

Test and calibration of hard X-ray detectors

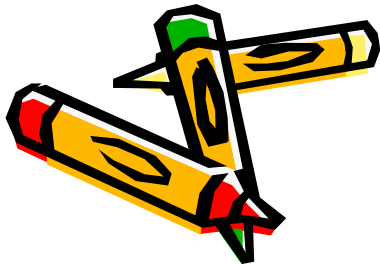
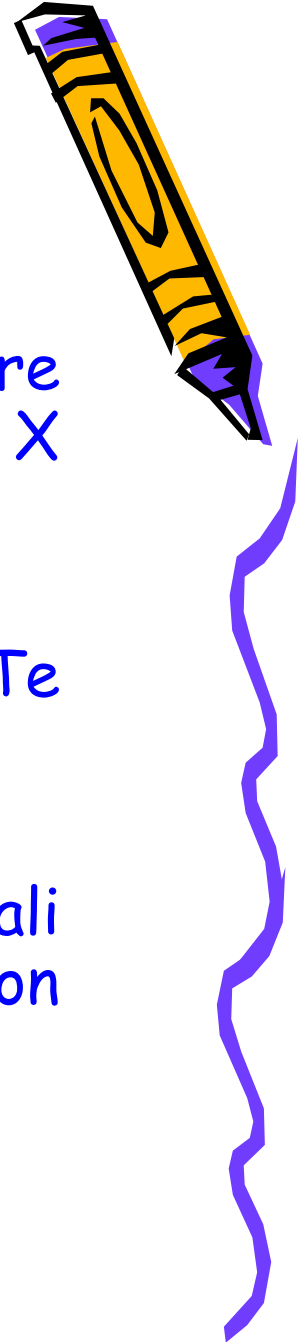
IASF Bologna / INAF



Bologna, 30 Novembre 2015

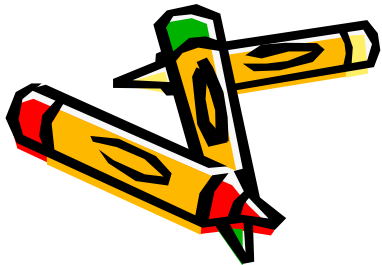
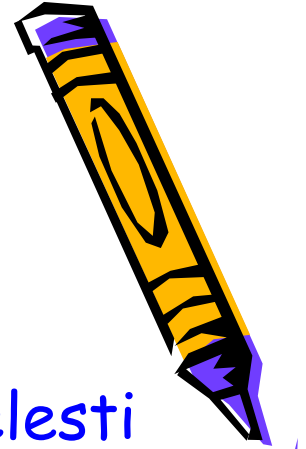
OBIETTIVO

- ❑ 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



SCOPO DELLA CALIBRAZIONE

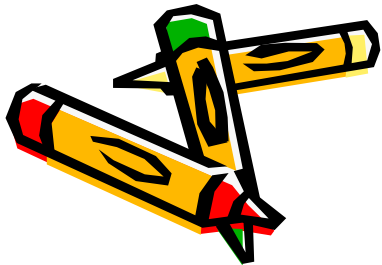
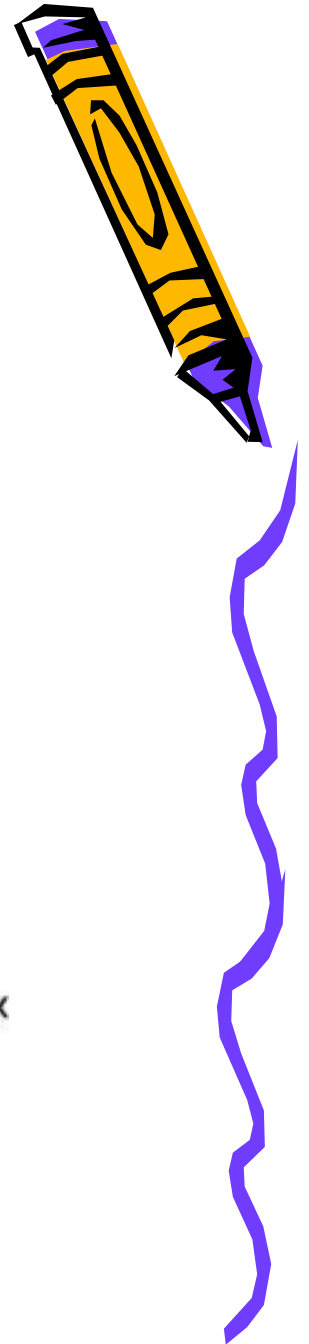
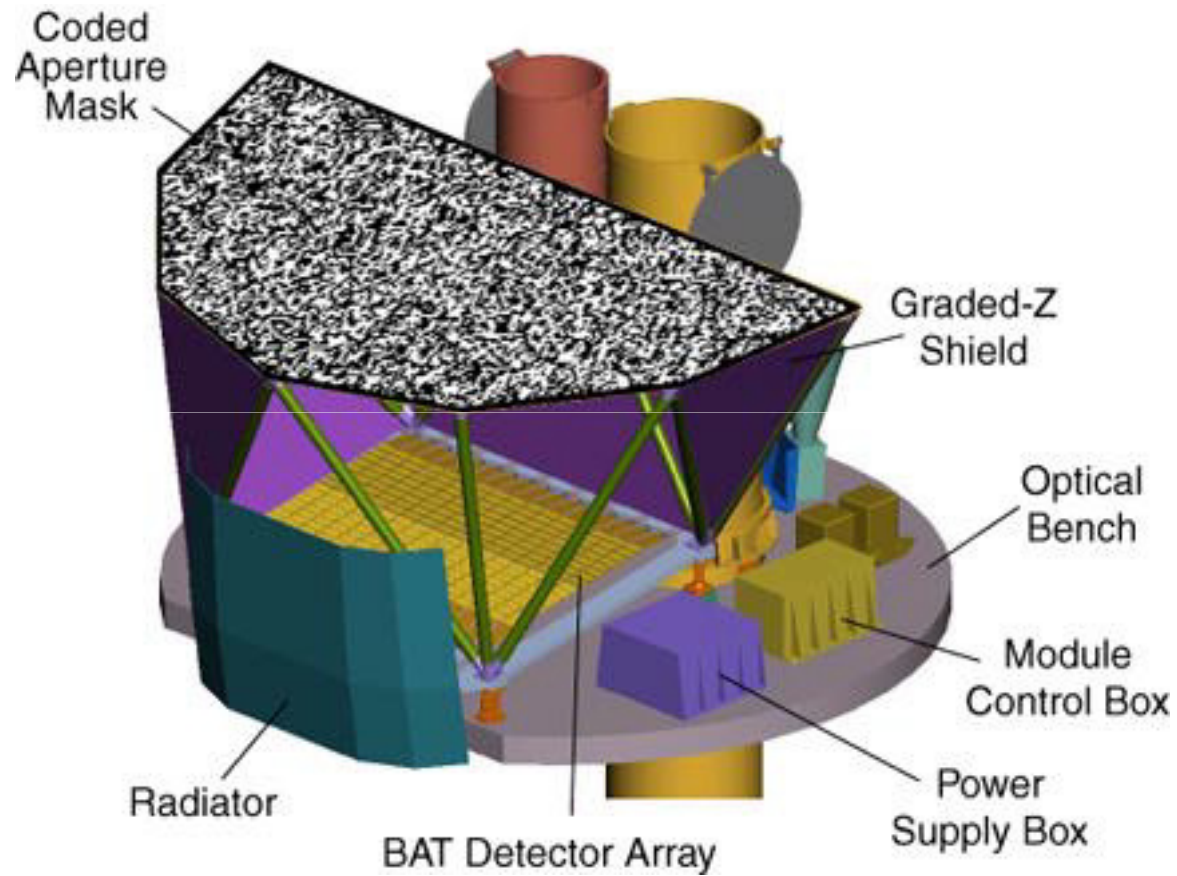
- ❖ I raggi X e gamma emessi da sorgenti celesti vengono rivelati con dei sensori che prima di essere lanciati nello spazio devono essere calibrati a terra.
- ❖ La calibrazione in energia permette l'associazione canale-energia.



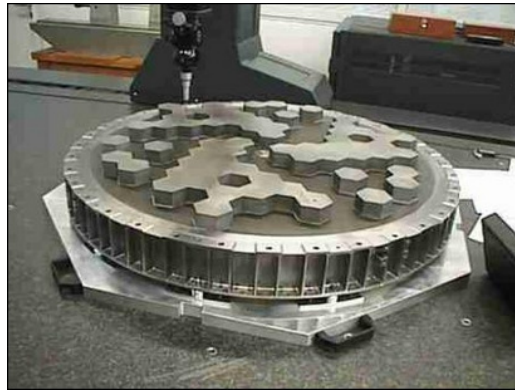
ISGRI/INTEGRAL: CdTe



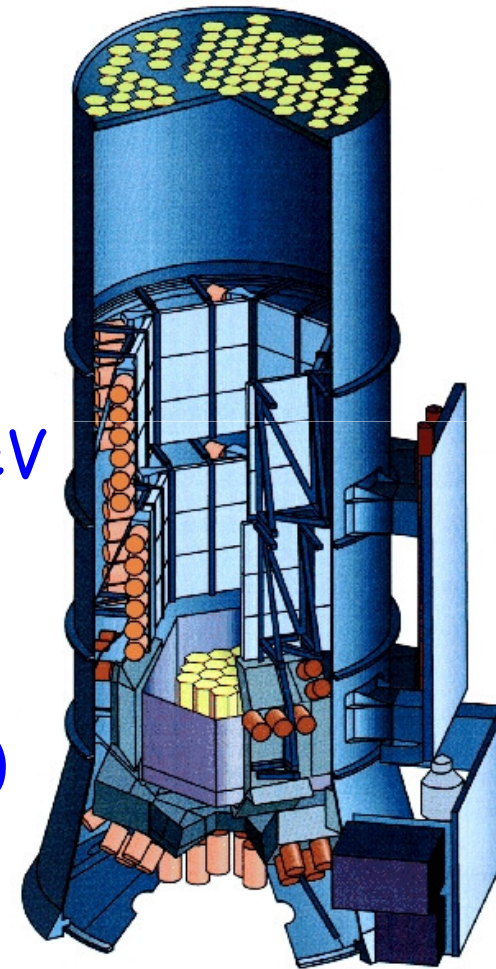
BAT/Swift: CZT



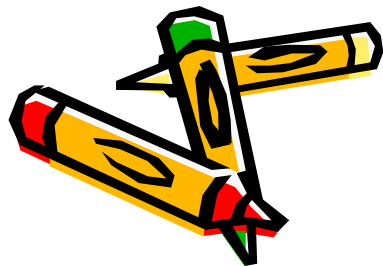
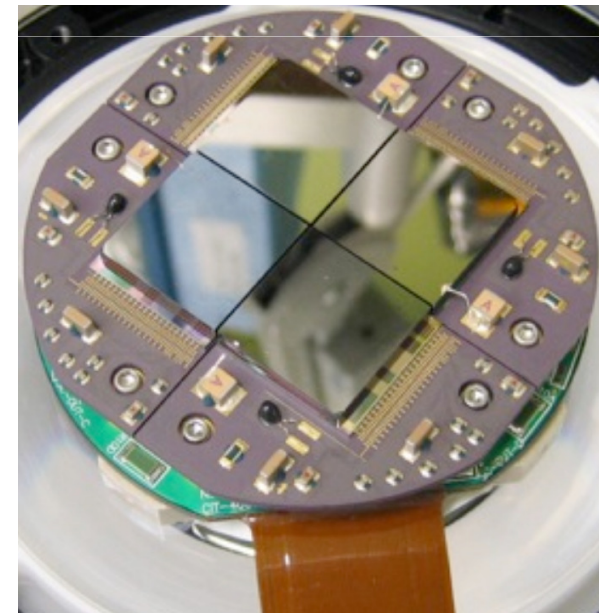
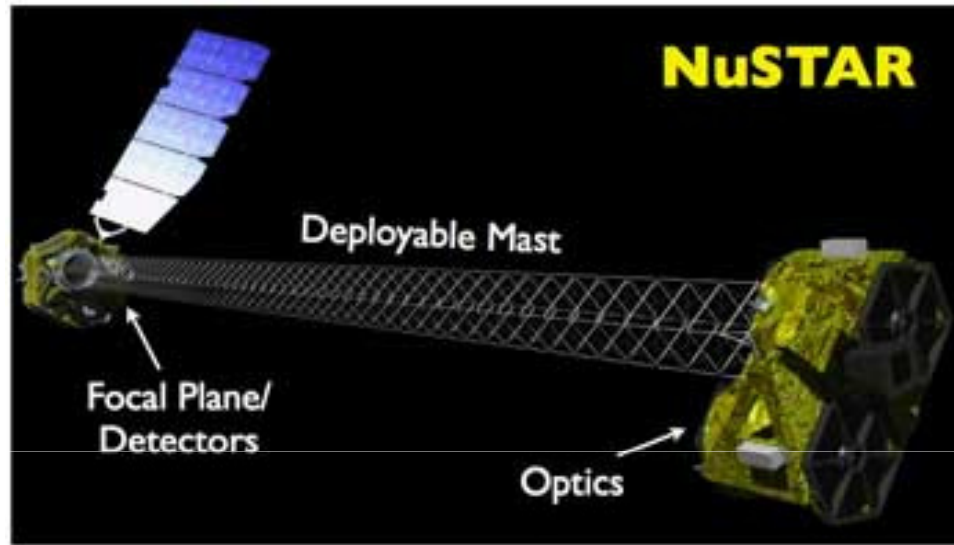
SPI/INTEGRAL: HPGe



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

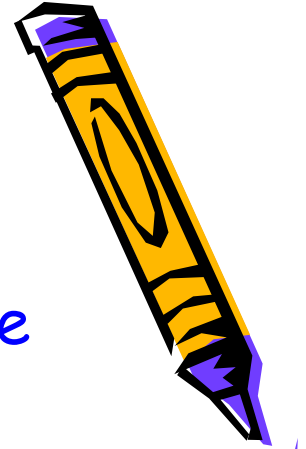


Focal plane detector/NuSTAR: CZT



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.
- Studio della risposta di un rivelatore a stato solido.

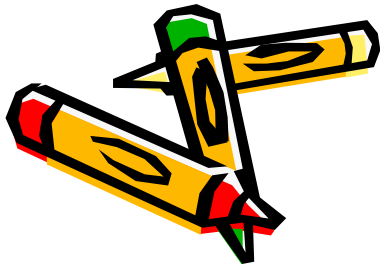


INTERAZIONE DEI RAGGI X E GAMMA CON LA MATERIA

- 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.

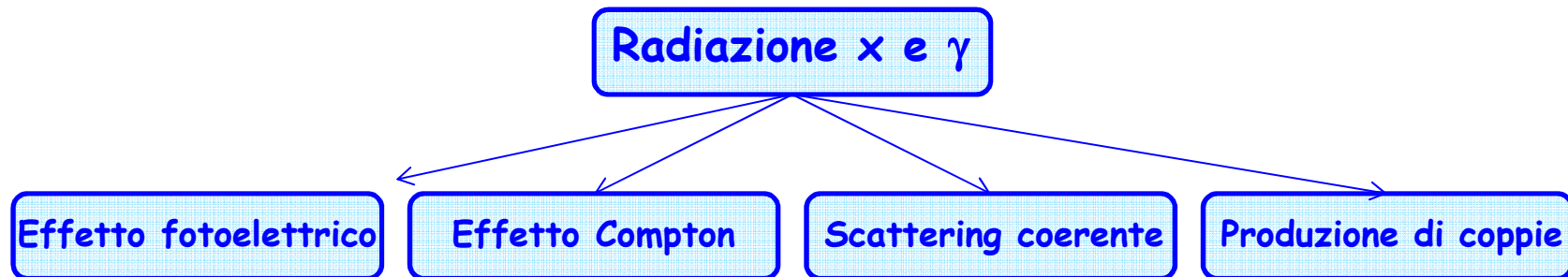
• INTERAZIONE DELLE RADIAZIONI FOTONICHE

- 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.



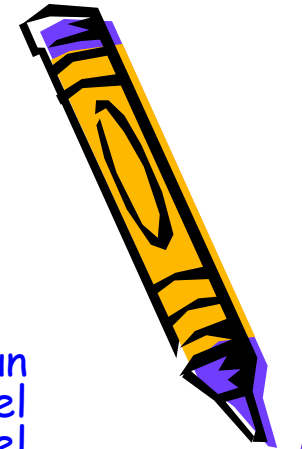
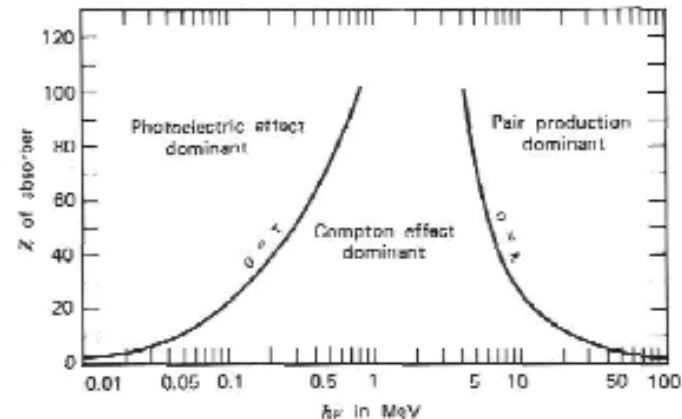
INTERAZIONE DEI RAGGI X E GAMMA CON LA MATERIA (2)

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).



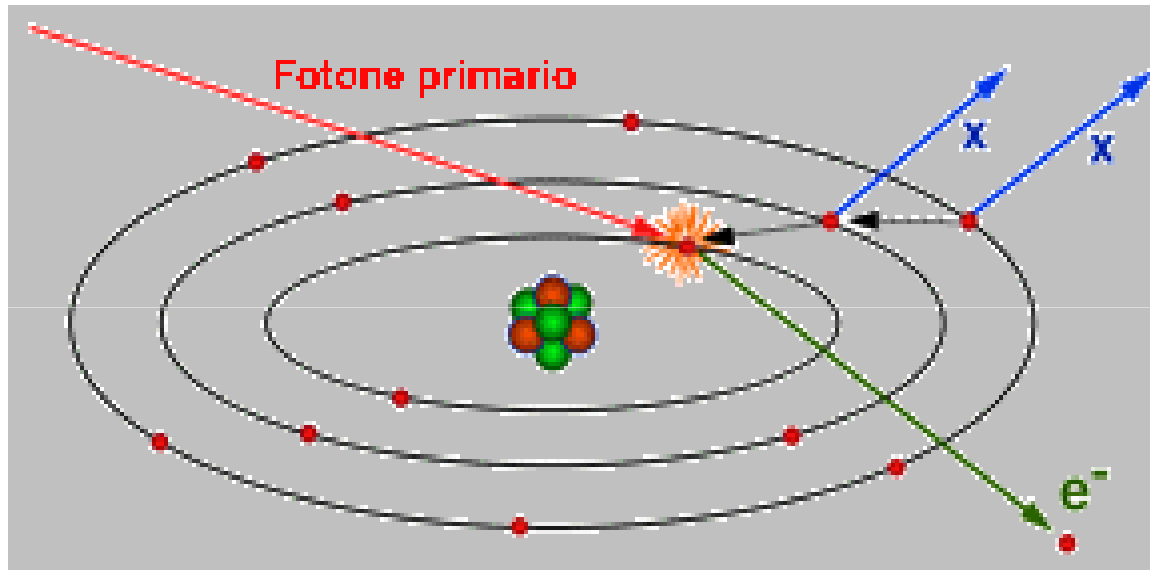
Le tre interazioni principali dominano in tre regioni diverse definite da:

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



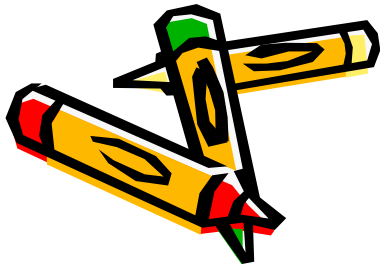
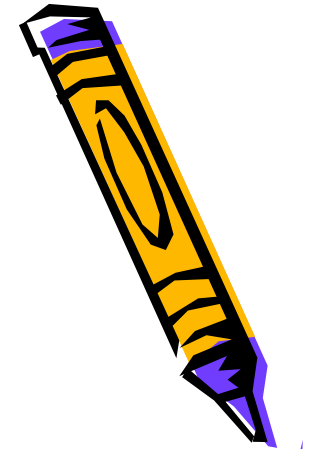
I principali meccanismi di interazione

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



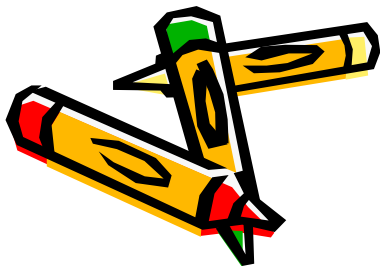
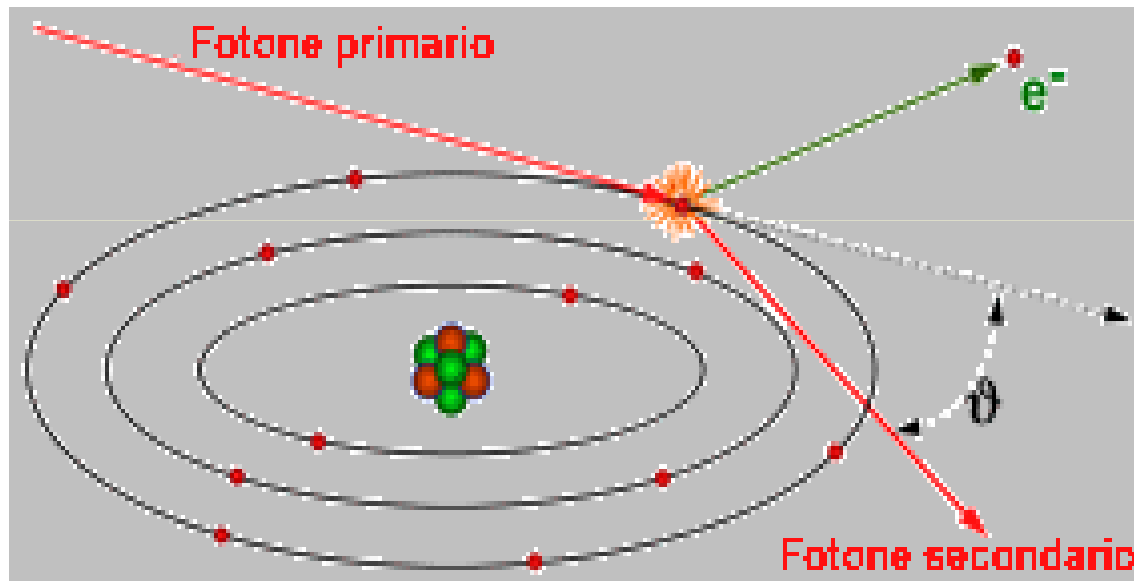
$$E_{e^-} = h\nu - E_b$$

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

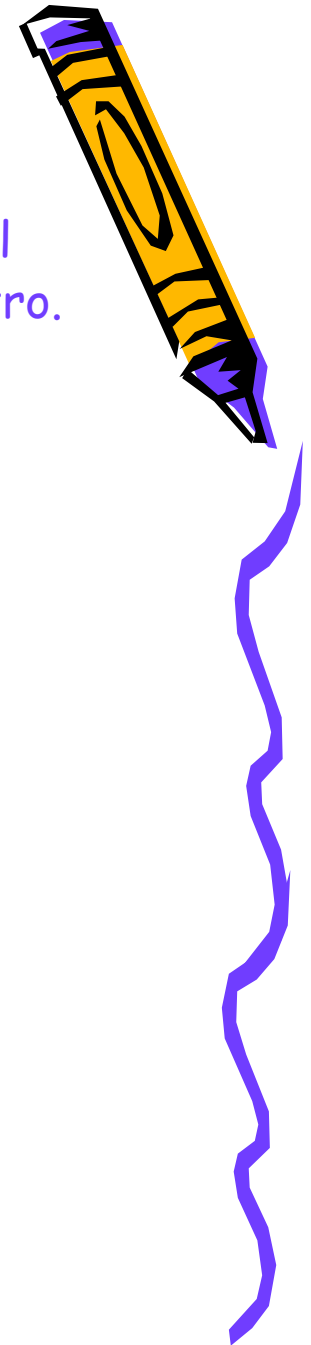


I principali meccanismi di interazione

- **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.



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



Rivelazione con rivelatori a semiconduttore per raggi X duri

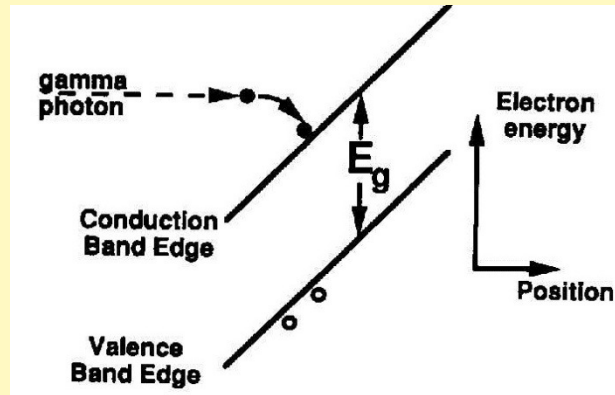
- Un fotone X o gamma di energia E , che attraversa il volume sensibile di un rivelatore a semiconduttore, produce i processi di **assorbimento fotoelettrico, diffusione Compton e creazione di coppie**, elevando elettroni dalla banda di valenza a quella di conduzione **(a)**.
- Si formano, così, coppie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



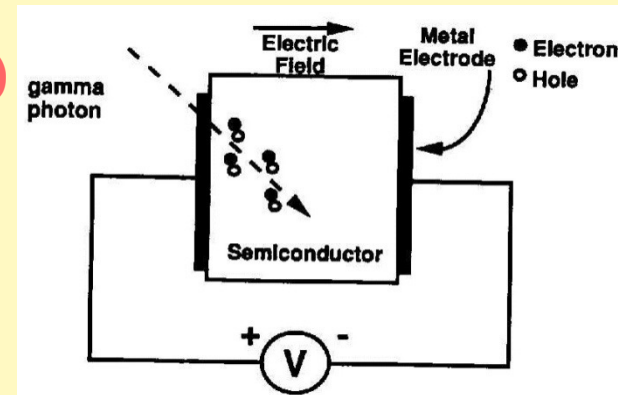
Rivelazione con rivelatori a stato solido per raggi X duri (2)



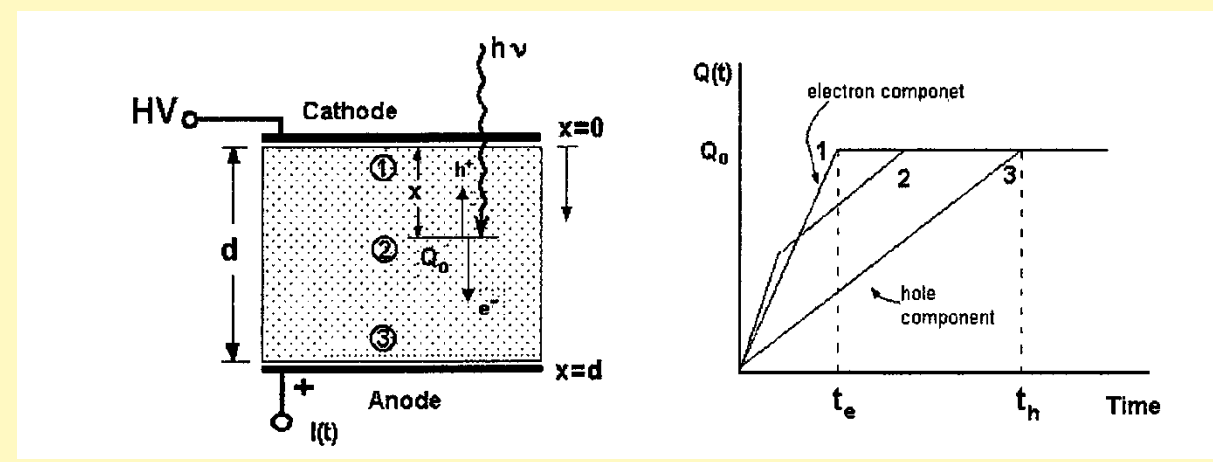
a)



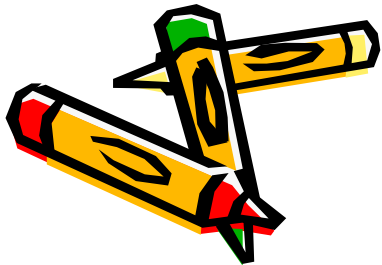
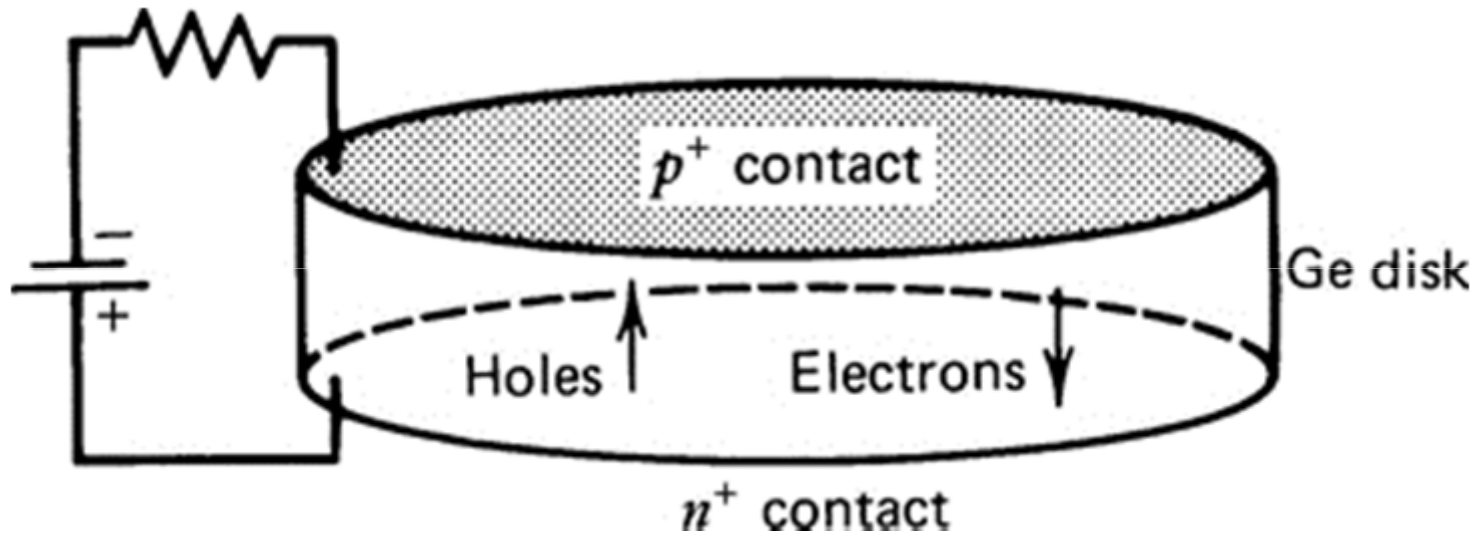
b)



c)

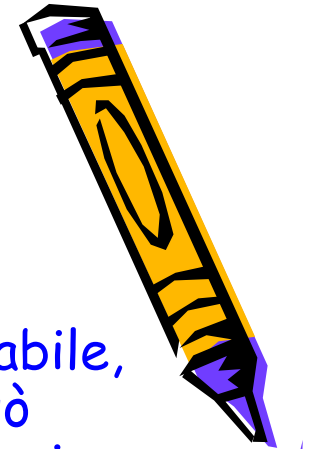
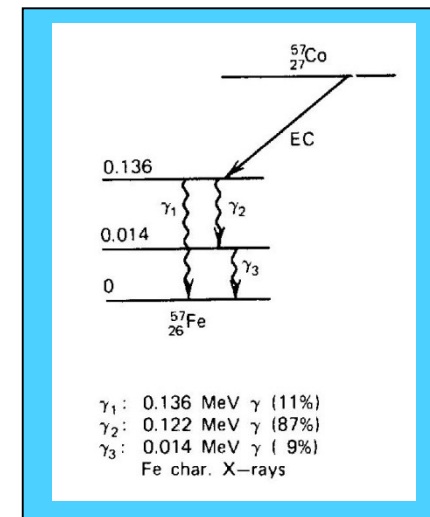
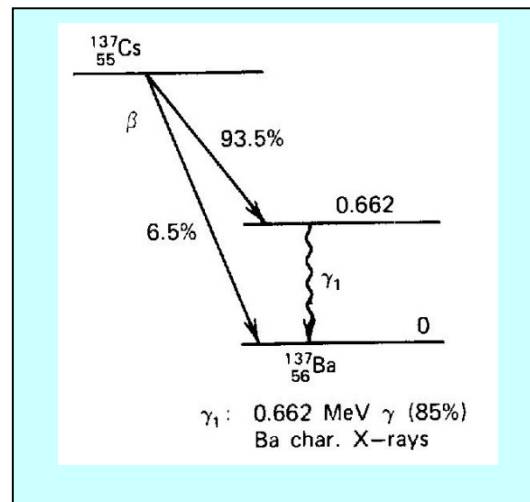


Configurazione Planare di HPGe



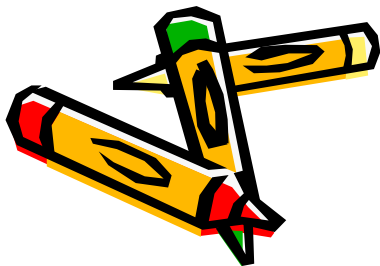
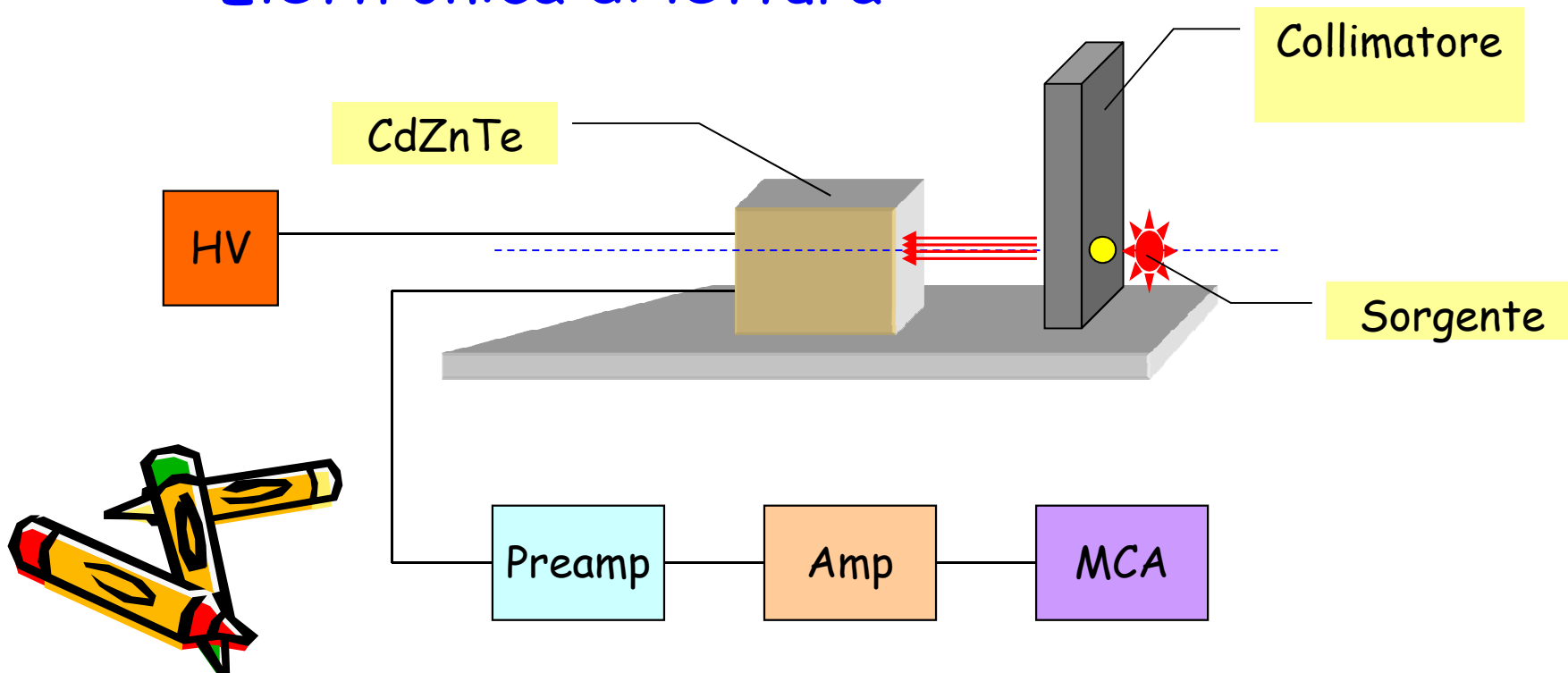
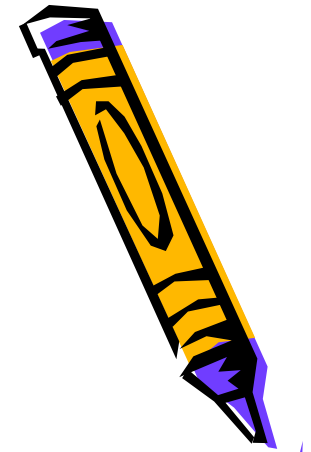
SCHEMI DI DECADIMENTO

- ❖ 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).



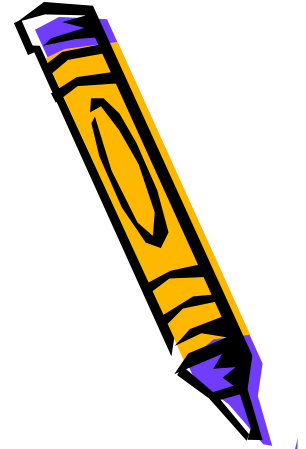
APPARATO SPERIMENTALE

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



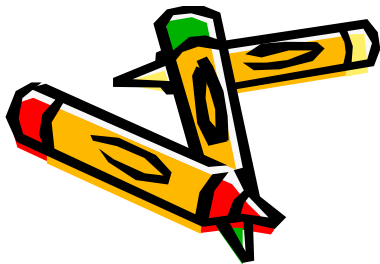
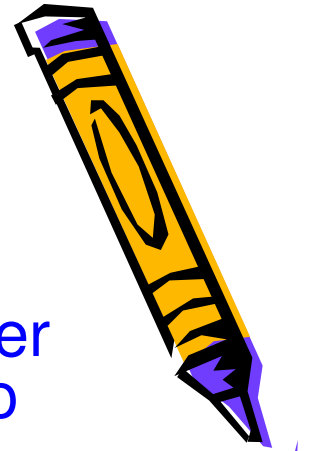
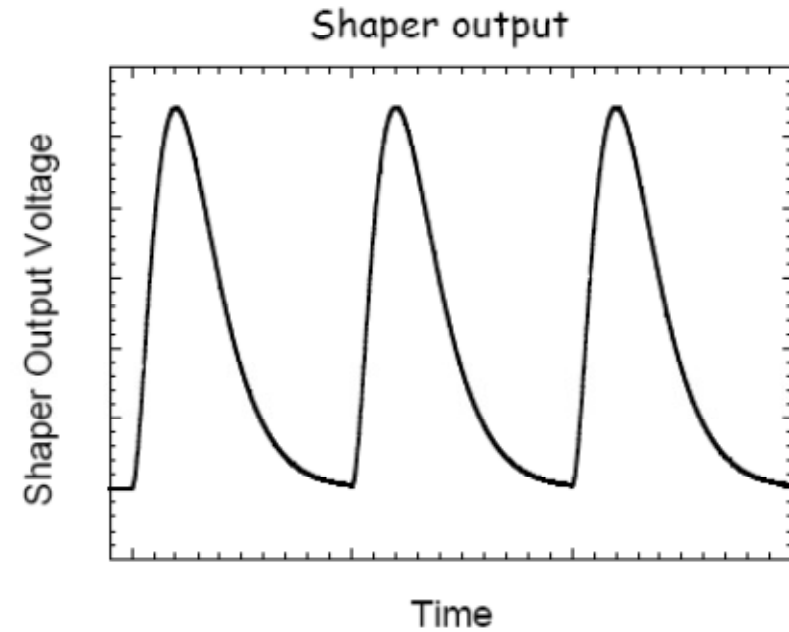
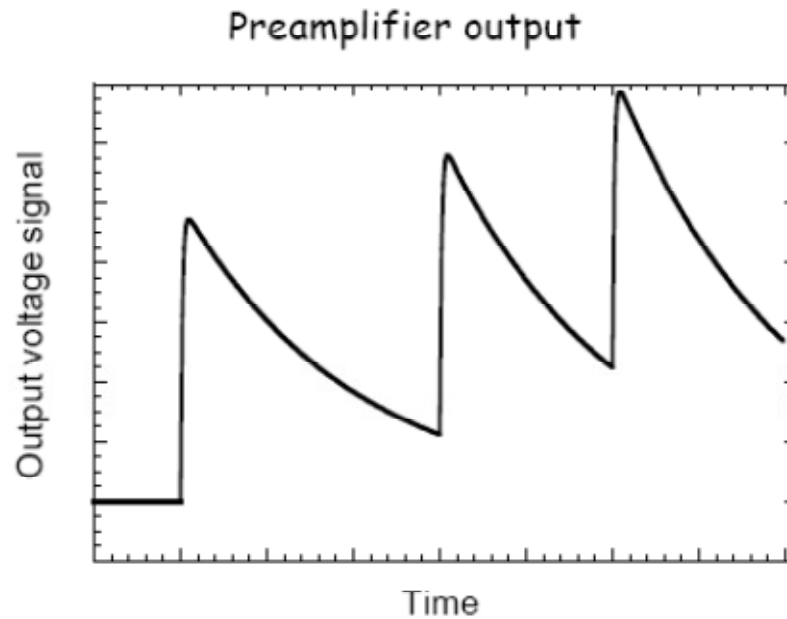
Elettronica di lettura standard

- **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.



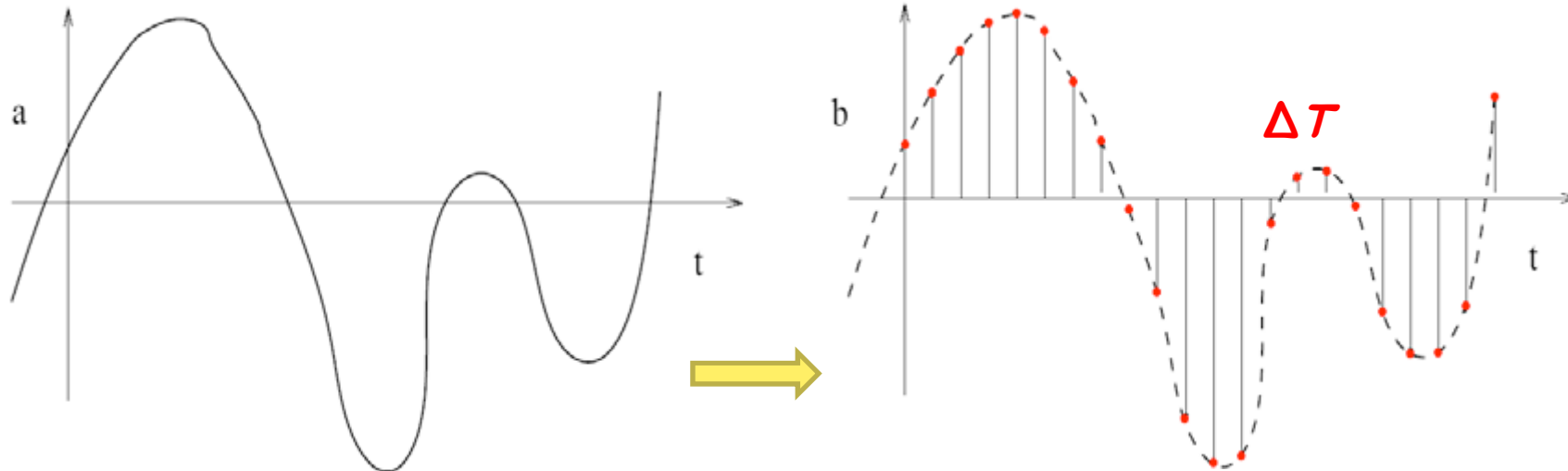
Principio di funzionamento della digitalizzazione dei segnali



Da analogico a digitale \longrightarrow da continuo a discreto

1) Discretizzazione del tempo: il campionamento

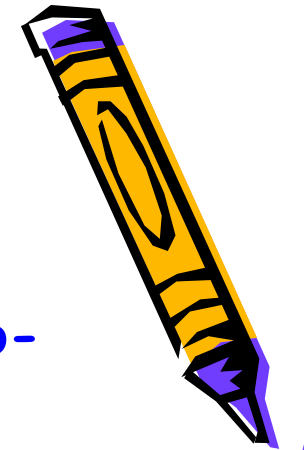
Campionamento: misura dell'ampiezza del segnale a intervalli regolari di tempo ΔT (tempo di campionamento o sampling time)



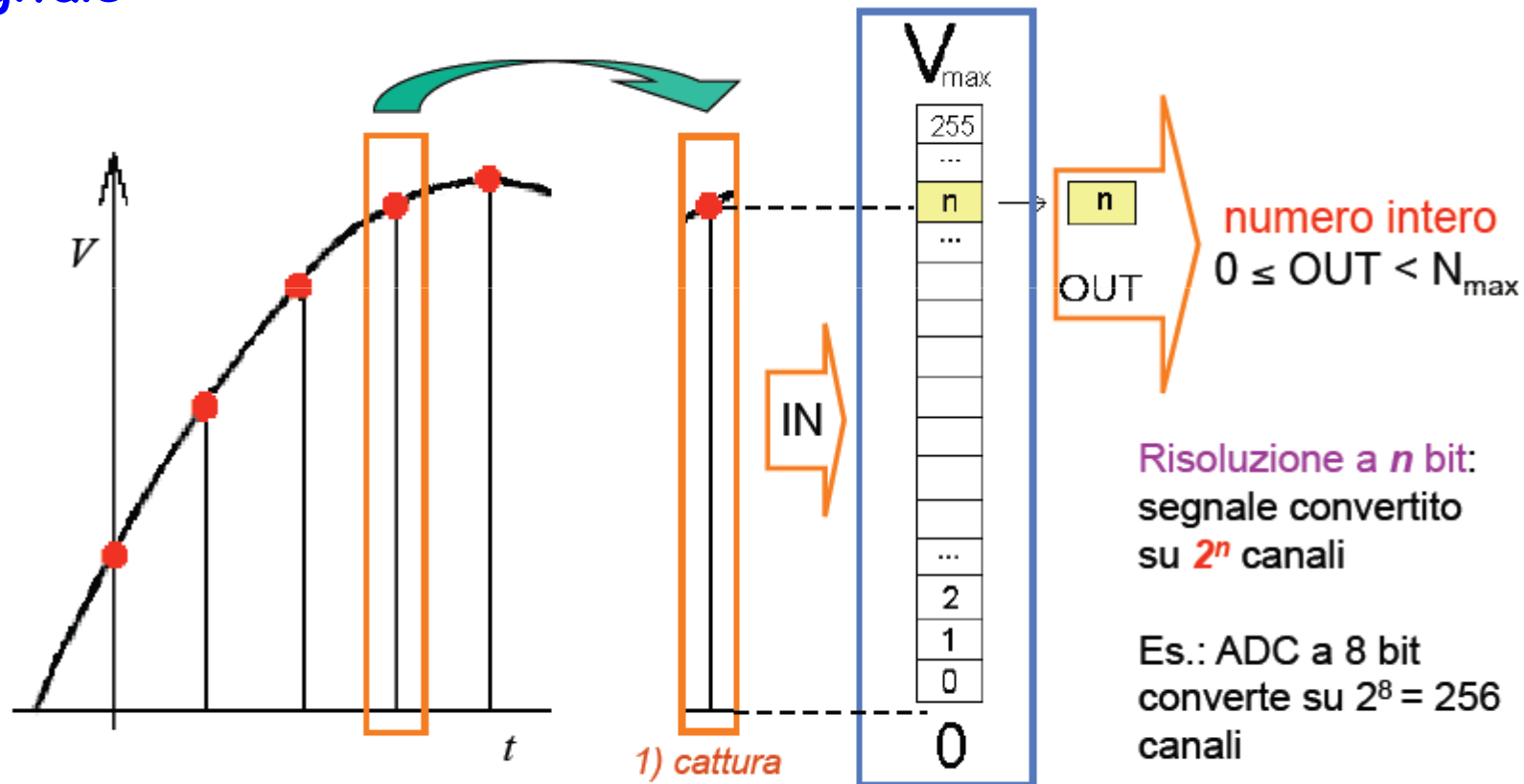
Frequenza di campionamento (sampling rate): $\nu = 1 / \Delta T$ [Sample/s]
Es: campionamento a 1 GS/s = 10^9 punti/secondo, $\Delta T = 1$ ns



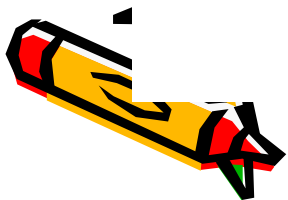
Principio di funzionamento della digitalizzazione dei segnali (2)



2) Discretizzazione della tensione: la conversione Analogico-Digitale



2) conversione nel FLASH ADC (Analog to Digital Converter)



Materiali Circostanti

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

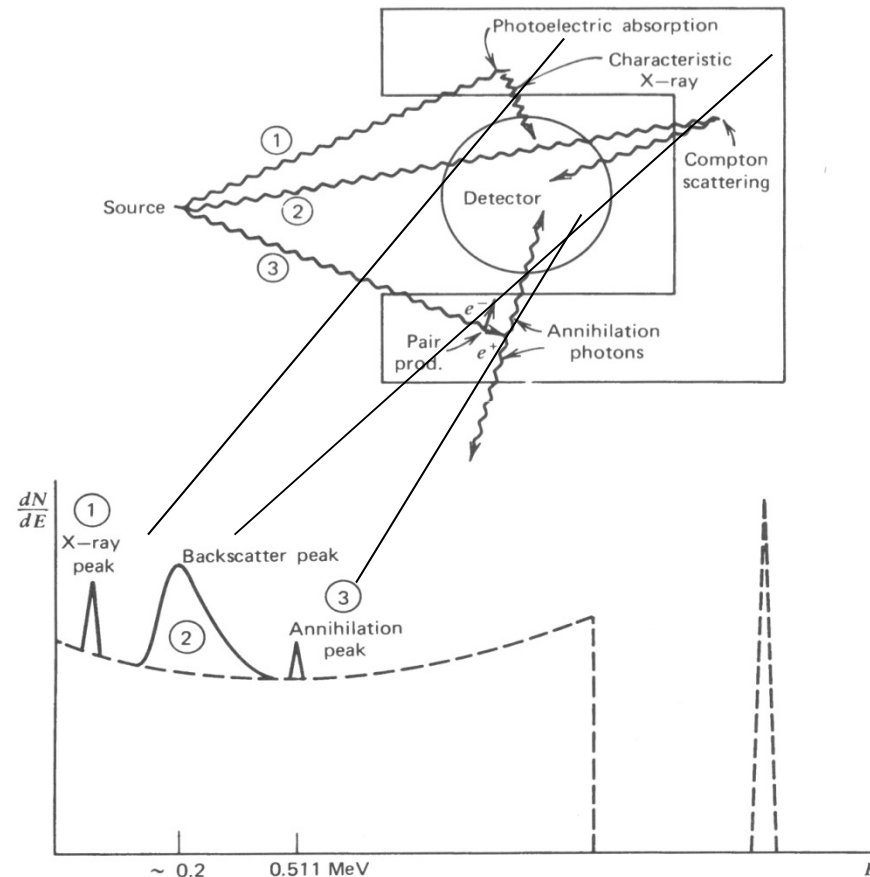
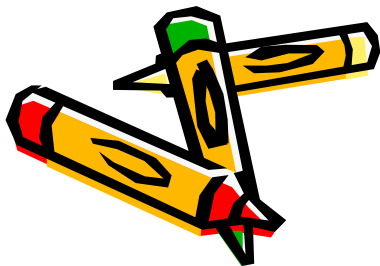
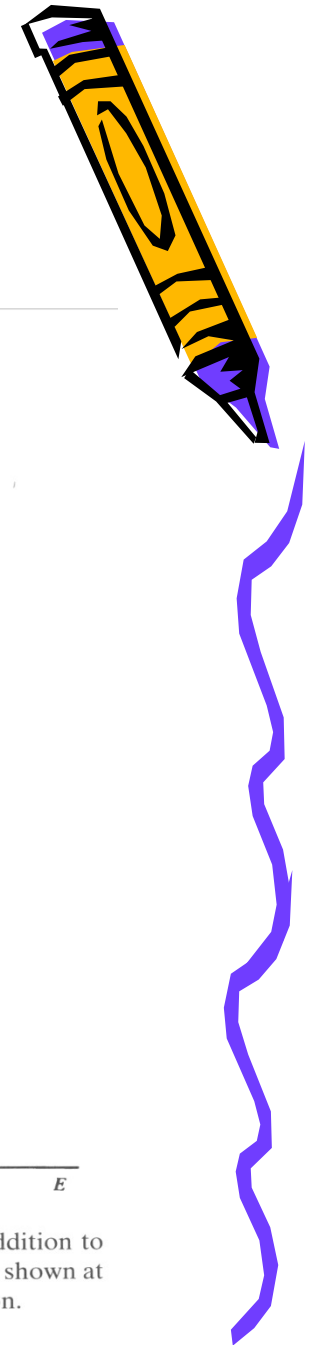


Figure 10.6 Influence of surrounding materials on detector response. In addition to the expected spectrum (shown as a dashed line), the representative histories shown at the top lead to the indicated corresponding features in the response function.

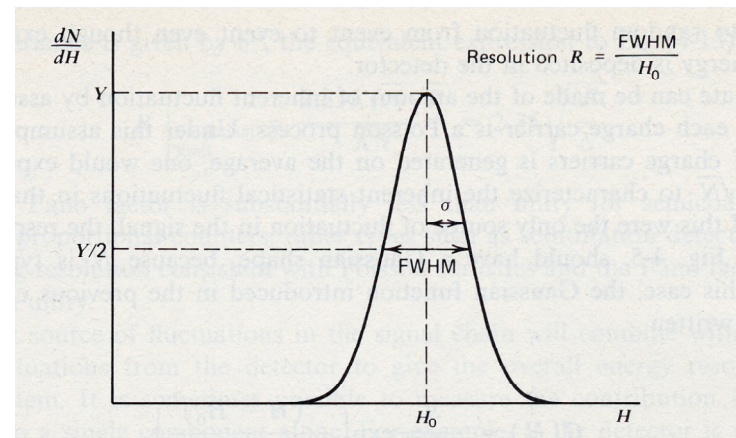
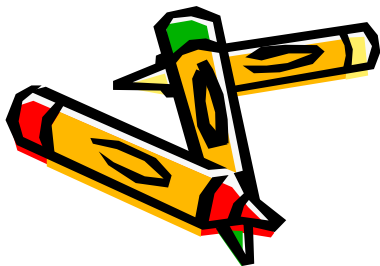


Risoluzione energetica

- 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:

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

- 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 $0.1 \div 0.3$.



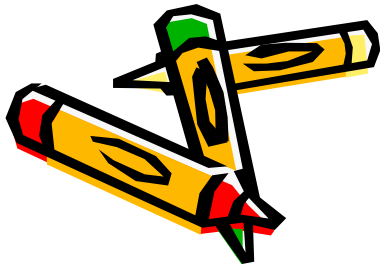
Efficienza di raccolta di carica

- L'efficienza di raccolta di carica è definita:

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

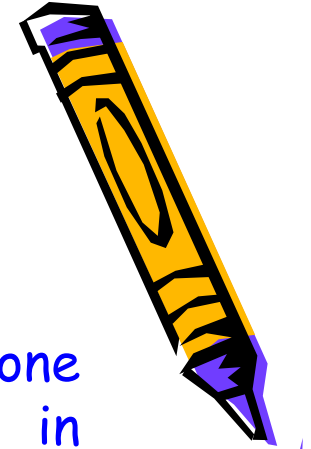
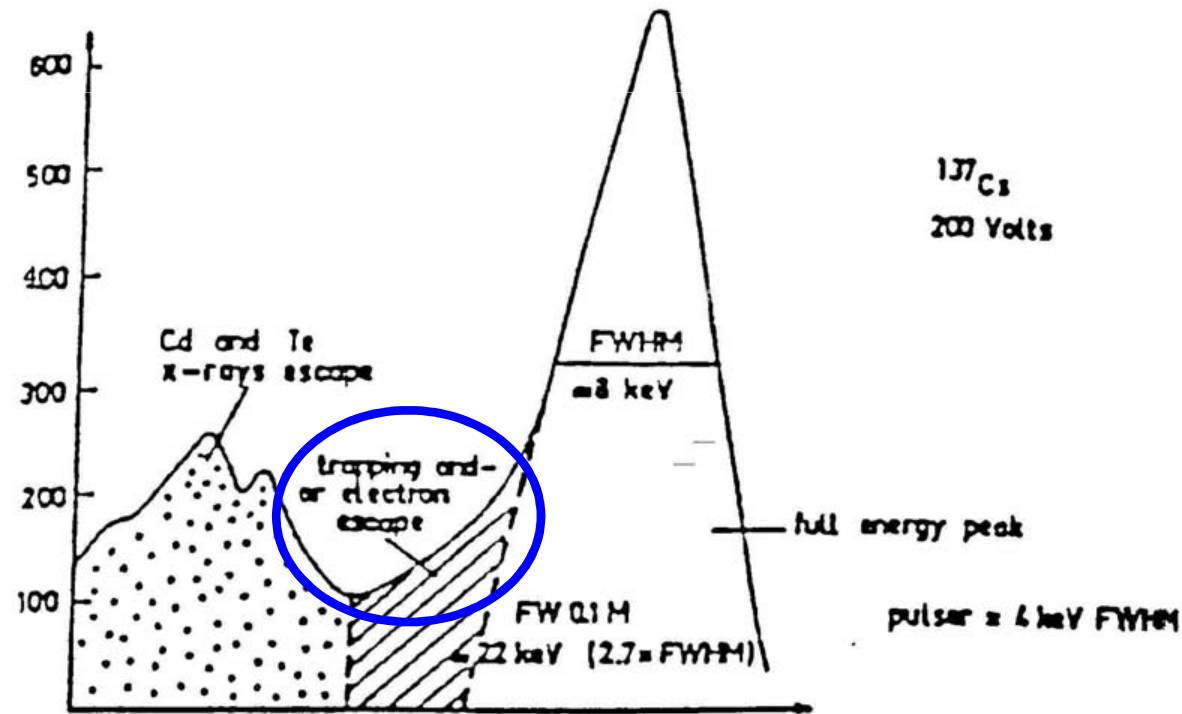
dove Q_0 è la carica totale generata dal fotone nel volume sensibile del rivelatore, corrispondente a N_0 coppie elettrone-lacuna, mentre Q è la carica indotta agli elettrodi.

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



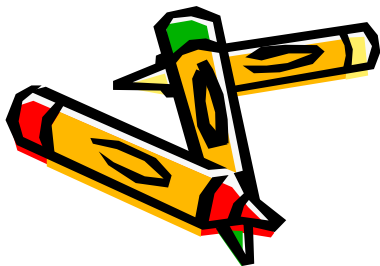
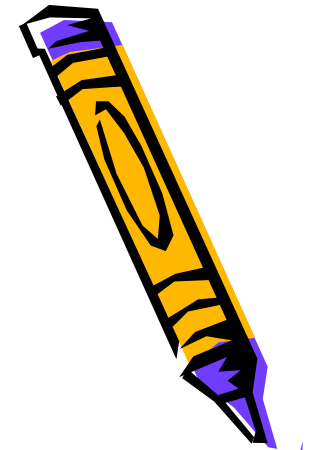
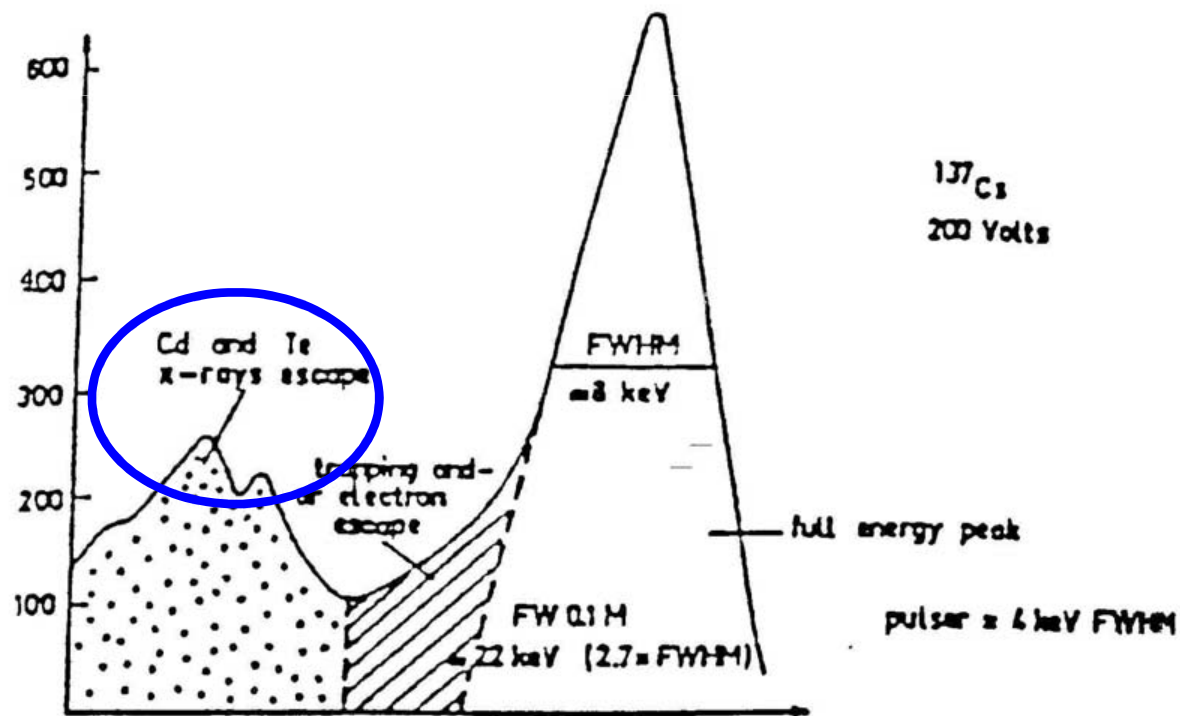
Fenomeni di trapping

- 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)

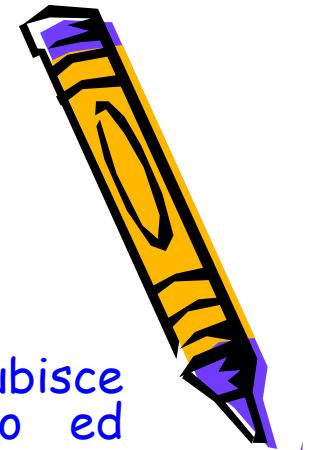
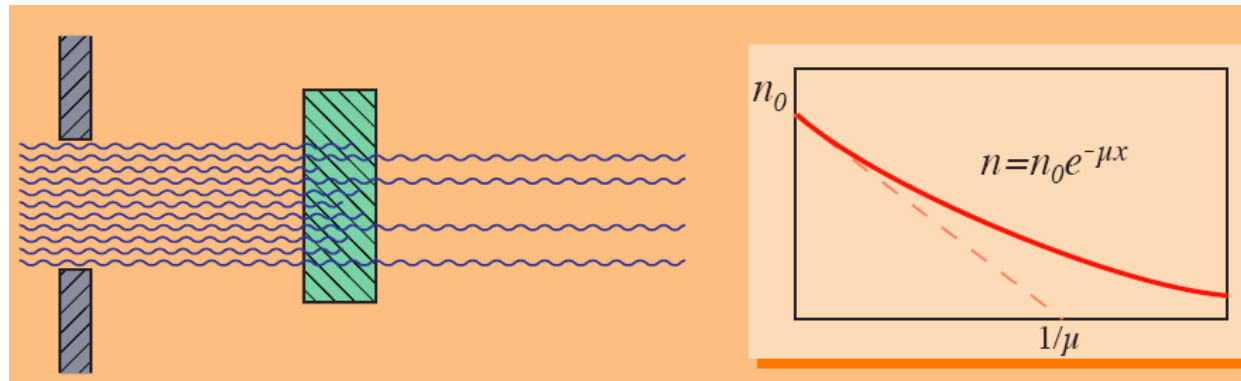
- Un fascio di intensità I_0 , entrando in un mezzo subisce un'attenuazione che è proporzionale al tratto percorso ed all'intensità I nel punto x :

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

- 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

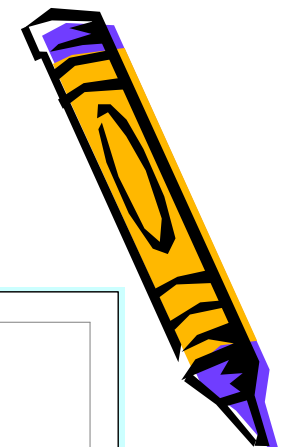
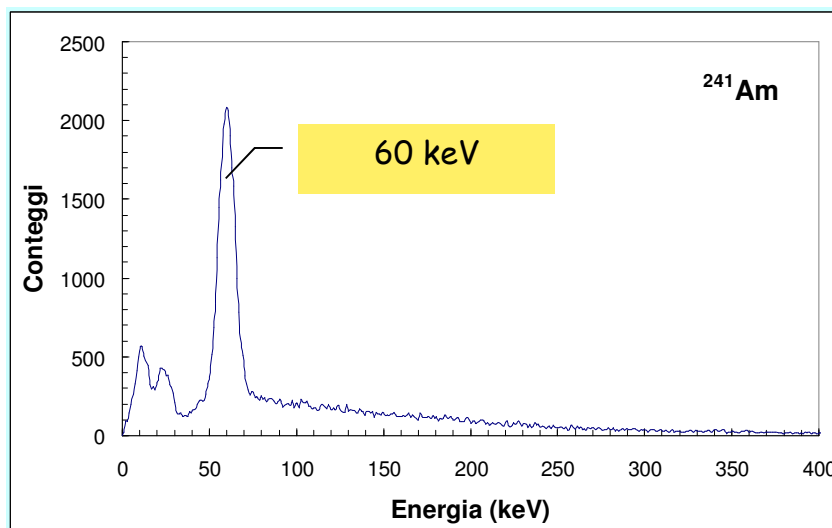
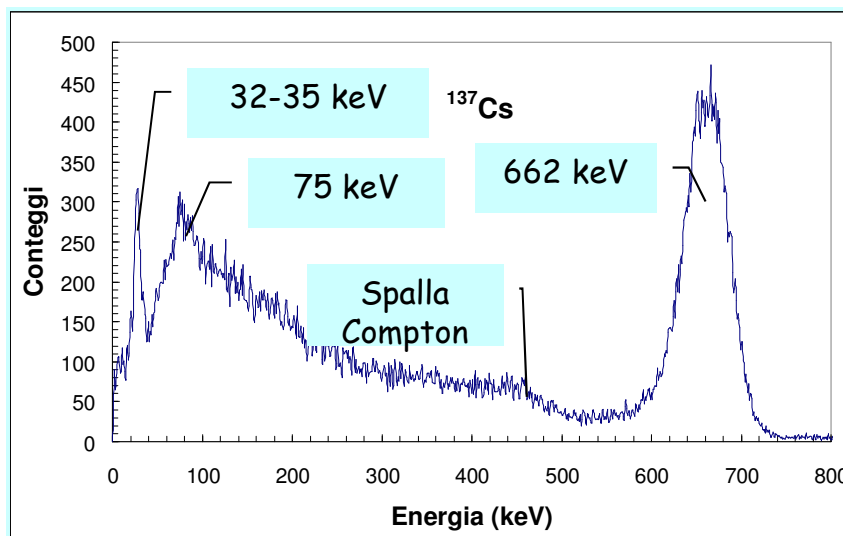
Per effettuare la calibrazione in energia:

✓ acquisiamo uno spettro di ^{57}Co per XX minuti;

✓ acquisiamo uno spettro di ^{241}Am per XX minuti;

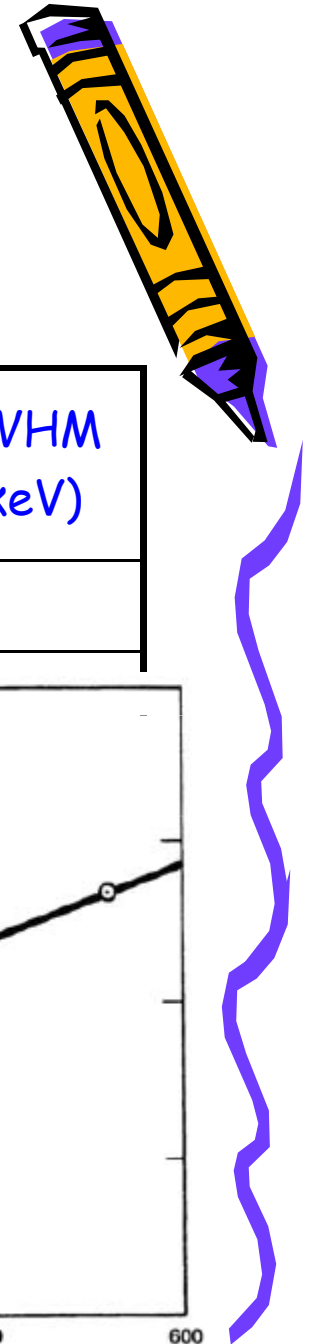
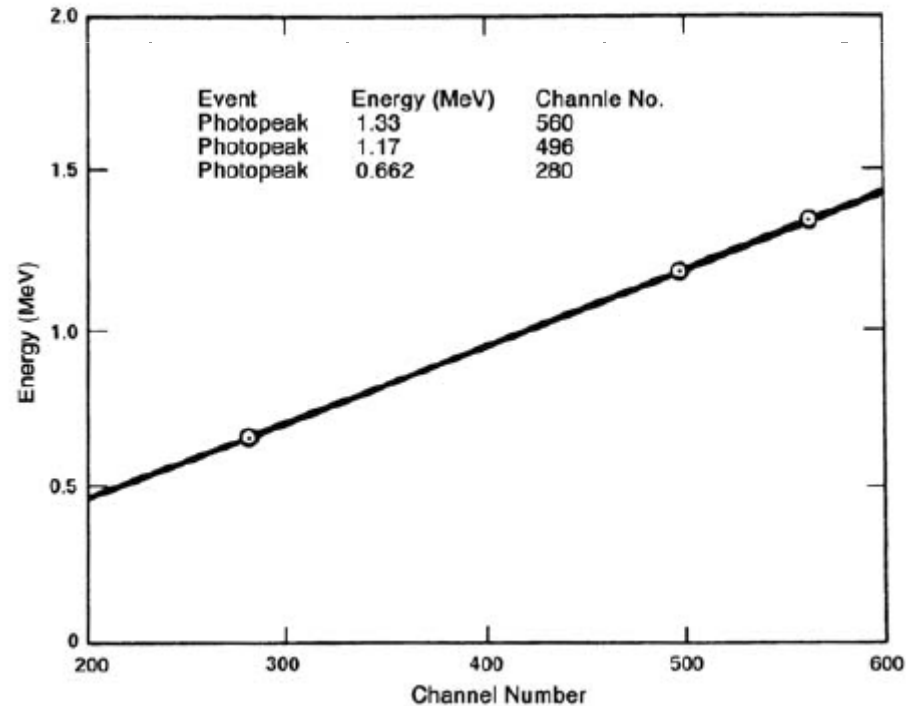
✓ acquisiamo uno spettro di ^{109}Cd per XX minuti;

✓ 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					

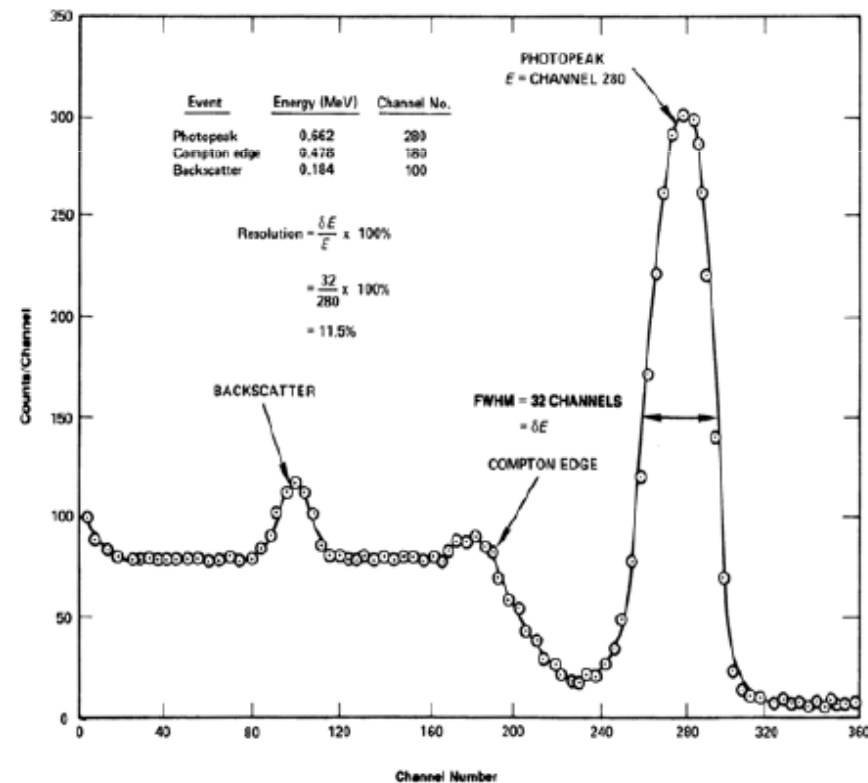
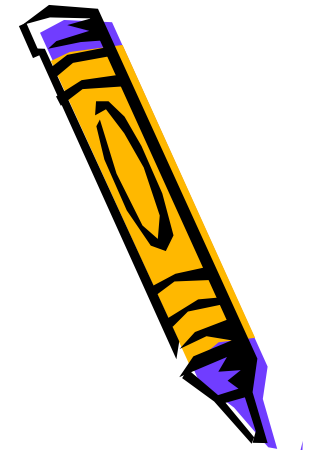


LO SPETTRO DEL ^{137}Cs

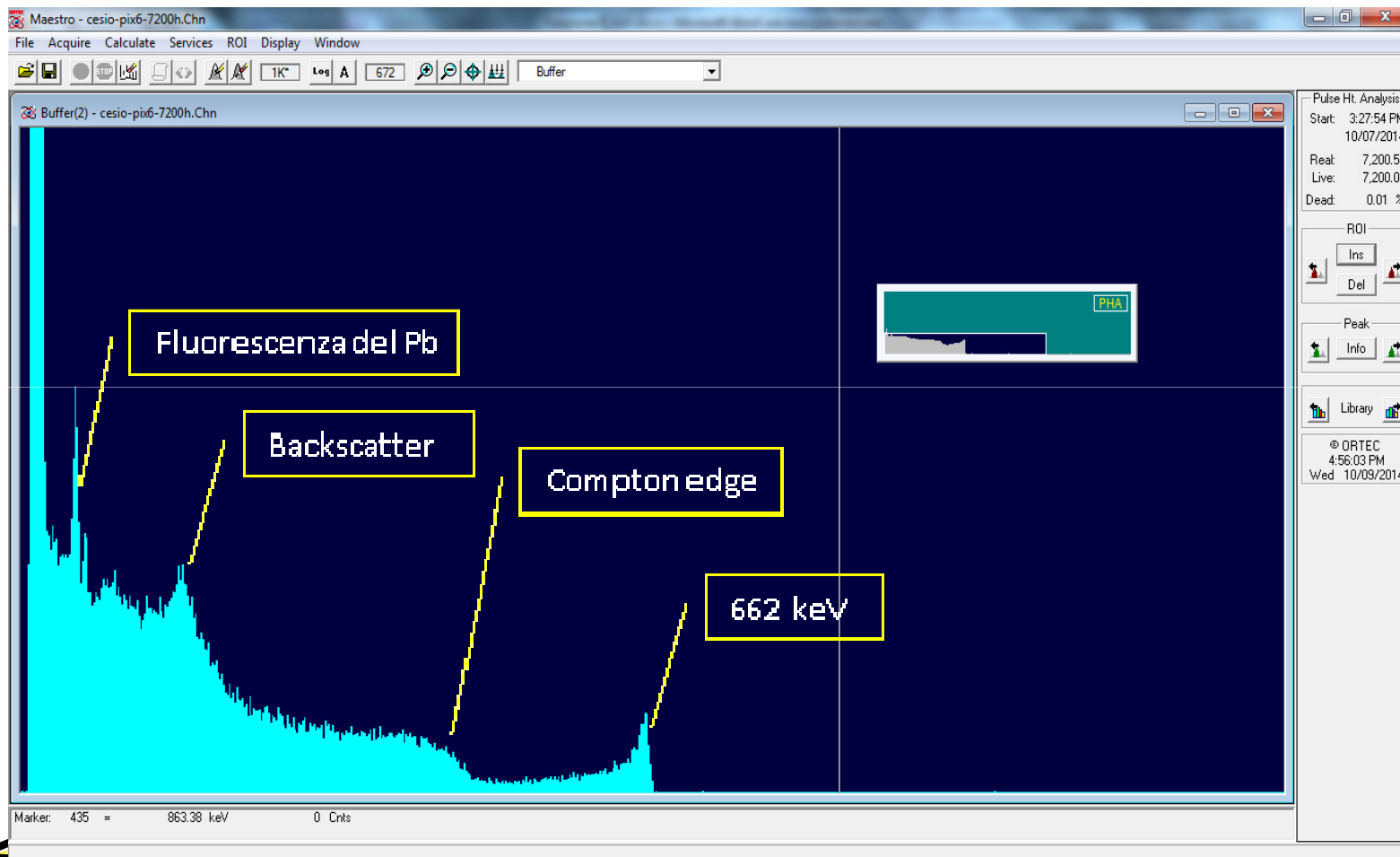
- Possiamo notare presenti nello spettro:
- il picco fotoelettrico
- la spalla Compton
- il picco di backscattering
- e^- ?

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

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

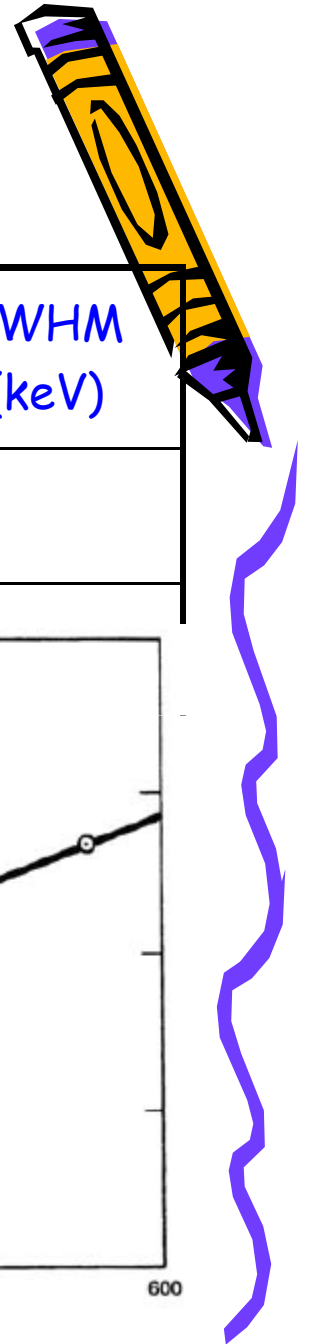
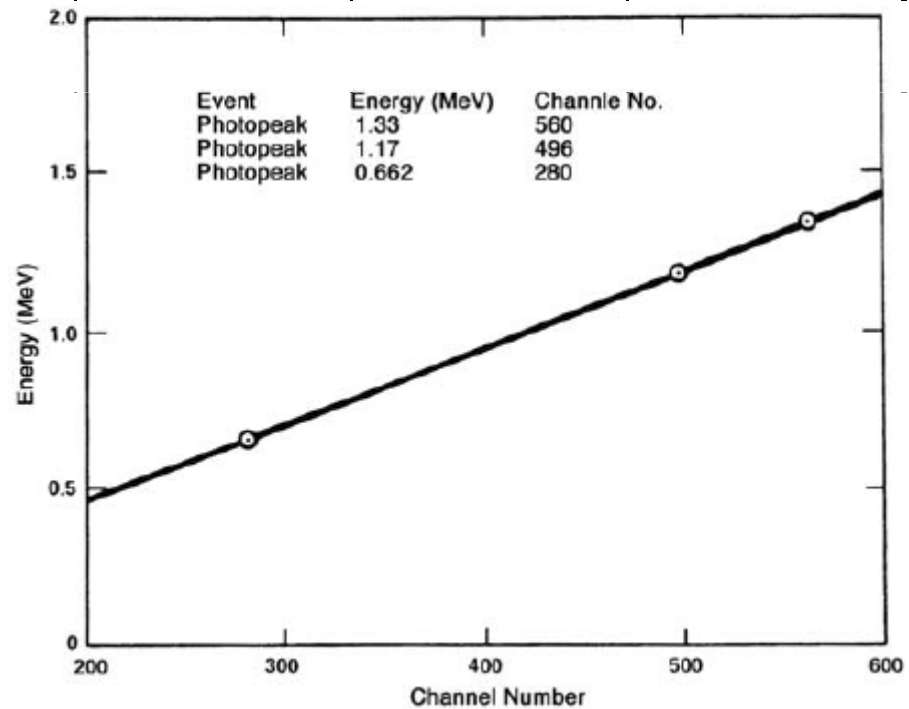


LO SPETTRO DEL ^{137}Cs



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					



Rivelatori per l'esperienza di laboratorio

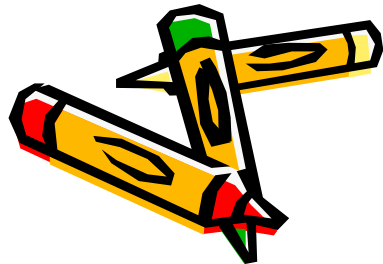
- ✓ Rivelatore di HPGe raffreddato con azoto liquido
- ✓ Rivelatore di CZT sensibile alla posizione
- ✓ Rivelatore di CZT monoelettrodo



Rivelatore di HPGe



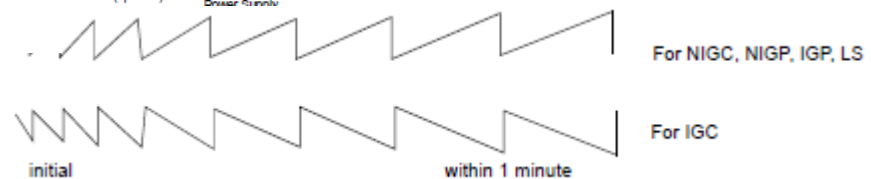
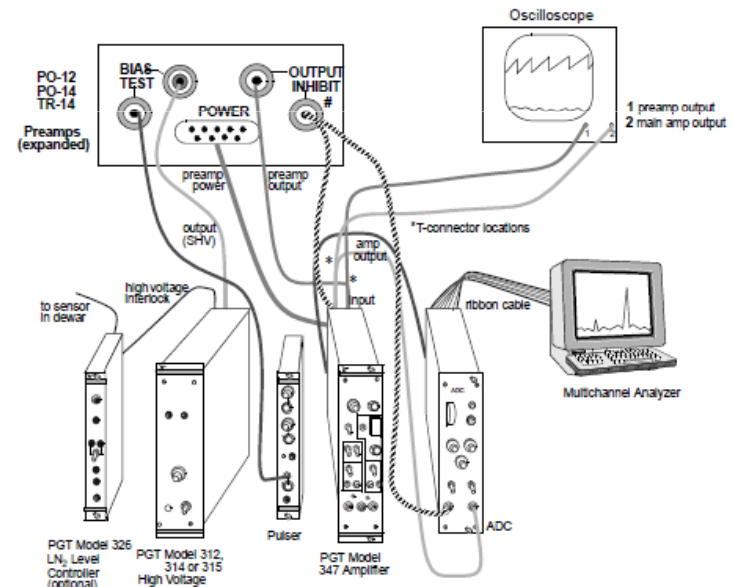
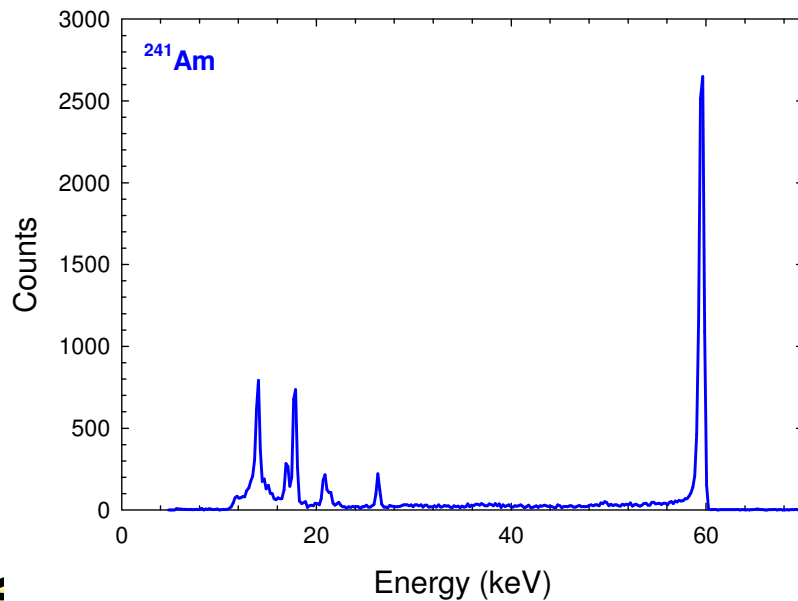
Model and Serial Numbers	
Detector Model N.	IGP210/1429
Cryogenic Information	
Detector Cool-Down Time	3 hours
Dimensions	
Detector size (mm ²)	200
Diameter (mm)	16
Detector sensitive depth (mm)	10
Window	Be
Performance	
Energy range	180 eV- 1 MeV
Resolution FWHM at 122 keV (eV)	480-750 eV
Semiconductor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



Rivelatore di HPGe

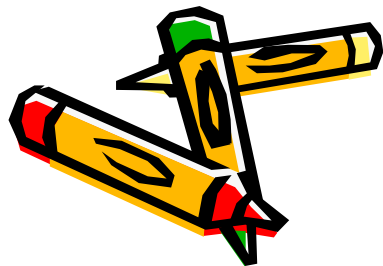
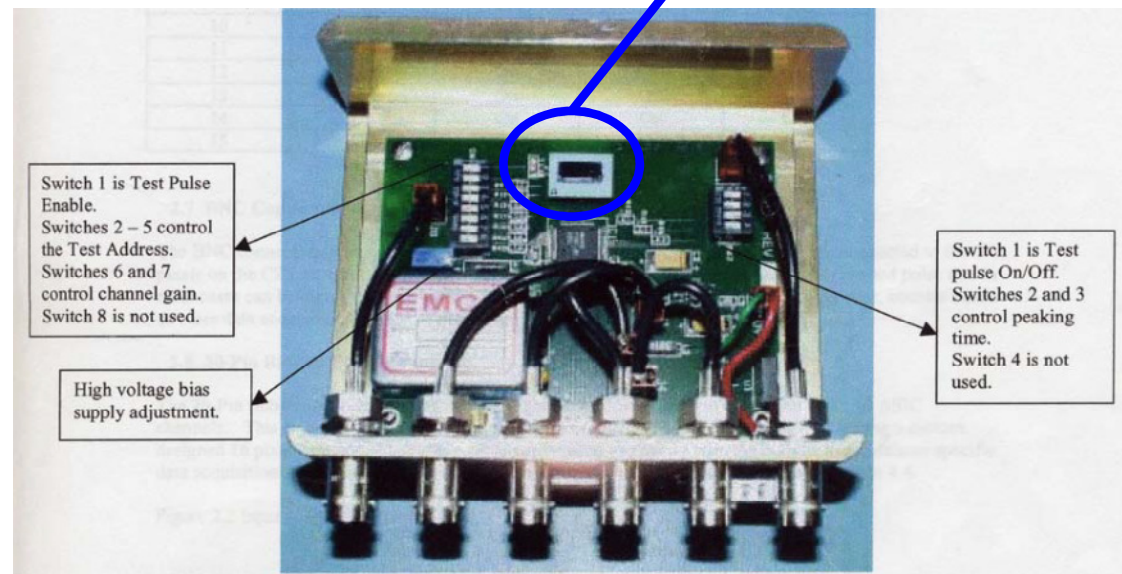
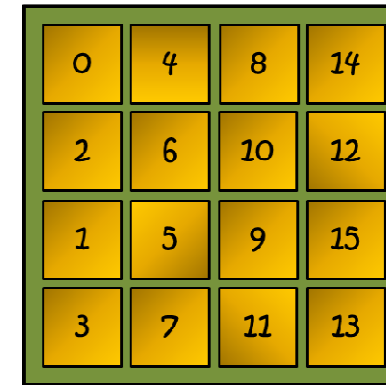
Studio della risposta di un rivelatore di HPGe raffreddato con azoto liquido:

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



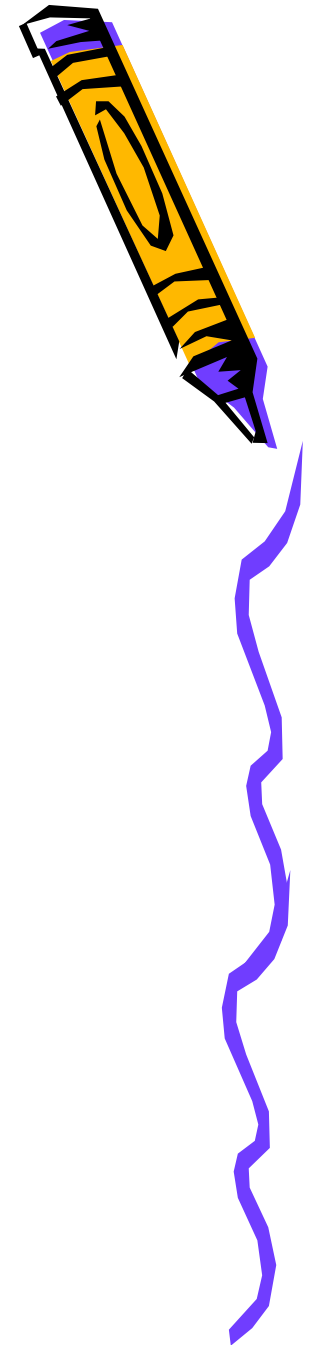
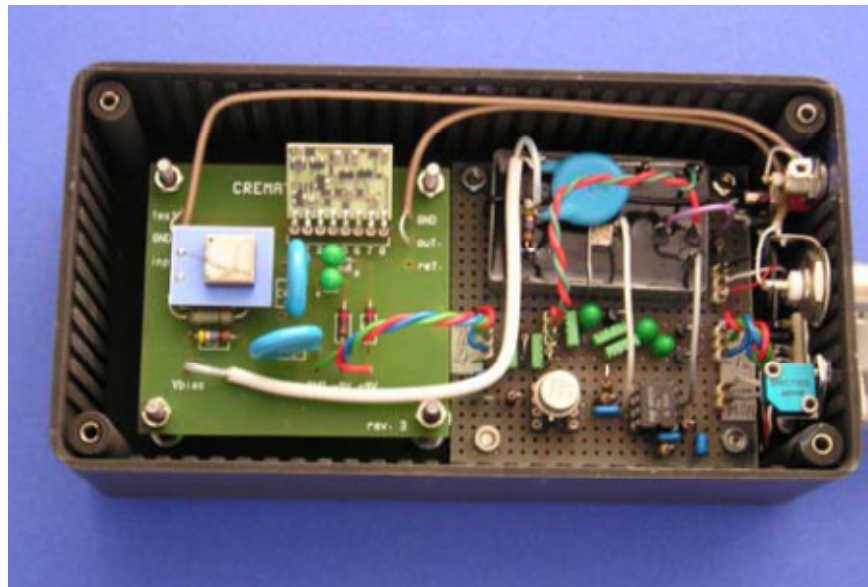
CZT multipixel

- ❑ 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

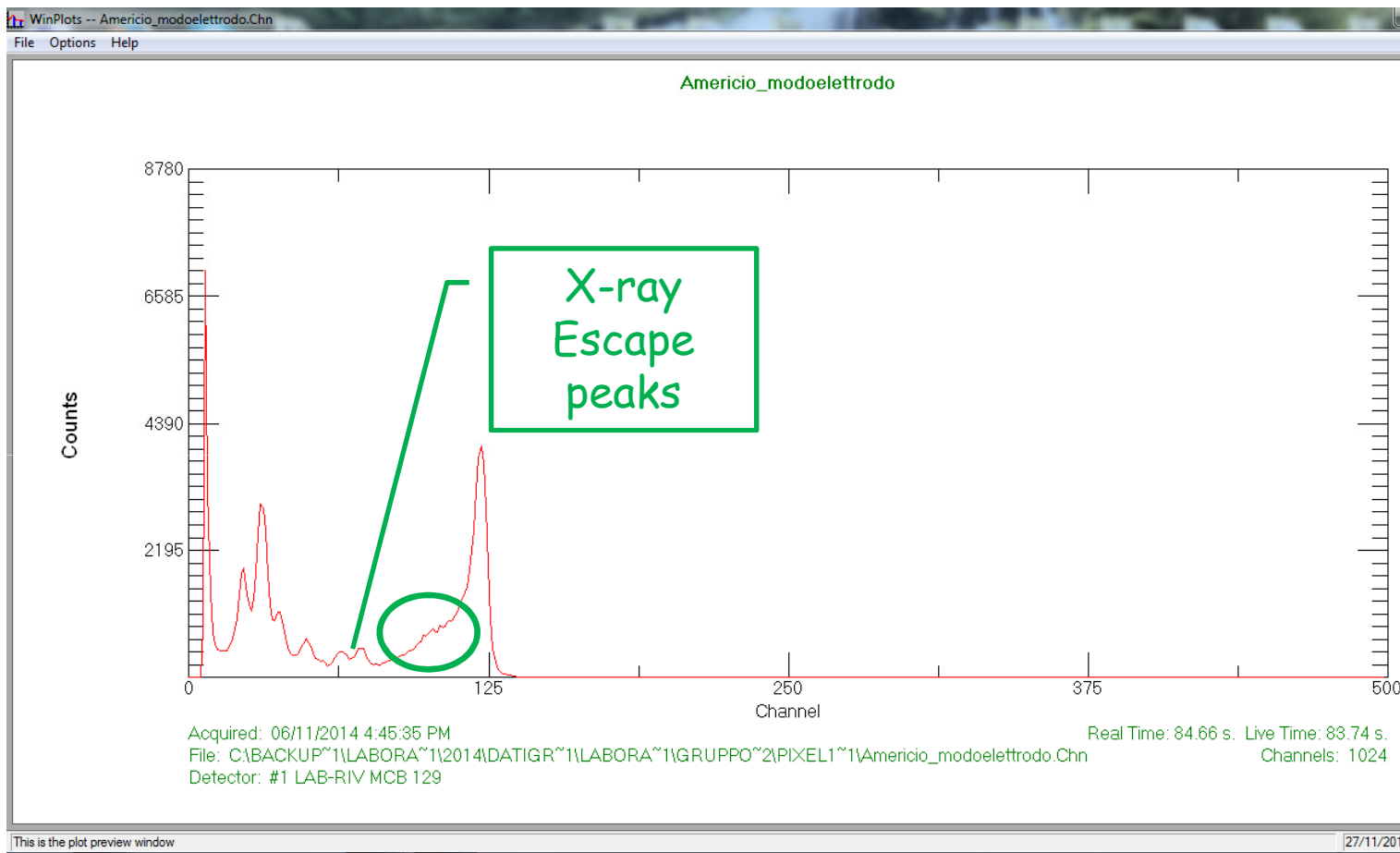
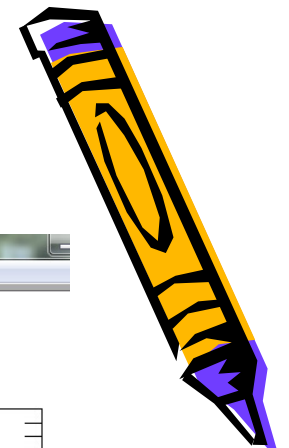


CZT monolettrodo

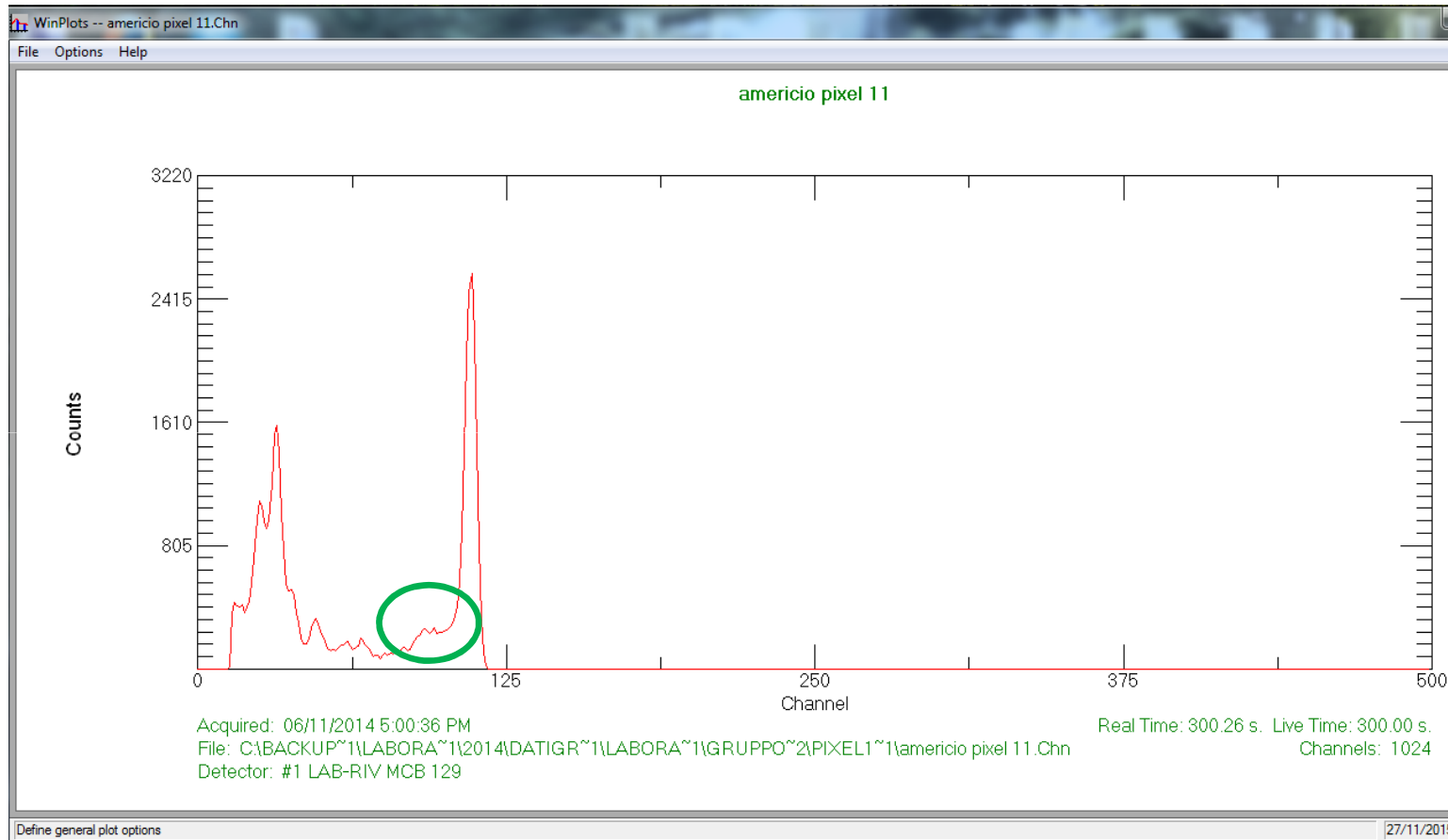
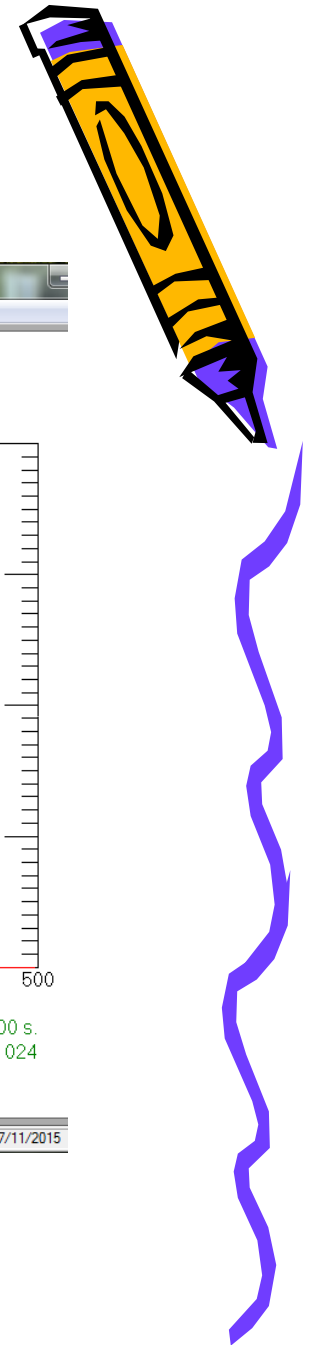
- ❑ Crystal size = $\sim 4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$
- ❑ Au Metallization
- ❑ Thickness = 2 mm
- ❑ Bias Voltage = 100V/mm



Risposta del rivelatore monolettrodo

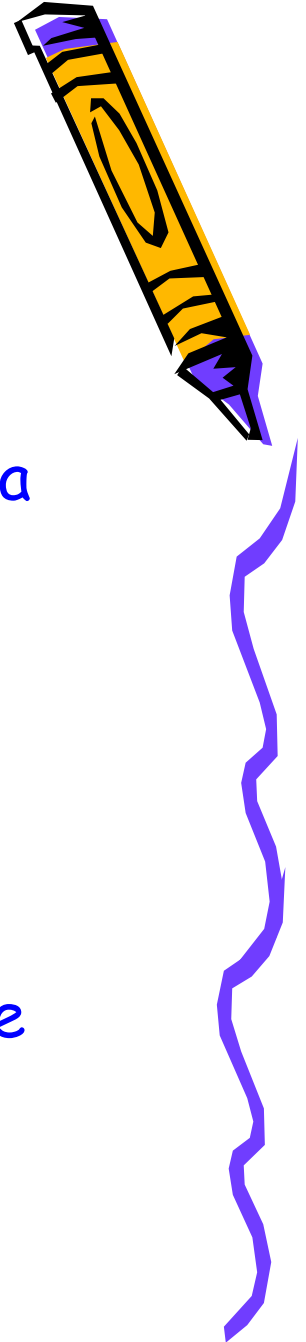


Risposta del multipixel

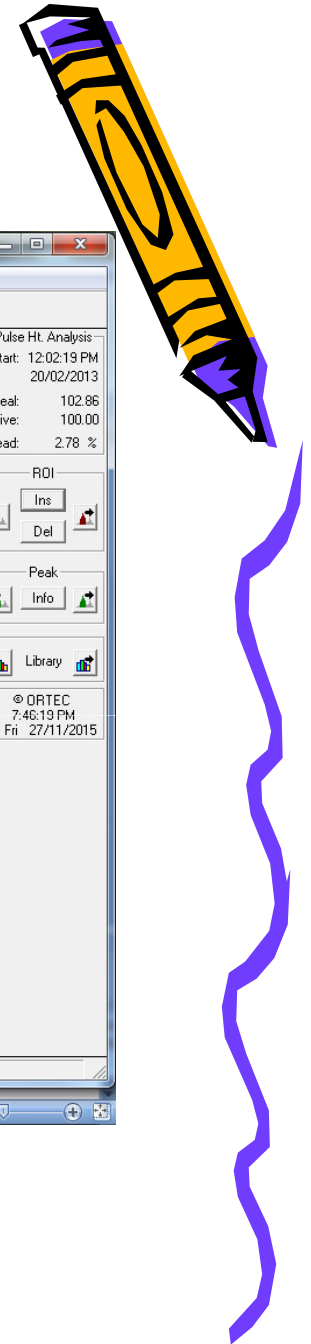
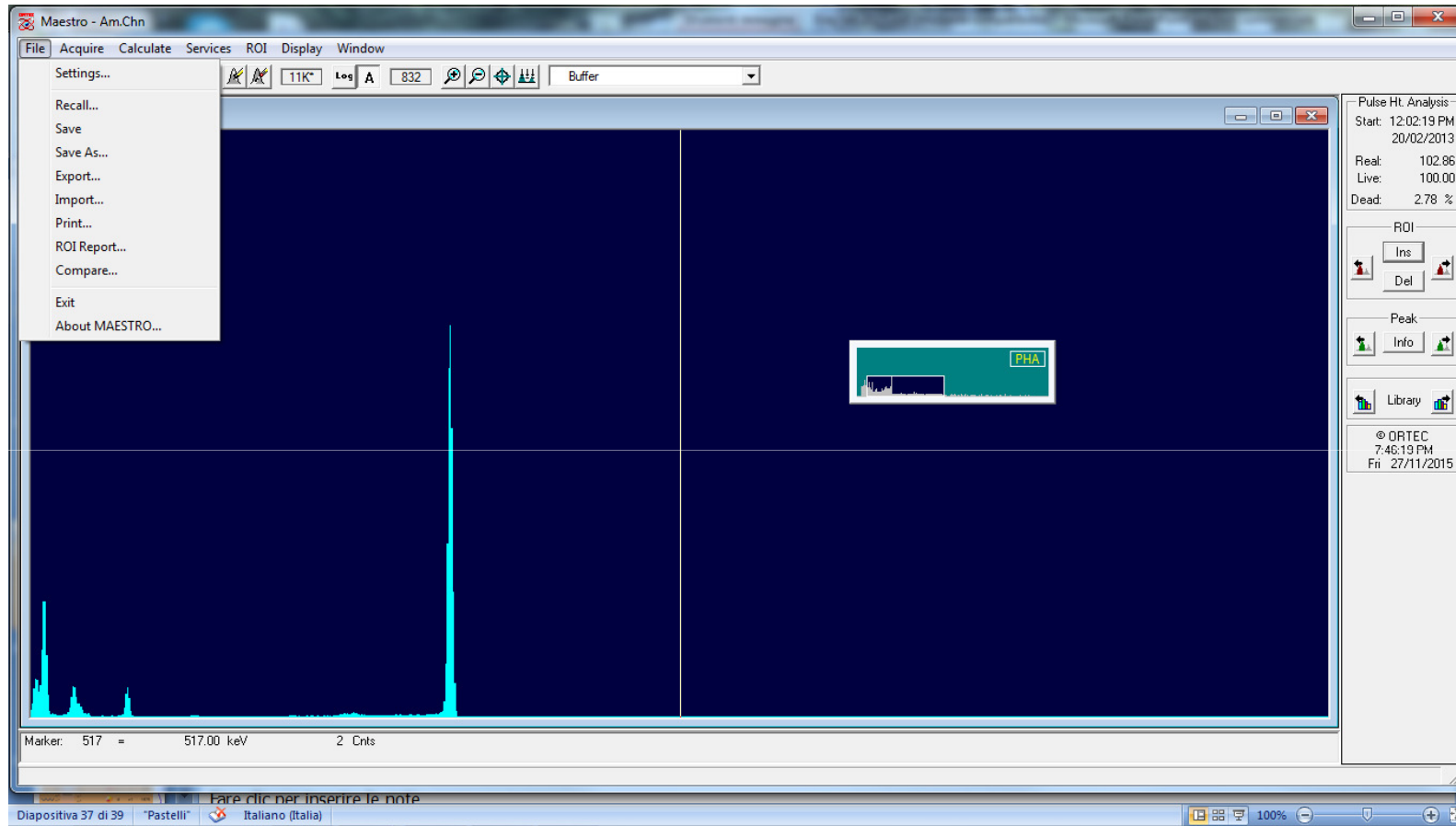


Risposta del multipixel: Small pixel effect

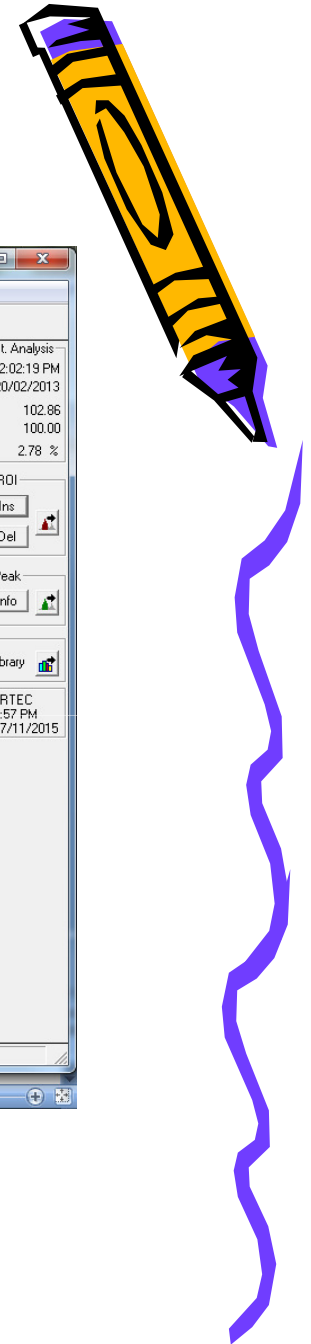
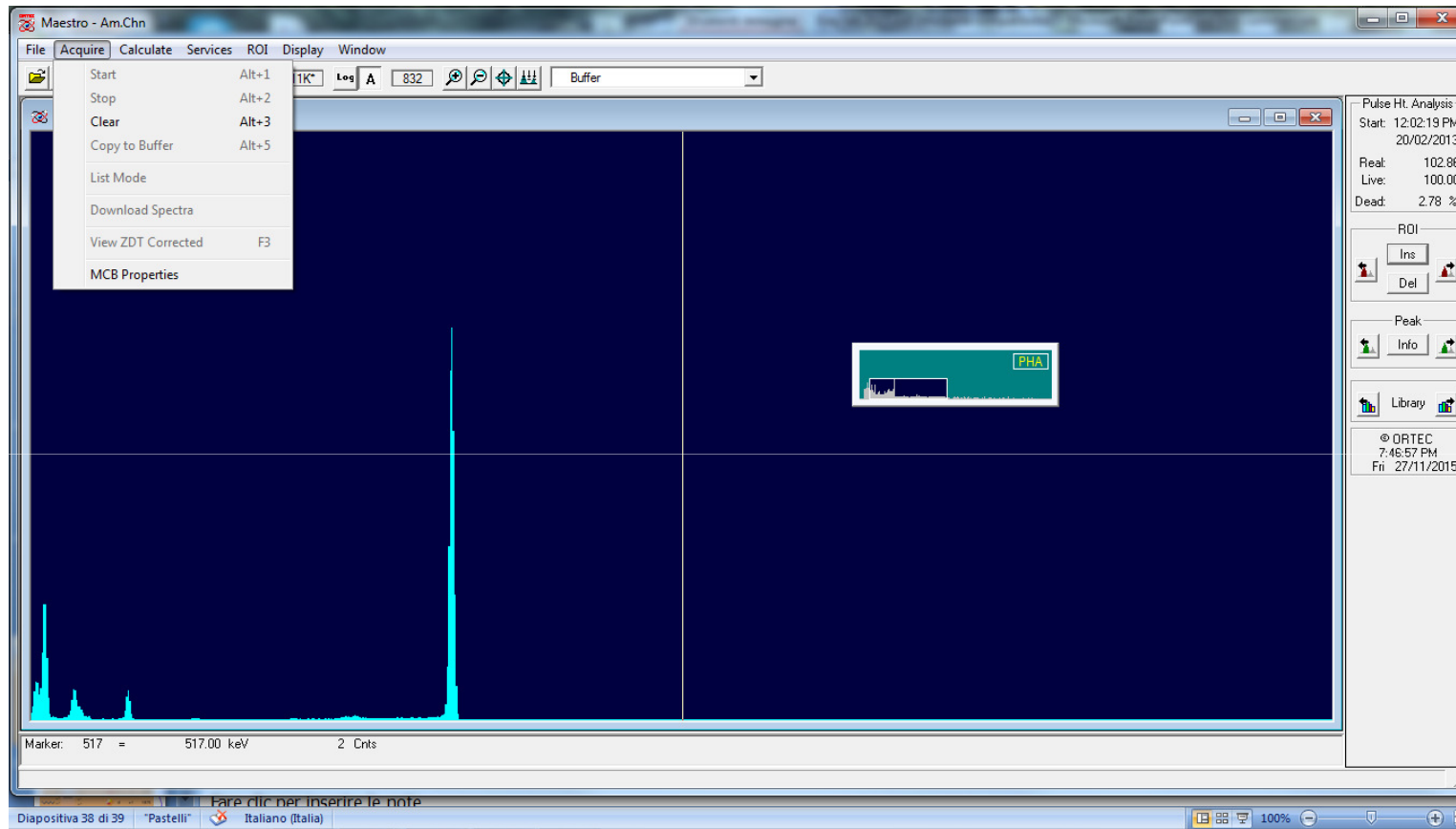
- ✓ Catodo monoelettrodo
- ✓ Anodo segmentato in una matrice di pixel di area ridotta per diminuire la capacità dell'anodo di raccolta con conseguente riduzione del rumore elettronico e miglioramento della risoluzione energetica
- ✓ Raccolta di carica dipende principalmente dalla carica indotta dagli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



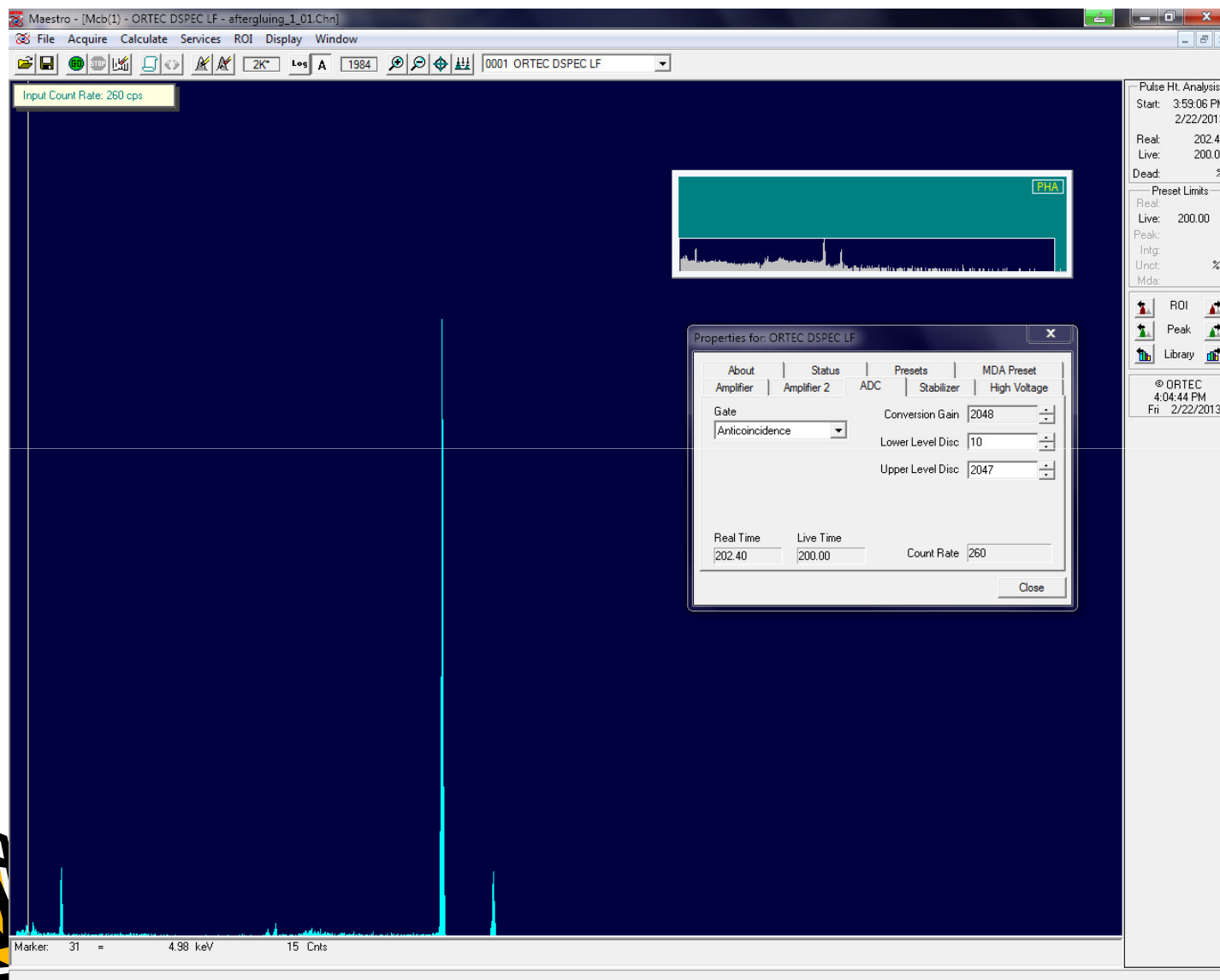
Software d'acquisizione



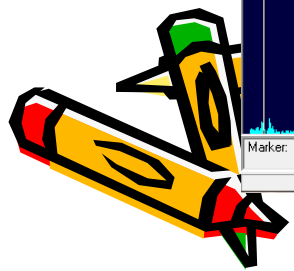
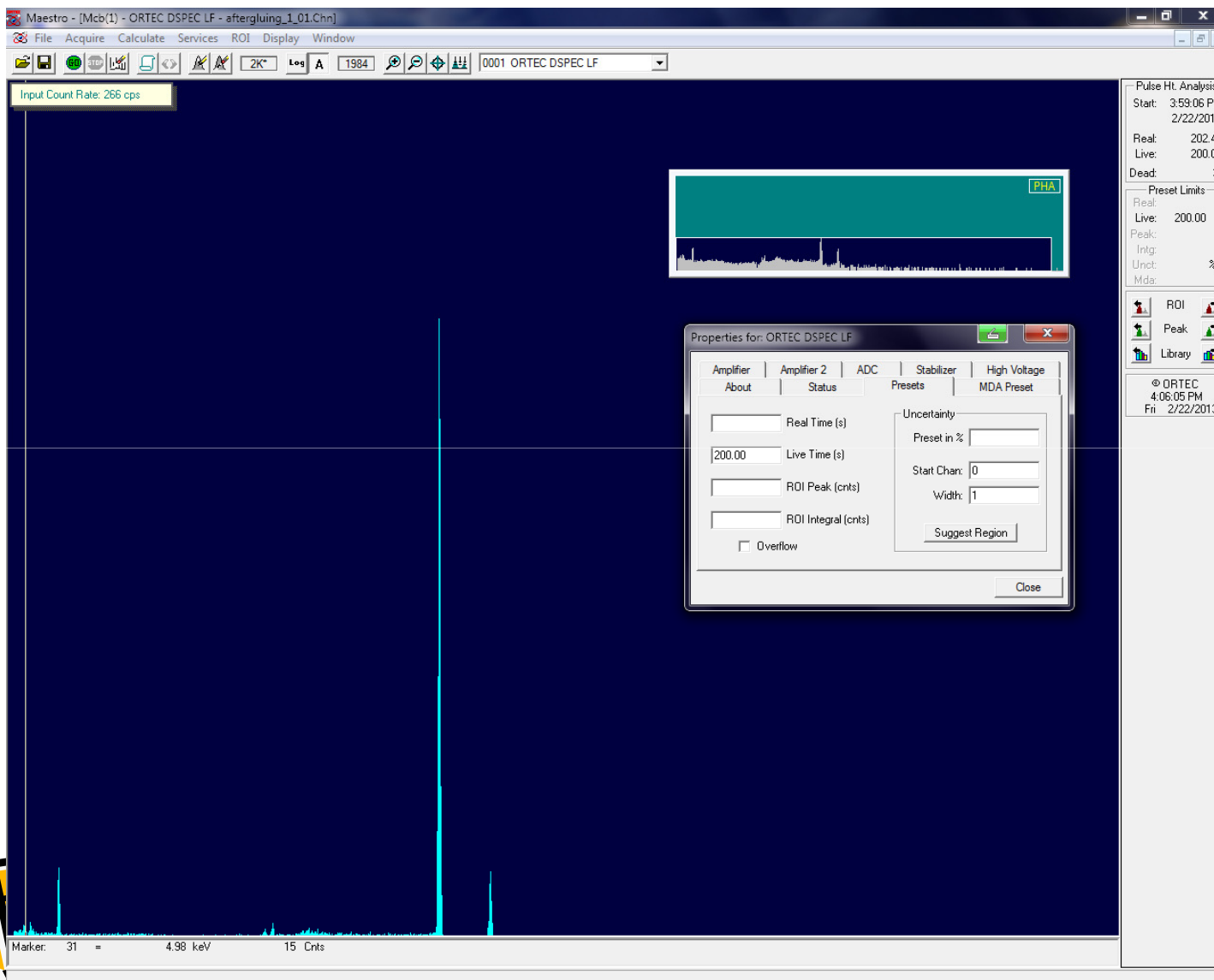
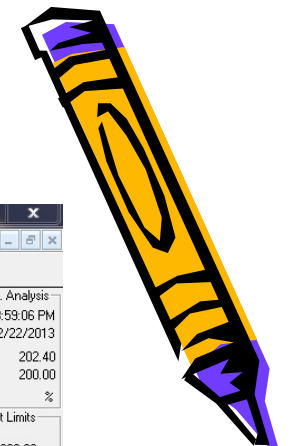
Software d'acquisizione



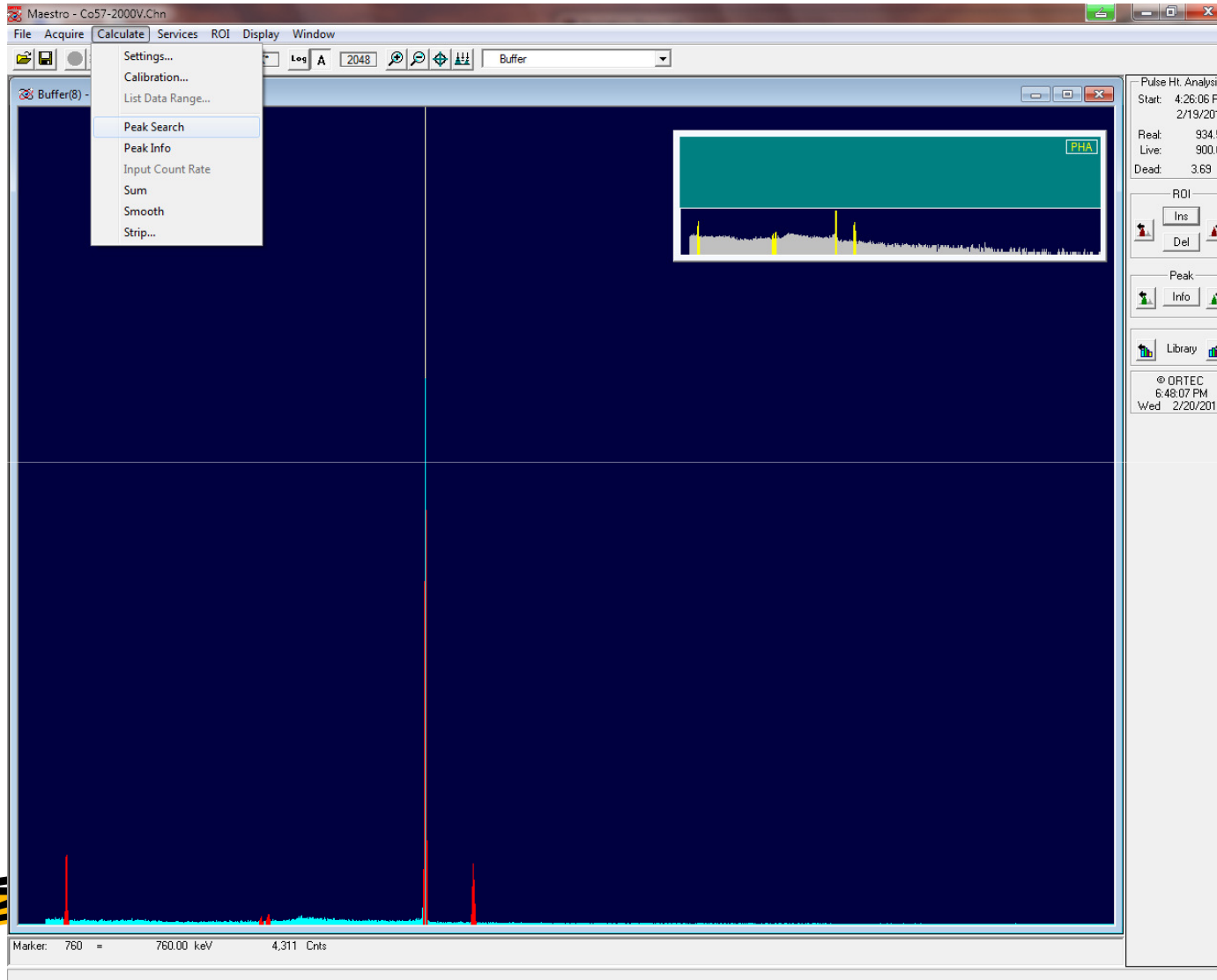
Software d'acquisizione



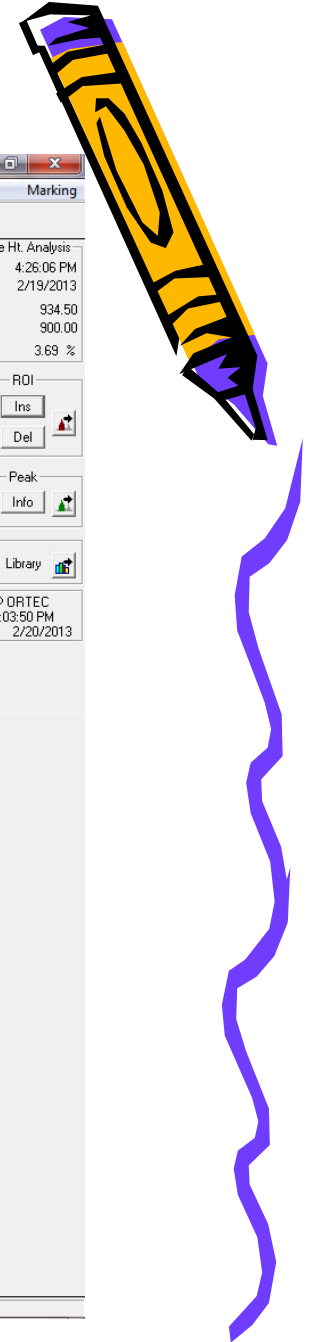
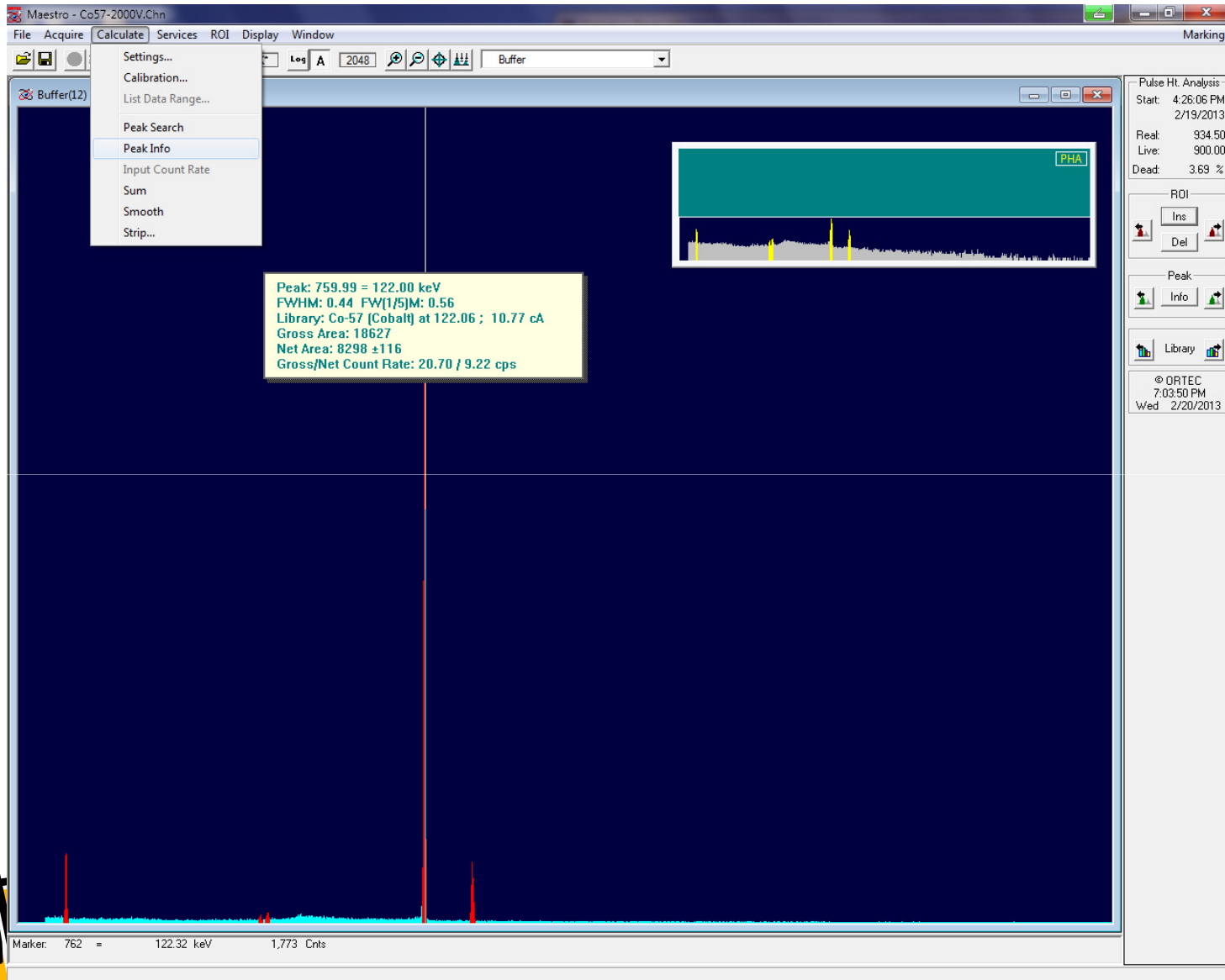
Software d'acquisizione



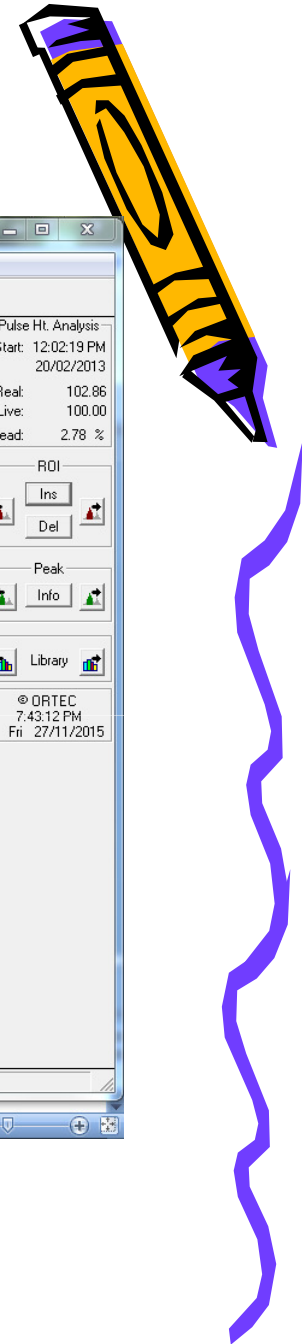
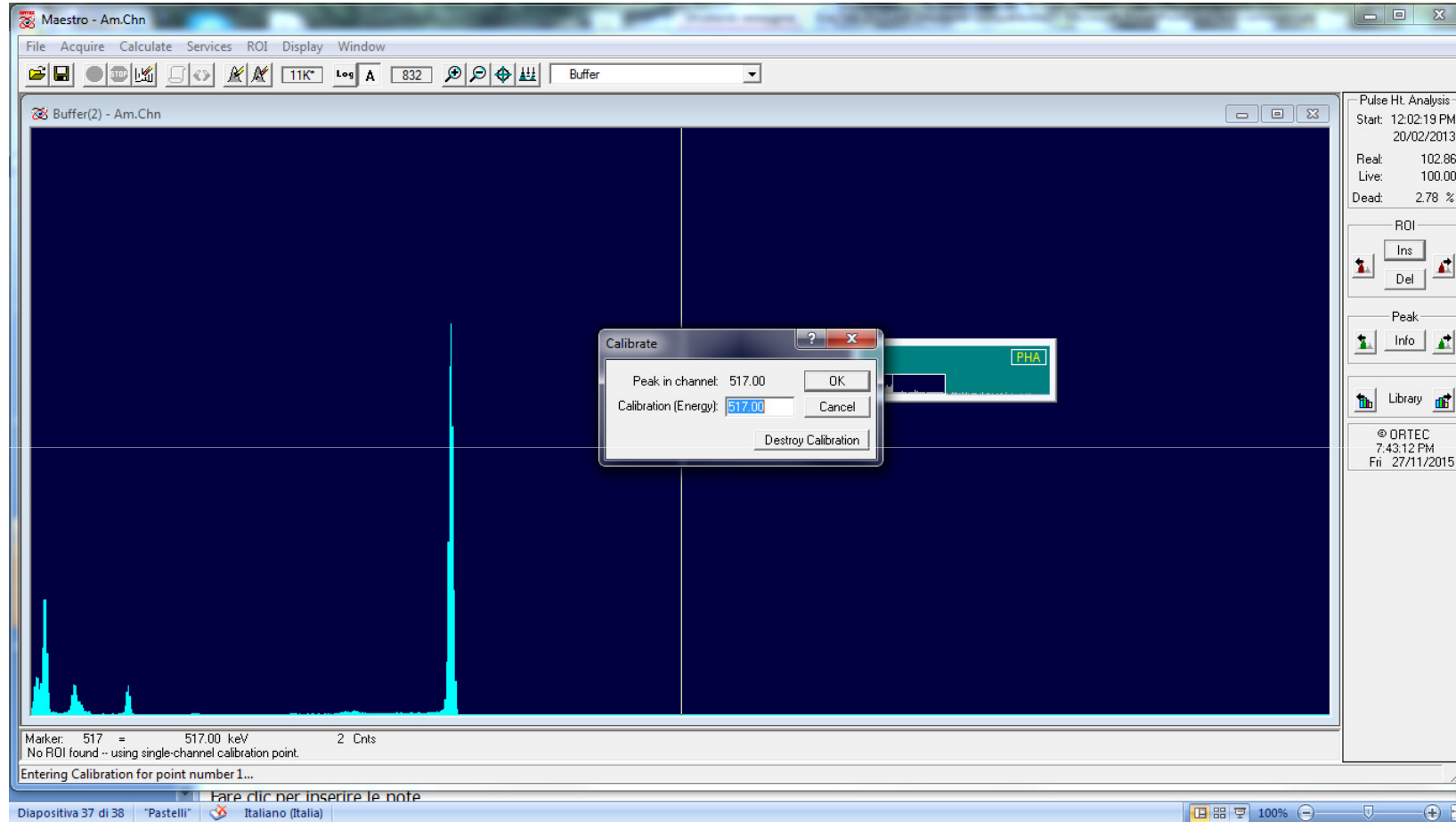
Software d'acquisizione: analisi



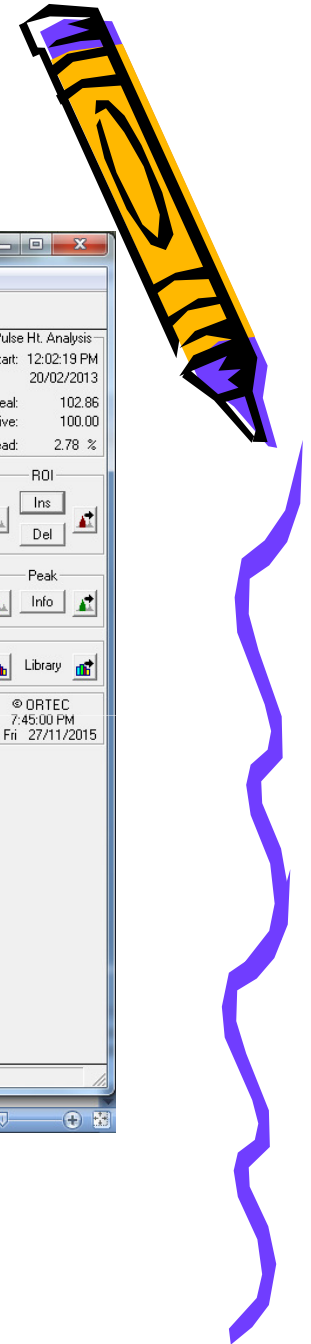
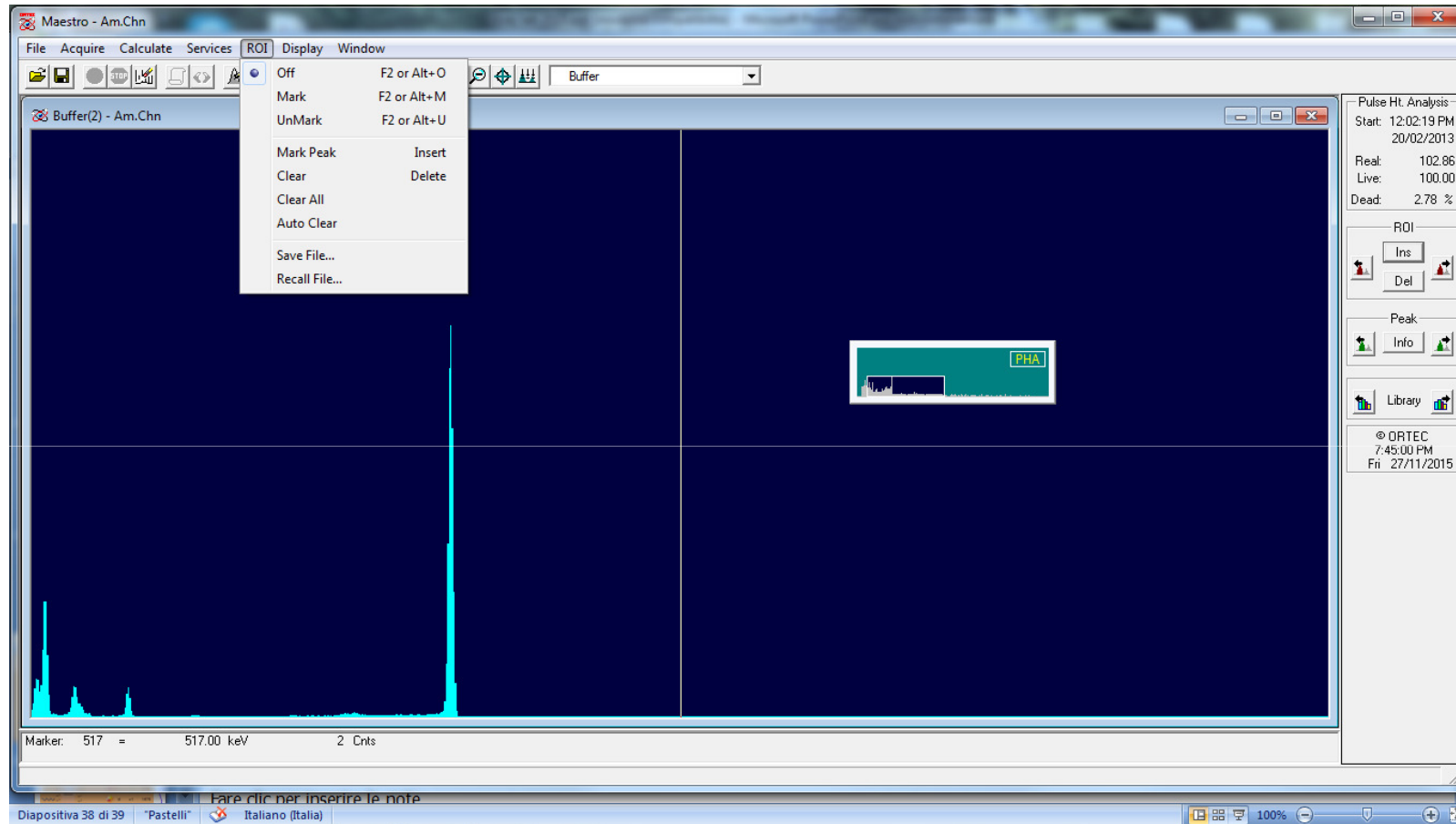
Software d'acquisizione: analisi



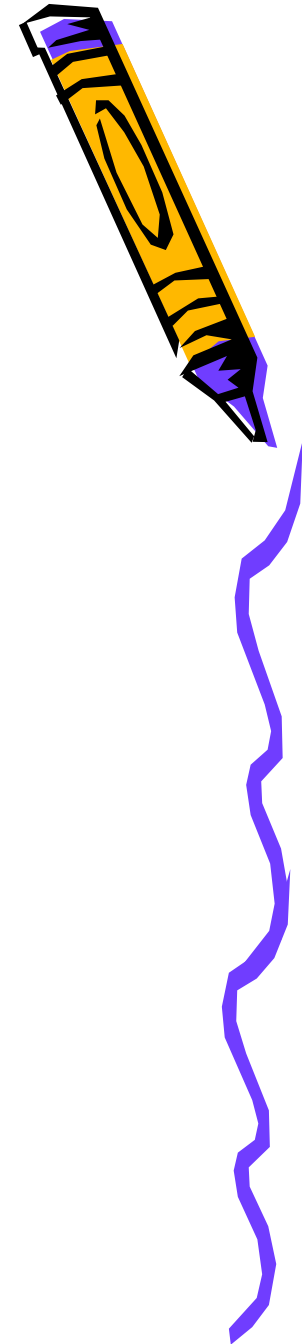
Software d'acquisizione: analisi



Software d'acquisizione: analisi



Radiation Decay



Radiation Decay V4

File Edit Action Search Data Options Help

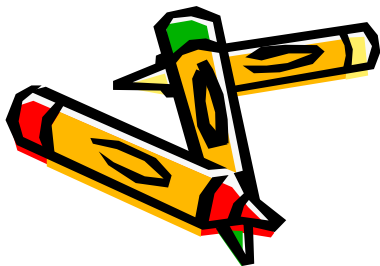
Periodic Table Nuclides Table Decay Calculations Decay Series

Sort by: Atomic Name Properties Radionuclides

Element	Symbol	Radionuclide	Am-241		
Actinium	Ac	Am-231			
Aluminum	Al	Am-232			
Americium	Am	Am-233			
Antimony	Sb	Am-234			
Argon	Ar	Am-235			
Arsenic	As	Am-236			
Astatine	At	Am-237			
Barium	Ba	Am-238			
Berkelium	Bk	Am-239			
Beryllium	Be	Am-240			
Bismuth	Bi	Am-241			
Bohrium	Bh	Am-242			
Boron	B	Am-243			
Bromine	Br	Am-244			
Cadmium	Cd	Am-245			
Calcium	Ca	Am-246			
Californium	Cf	Am-247			
Carbon	C	Am-248			
Cerium	Ce	Am-249			
Cesium	Cs	Am-237m			
Chlorine	Cl	Am-238m			
Chromium	Cr	Am-239m			
Cobalt	Co	Am-241m			
Copper	Cu	Am-242m			
Curium	Cm	Am-243m			
Dubnium	Db	Am-244m			
Dysprosium	Dy	Am-245m			
Einsteinium	Es	Am-246m			
Element-110	10	Am-242m2			
Element-111	11	Am-246m2			
Erbium	Er				
Europium	Eu				
Fermium	Fm				
Fluorine	F				
Francium	Fr				
Gadolinium	Gd				
Gallium	Ga				
Germanium	Ge				
Gold	Au				

X-Ray Emissions:			
Energy (keV)	Intensity (%)	Assignment	
117.875	0.0004	Np	Kb4
117.463	0.0011	Np	Kb2
114.912	0.0001	Np	Kb5
114.234	0.0028	Np	Kb1
113.303	0.0015	Np	Kb3
101.059	0.0120	Np	Ka1
97.069	0.0080	Np	Ka2
96.242	0.0000	Np	Ka3
21.491	0.2900	Np	Lg6
21.342	0.5900	Np	Lg3
21.099	0.6500	Np	Lg2
20.784	1.3900	Np	Lg1
17.992	1.3700	Np	Lb3
17.751	5.7000	Np	Lb1
17.505	0.6500	Np	Lb5
17.061	1.5000	Np	Lb4
16.816	2.5000	Np	Lb2
16.109	0.1840	Np	Lb6
15.861	0.1530	Np	Lh
13.946	9.6000	Np	La1
13.761	1.0700	Np	La2
11.871	0.6600	Np	Ll

Properties Alphas Betas Gammas X-Rays Ref.



Ci vediamo in laboratorio

