Multi channel Analyzer**: software dedicato alla visualizzazione e analisi dello spettro energetico.



L' amplificatore formatore

- Signal shaping: the voltage step at the preamplifier output has to be constrained to a finite duration to avoid pileup of successive signals.



Materiali Circostanti

- La presenza dei materiali circostanti il rivelatore puo' avere influenza sulla sua risposta. Un esempio è riportato nello spettro di fianco.

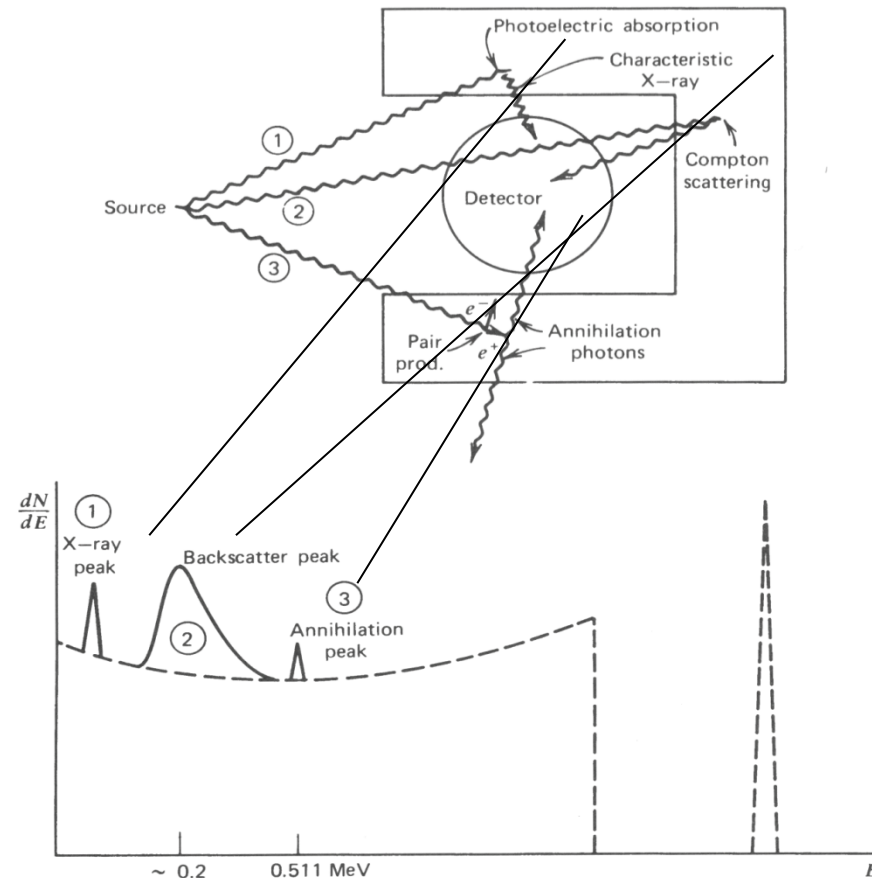
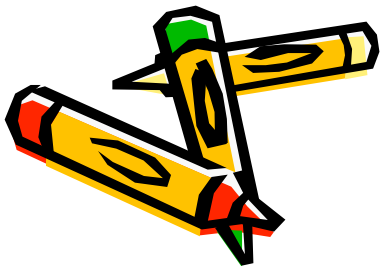
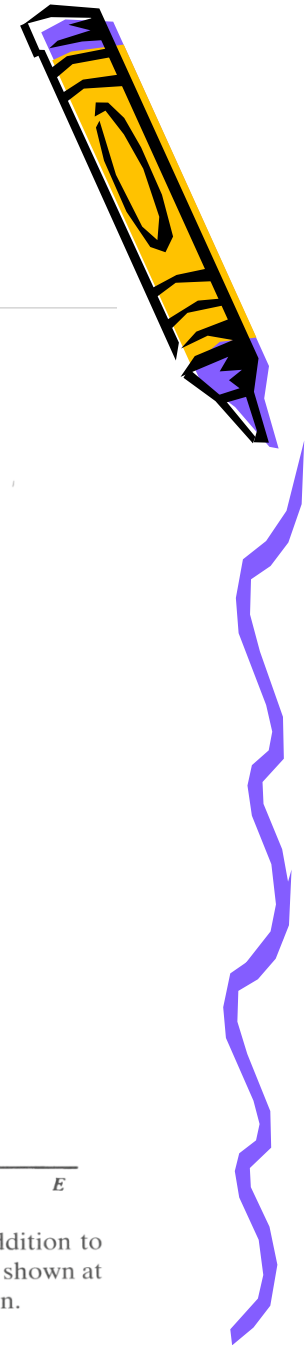


Figure 10.6 Influence of surrounding materials on detector response. In addition to the expected spectrum (shown as a dashed line), the representative histories shown at the top lead to the indicated corresponding features in the response function.

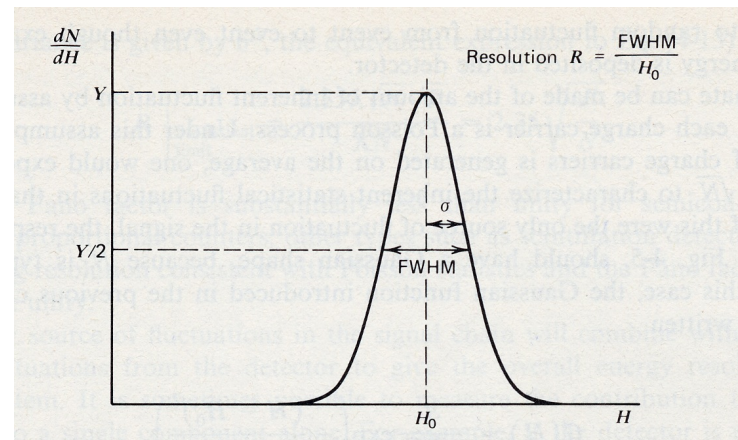


Risoluzione energetica

- Uno spettro ideale prodotto da un fotone che ha ceduto tutta la sua energia $E_\gamma = h\nu$ al rivelatore dovrebbe essere una riga sottile centrata intorno al valore $h\nu$.
- In realtà lo spettro presenta un allargamento della riga spettrale, misurato dalla risoluzione energetica. La sua definizione formale è data dal rapporto tra la larghezza totale a metà del massimo del fotopicco (*Full Width at Half Maximum*) e l'energia E sulla quale è localizzato il centroide del picco:

$$R = \frac{\Delta E(\text{FWHM})}{E} = \frac{\Delta c}{c_0}$$

dove Δc è numero di canali nel FWHM e c_0 il canale del centroide del picco.



Risoluzione energetica (2)

- In un rivelatore a semiconduttore l'assorbimento di un fotone di energia E crea un numero di coppie elettrone-lacuna, entro il volume attivo del rivelatore, dato da $N = E/\varepsilon$ (ε = energia di ionizzazione).
- La generazione dei portatori di carica è un fenomeno di tipo quantico, quindi, soggetto a fluttuazioni casuali. Se supponiamo che ogni evento ionizzante segua la statistica di Poisson, si ha che in media vengono generati N portatori di informazione, con una fluttuazione caratterizzata da una deviazione standard pari a:

$$\sigma = k\sqrt{N} \quad \longrightarrow \quad R_{\text{Poisson limit}} = \frac{2.35}{\sqrt{N}}$$

- Ampiezza $H_0 = kN$



Risoluzione energetica (3)

- In realtà la risoluzione energetica misurata è più piccola di quella calcolata dall'equazione precedente, poiché le fluttuazioni statistiche osservate sono minori di quelle teoriche. Questo significa che non si può applicare la semplice statistica poissoniana dato che gli eventi ionizzanti non sono completamente indipendenti tra loro.
- Il fattore di Fano F , introdotto per quantificare la deviazione delle fluttuazioni statistiche osservate nel numero di portatori di carica dalla statistica di Poisson è funzione di tutti i processi fondamentali che portano ad un trasferimento d'energia nel rivelatore, incluse le reazioni che non causano ionizzazione come le eccitazioni dei fononi, ecc.
- La risoluzione energetica è:

$$R_{\text{stat}} = 2.35 \sqrt{\frac{F}{N}}$$

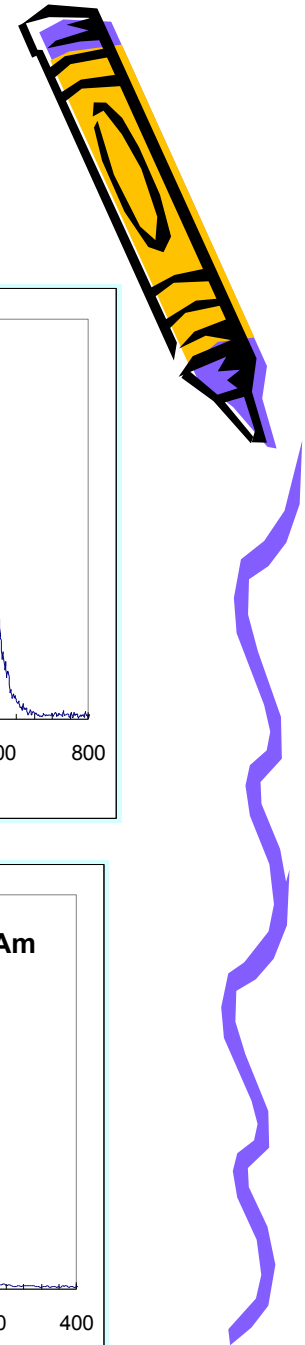
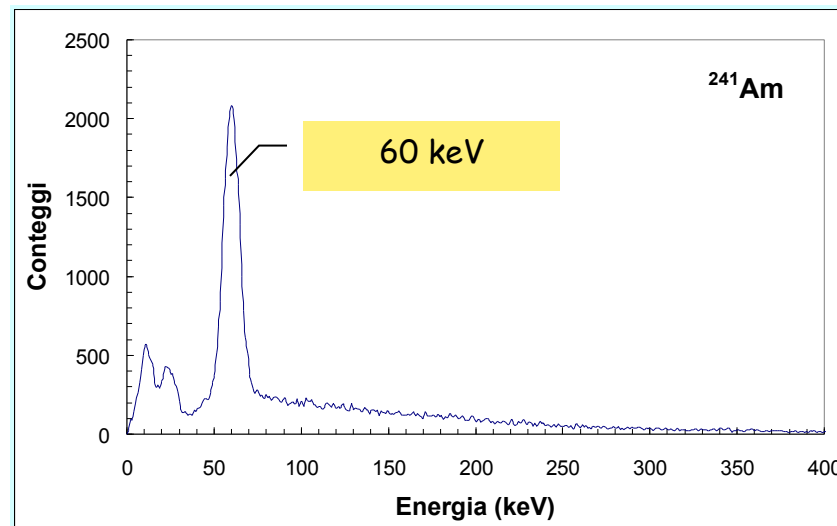
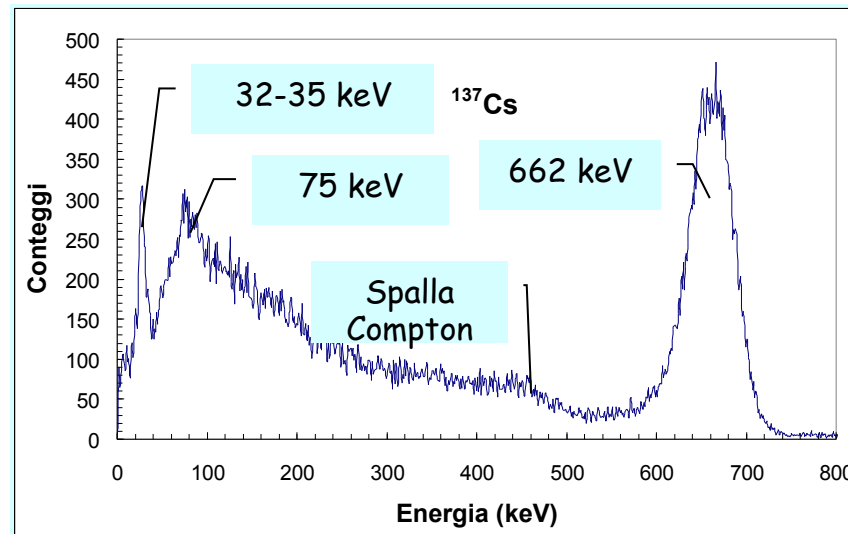
- Per i semiconduttori, compresi il CdTe e il CZT, il fattore di Fano assume un valore di circa $0.1 \div 0.3$.



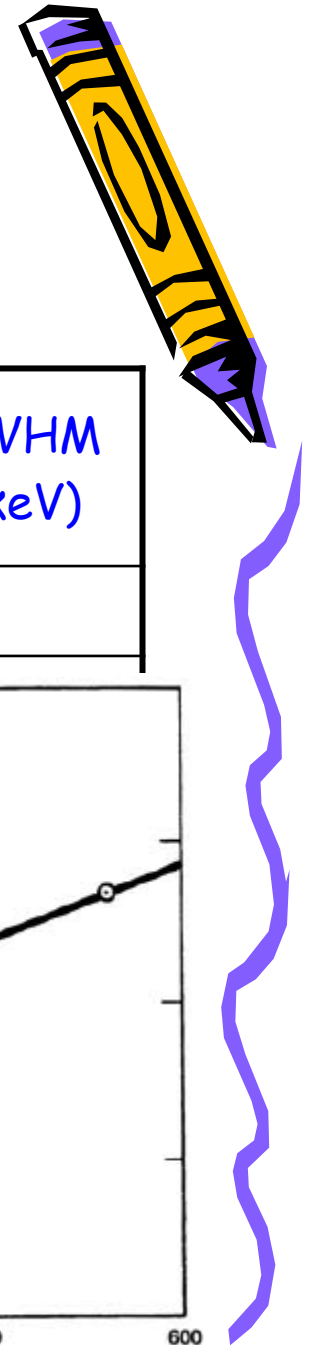
Calibrazione in energia

Per effettuare la calibrazione in energia:

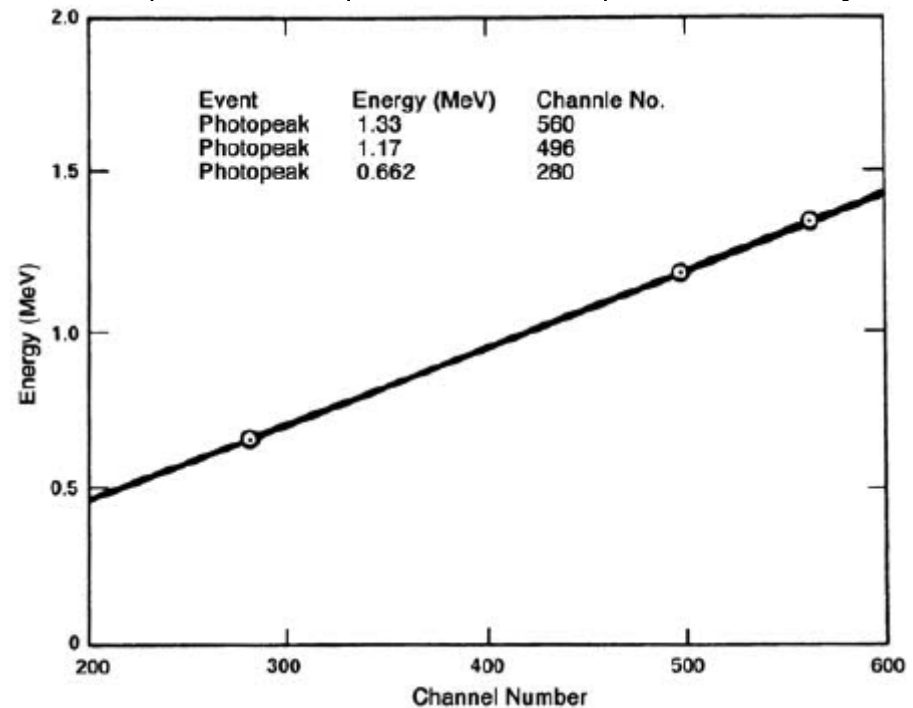
- ✓ acquisiamo uno spettro di ^{57}Co per 20 minuti;
- ✓ acquisiamo uno spettro di ^{241}Am per 10 minuti;
- ✓ acquisiamo uno spettro di ^{109}Cd per 5 minuti;
- ✓ determiniamo la retta di calibrazione: grafico dell'energia dei fotopicchi in funzione del canale.



OUTPUT DEI DATI



Evento	Energia (keV)	No. del canale	FWHM (ch)	Energy resolution (%)	FWHM (keV)
Fotopicco a 122.06 keV	122.06				
Fotopicco a 59.54 keV	59.54				
Fotopicco a 22.xx keV	22.xx				
Fotopicco a 88.04 keV	88.04				
Optional Picchi di escape in ^{241}Am					

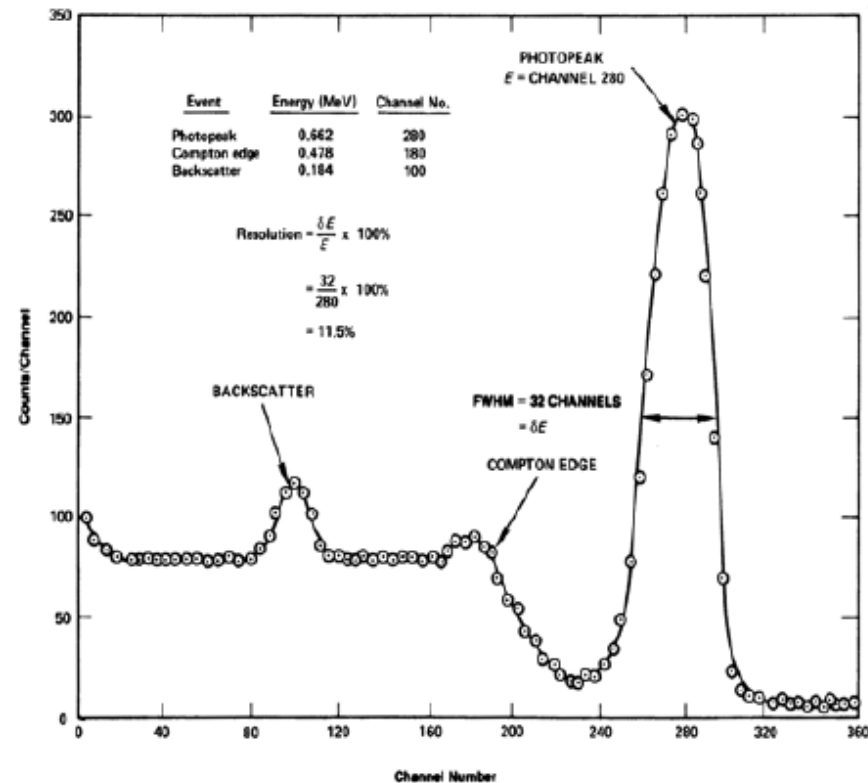
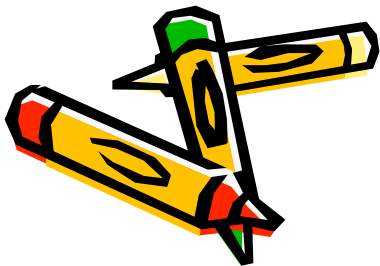


LO SPETTRO DEL ^{137}Cs

- Possiamo notare presenti nello spettro:
- il picco fotoelettrico
- la spalla Compton
- il picco di backscattering
- **e ?**

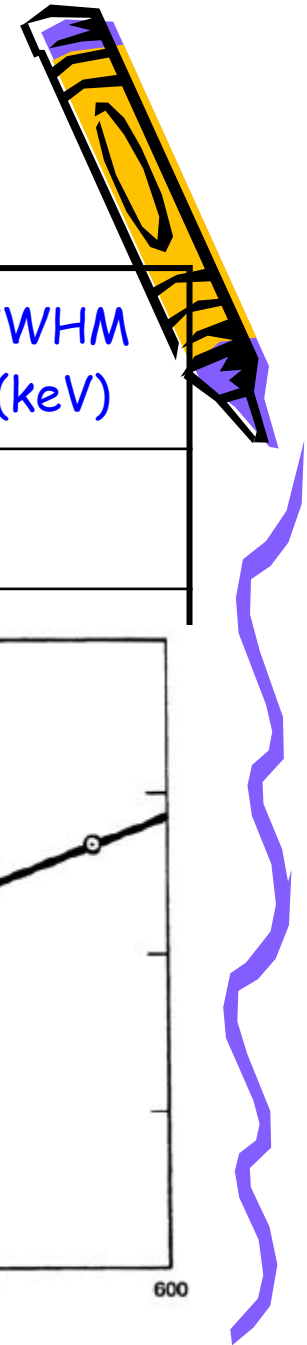
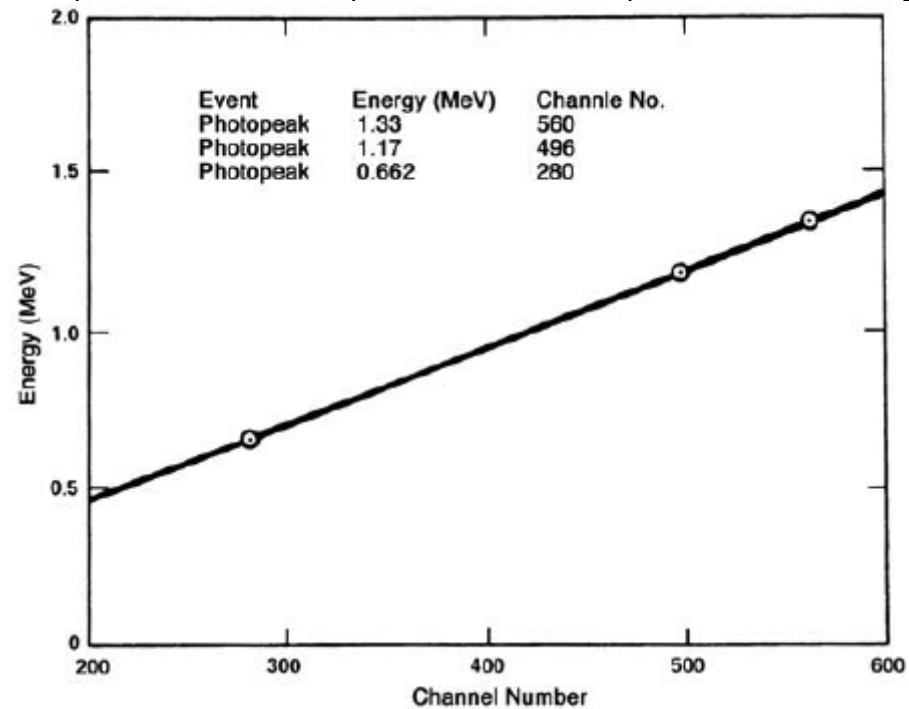
$$E_{\gamma'} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{E_{\gamma}}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)}$$

$$\theta = 180^{\circ} \quad E_{\gamma'} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{2E_{\gamma}}{m_e c^2}} \approx \frac{E_{\gamma}}{1 + 4E_{\gamma}}$$



OUTPUT DEI DATI

Evento	Energia (keV)	No. del canale	FWHM (ch)	Energy resolution (%)	FWHM (keV)
Fotopicco a 662 keV	662				
Fotopicco a 122	122				
Compton Edge ^{137}Cs					
Optional Fluorescenza del Pb					



Calcolo dell'efficienza di rivelazione (teorica)

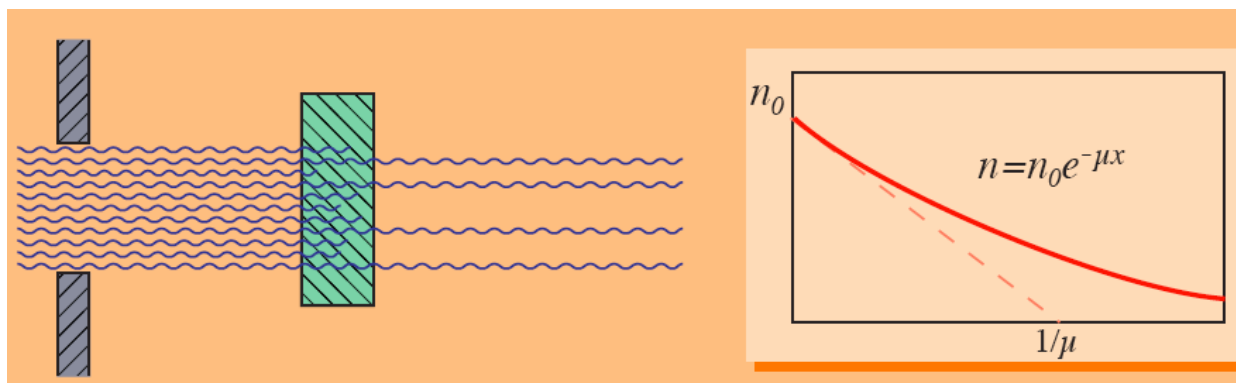
- Un fascio di intensità I_0 , entrando in un mezzo subisce un'attenuazione che è proporzionale al tratto percorso ed all'intensità I nel punto x :

$$I = I_0 \exp(-\mu x)$$

- Probabilità che un fotone gamma incidente depositi la sua energia nel rivelatore:

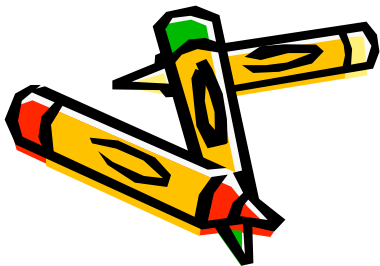
$$\text{Efficienza} = 1 - \exp(-\mu x)$$

- Dipende dall'energia, dal materiale e dallo spessore



Esperienze di laboratorio

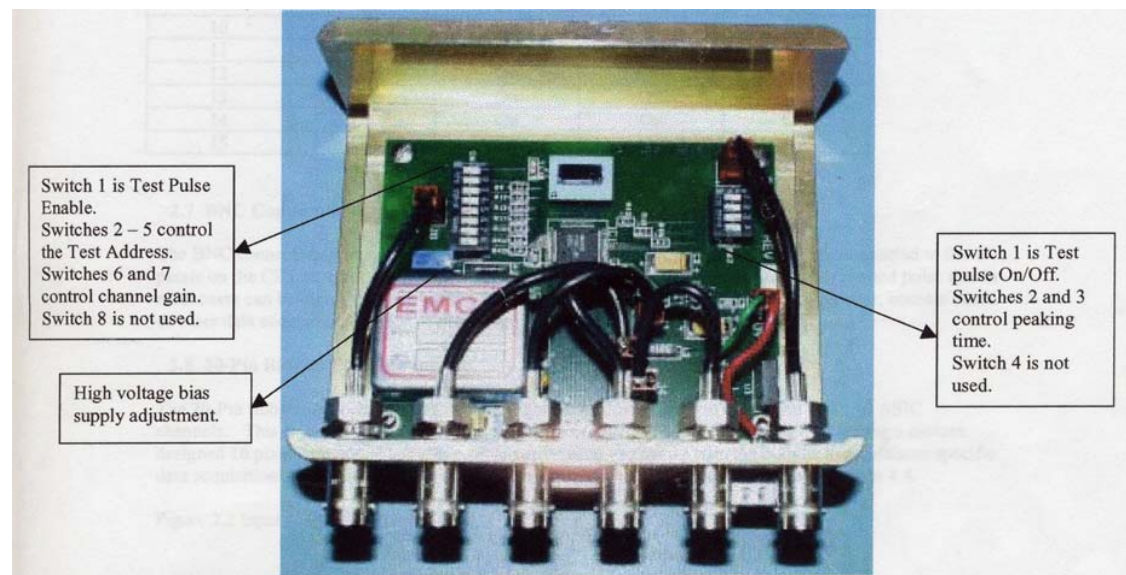
- Studio dell'uniformità di risposta di un rivelatore di CZT sensibile alla posizione
- Studio della risposta di un rivelatore di HPGe raffreddato con azoto liquido
- Imaging



CZT multipixel

Studio dell'uniformità di risposta di un rivelatore di CZT sensibile alla posizione:

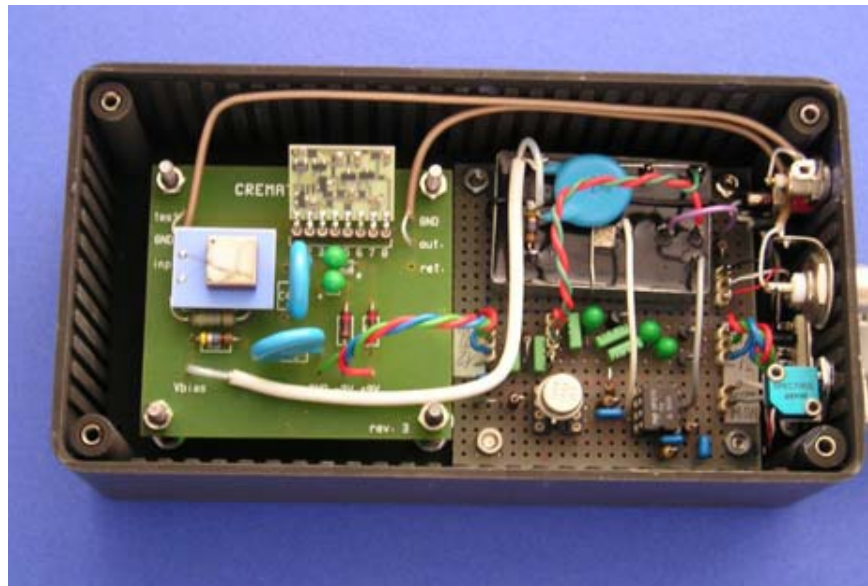
- ✓ acquisizione di spettri energetici di 4 - 5 pixel;
- ✓ analisi comparativa della loro risposta in termini di efficienza di raccolta di carica, risoluzione energetica, efficienza di fotopicco.



CZT monolettrodo

Studio della risposta di un rivelatore di CZT con anodo continuo
Ottimizzazione della tensione operativa e del tempo di formatura dell'amplificatore formatore:

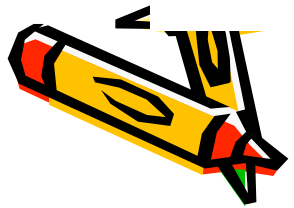
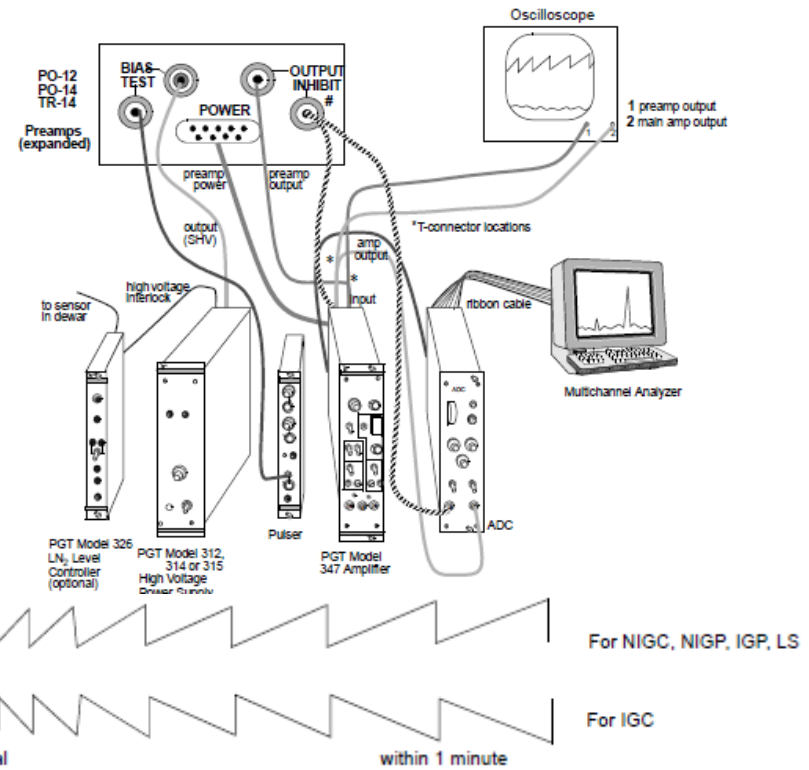
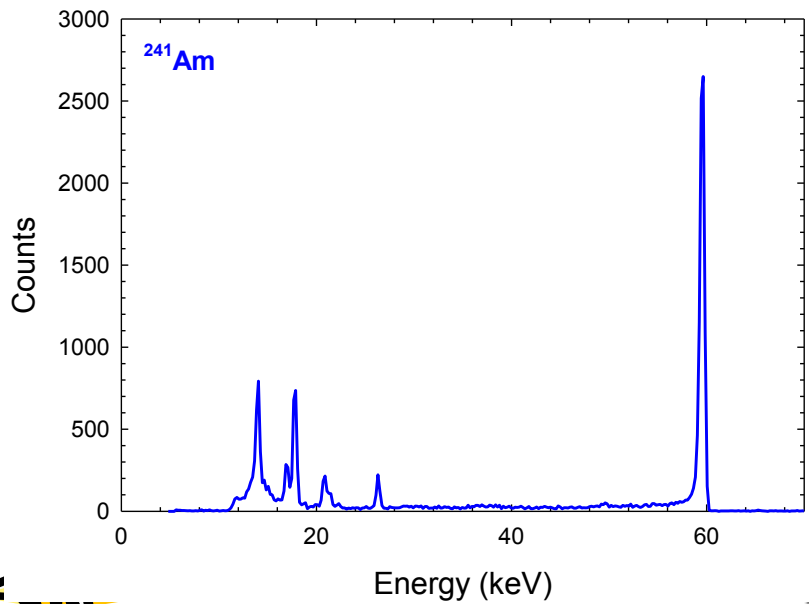
- ✓ acquisizione di spettri energetici a tre tensioni di polarizzazione;
- ✓ acquisizione di spettri energetici a tre diversi tempi di formatura.



Rivelatore di HPGe

Studio della risposta di un rivelatore di HPGe raffreddato con azoto liquido:

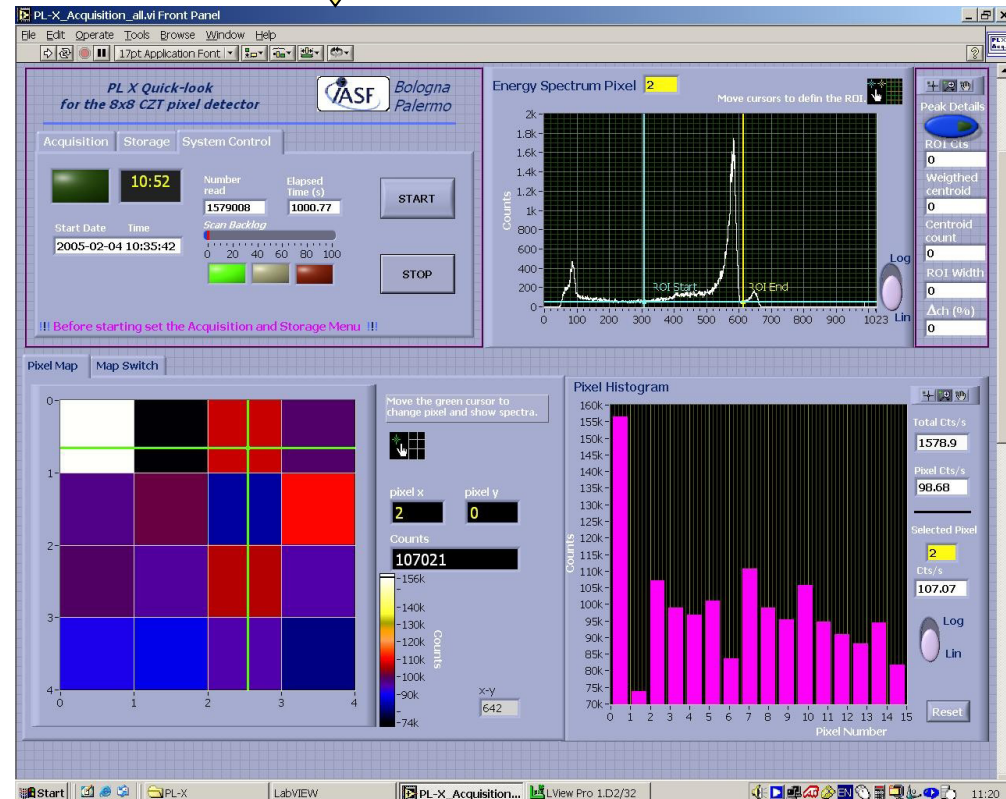
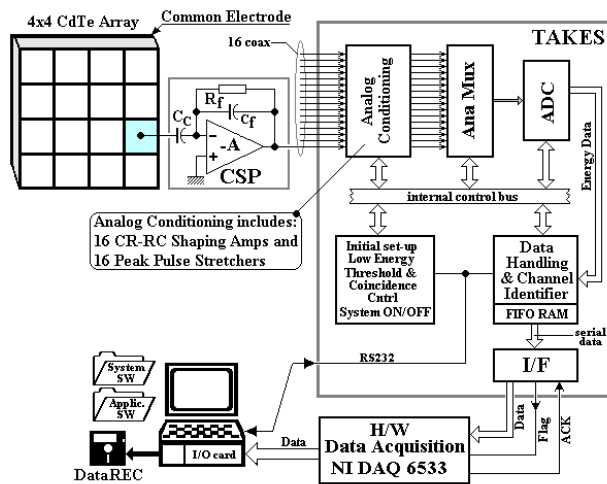
- ✓ acquisizione degli spettri energetici di ^{57}Co , ^{241}Am e ^{109}Cd ;
- ✓ Calibrazione e analisi della risposta spettroscopica.



IMAGING

Acquisizione di un'immagine con un rivelatore di CZT sensibile alla posizione:

- ✓ descrizione della catena elettronica di lettura;
- ✓ descrizione del software di acquisizione;
- ✓ acquisizione del fondo ambientale;
- ✓ acquisizione dell'immagine.



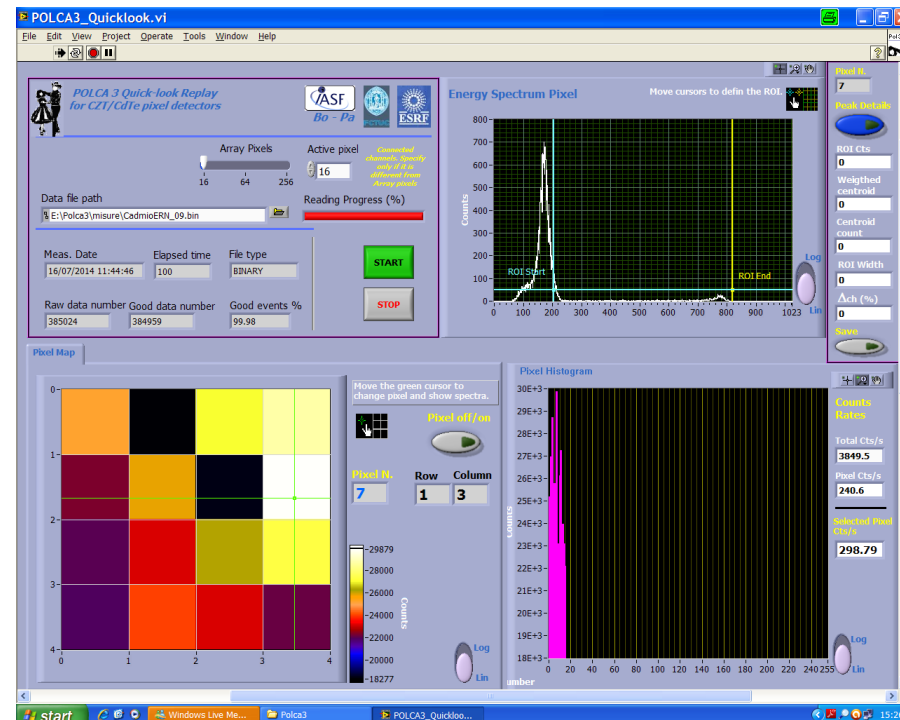
Schermi passivi

Acquisizione di un'immagine con un rivelatore di CZT sensibile alla posizione:

- ✓ inserendo uno schermo di Alluminio tra sorgente e rivelatore;
- ✓ inserendo uno schermo di Piombo tra sorgente e rivelatore;




Analisi della risposta del rivelatore.

Trasparenza degli schermi.








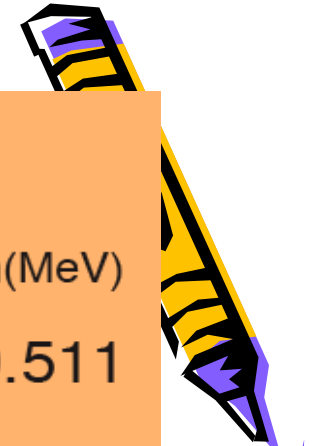
RADIAZIONI

ELETTROMAGNETICHE

$\lambda(m)$		$h\nu(eV)$
	raggi γ	10^4
	raggi X	10^3
	ultravioletto	10^2
	luce visibile	10^1
	infrarosso	10^0
		10^{-1}
		10^{-2}
	micro-onde	10^{-3}
		10^{-4}
	TV, radio FM	10^{-5}
		10^{-6}
		10^{-7}
	radio AM	10^{-8}

CORPUSCOLARI

	Q	m(MeV)	
	β	± 1	0.511
	p	+1	938
	d	+1	1876
	α	+2	3727
	n	0	939.5
ioni pesanti, muoni, pioni, ...			



Radiazione di Fluorescenza

