

Calibrazione di rivelatori per raggi X di CdZnTe per applicazioni spaziali

Rea Dizdari*, Eugenio Dondi, Natalia Auricchio*****

* Liceo Scientifico N. Copernico – Bologna (BO)

** Liceo Scientifico A. Righi – Bologna (BO)

*** INAF IASF Bologna – Bologna (BO)

Rapporto Interno INAF/IASFBO n. 645/2014

7/18 Luglio 2014



ISTITUTO DI ASTROFISICA SPAZIALE E FISICA COSMICA - BOLOGNA

Sommario

1	IL NOSTRO OBIETTIVO	3
1.1	Perchè utilizzare il CdZnTe?.....	3
1.2	Applicazioni	4
2	SET-UP SPERIMENTALE.....	5
2.1	CZT monolettrodo	5
2.2	CZT multipixel.....	6
3	CALIBRAZIONE DEI RIVELATORI.....	7
3.1	CZT monolettrodo	7
3.2	CZT multipixel.....	10
4	VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI DEI RIVELATORI.....	12
5	VALUTAZIONE DEI PARAMETRI OPERATIVI DEL CZT MONOELETTRODO.....	12
6	STUDIO DELL'UNIFORMITA' DI RISPOSTA DI UN RIVELATORE DI CZT SENSIBILE ALLA POSIZIONE (MULTIPIXEL).....	15
7	ANALISI DELLO SPETTRO AD ALTA ENERGIA	16
8	CALCOLO TEORICO DELL'EFFICIENZA DI RIVELAZIONE A DIVERSE ENERGIE.....	16
9	ACQUISIZIONE DELLE IMMAGINI CON IL RIVELATORE SENSIBILE ALLA POSIZIONE (PSD).....	17
10	STUDIO DELLA STABILITA' DEL SISTEMA DI RIVELAZIONE MULTIPIXEL	19
11	CONCLUSIONI	20
12	REFERENZE	20

ISTITUTO DI ASTROFISICA SPAZIALE E FISICA COSMICA – BOLOGNA

Area della Ricerca di Bologna – via Piero Gobetti, 101 – 40129 Bologna – ITALY

e-mail: segreteria@iasfbo.inaf.it – PEC: inafiasfbo@pcert.postecert.it – www.iasfbo.inaf.it

Tel. (+39) 051.6398688 – Fax (+39) 051.6398724 - Cod. Fisc. 97220210583 – Part. Iva 06895721006

1 IL NOSTRO OBIETTIVO

In questa relazione presentiamo i nostri risultati riguardo allo studio e caratterizzazione di rivelatori di raggi X duri e gamma molli. I sensori utilizzati sono un monolettrodo e un multipixel dell'eV-products a 16 canali, entrambi di CdZnTe.

Gli aspetti su cui abbiamo focalizzato la nostra attenzione sono stati:

- Acquisizione dello spettro di sorgenti tipiche di calibrazione: ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{57}Co e ^{137}Cs .
- Analisi degli spettri.
- Calibrazione in energia.
- Calcolo della risoluzione energetica.
- Ottimizzazione della tensione operativa e del tempo di formatura (shaping time) dell'amplificatore formatore.
- Studio della risposta del rivelatore multipixel **PSD (Position Sensitive Detector)**.
- Acquisizione dell'immagine fornita dal rivelatore PSD.
- Studio della stabilità del sistema di rivelazione basato sul multipixel in funzione del tempo.

Lo scopo dell'esperienza è quello di calibrare a terra i prototipi degli strumenti che verranno poi integrati sui satelliti e utilizzati in volo.

1.1 Perché utilizzare il CdZnTe?

Il Tellururo di Cadmio attivato allo Zinco, a differenza di altri materiali che prevedono il raffreddamento criogenico durante il loro utilizzo (come il Germanio iperpuro), presenta la peculiarità di poter essere utilizzato a temperatura ambiente, che ne rende più agevole la fruizione.

Le proprietà intrinseche del materiale sono:

- alto numero atomico (48-30-52) che permette un'elevata efficienza di rivelazione grazie anche all'elevata densità (circa 6g/cm³);
- bassa corrente di leakage che comporta un basso rumore e migliore risoluzione energetica.

Uno svantaggio di questo materiale è la bassa mobilità dei portatori di carica positivi (lacune/hole) rispetto agli elettroni. Le lacune perciò vengono intrappolate più facilmente dai difetti del cristallo degradando la risoluzione energetica [1].

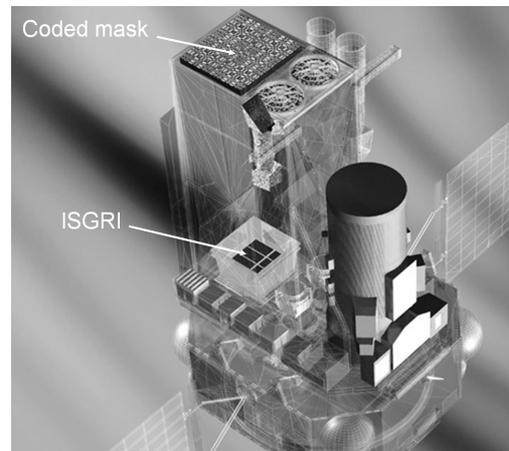


1.2 Applicazioni

Il CdTe/CZT è un semiconduttore operativo a temperatura ambiente di uso consolidato nell'ambito dell'astronomia a raggi X duri e gamma molli. Attualmente, infatti, viene impiegato a bordo di satelliti come Swift, INTEGRAL e NuSTAR.

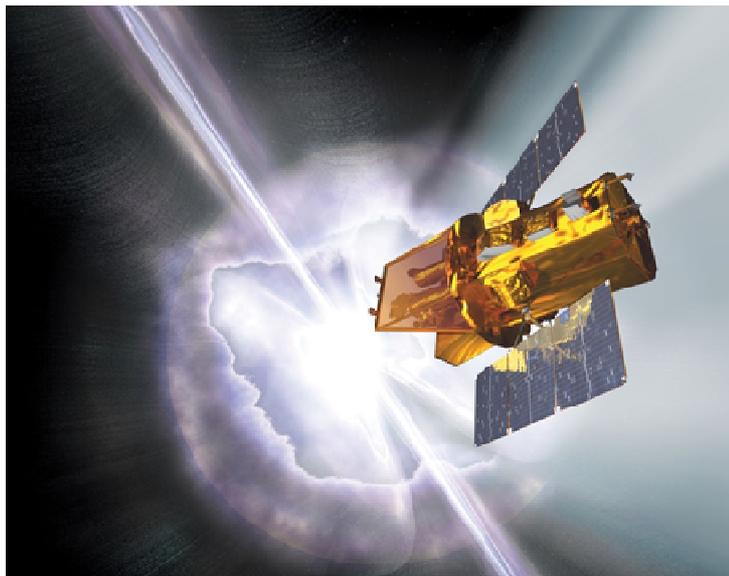
- **INTEGRAL**

Lanciato nell'ottobre 2002 per compiere *all-sky survey* a raggi X/gamma e tuttora attivo, vanta il primo e il più grande rivelatore per raggi gamma mai realizzato, ISGRI [2,3].



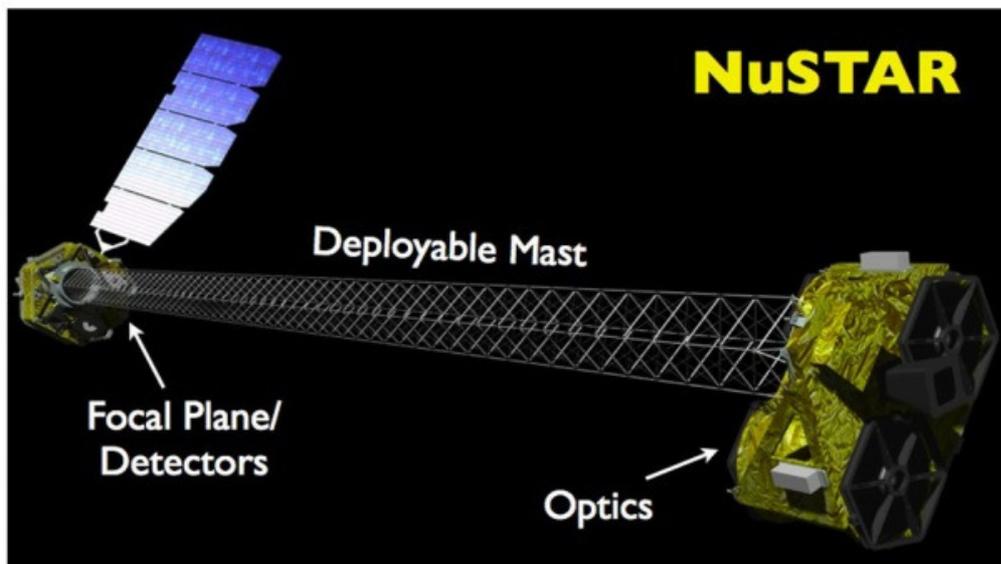
- **Swift**

In orbita dal novembre 2004, compie *all-sky survey* a raggi X e rileva lampi gamma grazie ai due telescopi che monta a bordo, XRT (X-ray Telescope) e BAT (Burst Alert Telescope) [4].



- **NuSTAR**

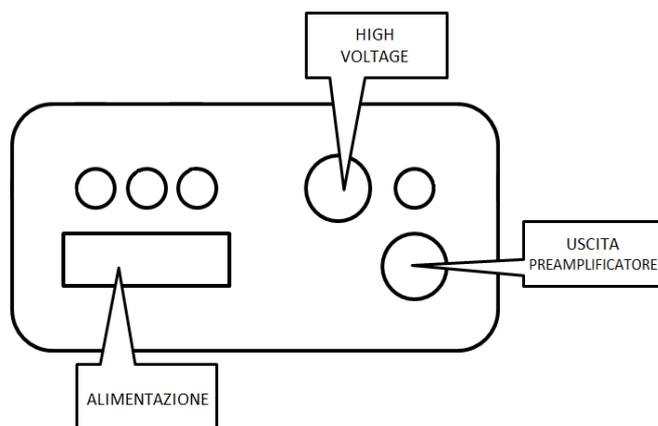
E' un satellite lanciato dalla NASA nel 2012 dotato di un rivelatore di piano focale di CZT.



2 SET-UP SPERIMENTALE

2.1 CZT monolettrodo

Le dimensioni del rivelatore monolettrodo sono 4 mm x 4 mm di area, mentre lo spessore è 2 mm.

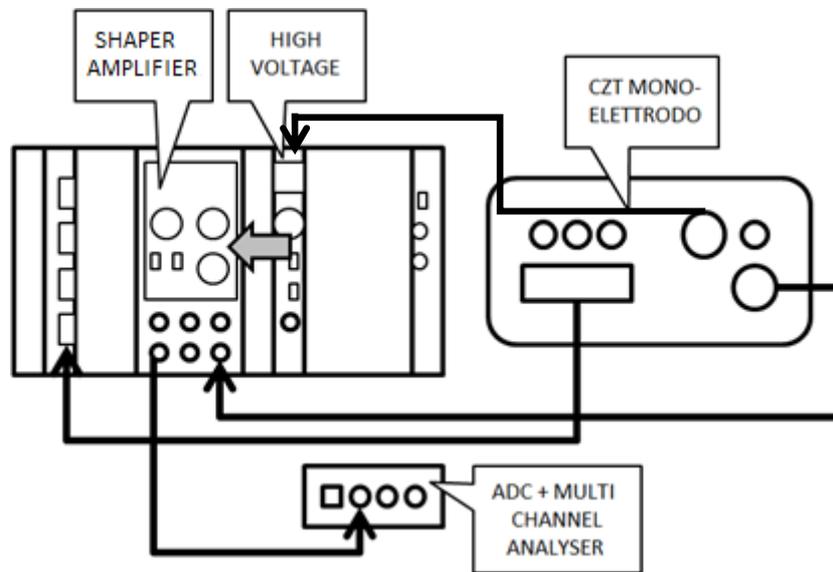


Il set up sperimentale per il rivelatore CZT monolettrodo prevede la seguente elettronica di lettura:

- **Charge Sensitive Preamplicifer (CSP):** dispositivo che consente la conversione dell'impulso di carica raccolto agli elettrodi all'interno del rivelatore in un segnale analogico

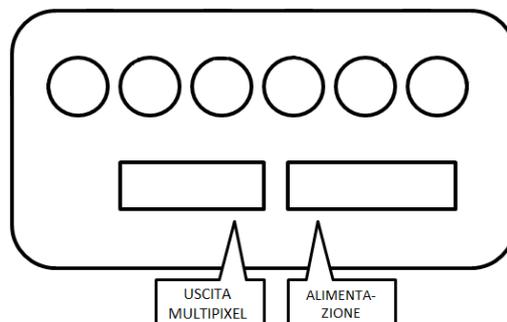
di tensione con guadagno generalmente unitario.

- **Shaper amplifier:** strumento che permette la formatura gaussiana e l'amplificazione del segnale di tensione.
- **High Voltage:** alimentazione necessaria al funzionamento del rivelatore.
- **Low Voltage (12V):** alimentazione necessaria per il funzionamento del CSP.
- **Analog Digital Converter:** converte il segnale da analogico in digitale.
- **Multi channel Analyzer:** software dedicato all'acquisizione, alla visualizzazione e all'analisi dello spettro energetico.



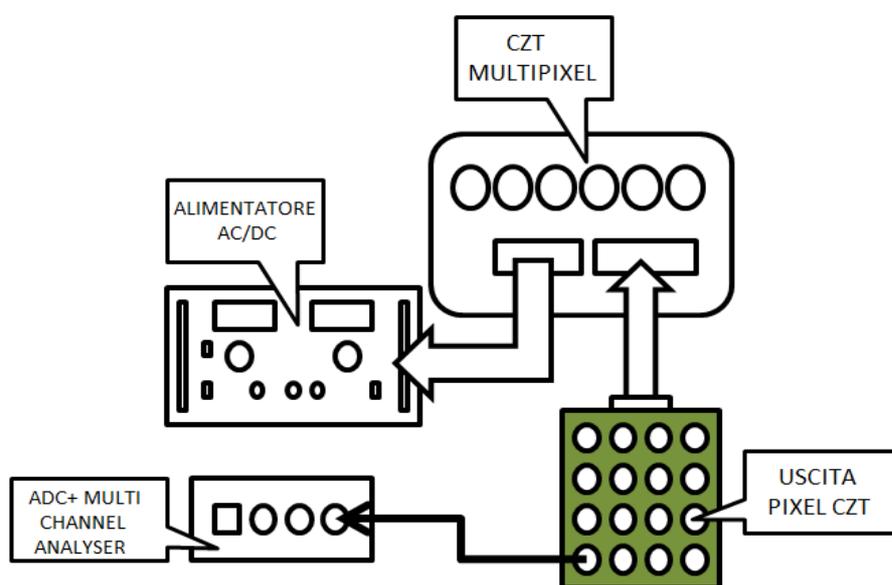
2.2 CZT multipixel

Le dimensioni del rivelatore multipixel sono 10 mmx10 mm di area, mentre lo spessore è 5 mm. Ogni pixel ha un'area di 2 mm x2 mm.



Il set up sperimentale per il rivelatore CZT multipixel prevede la seguente elettronica di lettura:

- **16 Charge sensitive preamplifier** (conversione dell'impulso di carica raccolto agli elettrodi all'interno del rivelatore in un segnale analogico) e **16 Shaper amplifier** (formatura gaussiana e l'amplificazione del segnale di tensione) racchiusi nell'**ASIC** (Circuito Integrato per Applicazioni Specifiche).
- **Analog Digital Converter**: converte il segnale da analogico in digitale.
- **Multi channel Analyzer**: software dedicato all'acquisizione, alla visualizzazione e all'analisi dello spettro energetico.



3 CALIBRAZIONE DEI RIVELATORI

Abbiamo calibrato i rivelatori seguendo la seguente procedura:

- Prima di tutto abbiamo acquisito gli spettri di alcune sorgenti radioattive di calibrazione (^{241}Am , ^{109}Cd , ^{57}Co).
- Successivamente, per ottenere la retta di calibrazione, abbiamo riportato in un grafico i centroidi dei fotopicchi di ogni sorgente:
 - 59.54 keV per l'Americio (^{241}Am)
 - 14 keV e 122 keV per il Cobalto (^{57}Co)
 - 22.1 keV e 88.04 keV per il Cadmio (^{109}Cd)
- Utilizzando la retta trovata abbiamo convertito i canali in energia.

3.1 CZT monolettrodo

L'amplificatore formatore ha i seguenti valori impostati:

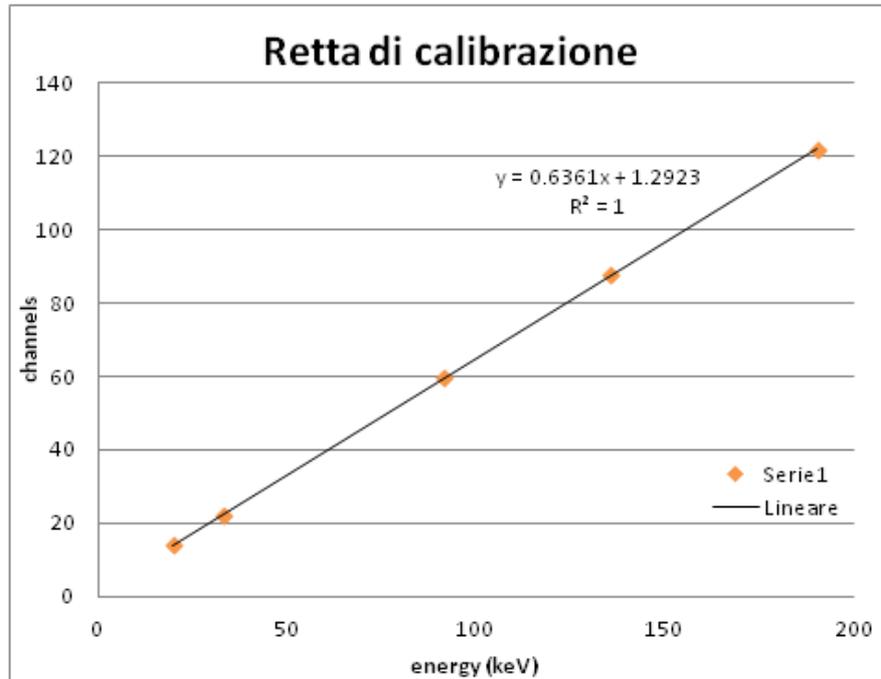
ISTITUTO DI ASTROFISICA SPAZIALE E FISICA COSMICA – BOLOGNA

Area della Ricerca di Bologna – via Piero Gobetti, 101 – 40129 Bologna – ITALY

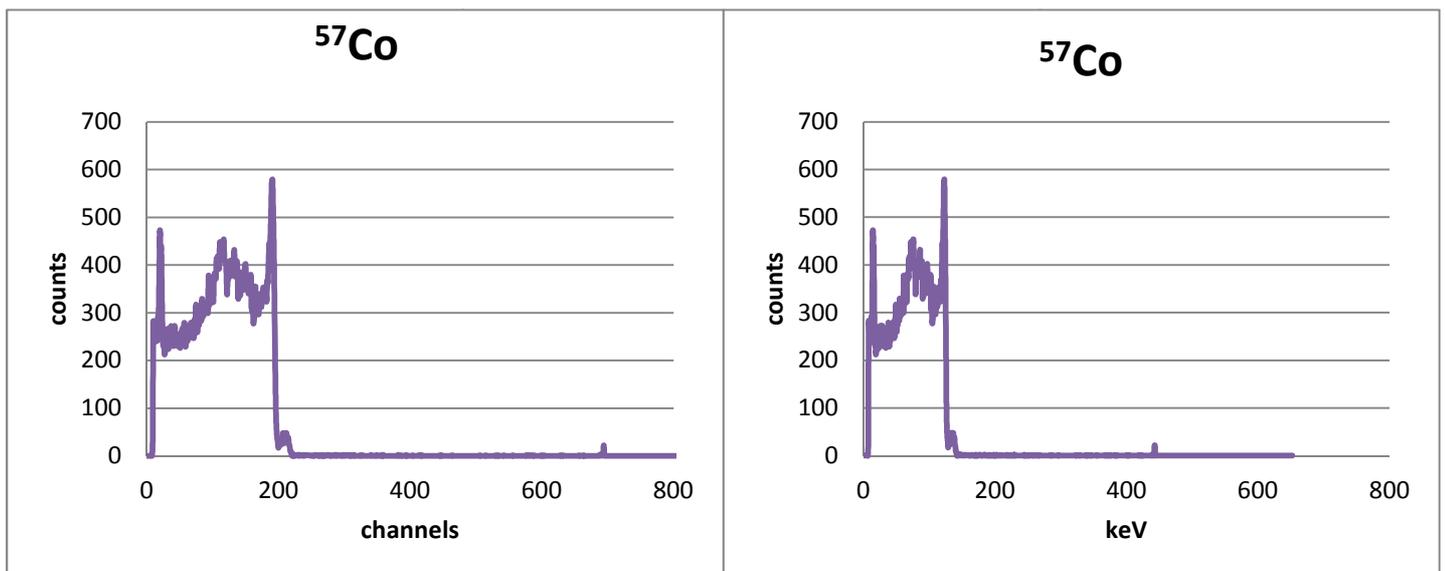
e-mail: segreteria@iasfbo.inaf.it – PEC: inafiasfbo@pcert.postecert.it – www.iasfbo.inaf.it

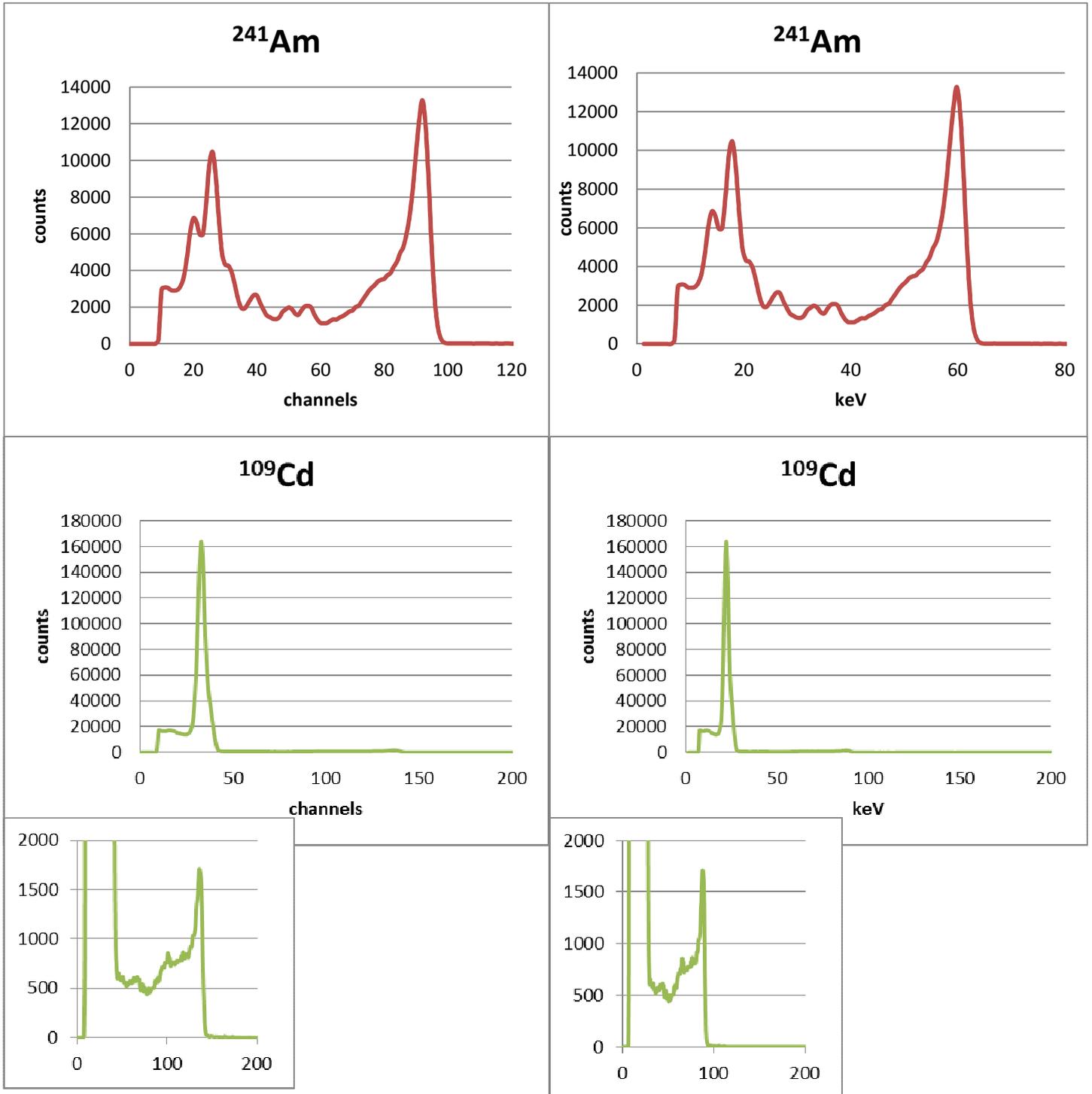
Tel. (+39) 051.6398688 – Fax (+39) 051.6398724 - Cod. Fisc. 97220210583 – Part. Iva 06895721006

- Guadagno: 200
- Shaping time: 1 μ s



Il grafico riporta i punti sperimentali in arancione mentre la linea continua rappresenta il fit lineare dei dati. Nella figura seguente sono riportati gli spettri in canali a sinistra e in energia a destra:



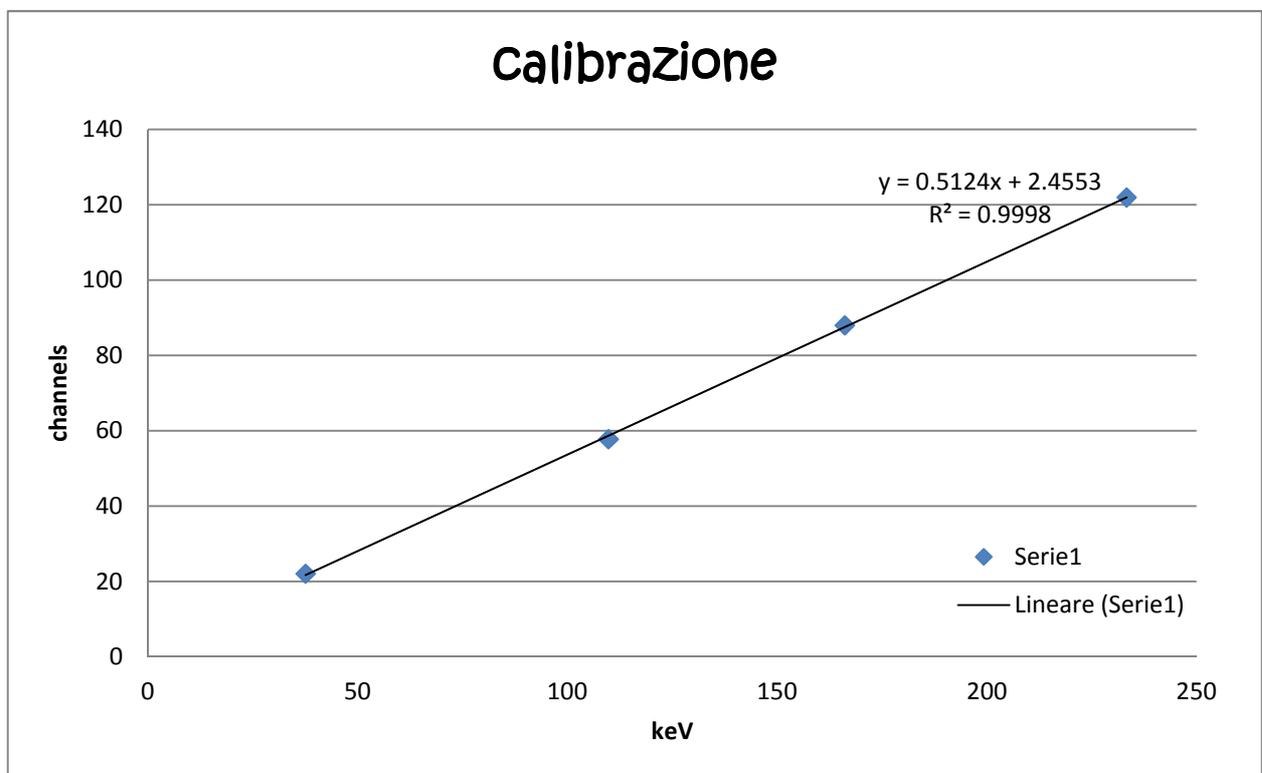


3.2 CZT multipixel

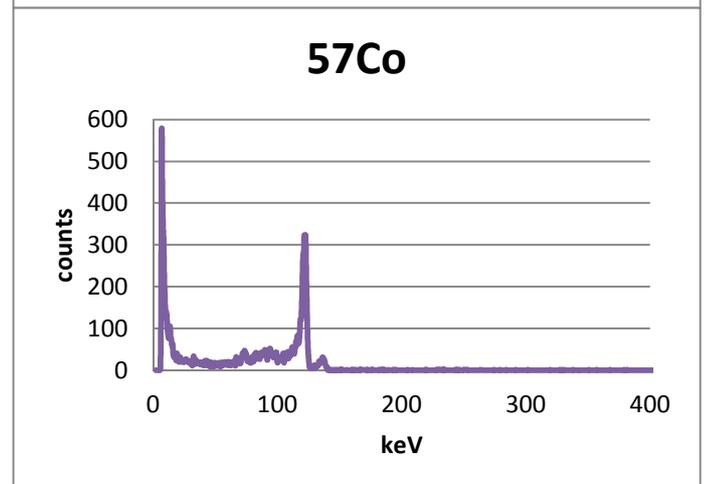
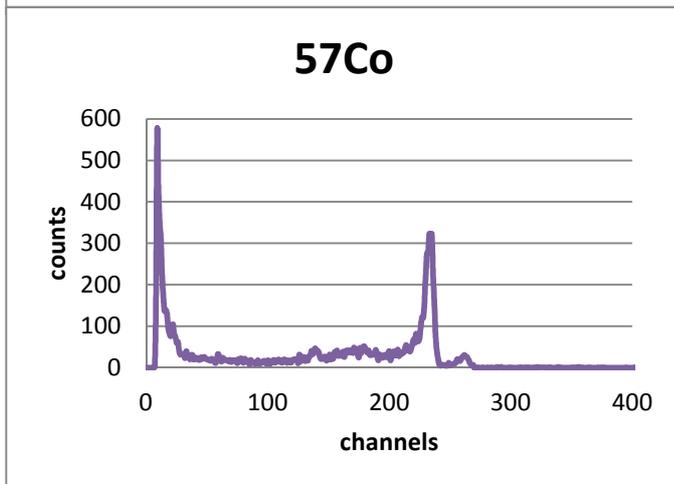
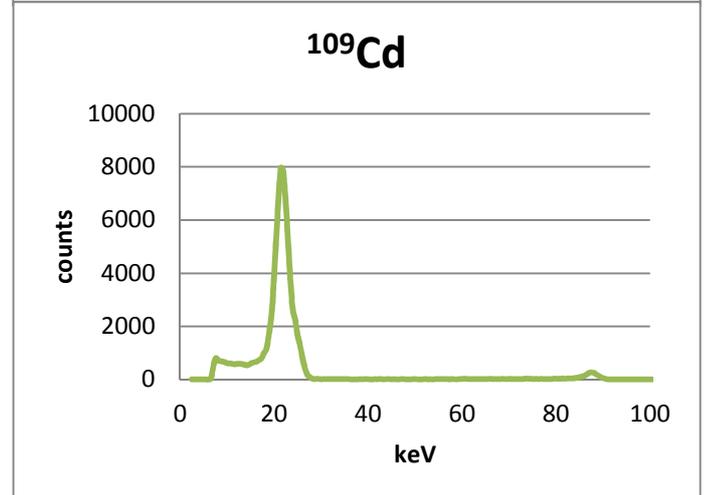
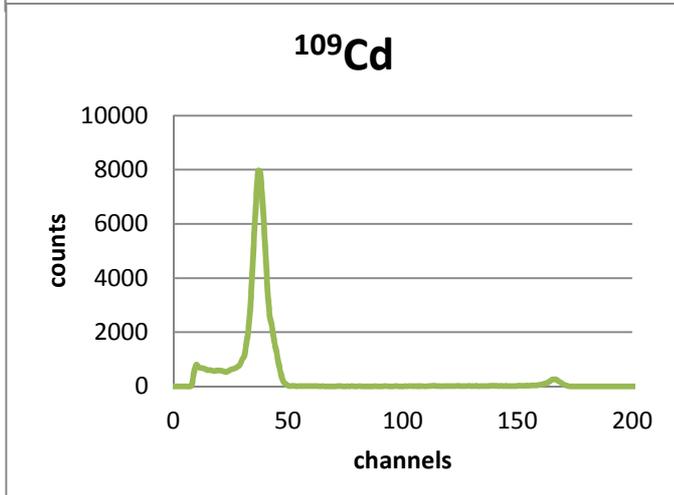
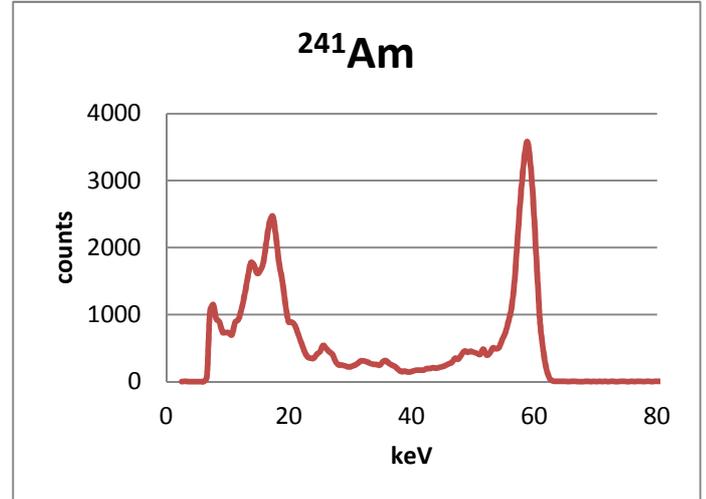
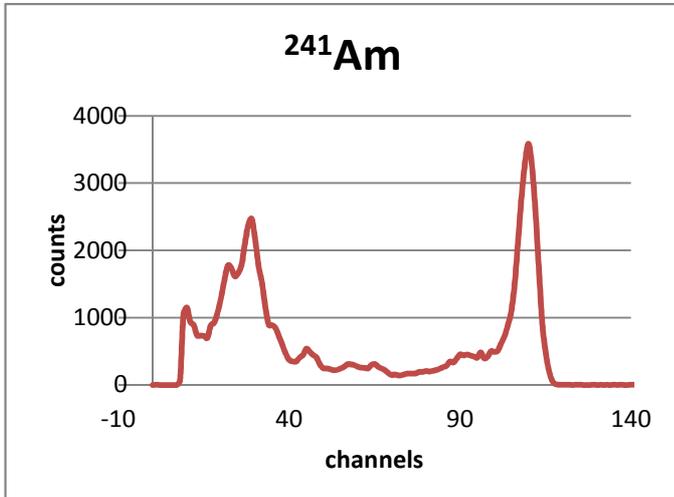
L'amplificatore formatore ha i seguenti valori impostati:

- Guadagno: 200 mV/fC
- Peaking time: 1,2 μ s

Il grafico riporta i punti sperimentali in blu mentre la linea continua rappresenta il fit lineare dei dati.



Nelle figure seguenti sono riportati gli spettri in canali a sinistra e in energia a destra.





4 VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI DEI RIVELATORI

La risoluzione energetica è data dalla seguente formula:

$$R (\%) = \frac{FWHM}{Centroid} (\%)$$

Di seguito sono riportati i valori della risoluzione energetica che abbiamo calcolato per i due rivelatori testati a diverse energie:

rivelatore	isotopo	FWHM	centoide	R (%)
CZT monolettrodo	Am241 (59.54 keV)	3.05	91.47	3.33
	Co57 (122 keV)	4.13	190.19	2.17
	Cd109 (88 keV)	2.96	100.23	2.95
CZT multipixel	Am241 (59.54 keV)	3.29	109.79	3.00
	Co57 (122 keV)	3.73	233.30	1.60
	Cd109 (88 keV)	3.11	166.11	1.87

5 VALUTAZIONE DEI PARAMETRI OPERATIVI DEL CZT MONOELETTRODO

Abbiamo determinato i parametri operativi del sensore mono-elettrodo:

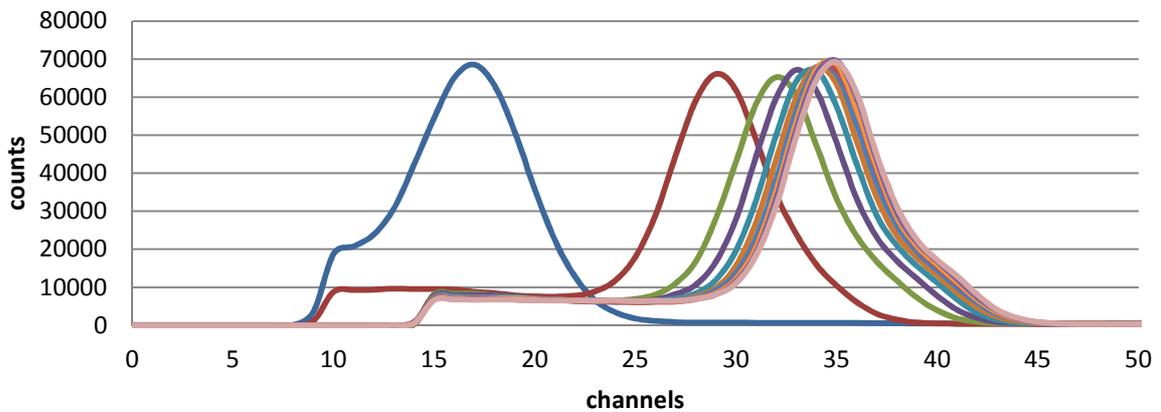
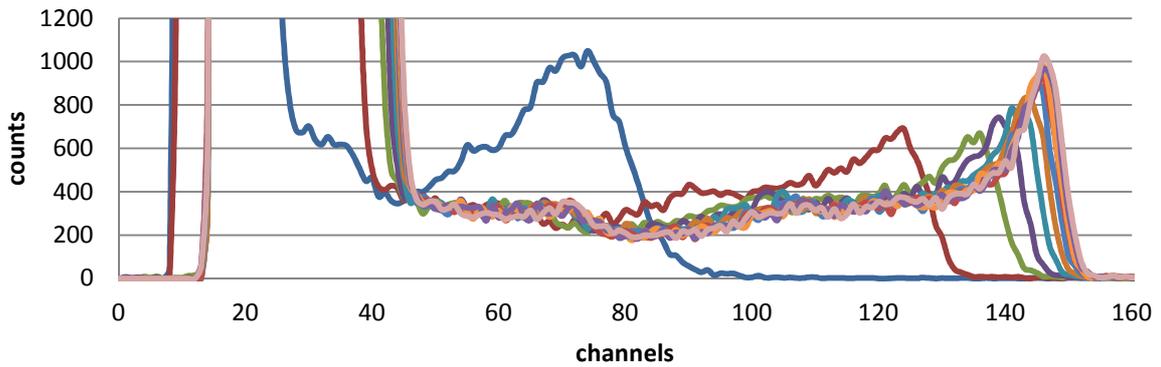
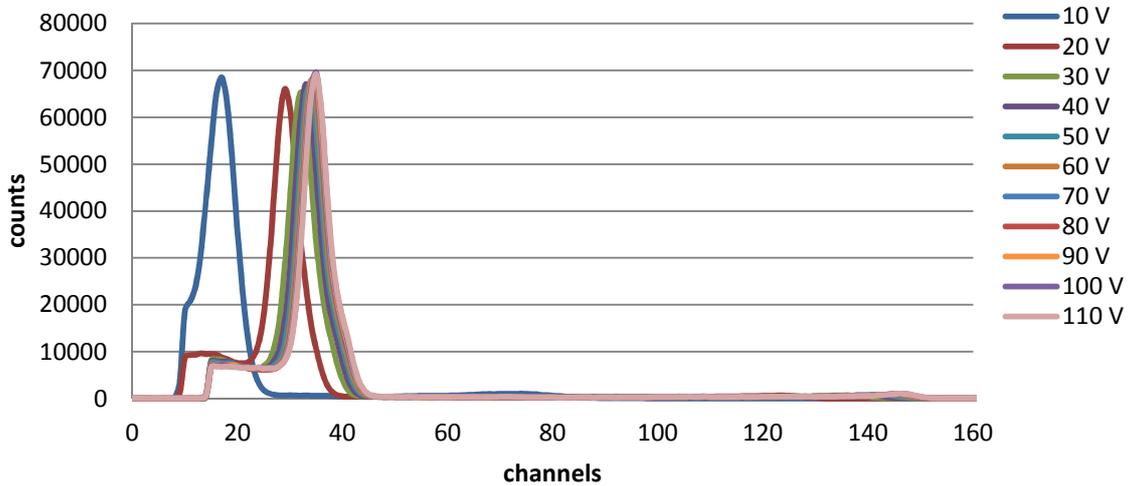
- **Tensione di polarizzazione**

La procedura utilizzata consisteva nell'aumentare la tensione a partire da 10 V fino a 110 V, con step di 10 Volt. Lo shaping time impiegato è stato di 2 μ s.

Per ogni misura abbiamo acquisito lo spettro di Cadmio con un live time di 300 secondi ed analizzato lo spettro, ricavando il centroide e il Full Width Half Maximum (FWHM) a 22 keV e 88 keV.



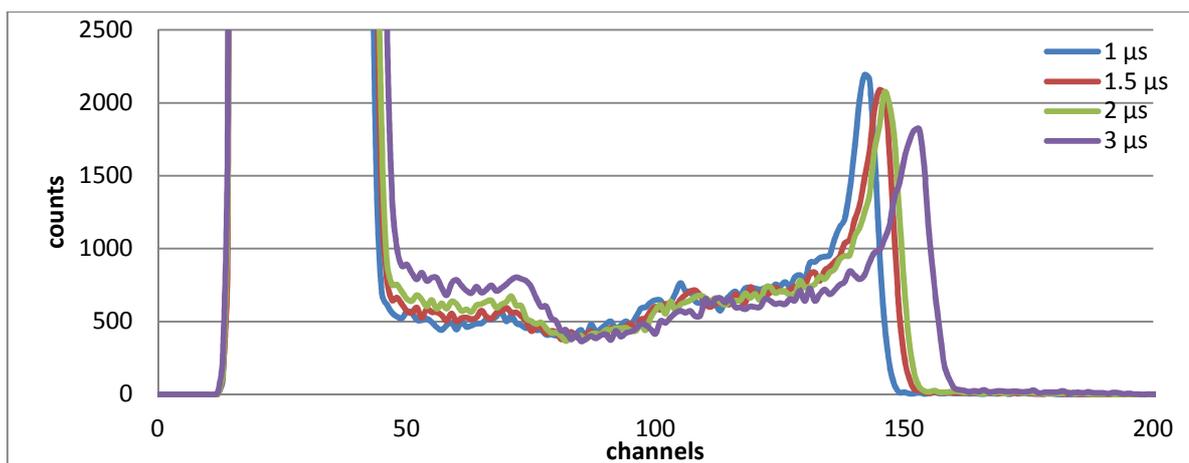
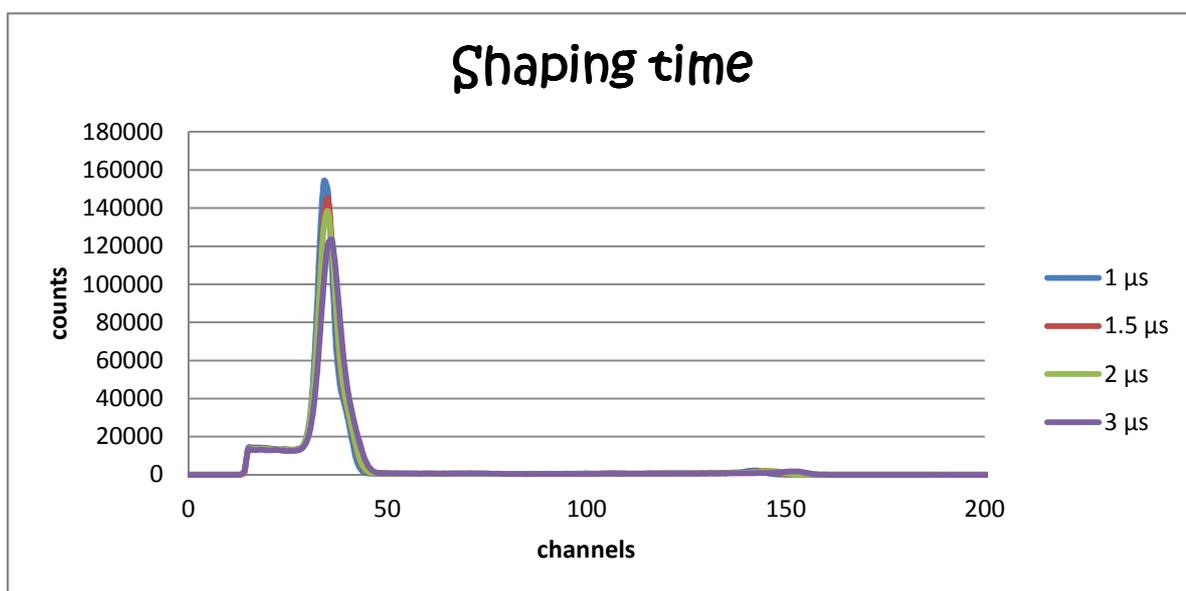
tensione di polarizzazione



Dall'analisi dei dati abbiamo ottenuto che il valore per cui si ha l'efficienza di raccolta di carica massima è 90V. Dopo tale valore la CCE (charge collection efficiency) resta stabile.

- **Shaping time (tempo di formatura)**

Una volta determinato il valore operativo della tensione di polarizzazione, lo abbiamo fissato e modificato lo shaping time da 1 μs a 3 μs , con l'obiettivo di determinarne il valore ottimale per cui la risoluzione energetica è minore.



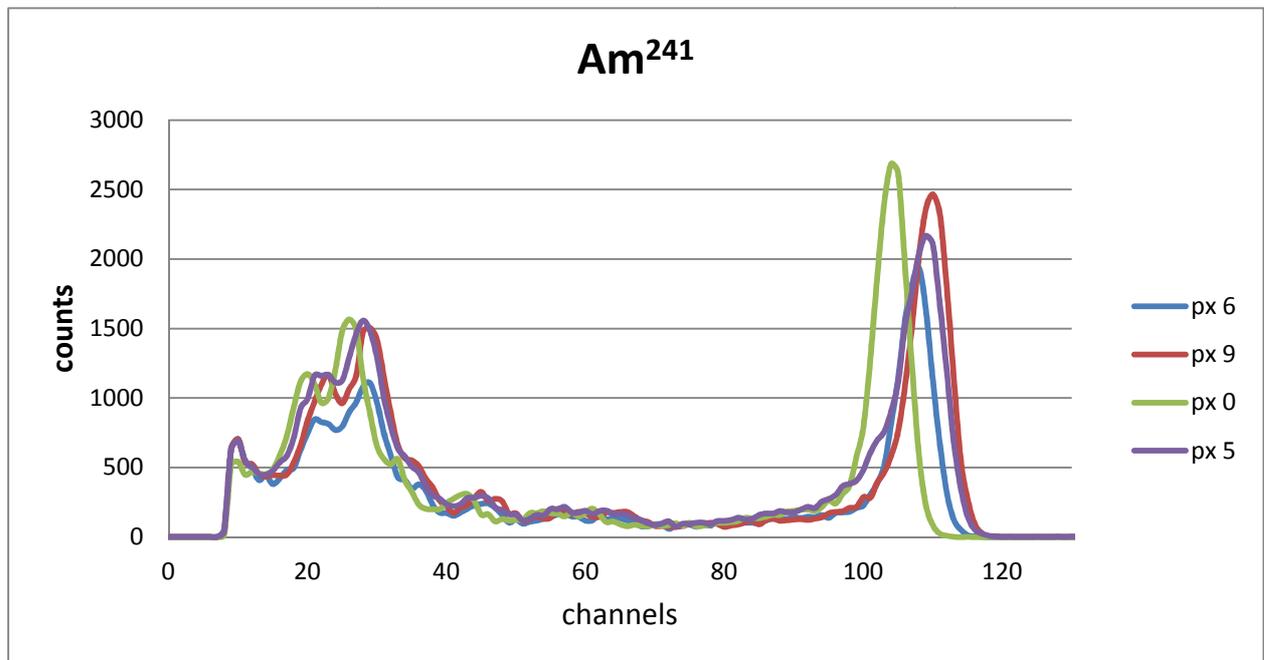
Dall'analisi dei dati abbiamo ottenuto che il valore per cui la risoluzione energetica è migliore mantenendo elevato il valore della CCE è di 2 μs .

6 STUDIO DELL'UNIFORMITA' DI RISPOSTA DI UN RIVELATORE DI CZT SENSIBILE ALLA POSIZIONE (MULTIPIXEL)

Abbiamo acquisito lo spettro energetico dell'Americio di alcuni pixel (0,5,6,9). Il tempo di acquisizione è di 600 secondi.

Abbiamo confrontato gli spettri riportati nel grafico seguente.

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



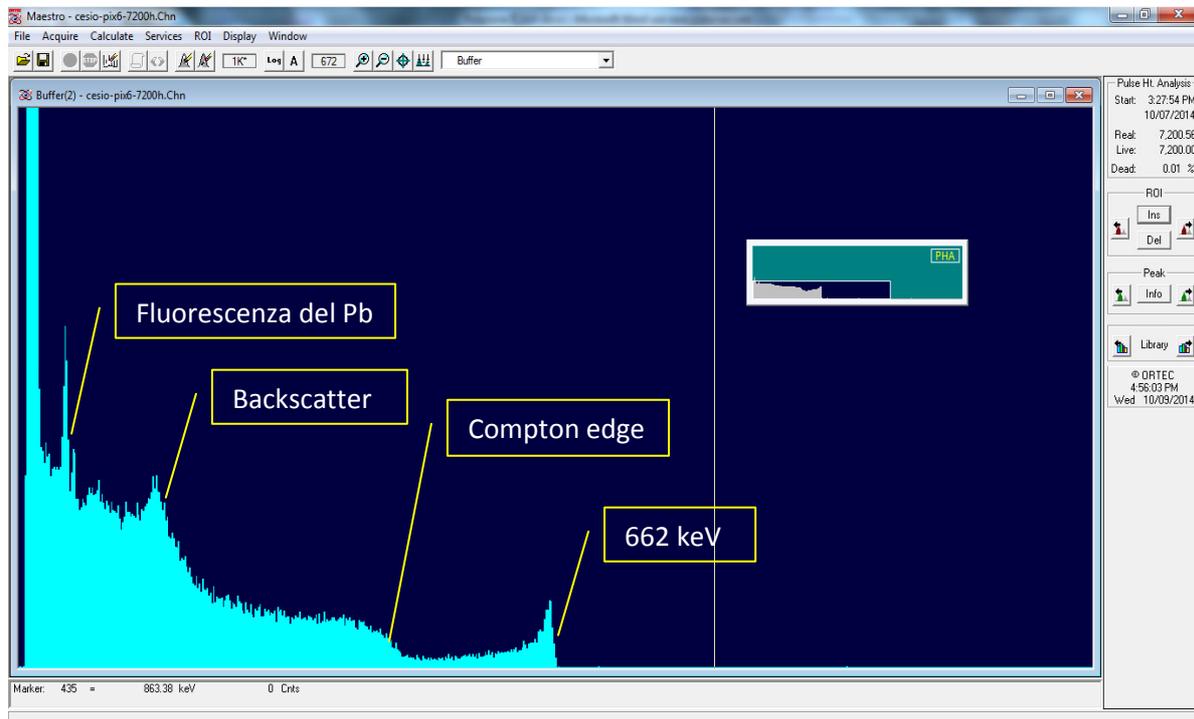
Pixel	Qualità del pixel
0	😊
5	😞
6	😐
9	😊

7 ANALISI DELLO SPETTRO AD ALTA ENERGIA

Abbiamo acquisito uno spettro di Cesio (^{137}Cs) con il pixel 6 di un secondo rivelatore sensibile alla posizione (PSD) composto da 4 pixel a nostra disposizione.

Abbiamo dovuto diminuire il guadagno da 200 mV/fC a 50 mV/fC per poter registrare l'energia a 662 keV, lasciando invariato il peaking time.

Nel grafico riportato di seguito sono state individuate tutte le caratteristiche dello spettro.



8 CALCOLO TEORICO DELL'EFFICIENZA DI RIVELAZIONE A DIVERSE ENERGIE

Abbiamo calcolato l'efficienza teorica di rivelazione alle energie di interesse sia per il mono elettrodo che per il multipixel.

La probabilità che un fotone gamma incidente depositi la sua energia nel rivelatore è pari a:

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

dove:

μ = coefficiente di attenuazione totale

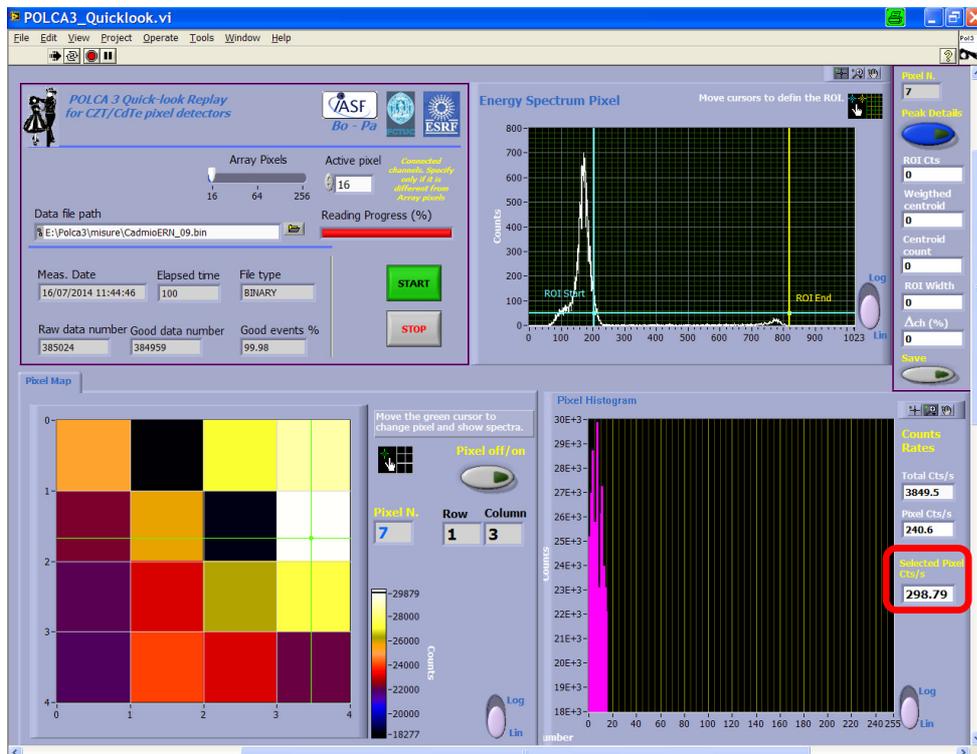
x = spessore del rivelatore.

Energia (keV)	Efficienza (%) Monolettrodo Spessore = 2 mm	Efficienza (%) Multipixel Spessore = 5 mm
60	99.97	100.00
90	93.51	99.89
120	72.80	96.14

9 ACQUISIZIONE DELLE IMMAGINI CON IL RIVELATORE SENSIBILE ALLA POSIZIONE (PSD)

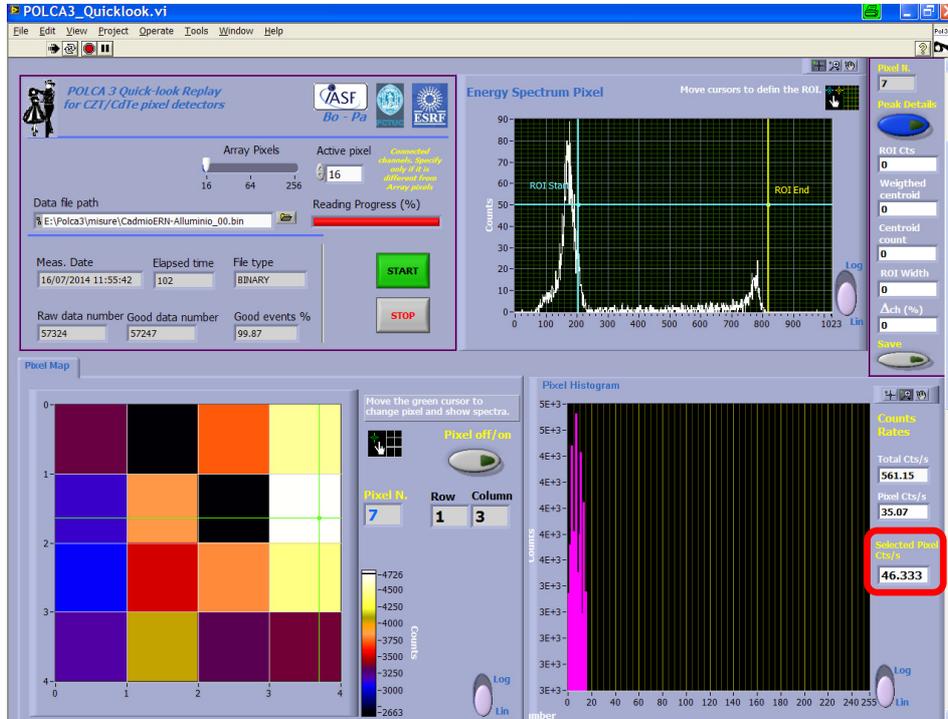
Abbiamo sostituito la catena elettronica standard del multipixel con un'elettronica custom che permette di acquisire in coincidenza i segnali dei 16 pixel. La finestra temporale entro la quale i segnali sono acquisiti in coincidenza è 1 μ s.

Di seguito riportiamo l'immagine acquisita con tutti i pixel irraggiando il rivelatore con ^{109}Cd . Tale immagine è visibile nel pannello in fondo a sinistra, dove i colori indicano i livelli di conteggio acquisiti. I cursori indicano il pixel n. 7 di cui si osserva lo spettro in alto a destra. Infine il pannello in alto a sinistra riporta la data della misura, il tempo d'acquisizione, il nome ed il tipo di file.

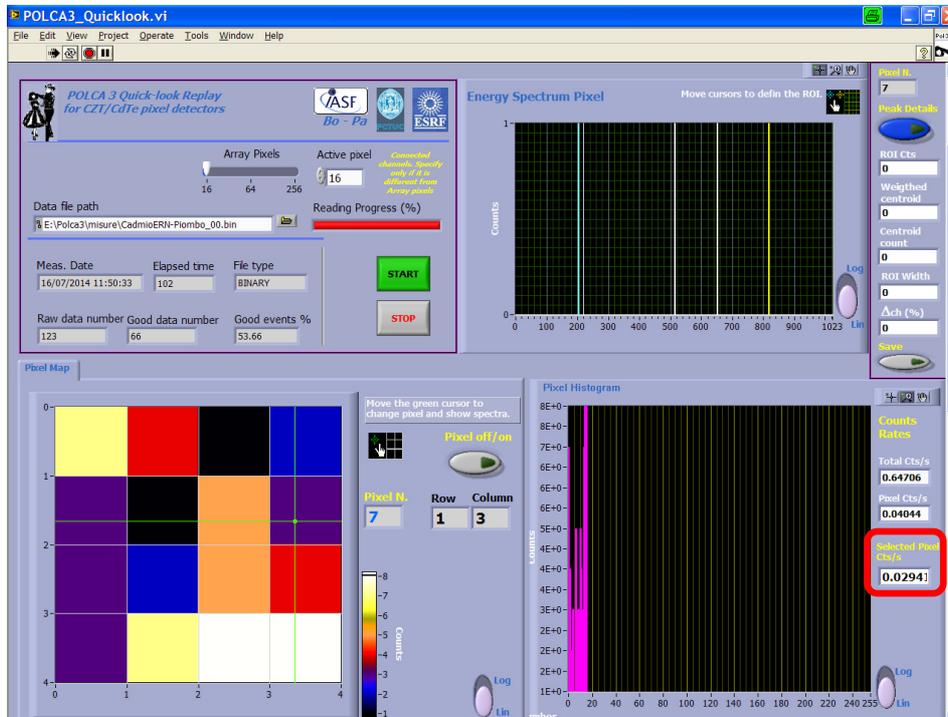


Abbiamo poi posto tra la sorgente e il rivelatore prima un assorbitore di alluminio e poi uno di piombo, con l'obiettivo di verificare l'attenuazione di materiali con differenti numeri atomici.

- Cadmio con assorbitore di alluminio (Z=13)



- Cadmio con assorbitore di piombo (Z=82)

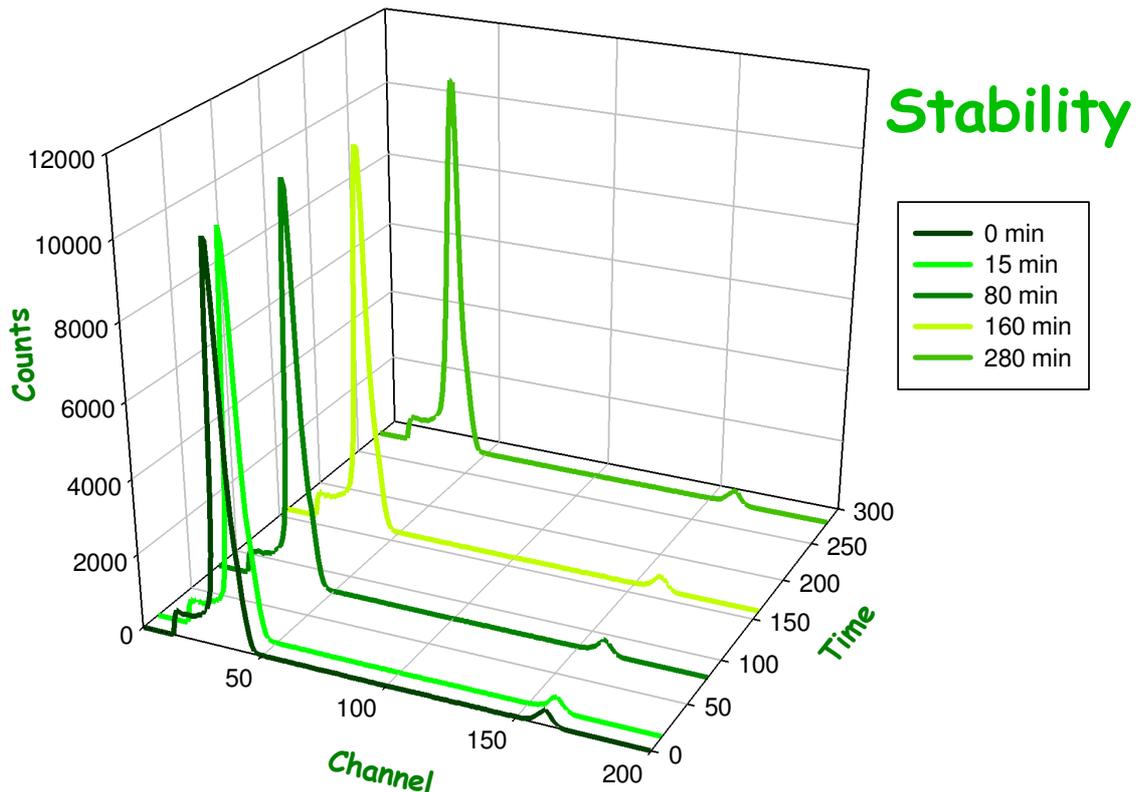




Dall'osservazione delle immagini e degli spettri possiamo notare come il piombo riesca ad attenuare maggiormente la radiazione incidente del cadmio rispetto all'alluminio, il quale attenua rispetto alla misura acquisita senza nessun assorbitore interposto tra la sorgente e il rivelatore, come possiamo notare dai conteggi/secondo, evidenziati in rosso, misurati dal pixel 7 di riferimento.

10 STUDIO DELLA STABILITA' DEL SISTEMA DI RIVELAZIONE MULTIPIXEL

Abbiamo acquisito gli spettri di ^{109}Cd di uno dei pixel del PSD per verificare la stabilità nel tempo del sistema di rivelazione in un campo costante di radiazione.



Possiamo concludere che il sistema di rivelazione è stabile.



11 CONCLUSIONI

In questo rapporto abbiamo presentato i risultati dello studio e della caratterizzazione di un rivelatore monolettrodo e di un multipixel dell'eV-products a 16 canali, entrambi di CdZnTe.

Abbiamo acquisito gli spettri energetici delle sorgenti radioattive di ^{241}Am , ^{109}Cd , e ^{57}Co con entrambi i rivelatori per effettuare la calibrazione in energia e calcolato la risoluzione energetica in percentuale a 59.54 keV, 88 keV e 122 keV per poter valutare le prestazioni dei due rivelatori.

La tensione operativa e lo *shaping time* dell'amplificatore formatore del rivelatore monolettrodo sono 90V e 2 microsecondi.

Per quanto riguarda il rivelatore multipixel **PSD** abbiamo effettuato:

- lo studio della risposta spettroscopica di alcuni pixel;
- l'acquisizione dell'immagine ottenuta irraggiando il rivelatore con la sorgente di ^{109}Cd ;
- verificato la maggiore attenuazione del Piombo che ha numero atomico 82 rispetto all'Alluminio che ha un numero atomico inferiore (13);
- verificato la stabilità del sistema di rivelazione in funzione del tempo.

Abbiamo, inoltre, calcolato l'efficienza di rivelazione teorica dei due rivelatori, che dipende dall'energia, dal materiale e dal suo spessore, e accertato che il rivelatore PSD è più efficiente a parità di energia perché più spesso, 5 mm, rispetto al monolettrodo dello stesso materiale (CZT), il cui spessore è 2 mm.

12 REFERENZE

- [1] Knoll, Radiation detection and measurement, J.Wiley & S (1989).
- [2] "The ISGRI CdTe gamma camera *In-flight behavior*", François Lebrun, (2004), arxiv.org/pdf/astro-ph/041141.
- [3] "ISGRI: the INTEGRAL Soft Gamma-Ray Imager", F. Lebrun, (2003), *Astronomy & Astrophysics* manuscript no. INTEGRAL62.
- [4] "The Burst Alert Telescope (BAT) on the *Swift* MIDEX mission", Scott D. Barthelmy, (2005), arxiv.org/pdf/astro-ph/0507410.

Si ringraziano l'Istituto IASF Bologna per aver reso disponibili i laboratori, Ezio Caroli, Angelo Basili e Filomena Schiavone per il supporto durante lo svolgimento dell'esperienza e l'Area di Ricerca del CNR di Bologna per l'organizzazione dell'iniziativa.

ISTITUTO DI ASTROFISICA SPAZIALE E FISICA COSMICA – BOLOGNA

Area della Ricerca di Bologna – via Piero Gobetti, 101 – 40129 Bologna – ITALY

e-mail: segreteria@iasfbo.inaf.it – PEC: inafiasfbo@pcert.postecert.it – www.iasfbo.inaf.it

Tel. (+39) 051.6398688 – Fax (+39) 051.6398724 - Cod. Fisc. 97220210583 – Part. Iva 06895721006