

# Test and calibration of gamma and X-ray detectors

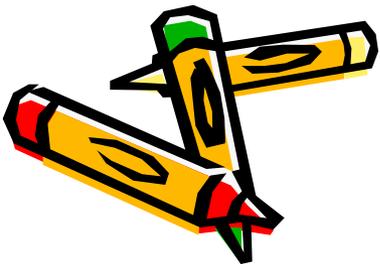
IASF Bologna / INAF

Bologna, 21 Novembre 2018



# OBIETTIVO

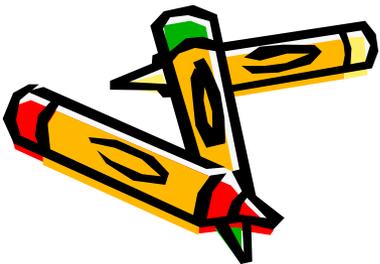
- ❑ Calibrazione in energia di un rivelatore utilizzato nella banda energetica dei raggi X duri /gamma molli.
- ❑ Rivelatori a semiconduttore di CdTe/CdZnTe e HPGe impiegati in missioni spaziali.
- ❑ Studio comparativo delle prestazioni di tali rivelatori in termini di Charge Collection Efficiency e risoluzione energetica.
- ❑ Calibrazione e derivazione dei principali parametri operativi di un rivelatore a scintillazione letto da un SDD.



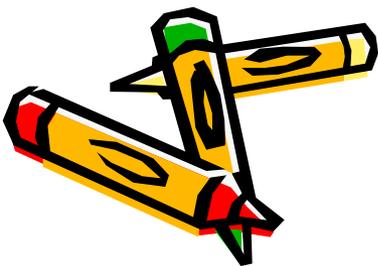
# SCOPO DELLA CALIBRAZIONE



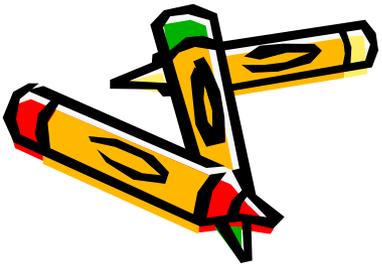
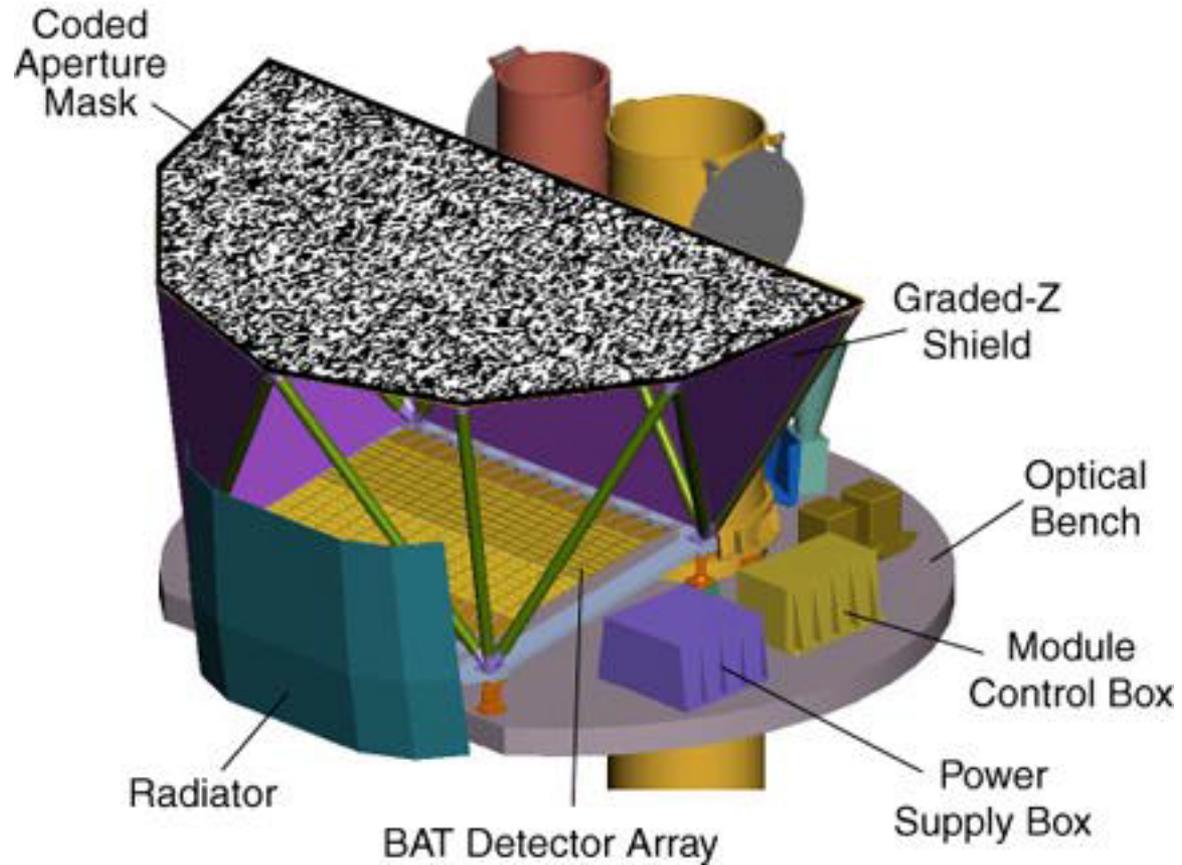
- ❖ I raggi X e gamma emessi da sorgenti celesti vengono rivelati con dei sensori che prima di essere lanciati nello spazio devono essere calibrati a terra.
- ❖ La calibrazione in energia permette l'associazione canale-energia.



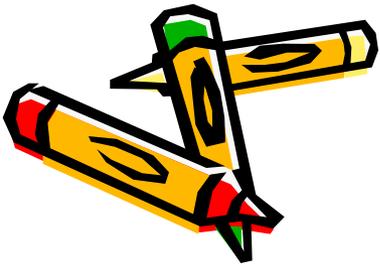
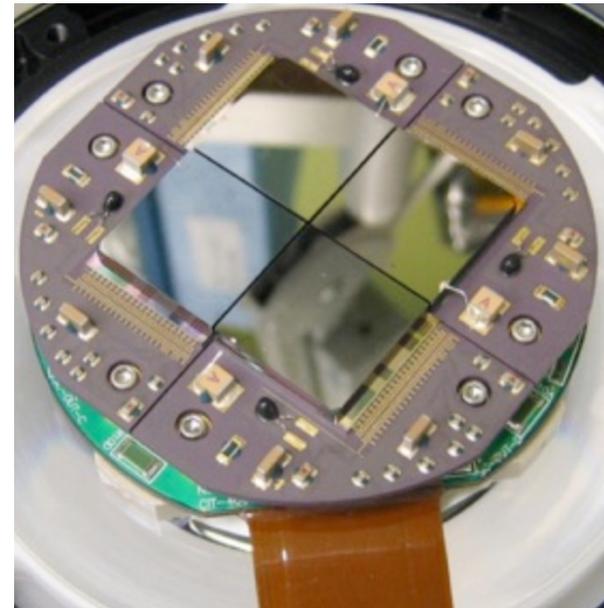
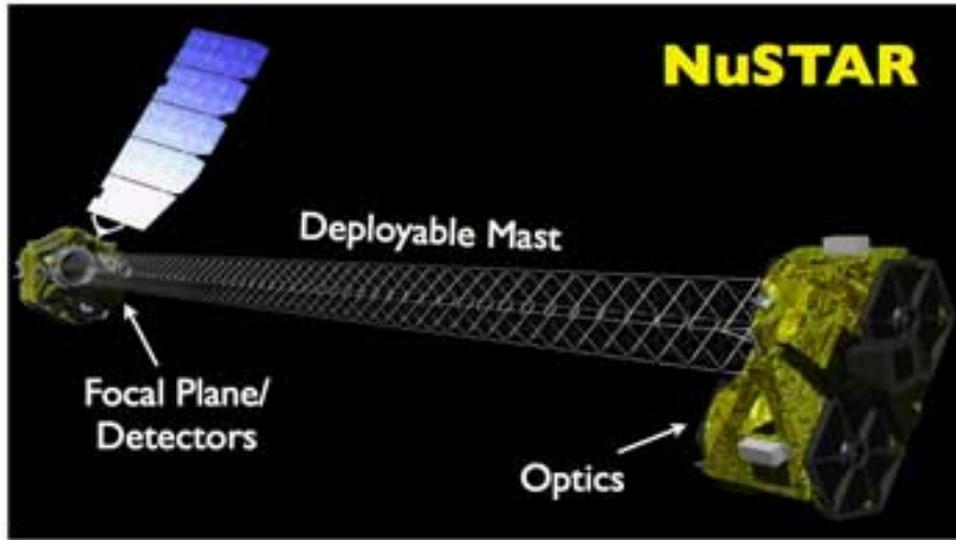
# ISGRI/INTEGRAL: CdTe



# BAT/Swift: CZT



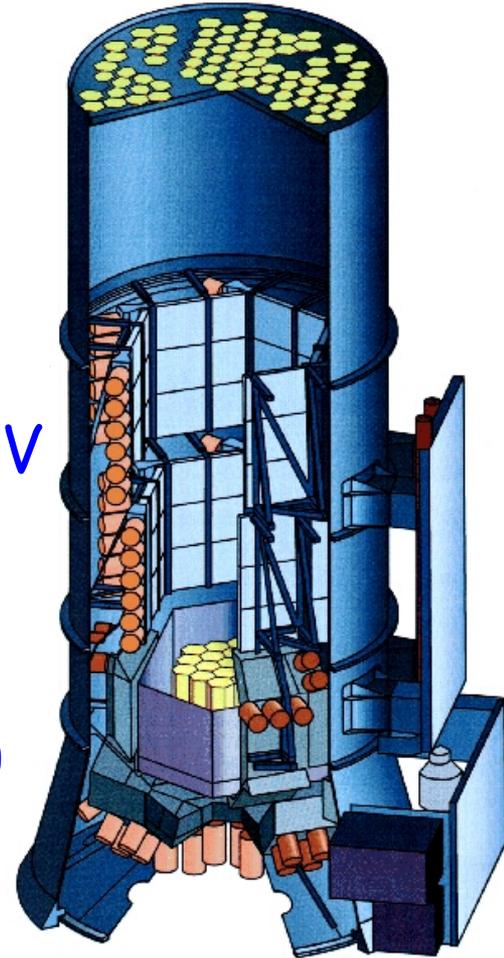
# Focal plane detector/NuSTAR: CZT



# SPI/INTEGRAL: HPGe

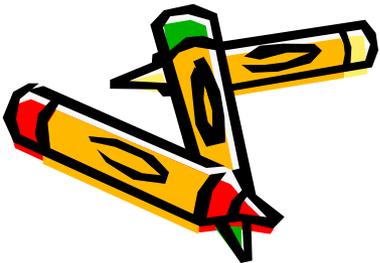


- ❖ Range Energetico: 20 keV - 8 MeV
- ❖ 19 rivelatori esagonali di germanio iperpuro
- ❖ Temperatura criogenica: 85 K (-188 °C)
- ❖ Massa: 1300 chilogrammi



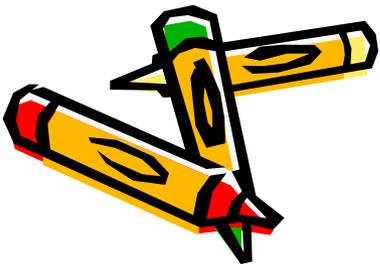
# IN CHE COSA CONSISTE

- 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:  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{57}\text{Co}$  e  $^{137}\text{Cs}$ .
- Analisi dello spettro.
- Calibrazione in energia.
- Calcolo della risoluzione energetica.
- Studio della risposta di un rivelatore a stato solido.



# INTERAZIONE DEI RAGGI X E GAMMA CON LA MATERIA

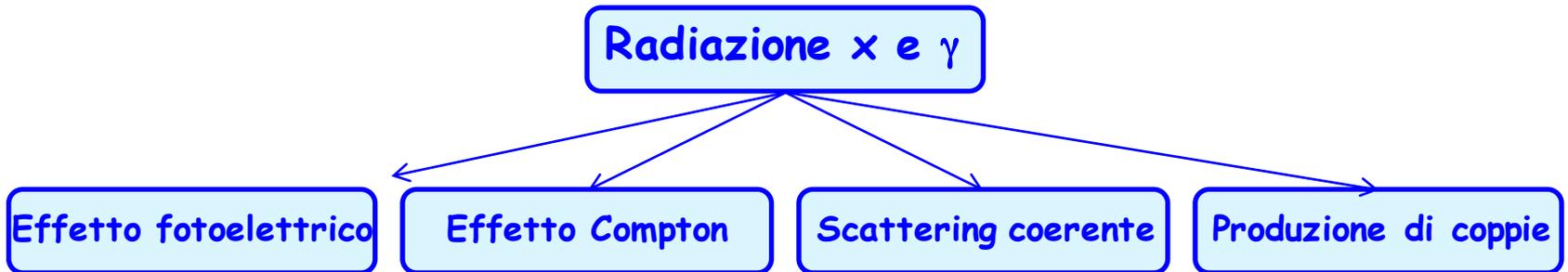
- Le sorgenti radioattive sono nuclei instabili che decadono emettendo radiazioni di diverso tipo, tra cui i raggi gamma.
- Le sostanze sono sempre trasparenti ai raggi gamma anche se in misura molto diversa a secondo della energia dei fotoni e della sostanza assorbente.
- **INTERAZIONE DELLE RADIAZIONI 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)

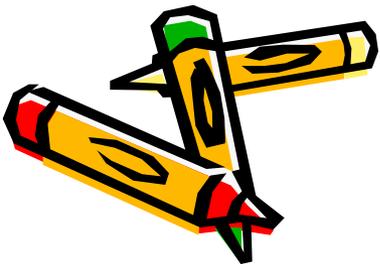
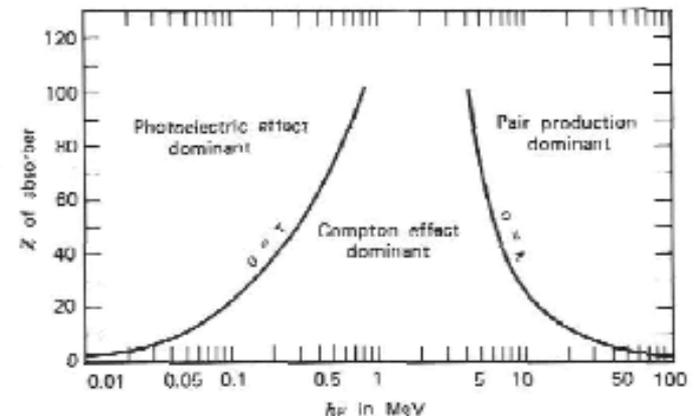


L'interazione può riguardare l'intero atomo (effetto **Fotoelettrico**), o un singolo elettrone atomico (effetto **Compton** e produzione di coppie nel campo elettronico) oppure il nucleo atomico (**Produzione di coppie** nel campo nucleare).



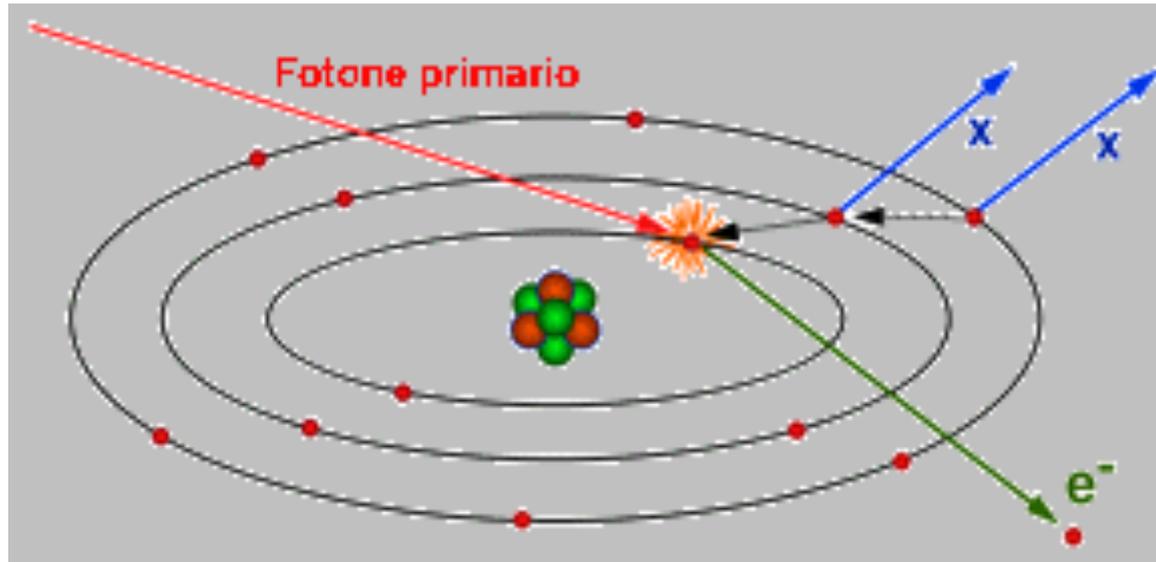
Le tre interazioni principali dominano in tre regioni diverse definite da:

- **energia dei fotoni incidenti**
- **numero atomico del materiale assorbitore**



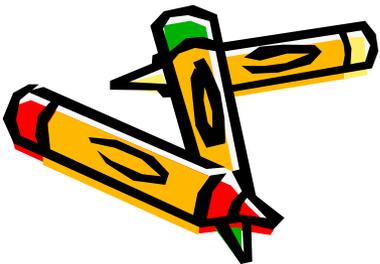
# I principali meccanismi di interazione

- **Effetto fotoelettrico** : il fotone strappa un elettrone dalle orbite più interne.



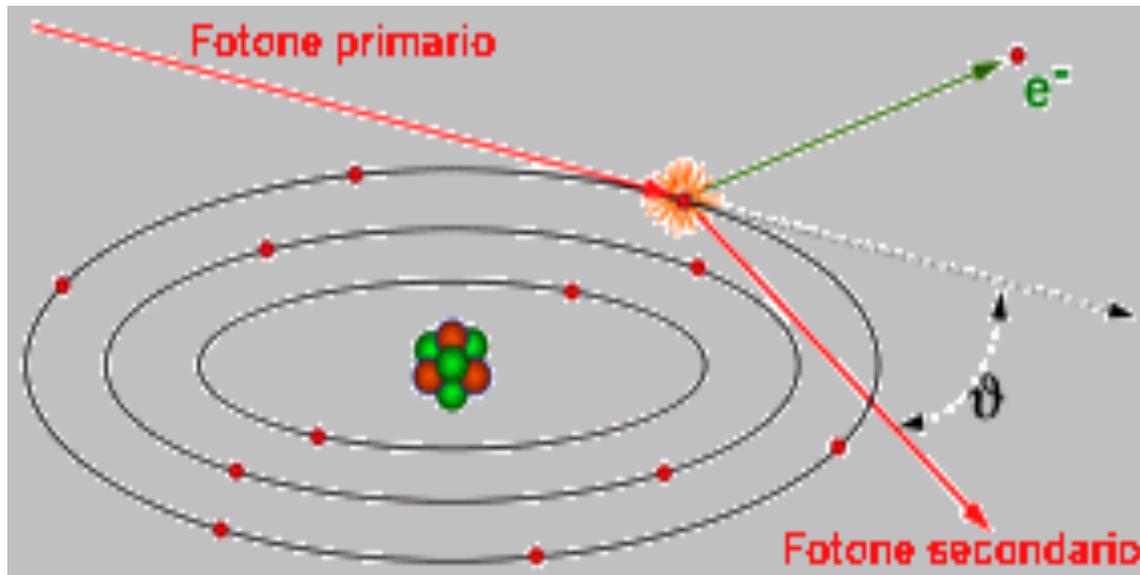
$$E_{e^-} = h\nu - E_b$$

$E_b$  è l'energia di legame dell'elettrone nell'orbitale

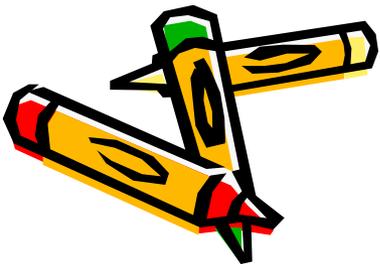


# I principali meccanismi di interazione

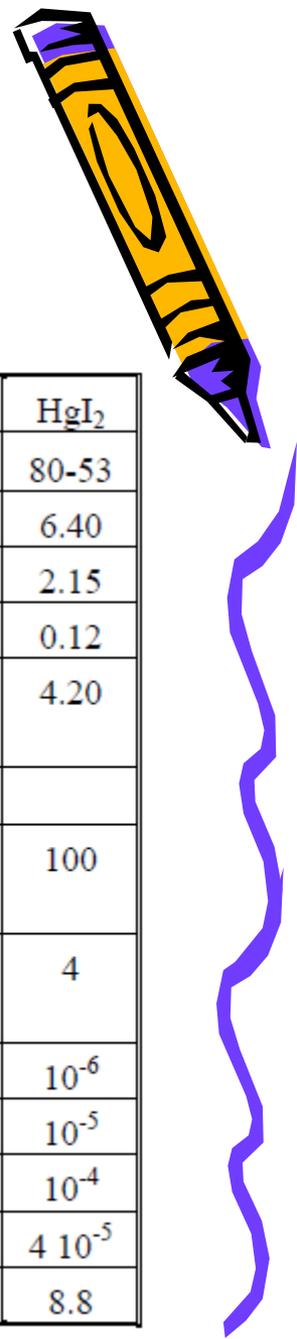
- **Effetto Compton** : urto diretto fotone X-elettrone libero. Il fotone in genere non viene assorbito ma diffuso anche all'indietro.
- **Creazione di coppie** : ad energie superiori ad 1 MeV è possibile la creazione della coppia elettrone-positrone.



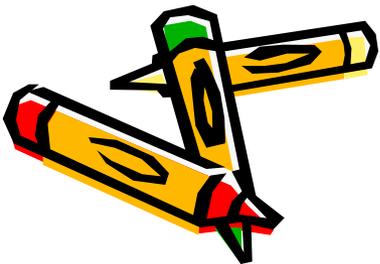
$$\Delta\lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \vartheta)$$



# Proprietà principali di Si, Ge, CdTe/CZT e HgI<sub>2</sub>

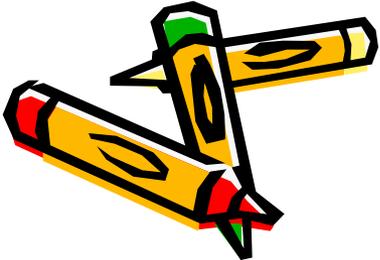


	Si	Ge	CdTe	Cd <sub>0.9</sub> Zn <sub>0.1</sub> Te	HgI <sub>2</sub>
Numero atomico Z	14	32	48-52	48-30-52	80-53
Densità a 300 K (g cm <sup>-3</sup> )	2.33	5.33	5.78	5.78	6.40
Bandgap a 300 K (eV)	1.12	0.67	1.44	1.572	2.15
Fattore di Fano	0.085	0.063		0.1	0.12
Energia di ionizzazione (eV)	3.62	2.96 (77 K)	4.43	4.64	4.20
Resistività (Ω cm)	<10 <sup>4</sup>	50	10 <sup>9</sup>	3 10 <sup>10</sup>	
Mobilità elettrone a 300 K (cm <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	1400	3900	1100	1000	100
Mobilità lacuna a 300 K (cm <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	480	1900	100	50-80	4
Vita media elettrone (s)	> 10 <sup>-3</sup>	> 10 <sup>-3</sup>	3 10 <sup>-6</sup>	3 10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>
Vita media lacuna (s)	2 10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-3</sup>	2 10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-5</sup>
μτ <sub>e</sub> (cm <sup>2</sup> /V)	> 1	> 1	3.3 10 <sup>-3</sup>	(3-5) 10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>
μτ <sub>h</sub> (cm <sup>2</sup> /V)	≈1	>1	2 10 <sup>-4</sup>	5 10 <sup>-5</sup>	4 10 <sup>-5</sup>
Costante dielettrica	11.7	16	11	10.9	8.8



# Rivelazione con rivelatori a semiconduttore per raggi X duri

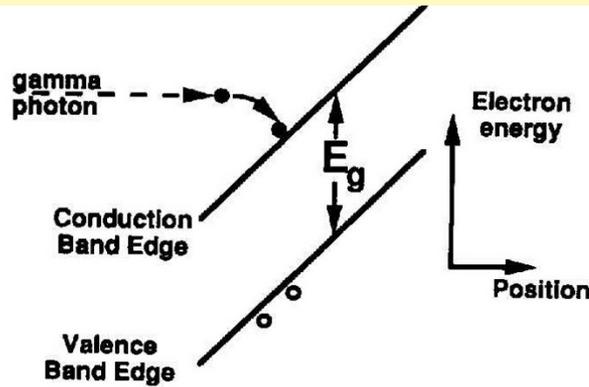
- Un fotone X o gamma di energia  $E$ , che attraversa il volume sensibile di un rivelatore a semiconduttore, produce i processi di **assorbimento fotoelettrico, diffusione Compton e creazione di coppie**, elevando elettroni dalla banda di valenza a quella di conduzione **(a)**.
- Si formano, così, coppie 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:  $N = E_\gamma / \epsilon$  dove  $\epsilon$  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.



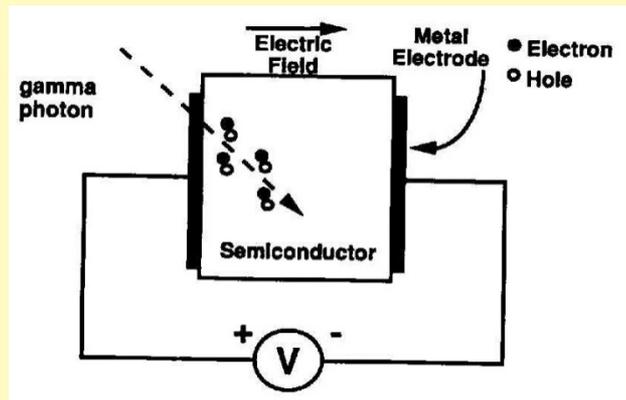
# Rivelazione con rivelatori a stato solido per raggi X duri (2)



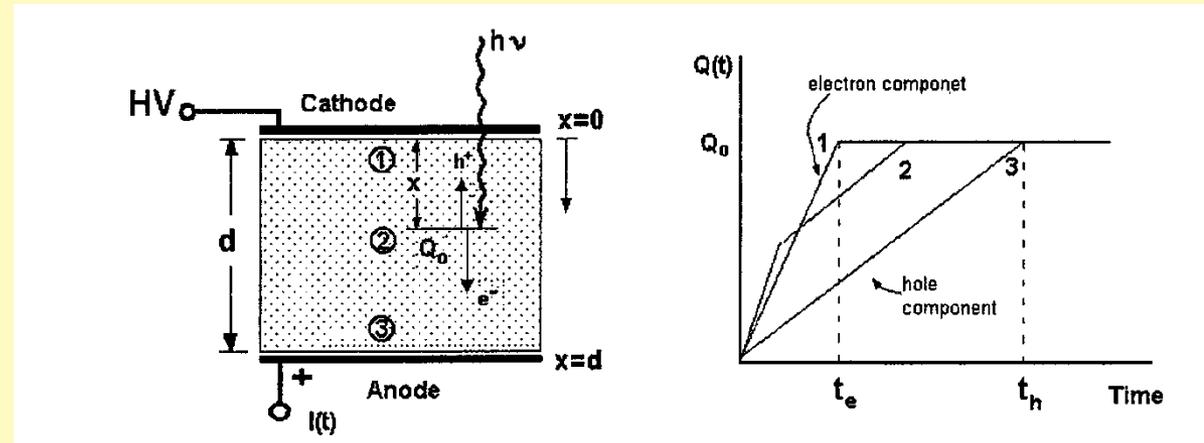
a)



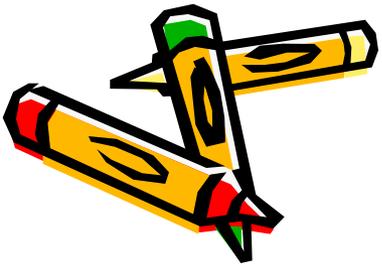
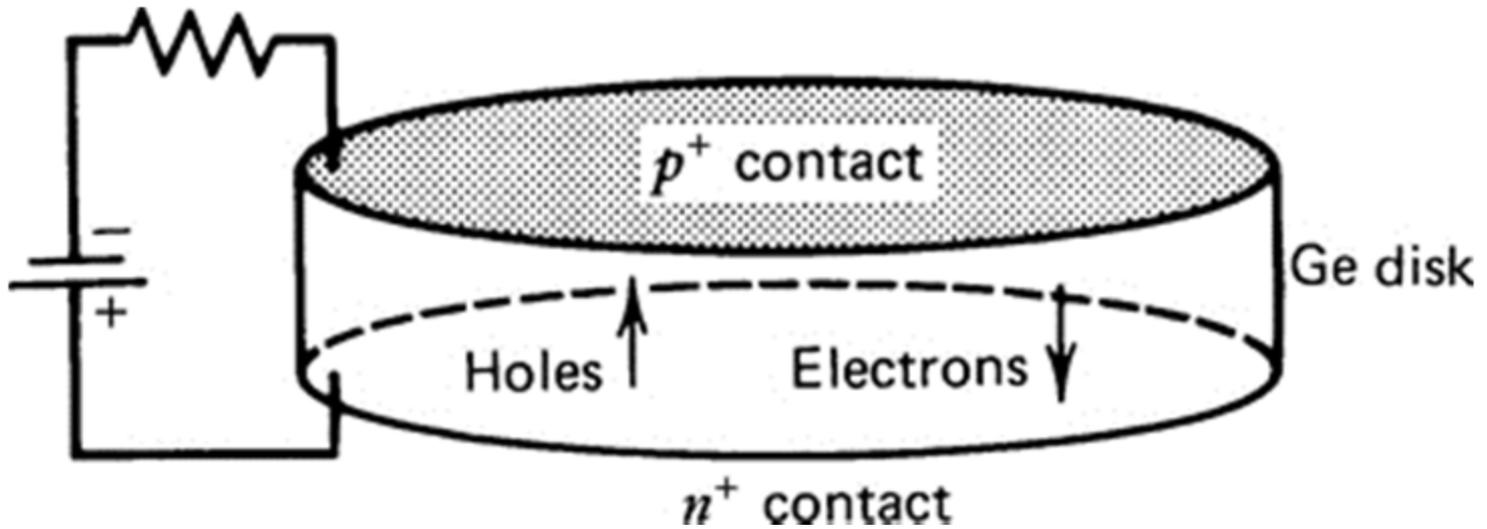
b)



c)

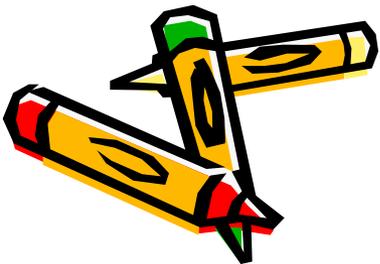
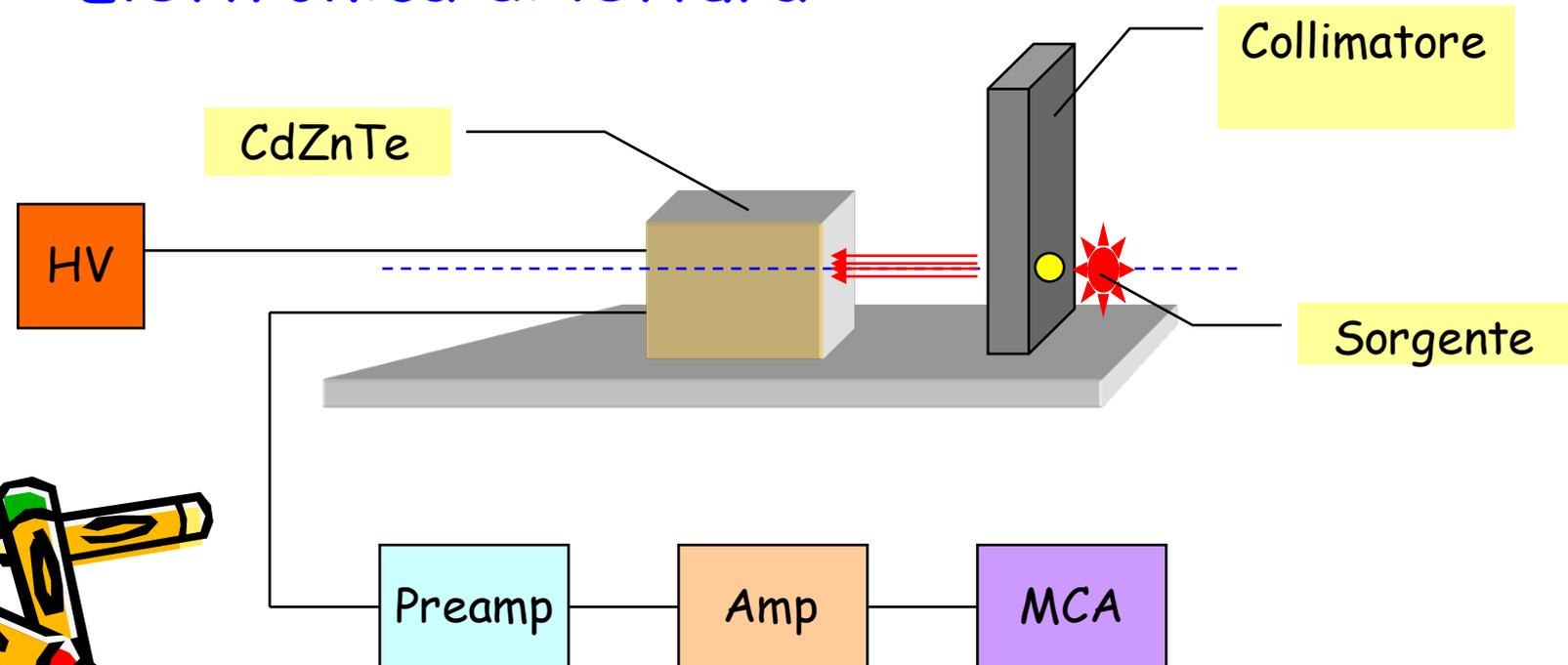


# Configurazione Planare di HPGe



# APPARATO SPERIMENTALE

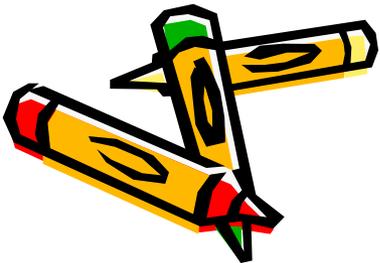
- Sorgenti collimate di calibrazione
- Collimatore di Piombo ( $\phi = 3.5\text{mm}$ )
- Rivelatore di CZT/HPGe
- Elettronica di lettura



# Elettronica di lettura standard

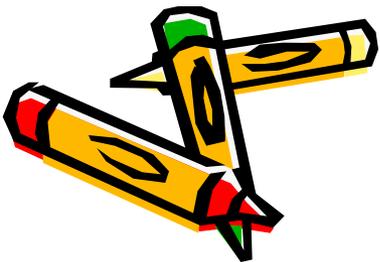
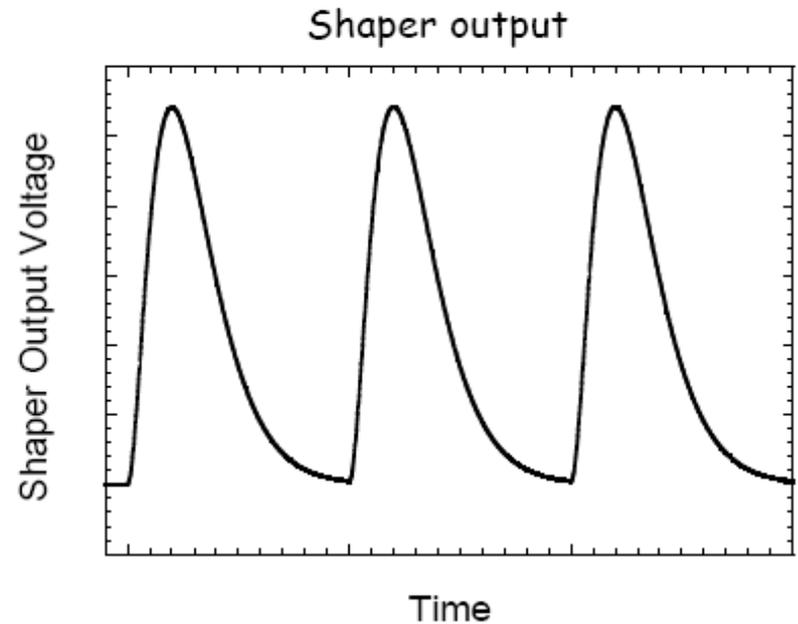
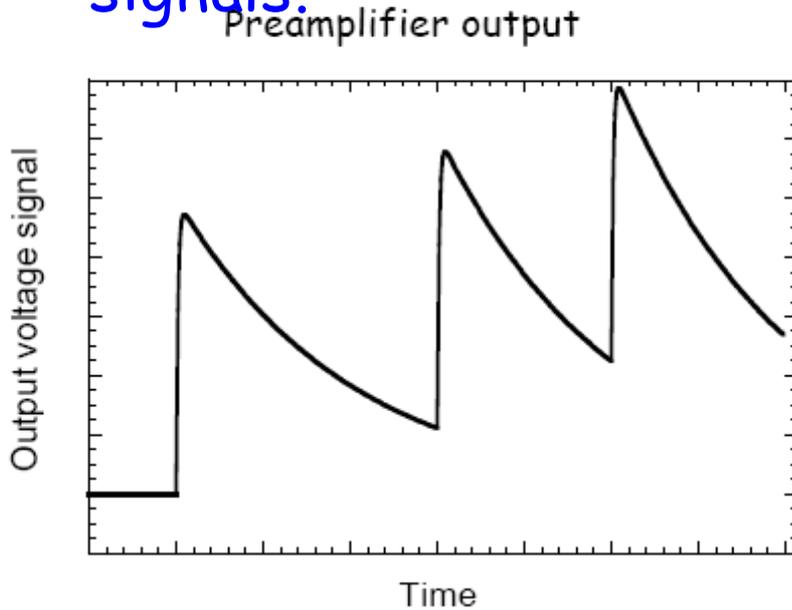


- **Charge sensitive preamplifier**: conversione dell'impulso di carica raccolto agli elettrodi all'interno del rivelatore in un segnale analogico di tensione con guadagno generalmente unitario.
- **Shaper amplifier**: formatura gaussiana e amplificazione del segnale di tensione.
- **Analog Digital Converter**: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



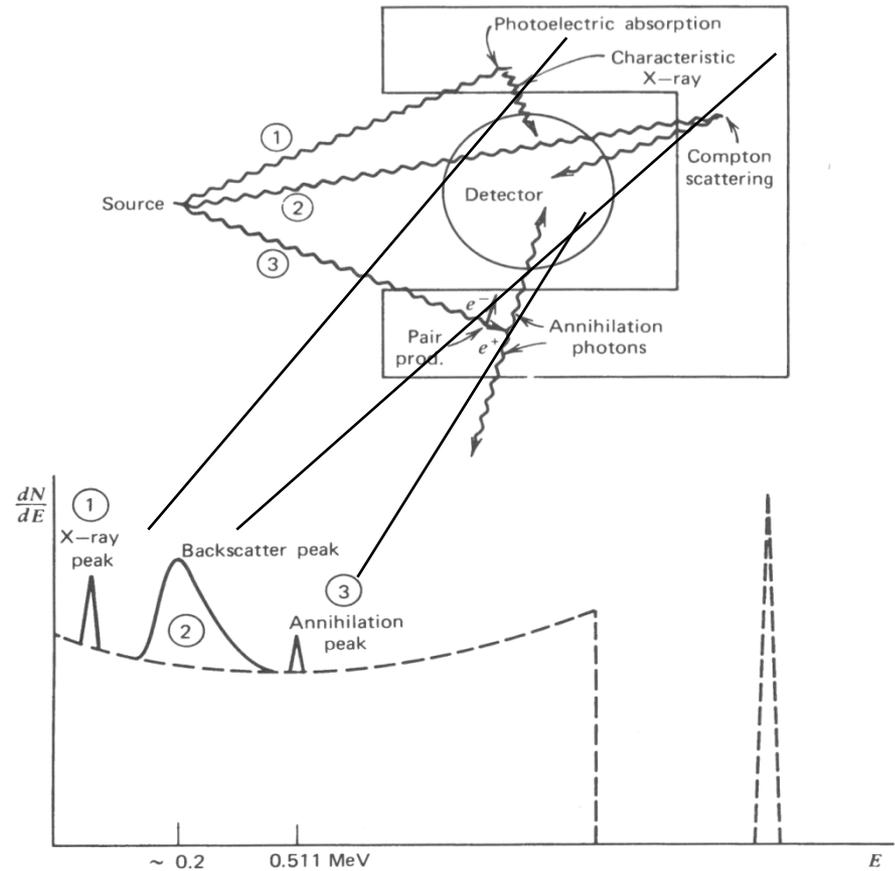
# L'amplificatore formatore

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

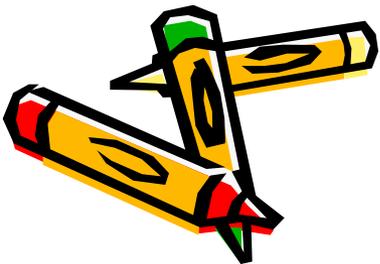


# Materiali Circostanti

- 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.

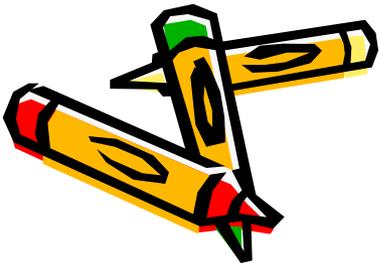
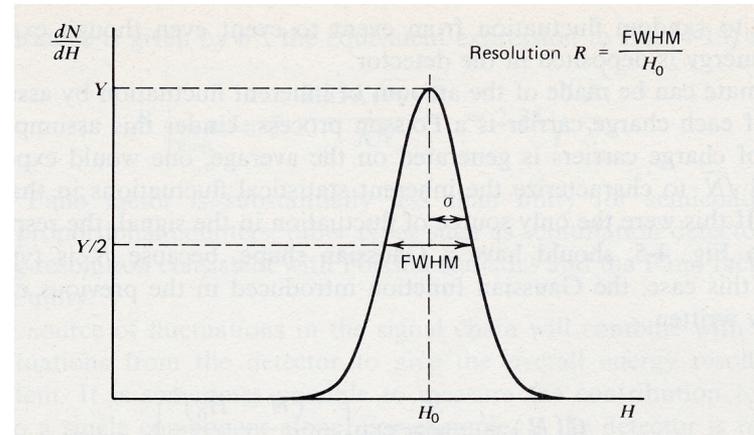


# Risoluzione energetica

- 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  $\Delta c$  è numero di canali nel FWHM e  $c_0$  il canale del centroide del picco.



## Risoluzione energetica (2)

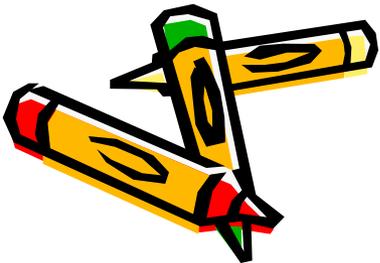
- In un rivelatore a semiconduttore l'assorbimento di un fotone di energia  $E$  crea un numero di coppie elettrone-lacuna, entro il volume attivo del rivelatore, dato da  $N = E/\varepsilon$  ( $\varepsilon$  = energia di ionizzazione).
- La generazione dei portatori di carica è un fenomeno di tipo 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:

$$\sigma = k\sqrt{N}$$



$$R_{\text{Poisson limit}} = \frac{2.35}{\sqrt{N}}$$

- Ampiezza  $H_0 = kN$

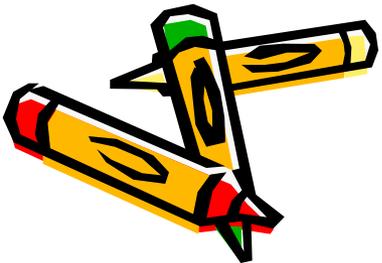


## Risoluzione energetica (3)

- 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  $0.1 \div 0.3$ .



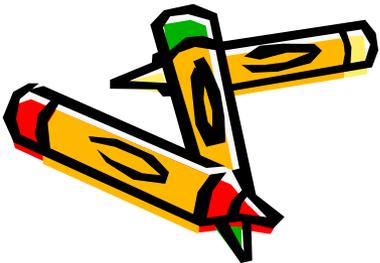
# Efficienza di raccolta di carica

- L'efficienza di raccolta di carica è definita:

$$\eta = \frac{Q}{Q_0} = \frac{N}{N_0}$$

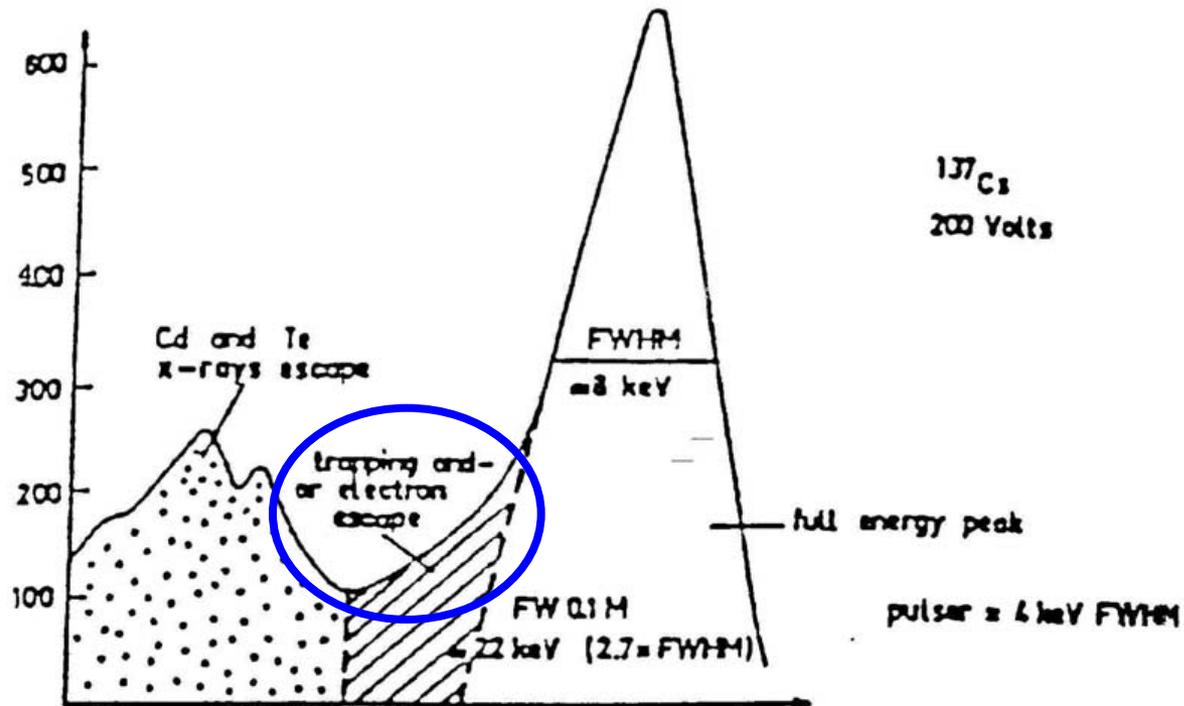
dove  $Q_0$  è la carica totale generata dal fotone nel volume sensibile del rivelatore, corrispondente a  $N_0$  coppie elettrone-lacuna, mentre  $Q$  è la carica indotta agli elettrodi.

- L'efficienza di raccolta di carica dipende dal punto di interazione della radiazione incidente (relazione di Hecht).



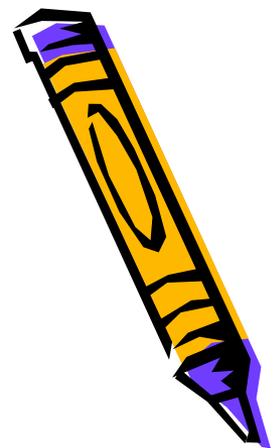
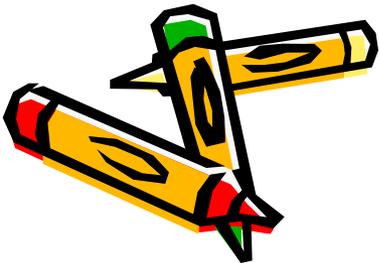
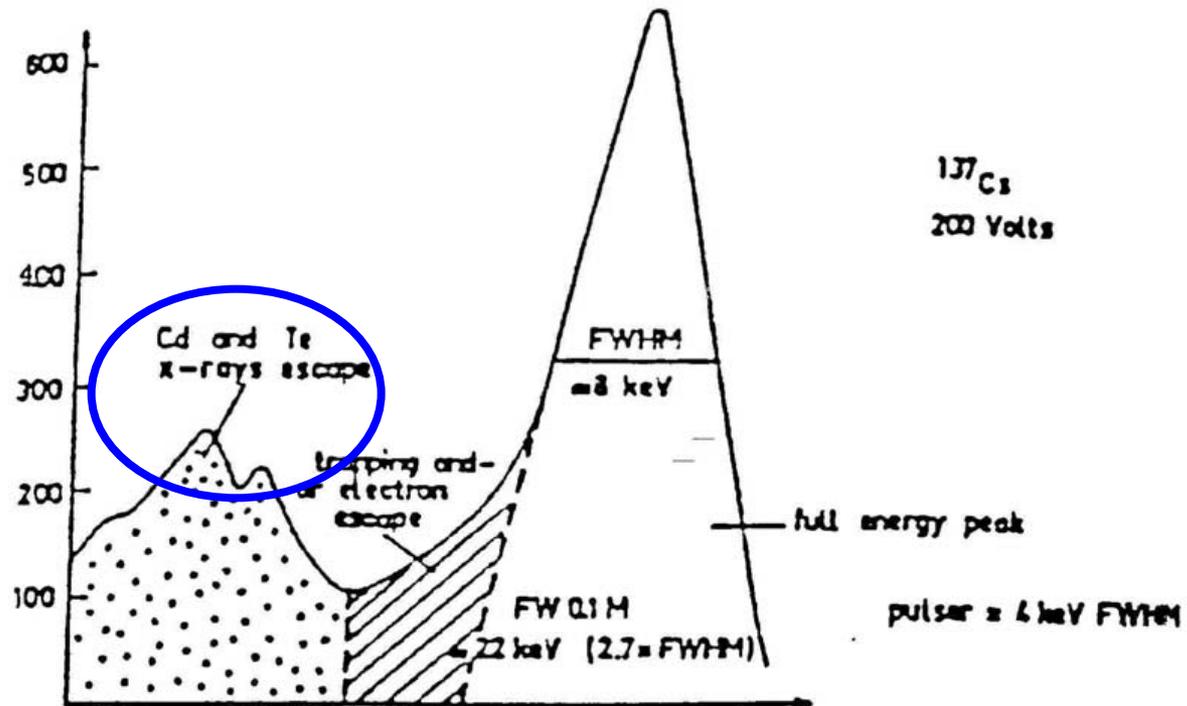
# Fenomeni di trapping

- La dipendenza della CCE dalla posizione d'interazione modifica la forma dello spettro in generale ed in particolare del fotopicco.



# Picchi di escape

- ❑ Fuga di alcuni fotoni di fluorescenza dal volume attivo.
- ❑ L'energia rilasciata nel rivelatore è pari alla differenza fra l'energia del fotone incidente e quella del fotone di fluorescenza.



# Efficienza di rivelazione (teorica)

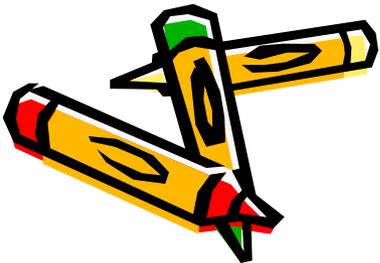
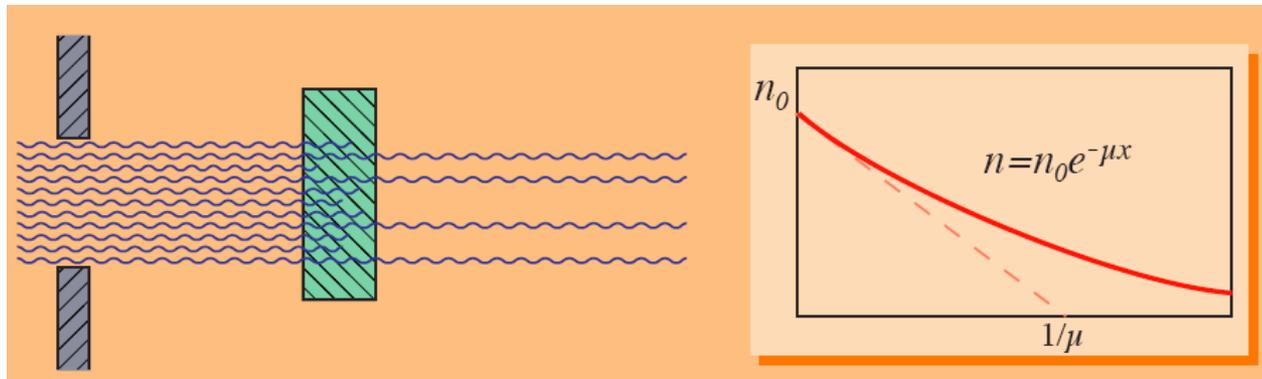
- Un fascio di intensità  $I_0$ , entrando in un mezzo subisce un'attenuazione che è proporzionale al tratto percorso ed all'intensità  $I$  nel punto  $x$ :

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

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

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

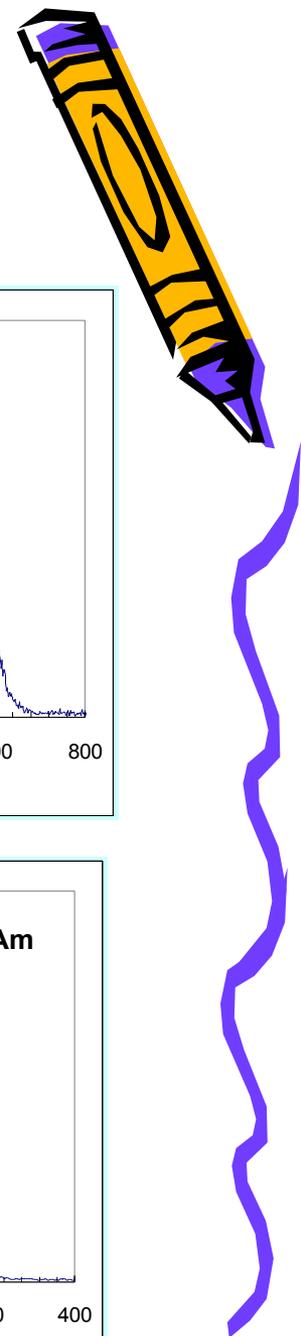
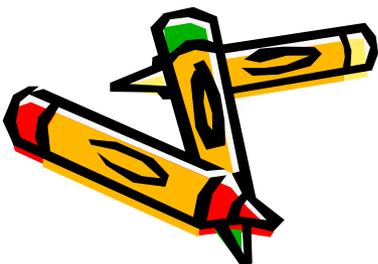
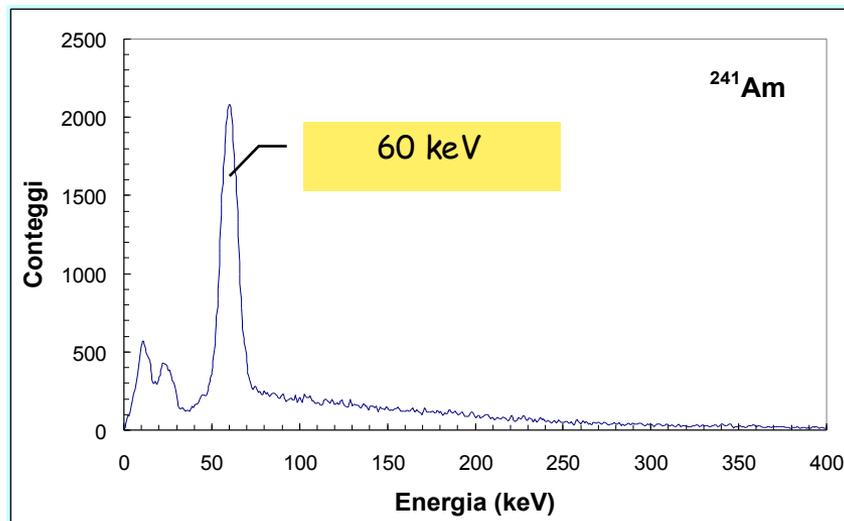
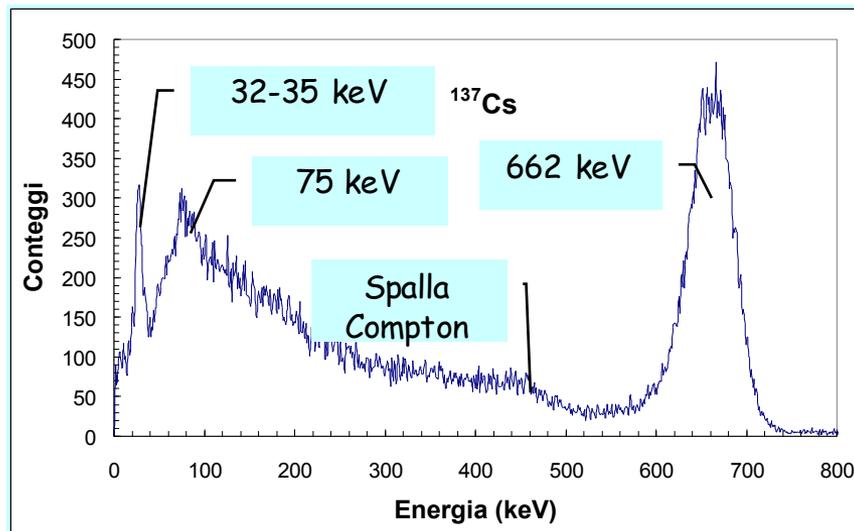
- Dipende dall'energia, dal materiale e dallo spessore



# Calibrazione in energia

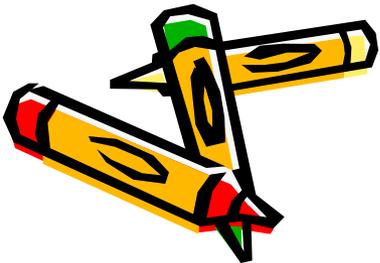
Per effettuare la calibrazione in energia:

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



# Rivelatori per l'esperienza di laboratorio

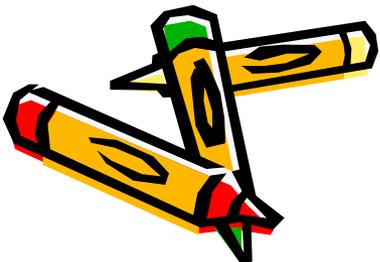
- ✓ Rivelatore di HPGe raffreddato con azoto liquido
- ✓ Rivelatore di CZT sensibile alla posizione
- ✓ Rivelatore di CZT monoelettrodo



# Rivelatore di HPGe



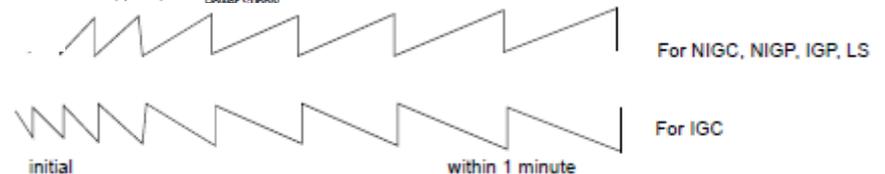
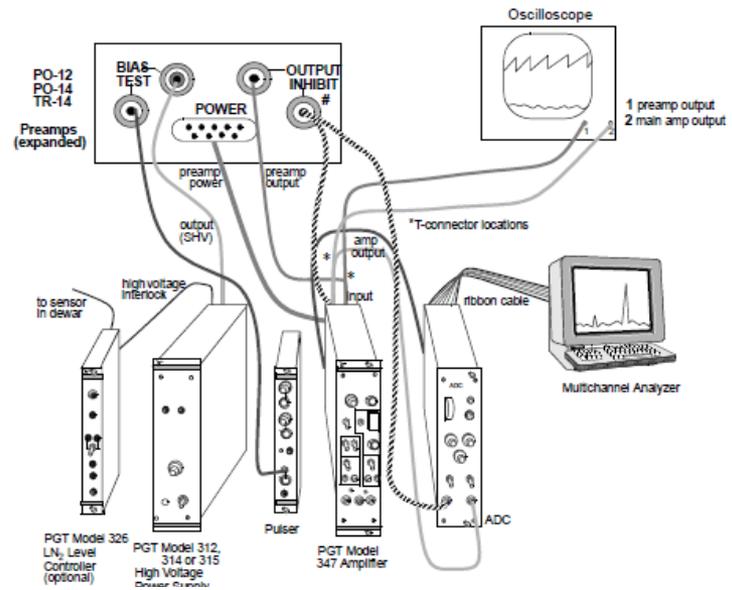
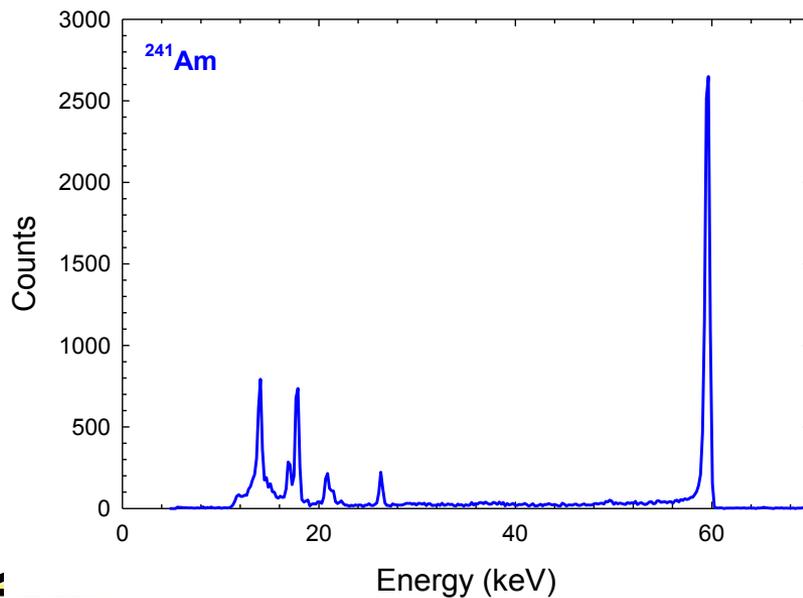
Model and Serial Numbers	
Detector Model N.	IGP210/1429
Cryogenic Information	
Detector Cool-Down Time	3 hours
Dimensions	
Detector size (mm <sup>2</sup> )	200
Diameter (mm)	16
Detector sensitive depth (mm)	10
Window	Be
Performance	
Energy range	180 eV- 1 MeV
Resolution FWHM at 122 keV (eV)	480-750 eV
Semiconductor material	P-Type High-Purity Germanium
Detector type and geometry	Planar



# Rivelatore di HPGe

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

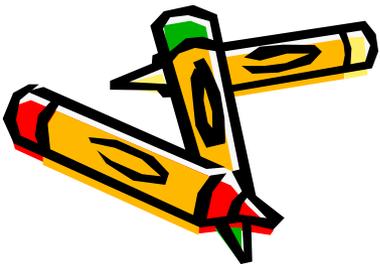
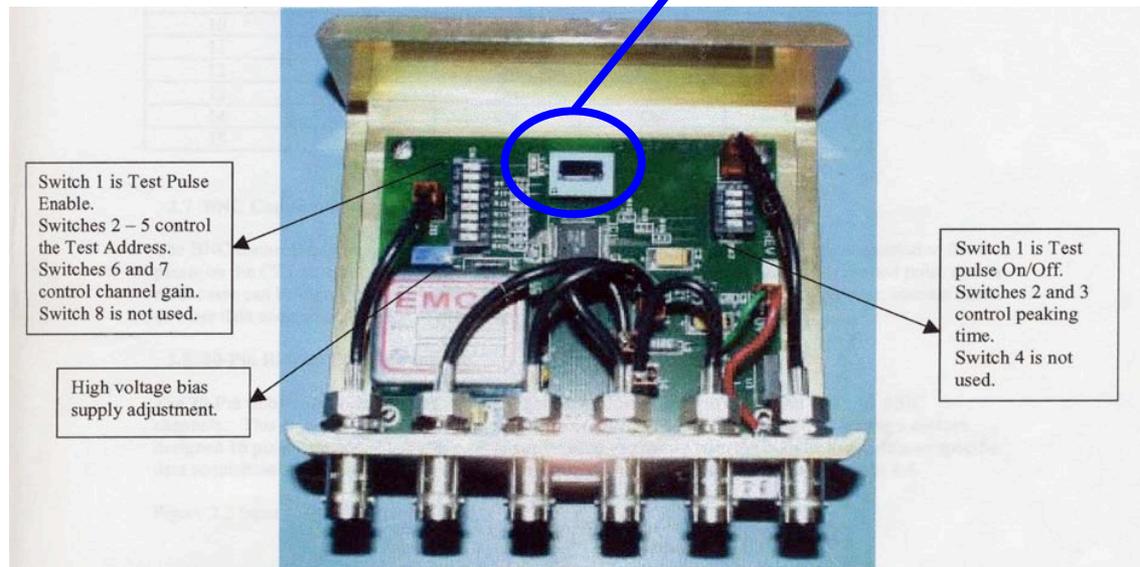
- ✓ acquisizione degli spettri energetici di  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{241}\text{Am}$  e  $^{109}\text{Cd}$ ;
- ✓ Calibrazione e analisi della risposta spettroscopica.



# CZT multipixel

- ❑ Crystal size = ~10 mm x 10 mm
- ❑ Number of pixels = 16
- ❑ Thickness = 5 mm
- ❑ Pixel size = 1.8 mm x 1.8 mm
- ❑ Pitch = 2 mm
- ❑ Guard ring = 0.5 mm
- ❑ Bias Voltage = -520 V

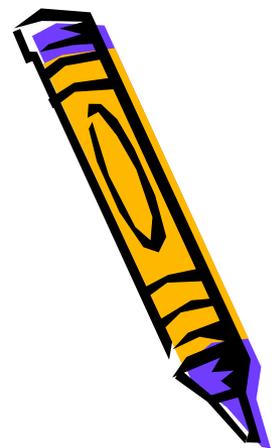
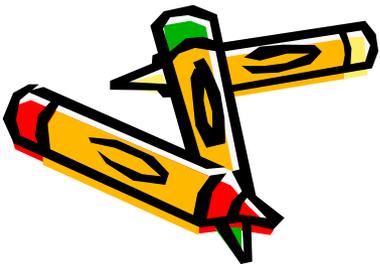
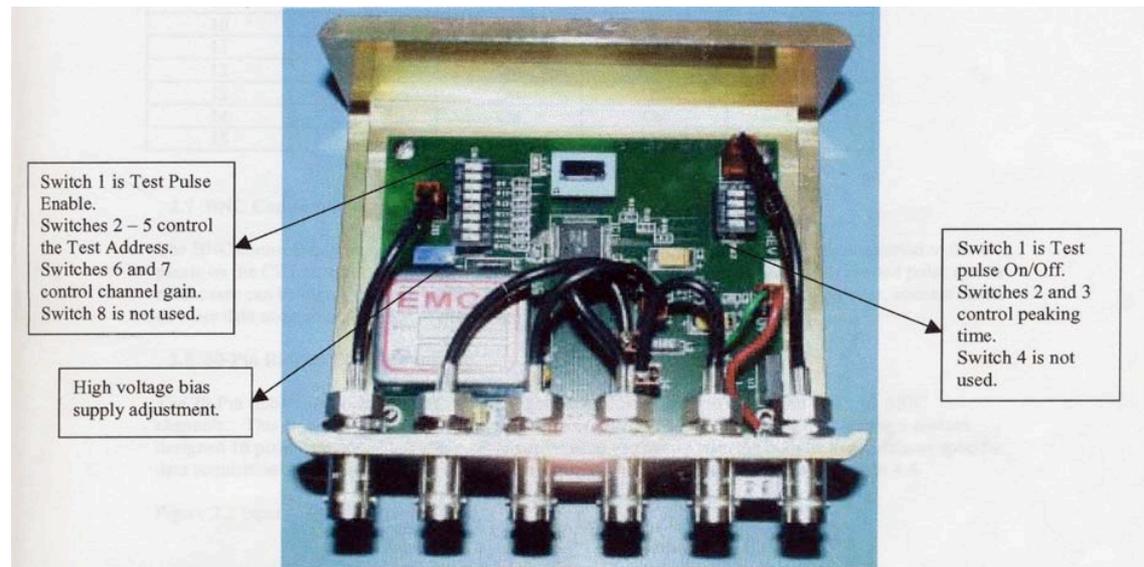
0	4	8	14
2	6	10	12
1	5	9	15
3	7	11	13



# CZT multipixel

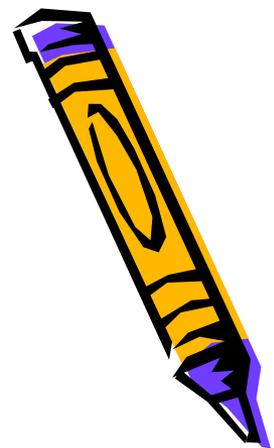
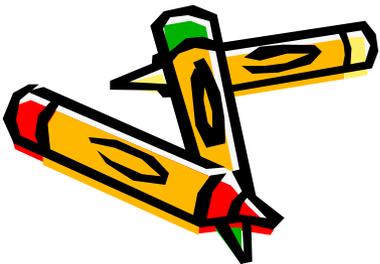
Studio dell'uniformità di risposta di un rivelatore di CZT sensibile alla posizione:

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



# CZT monoelettrodo

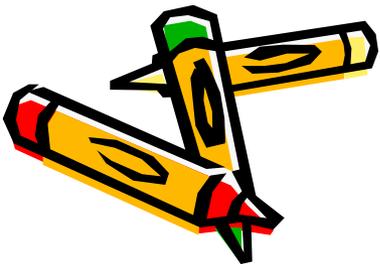
- ❑ Crystal size =  $\sim 4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$
- ❑ Au Metallization
- ❑ Thickness = 2 mm
- ❑ Bias Voltage = 100V



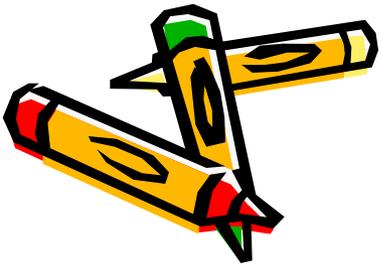
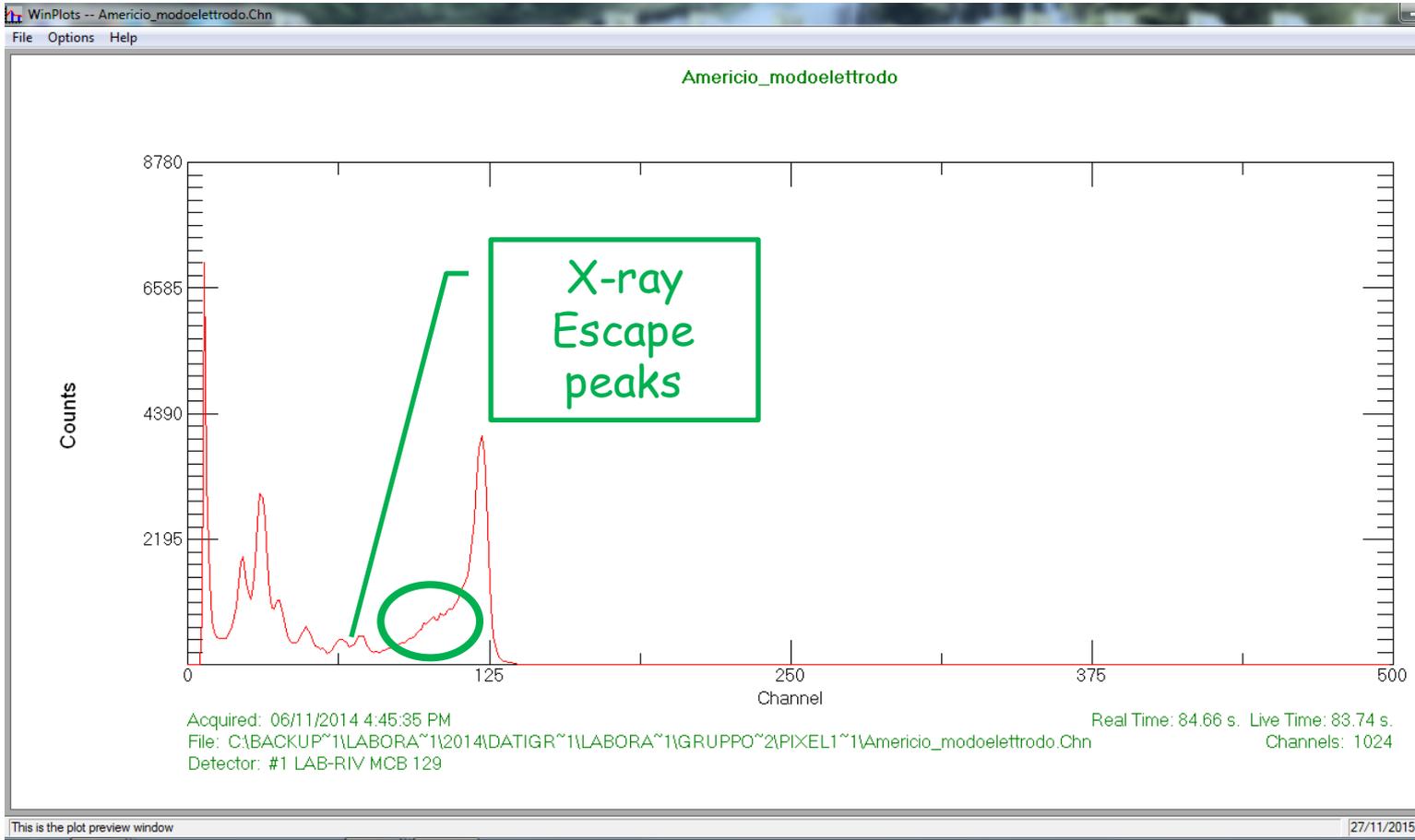
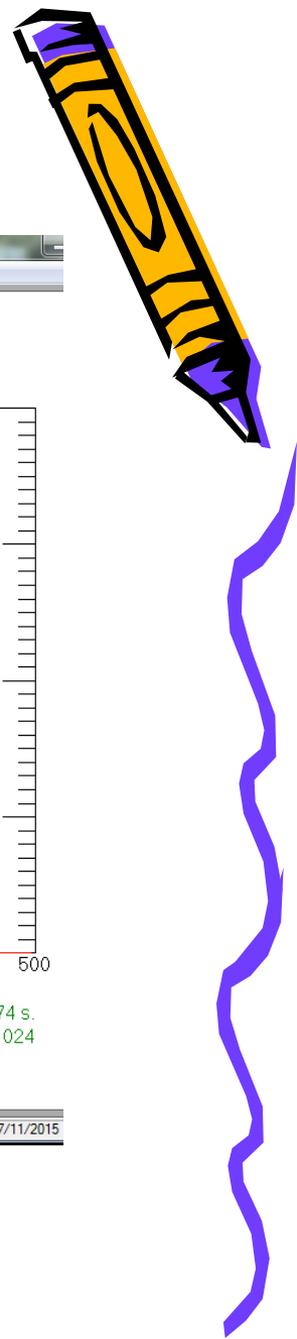
# CZT monolettrodo

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

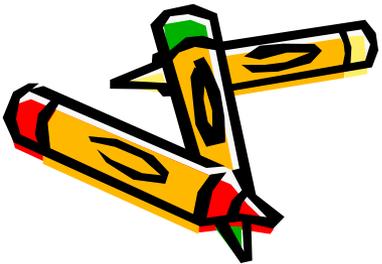
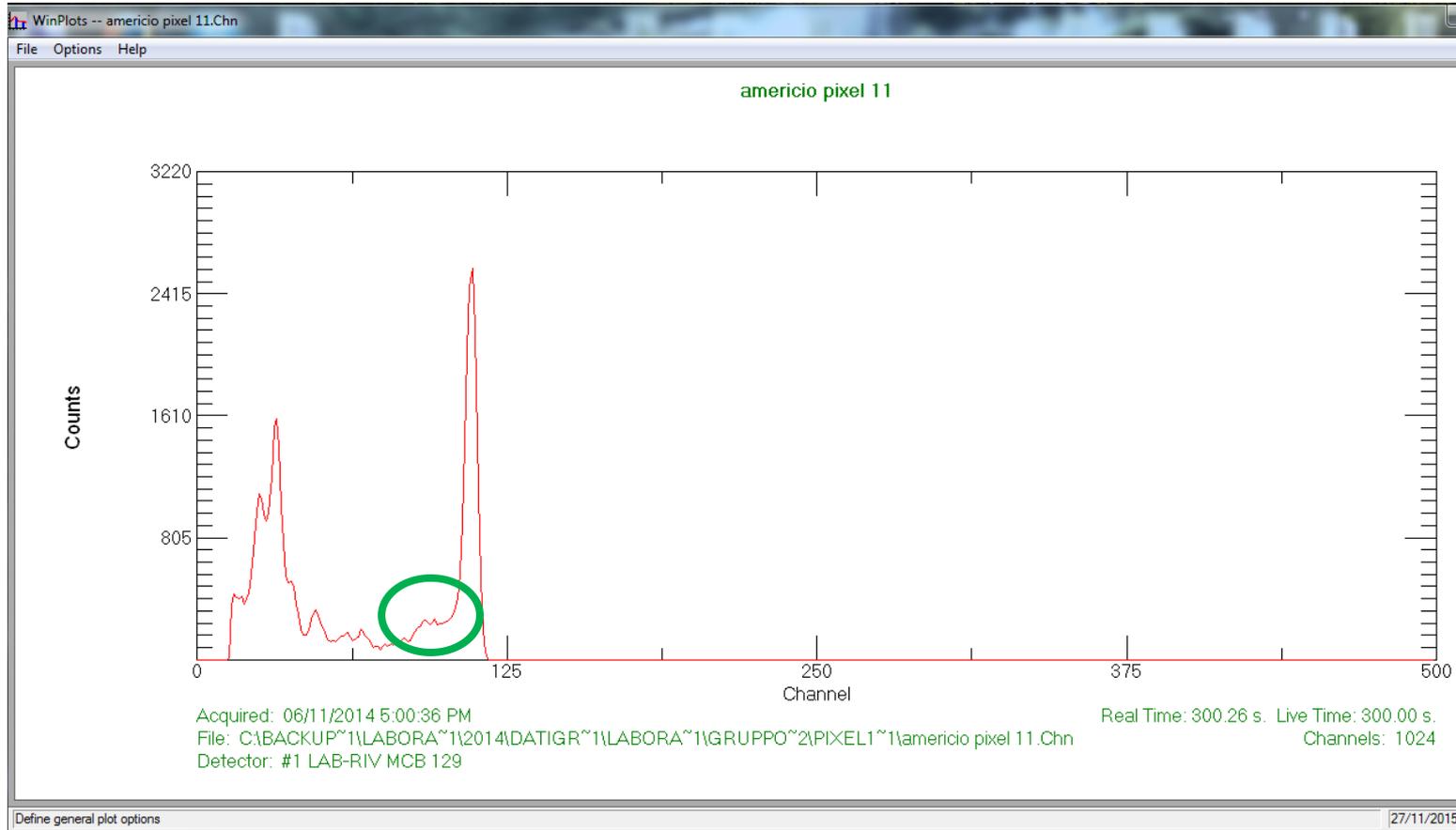
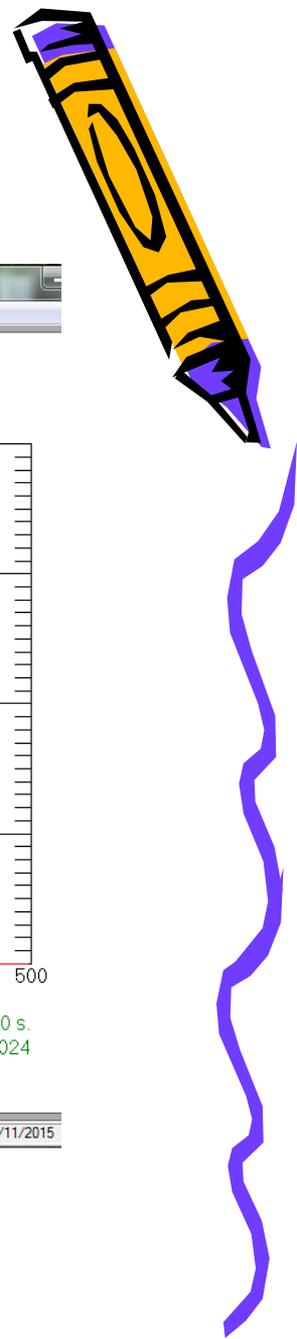
- ✓ acquisizione di spettri energetici a tre tensioni di polarizzazione;
- ✓ acquisizione di spettri energetici a tre diversi tempi di formatura.



# Risposta del rivelatore monolettrodo

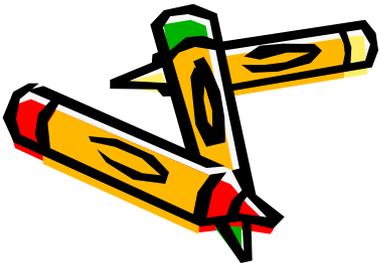


# Risposta del multipixel



# Risposta del multipixel: Small pixel effect

- ✓ Catodo monoelettrodo
- ✓ Anodo segmentato in una matrice di pixel di area ridotta per diminuire la capacità dell'anodo di raccolta con conseguente riduzione del rumore elettronico e miglioramento della risoluzione energetica
- ✓ Raccolta di carica dipende principalmente dalla carica indotta dagli elettroni all'anodo (riduzione del contributo delle lacune al segnale)



Ci vediamo in laboratorio

