
Sviluppo di Rivelatori CZT per astrofisica delle alte energie

Tesi svolta presso INAF - IASF Milano

Serena Monti

Astronomia nella banda energetica 10-500 keV

La banda energetica compresa fra 10 e 500 keV è particolarmente interessante perché tocca questioni aperte riguardanti per esempio lo studio di:

- Lampi di luce gamma;
- Formazione ed evoluzione di buchi neri;
- Accelerazione di raggi cosmici.

Le osservazioni in questa banda sono problematiche perché fotoni così energetici tendono ad attraversare la materia.

Recentemente sono state sviluppate nuove ottiche focalizzanti che permettono di migliorare la risoluzione angolare.

I rivelatori accoppiati a queste ottiche devono avere buona risoluzione energetica per uno studio dettagliato delle righe.

In questa banda energetica i rivelatori CZT sono quelli che garantiscono la **migliore risoluzione energetica a temperatura ambiente**.

Caratteristiche dei cristalli di CdZnTe

- Grande numero atomico e elevata densità che garantiscono buon potere d'arresto
- Variazioni lineari in funzione di temperatura e polarizzazione
- Buona risoluzione energetica anche a temperatura ambiente
- Buona risoluzione spaziale in 3D
- Facilità di lavorazione, basso costo

Formazione del segnale

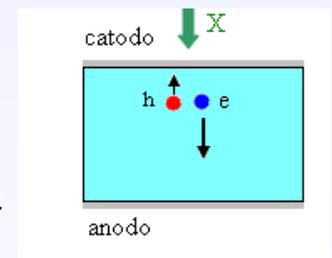
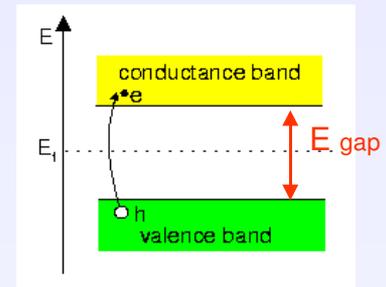
Il CdZnTe o CZT è un cristallo semiconduttore

Il fotone interagente eccita alcuni elettroni facendoli passare dalla banda di valenza a quella di conduzione formando coppie elettrone - lacuna

I portatori di carica si muovono verso gli elettrodi a causa della differenza di potenziale applicata

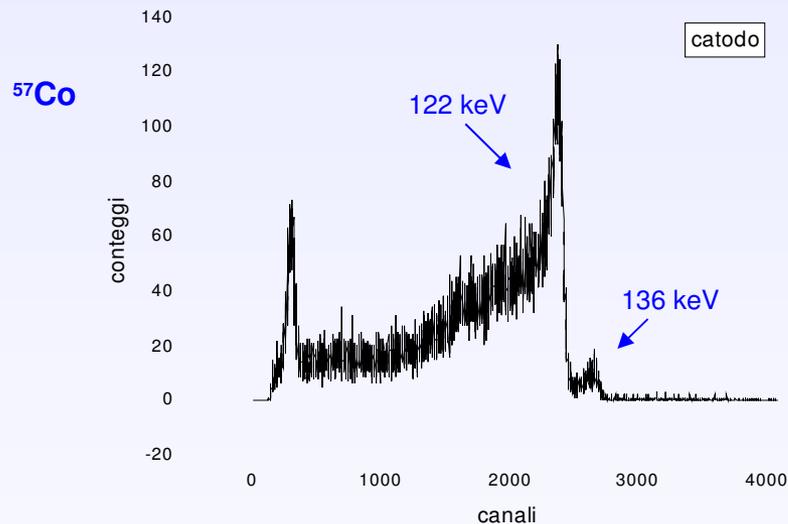
Queste cariche libere in movimento all'interno del cristallo inducono una carica superficiale sugli elettrodi

La carica indotta, integrata da preamplificatori di carica, produce il segnale



Effetto tailing

- Le lacune vengono facilmente intrappolate nel cristallo
- L'impulso generato ha ampiezza variabile in funzione della profondità dell'interazione
- Parte dei segnali sono interpretati come fotoni di energia inferiore a quella rilasciata
- Il fotopicco presenta un tipico allargamento a sinistra, detto effetto tailing, che deteriora la risoluzione energetica



Per ovviare all'effetto tailing è necessario correggere l'ampiezza dei segnali in funzione della profondità di interazione

Ottimizzazione di un prototipo di rivelatore

1. Caratterizzazione di un prototipo basato su cristalli CZT di dimensioni $11 \times 11 \times 5 \text{ mm}^3$ con anodo a 16 pixel e catodo ad elemento singolo
1. Sviluppo di un modello analitico della formazione del segnale all'interno del rivelatore
1. Analisi dei segnali e correzione dell'ampiezza in funzione della profondità di interazione
1. Caratterizzazione di un'elettronica di lettura del segnale dedicata e analisi del fenomeno di cross-talk

Ottimizzazione di un prototipo di rivelatore

1. Caratterizzazione di un prototipo basato su cristalli CZT di dimensioni $11 \times 11 \times 5 \text{ mm}^3$ con anodo a 16 pixel e catodo ad elemento singolo
1. Sviluppo di un modello analitico della formazione del segnale all'interno del rivelatore
1. Analisi dei segnali e correzione dell'ampiezza in funzione della profondità di interazione
1. Caratterizzazione di un'elettronica di lettura del segnale dedicata e analisi del fenomeno di cross-talk

Caratterizzazione dei cristalli

- Misure di corrente di fuga e calcolo della resistività $\rho = \frac{RS}{l}$

Rivelatore	$\rho_{\text{pixel}} (\Omega \cdot \text{cm})$	$\rho_{\text{ring}} (\Omega \cdot \text{cm})$
Cristallo 3	$(3.91 \pm 0.01) \cdot 10^{10}$	$(2.30 \pm 0.01) \cdot 10^{10}$
Cristallo 2	$(2.32 \pm 0.04) \cdot 10^{11}$	$(1.17 \pm 0.02) \cdot 10^{11}$
Cristallo 1	$(1.70 \pm 0.02) \cdot 10^{11}$	$(4.35 \pm 0.01) \cdot 10^{11}$

- Acquisizione tramite multicanale di spettri da sorgenti note e valutazione della FWHM

Energia picco (keV)	FWHM %
60	10
122	5
356	3

Ottimizzazione di un prototipo di rivelatore

1. Caratterizzazione di un prototipo basato su cristalli CZT di dimensioni $11 \times 11 \times 5 \text{ mm}^3$ con anodo a 16 pixel e catodo ad elemento singolo
- 1. Sviluppo di un modello analitico della formazione del segnale all'interno del rivelatore**
1. Analisi dei segnali e correzione dell'ampiezza in funzione della profondità di interazione
1. Caratterizzazione di un'elettronica di lettura del segnale dedicata e analisi del fenomeno di cross-talk

Modello analitico: Teorema di Schockley-Ramo

La corrente indotta sugli elettrodi è

$$i(t) = q \cdot v \cdot F_w^u$$

dove

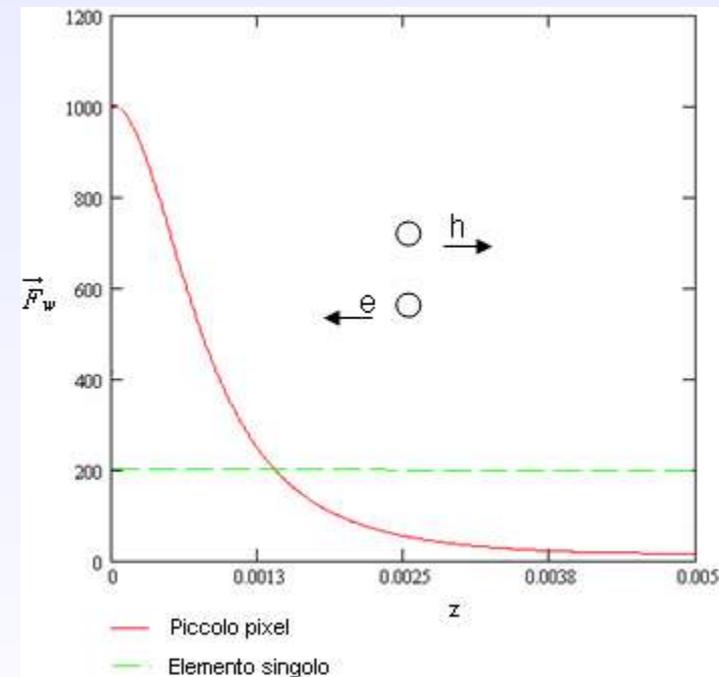
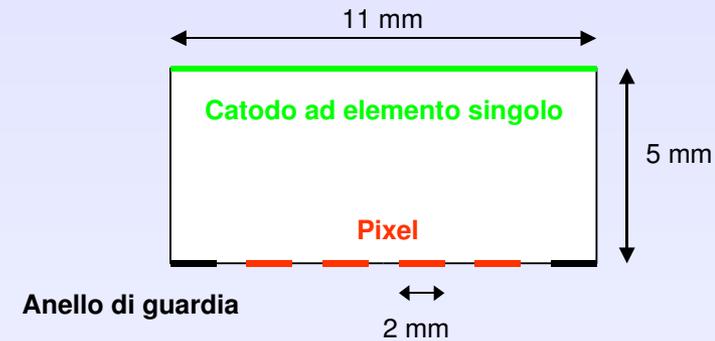
q = carica del portatore

v = velocità del portatore

F_w^u = “weighting field”

F_w^u è il campo generato alla distanza $z(t)$ dall'elettrodo applicando le seguenti condizioni al contorno:

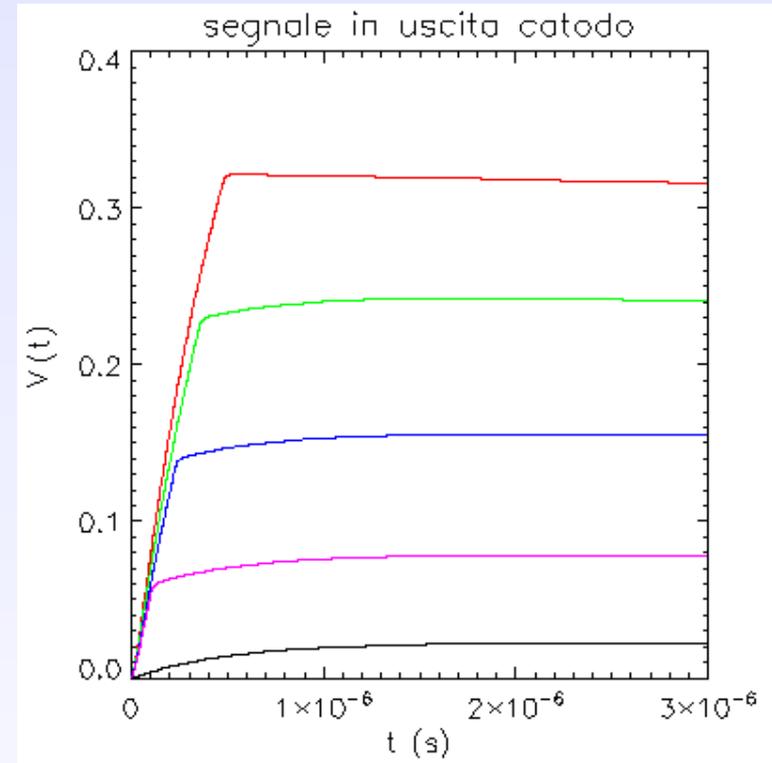
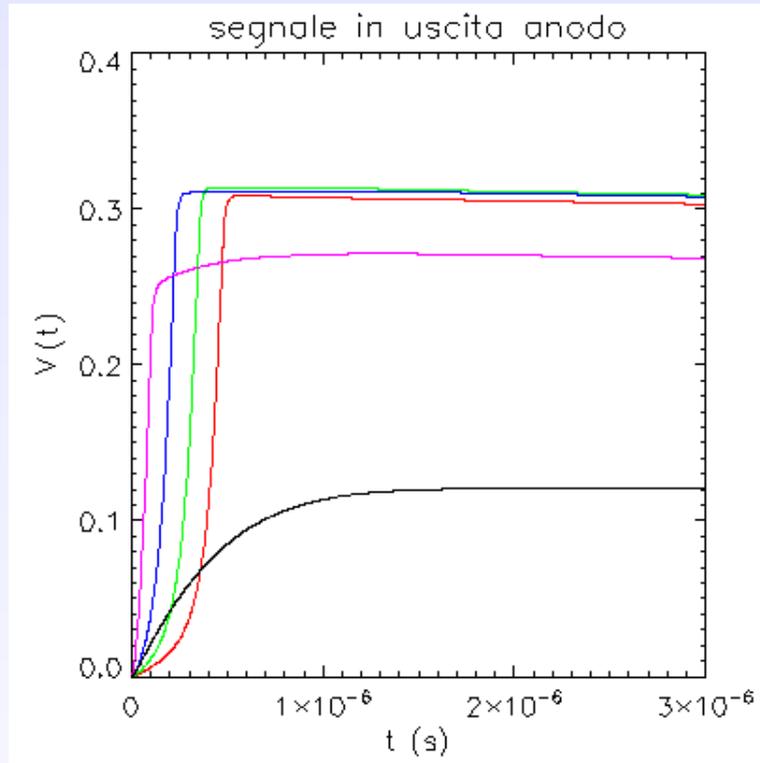
- e) il potenziale dell'elettrodo in considerazione è posto uguale ad uno
- g) il potenziale su tutti gli altri elettrodi è posto uguale a zero
- i) le cariche statiche intrappolate all'interno del rivelatore non vengono considerate



Modello analitico: segnale in uscita

Il segnale in uscita è dato da

$$V(t) = i(t) \otimes H(t)$$



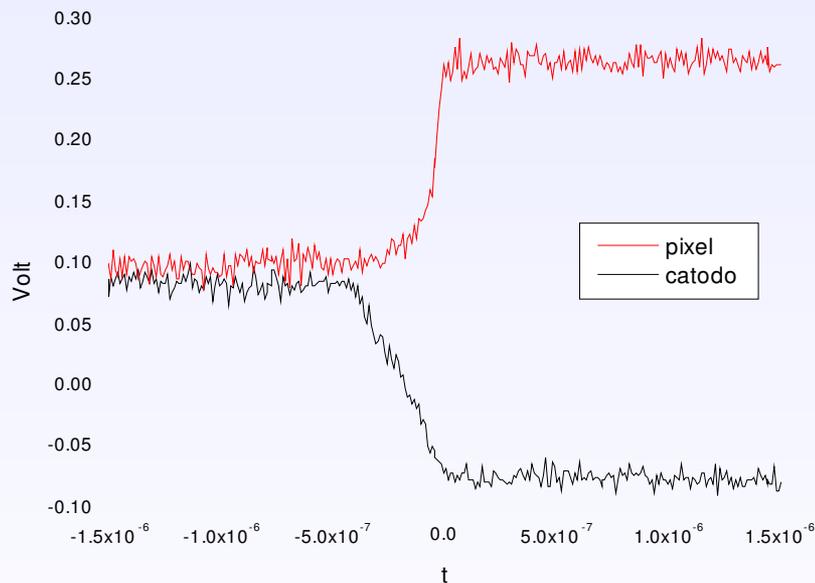
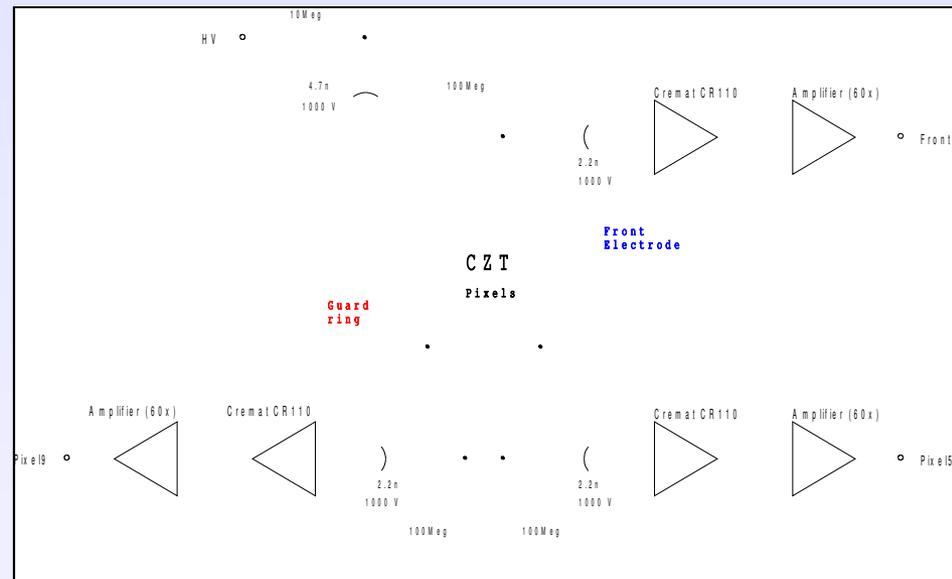
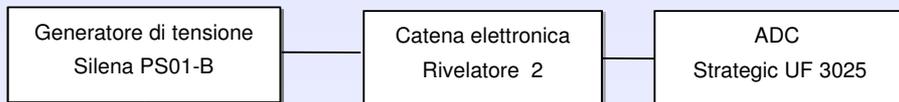
Il modello ci ha permesso di:

- Analizzare la variazione della forma del segnale al variare della profondità di interazione
- Scegliere i parametri da utilizzare come estimatori della profondità di interazione

Ottimizzazione di un prototipo di rivelatore

1. Caratterizzazione di un prototipo basato su cristalli CZT di dimensioni $11 \times 11 \times 5 \text{ mm}^3$ con anodo a 16 pixel e catodo ad elemento singolo
1. Sviluppo di un modello analitico della formazione del segnale all'interno del rivelatore
1. Analisi dei segnali e correzione dell'ampiezza in funzione della profondità di interazione
1. Caratterizzazione di un'elettronica di lettura del segnale dedicata e analisi del fenomeno di cross-talk

Acquisizione forme d'onda: set up sperimentale



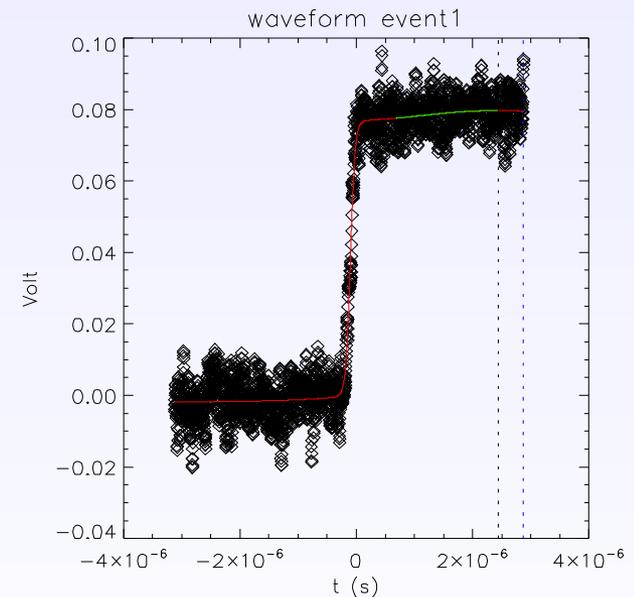
L'ADC digitalizza il segnale campionandolo ogni 10ns

Correzione dell'ampiezza

1. Scelta dei parametri da utilizzare
 - Tempo di salita
 - Ampiezza catodo/Ampiezza anodo

1. Fit della curva con una funzione analitica in grado di riprodurre esattamente il fronte di salita

1. Calcolo dell'ampiezza del segnale e del tempo di salita sul miglior fit della curva (ricampionato a 0.5 ns)

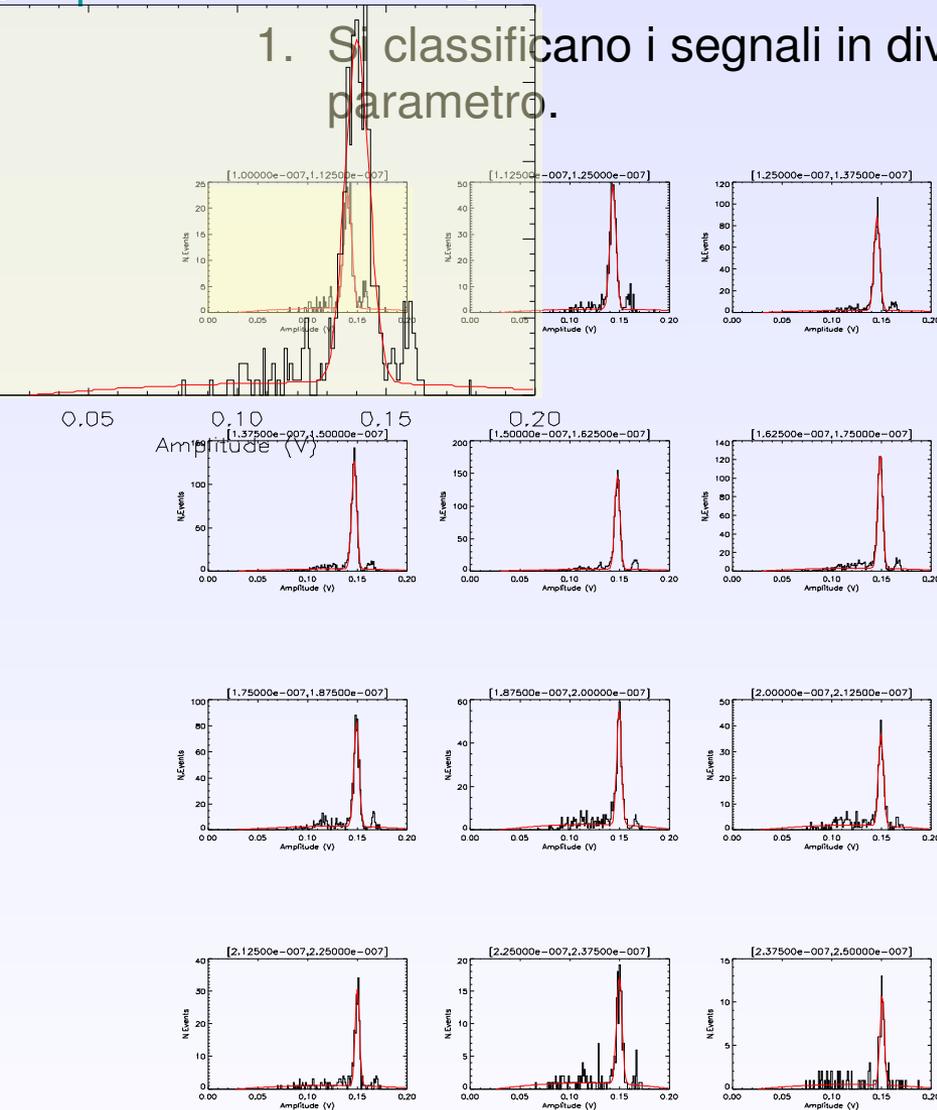


Tempo di salita

Correzione dell'ampiezza

[1.00000e-007, 1.12500e-007]

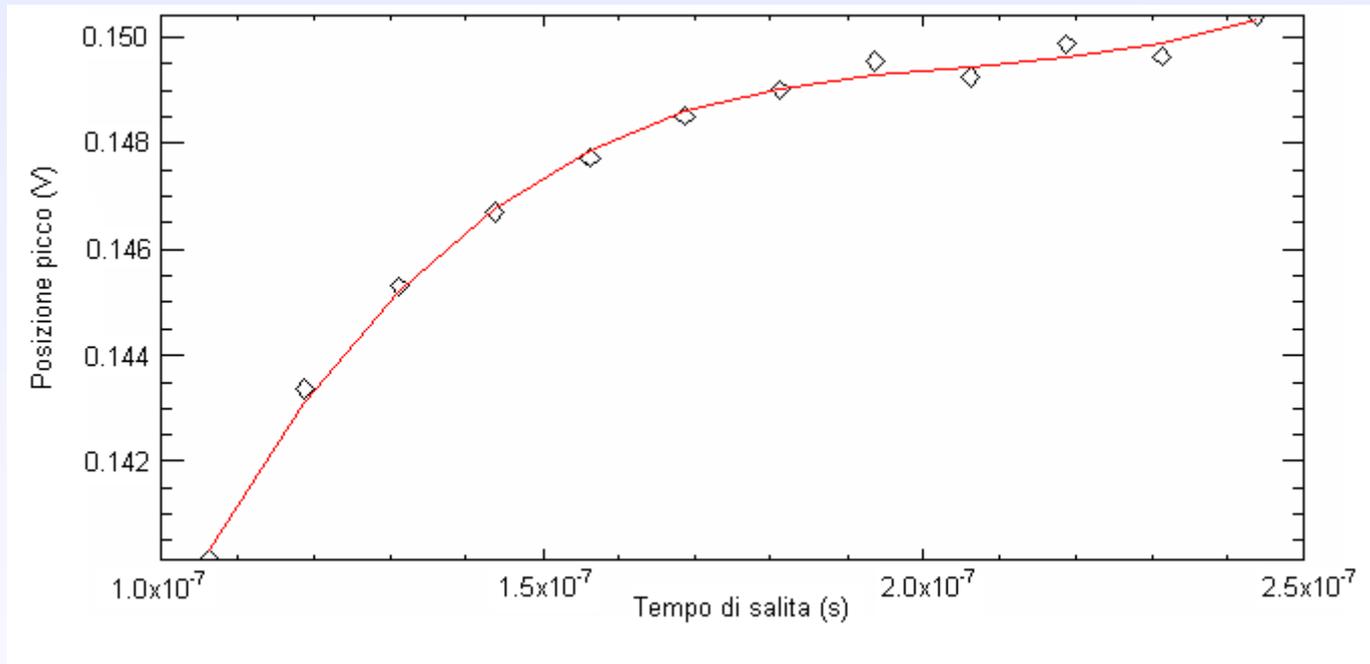
1. Si classificano i segnali in diversi gruppi a seconda del valore del parametro.



Per ciascun gruppo si calcola uno spettro parziale e si valuta il centroide della riga prescelta.

Correzione dell'ampiezza

1. Si costruisce un grafico della posizione del centroide della riga in funzione del parametro considerato e si fa un fit polinomiale dei dati

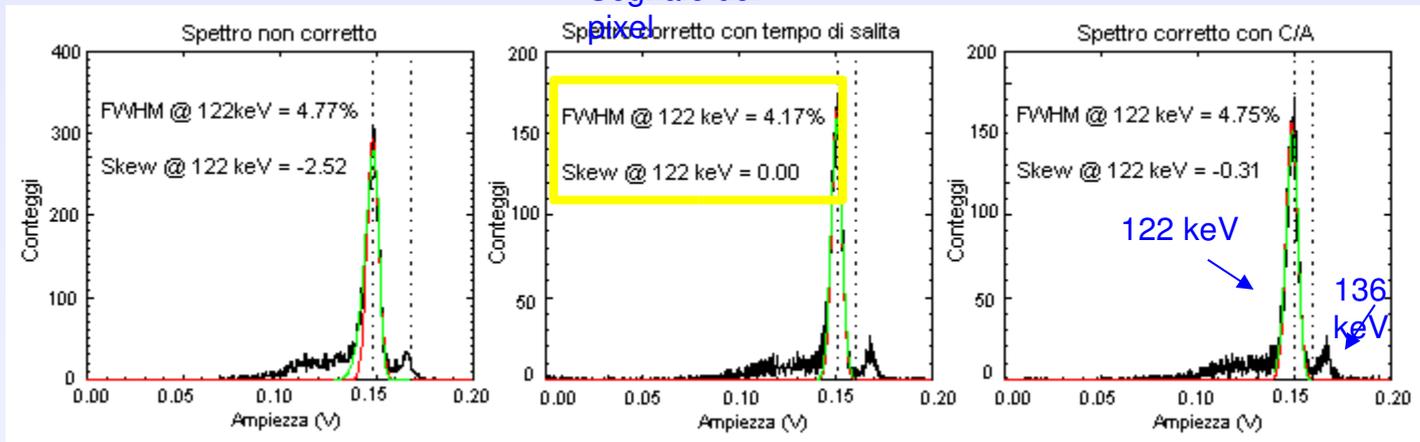


Spettro di ^{57}Co

1. Il fit polinomiale viene utilizzato per correggere l'ampiezza dei segnali, assumendo che la correzione non dipenda dall'energia

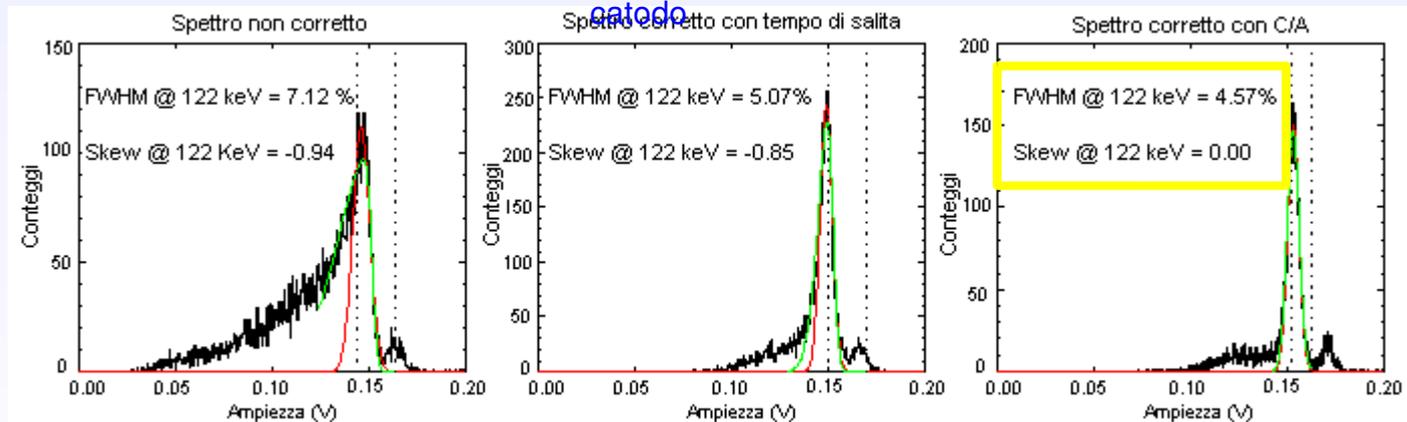
Segnale del

pixel



Segnale del

catodo



Spettro di ^{133}Ba

Fotoni maggiormente energetici interagiscono più in profondità

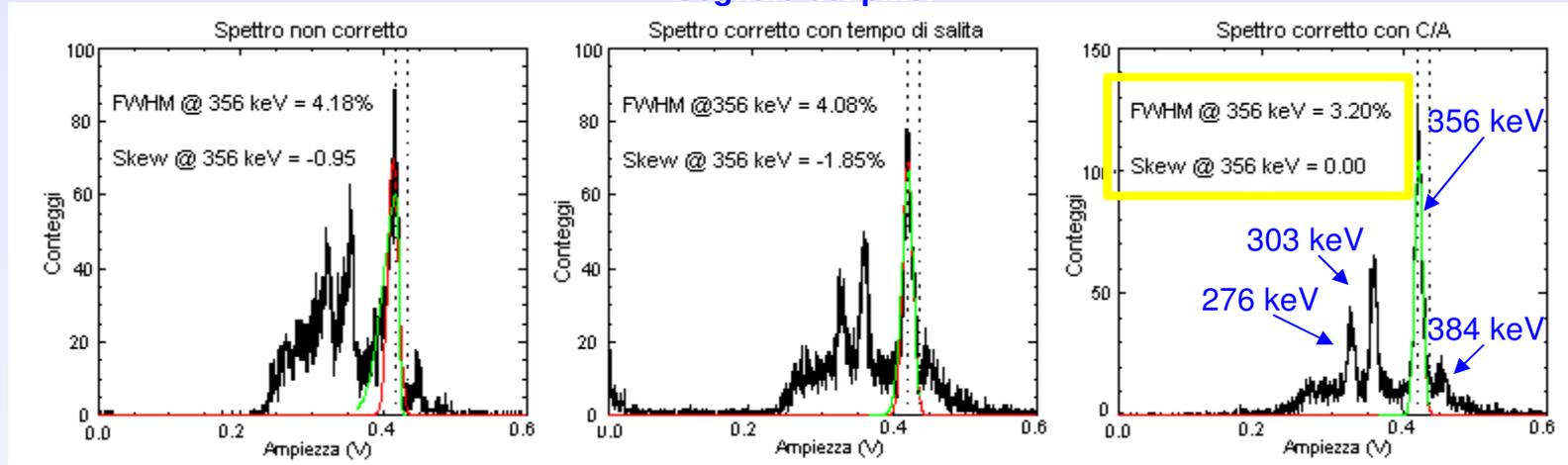


Le lacune sono facilmente catturate poiché devono percorrere distanze maggiori

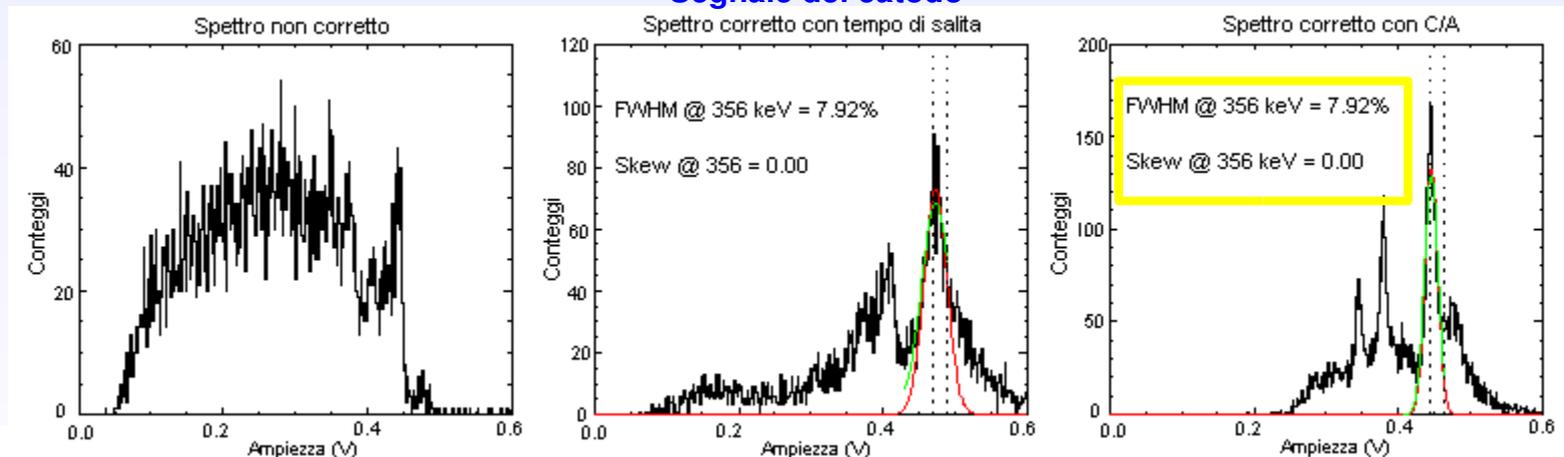


L'effetto tailing aumenta

Segnale del pixel



Segnale del catodo



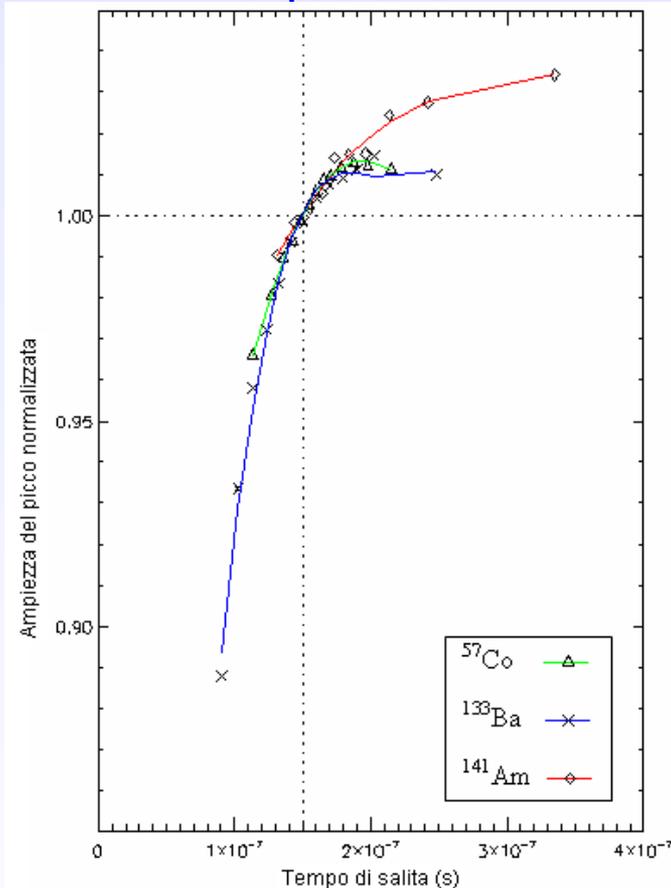
Confronto fra le funzioni di best fit

L'andamento delle funzioni non dipende in maniera drastica dall'energia

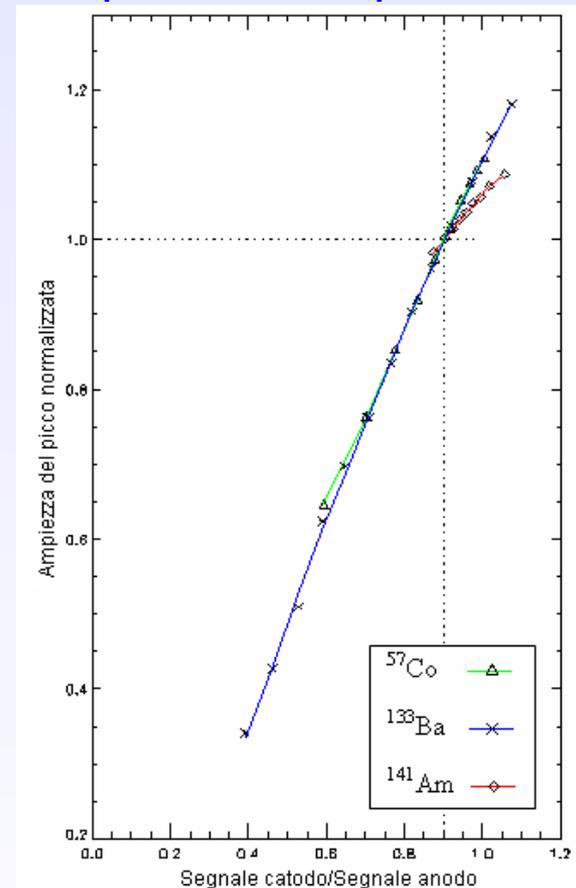


Si può ricavare una funzione di best fit necessaria per correggere l'ampiezza dei segnali generati da fotoni di energia ignota

Tempo di salita



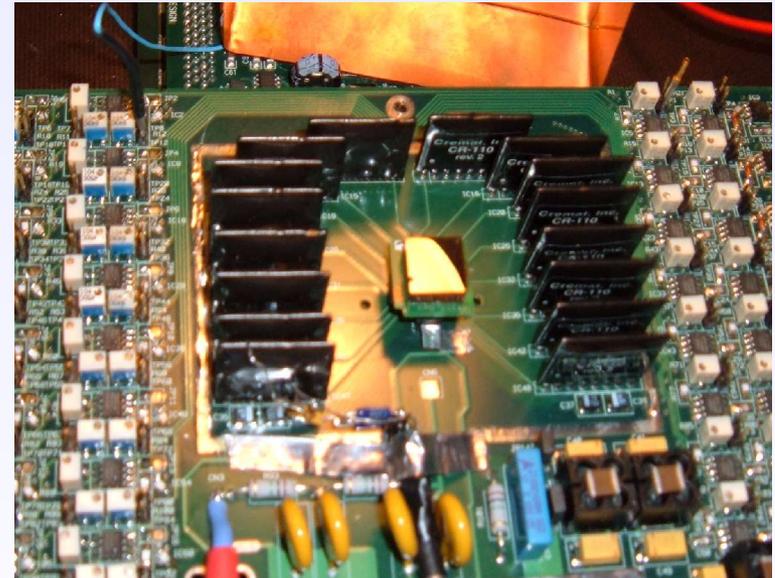
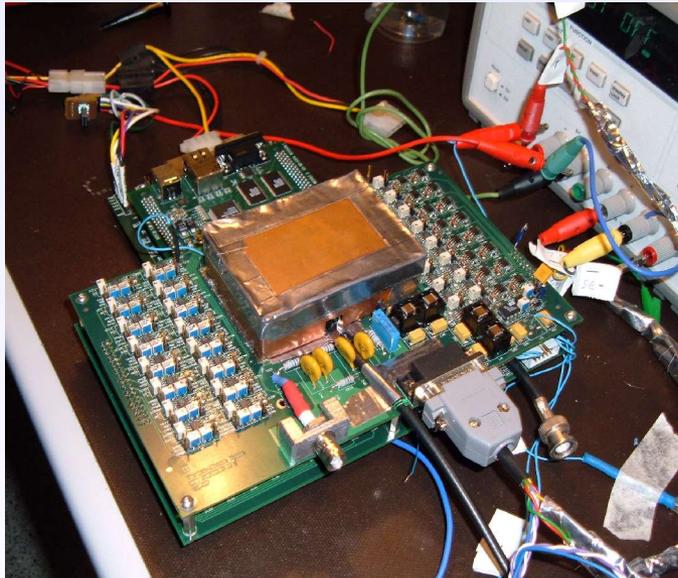
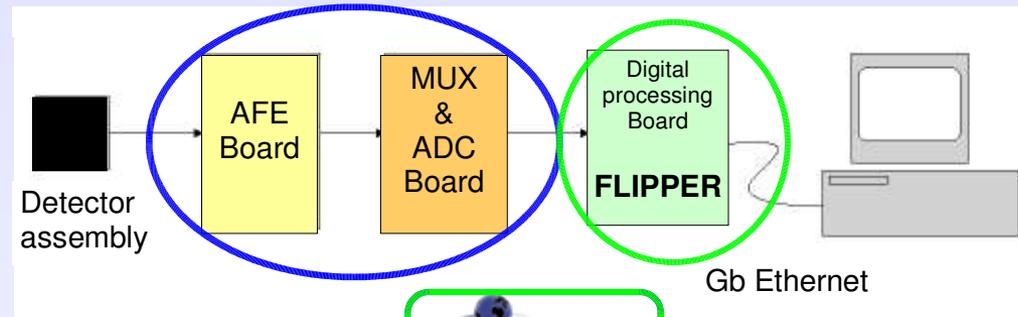
Ampiezza catodo/Ampiezza anodo



Ottimizzazione di un prototipo di rivelatore

1. Caratterizzazione di un prototipo basato su cristalli CZT di dimensioni $11 \times 11 \times 5 \text{ mm}^3$ con anodo a 16 pixel e catodo ad elemento singolo
1. Sviluppo di un modello analitico della formazione del segnale all'interno del rivelatore
1. Analisi dei segnali e correzione dell'ampiezza in funzione della profondità di interazione
1. Caratterizzazione di un'elettronica di lettura del segnale dedicata e analisi del fenomeno di cross-talk

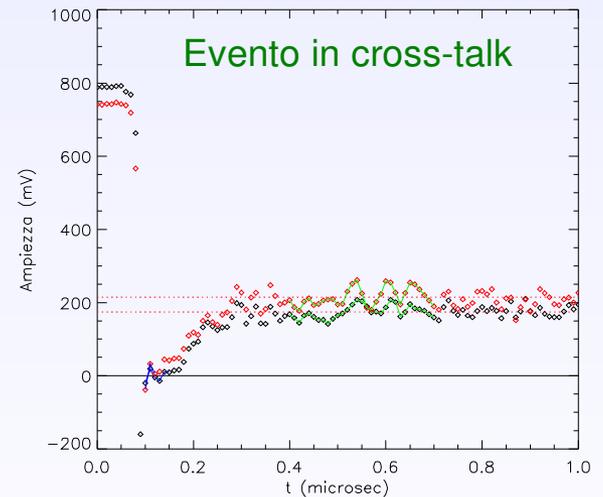
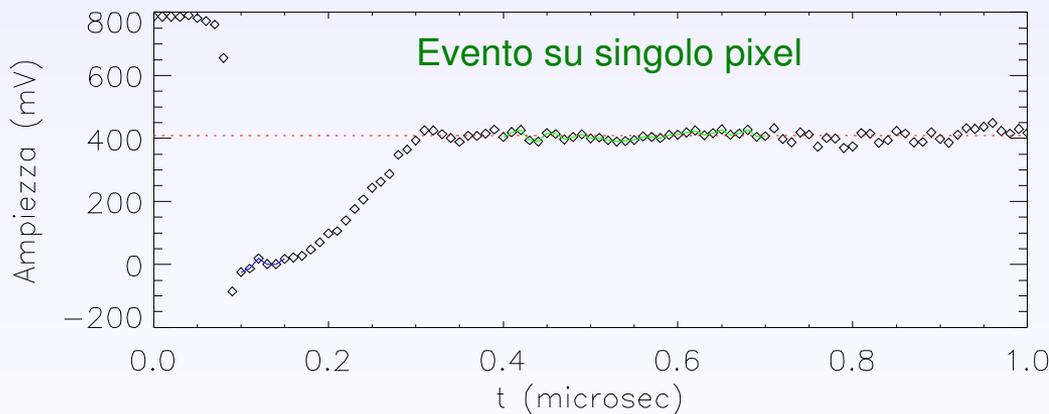
Elettronica di lettura del segnale dedicata



Eventi in cross-talk

- Un fotone interagisce nel cristallo
 - Il fotoelettrone perde energia per ionizzazione creando coppie elettrone-lacuna lungo il suo percorso
-
-
- ↓
- Un fotoelettrone è liberato
 - Si crea una distribuzione di portatori di carica detta nube

- Gli elettroni generati da un unico evento possono essere raccolti da due o più pixel adiacenti
- Ciascun segnale prodotto, preso singolarmente, ha ampiezza minore di quella corrispondente all'energia del fotone interagente



Analisi degli eventi in cross-talk

Spettro di ^{57}Co : 4.3% degli eventi sono in cross-talk

Spettro di ^{133}Ba : 9.9% degli eventi sono in cross-talk



- La maggior parte degli eventi condivisi nel caso di ^{133}Ba sono stati generati da fotoni di alta energia
- Fotoni più energetici generano nubi di portatori di carica più grandi
- La probabilità che la nube si trovi fra due pixel adiacenti è maggiore nel caso dei fotoni di ^{133}Ba rispetto a quelli di ^{57}Co

Ricostruzione dell'energia del fotone interagente

Si sommano le ampiezze dei due segnali generati dallo stesso evento

Nella maggior parte dei casi, l'ampiezza misurata è minore di quella attesa
Nella maggior parte dei casi, l'ampiezza misurata è minore di quella attesa

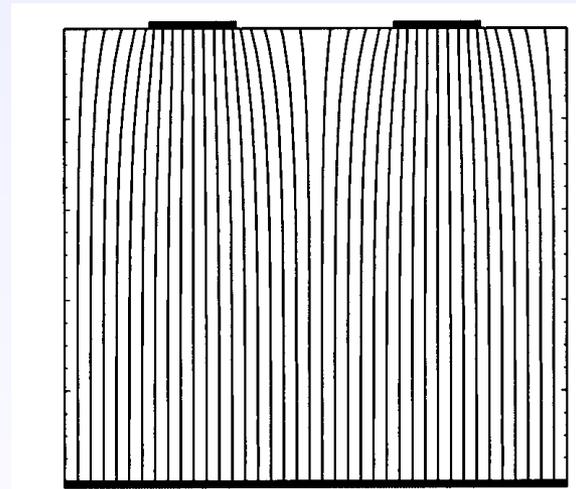
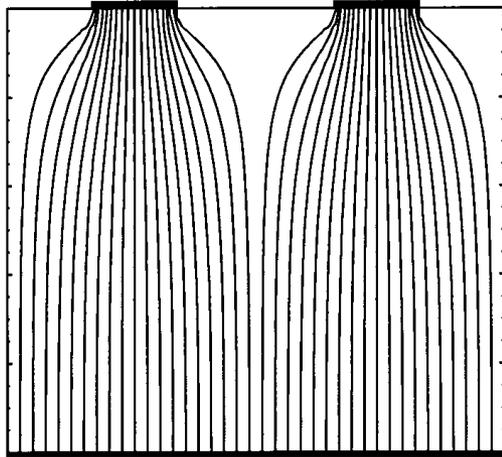
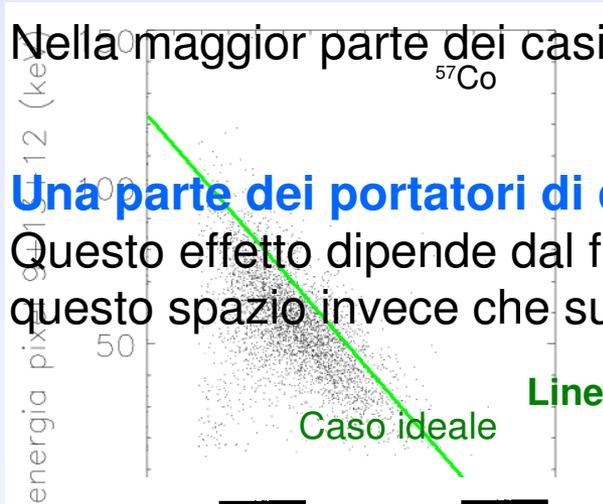
Una parte dei portatori di carica va persa nello spazio fra i pixel.

Questo effetto dipende dal fatto che alcune delle linee di campo terminano in questo spazio invece che sul pixel.

Una parte dei portatori di carica va persa nello spazio fra i pixel

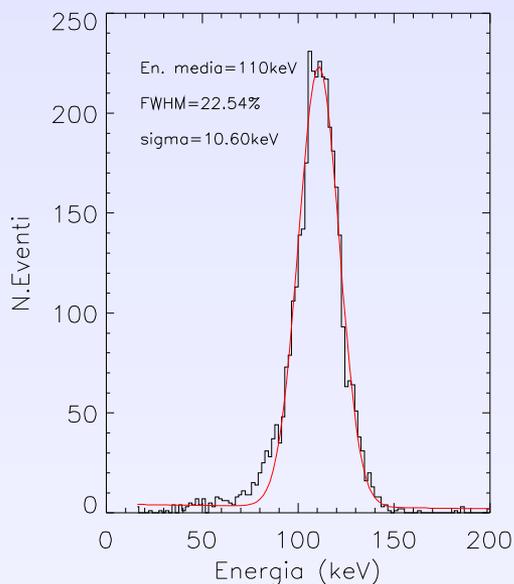
Linee di campo nel rivelatore

Caso reale

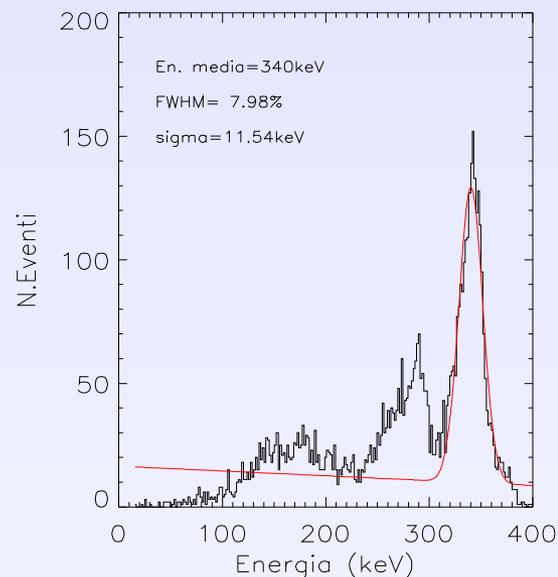


Ricostruzione dell'energia del fotone interagente

^{57}Co $\Delta E=9.8\%$

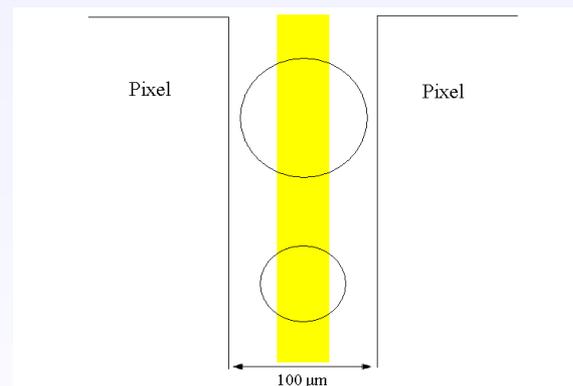


^{133}Ba $\Delta E=4.5\%$



La percentuale di elettroni persi nello spazio fra gli elettrodi è maggiore alle basse energie

Un fotone meno energetico produce una nube più piccola



Conclusioni

1. E' stato sviluppato un metodo di correzione dell'ampiezza del segnale in funzione della profondità di interazione del fotone incidente
 - ✓ Dopo la correzione la simmetria dei picchi è ripristinata e la risoluzione energetica è sensibilmente migliorata
3. E' stato caratterizzato un primo prototipo di elettronica di lettura del segnale dedicata
 - ✓ Approccio di lettura del segnale pratico ed efficiente che permette di acquisire il segnale di tutti i pixel contemporaneamente
 - ✓ Valutazione del fenomeno di cross-talk

Sviluppi futuri

- Le prestazioni di questo primo prototipo saranno valutate in un volo da pallone artico, che è pianificato per Dicembre 2008
 - ✓ Questo esperimento permetterà di studiare il comportamento del rivelatore in presenza di grandi quantità di radiazione ambientale
 - ✓ Le informazioni ricavate saranno utili per lo sviluppo degli strumenti basati su cristalli CZT che sono stati proposti per missioni ancora in fase di studio (per es. GRI, EDGE e EXIST)
- In un secondo prototipo saranno possibili miglioramenti della risoluzione energetica tramite ottimizzazione della scheda analogica di front-end
- Lo sviluppo di un modello più dettagliato del rivelatore, basato su simulazioni Monte Carlo, permetterà uno studio più quantitativo della formazione del segnale e dei fenomeni di cross-talk

Astronomia nella banda energetica 10-500 keV

- **Supernovae**

- ✓ Le emissioni radioattive di elementi pesanti (^{56}Ni , ^{57}Ni , ^{44}Ti , ^{60}Fe) permettono di stimarne le abbondanze e di verificare modelli di nucleosintesi
- ✓ L'analisi del profilo delle righe permette di ottenere informazioni sulla dinamica dell'espansione dei resti di supernova

- **Origine dei positroni galattici**

Lo studio della riga a 511 keV permette di ottenere informazioni:

- ✓ sulle sorgenti di antimateria nel centro della Galassia
- ✓ sul mezzo interstellare nel quale avvengono le annichilazioni

- **Nucleosintesi nelle novae**

Gli isotopi radioattivi prodotti durante l'esplosione (per es. ^7Be) possono essere utilizzati come tracciatori per studiare i processi fisici alla base di questi eventi

- **Gamma ray burst**

In questa banda energetica i gamma ray burst sono facilmente identificabili, quindi possono essere tracciati velocemente. Lo studio degli afterglow in multifrequenza permette poi di:

- ✓ Ottenere informazioni sul WHIM (Warm Hot Interstellar Medium) e sull'arricchimento di metalli nella galassia ospite (tramite spettroscopia nella banda degli X soffici)
- ✓ Misurare il redshift (tramite spettroscopia nell'ottico e IR)

- **Buchi neri e Nuclei galattici attivi**

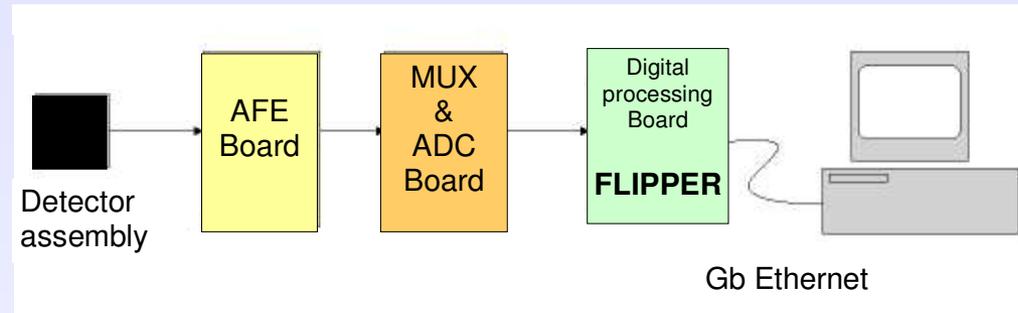
In questa banda energetica si possono osservare:

- ✓ Emissioni non termiche negli AGN dovute alla accelerazione di particelle, che forniscono informazioni sulle zone di accrescimento
- ✓ Emissioni termiche da sistemi binari (osservate in questa banda a causa dell'effetto Compton inverso)
- ✓ Emissioni non termiche dovute agli effetti di marea nelle vicinanze di buchi neri supermassivi

Righe nella banda energetica 10-500 keV

Isotopi	Vita media	Decadimento	Energia dei γ emessi (keV)
${}^7\text{Be}$	77 d	${}^7\text{Be} \rightarrow {}^7\text{Li}^*$	478
${}^{56}\text{Ni}$	111 d	${}^{56}\text{Ni} \rightarrow {}^{56}\text{Co}^* \rightarrow {}^{56}\text{Fe}^* + e^-$	158, 812
${}^{57}\text{Ni}$	390 d	${}^{57}\text{Co}^* \rightarrow {}^{57}\text{Fe}^*$	122
${}^{44}\text{Ti}$	89 y	${}^{44}\text{Ti} \rightarrow {}^{44}\text{Sc}^* \rightarrow {}^{44}\text{Ca}^* + e^+$	78, 68
${}^{60}\text{Fe}$	$2.0 \cdot 10^6$ y	${}^{60}\text{Fe} \rightarrow {}^{60}\text{Co}^* \rightarrow {}^{60}\text{Ni}^*$	59, 1173, 1332
e^+	10^5 y	$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$	511

Elettronica di lettura del segnale dedicata



- Scheda Analogica di front end

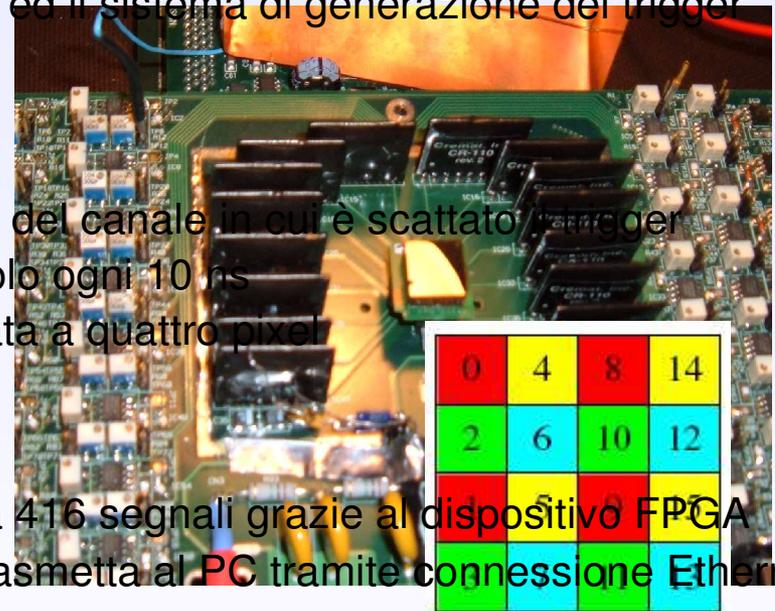
- ✓ Include i preamplificatori, gli amplificatori ed il sistema di generazione dei trigger

- Scheda MUX&ADC

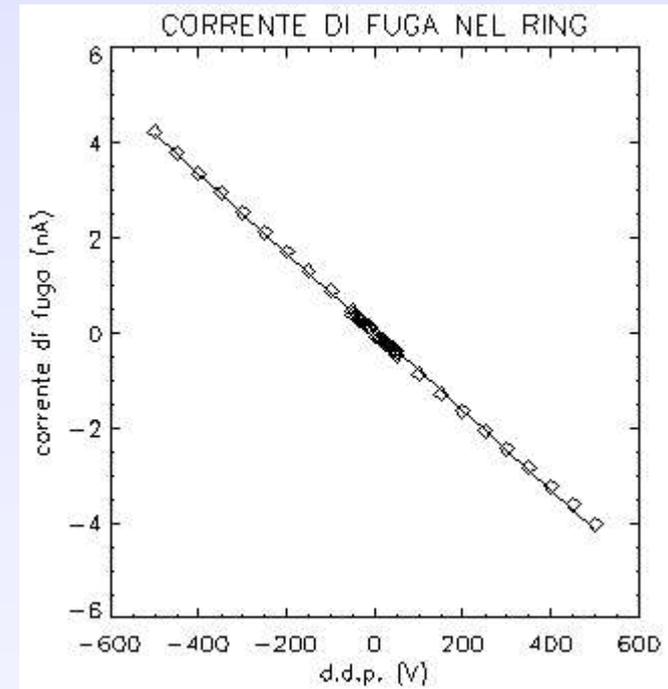
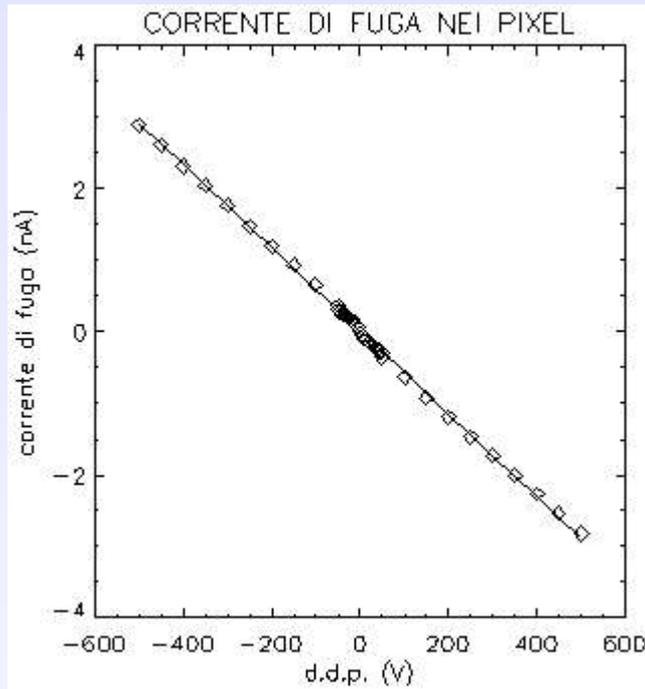
- ✓ Il segnale è opportunamente ritardato
- ✓ Il MUX permette di selezionare il segnale del canale in cui è scattato il trigger
- ✓ L'ADC digitalizza il segnale campionandolo ogni 10 ns
- ✓ Ogni combinazione MUX&ADC è associata a quattro pixel

- Scheda Digitale FLIPPER

- ✓ Può gestire contemporaneamente fino a 416 segnali grazie al dispositivo FPGA
- ✓ Immagazzina in memoria i segnali e li trasmette al PC tramite connessione Ethernet



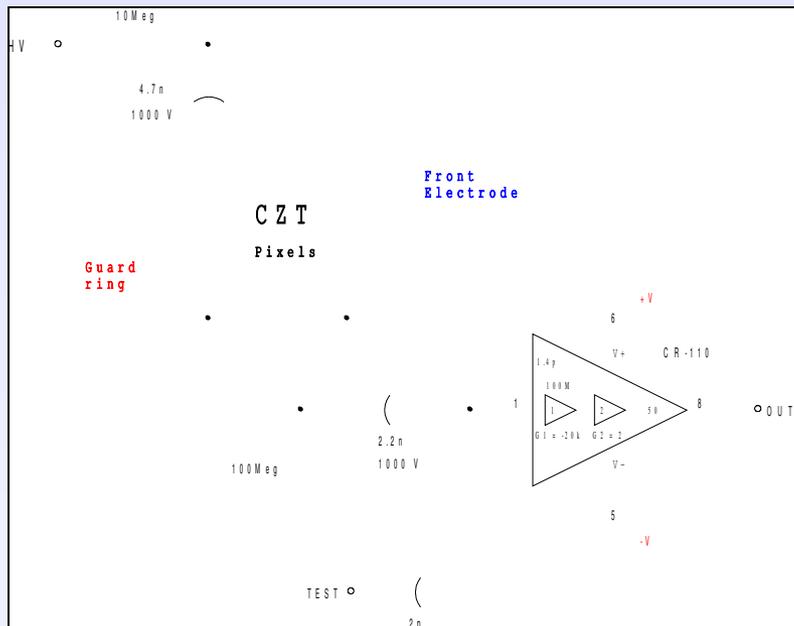
Caratterizzazione cristalli: Misure di corrente di fuga



Calcolo della resistività $\rho = \frac{RS}{l}$

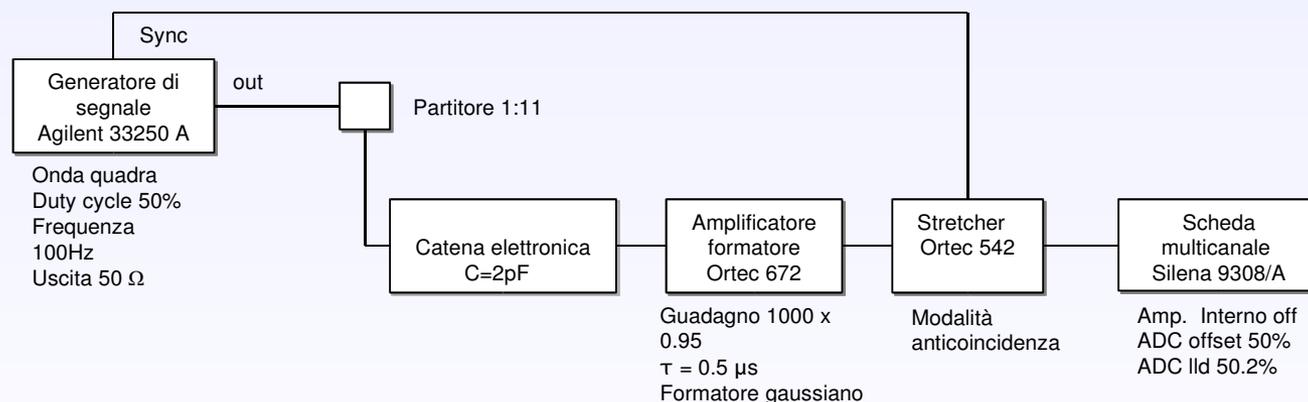
Rivelatore	$\rho_{pixel} (\Omega \cdot cm)$	$\rho_{ring} (\Omega \cdot cm)$
Cristallo 3	$3.91 \cdot 10^{10}$	$2.30 \cdot 10^{10}$
Cristallo 2	$2.32 \cdot 10^{11}$	$1.17 \cdot 10^{11}$
Cristallo 1	$1.70 \cdot 10^{11}$	$4.35 \cdot 10^{10}$

Caratterizzazione cristalli: calibrazione della catena elettronica

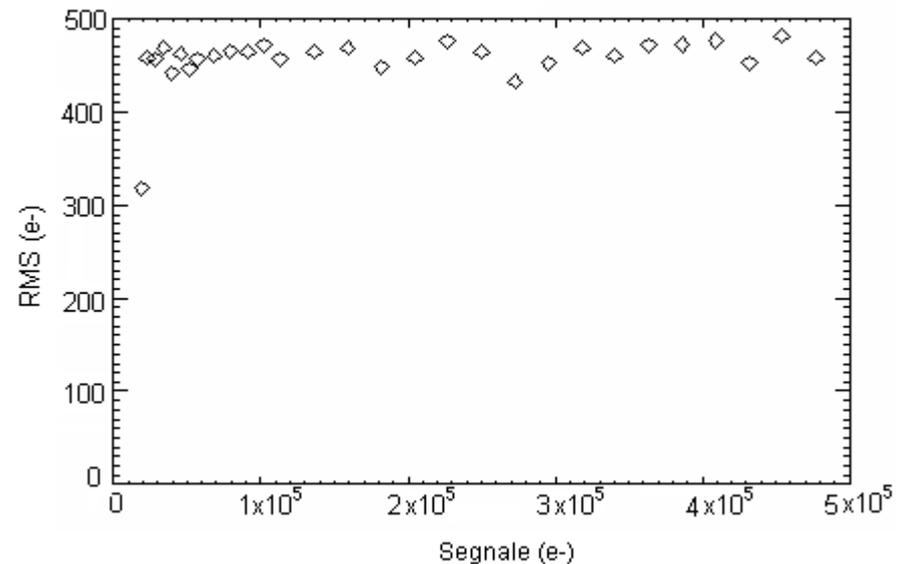
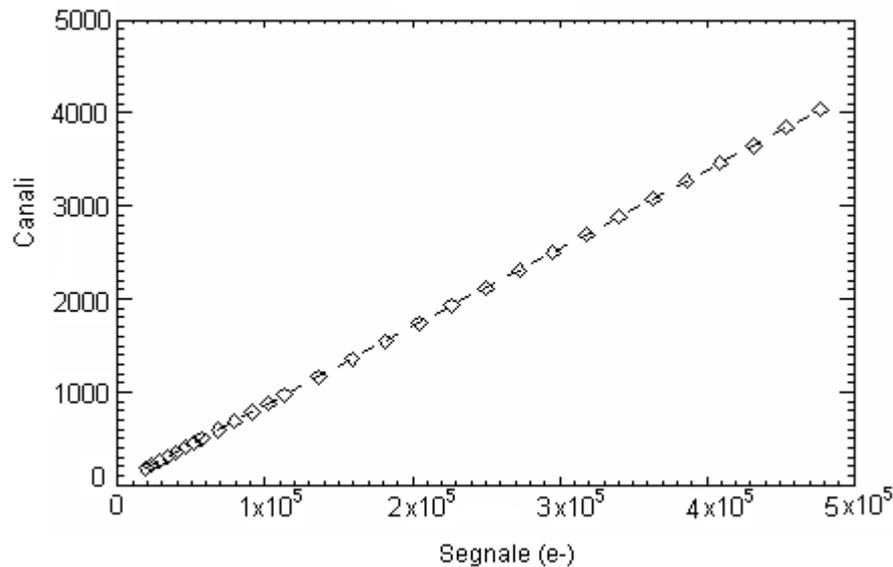


Catena elettronica di lettura del segnale

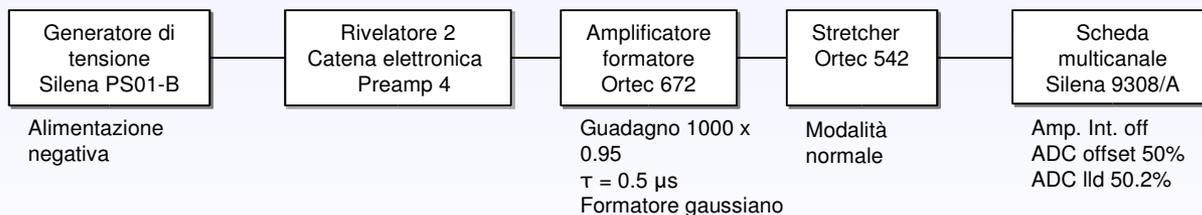
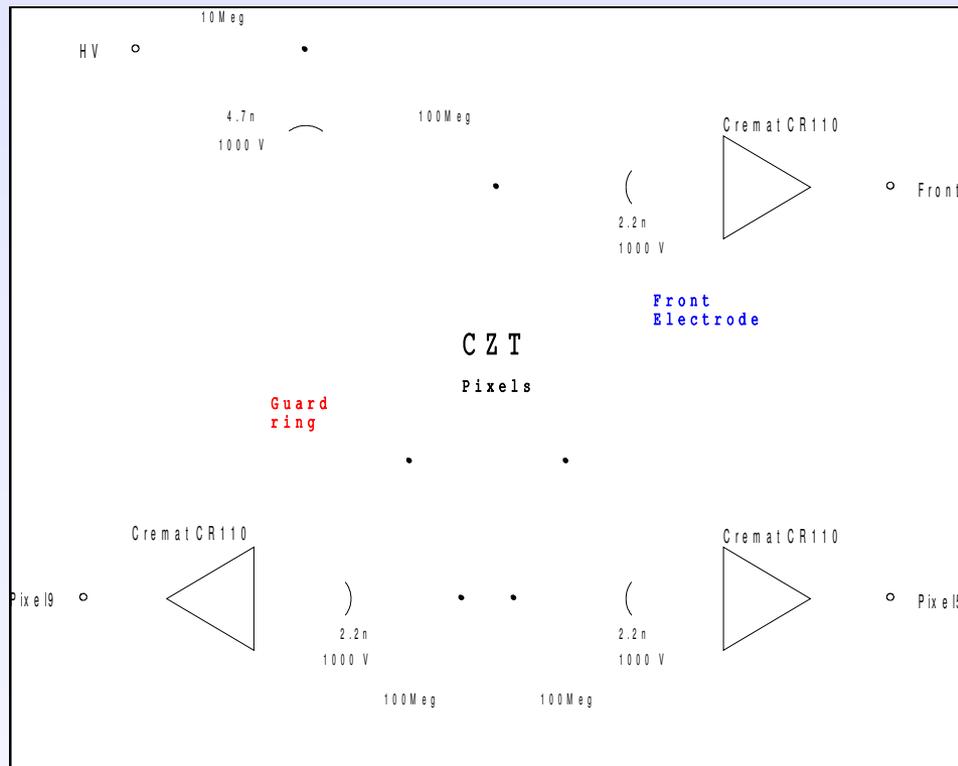
Set up sperimentale



Caratterizzazione dei cristalli: calibrazione della catena elettronica



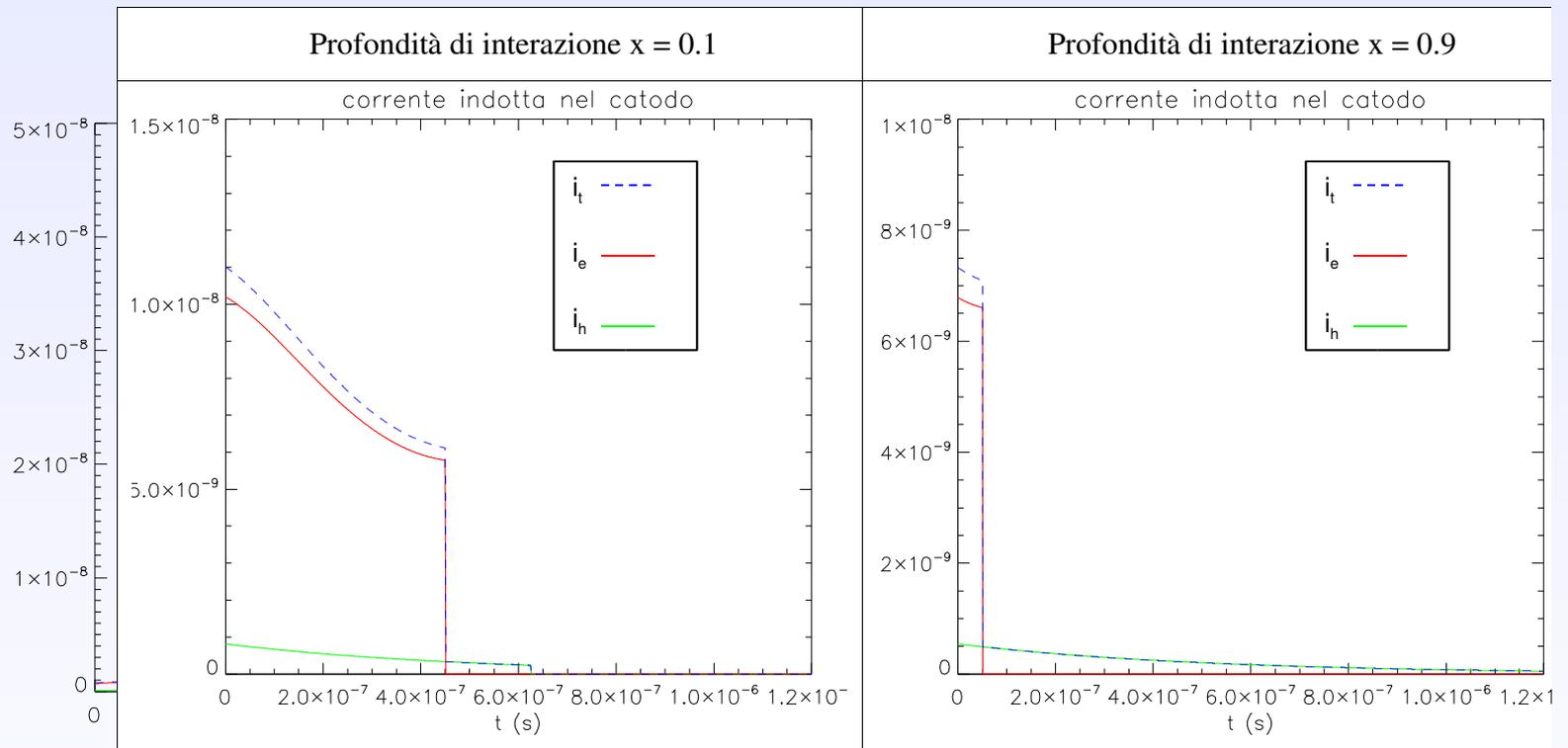
Acquisizione spettri : set up sperimentale



Modello analitico: correnti indotte sugli elettrodi

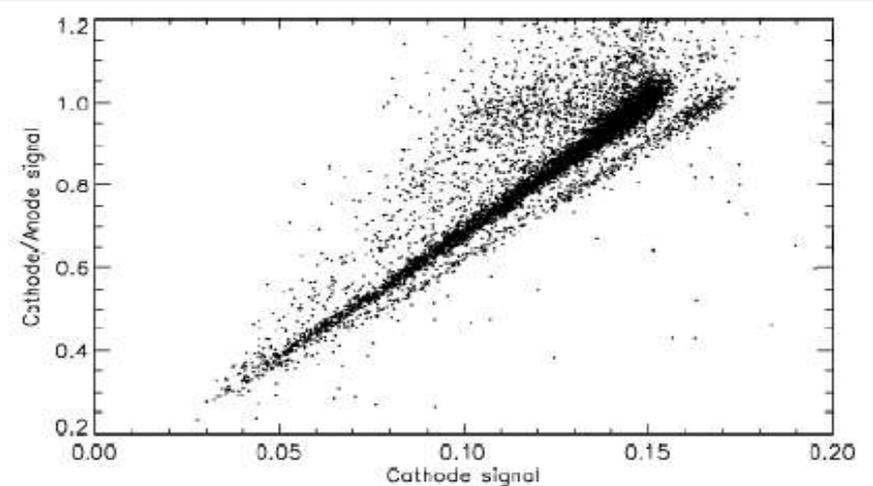
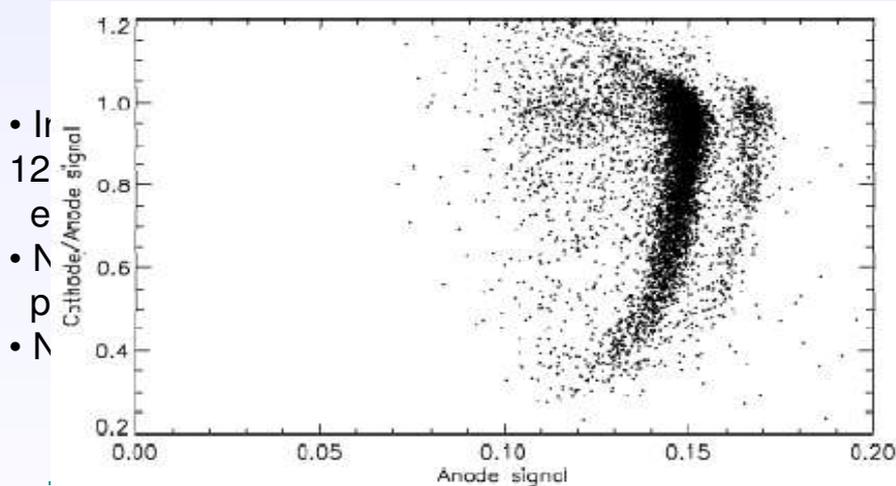
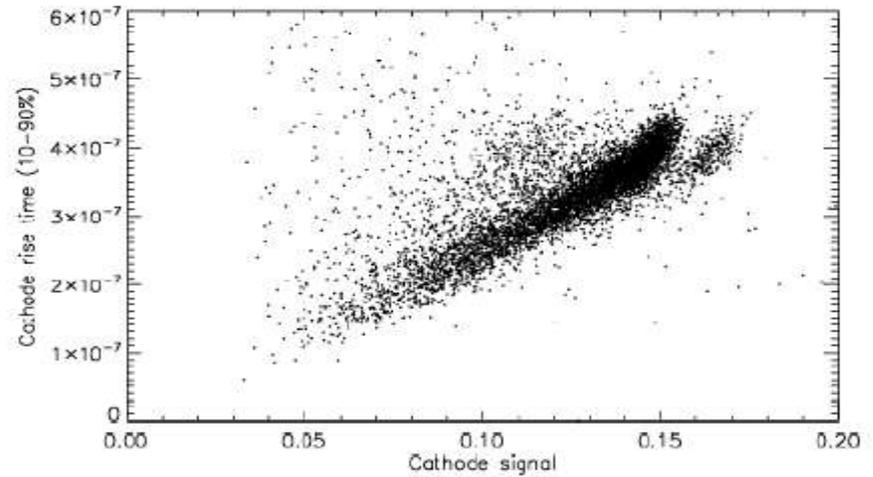
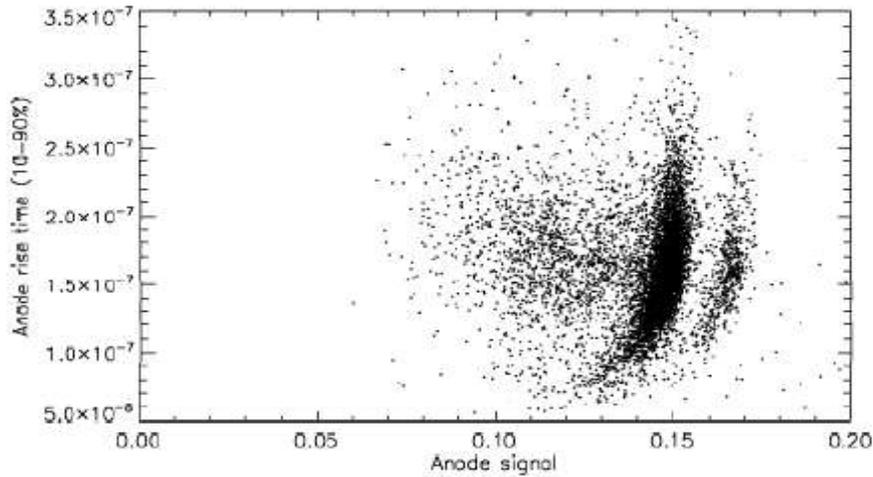
La corrente indotta in ciascun elettrodo è costituita da una componente generata dal moto degli elettroni e da una prodotta dal moto delle lacune

Catodo



Correzione dell'ampiezza

1. Grafici biparametrici



• Ir
12
e
• γ
p
• γ

ect'
t'

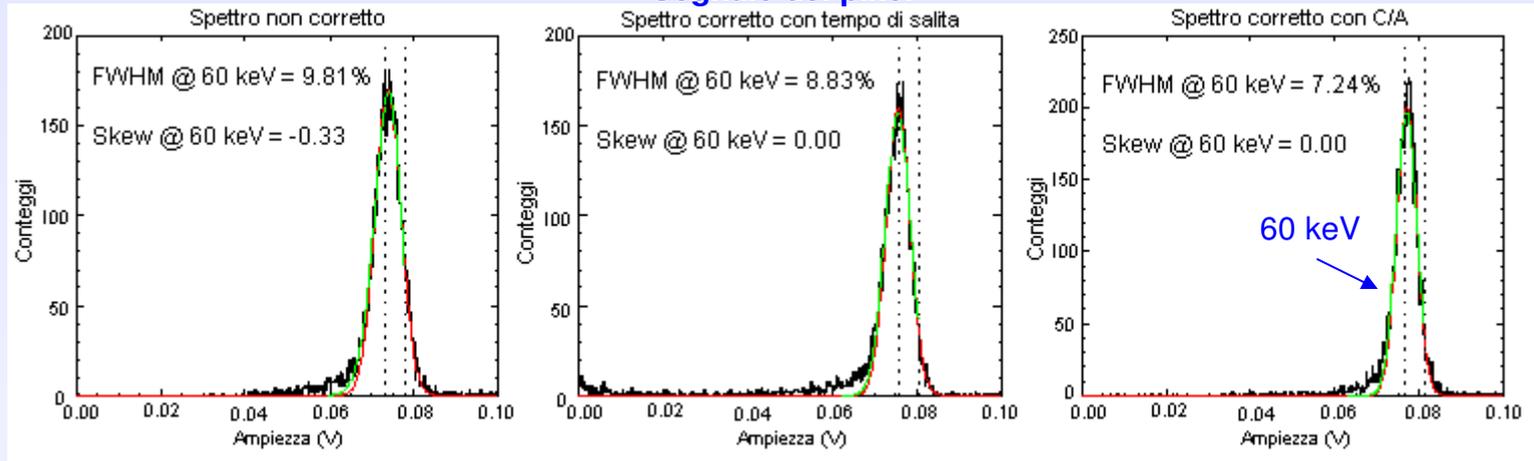
Spettro di ^{241}Am

Fotoni meno energetici interagiscono più in superficie

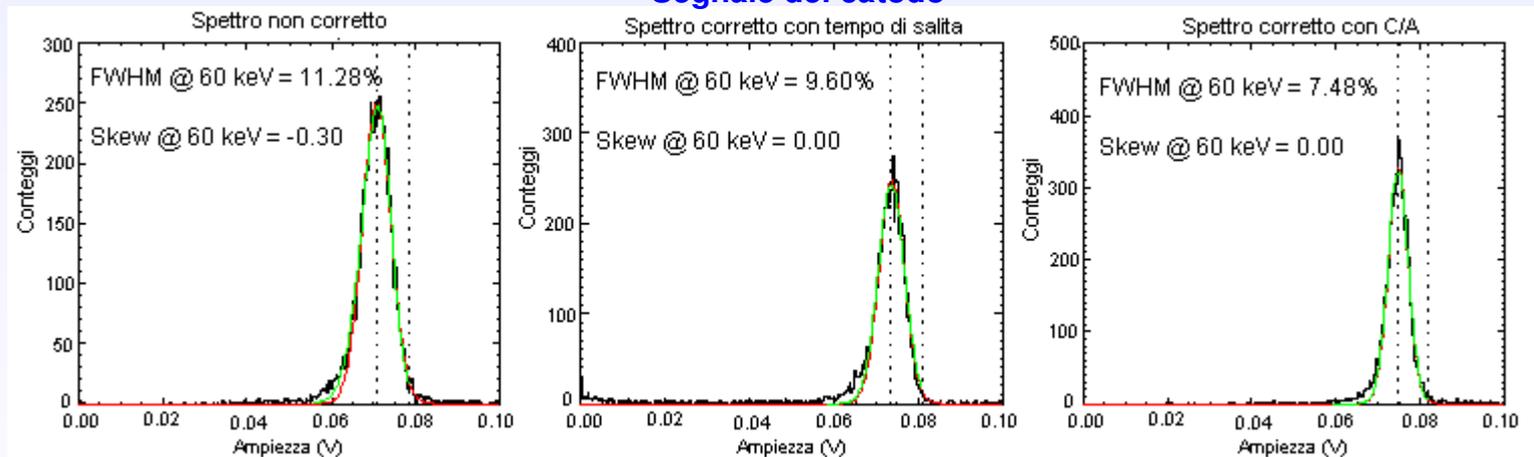


Le lacune non sono intrappolate facilmente

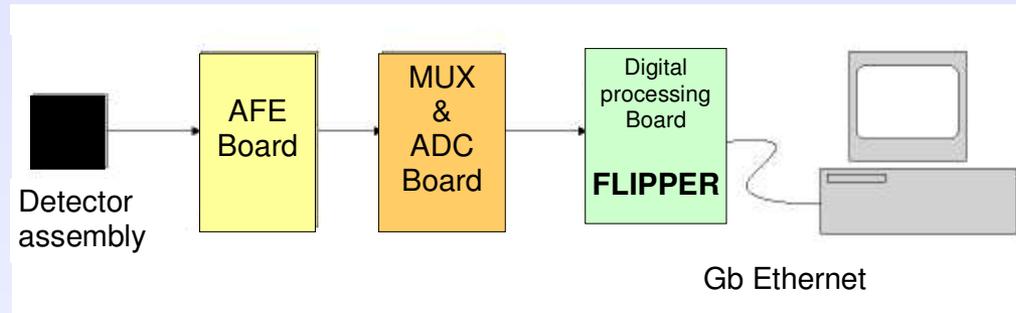
Segnale del pixel



Segnale del catodo



Elettronica di lettura del segnale dedicata



- Scheda Analogica di front end

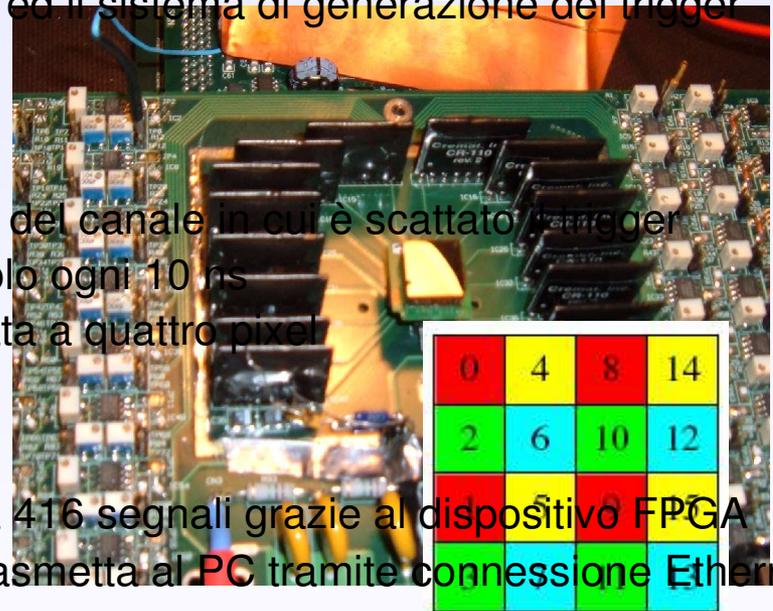
- ✓ Include i preamplificatori, gli amplificatori ed il sistema di generazione dei trigger

- Scheda MUX&ADC

- ✓ Il segnale è opportunamente ritardato
- ✓ Il MUX permette di selezionare il segnale del canale in cui è scattato il trigger
- ✓ L'ADC digitalizza il segnale campionandolo ogni 10 ns
- ✓ Ogni combinazione MUX-ADC è associata a quattro pixel

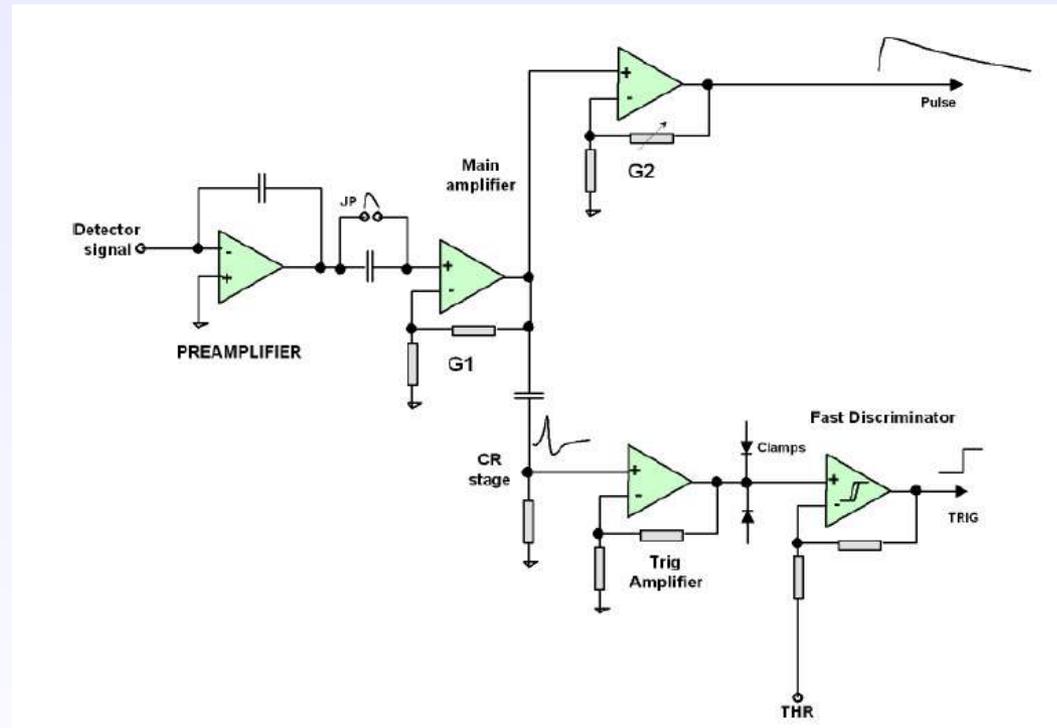
- Scheda Digitale FLIPPER

- ✓ Può gestire contemporaneamente fino a 416 segnali grazie al dispositivo FPGA
- ✓ Immagazzina in memoria i segnali e li trasmette al PC tramite connessione Ethernet



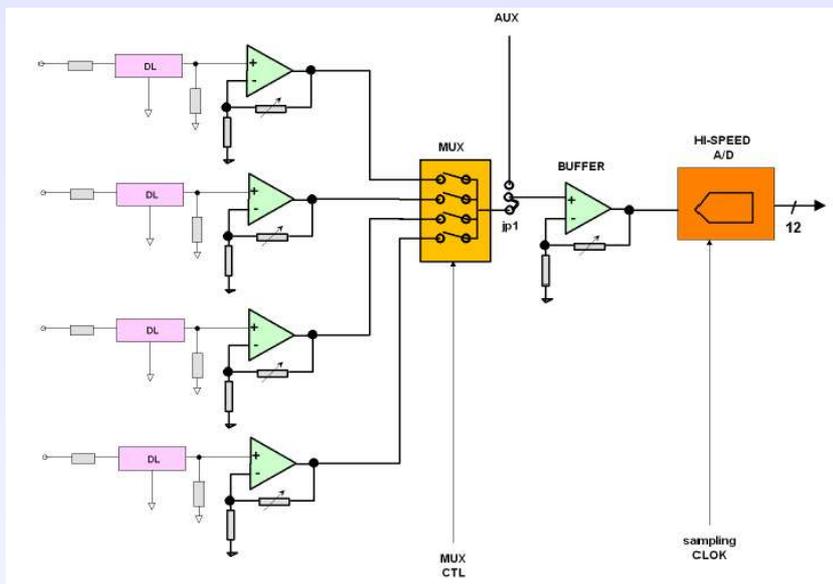
Scheda Analogica di Front End

- 16 canali Front End (FE) identici, ciascuno dei quali dedicato ad un singolo pixel;
- 1 trimmer per il valore di riferimento della soglia;
- 1 connettore per l'alta tensione con i relativi filtri, necessario per fornire un'adeguata differenza di potenziale fra gli elettrodi del rivelatore;
- Una serie di filtri per le linee di alimentazione.



Scheda MUX & ADC

Questa scheda è formata da una sezione digitale e da una analogica.
Essa è composta da quattro blocchi identici



Schema dei pixel

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

- **Campiona i 16 segnali di trigger che provengono dall'AFE ogni 50 ns (20 MHz);**
- **Valuta se qualcuno di questi trigger presenta un fronte di salita all'interno della finestra di campionamento;**
- **Connette il canale del MUX appropriato con la linea di segnale che ha il trigger attivo;**
- **Nel momento in cui rivela un trigger attivo, apre una finestra di integrazione di durata prefissata;**
- **Inibisce i trigger provenienti dalle altre linee collegate allo stesso ADC per tutto il tempo in cui resta attiva la finestra di integrazione;**
- **Connette il canale sul quale è attivo il trigger con la scheda Flipper per tutta la durata del tempo di integrazione;**
- **Fornisce il clock a 100 MHz all'ADC.**

Scheda Digitale FLIPPER

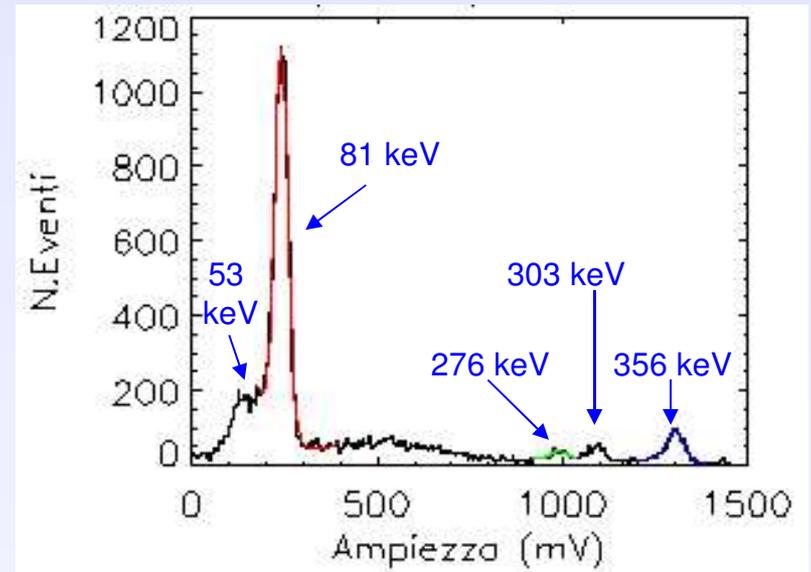
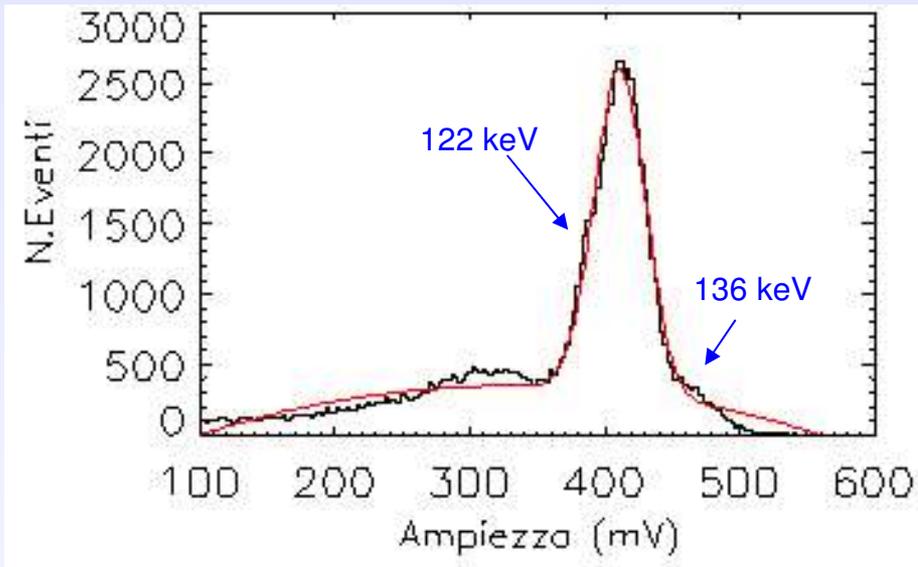
Questa scheda si occupa del processamento digitale dei segnali.



E' dotata di:

- Un dispositivo FPGA che può gestire fino a 416 segnali;
- Una memoria SDRAM/DDR da 128 MByte e una memoria Flash da 16 MByte;
- 2 connettori per allacciarsi alla scheda MUX&ADC;
- Modulo di comunicazione che permette la connessione Ethernet.

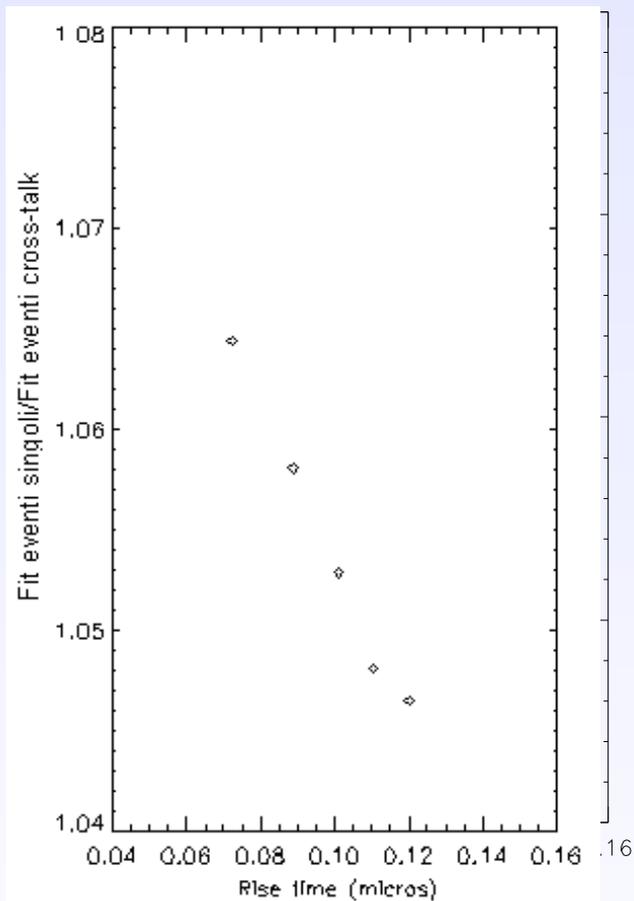
Calibrazione della catena elettronica e valutazione della risoluzione energetica



Energia (keV)	FWHM %
81	17
122	11
276	6.2
303	4.5
356	3.8

Variazione dell'ampiezza degli eventi in cross-talk con la profondità

Gli eventi in cross-talk e quelli su singolo pixel sono analizzati separatamente con il procedimento descritto in precedenza



La pendenza del fit ottenuto per i segnali in cross-talk è maggiore di quella per i segnali su singolo pixel.



- **Segnali su singolo pixel**

La dipendenza dalla profondità di interazione è dovuta alla cattura dei portatori di carica all'interno del cristallo.

- **Eventi in cross-talk**

A questo effetto si somma anche il fatto che la percentuale di elettroni persa nello spazio tra gli elettrodi dipende dalle dimensioni della nube, le quali dipendono a loro volta dalla profondità di interazione