

Università degli Studi di Padova

RELAZIONE DI LABORATORIO: TIMING RAPIDO

Laboratorio di fisica, primo anno LM

Davide Chiappara

Università di Padova, facoltà di fisica,
davide.chiappara@studenti.unipd.it
Matricola: 1153465

Ivan Di Terlizzi

Università di Padova, facoltà di fisica,
ivan.diterlizzi@studenti.unipd.it
Matricola: 1155188

Enrico Lusiani

Università di Padova, facoltà di fisica,
enrico.lusiani@studenti.unipd.it
Matricola: 1153399

Anno accademico 2016-2017

Sommario

La seguente è la relazione sull'esperimento di timing rapido eseguito da Chiappara Davide, Di Terlizzi Ivan e Lusiani Enrico facenti parte del gruppo 8. I dati sono stati raccolti presso il laboratorio di fisica in via Loredan in data 20-21-24 Ottobre 2016, e sono stati successivamente analizzati durante lo stesso anno accademico.

L'esperienza consiste nello studio di un sistema di acquisizione di intervalli temporali, tramite ottimizzazione dei parametri strumentali e valutazione della risoluzione. Si sono utilizzati sia un sistema analogico che un sistema digitale.

Indice

1	Esecuzione esperimento	1
2	Analisi Dati	2
2.1	Analisi preliminare dei segnali	2
2.2	Calibrazione in Energia	2
3	Calibrazione in Tempo	5
3.1	Studio della risoluzione temporale al variare dell'energia	7
3.2	Velocità della luce	12
3.3	Analisi dei dati digitali	14
4	Conclusioni	20
5	Appendici	20
5.1	Calibrazione in energia	20
5.2	Calibrazione in tempo	23
5.3	Misura del tempo di ritardo dei cavetti	27

1. Esecuzione esperimento

L'apparato strumentale consiste di una serie di moduli (amplificatori di alto voltaggio, un fan in/out, un amplificatore analogico, una cassetta di ritardi, un CFTD e un TAC), due scintillatori organici di 5 cm ciascuno collegato a un fotomoltiplicatore XP2020, un oscilloscopio, un ADC ed un digitizer. Durante la prima sessione di laboratorio si è preso confidenza con tutte le parti dell'apparato strumentale e si è fatta la calibrazione di tale apparato. Come prima cosa si sono collegati i rivelatori al fan in/out e il segnale è stato mandato all'oscilloscopio, in modo che fosse possibile vedere il segnale e misurarne ampiezza, tempo di salita e tempo di discesa. Poi si è ripetuto il procedimento collegando l'amplificatore, e si sono anche collegati il CFD e il TAC per la prova della misura di tempo. Una volta capito il funzionamento dei vari moduli, si è proceduto con la regolazione della soglia: dopo aver collegato tutti i moduli all'oscilloscopio si è visto il segnale del CFTD in concomitanza con il segnale in uscita direttamente dall'amplificatore: in questo modo è stato possibile verificare che non ci fossero falsi eventi, e regolando un trimmer si è scelta la soglia del CFTD in modo che fosse la più bassa possibile ma senza registrare falsi eventi a causa del rumore elettronico. Infine si è preso un file di prova per verificare il corretto funzionamento del sistema di misura.

Subito dopo si è passati alla vera e propria calibrazione in energia: per prendere i dati si è impostato il sistema di acquisizione in modo che triggherasse singolarmente sui segnali provenienti dal primo rivelatore e poi su quelli provenienti dal secondo rivelatore. Si sono quindi acquisiti due campioni di dati per una durata di circa 15 minuti l'uno, che contenessero entrambe le spalle Compton del decadimento del sodio, da usare per la calibrazione in energia.

Durante la seconda sessione si è passati alla calibrazione in tempo e alla misura del ritardo dei cavi forniti. Per farla, si sono prese misure analoghe a quelle prese per la calibrazione in energia andando a modificare i ritardi introdotti, e poi si sono studiati i grafici risultanti. Dopodiché si sono misurati i ritardi legati ai cavetti aggiungendoli in serie all'uscita della scatola dei ritardi, e si sono presi altri campioni.

Successivamente si è passati allo studio della risoluzione temporale in funzione del delay: si è cambiato il cavo del delay utilizzato dal CFTD e si sono studiate le risoluzioni al variare della lunghezza di tale cavo, in modo da trovare la lunghezza ottimale per la presa dati successiva. Inoltre, collegando una delle uscite del CFTD assieme al CF MONITOR all'oscilloscopio si è modificato il trimmer WALK ADJ in modo tale che l'intersezione dei segnali bipolari visti sull'oscilloscopio coincidesse con la baseline del segnale stesso, e che quindi la misura di tempo fosse la migliore possibile.

Una volta effettuate tutte le calibrazioni e le regolazioni necessarie si è deciso di prendere una misura che potesse dare una stima della risoluzione temporale al variare dell'energia, così si è sostituita la sorgente di ^{22}Na con una sorgente di ^{60}Co (che emette fotoni in coincidenza più energetici, sebbene non collineari) e si è verificato che tutte le regolazioni dell'apparato fossero quelle ottimali per prendere una misura che fosse la migliore possibile. Tale misura è stata presa nell'intervallo tra la seconda e la terza sessione di laboratorio (è servito un campione più lungo considerando che i fotoni erano collineari solo come accidente).

La terza sessione è stata dedicata alla misura della velocità della luce e all'utilizzo del sistema di acquisizione digitale. Per misurare la velocità della luce, come prima cosa, si è posizionata la sorgente di ^{22}Na , che decade attraverso due fotoni collineari e si è controllato che tutti i parametri della strumentazione (in particolare i ritardi inseriti nella cassetta, il filo del delay del CFTD, la soglia e il Walk Adj)

fossero quelli ottimali per la presa dati. Dopodiché si sono allontanati i due rivelatori il più possibile e si è avvicinata la sorgente al rivelatore 1, triggherando su tale rivelatore si sono osservati i segnali in coincidenza; poi si sono cambiati i valori dell'amplificatore e della cassetta dei ritardi per fare in modo che i segnali avessero una larghezza di circa 150 ns e fossero distanziati il più possibile. Settato l'apparato, si è presa una misura di circa un'ora con la sorgente vicina al primo rivelatore e un'altra con la sorgente vicina al secondo rivelatore, e si sono misurate le distanze caratteristiche del sistema.

Come ultima cosa si è passati al sistema di acquisizione digitale: si sono collegati i cavi del sistema (preimpostato) di acquisizione digitale e si è preso un campione in uscita dai due rivelatori indipendentemente lungo circa una ventina di minuti.

2. Analisi Dati

2.2.1 Analisi preliminare dei segnali

Si riportano i dati ottenuti dall'analisi dei segnali dei rivelatori direttamente sull'oscilloscopio. Il segnale ottenuto è simile per entrambi i rivelatori, sono infatti entrambi negativi e presentano le seguenti caratteristiche:

Rivelatore	Ampiezza [V]	Errore [V]	Tempo salita [ns]	Errore [ns]	Tempo discesa [ns]	Errore [ns]
1	1.20	0.03	4.4	0.6	11.2	0.6
2	1.16	0.03	3.8	0.3	10.8	0.6

Tabella 1: Le misure preliminari in uscita dei rivelatori

Per misurare i tempi di salita (allontanamento dalla baseline) e di discesa si è misurato il tempo impiegato dal segnale per passare dal 10% al 90% dell'ampiezza massima per la discesa e viceversa per la salita; gli errori sono stati stimati come semplici errori associati alla lettura da oscilloscopio.

2.2.2 Calibrazione in Energia

Gli spettri presi presentano i classici Compton edge relativi ai fotoni a 511KeV e 1275KeV riconducibili rispettivamente all'annichilazione del positrone prodotto dal decadimento della sorgente di sodio ed un elettrone presente nel materiale ed il decadimento gamma del neon. Le due spalle Compton possono essere interpolate tramite una gaussiana di cui ci si ricava centroide e sigma. I centroidi non corrispondono però con i Compton edge veri e propri, che valgono 340KeV e 1062KeV per i due fotoni sopracitati: infatti al crescere della sigma si osserva uno shift verso sinistra dei centroidi relativi alle due spalle Compton per effetto della risoluzione finita dello strumento.

Si può però correlare il parametro adimensionale $\frac{s}{c}$ con il valore in KeV della sigma e quest'ultima al valore dello shift tramite delle funzioni di risposta, in maniera tale da poter associare al centroide un valore in energia pari a $E_{\text{centroide}} = E_{\text{CE}} - E_{\text{shift}}$. Nelle tabelle sottostanti si possono leggere i parametri

ottenuti interpolando i Compton edge e le conseguenti correzioni del valore in energia dei centroidi¹. Poichè questa procedura è stata effettuata a mano non è stato possibile fare una stima degli errori associati alle energie dei Compton edge.

Centroide	s	s/C	σ [KeV]	Shift [KeV]	Centroide [KeV]
239.7	48.4	0.202	38	57	283
801.9	78.0	0.0972	77	132	930

Tabella 2: *Procedura calibrazione del rivelatore 1*

Centroide	s	s/C	σ [KeV]	Shift [KeV]	Centroide [KeV]
297.1	60.4	0.203	38	57	283
930	92.7	0.0951	78	132	930

Tabella 3: *Procedura calibrazione del rivelatore 2*

Avendo quindi due coppie di valori corrispondenti ai due Compton edge, è possibile ottenere un grafico che permette di calibrare gli spettri in energia. Essendo i punti a disposizione per ogniuna delle interpolazioni solamente due non si è potuto fornire gli errori relativi ai parametri dell'interpolazione. Inoltre per trovare i centroidi è stata eseguita la correzione dovuta alla finitezza della risoluzione sopra descritta; dato che questa correzione fa uso di grafici ottenuti sperimentalmente senza errori, non si è ritenuto opportuna la stima di errori legati ai parametri di calibrazione.

¹I grafici delle interpolazioni si possono vedere nelle *appendici*.

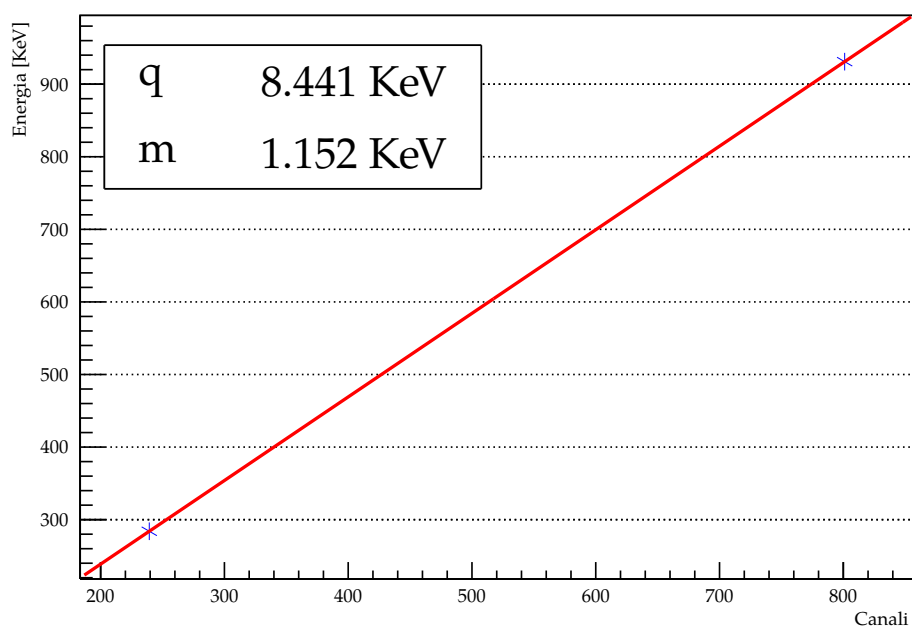


Figura 1: Calibrazione in energia del rivelatore R1

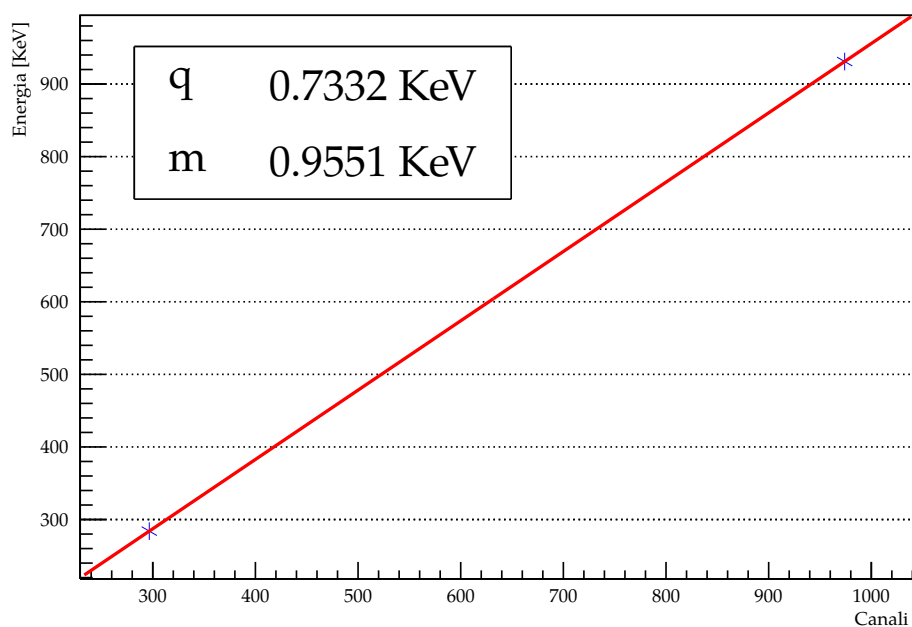


Figura 2: Calibrazione in energia del rivelatore R2

3. Calibrazione in Tempo

A questo punto si è proceduto con la calibrazione in tempo, acquisendo lo spettro del TAC (CH1 canale dell'MCA) avendo settato differenti ritardi tramite un'apposita cassetta dei ritardi. Interpolando tali spettri con una gaussiana si è potuto ottenere nuovamente centroide con relativo errore corrispondenti ai vari ritardi della delay unit (tra i 4 ns ed i 30 ns), ed effettuando quindi un'interpolazione lineare. Nella seguente tabella si possono vedere i risultati dell'interpolazione gaussiana usati per la calibrazione. Si presenta qui per brevità solo un grafico contenente tutti gli spettri insieme privi di fit (Fig 3).².

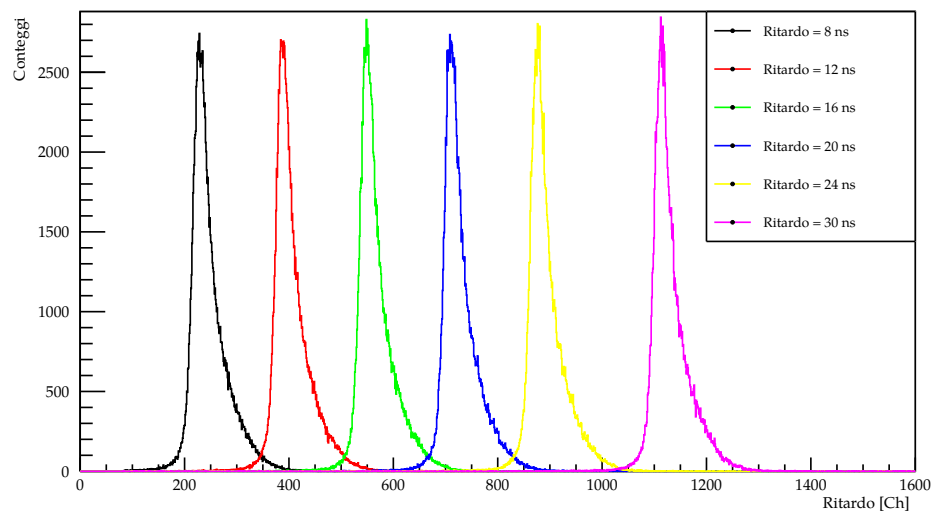


Figura 3: Spettri della misura della differenza di tempo tra i due rivelatori al variare del ritardo nominale impostato con la cassetta dei ritardi. Lo spettro non è stato calibrato per far vedere la corrispondenza canale/tempo.

Ritardo [ns]	Centroide	σ centroide
8	230.3	0.1
12	389.1	0.1
16	549.9	0.2
20	711.5	0.1
24	876.4	0.1
30	1114	0.1

Tabella 4: Calibrazione della delay unit

La dipendenza lineare attesa è stata ben riscontrata. A seguito di tale calibrazione è stato possibile ricavare il ritardo associato all'inserimento di cavi LEMO tra il Delay e lo stop del TAC ricavando il

²i singoli grafici di interpolazione gaussiana possono essere visti in Appendice.

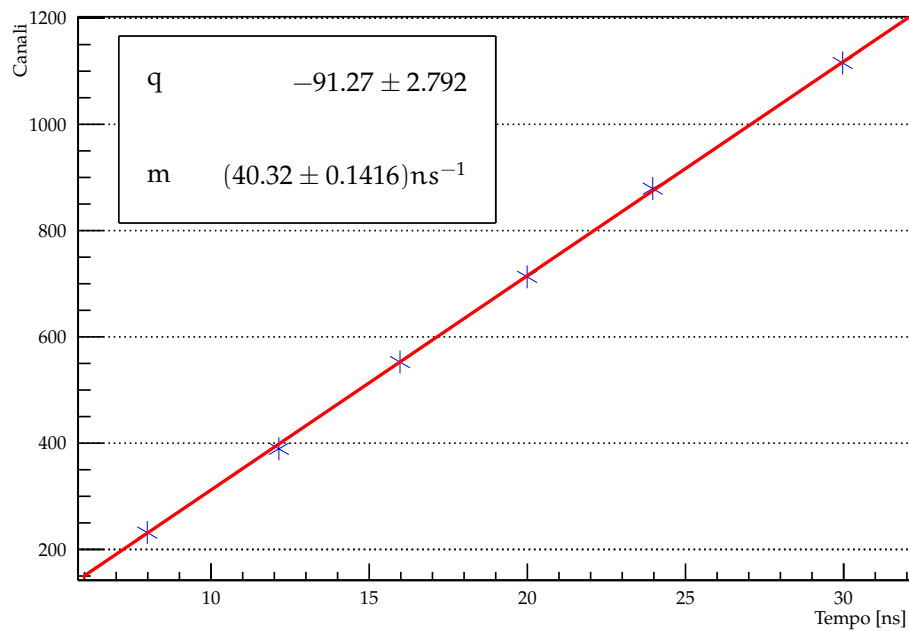


Figura 4: Calibrazione temporale del TAC

centroide dai vari spettri del TAC ed associandovi un ritardo ricavato tramite i parametri del precedente fit. La relazione lineare che vede in ascissa i tempi ed i relativi centroidi in ordinata è stata quindi invertita ricavandosi per propagazione gli errori sui nuovi parametri ed ottenendo i seguenti risultati. Il ritardo associato ai cavetti di diversa lunghezza è molto simile a quello indicato, la differenza è forse dovuta ad approssimazioni o ad effetti strumentali.

Cavo	Centroide	Sigma centroide	Tempo [ns]	Sigma tempo [ns]
3 ns	1241	0.1	3.0	0.1
5 ns	1323	0.2	5.1	0.1
6 ns	1371	0.2	6.3	0.1

Tabella 5: Stima del ritardo introdotto dai cavi

Infine si è verificato che il delay esterno del CFD che massimizzasse la risoluzione fosse quello di 4ns, ottenuto tramite un apposito cavo LEMO. Si sono confrontati tre diversi cavi che determinassero un ritardo da 3ns, 4ns e 5ns acquisendo lo spettro del TAC e limitandosi a confrontare solamente le sigma essendo i centroidi sostanzialmente uguali. Ciò che si è osservato è che il picco con sigma minore era quello relativo al ritardo da 4ns, determinando quindi la scelta di usare tale cavo per le misure successive. Di seguito in tabella i risultati dei fit gaussiani in canali effettuati sugli spettri³.

³Come prima, nelle appendici si possono vedere i grafici delle interpolazioni gaussiane.

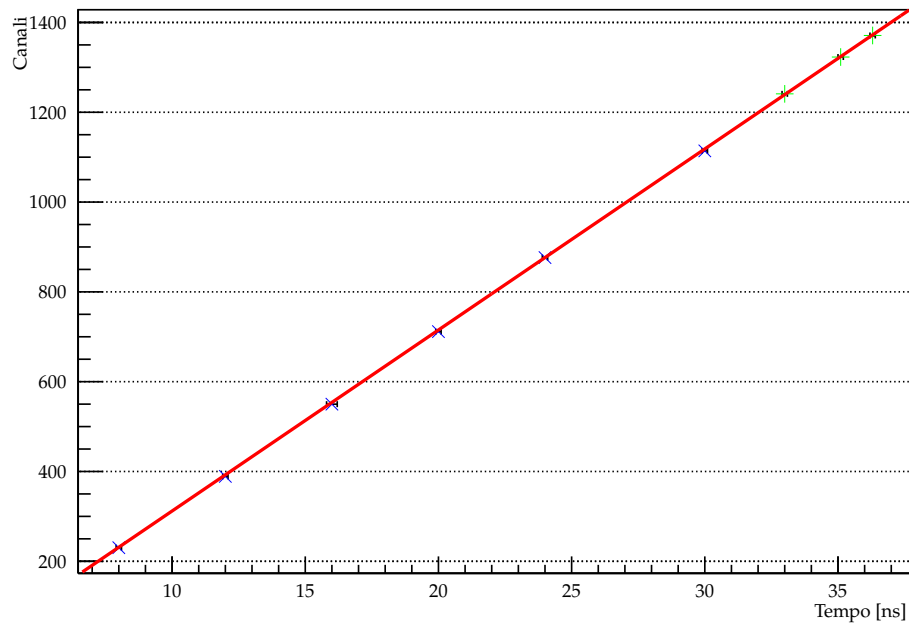


Figura 5: Calibrazione temporale e inserimento cavetti di ritardo nel sistema

Cavi	Centroide	Errore Centroide	Sigma	Errore sigma
3 ns	1270	0.1	11.29	0.01
4 ns	1263	0.1	11.11	0.03
5 ns	1269	0.1	13.09	0.02

Tabella 6: Stima del ritardo introdotto dai cavi

3.3.1 Studio della risoluzione temporale al variare dell'energia

Una volta ultimata la calibrazione, si è voluto andare a stimare la risoluzione temporale dell'apparato al variare dell'energia depositata sui rivelatori. Per farlo, si sono analizzati i dati con riferimento all'energia depositata all'interno dei rivelatori: quando la media dell'energia depositata nei due rivelatori era sopra una certa soglia (o al di fuori della finestra prescelta) si è rimosso tale dato dal campione: ripetendo più volte questo procedimento al variare della soglia e al variare della finestra è stato possibile stimare la risoluzione temporale. Tale risoluzione è stata stimata andando a fare un'interpolazione gaussiana dei dati ottenuti in uscita dal TAC, selezionati come precedentemente descritto. Dato che tale calcolo è stato fatto per molti intervalli di energia, non si riportano tutti i grafici creati singolarmente. Nella tabella si possono leggere i risultati ottenuti.

Nelle figure 6 e 7 si sono riportate le gaussiane al variare rispettivamente della soglia e dell'intervallo utilizzato. Nella figura 8, inoltre, si possono vedere i risultati dell'analisi, cioè la risoluzione al variare dell'energia rappresentati su un grafico. Un grafico analogo è stato costruito con l'utilizzo

Intervallo energetico	Centroide	Errore	Sigma	Errore	Risoluzione
0-100	33.608	0.006	0.494	0.007	0.0346
0-200	33.670	0.002	0.347	0.002	0.0243
0-300	33.3778	0.0009	0.311	0.001	0.0219
0-400	33.6811	0.0006	0.2945	0.0007	0.0206
0-500	33.6880	0.0005	0.2899	0.0005	0.0203
0-600	33.6962	0.0004	0.2705	0.0005	0.0189
0-700	33.7002	0.0004	0.2498	0.0005	0.0175
0-800	33.7018	0.0003	0.2369	0.0003	0.0166
0-900	33.7033	0.0003	0.2280	0.0003	0.0159
50-150	33.640	0.002	0.399	0.002	0.0279
150-250	33.6382	0.001	0.306	0.001	0.0214
250-350	33.6825	0.0009	0.281	0.001	0.0196
350-450	33.6965	0.0008	0.2707	0.0009	0.0189
450-550	33.7038	0.0007	0.2687	0.0008	0.0188
550-650	33.7069	0.0006	0.2261	0.0007	0.0158
650-750	33.7108	0.0005	0.1763	0.0005	0.0123
750-850	33.7194	0.0005	0.1503	0.0004	0.0105
850-950	33.7245	0.0005	0.1412	0.0004	0.0099

Tabella 7: La risoluzione temporale in funzione dell'energia

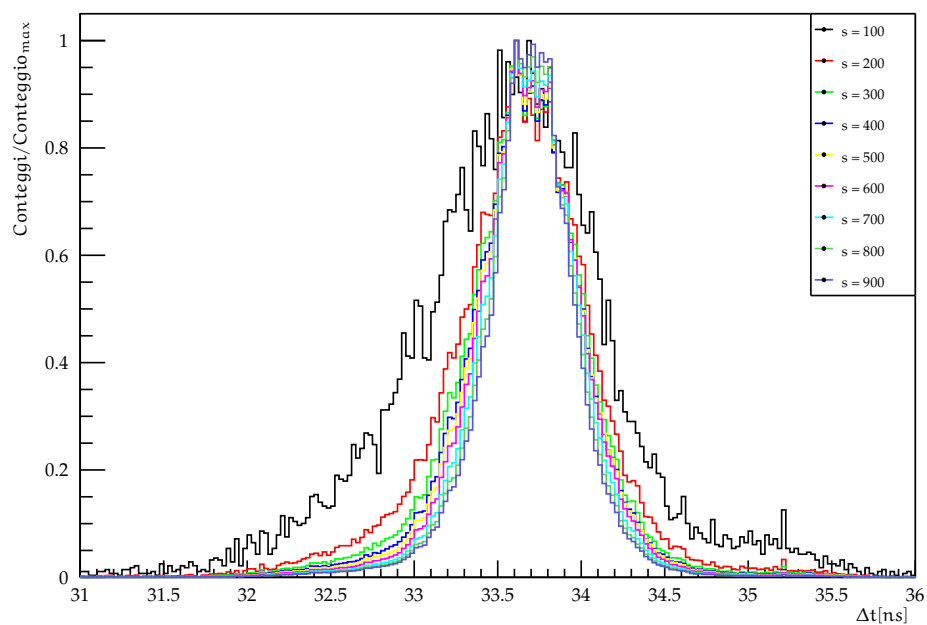


Figura 6: Segnale del TAC al variare della soglia energetica impostata

delle soglie nella figura 9. Si vede con evidenza che la risoluzione tende a decrescere all'aumentare dell'energia.

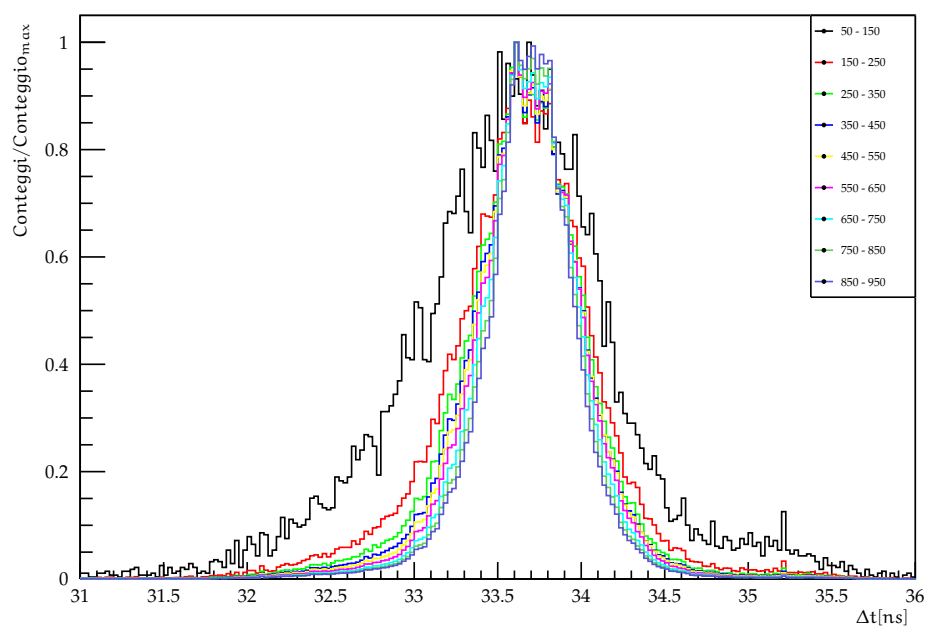


Figura 7: Segnale del TAC al variare dell'intervallo energetico impostato

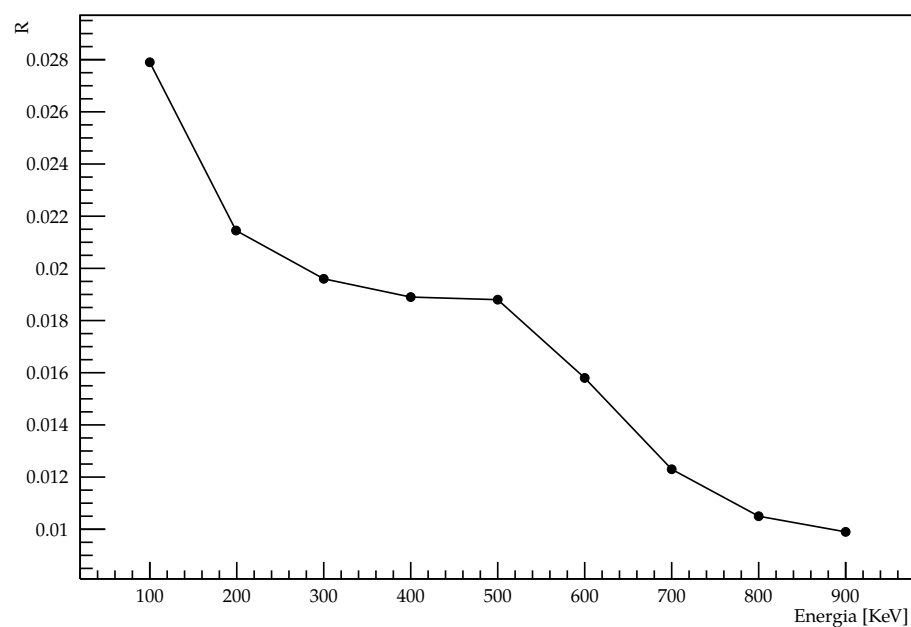


Figura 8: Risoluzione del TAC al variare dell'intervallo energetico selezionato

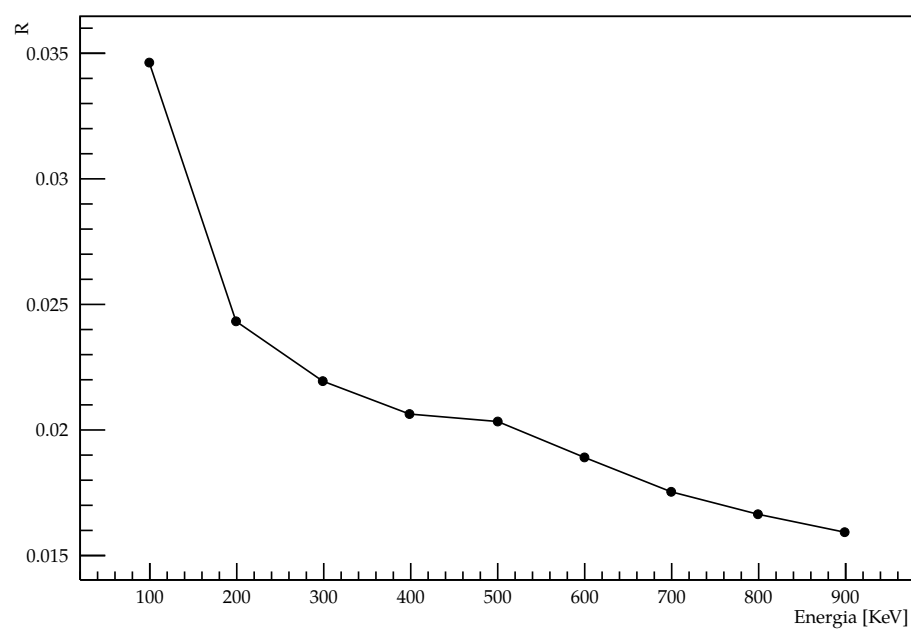


Figura 9: Risoluzione del TAC al variare della soglia energetica impostata

3.3.2 Velocità della luce

Si vuole utilizzare l'apparato a disposizione per misurare la velocità della luce. Si noti che con tale apparato è possibile misurare solamente differenze di tempi e non tempi assoluti (vista tutta l'elettronica utilizzata). Le misure sono state prese come descritto nell'analisi dati, e a disposizione quindi si hanno:

- la distanza tra i due rivelatori
- i diversi ritardi nella rivelazione nelle due diverse configurazioni
- le dimensioni del piombo contenente la sorgente
- il datasheet dei rivelatori

Si cerchi una formula per ricavare la velocità della luce date queste informazioni. Il ragionamento farà uso di due approssimazioni: la sorgente è puntiforme lungo la direzione di volo dei fotoni rivelati (assumibile in quanto consisteva in un disco posto in maniera perpendicolare a tale direzione) e si può pensare il fotone venga rivelato sempre nella stessa posizione dentro il rivelatore.

Con tali ipotesi, si considerino le misure di lunghezze con la seguente notazione:

- R_1 indica lo spazio medio percorso dai fotoni nel rivelatore prima di interagire con lo stesso
- x_1 indica la distanza tra la placca in piombo più vicina e il rivelatore 1
- δ_1 indica lo spessore della placca in piombo più vicina al rivelatore 1

E analoga notazione per quanto riguarda il rivelatore 2. In poche parole le ipotesi fatte consistono nel fatto che i valori di R_1 R_2 si possono prendere come esatti.⁴, mentre l'ipotesi di sorgente puntiforme è necessaria per ridurre il problema in tre dimensioni a un problema unidimensionale.

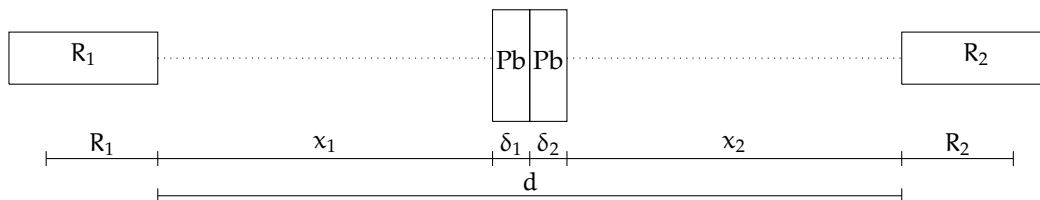


Figura 10: Schema dell'apparato sperimentale utilizzato con riportate le grandezze definite

A questo punto, se la configurazione è la A, si possono descrivere i tempi di percorrenza dei fotoni prima che vengano rivelati come:

$$t_{1A} = \frac{\delta_1 + nR_1}{c} \quad t_{2A} = \frac{\delta_2 + x_2 + nR_2}{c}$$

Ove n indica un eventuale coefficiente di rifrazione all'interno del rivelatore stesso. Quindi il TAC rivelerà l'intervallo temporale:

$$\delta t_A = t_{2A} - t_{1A} = \frac{\delta_2 + x_2 + nR_2 - \delta_1 - nR_1}{c}$$

⁴In realtà, questa ipotesi viene verificata nel limite delle infinite misure; dato che il campione preso è sufficientemente grande, si suppone essa sia valida

Analogamente per la configurazione B si trova:

$$t_{1B} = \frac{\delta_1 + x_1 + nR_1}{c} \quad t_{2B} = \frac{\delta_2 + nR_2}{c}$$

e l'intervallo rilevato dal TAC sarà:

$$\Delta t_B = t_{2B} - t_{1B} = \frac{\delta_2 + nR_2 - \delta_1 - x_1 - nR_1}{c}$$

A questo punto, però, questi due intervalli non hanno senso presi singolarmente, in quanto non rivelano effettivamente un intervallo temporale ma il tempo riferito ad uno zero che, sebbene non sia noto oggettivamente, è lo stesso per entrambe le misure (infatti non si è toccato l'apparato strumentale se non per spostare la sorgente racchiusa tra le placche di piombo). Perciò ha senso fisico la loro differenza, che si può stimare con facilità:

$$\Delta t = \Delta t_A - \Delta t_B = \frac{\delta_2 + x_2 + nR_2 - \delta_1 - nR_1 - \delta_2 - nR_2 + \delta_1 + x_1 + nR_1}{c} = \frac{x_1 + x_2}{c}$$

Perciò per stimare la velocità della luce è sufficiente andare a misurare la distanza dei due rivelatori a meno delle placche di piombo e la distanza temporale tra i due picchi nei grafici calibrati del TAC. Però, in sede di esecuzione dell'esperimento, non si è effettivamente misurata quella distanza ma solamente le distanze tra la sorgente e i rivelatori nelle due configurazioni, quindi si ha una stima di δ e una stima di $2\delta + x$ per i due casi.

Si venga alla vera e propria analisi dati: si vuole applicare la formula, appena dimostrata:

$$c = \frac{x_1 + x_2}{\Delta t}$$

si ragioni sul numeratore, cioè la misura di lunghezza: si conoscono i valori, misurati con il metro:

$$d = 173.2\text{cm} \quad \delta = 3.7\text{cm}$$

ove d indica la distanza tra i due rivelatori e δ indica le misure (uguali) dei blocchi di piombo. Ora si è interessati a $x_1 + x_2$, per motivi geometrici si può riscrivere in funzione delle variabili misurate come:

$$x_1 + x_2 = 2(d - 2\delta)$$

Come errore sulle variabili si considera un errore triangolare associato al fatto che il metro aveva una scala dei millimetri, quindi si ha

$$\sigma_d = \sigma_\delta = \frac{0.5\text{mm}}{\sqrt{6}} = 0.2\text{mm}$$

Ora si pensi al denominatore dell'equazione per la velocità della luce, cioè la differenza tra le distanze temporali nelle due diverse configurazioni dell'esperimento. Si riscriva tenendo conto della calibrazione:

$$\Delta t = \Delta t_A - \Delta t_B = m\Delta t_A + q - m\Delta t_B - q = m(\Delta t_A - \Delta t_B)$$

Ove m , q , sono i coefficienti della calibrazione stimati nelle sezioni precedenti. I due picchi si possono vedere, già calibrati, nella figura sottostante.

Nonostante questa figura sia utile da vedere in quanto calibrata, è necessario operare con i centroidi non calibrati se si vuole avere un'analisi che tenga conto anche della correlazione degli errori di calibrazione. Quindi, nella tabella sottostante, si riportano i valori dei centroidi sia prima della calibrazione (quindi in canali) che dopo la calibrazione (e quindi in nanosecondi), con gli errori presentati come errori sui parametri dell'interpolazione fatta:

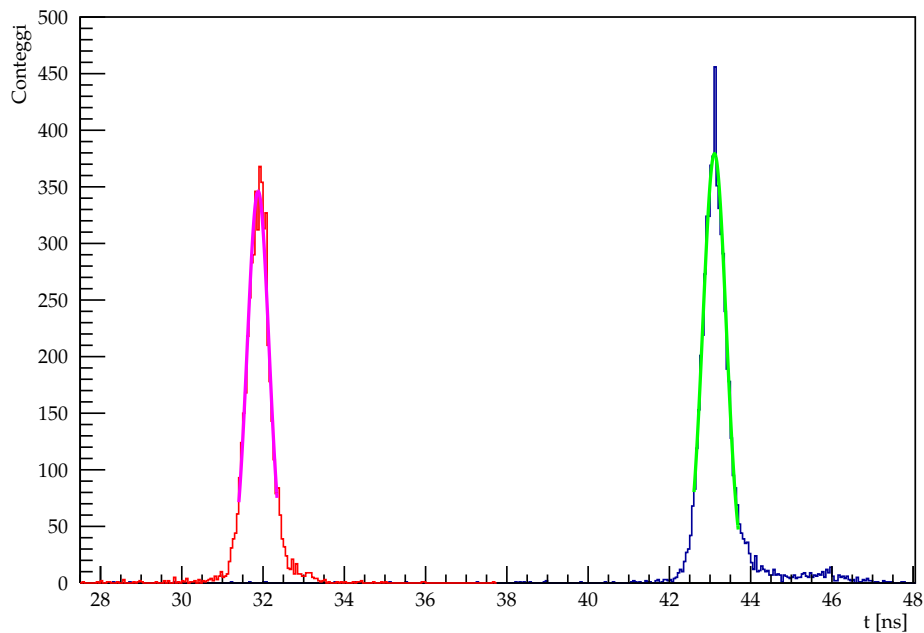


Figura 11: Confronto tra i dati del TAC nelle due configurazioni (con interpolazione gaussiana dei segnali)

Configurazione	Valore in canali	Errore	Valore [ns]	Errori
A	1647.3	0.3	43.110	0.005
B	1194.2	0.2	31.867	0.005

Presentati questi dati, è possibile passare alla vera e propria stima della velocità della luce, alla quale è ovviamente necessario associare un errore. Dati i preamboli fatti, si può considerare la formula (espansa in modo da risolvere i problemi di correlazione, perciò è possibile ottenere l'errore tramite semplice propagazione lineare):

$$c = \frac{2(d - 2\delta)}{m(\Delta t_A - \Delta t_B)_{\text{canali}}} = (2.951 \pm 0.011) \times 10^8 \text{ m/s}$$

Si noti che non si sta considerando correlazione tra le misure spaziali (cioè si considera il metro supponendo che la scala su di esso stampata sia perfetta)

3.3.3 Analisi dei dati digitali

Si è usato il campione preso con il digitizer per fare un confronto tra le misure prese con l'apparato analogico e quelle prese digitalmente.

Per prima cosa è stato ricavato un segnale medio per canale, ottenendo così tempo di salita, di discesa e ampiezza media. I due grafici ottenuti sono mostrati in Fig. 12 e Fig. 13

Filtrando dal campione solo gli eventi in coincidenza (presa contando gli eventi il cui time tag differisse meno di 100 ns), si è poi fatta un'analisi della risoluzione temporale dell'apparato digitale.

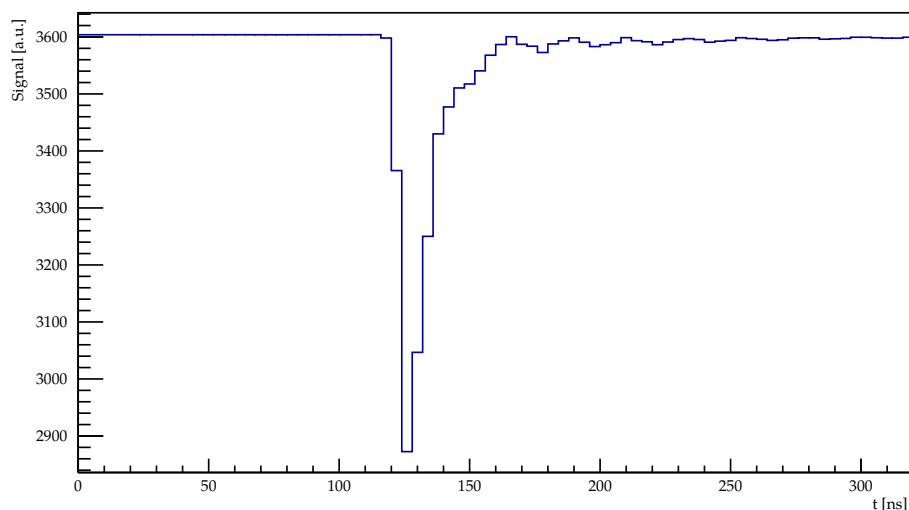


Figura 12: Segnale medio ottenuto dai segnali misurati nel canale 0 del digitizer

Rivelatore	Ampiezza	Errore	Tempo salita [ns]	Errore [ns]	Tempo discesa [ns]	Errore [ns]
1	751.48	0.30	7.57116	0.00058	25.4522	0.0020
2	647.11	0.28	7.51217	0.00067	18.6943	0.0016

Tabella 8: Parametri del segnale medio acquisito in ogni canale

Per le misure di tempo si è usato un algoritmo simile al CFTD analogico, facendo variare il ritardo tra i 4 e i 12 ns e l'attenuazione tra lo 0.2 e lo 0.8. Per la ricerca del punto di zero crossing si è fatta un'interpolazione retta tra i punti di zero crossing nel segnale di "CF monitor". A causa della bassa frequenza di campionamento, lo zero crossing misurato presenta un errore dipendente dal momento di inizio del campionamento (vedi Fig. 14), e presenta perciò una distribuzione non gaussiana.

Le distribuzioni ottenute al variare dei parametri sono state sovrapposte in Fig. 15, e i loro parametri sono mostrati in Tab. 9. Dalla tabella si può vedere come la distribuzione che più si avvicina ad una gaussiana (ovvero quella con un χ^2 minore) è quella con ritardo 2 e attenuazione 0.8. Questi sono stati i parametri usati nelle seguenti analisi.

Una volta ottimizzato il CFTD, si è proceduto ad analizzare la risoluzione temporale in funzione di una soglia in energia. Per farlo, è stata fatta una calibrazione dei canali approssimativa sovrapponendo lo spettro totale (privo di coincidenza) con lo spettro ottenuto analogicamente, ovvero assumendo che il compton edge nello spettro digitale avesse lo stesso shift di quello analogico (approssimazione sensata in quanto lo spostamento del CE dipende dalla risoluzione del rivelatore e non dello strumento di acquisizione). Gli spettri ottenuti sono mostrati in Fig 16 e 16. Si è poi applicato l'algoritmo agli eventi con un'energia minore di una di una soglia, variabile tra i 50 e i 350 keV. Le distribuzioni ottenute sono in Fig. 18

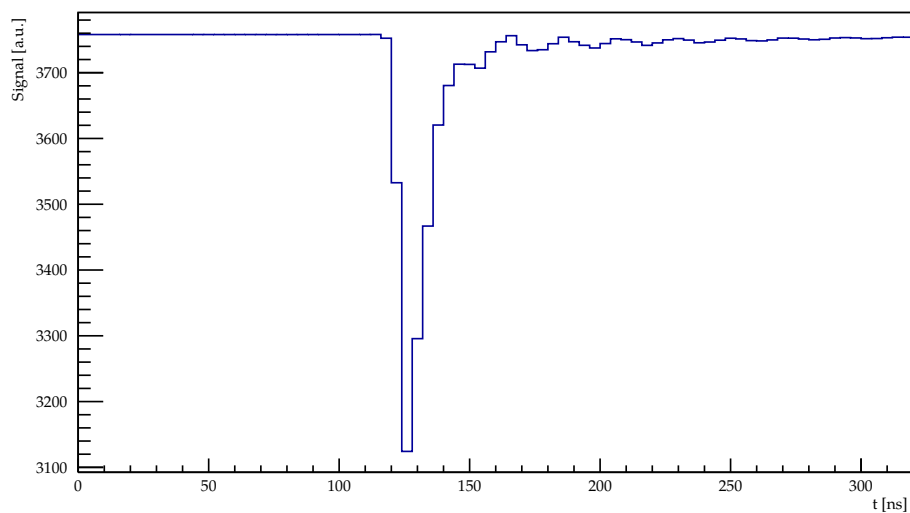


Figura 13: Segnale medio ottenuto dai segnali misurati nel canale 1 del digitizer

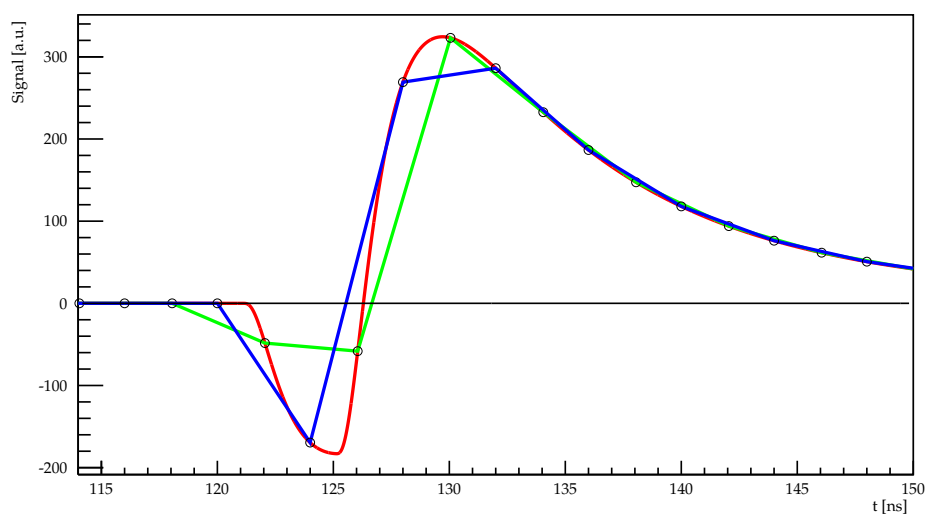


Figura 14: Simulazione di un evento (con un modello log-normale) campionato in due modi diversi a 250 MHz. Come si può vedere, a seconda del momento di inizio del campionamento, l'istante di zero-crossing si sposta in avanti o indietro.

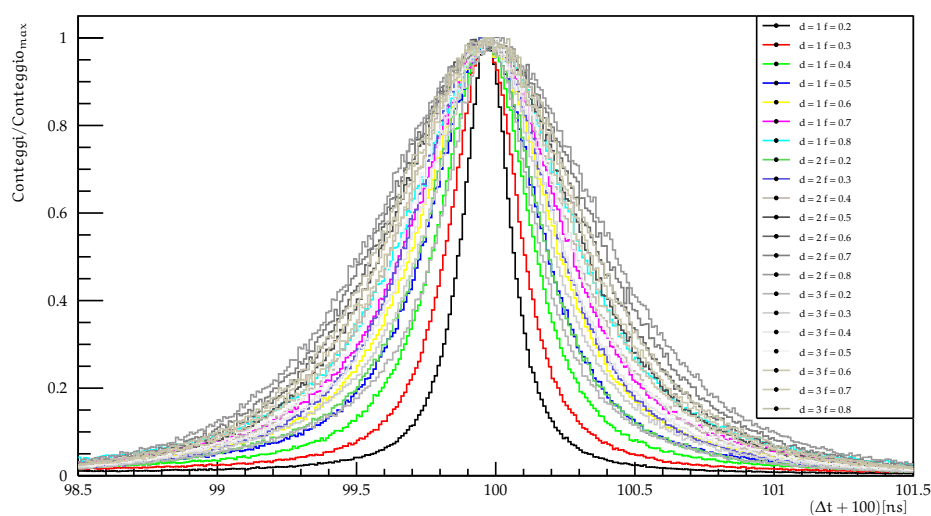


Figura 15: Sovrapposizione delle distribuzioni ottenute dall'analisi del campione al variare dei parametri inseriti nell'algoritmo CFTD. Le distribuzioni sono state normalizzate in modo che il valore massimo sia 1.

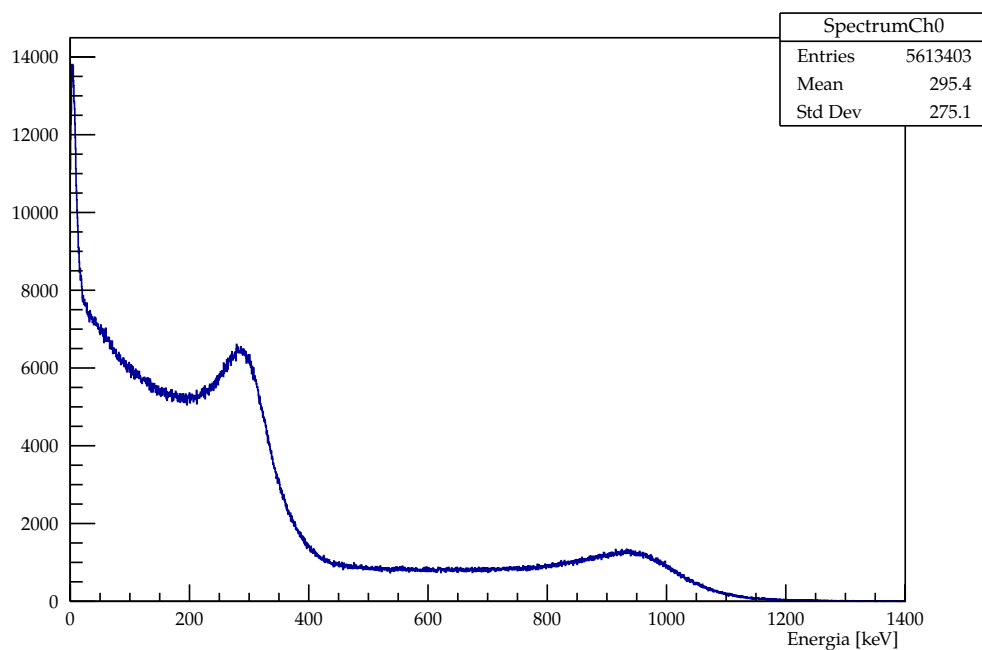


Figura 16: Spettro calibrato in energia ottenuto dal primo rivelatore tramite l'uso del digitizer.

Ritardo	Attenuazione	Centroide	Errore	Sigma	Errore	FWHM	χ^2
1	0.2	99.9627	0.00016	0.12791	0.00021	0.30123	180971
1	0.3	99.9561	0.00022	0.18129	0.00028	0.42694	155779
1	0.4	99.9527	0.00029	0.23718	0.00037	0.55856	133869
1	0.5	99.9523	0.00035	0.29110	0.00044	0.68555	113632
1	0.6	99.9538	0.00040	0.34126	0.00051	0.80366	98032
1	0.7	99.9577	0.00045	0.38547	0.00056	0.90779	87087.5
1	0.8	99.9641	0.00055	0.42387	0.00061	0.99822	82353.8
2	0.2	99.9446	0.00035	0.29666	0.00045	0.69864	99795.6
2	0.3	99.9456	0.00040	0.34435	0.00047	0.81095	72161.6
2	0.4	99.9492	0.00044	0.38020	0.00048	0.89537	56748.1
2	0.5	99.9537	0.00048	0.41046	0.00049	0.96663	47918.5
2	0.6	99.9585	0.00050	0.43765	0.00051	1.03067	42789.5
2	0.7	99.9633	0.00053	0.46315	0.00053	1.09072	40233.9
2	0.8	99.9681	0.00055	0.48786	0.00056	1.14892	39250.1
3	0.2	99.9540	0.00036	0.29531	0.00053	0.69545	126754
3	0.3	99.9531	0.00040	0.33269	0.00052	0.78349	97904.9
3	0.4	99.9538	0.00042	0.36142	0.00052	0.85115	80379.9
3	0.5	99.9548	0.00045	0.38496	0.00052	0.90658	70040.9
3	0.6	99.9557	0.00047	0.40636	0.00053	0.95697	59696.7
3	0.7	99.9570	0.00049	0.42542	0.00053	1.00187	52955.5
3	0.8	99.9584	0.00050	0.44264	0.00053	1.04242	48806.9

Tabella 9: Risoluzione temporale in funzione di dei parametri delay e attenuazione nell'algoritmo CFTD

intervallo energetico	centroide	errore	sigma	errore	FWHM
0-350	99.96800	0.00056	0.48273	0.00056	1.13684
0-300	99.96910	0.00060	0.49526	0.00059	1.16633
0-250	99.97170	0.00070	0.52915	0.00069	1.24614
0-200	99.97620	0.00091	0.58527	0.00089	1.3783
0-150	99.9821	0.0014	0.6584	0.0013	1.5505
0-100	99.9862	0.0024	0.7566	0.0023	1.7817
0-50	99.9936	0.0064	0.9425	0.0057	2.2196

Tabella 10: Risoluzione temporale in funzione di una soglia di energia nelle misure digitali

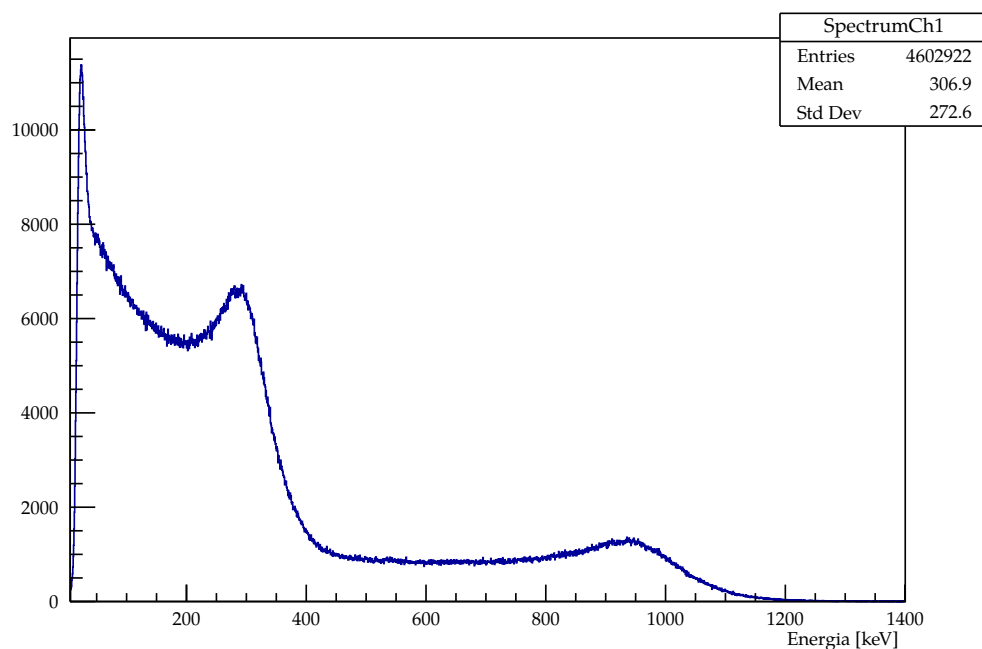


Figura 17: Spettro calibrato in energia ottenuto dal secondo rivelatore tramite l'uso del digitizer.

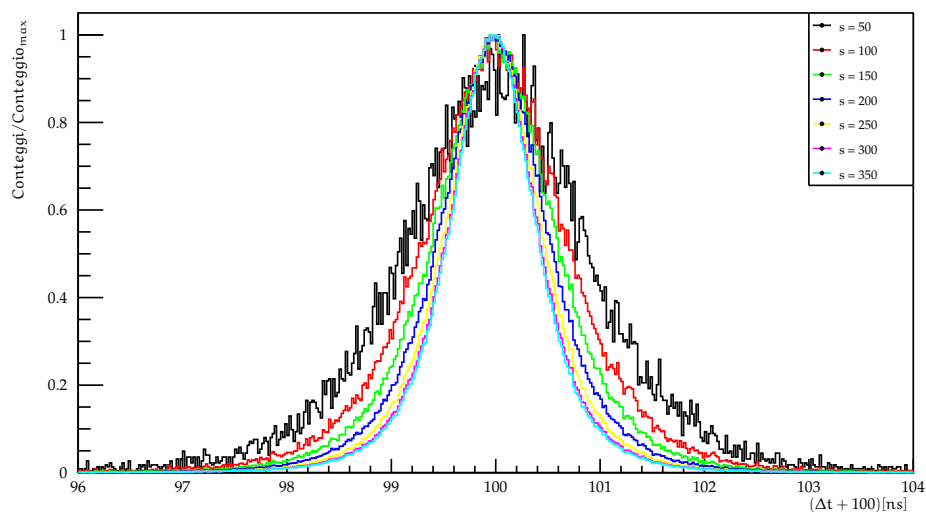


Figura 18: Confronto delle distribuzioni ottenute analizzando gli eventi al di sotto di una certa soglia di energia. Le distribuzioni sono state normalizzate in modo che il valore massimo sia 1.

4. Conclusioni

I risultati ottenuti dall'esperimento sono stati abbastanza in linea con quelli che ci si aspettava.

Per quanto riguarda la calibrazione in tempo ed in energia, tutti i risultati sono stati perfettamente in linea con le aspettative (per esempio le due calibrazioni in energia dei rivelatori sono risultate simili), e la calibrazione in tempo coincide con le aspettative. In tutti i grafici in energia è stato abbastanza semplice riconoscere le spalle Compton e non si sono riconosciuti fenomeni particolari.

Per quanto riguarda lo studio della risoluzione utilizzando la sorgente di Cobalto al posto di quella di sodio si è notato effettivamente che lo spettro coincideva con quello teorico; la risoluzione tende a migliorare all'aumentare dell'energia come ci si aspetta (infatti più energetici sono i fotoni più alta è la probabilità di interazione all'interno del rivelatore, e se la probabilità di interazione è più alta i due punti di interazione all'interno dei due rivelatori saranno più simili, il che porta ad una risoluzione minore).

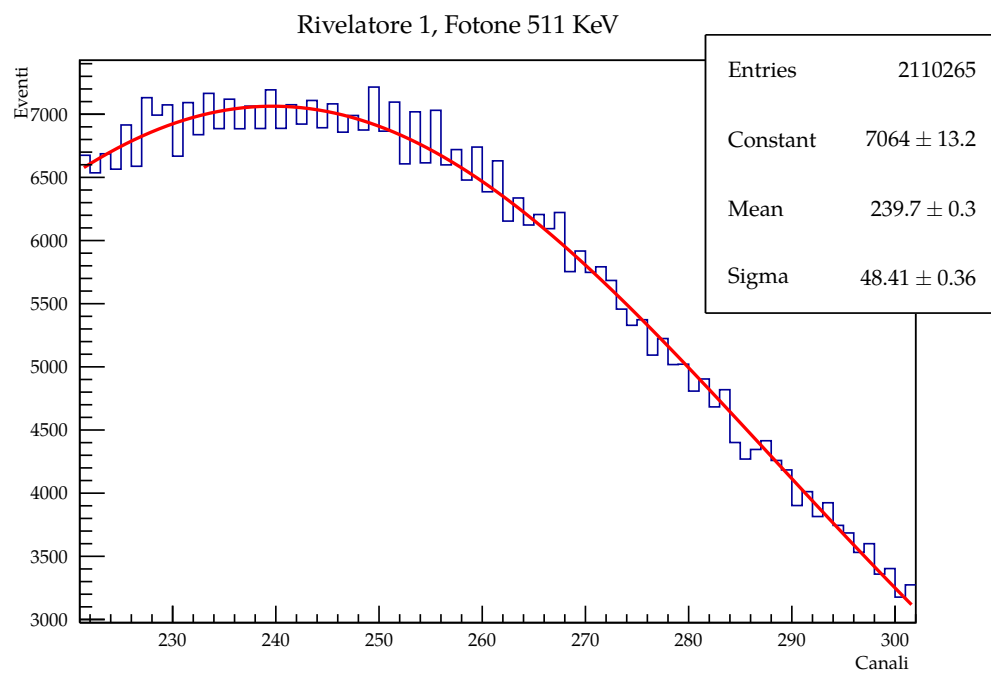
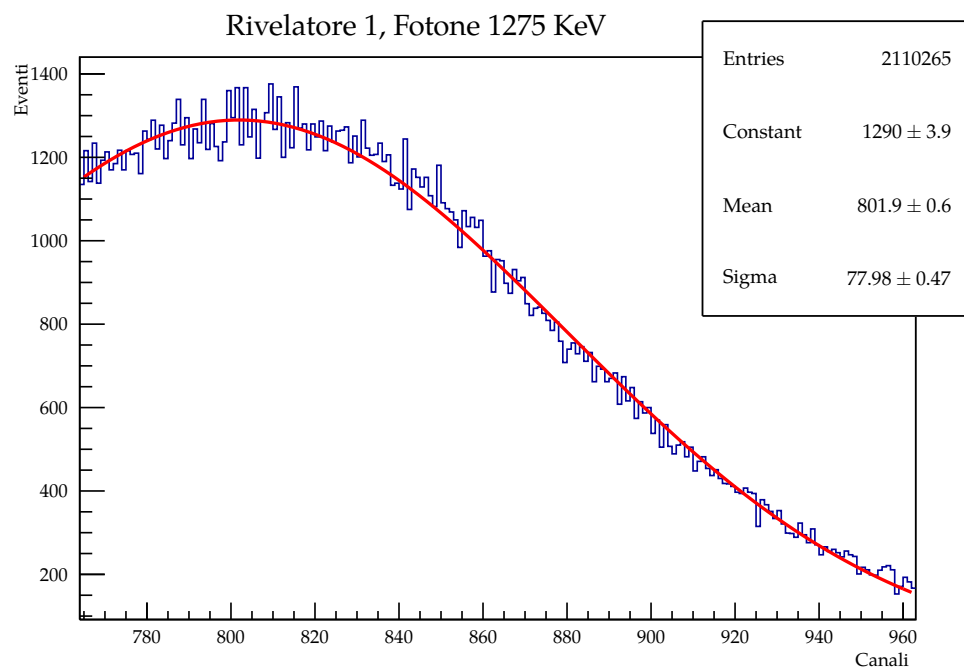
A proposito della misura della velocità della luce, effettivamente il valore ottenuto è abbastanza vicino al valore presente in letteratura, anche se l'errore è stato evidentemente sottostimato, probabilmente a causa di una sottostima di tutti gli effetti strumentali legati alla strumentazione elettronica: la differenza temporale tra i due segnali è effettivamente molto piccola per poter associare una misura molto precisa ad essa, e l'errore associato è di ordini di grandezza inferiore a quello che ci si aspetta, risulta poco plausibile pensare che con un simile apparato strumentale si possa avere un errore su una misura temporale dell'ordine dei picosecondi.

Lo studio del sistema di acquisizione digitale ha rivelato come il digitizer utilizzato non sia adeguato alle misurazioni prese: infatti sebbene i grafici rivelino una forma più *appuntita* (e quindi sembrano associare errori più piccoli), non sono effettivamente buone gaussiane. Probabilmente tale problema è da imputare al campionamento non sufficiente dal digitizer stesso, come evidenziato nella sezione apposita, a seconda del punto di campionamento lo *zero crossing* avviene in punti diversi, e tale errore è di stima molto difficile. Questo problema rende meno importante il confronto tra le risoluzioni nei due metodi: sebbene la FWHM sia minore nel caso dell'analisi digitale, essa presenta fenomeni strumentali non imputabili a effetti fisici, e quindi non permette di prendere dati attendibili, perciò si preferisce lo studio analogico.

5. Appendici

Si riportano di seguito i grafici di interpolazioni non messi nella vera e propria relazione per non appesantirne la lettura.

5.5.1 Calibrazione in energia

Figura 19: *r1 511*Figura 20: *r1 1275*

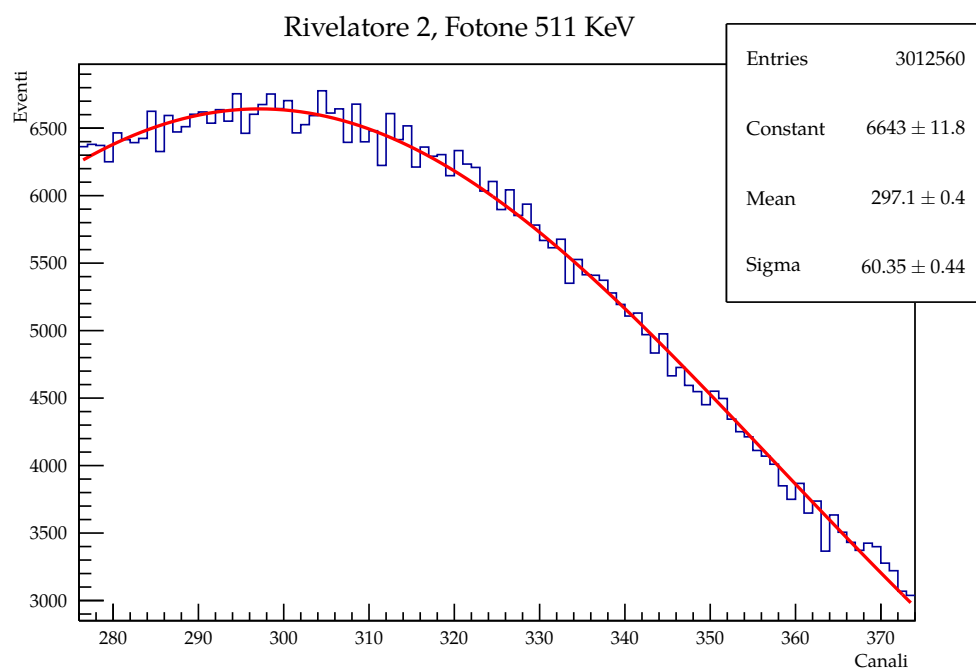


Figura 21: r2 511

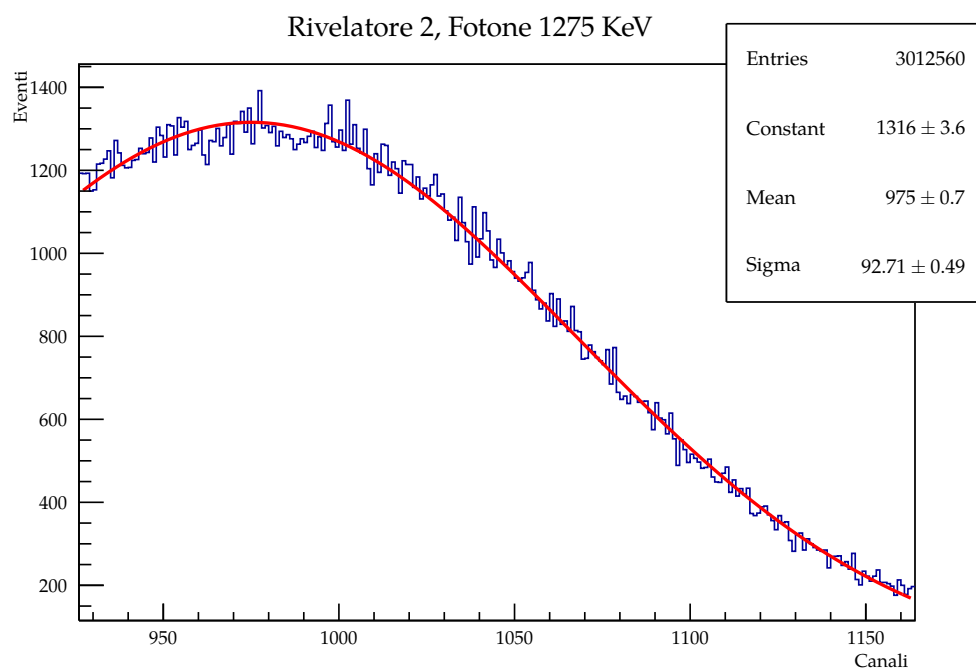


Figura 22: r2 1275

5.5.2 Calibrazione in tempo

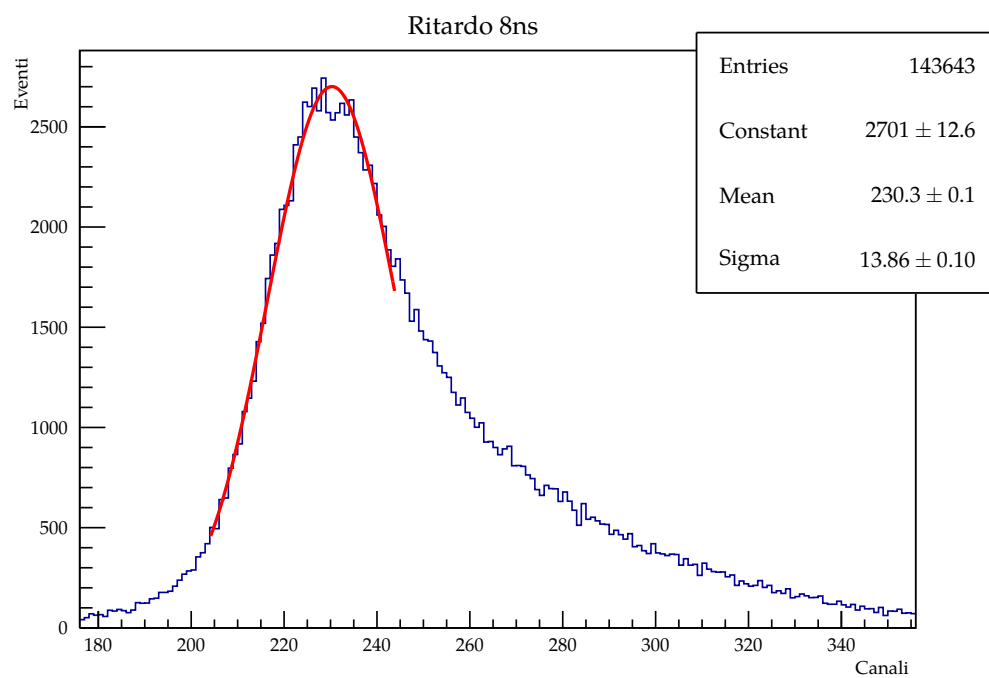
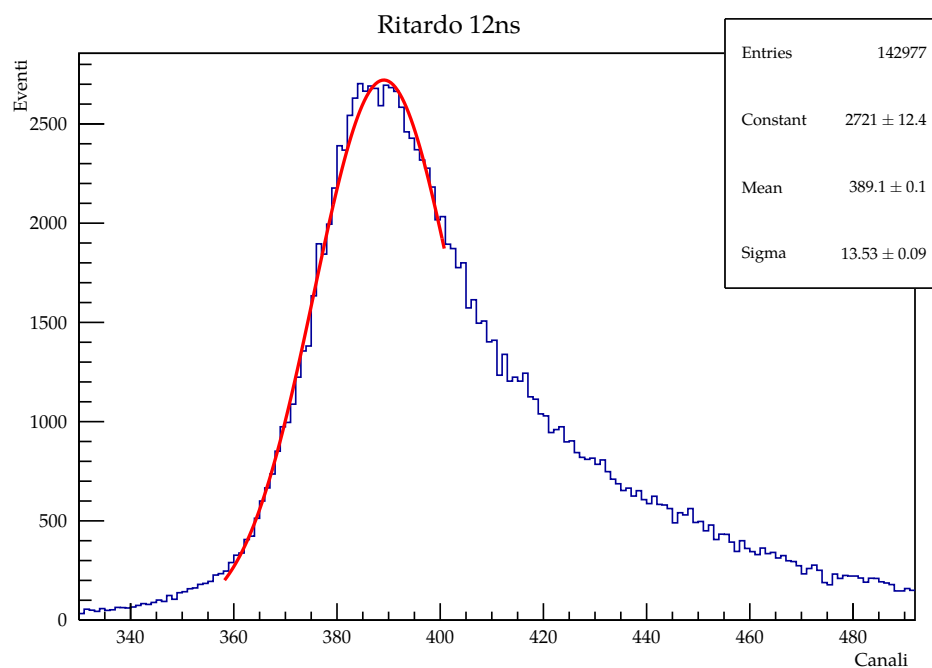
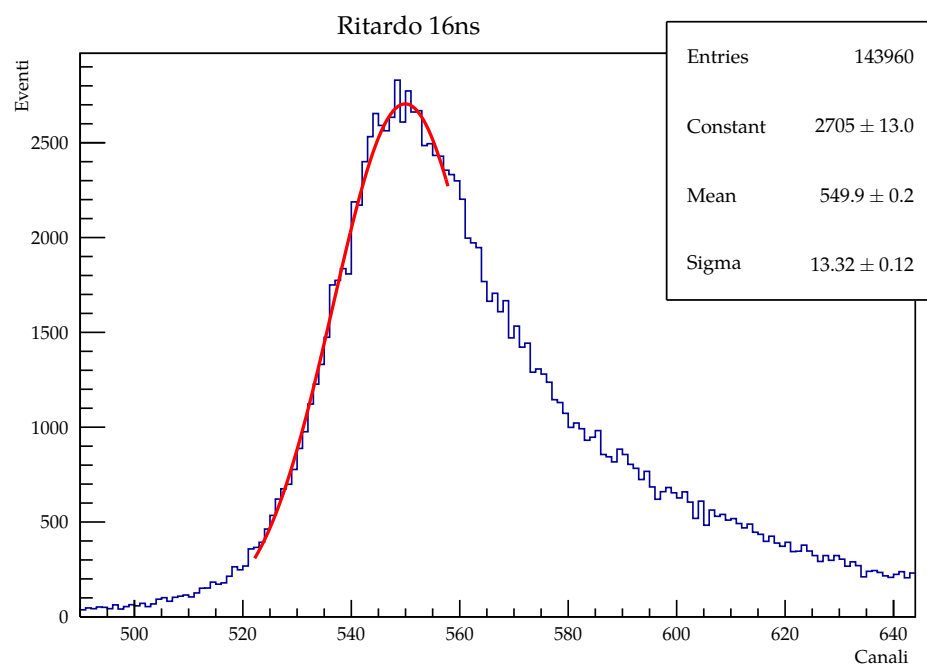
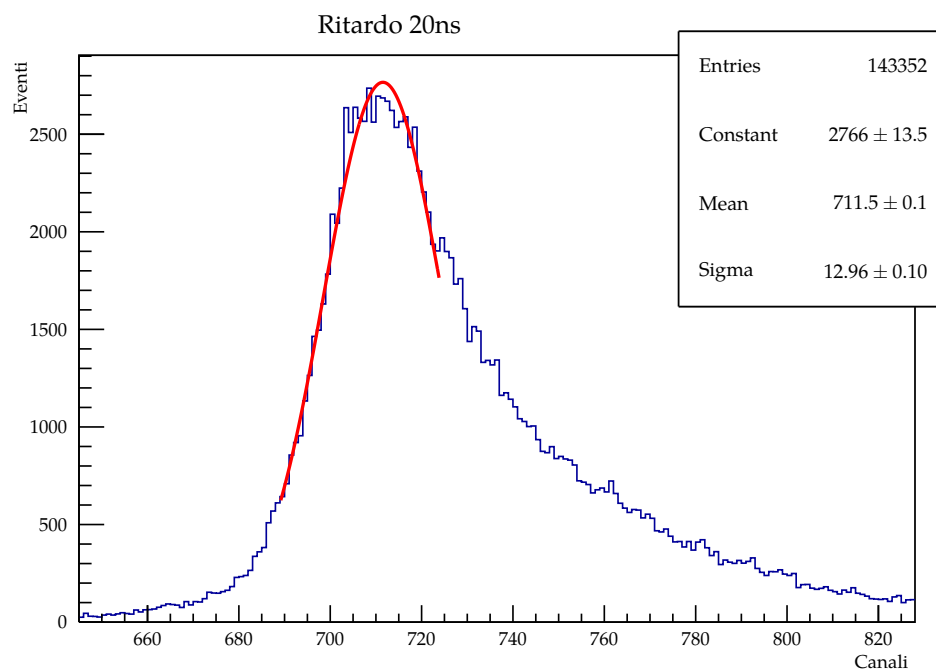
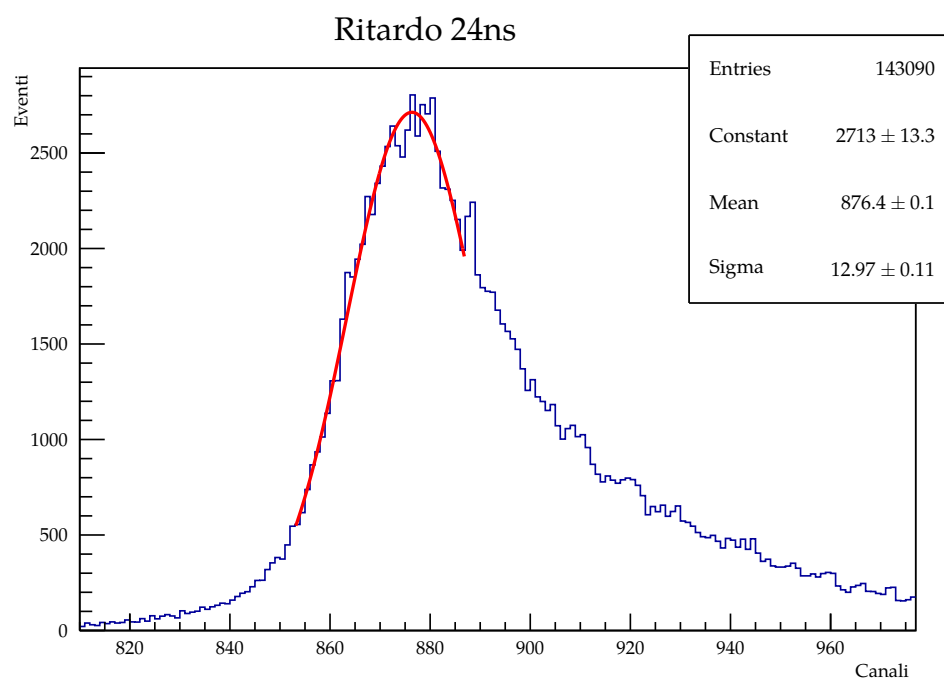
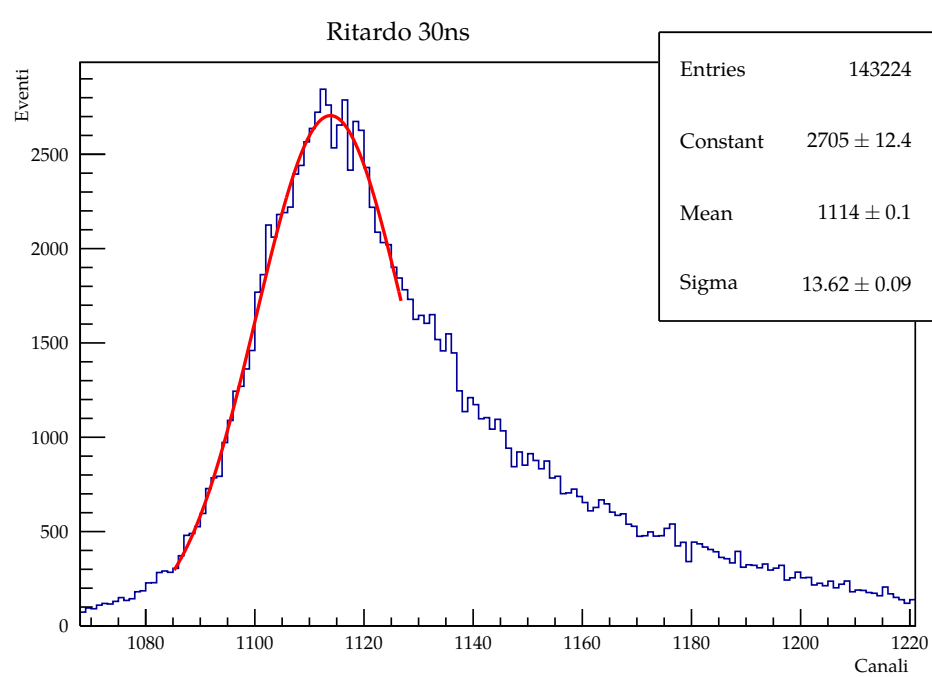


Figura 23: *Ritardo8ns*

**Figura 24:** *Ritardo12ns***Figura 25:** *Ritardo16ns*

**Figura 26:** *Ritardo20ns***Figura 27:** *Ritardo24ns*

**Figura 28:** *Ritardo30ns*

5.5.3 Misura del tempo di ritardo dei cavetti

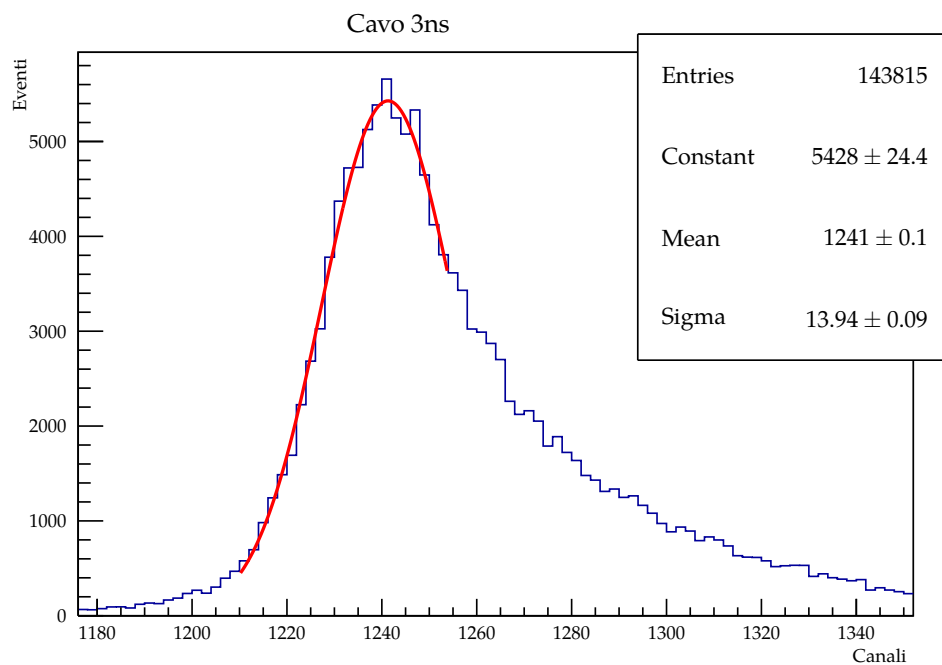
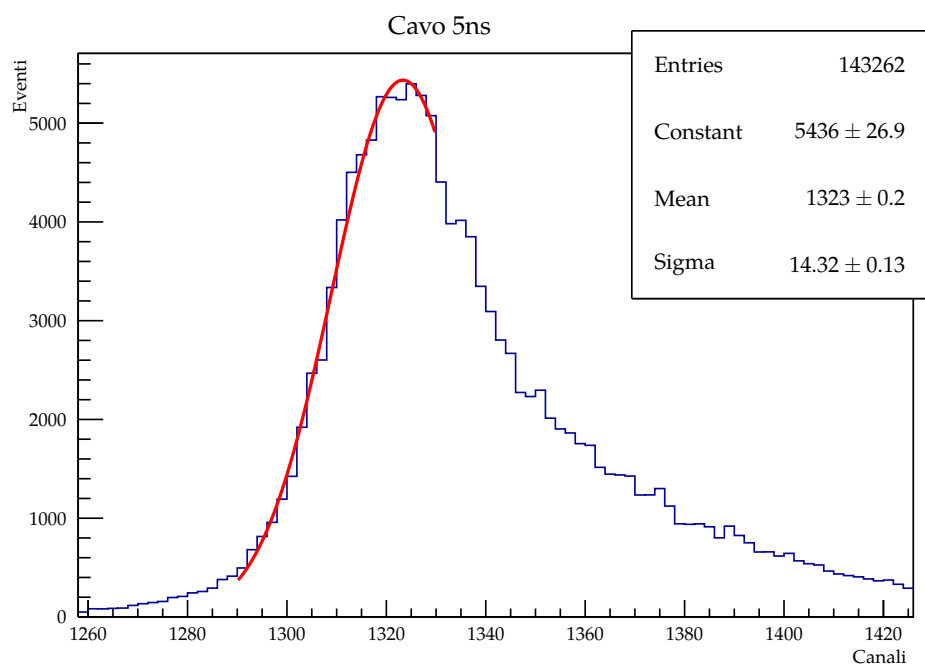
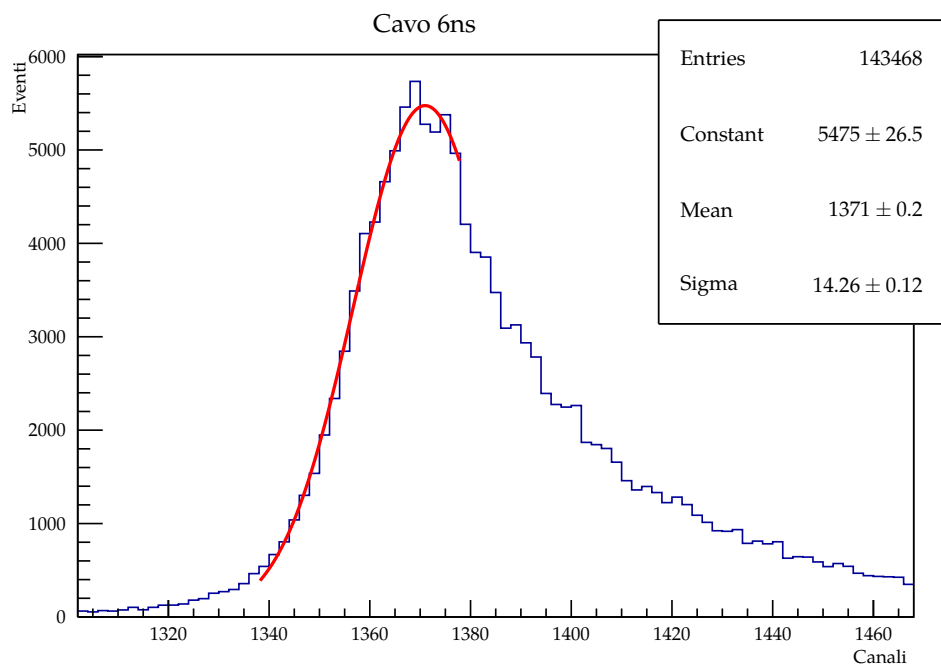


Figura 29: Cavo 3ns

**Figura 30:** *Cavo 5ns***Figura 31:** *Cavo 6ns*