

Universita degli Studi di Roma "Tor Vergata"
Facolta di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali
Corso di Laurea in FISICA

**Caratterizzazione dei rivelatori a camera
a deriva in silicio (SDD) per misure di
precisione delle transizioni X negli atomi
kaonici per l'esperimento SIDDHARTA**

Laureando Alessandro Rizzo

Relatore interno: Prof. Carlo Schaerf

Relatore esterno: Prof.ssa Catalina
Petrascu

Il lavoro svolto, frutto dello stage condotto ai LNF - INFN nel periodo maggio 2005\ marzo 2006, si colloca nell'ambito degli studi condotti per la realizzazione di SIDDHARTA (Silicon Drift Detectors for Hadronic Atom Research by Timing Application) e risponde alla seguente domanda:

→ •E' fattibile per SIDDHARTA una misura dei raggi X relativi alle transizioni atomiche sul livello 1s per l'idrogeno e il deuterio kaonici con una precisione di qualche eV?

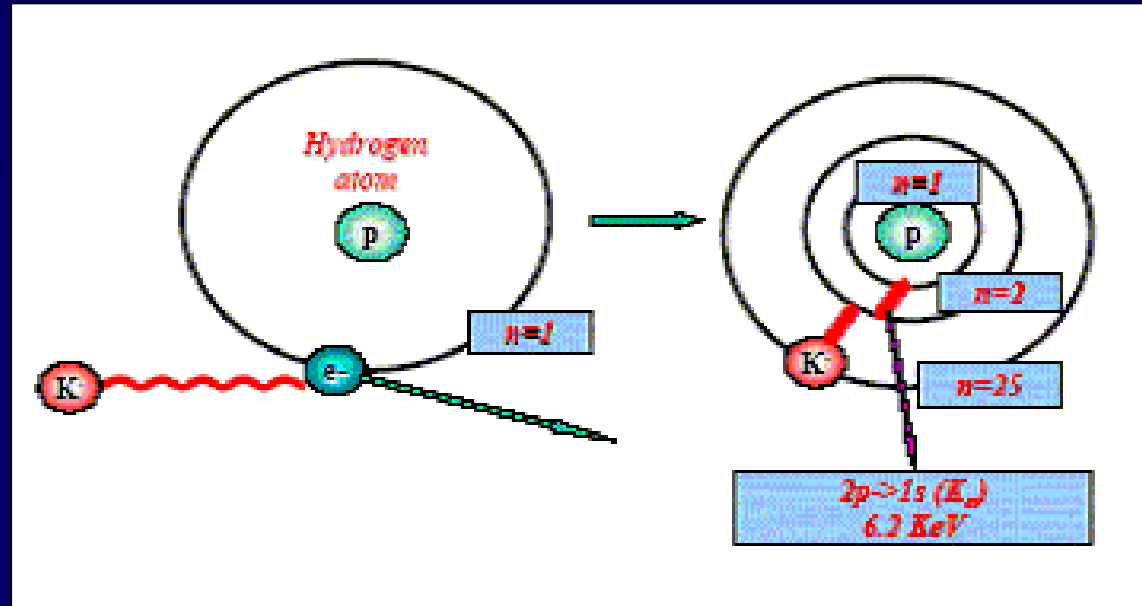
Il che equivale a chiedere:

→ •Il sistema di rivelazione che verrà utilizzato, composto da rivelatori a deriva in silicio accoppiati con un nuovo tipo di elettronica read - out realizzato per la prima volta in assoluto, permetterà a SIDDHARTA di raggiungere il suo obiettivo?

Per rispondere a queste domande è stato eseguito uno studio di stabilità e di linearità per il sistema di rivelazione SDD + elettronica read-out, al fine di monitorare le due principali potenziali sorgenti di errori sistematici, che dovranno essere ridotti intorno la stessa quantità degli errori statistici presenti.

Atomi kaonici

Un atomo kaonico si forma quando un kaone di carica negativa, viene catturato da un atomo bersaglio (ad esempio idrogeno o deuterio): in questo processo esso, sostituendosi ad un elettrone orbitale, lo espelle, subentrando in un'orbita eccitata del nuovo sistema legato che esso va a formare.



$$n \approx n_e \sqrt{\frac{m_{X^-}}{m_e}}$$

Perché è importante il loro studio

- Dallo stato eccitato con numero quantico principale $n=25$ il mesone inizia un processo cosiddetto a “cascata” per di raggiungere lo stato a minore energia



- A causa della vicinanza col nucleo che il kaone raggiunge attraverso una serie di transizioni radiative relative all'interazione elettromagnetica, nelle ultime transizioni sullo stato 1s (per esempio $3p \rightarrow 1s$ e $2p \rightarrow 1s$) è presente, oltre all'interazione elettromagnetica, anche l'interazione forte



- E' proprio questa caratteristica che rende gli atomi kaonici i sistemi ideali per verificare le previsioni della QCD relative all'interazione kaone-nucleone a bassissime energie (QCD non perturbativa)

Atomi esotici: Transizioni radiative e misura dell'interazione forte

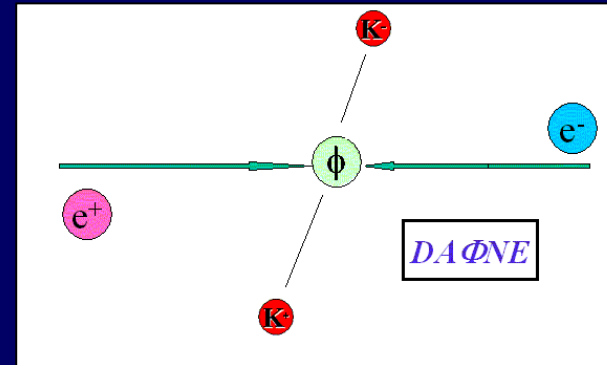
- *La presenza delle interazioni forti provoca sia uno spostamento ε nella posizione della riga $K\alpha$ (relativa alla transizione $2p \rightarrow 1s$) rispetto la sua posizione calcolata considerando un'interazione puramente elettromagnetica, sia un allargamento della larghezza Γ relativa al livello $1s$*
- *Possiamo quindi risalire all'interazione forte andando a misurare lo shift ε e la larghezza Γ*

$$\varepsilon = | E_{2p \rightarrow 1s}^{measured} | - | E_{2p \rightarrow 1s}^{e.m.} |$$

- Il punto di contatto tra le grandezze misurate e le grandezze della QCD è la relazione di Deser - Trueman: ε e Γ sono interpretate rispettivamente come la parte reale e la parte immaginaria della lunghezza complessa di diffusione in onda s.

Atomi esotici: formazione dell'idrogeno e del deuterio kaonico a DAΦNE

FORMAZIONE COPPIA
KAONE - ANTIKAONE A
BASSA ENERGIA (~13
MeV)

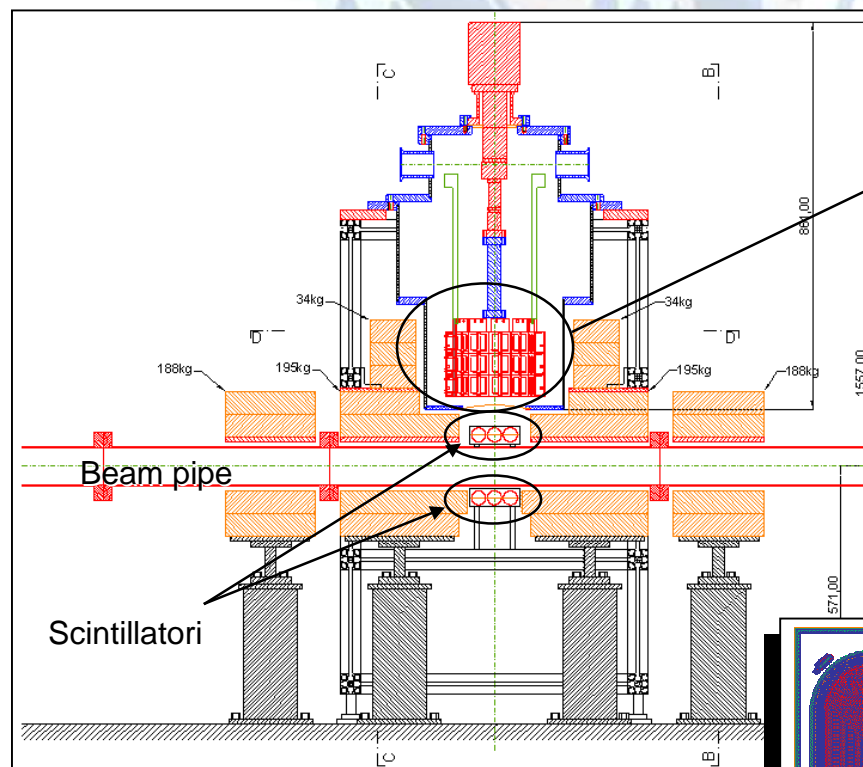


PASSAGGIO ATTRAVERSO UN
“DEGRADER” SOTTILE (~2mm)

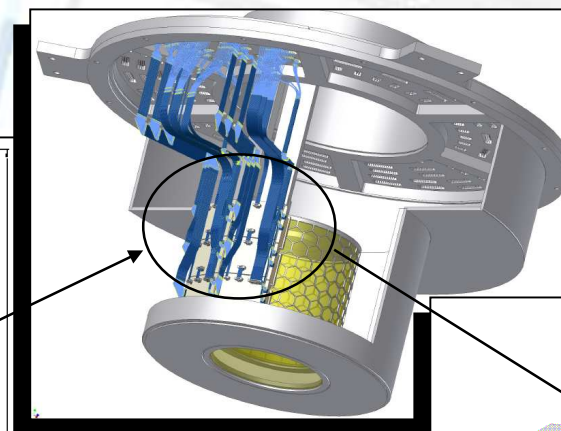
PROCESSO DI
CATTURA DA PARTE
DELL'ATOMO

DENSITA' DEL BERSAGLIO:
scelta in modo da ottimizzare il
rapporto tra la probabilità di
formazione dell'atomo kaonico
e la probabilità che ci sia effetto
Stark - Lo Surdo

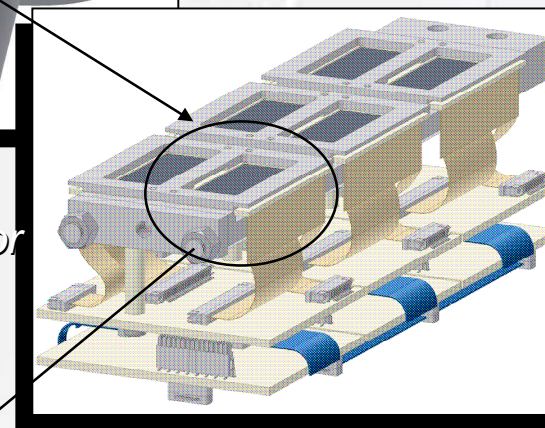
Apparato SIDDHARTA (Silicon Drift Detectors for Hadronic Atom Research by Timing Application)



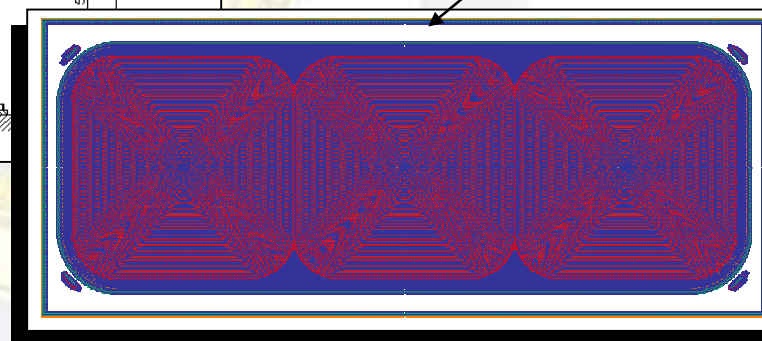
*Apparato
SIDDHARTA*



*Cella
bersaglio e
rivelatori*

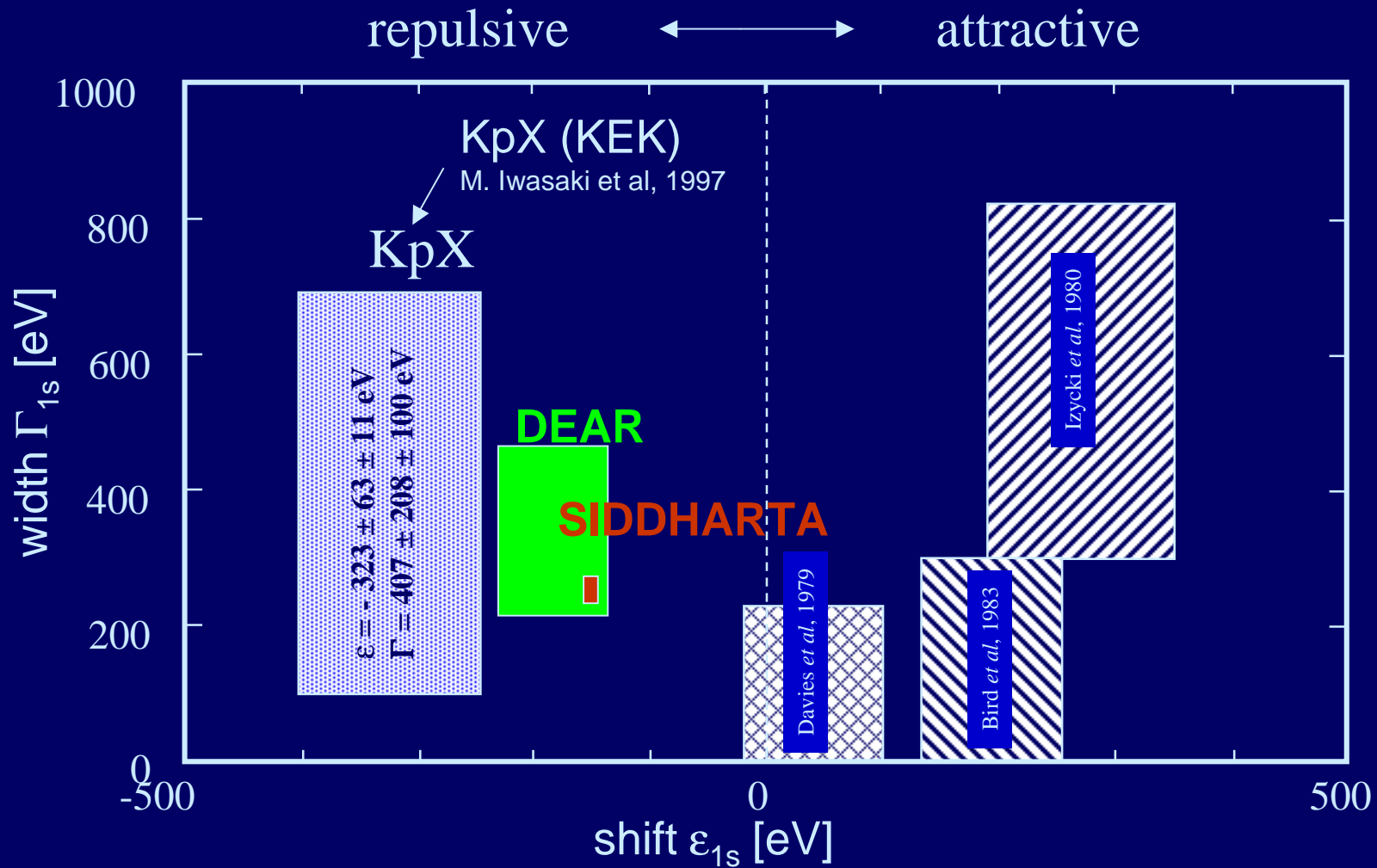


*SDD detector
unit*



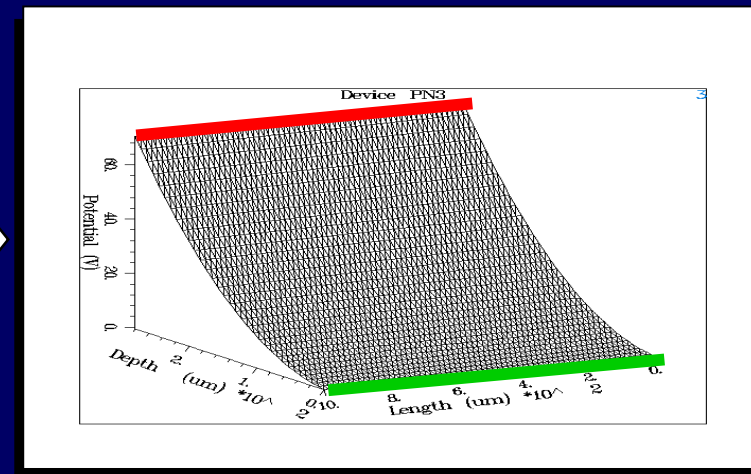
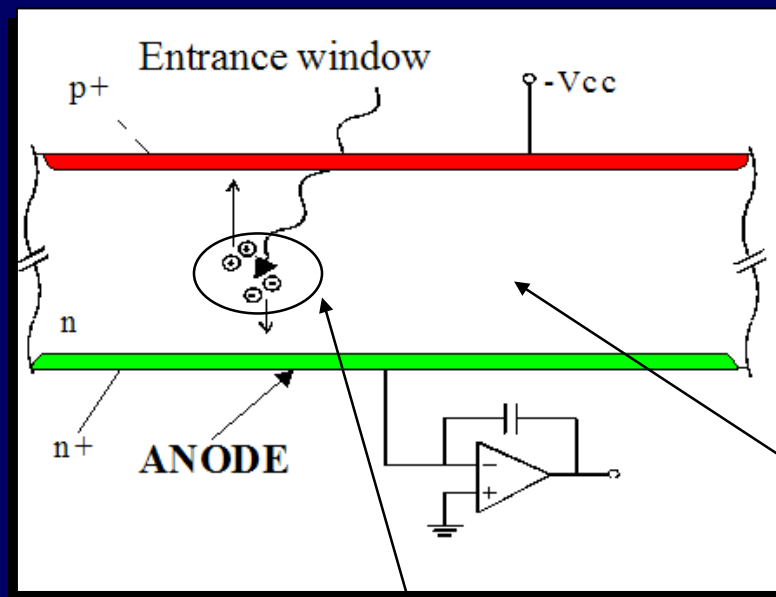
SDD

Le misure effettuate fino ad oggi



Rivelatori a semiconduttore: caratteristiche generali

PIN (Positive-Intrinsic-Negative) - il diodo rivelatore

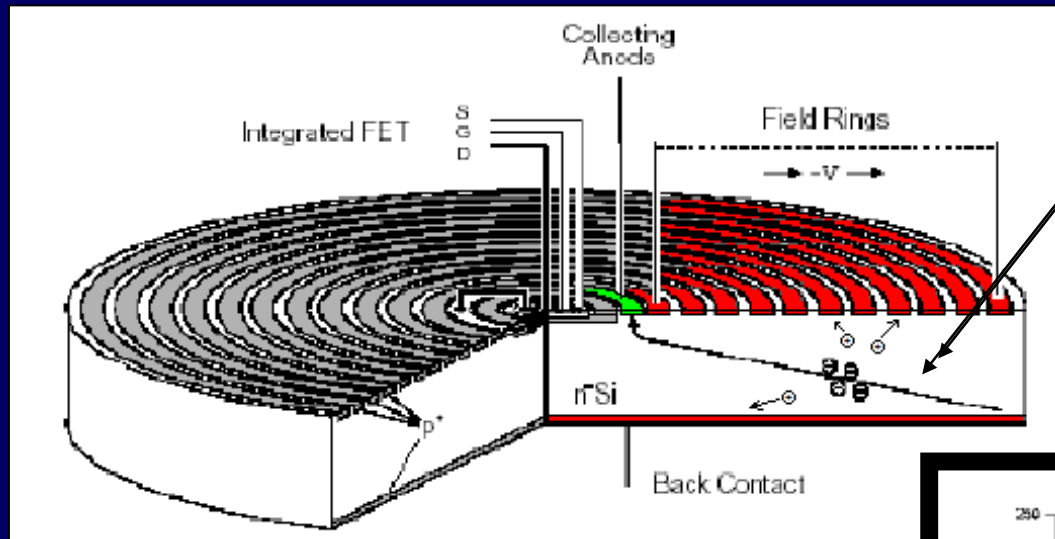


Zona di svuotamento

Creazione di coppie elettrone-lacuna:
creazione di
carica elettrica libera di muoversi nel
rivelatore proporzionale all'energia dei fotoni
incidenti

Il rumore è proporzionale
alla capacità dell'anodo!

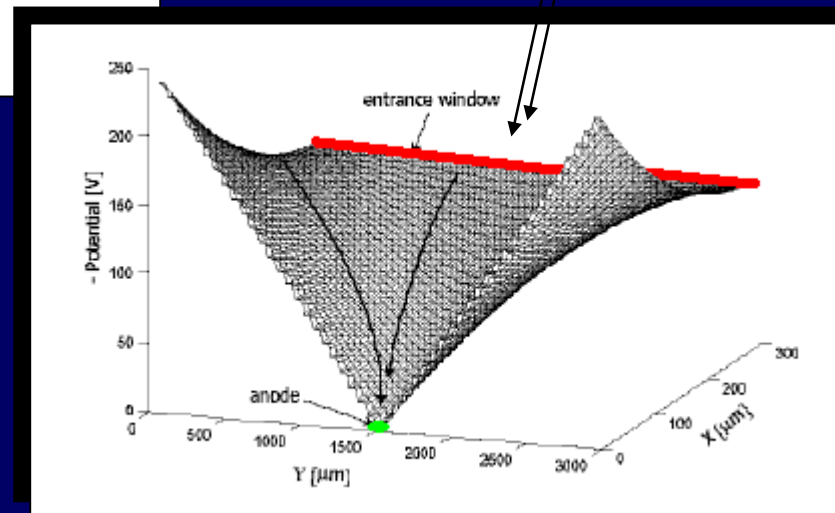
SDD: Struttura, principi di funzionamento e caratteristiche



La regione di svuotamento (area attiva) negli SDD corrisponde alla superficie del rivelatore stesso

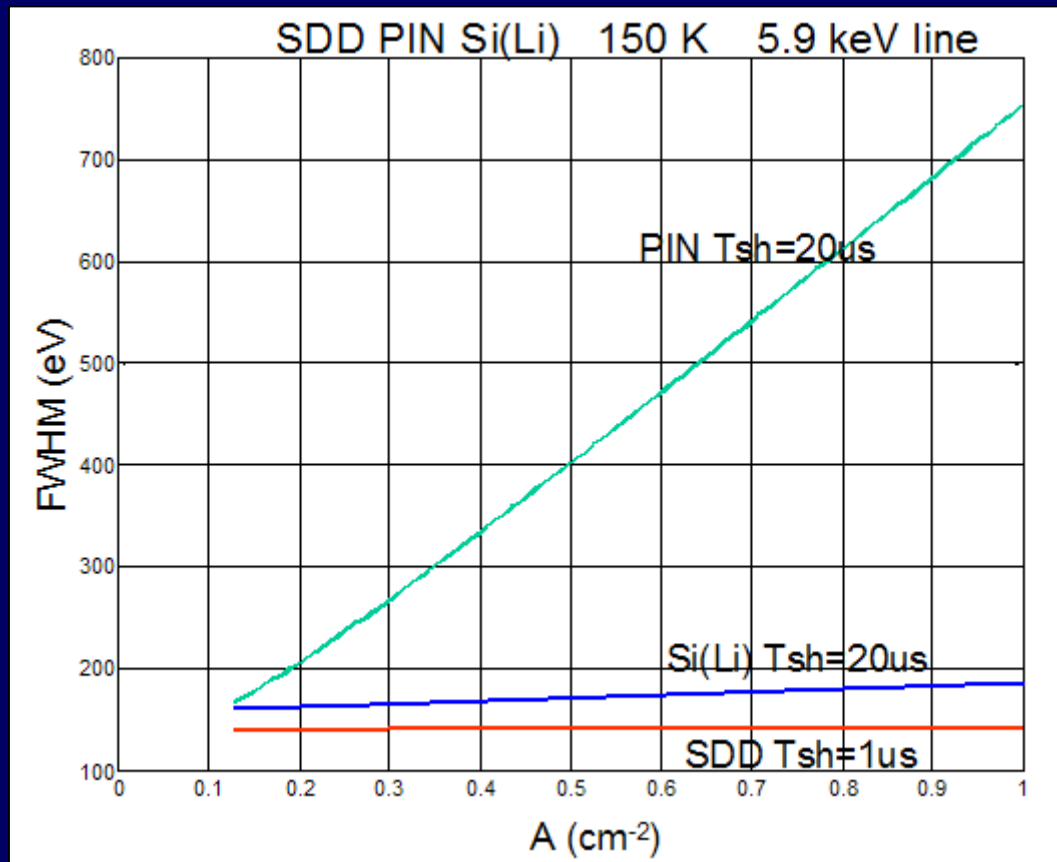
Campo di Deriva

Essendo il rumore proporzionale all'area dell'anodo, vediamo che in questo tipo di rivelatore essa è ridotta al minimo senza che l'area attiva diminuisca



Perché è stato scelto il rivelatore SDD per raggiungere l'obiettivo di SIDDHARTA

Confronto tra 4 diversi rivelatori



$\text{FWHM}_{\text{meas}}$
at monoenergetic line 5.9 keV,
1 cm^2 detector at 150 K

SDD
FWHM=140eV $\tau_{\text{shap}} = 1 \mu\text{s}$

Si(Li)
FWHM=180eV $\tau_{\text{shap}} = 15 \mu\text{s}$

PIN diode
FWHM=750eV $\tau_{\text{shap}} = 20 \mu\text{s}$

CCD
FWHM=140eV $\tau_{\text{frame}} = 1 \text{s}$

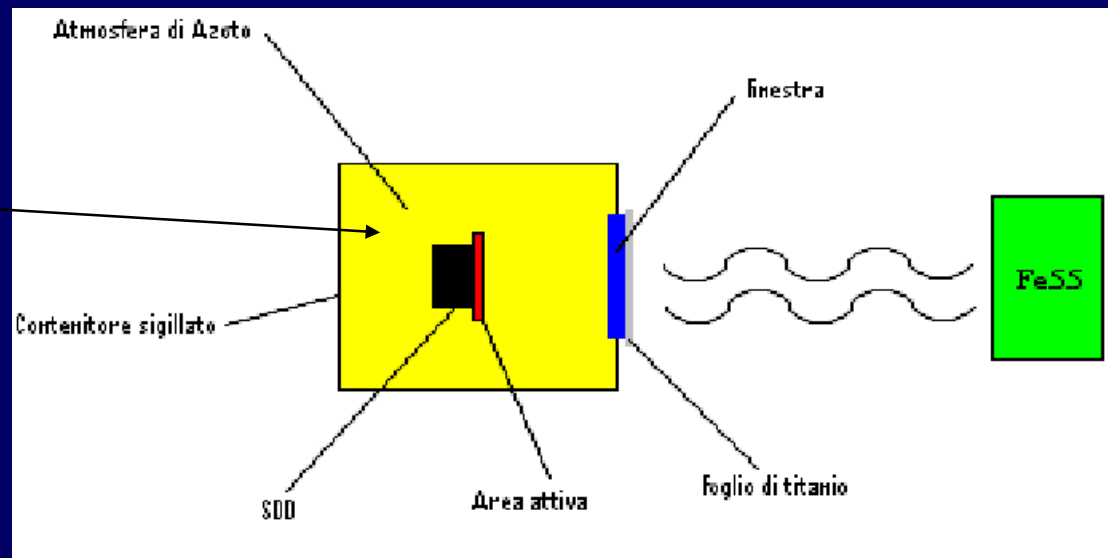
Permette l'implementazione di un meccanismo di Trigger veloce!

Setup sperimentale per la caratterizzazione degli SDD

Al fine di verificare che gli errori sistematici siano compatibili con lo scopo dell'esperimento, si è effettuato uno studio sia di stabilità che di linearità, per la caratterizzazione dei rivelatori a deriva in silicio al fine di andare a monitorare due delle principali potenziali sorgenti di errori sistematici.

Setup sperimentale

Le misure studiate in questo lavoro sono un gruppo di 50, prese una ogni ora

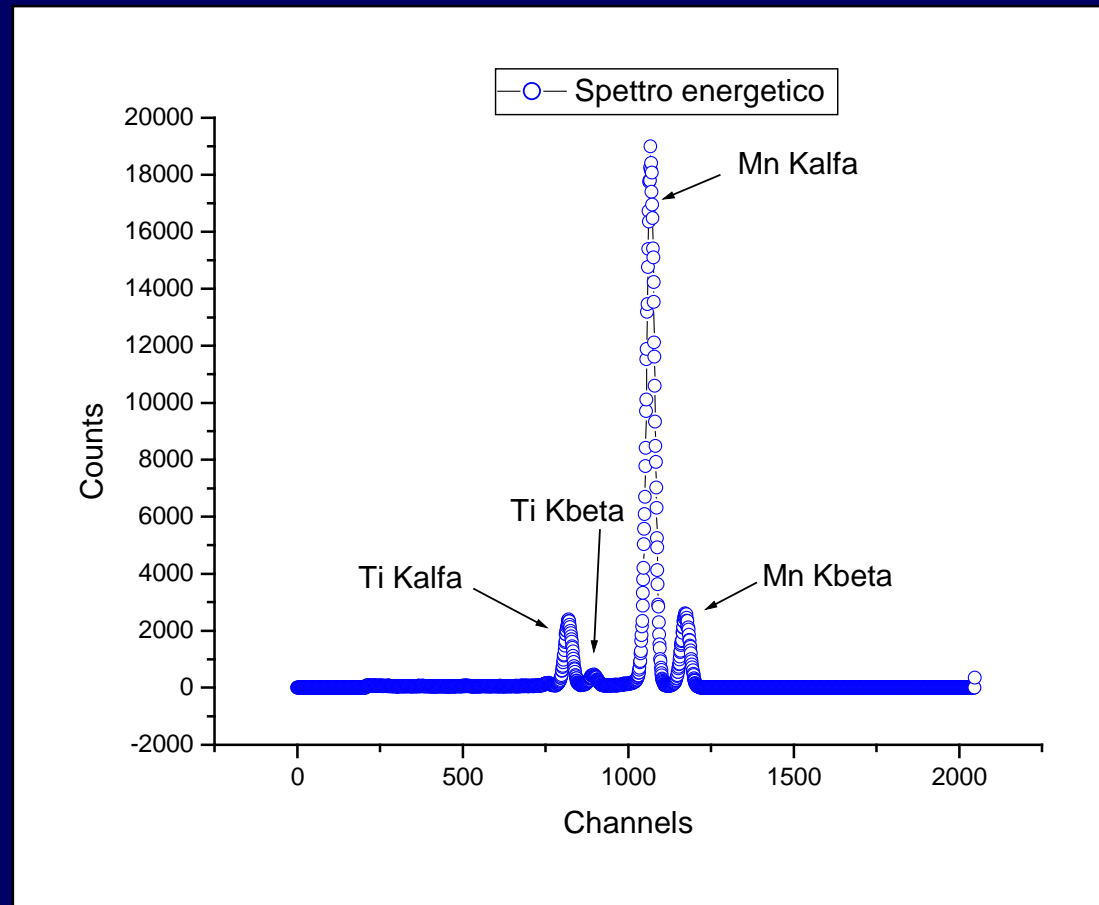


Decadimento beta nucleare del ferro 55

Studi di stabilità

Come si ottiene uno spettro energetico - 1\3

Lo spettro finale si ottiene andando a graficare i conteggi forniti dal rivelatore in funzione dell'energia: esso lo si ottiene a partire da un primo spettro in cui l'ascissa reale viene graduata in un'unità di misura (proporzionale all'energia dei fotoni X incidenti) fornita dall'elettronica di lettura: i canali.

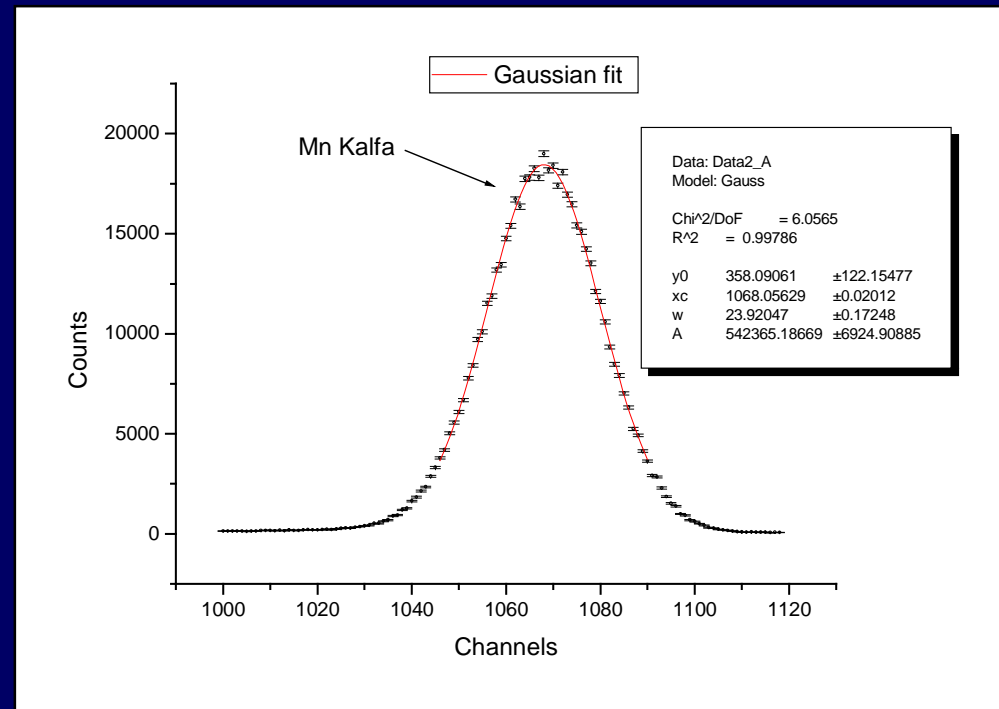


Studi di stabilità

Come si ottiene uno spettro energetico - 2\3

In seguito, per impostare la relazione che lega i canali all'energia, ci si riferisce alla posizione della riga $K\alpha$ del manganese (segnale più "pulito" e meglio definito a nostra disposizione), che può essere riconosciuta facilmente facendo riferimento alla posizione reciproca dei picchi conoscendo le loro rispettive energie.

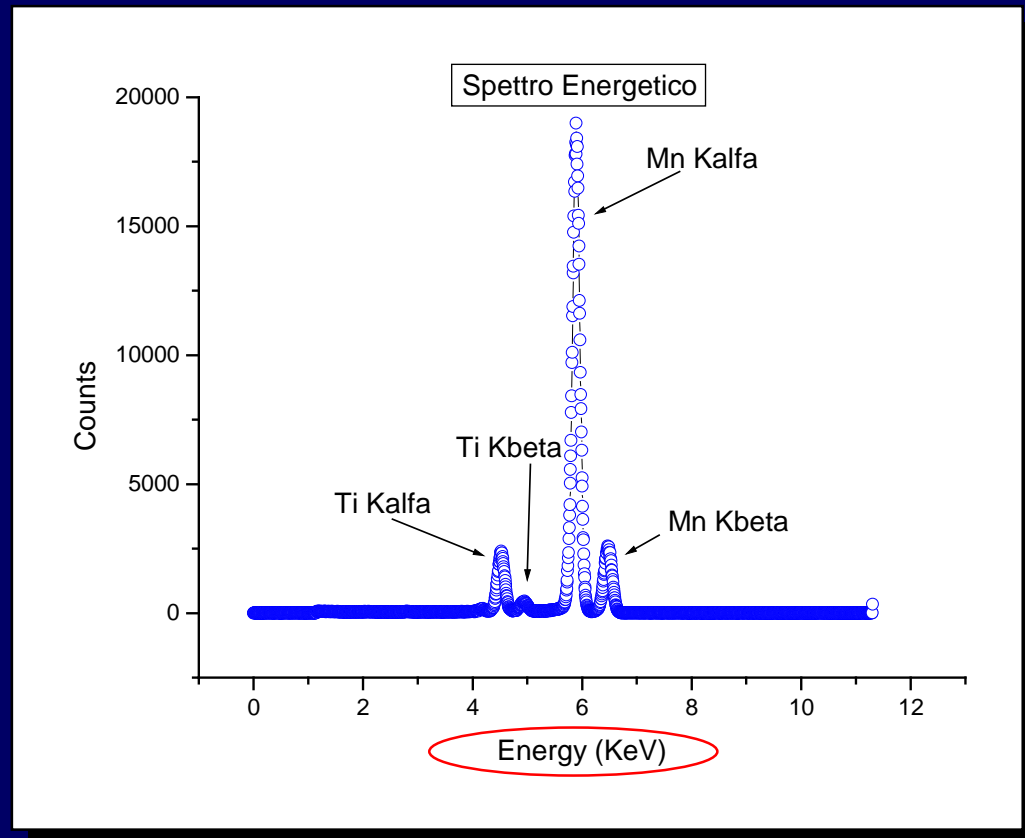
Per risalire alla posizione del picco $K\alpha$ del manganese, lo si isola dallo spettro, si assegna l'errore sui punti e si esegue su di esso un best fit gaussiano, calcolando la posizione del centro.



Studi di stabilità

Come si ottiene uno spettro energetico - 3/3

In seguito, conoscendo la posizione del picco in canali, si impone che il valore ottenuto sia pari esattamente a 5,895 KeV (senza errore). Il ragionamento appena esposto, anche se può sembrare semplicistico, ci dà comunque una buona indicazione per lo studio della stabilità del rivelatore: ci interessano infatti le fluttuazioni relative. Si ottiene dunque la relazione:



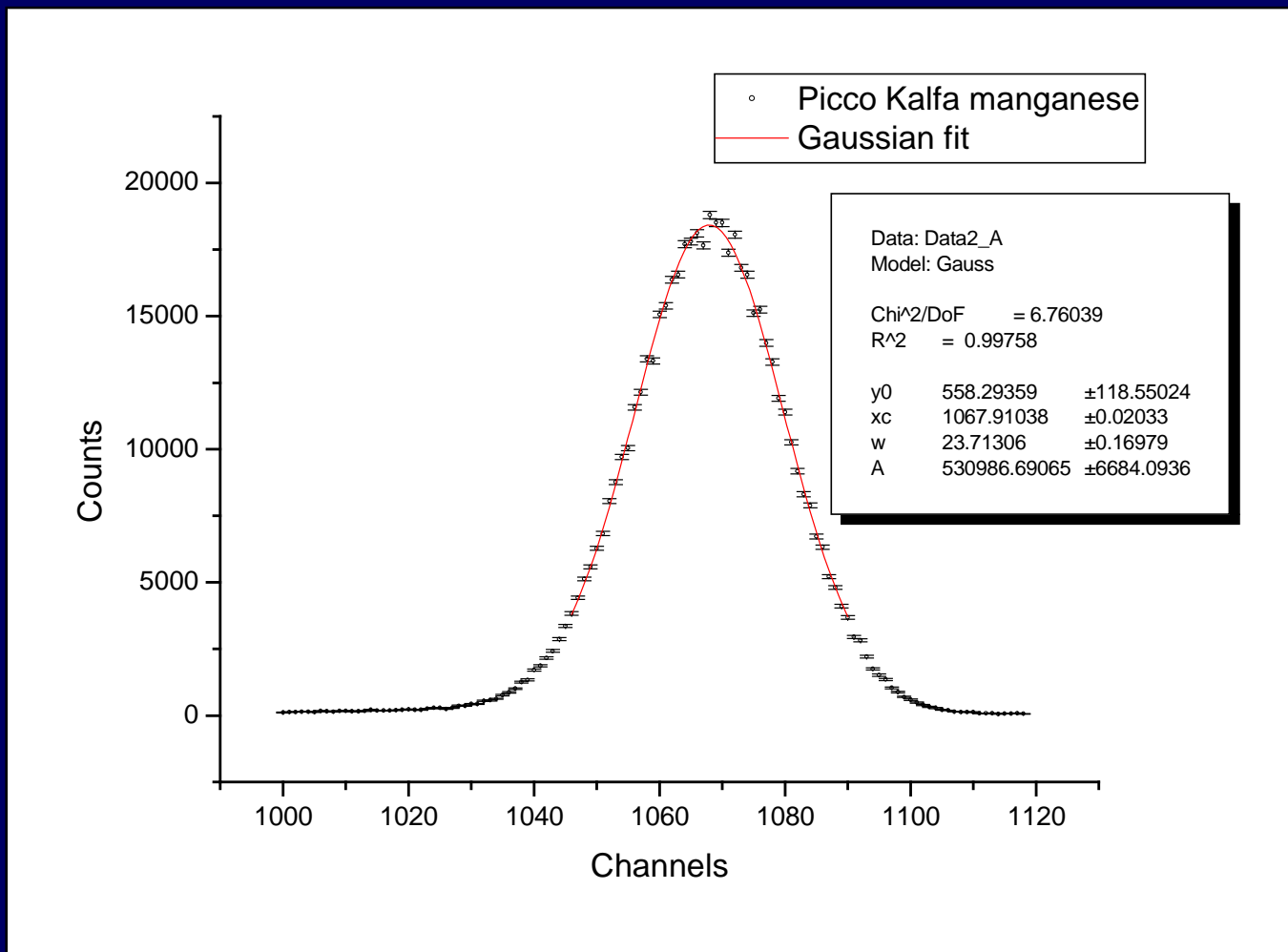
$$1\text{canale} = 0,00552 \pm 0,00002\text{KeV}$$

Studi di stabilità

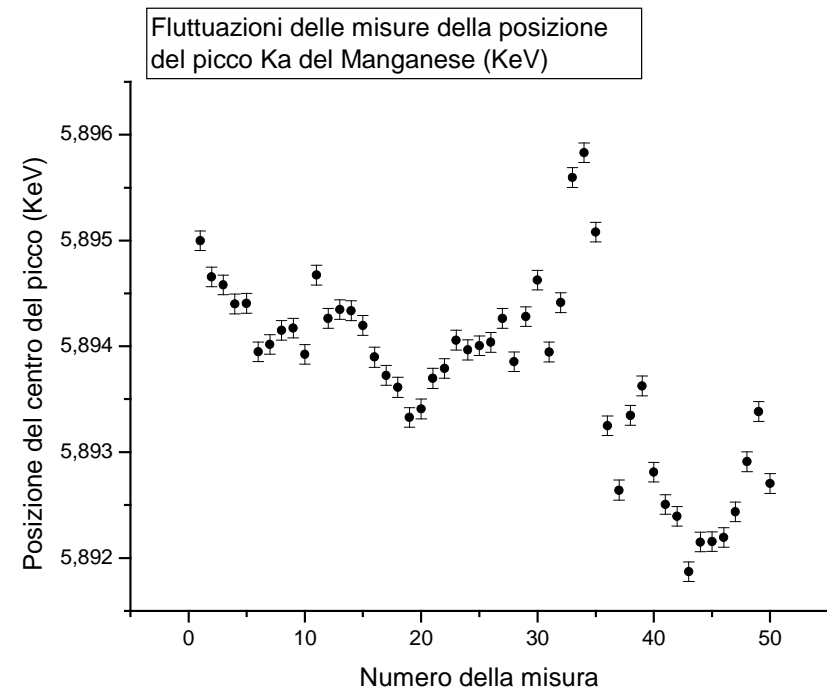
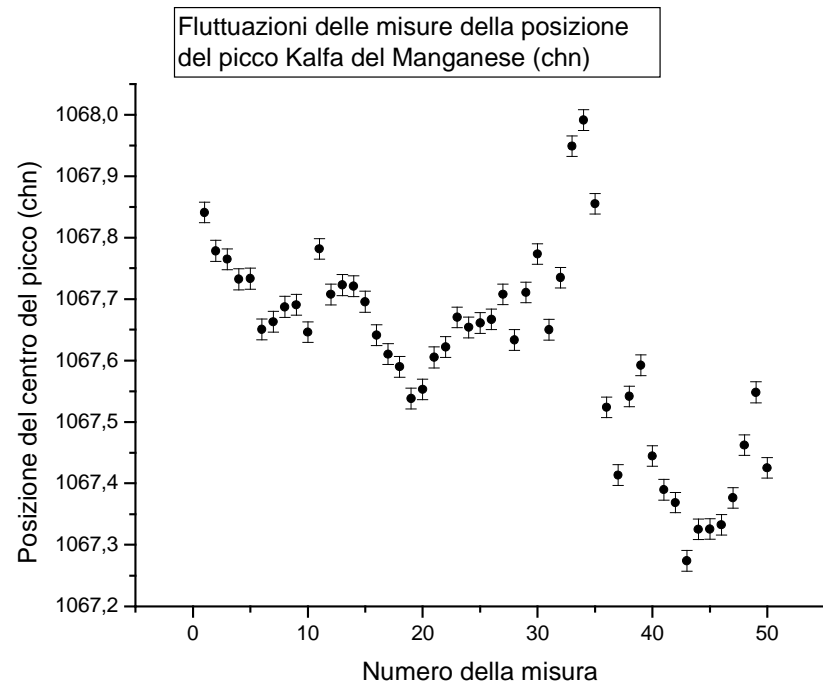
- **Studio di stabilità viene effettuato partendo dagli spettri misurati, osservando le variazioni nel tempo della posizione dei picchi**
- **La variazione nel tempo viene osservata prendendo la posizione dei picchi nelle 50 misure a nostra disposizione, prese una ogni ora, in modo da esaminare le fluttuazioni delle posizioni dei picchi in un arco di tempo appunto di 50 ore.**
- **Lo studio di stabilità condotto in questo lavoro è stato eseguito su tutti i picchi presenti nello spettro.**

Picco K_{α} Manganese

15° misura

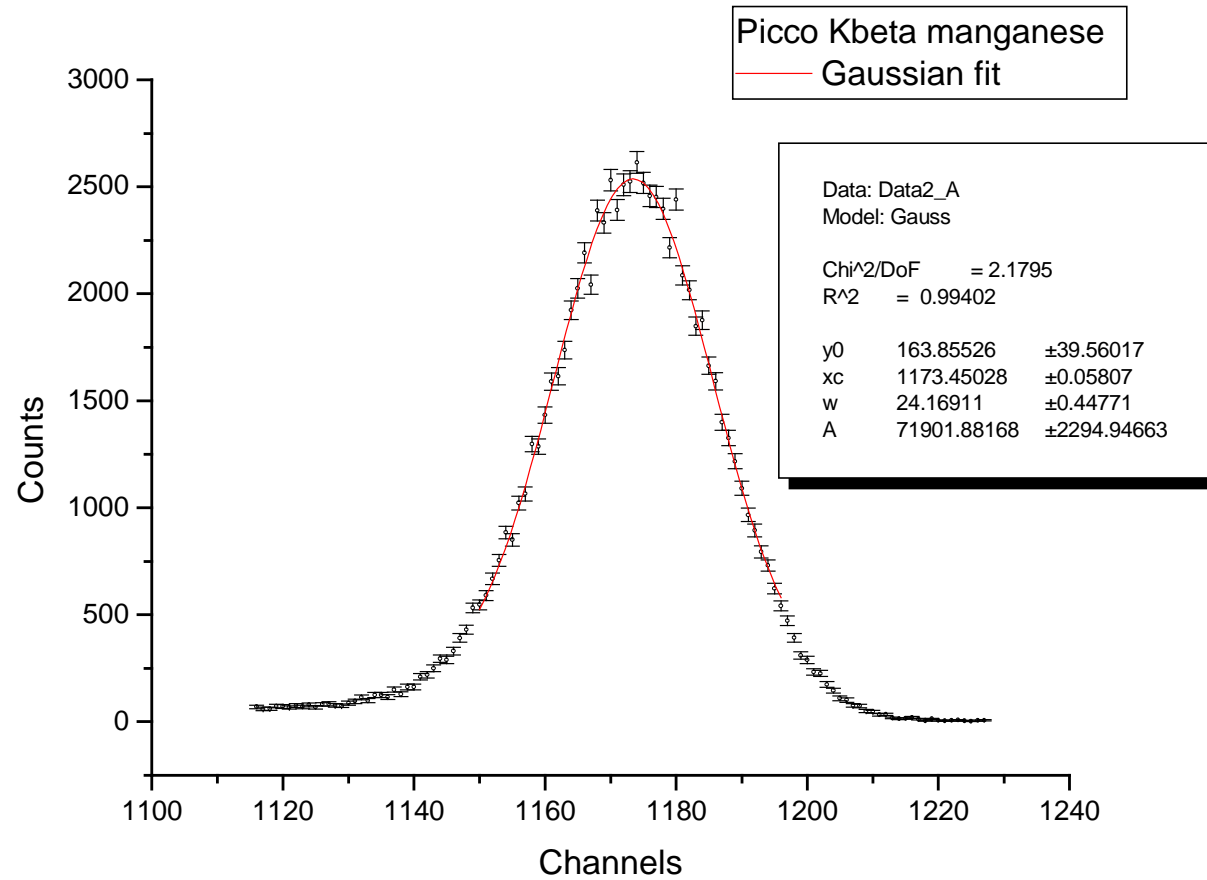


Studio di stabilità del picco K_{α} Manganese

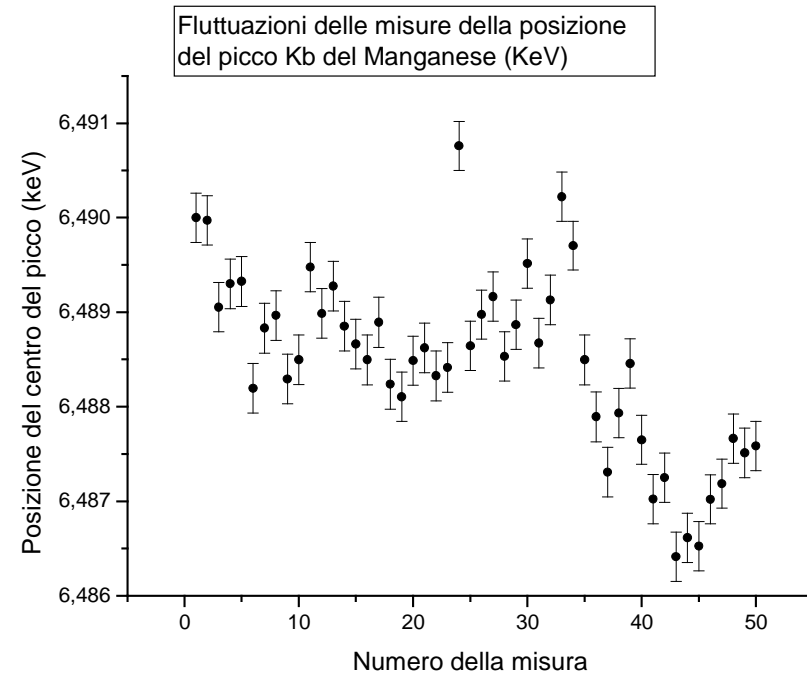
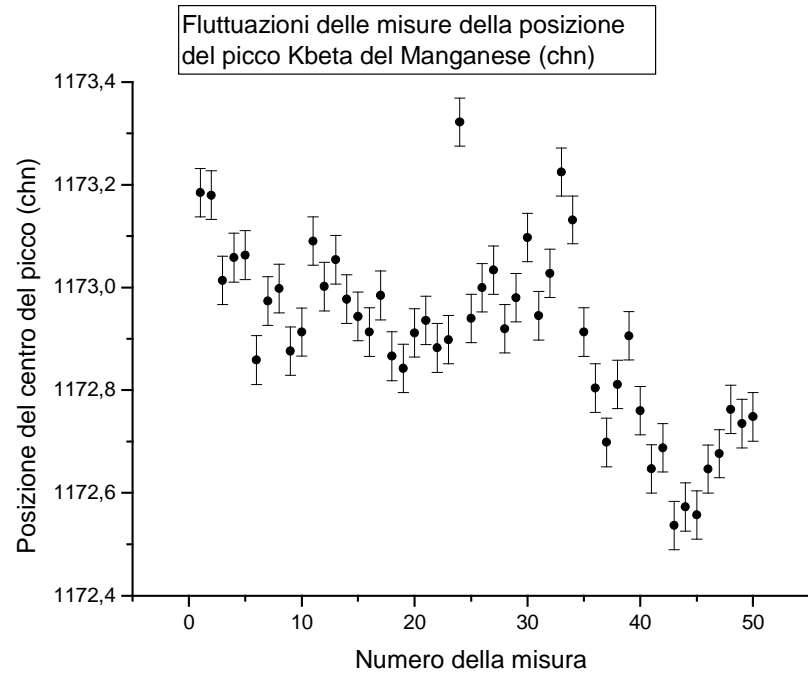


Picco K_{β} Manganese

18° misura



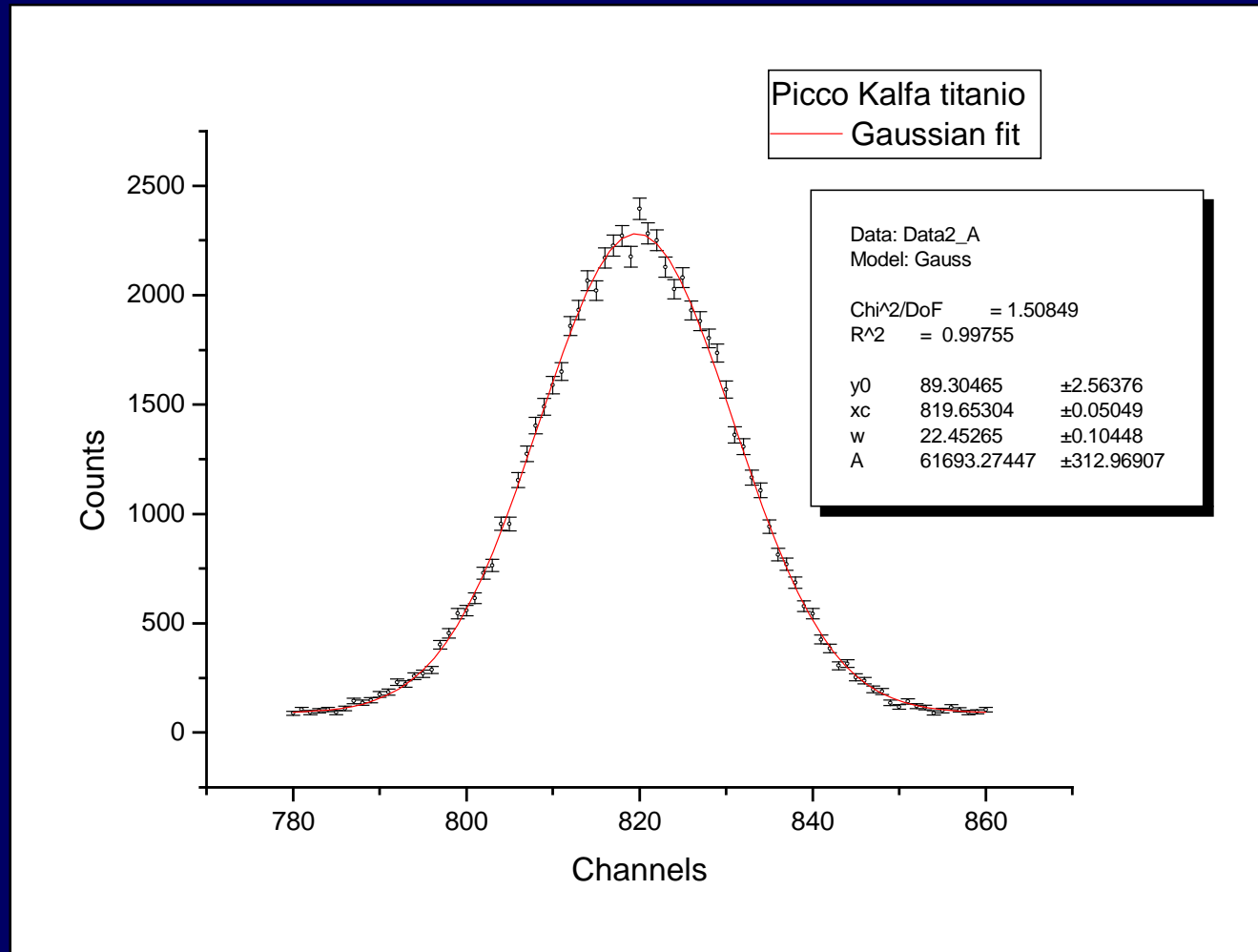
Studio di stabilità del picco K_{β} Manganese



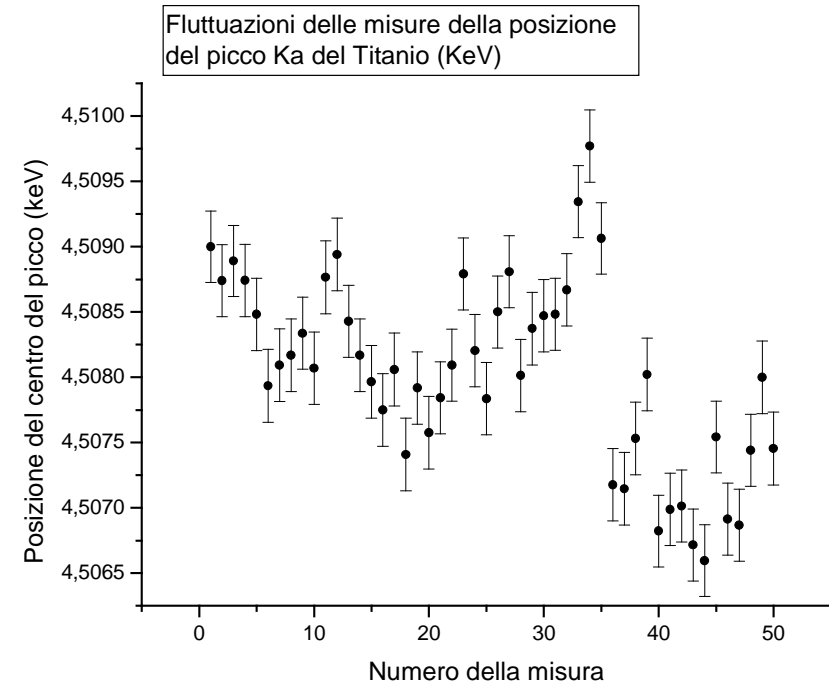
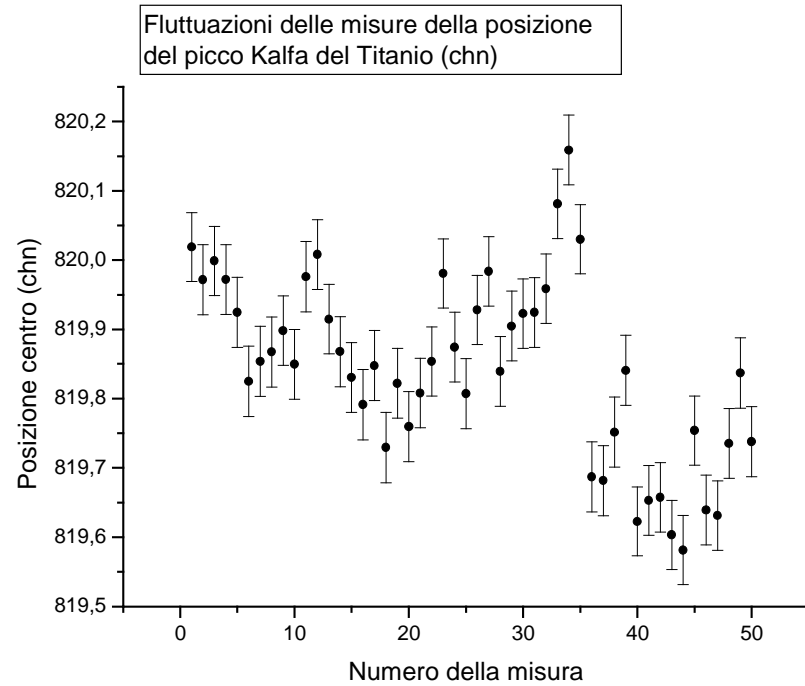
Per quanto riguarda gli errori sulla posizione del picco notiamo che essi sono circa 3 volte maggiori rispetto al caso antecedente: tutto ciò è semplicemente imputabile al fatto che il segnale relativo al picco Mn K_{α} è più definito e chiaro, avendo ovviamente una statistica più alta, rispetto a quello del Mn K_{β}

Picco K_{α} Titanio

41° misura

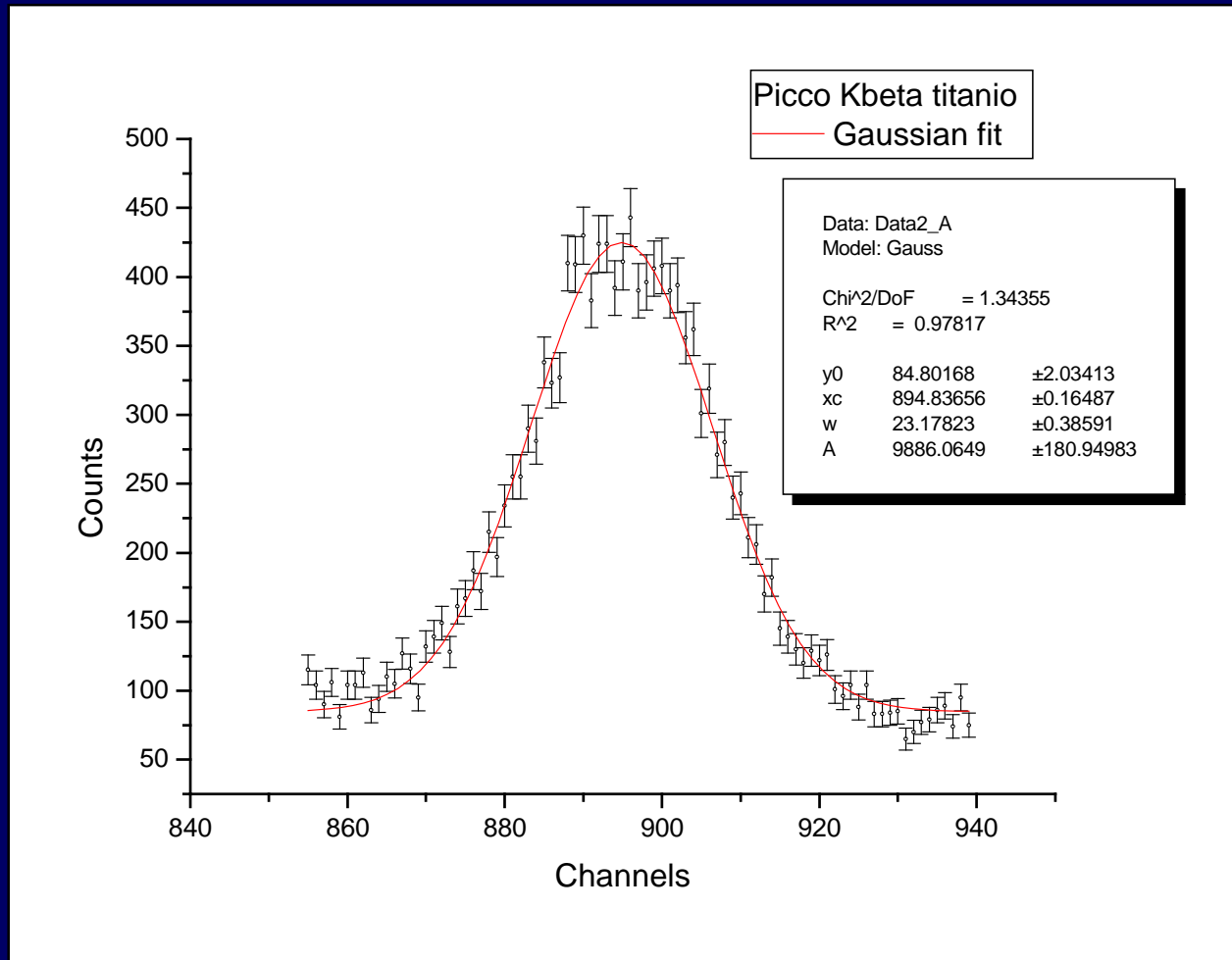


Studio di stabilità del picco K_{α} Titanio

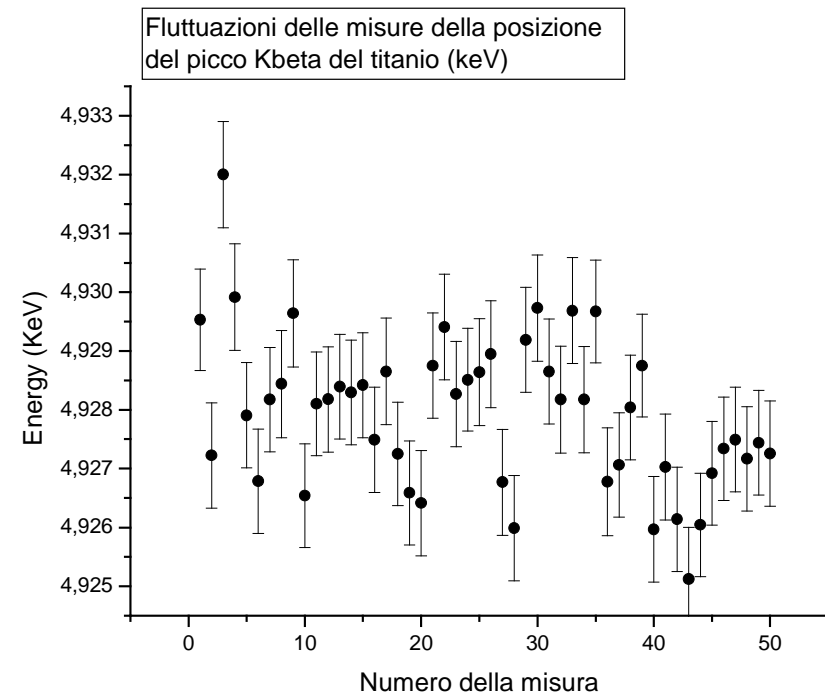
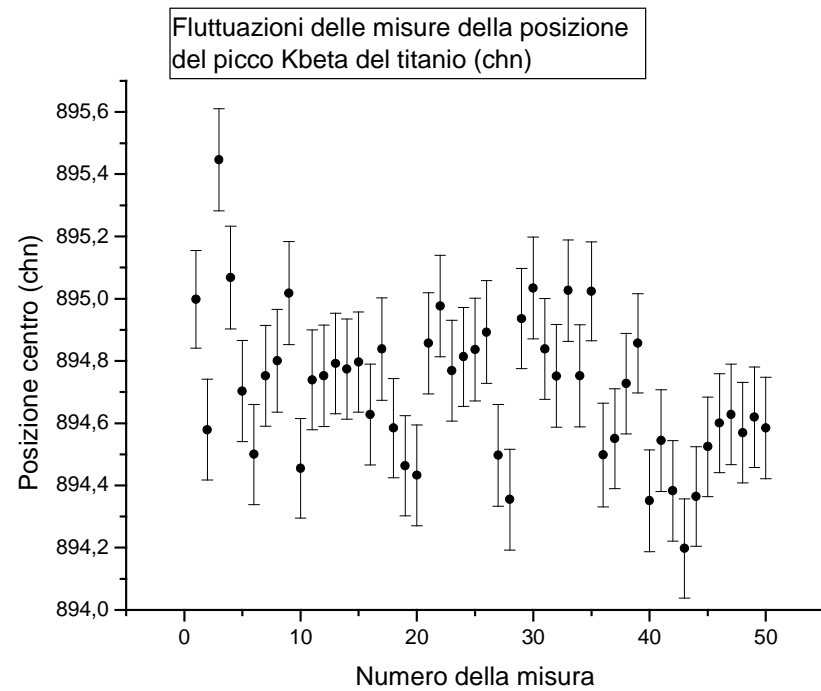


Picco K_{β} Titanio

25° misura

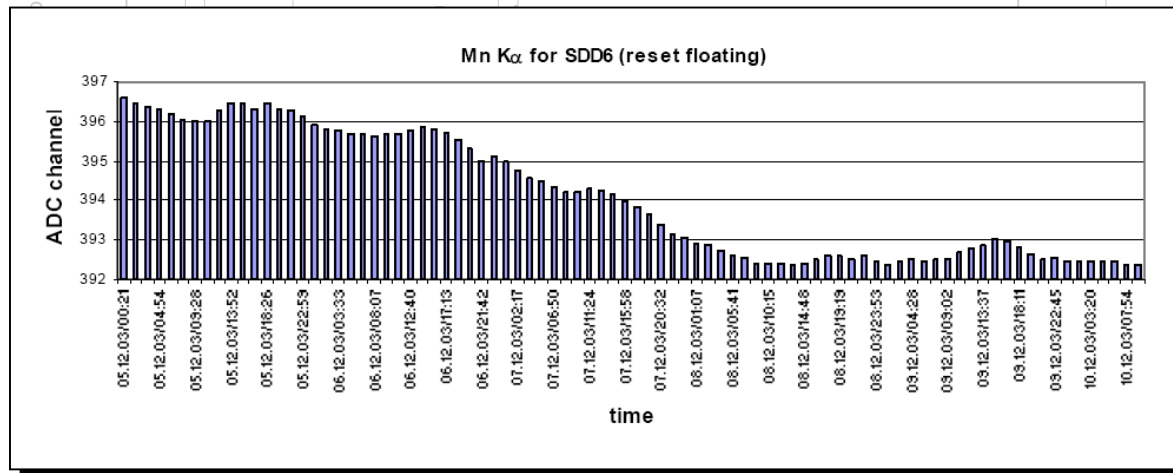


Studio di stabilità del picco K_{β} Titanio



Conclusioni degli studi di stabilità

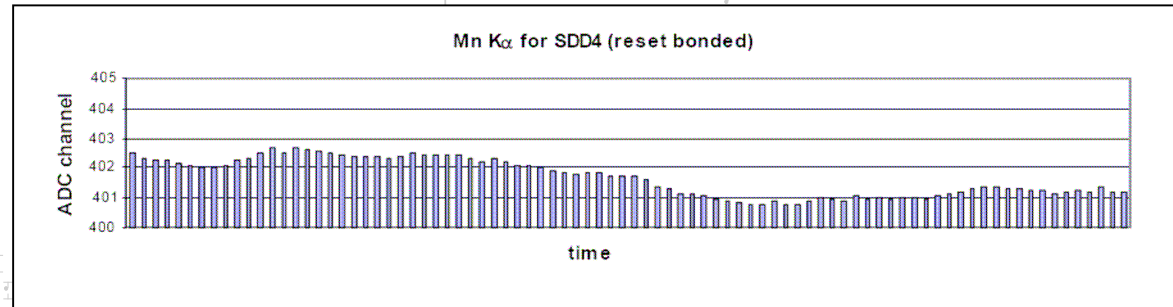
- L'andamento delle misure di stabilità è molto simile per i quattro picchi studiati
- Ciò che risalta all'occhio è un'instabilità a lungo termine, ma su questo punto occorre fare una precisazione: come possiamo vedere nel nostro lavoro l'instabilità massima è dell'ordine di soli 4 eV (dunque l'errore in termini di sigma è dell'ordine di 2 eV) ed è totalmente riconducibile alle specifiche dei rivelatori e dell'elettronica read - out, che difatti offrono ottime prestazioni nel campo della stabilità. Il risultato ottenuto è stato il frutto di un processo effettuato per minimizzare quest'instabilità a lungo termine che nelle misure preliminari ricopriva un ruolo preponderante ed era associata alla variazione della temperatura.



Misure di stabilità dopo l'applicazione di un criostato APD ad uno stato per la stabilizzazione della temperatura.

Conclusioni degli studi di stabilità

Misure di stabilità dopo l'intervento su una struttura floating del rivelatore, supposta influenzare il fet di output



Bisogna quindi sottolineare che il sistema SDD + elettronica read – out studiato in questa tesi è il frutto di questo processo di miglioramento che ha portato l'instabilità a lungo termine ai minimi valori possibili imputabili a questo punto solamente alle specifiche dei rivelatori e alle fluttuazioni statistiche del segnale fornito dalla sorgente di Fe 55.

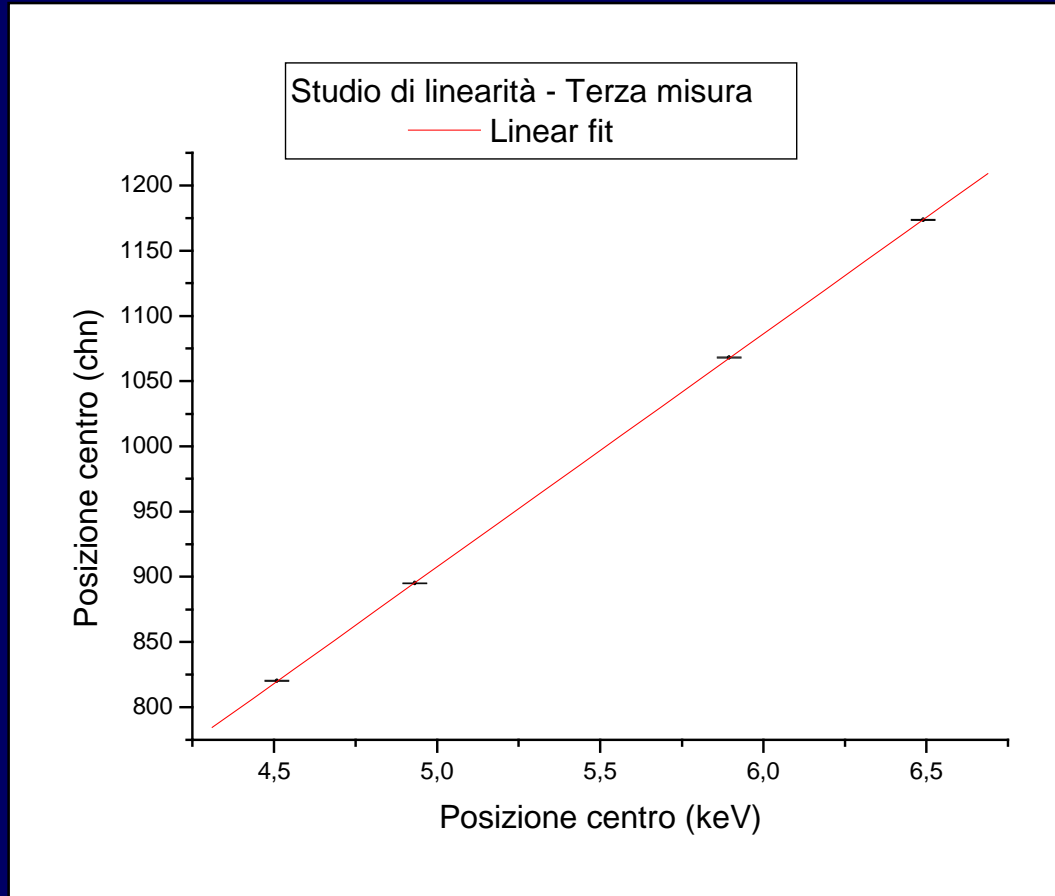
Come possiamo vedere dallo studio svolto gli errori sistematici riconducibili ad una delle sorgenti potenziali più importanti, la stabilità appunto, sono dell'ordine di 2-3 eV.

Da questo punto di vista risulta quindi fattibile una misura dello spostamento e dell'allargamento con una precisione di qualche eV per l'idrogeno e il deuterio kaonici, obiettivo di SIDDHARTA.

Studi di linearità - 1\3

- Lo studio di linearità viene condotto prendendo in esame uno spettro energetico relativo ad una misura scelta in maniera del tutto arbitraria tra le cinquanta a disposizione (la terza nel nostro caso), e andando a graficare la posizione del centro dei picchi in canali in funzione delle energie tabulate relative alle righe $K\alpha$ e $K\beta$ del manganese e del titanio.
- Per quanto riguarda l'errore sulla posizione dei picchi misurata in canali, occorre effettuare una breve presentazione per illustrare il modo in cui è stato calcolato.
- Questo errore, di natura puramente statistica con un valore che può variare dal centesimo al decimo di canale a seconda del picco considerato, verrà portato a 0,5 canali sommando un contributo di natura sistematica che terrà conto della stabilità del rivelatore e del limite della discretizzazione (energia/canale) che comporta delle fluttuazioni energetiche dell'ordine di 2 – 3 eV (0,5 canali). Naturalmente il lavoro qui proposto rappresenta uno studio preliminare (in quanto esso andrebbe effettuato su più di quattro punti), ma comunque costituisce una buona indicazione relativa alla linearità del rivelatore.

Studi di linearità - 2\3 Best fit lineare



Il dato che risalta agli occhi è il valore ottenuto per il chi quadrato, il quale ci indica che il comportamento della relazione tra canali ed energia è lineare con una buona approssimazione. Come possiamo vedere l'errore sistematico relativo alla linearità è di circa 2eV

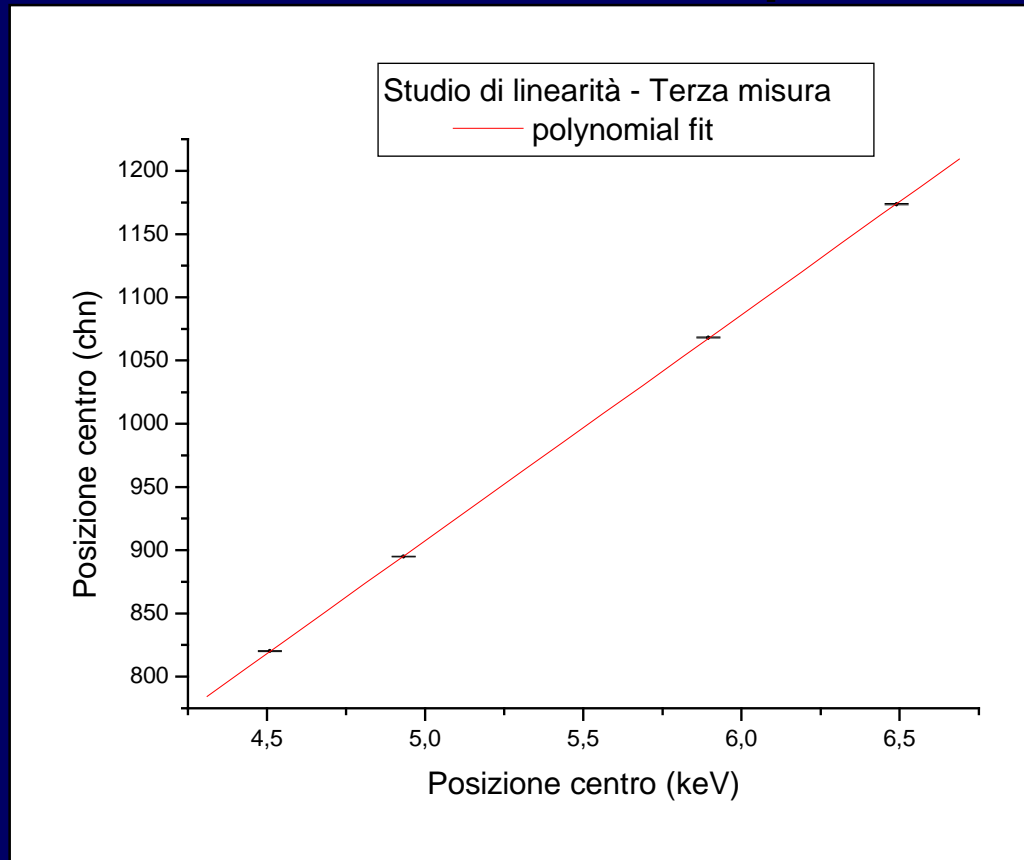
$$\text{canale} = a + b \cdot \text{energia (keV)}$$

$$a = 14,063 \pm 1,77 \quad b = 178,72 \pm 0,32$$

$$\frac{\chi^2}{DoF} = 1,25$$

Studi di linearità - 3\3

Best fit con un polinomio di secondo



Questo tipo di fit è stato eseguito al fine di effettuare uno studio preliminare della linearità andando a verificare la rilevanza del coefficiente del termine al quadrato. A prima vista possiamo notare che il valore di c è consistente, entro l'errore, col valore zero. Risulterà anche interessante il confronto del valore del chi quadrato ottenuto in questo caso con quello ottenuto effettuando un best fit lineare, che proporremo qui di seguito.

$$\text{canale} = a + b \cdot \text{energia(keV)} + c \cdot \text{energia(keV)}^2$$

$$a = 9,73 \pm 19,78$$

$$c = -0,15 \pm 0,67$$

$$b = 180 \pm 7,33$$

$$\frac{\chi^2}{DoF} = 2,46$$

Conclusioni degli studi di linearità

Lo studio di linearità condotto, anche essendo preliminare, ha confermato la supposizione di dipendenza lineare tra canali ed energia. Inoltre, i risultati ottenuti ci indicano che gli errori sistematici riconducibili ad una delle sorgenti potenziali più importanti, la linearità appunto, sono ridotti intorno alla stessa quantità degli errori statistici presenti: da questo punto di vista risulta quindi fattibile una misura di epsilon e di gamma con una precisione di qualche eV per l'idrogeno ed il deuterio kaonici, obiettivo di SIDDHARTA.

Conclusioni generali - 1\2

- Come abbiamo potuto osservare nella parte sugli studi di stabilità con le relative conclusioni, la fluttuazione massima in energia del sistema SDD + elettronica read – out nell'arco di 50 ore è di soli 4 eV. Questo valore, che indica delle buone prestazioni in stabilità, fa sì che uno degli errori sistematici più importanti, la stabilità appunto, sia ridotto alla stessa quantità degli errori statistici presenti, fornendo una prima risposta positiva alla domanda cui cerca di dare una risposta questo lavoro.
- Lo studio di linearità presentato in questa tesi ricopre anch'esso un ruolo di fondamentale importanza. I risultati preliminari ottenuti dimostrano appunto una relazione lineare tra la risposta dell'elettronica di lettura (canali) e l'energie dei raggi X misurati, con importanti conclusioni sia per gli errori sistematici che per la strategia di calibrazione in energia dell'esperimento, come discusso in questo lavoro.

Conclusioni generali - 2\2

Possiamo quindi affermare che la misura delle quantità epsilon (spostamento) e gamma (allargamento), dovute alla presenza dell'interazione forte, relative alle transizioni nell'idrogeno e nel deuterio kaonici sul livello 1s con una precisione di qualche eV risulta fattibile, rendendo SIDDHARTA a DAFNE l'unico esperimento al mondo in grado di effettuare tale fondamentale misura, migliorando nel caso dell'idrogeno kaonico il risultato esistente di un ordine di grandezza ed effettuando la prima misura al mondo per il deuterio kaonico.