

100

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	11
3.3	Analisi dai dati digitali	14
4	appendice test	18

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 e rumore. Poi si è ripetuto il procedimento collegando il rivelatore, 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 regolata 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 contenesse- ro 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 del segnale del rivelatore direttamente sull'oscilloscopio. Il segnale ottenuto è simile per entrambi i rivelatori, sono infatti entrambi negativi e presentano le seguenti caratteristiche:

Tabella 1: *Le misure preliminari in uscita dei rivelatori*

Rivela- tore	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

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; 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.

Tabella 2: Procedura calibrazione del rivelatore 1

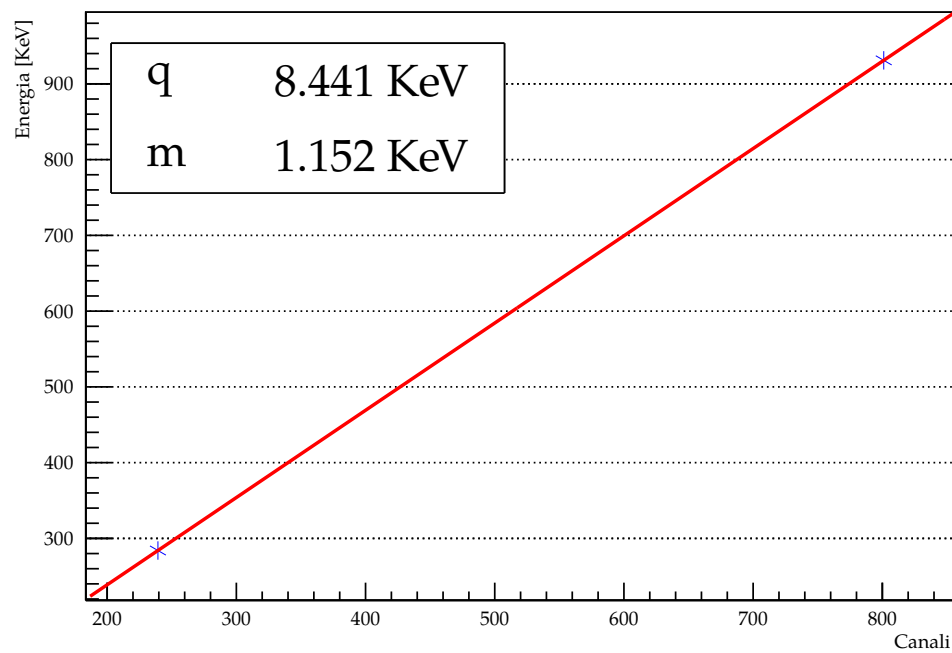
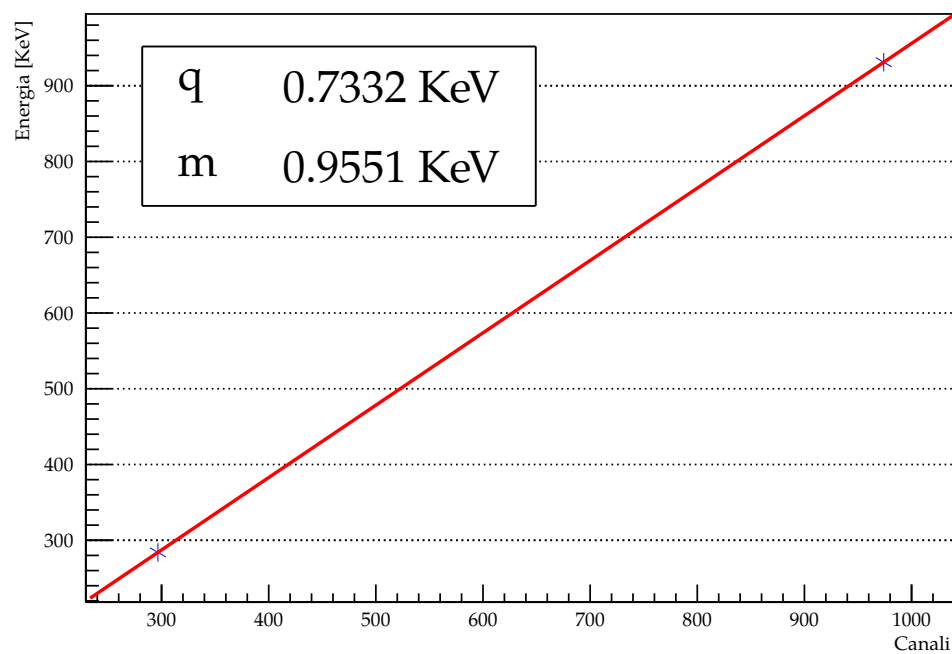
Centroide	s	s/C	σ [KeV]	Shift [KeV]	Centroide [KeV]
239.7	48.4	0.202	38	57	283
801.9	78.0	0.0972	77	132	930

Tabella 3: Procedura calibrazione del rivelatore 2

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

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.

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

Figura 1: *calibenergy r1*Figura 2: *calibenergy 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 4ns ed i 30ns) , ed effettuando quindi un'interpolazione lineare. Nella seguente tabella si possono vedere i dati usati per l'interpolazione.

Tabella 4: Calibrazione della delay unit

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

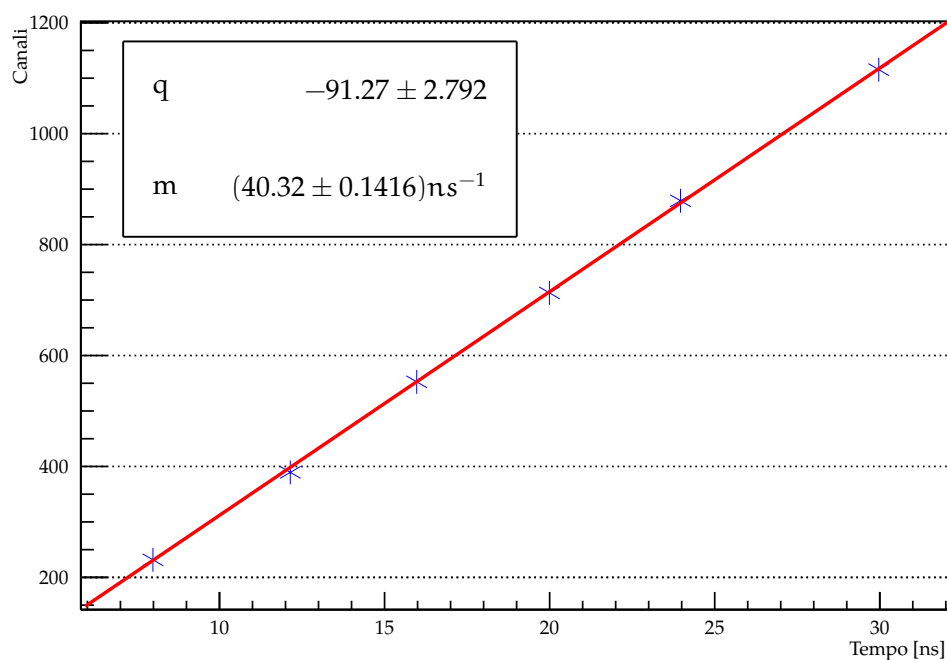


Figura 3: CalibTempo

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 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.

tabella bella che Davide ha

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 qui tutti i grafici creati ma si possono trovare nelle appendici, mentre nella tabella si possono leggere i risultati ottenuti.

Nelle figure 5 e 6 si sono riportate le gaussiane al variare rispettivamente della soglia e dell'intervallo utilizzato. Nella figura 7, inoltre, si possono vedere i risultati dell'analisi, cioè

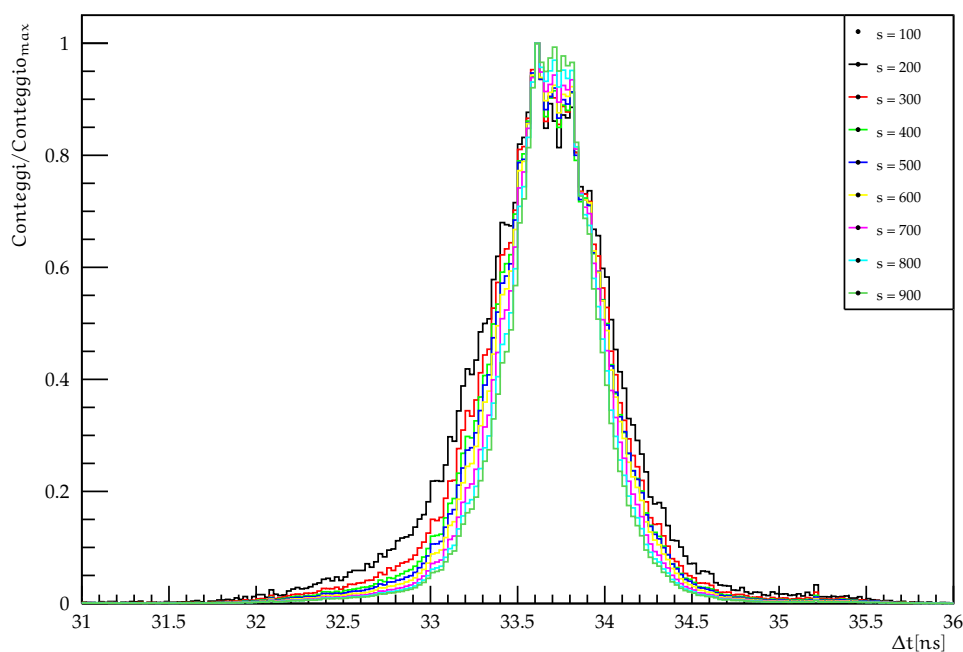


Figura 4: bella soglia

Tabella 5: *La risoluzione temporale in funzione dell'energia*

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

la risoluzione al variare dell'energia rappresentati su un grafico. Un grafico analogo è stato costruito con l'utilizzo delle soglie nella figura 8. Tutte le interpolazioni fatte si possono trovare nelle appendici. Si vede con evidenza che la risoluzione tende a decrescere all'aumentare dell'energia.

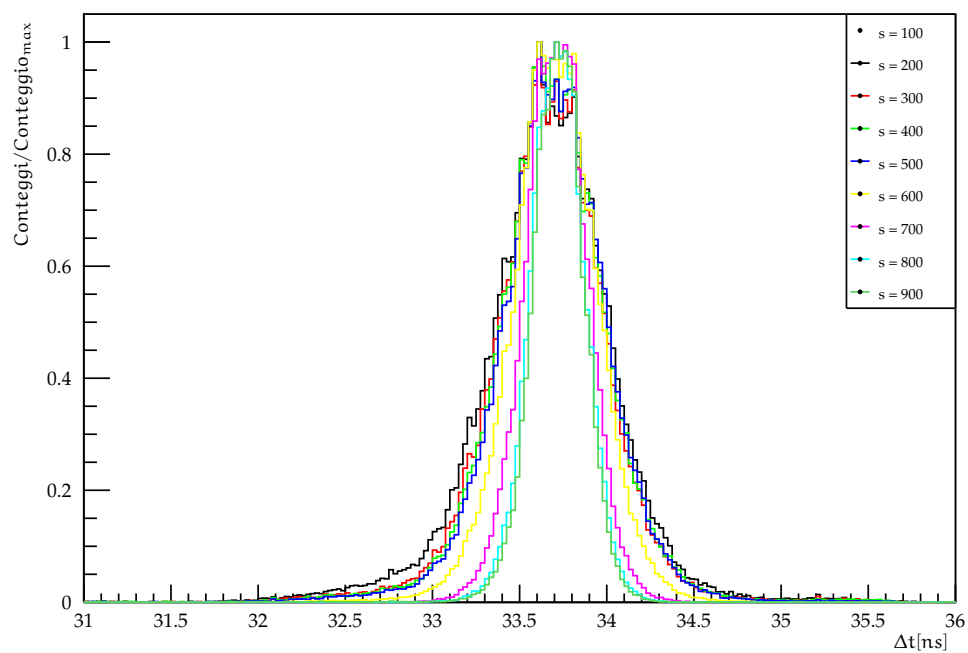


Figura 5: bella intervalla

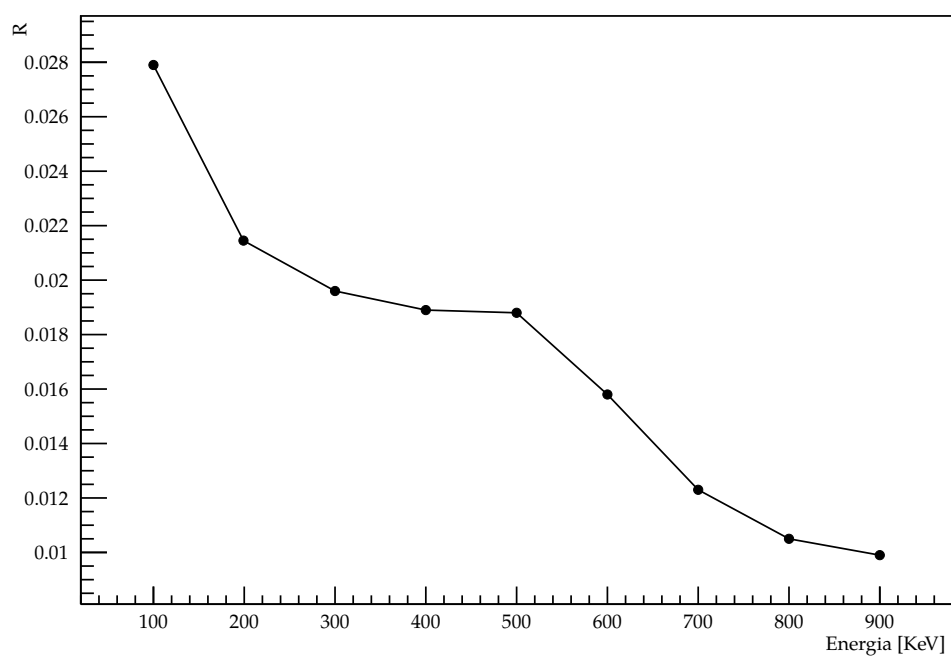


Figura 6: cobalto risoluzioni

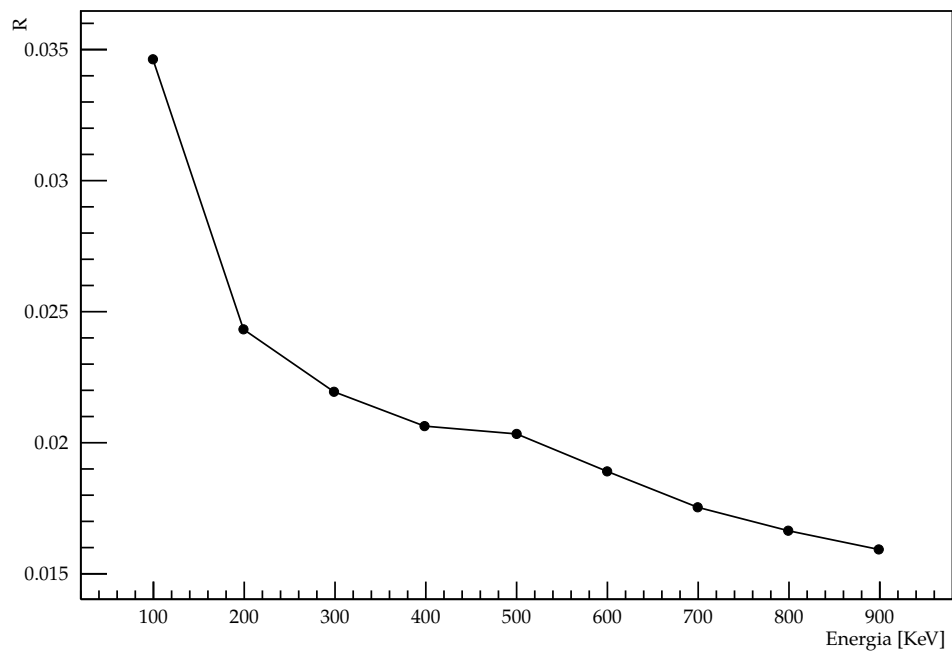


Figura 7: cobalto soglie

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 $R_1 = R_2$ e che questi valori si possono prendere come esatti.²

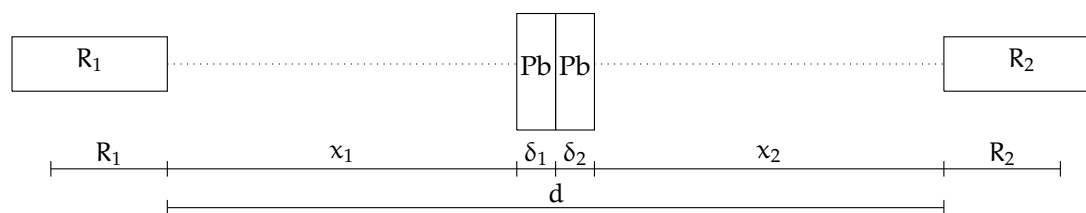


Figura 8: schema cobalto

A questo punto, se la configurazione è la A, si possono descrivere i tempi di percorrenza dei fotoni prima che vengano rivelati come³

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

²In realtà, questa ipotesi viene verificata nel limite delle infinite misure; dato che il campione preso è sufficientemente grande, si suppone essa sia valida

³:

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

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

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

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

SOrta 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

Confronto tra le due configurazioni

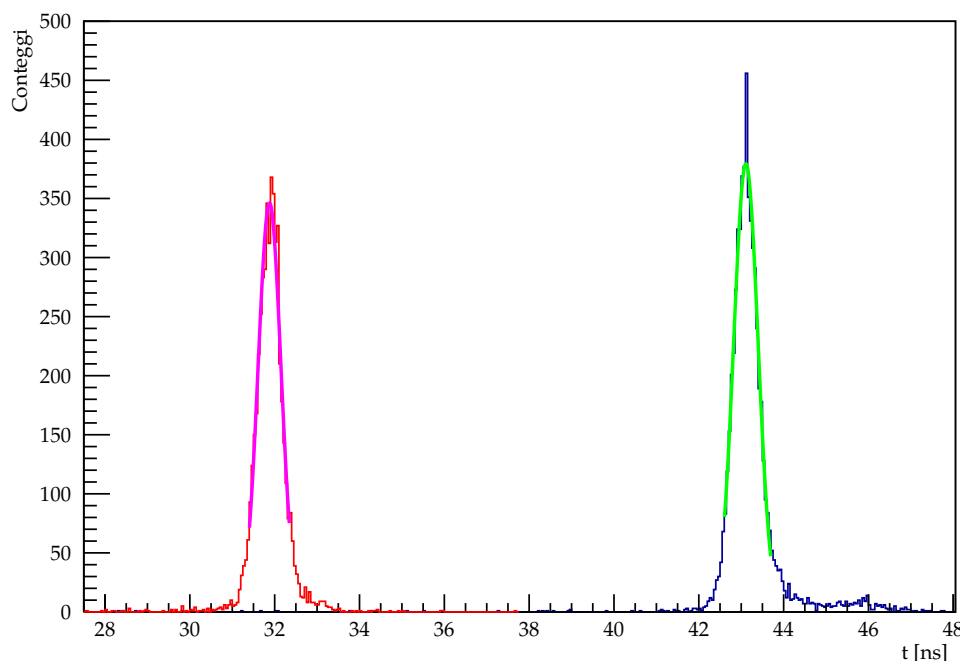


Figura 9: *light*

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:

Configurazione	Valore in canali	Errore	Valore in nanosecondi	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):

$$c = \frac{2(d - 2\delta)}{m(\Delta t_A - \Delta t_B)_{\text{canali}}} = (2.95 \pm 0.01) \times 10^8 \text{ m/s}$$

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 dai 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. 11 e Fig. 12

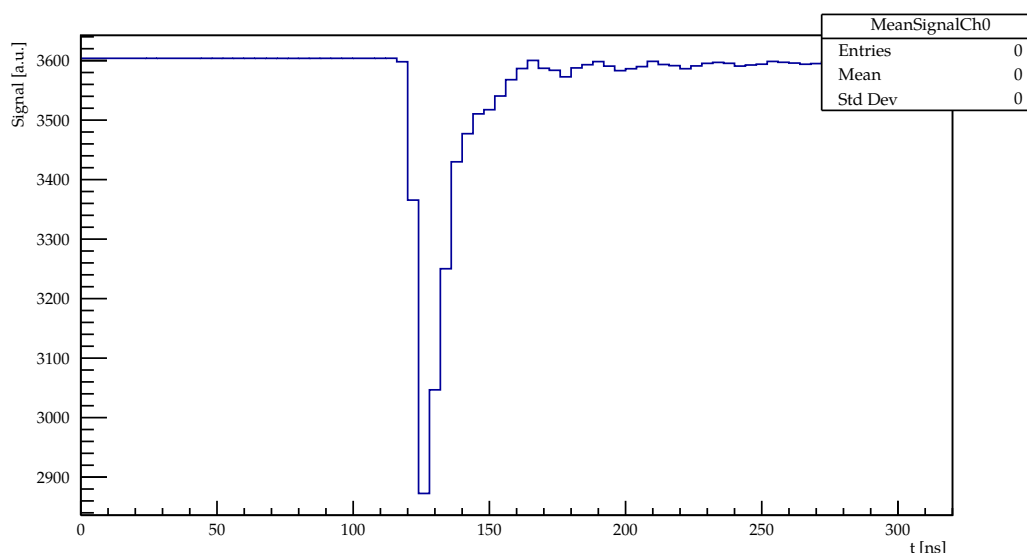


Figura 10: Segnale medio ottenuto dai segnali misurati nel canale 0 del digitizer

Tabella bella

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. 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 con una cubica tra i punti di massimo e minimo del segnale di "CF monitor", dato che l'interpolazione suggerita con una retta aveva diversi problemi dovuti alla bassa frequenza di campionamento (vedi Fig. 13) che davano una distribuzione temporale distorta.

Le distribuzioni ottenute al variare dei parametri sono state sovrapposte in Fig. ??, mostrando che la risoluzione migliore si ha quando il ritardo è di 4 ns e l'attenuazione è a 0.3. Dato però che questa distribuzione risulta essere leggermente deformata, si è preferito usare l'attenuazione a 0.4, la seconda migliore.

Una volta ottimizzato il CFTD, si è proceduto ad analizzare la risoluzione temporale in funzione di una soglia in energia. Fatta una calibrazione dei canali approssimativa sovrapponendo lo spettro totale (privo di coincidenza) con lo spettro ottenuto analogicamente, si è 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. 15

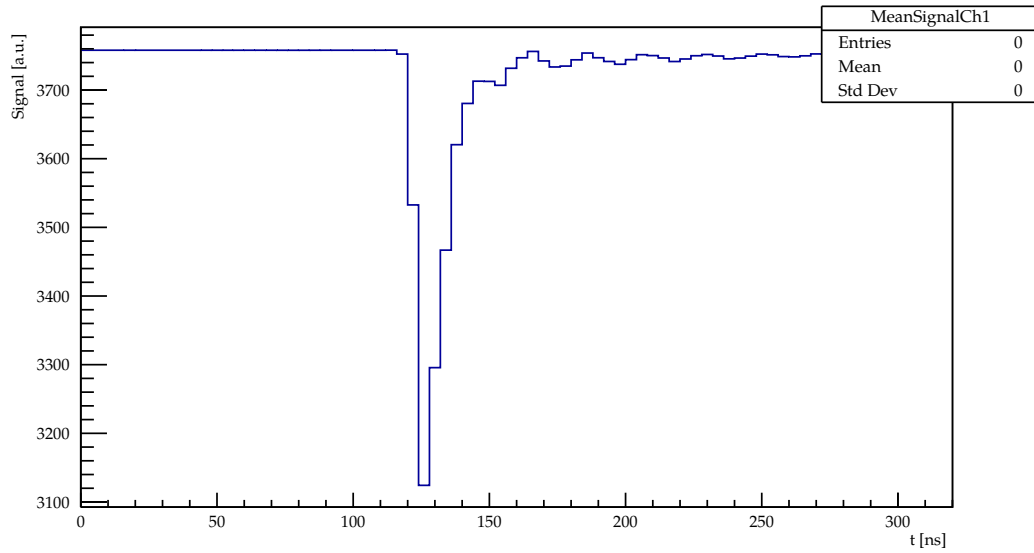


Figura 11: Segnale medio ottenuto dai segnali misurati nel canale 1 del digitizer

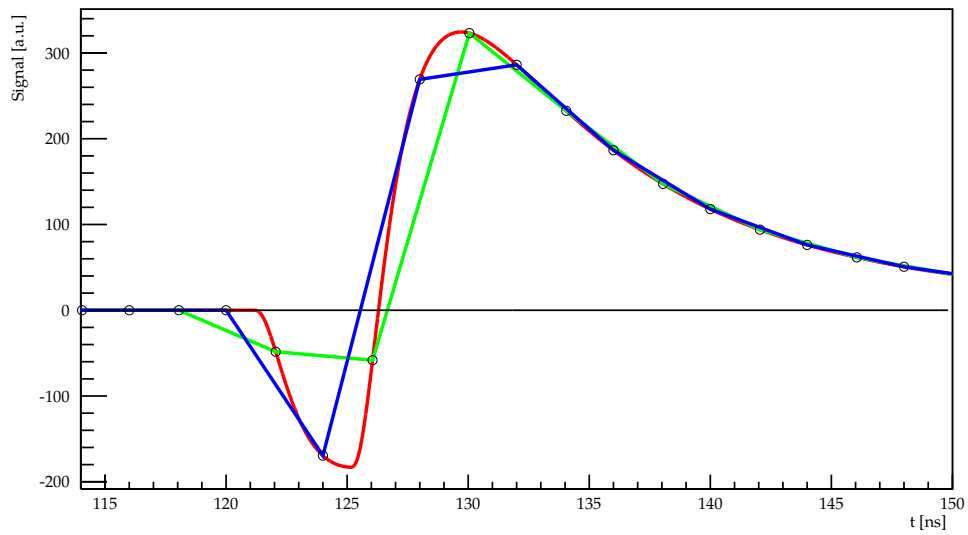


Figura 12: fail retta digi

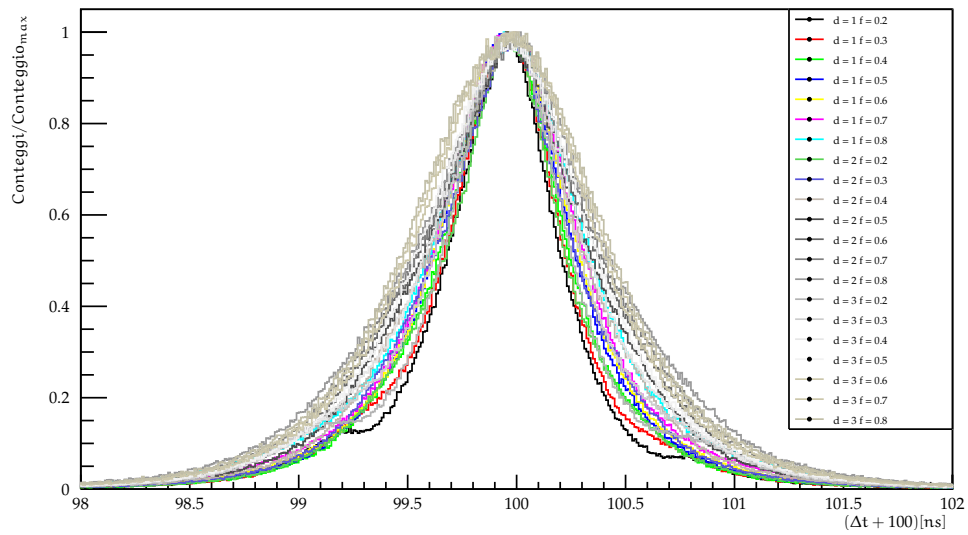


Figura 13: confronto ris temp CFTD

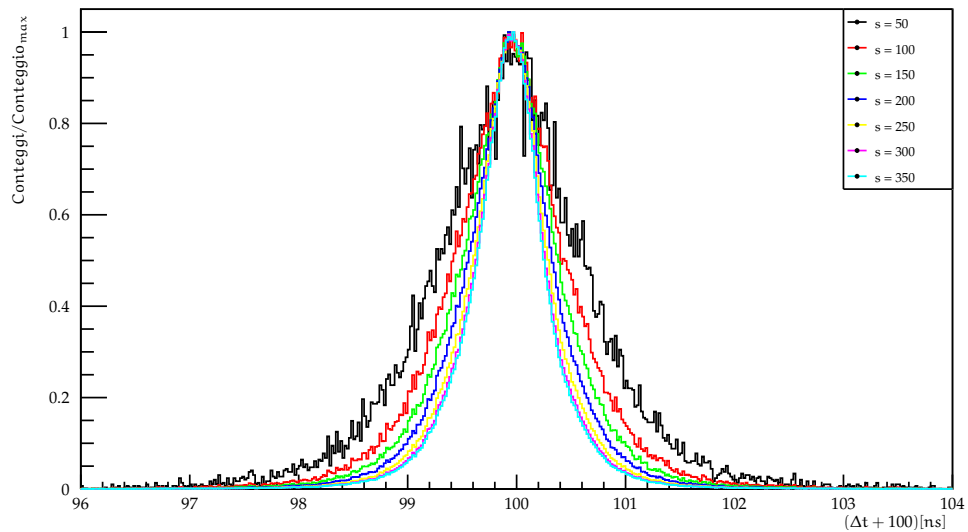


Figura 14: confronto ris temp energy

Tabella 6: Risoluzione temporale in funzione di dei parametri delay e attenuazione nell'algoritmo CFTD

delay	attenuation	centroide	errore	sigma	errore	FWHM
1	0.2	99.947	0.000466665	0.233271	0.000669415	0.00549643
1	0.3	99.9523	0.000509126	0.240807	0.000735589	0.0056737
1	0.4	99.9524	0.000570911	0.257318	0.000889945	0.00606273
1	0.5	99.9549	0.00067584	0.27523	0.00108602	0.0064846
1	0.6	99.9586	0.000693547	0.28527	0.00120484	0.00672089
1	0.7	99.9667	0.000759889	0.290201	0.00129067	0.00683652
1	0.8	99.9711	0.000883211	0.310629	0.00162171	0.00731742
2	0.2	99.9593	0.000509672	0.239812	0.000743546	0.00564988
2	0.3	99.9613	0.000650171	0.271533	0.00107911	0.00639707
2	0.4	99.9666	0.000781973	0.291525	0.00134951	0.00686771
2	0.5	99.9663	0.000855084	0.308752	0.00161424	0.00727357
2	0.6	99.9732	0.000934516	0.319411	0.00181931	0.00752415
2	0.7	99.9764	0.00103564	0.334705	0.00212091	0.00788417
2	0.8	99.9829	0.0011945	0.347099	0.00240677	0.00817557
3	0.2	99.9585	0.000586917	0.257649	0.000910735	0.00607016
3	0.3	99.9619	0.000735684	0.285246	0.00124576	0.00672011
3	0.4	99.964	0.000958801	0.314469	0.00168554	0.00740841
3	0.5	99.9634	0.00108457	0.347524	0.00228165	0.00818718
3	0.6	99.9641	0.00125769	0.369251	0.00275734	0.00869899
3	0.7	99.9643	0.00146255	0.390665	0.00329993	0.00920346
3	0.8	99.9618	0.00173264	0.412045	0.0039215	0.00970738

Tabella 7: Risoluzione temporale in funzione di una soglia di energia nelle misure digitali

intervallo energetico	centroide	errore	sigma	errore	FWHM
0-50	99.9472	0.00934141	0.557662	0.0182382	0.0131399
0-100	99.9528	0.00295561	0.425511	0.0051324	0.0100255
0-150	99.956	0.00167237	0.367191	0.00286003	0.00865115
0-200	99.953	0.00100735	0.326118	0.0016163	0.00768368
0-250	99.9535	0.000703918	0.28867	0.00104528	0.00680133
0-300	99.9516	0.000566218	0.271327	0.000797072	0.00639283
0-350	99.9499	0.000504595	0.268443	0.000670591	0.00632499

4. appendice test

Le appendici invece vanno qua, con la stessa convenzione di numeri che per i capitoli

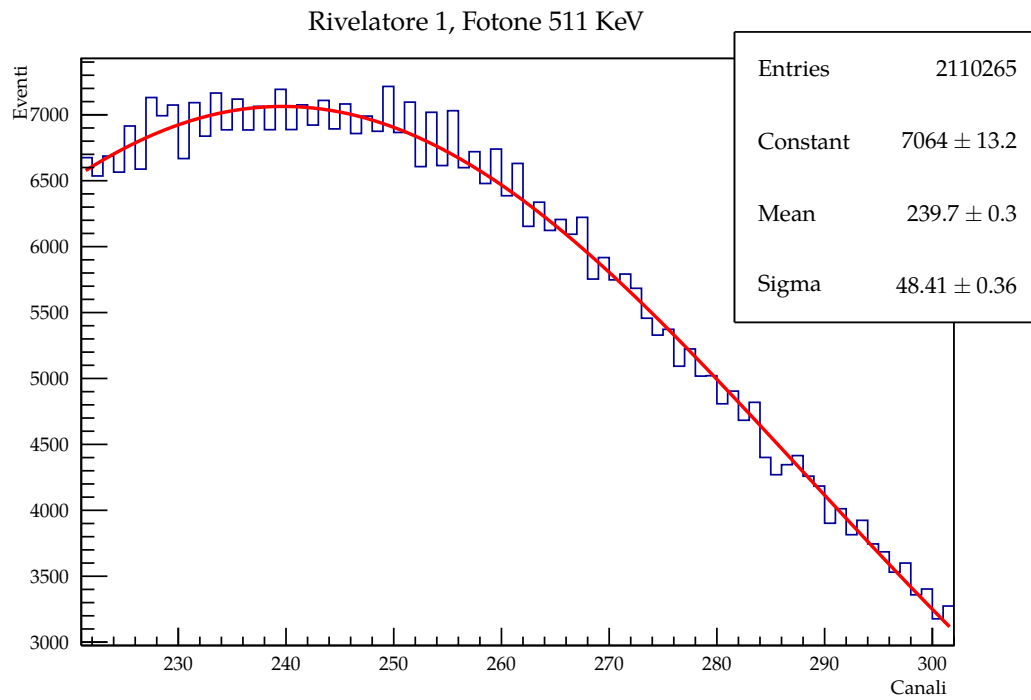
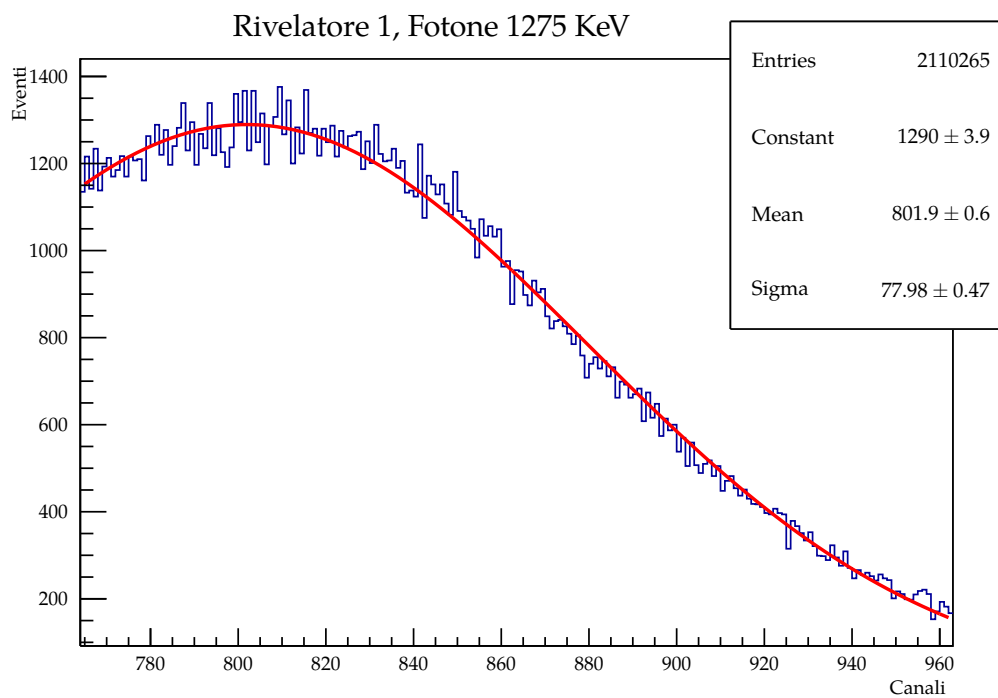
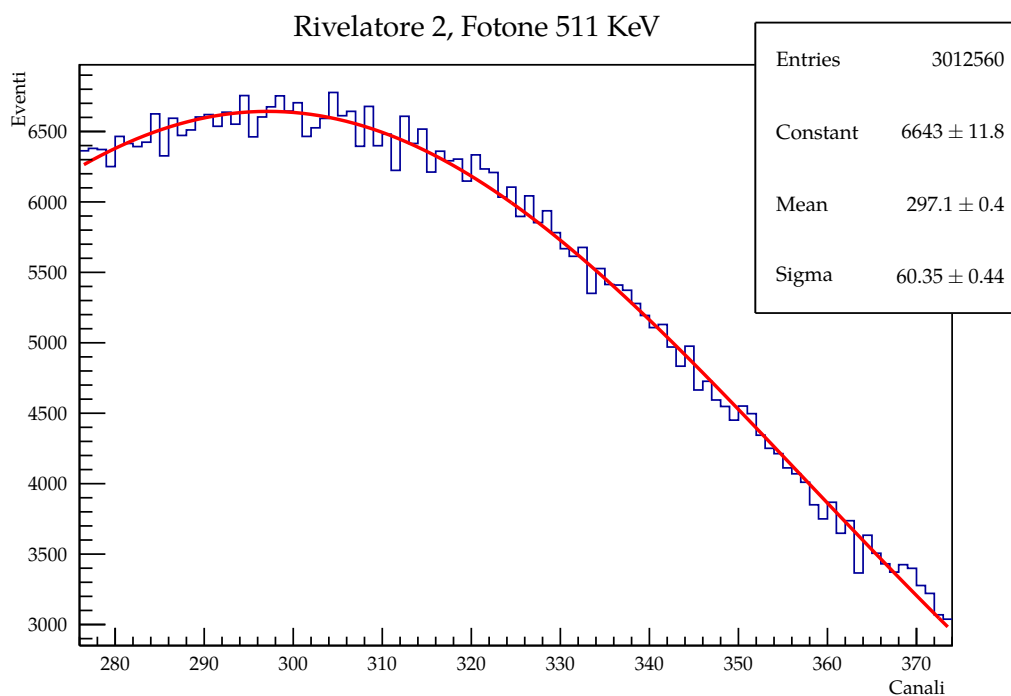
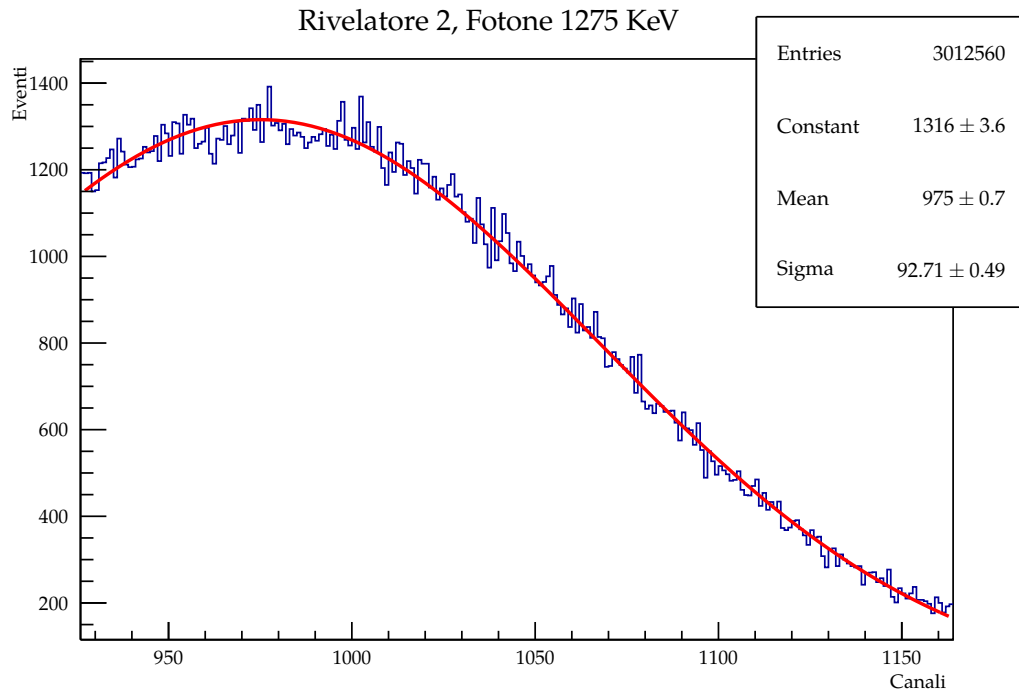
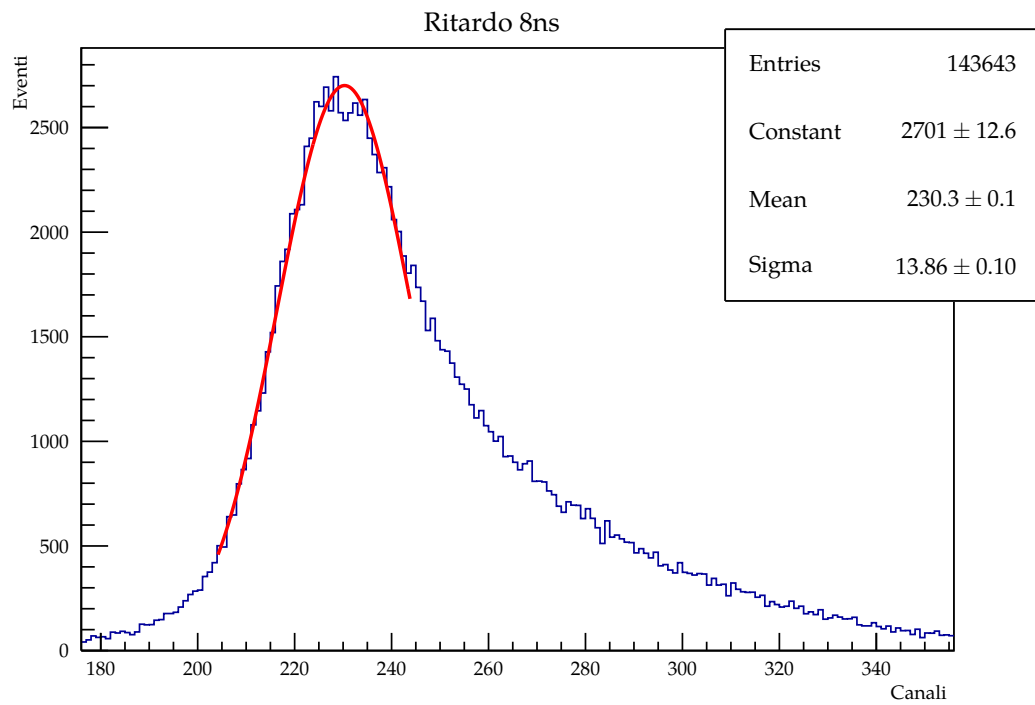
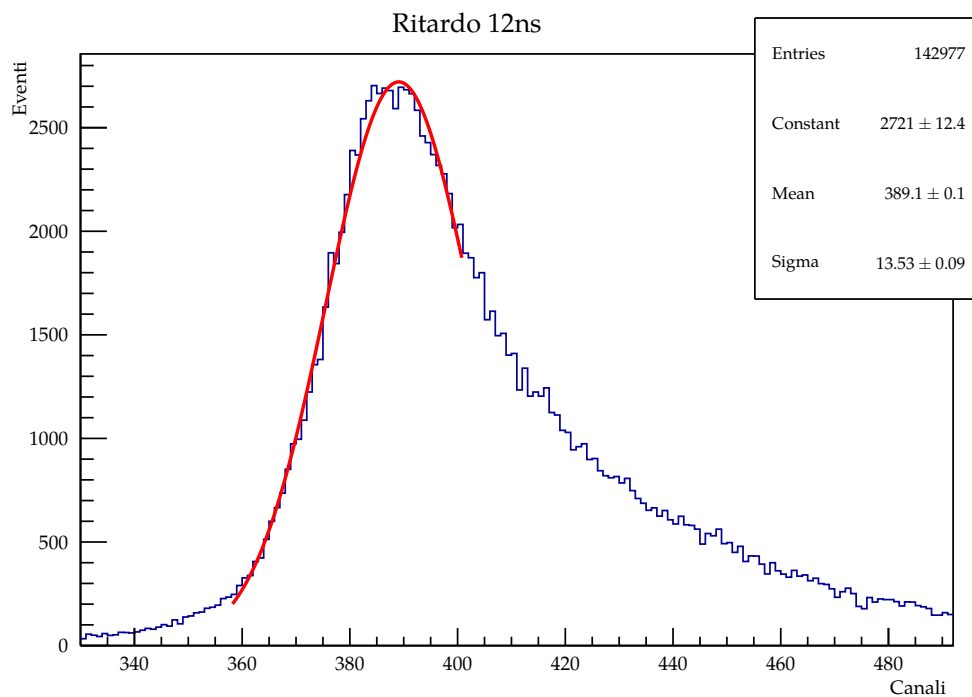
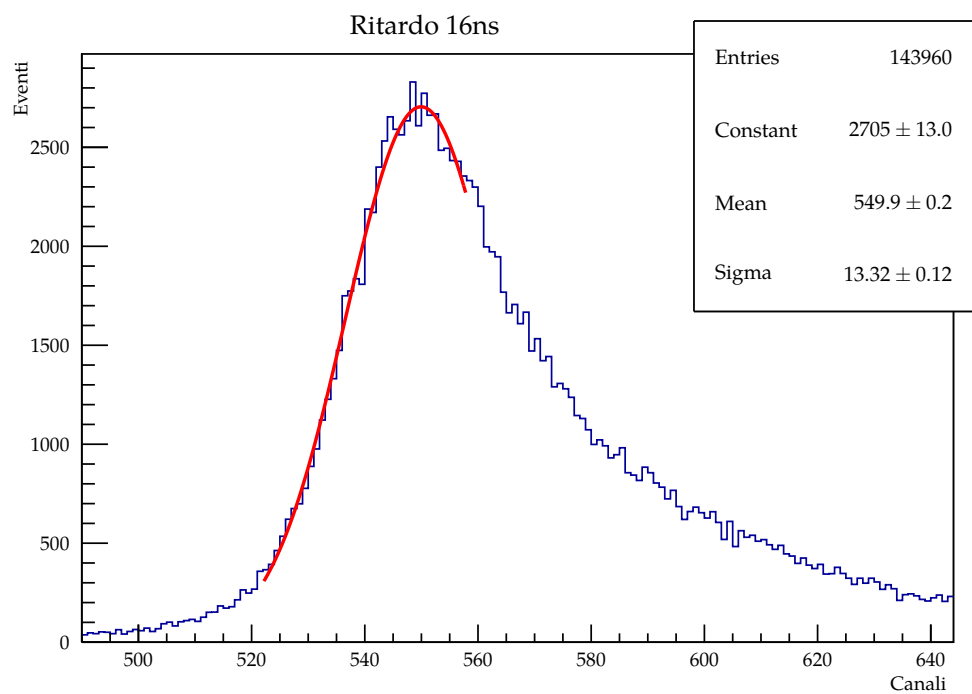
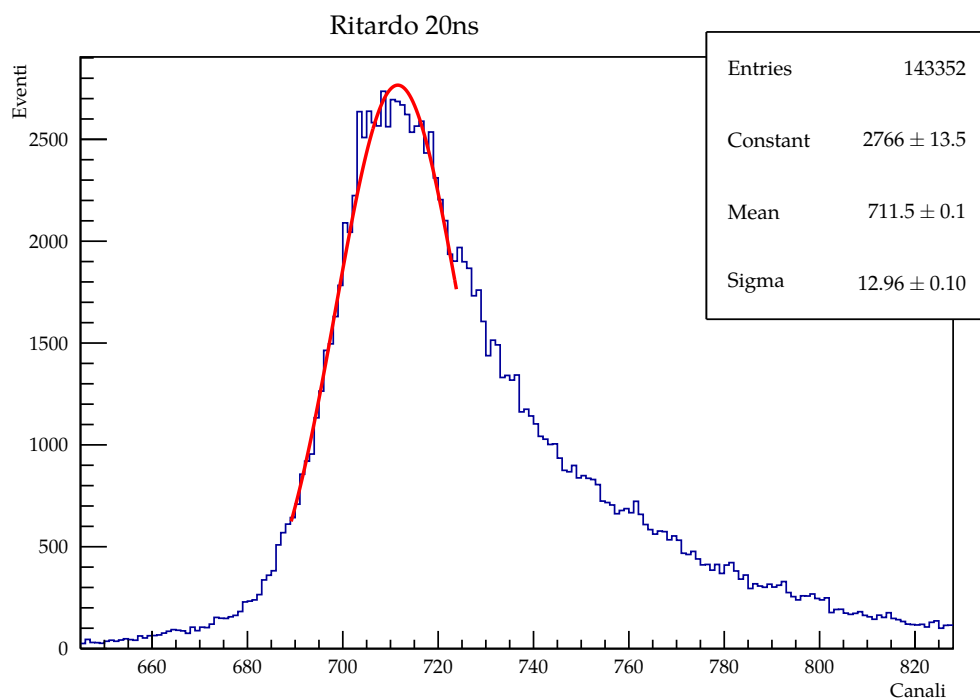
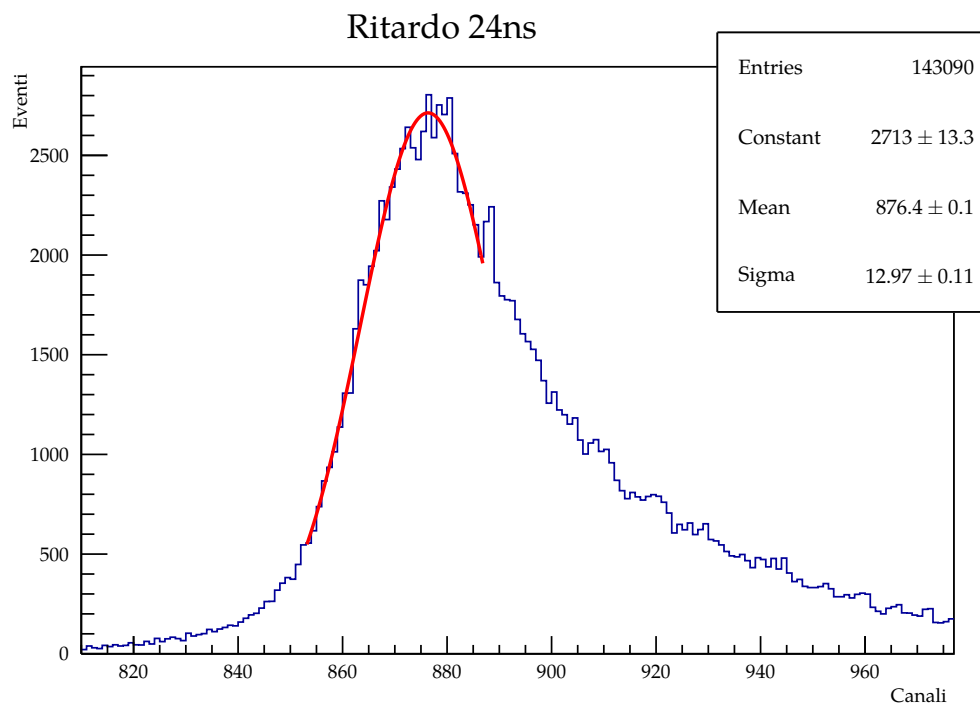


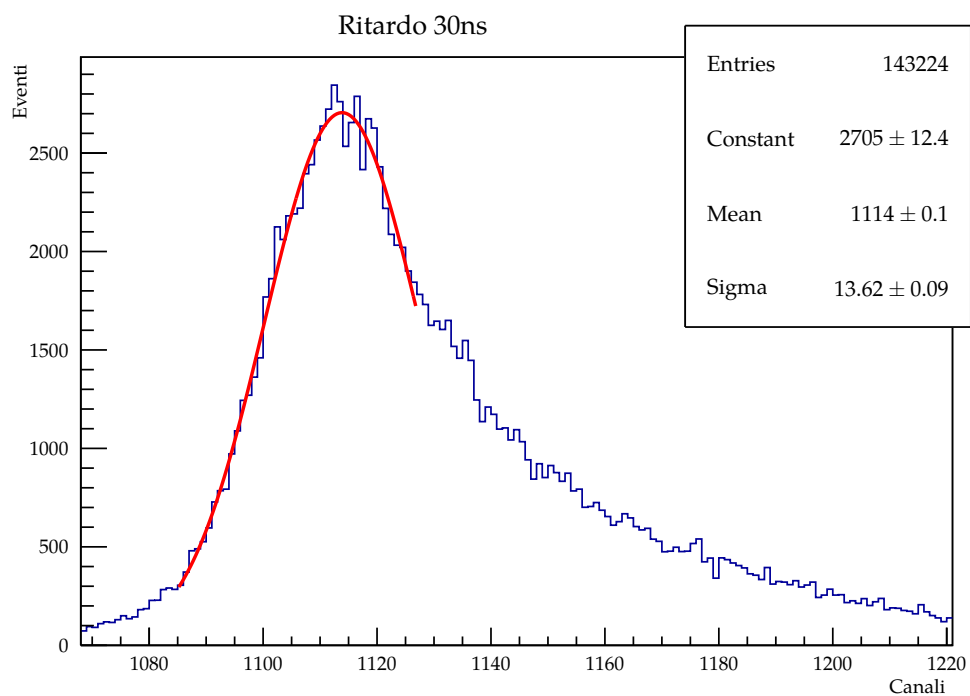
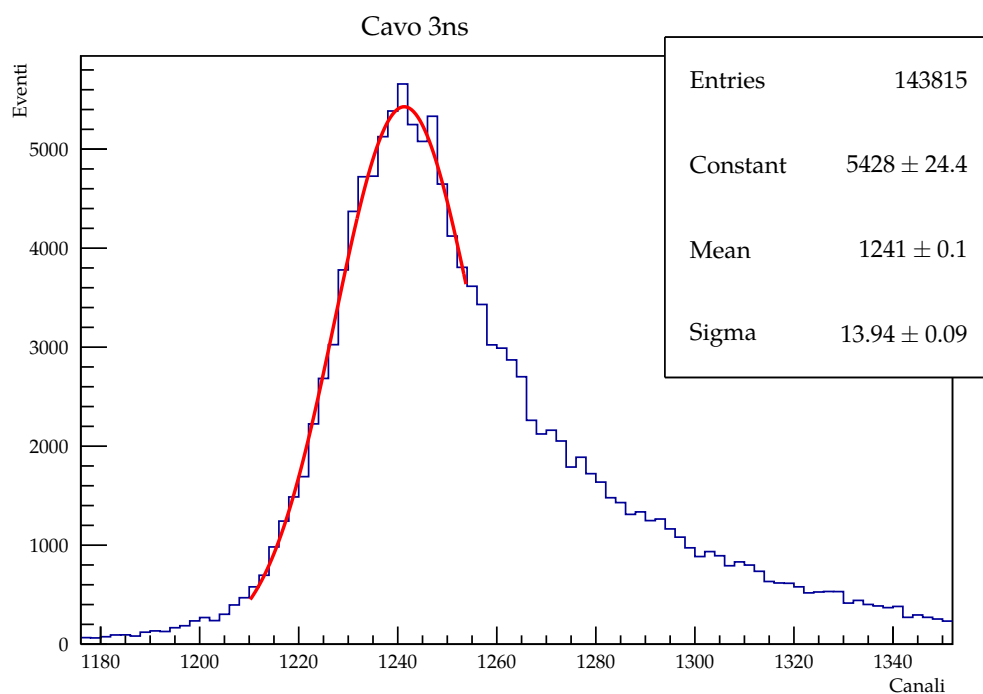
Figura 15: *r1 511*

**Figura 16:** *r1 1275***Figura 17:** *r2 511*

Figura 18: *r2 1275*Figura 19: *Ritardo8ns*

Figura 20: *Ritardo12ns*Figura 21: *Ritardo16ns*

Figura 22: *Ritardo20ns*Figura 23: *Ritardo24ns*

Figura 24: *Ritardo30ns*Figura 25: *Cavo 3ns*

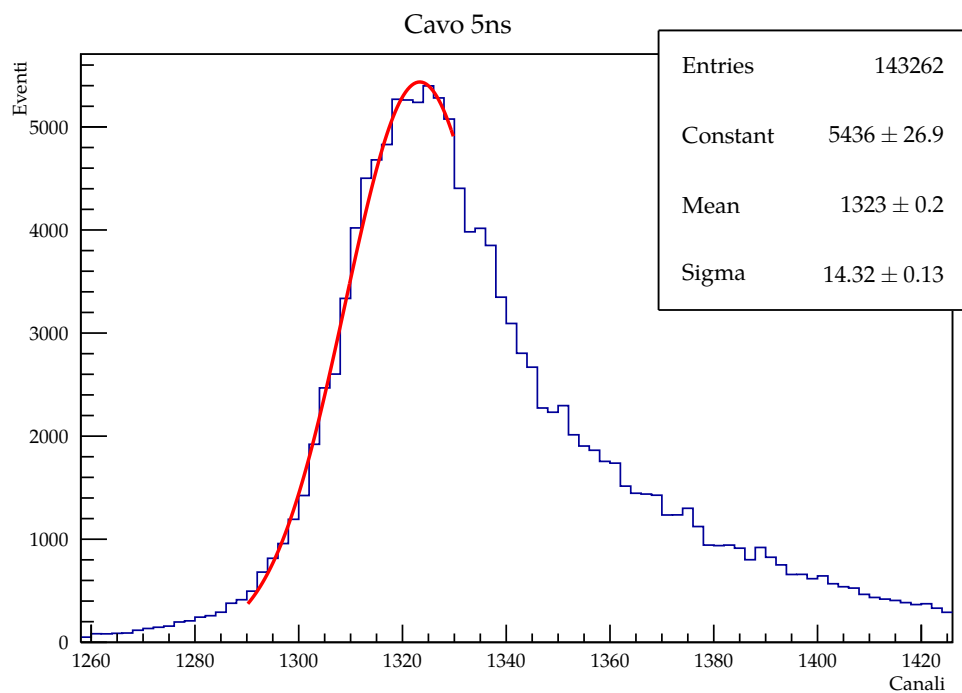


Figura 26: Cavo 5ns

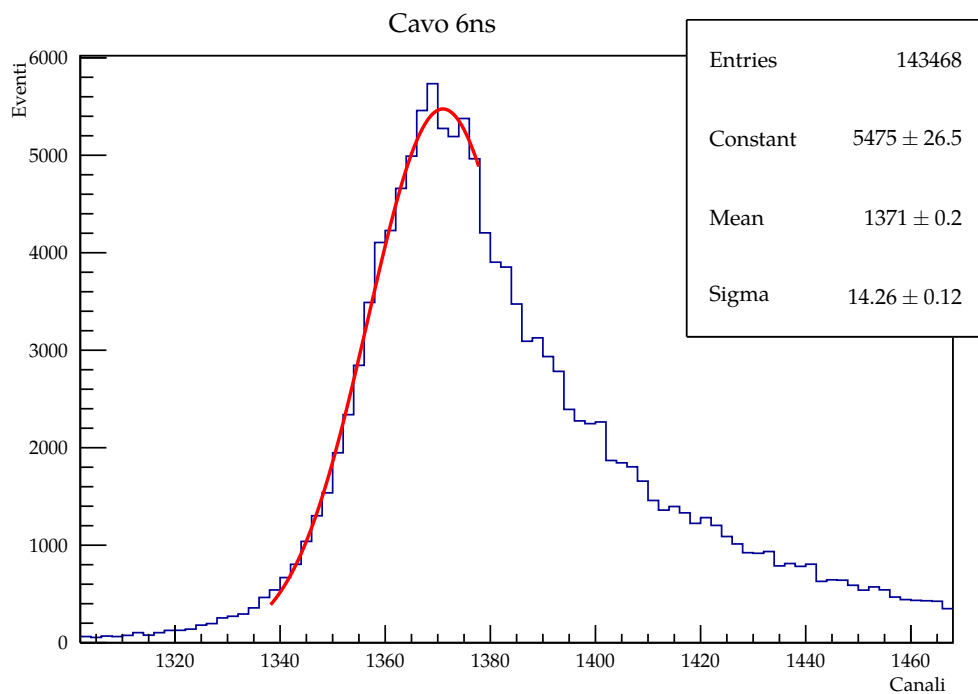


Figura 27: Cavo 6ns