

Time of flight

Andrea Foresi

15 gennaio 2021

Indice

1	Strumentazione	1
2	Calibrazione Apparato sperimentale	2
2.1	Discriminazione	3
2.2	Alimentazione	3
2.3	Coincidenze	4
3	Velocità della luce nella barra scintillante	6
3.1	Cenni teorici	6
3.2	Misure	6
3.3	Analisi dati, Oscilloscopio	6
3.4	Analisi dati ADC	7
4	Misura della distribuzione di V	8
4.1	Cenni Teorici	8
4.2	Calcoli	8
4.3	Misure	9
4.4	Eventi Ultrarelativistici	10
5	Attenuazione	11
5.1	Dipendenza dalla posizione	11
5.2	Dipendenza dall'angolo	12
6	Altre distribuzioni	14
7	Conclusioni	15
A	Problemi affrontati	16
A.1	Coincidenze casuali: "ADC Record Length"	16
A.2	Analisi dati, Ricerca dei minimi	16
A.3	Segnali mal riprodotti, "ADC Sample Rate"	17
A.4	Scelta calcolo Time-Stamp	19

Sommario

Scopo di questa esperienza è quello di misurare la distribuzione della velocità dei raggi cosmici e valutare quale frazione di essi sia relativistica. Per questo intento useremo un apparato sperimentale schematicizzato in figura 1. Per queste misure è necessario conoscere la velocità della luce nella barra scintillante(3) calcolata in due maniere con dati presi da oscilloscopio e con l'ADC. Per valutare la frazione di particelle oltre una certa soglia di energia e quindi di velocità si pone del Piombo lungo la traiettoria della particella; si ricostruisce nuovamente il grafico di distribuzione di V e se ne fa un rapporto. Durante l'esperienza sono stati incontrati alcuni problemi. Il primo si tratta dell'efficienza di un fotomoltiplicatore (2.3). Altre difficoltà si sono riscontrate durante la fase di analisi dati per un'incorretta ricostruzione del segnale impulsivo proveniente dai fotomoltiplicatori dovuta a delle caratteristiche dell'ADC converter (A). Queste difficoltà di ricostruzione del segnale hanno segnato infatti la maggior parte dei risultati ottenuti.

1 Strumentazione

- Barra scintillante BICRON BC408 con 2 fotomoltiplicatori alle estremità (numeri 1 e 2)
- Scintillatore plastico piano con relativo PMT di piccole dimensioni (numero 3).
- PMT4 accoppiato ad uno scintillatore piano di dimensioni maggiori rispetto al PMT-3
- Strumentazione ADQ

– Oscilloscopio 4 canali Tektronix MDO34

- Alimentatore 4 canali CAEN DT5533E
- Moduli NIM: ADC converter CAEN N6725S, discriminatore, ritardi, contatore.

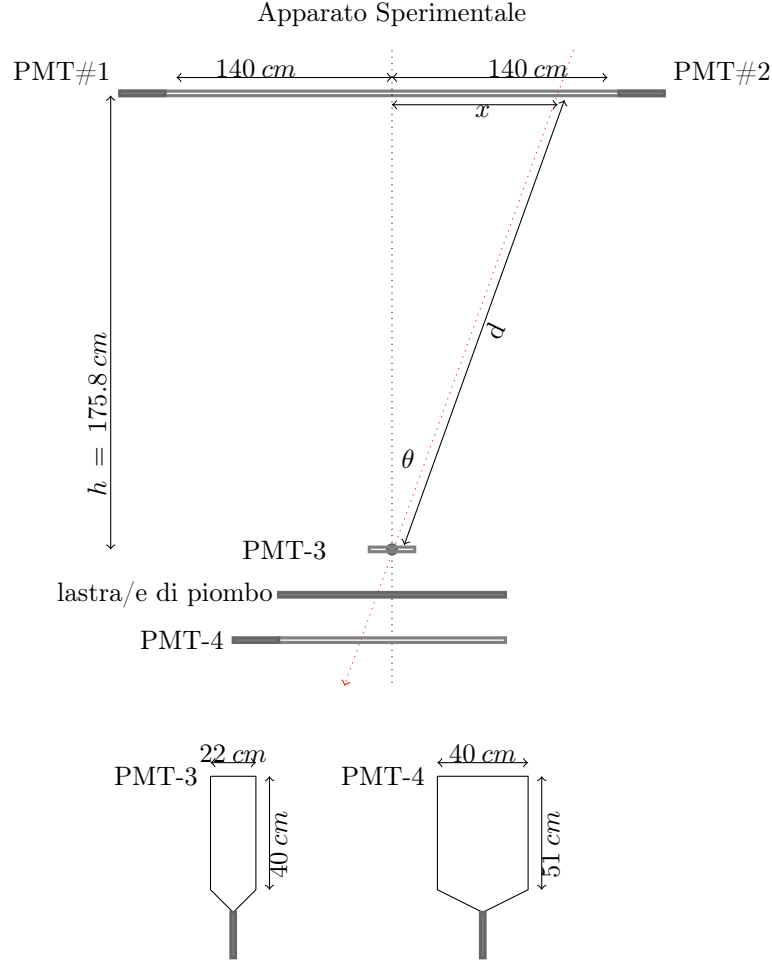


Figura 1: Schema apparato sperimentale, in rosso la traiettoria di una qualsiasi particella passante per il sistema. Con x è indicata la posizione nel quale la particella passa attraverso la barra. L'assemblaggio dell'apparato non è oggetto della relazione in quanto fatto dal tecnico di laboratorio

Misure preliminari

- $h = 175,8 \pm 0,1$ cm
- $L \sim 280$ cm
- PMT-3 40x22 cm
- PMT-4 51x40 cm
- Barra scintillante $\sim 2,80\text{m} \times 4\text{cm} \times 4\text{cm}$, indice di rifrazione $n \sim 1,58^1$
- Altezza del PMT-3 rispetto al PMT-4 $\sim 3\text{cm}$ ($\ll h$)

2 Calibrazione Apparato sperimentale

Per trovare i corretti punti di lavoro dei 4 PMT prima si sono discriminati i segnali dal possibile rumore (sec:refsec:DiscrSegn), poi è stata provata una calibrazione dei singoli PMT per cercare una prima alimentazione tramite il metodo della ricerca del Plateau (sec:2.2). Infine si è proceduti con la calibrazione tramite massimizzazione del rapporto tra coincidenze doppie e triple (sec:2.3)

¹Altri dati su <https://www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/bc400-404-408-412-416-data-sheet.pdf>

2.1 Discriminazione

Segnali su oscilloscopio

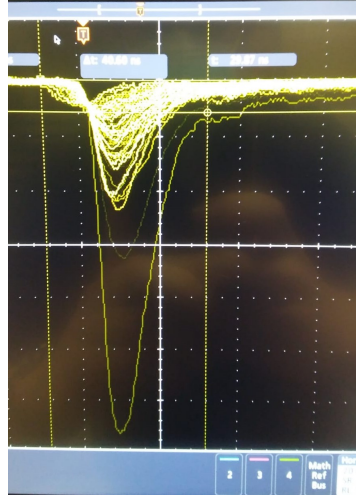


Figura 2: Divisioni: $\frac{10ns}{div}$ nei tempi $\frac{20mV}{div}$ per i voltaggi

La scelta del tempo di lunghezza del segnale output del discriminatore è stata fatta osservando la durata dei tempi di un singolo impulso (~ 15 massimo $20ns$ come da figura 2) al quale però è stato pensato di aggiungere un possibile ritardo dovuto alla differenza di trasmissione. Infatti dovendo misurare dei ritardi di qualche ns tra due o più segnali, quindi non in coincidenza quasi istantanea tra loro, sono stati stimati alcuni possibili tempi di percorrenza delle particelle e dei segnali:

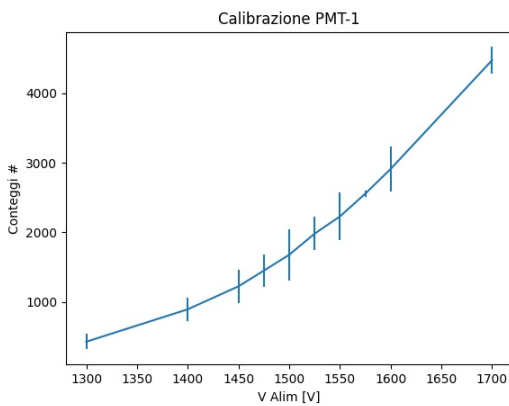
- Il primo ritardo è dovuto alla velocità della luce nella barra scintillante lunga: $v_{teorica} = \frac{30 \frac{cm}{ns}}{n} = 19 \frac{cm}{ns}$, perciò si ha un ritardo massimo di $\frac{L=280[cm]}{v=19[\frac{cm}{ns}]} \simeq 15ns$
- il secondo ritardo è quello dovuto al tempo di volo delle particelle. La distanza massima che percorrono le particelle è di circa: $d = \sqrt{\frac{L^2}{2} + h^2} \simeq 224cm$, e supponendo una velocità di $10 \frac{cm}{ns}$ si ottiene un ritardo di $\sim 21ns$

Dopo aver visualizzato i segnali di figura 2 sono stati scelti i seguenti livelli di discriminazione:

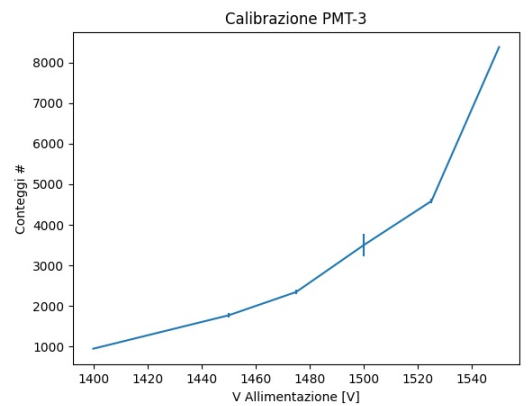
- -45mv in ampiezza
- 50 ns in larghezza di tempi

2.2 Alimentazione

Sono state ricercate le alimentazioni dei PMT-3 e PMT-1 tramite conteggi in singola



(a) Gli errori in figura sono moltiplicati per 10



(b)

Figura 3: Calibrazioni dei PMT presi individualmente. I conteggi sono stati presi per 10 secondi

Non avendo osservato un evidente plateau in nessuno dei due grafici (vedi figura 3) è stato scelto di alimentarli inizialmente tutti con una tensione di 1600V

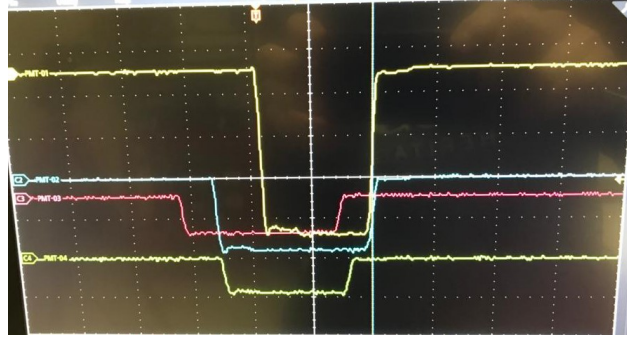


Figura 4: In giallo il segnale della coincidenza tripla. Verde e blu PMT collegati alla barra scintillante Rosso PMT-3. Trigger impostato sulla coincidenza tripla

2.3 Coincidenze

Per la calibrazione tramite coincidenze sono state fatte due prove, la prima ricercando un Plateau nel rapporto tra coincidenze, la seconda invece andando a massimizzare l'efficienza osservando che i conteggi in singola non aumentassero di troppi ordini di grandezza

Ricerca Plateau

Per primo è stato calibrato il PMT-1 dove:

Le coincidenze doppie sono C_{23}^2 e le triple C_{123}

$V_{Alim2} = V_{Alim3} = 1600V$

Soglie impostate a $\sim -45mV$ per i PMT-1e2 e $\sim -50mV$ per il PMT-3

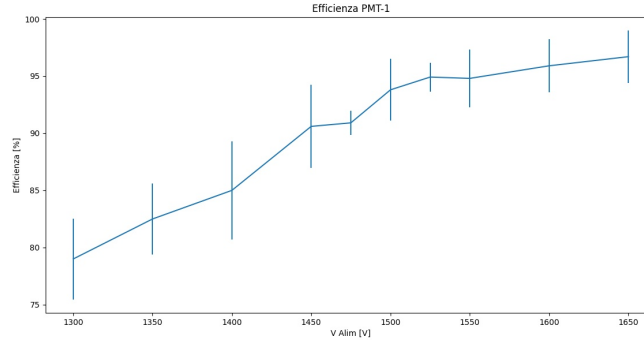


Figura 5: Per gli errori è stato considerato l'errore di efficienza dovuto ad una distribuzione binomiale: $\sigma = \sqrt{\frac{\epsilon(1-\epsilon)}{N}}$, dove $\epsilon = \frac{n}{N}$, n è il numero di occorrenze positive e N quello totale

Osservando la figura 5 per il PMT-1 è stata selezionata un'alimentazione di 1510 per un'efficienza del 93.8%.

Questa scelta però può essere limitante, facendo un stima delle coincidenze casuali si nota infatti che, anche con un'efficienza ritenuta alta del 96%, rimangono comunque molto basse:

$$f_{cas} = f_1 f_2 f_3 \tau_1 \tau_2 \simeq (5 * 10^2)(5 * 10^2)10^3(50 * 10^{-9})^2 = 6,25 * 10^{-7} cps \quad (1)$$

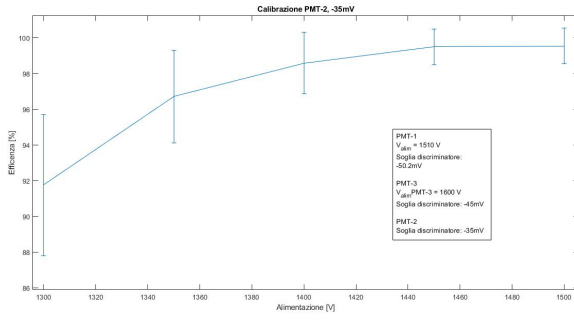
Massimizzazione dell'efficienza

Per questo metodo di calibrazione è stato tenuto il PMT-3 nel centro della barra scintillante e a turno è stato calcolato il rapporto tra coincidenze doppie e triple per PMT-1 e 2.

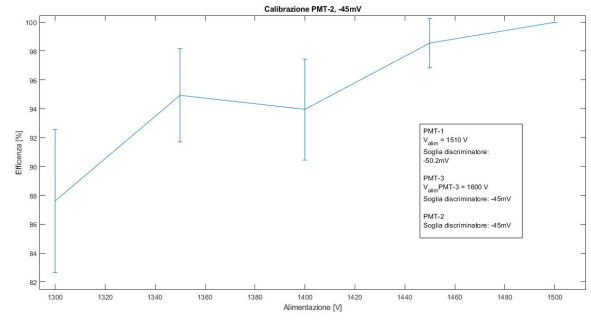
Si sceglie una tensione di alimentazione che corrisponda ad un'efficienza del 98%.

PMT-2; Scelta soglia discriminazione Per la prima calibrazione (PMT-2) si è verificata una possibile dipendenza della curva di efficienza dal valore di soglia impostato con il modulo discriminatore NIM .

²Con C_{ijk} si indica una coincidenza tra i segnali raccolti dai PMT numerati con i, j e k



(a)



(b)

Figura 6: Efficienze del PMT-2 con due livelli di soglia differente: -35mV 6a, -45mV 6b

Nei due tentativi a soglie diverse si nota che quando si raggiunge l'efficienza desiderata del 98% si hanno i seguenti conteggi in singola:

Soglia [mV]	V_{Alim} [V]	cps PMT-1	cps PMT-2	cps PMT-3
-35	1400	149	142	986
-45	1450	150	142	852

Non essendoci differenze sostanziali è stata preferita la scelta con: soglia = -35mV; $V_{Alim_2} = 1400V$

PMT-1, soglia -35mV Per il PMT-1 è stata tenuta la soglia a -35 così da tenerlo simile al PMT-2

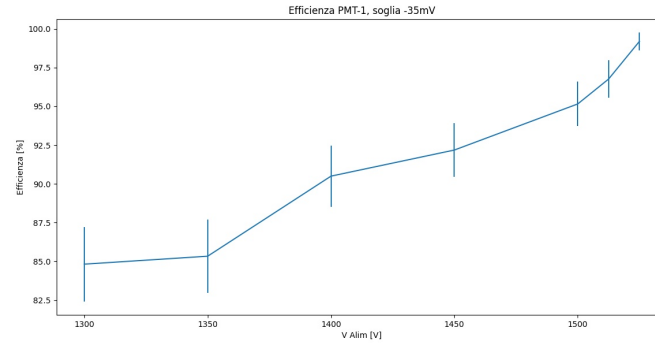


Figura 7: Per un valore di alimentazione di 1550V sono state trovate un numero maggiore di triple rispetto alle doppie. $V_{Alim_3} = 1600V$, $V_{Alim_2} = 1400V$

Facendo riferimento alla figura 7 è stato deciso di alimentare il PMT-1 con $V_{Alim_1} = 1525V$

PMT-4 Per questa calibrazione abbiamo posizionato lo scintillatore 3 esattamente sopra lo scintillatore 4 come in figura 9.

Le doppie sono C_{23} e le triple C_{234}

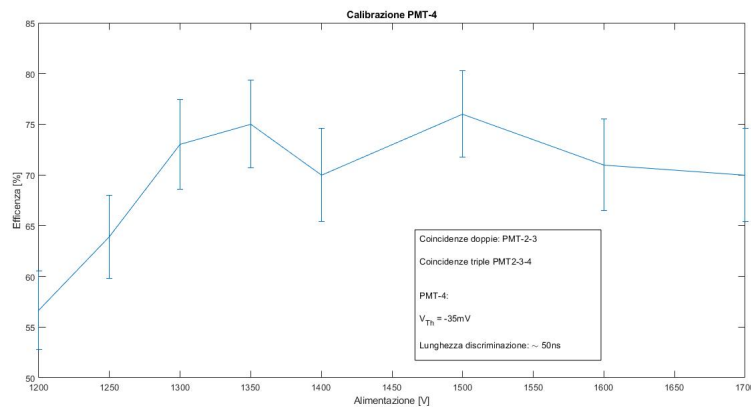


Figura 8: I segnali del PMT-4 sono stati discriminati con una soglia a -35mV e una lunghezza di discriminazione di 50ns

Notiamo che nonostante lo scintillatore 4 sia notevolmente più grande del 3 l'efficienza è ben diversa da quella attesa del 100% ma si stabilizza all'incirca sul 70%.



Figura 9: Lo scintillatore 4 è posto sotto del legno, ne è purtroppo poco visibile solo il perimetro segnato a matita

I problemi potrebbero essere dovuti a parti elettroniche, connessioni o ad effetti fisici, non sicuramente geometrici. La scelta è stata presa scegliendo un valore di alimentazione che si avvicinasse ai fotomoltiplicatori precedenti e che fosse comunque relativamente massima con conteggi dell'ordine del centinaio di Hz:

$V_{Alim}[V]$	doppie	triple	Cont. PMT-1	Cont. PMT-2	Cont. PMT-3	Cont. PMT-4	Tempo [ms]
1400	100	84	668883	48185	135507	92826	273037
1350	100	67	62857	41377	168528	86412	349377

in entrambi i casi si rimane su valori delle centinaia di cps. Si sceglie di alimentare con 1400V (~ 340 cps)

3 Velocità della luce nella barra scintillante

3.1 Cenni teorici

Ogni volta che una particella carica attraversa la barra scintillante questa rilascia energia eccitando gli elettroni degli atomi reticolari; successivamente per diseccitamento vengono liberati fotoni che formeranno un fascio luminoso. Questo segnale luminoso deve attraversare la lunghezza dello scintillatore plastico per raggiungere uno dei due capi e poter essere rivelato dal fotomoltiplicatore.

La luce essendo in un mezzo fisico e non nel vuoto andrà ad una velocità ridotta del valore dell'indice di rifrazione del materiale $n \simeq 1.58$. Quindi $v_{luce} = \frac{30}{1.58} \simeq 19,0 \frac{cm}{ns}$

3.2 Misure

Per la velocità dei segnali all'interno della barra scintillante lunga abbiamo posizionato il PMT-3 in diversi punti della barra così da fissare la distanza percorsa dalla luce e abbiamo associato la velocità seguendo questa formula.

Le misure nei due metodi differenti sono state presi in momenti diversi

$$\Delta t = \frac{2x - L}{v} + (\tau_1 - \tau_2) \quad (2)$$

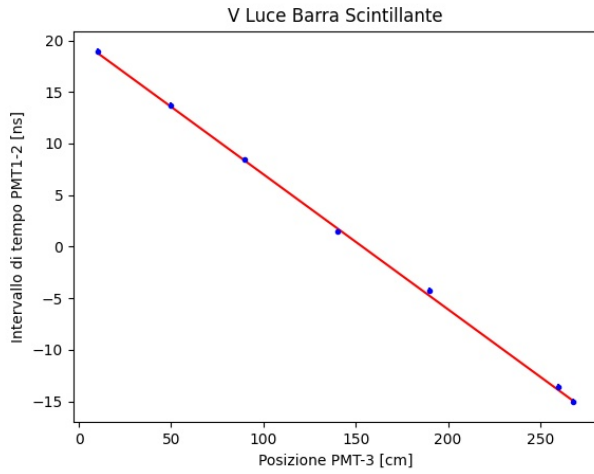
dove L è la lunghezza della barra (280 cm) Δt il ritardo tra i segnali che leggiamo da oscilloscopio, x la posizione che scegliamo in base a dove poniamo il PMT-3, τ_1 e τ_2 dei possibili ritardi tra le trasmissioni dei segnali che vanno ad influire unicamente sull'offset della retta.

L'inverso del coefficiente angolare sarà la nostra velocità.

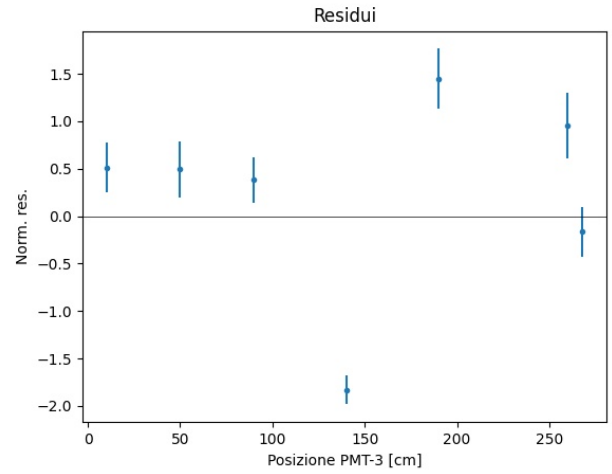
L'errore associato alla posizione del PMT-3 è dato dalla larghezza dello scintillatore 3 (22cm) divisa $\sqrt{12}(\sigma_x = \frac{22}{\sqrt{12}})$ poiché assumiamo che la probabilità che una particella attraversi il materiale è uniforme su tutta la larghezza del rivelatore.

3.3 Analisi dati, Oscilloscopio

Sono stati presi 100 di questi eventi tripli per ognuna delle posizioni scelte e ne è stata presa direttamente media e devstd calcolata dall' oscilloscopio. A quel punto ne è stato fatto un fit con la retta in equazione 2



(a) I dati sono stati fittati utilizzando l'equazione 2



(b)

Figura 10

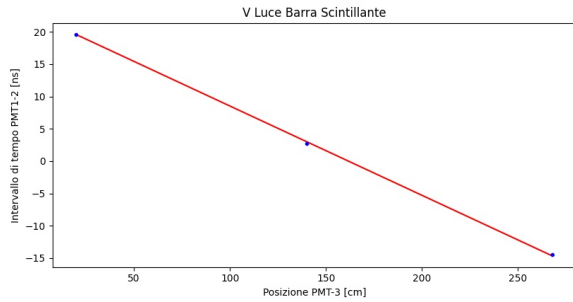
Dal fit abbiamo ottenuto i seguenti risultati:

$v \left[\frac{cm}{ns} \right]$	off [ns]	χ^2	ndof	norm.cov.
$-15,28 \pm 0,16$	$20,10 \pm 0,22$	7,04	5	0,86

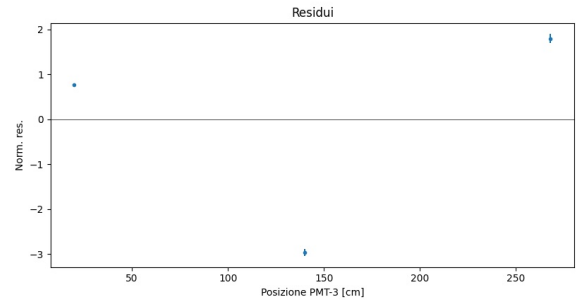
Il segno meno è dovuto alla scelta della differenza tra i PMT-1 e PMT-2.

3.4 Analisi dati ADC

Per questa analisi abbiamo preso diversi segnali in coincidenza tra PMT 1, 2 e 3 posizionato in alcune posizioni della barra e fatto media e devstd dei Δt ricavati



(a) Gli errori sono molto più piccoli rispetto al primo caso per la divisione per \sqrt{n} dove n è proprio il numero di campioni presi per una singola distanza dal PMT-1



(b)

Figura 11: In questo come nel caso precedente l'errore sulle x rimane molto piccolo rispetto a quello sulle y e dunque trascurabile

Dal fit abbiamo ottenuto i seguenti risultati:

$v \left[\frac{cm}{ns} \right]$	off [ns]	χ^2	ndof	norm.cov.
$-14,48 \pm 0,15$	$22,33 \pm 0,02$	12,61	1	0,64

In entrambi i casi la velocità è risultata inferiore a quella attesa ($\sim 19 \frac{cm}{ns}$) probabilmente perché il fascio di luce non compie delle traiettorie lineari dal punto in cui parte fino al fotocatodo ma riflettendosi lungo le pareti della barra scintillante compie un tragitto più lungo.

Nella misura con l'ADC ci sono troppi pochi dati e lo notiamo dal rapporto $\frac{\chi^2}{ndof} \gg 1$

4 Misura della distribuzione di V

4.1 Cenni Teorici

L'obiettivo di questa sezione è quello di misurare la distribuzione di velocità delle particelle cosmiche che riveliamo grazie all'apparato descritto in sezione 1.

I muoni hanno vita media molto breve e se visti dal sistema di riferimento nel quale la particella si trova a riposo anche se si muovessero alla velocità della luce questi non raggiungerebbero la Terra. Invece se visti da un osservatore esterno questi per la dilatazione temporale raggiungono il livello del mare.

Dopo aver ricostruito la distribuzione di velocità di questi eventi saranno posizionate delle lastre di Piombo sulla traiettoria delle particelle, i Muoni essendo particelle cariche (carica -e) quando attraversano un mezzo perdono una quantità di energia per unità di lunghezza che segue la curva descritta dall'espressione nota come la "Bethe-Block". Secondo questa curva le particelle con poca energia perdono una quantità di energia maggiore rispetto a quelle più veloci³.

Quindi si ricostruirà un secondo grafico di distribuzione delle velocità delle particelle che avranno attraversato il piombo che sarà confrontato con il primo.

Set-up

Per questo intento si tiene il PMT-3 centrato sopra lo scintillatore 4 come in figura 9

Il tempo di volo e dunque la velocità sarà misurata rispetto al PMT-3 in quanto potrebbe avere una risposta più veloce rispetto al più grande PMT-4 che inoltre ha presentato un difetto in efficienza non di poco conto (vedi 2.3).

Il piombo sarà posizionato tra PMT3 e 4.

Per queste prese dati ci serviremo dell'ADC converter.

ADC Converter Alcune caratteristiche che hanno influenzato notevolmente la fase di analisi dati⁴

- Frequenza campionamento 250MHz, un campione ogni 4 ns
- Lunghezza singolo record 1030 dati, 4120 ns

4.2 Calcoli

Considerando il tempo t_0 come quello in cui una particella attraversa istantaneamente la barra scintillante⁵, scriviamo i tempi t_i , ovvero i tempi necessari ai vari canali di acquisizione dati di ricevere i segnali dei PMT.

Consideriamo inoltre il punto $x = 0$ il centro della barra.⁶

$$t_1 = t_0 + \frac{x}{v_l} + \tau_1 \quad (3)$$

$$t_2 = t_0 - \frac{x}{v_l} + \tau_2 \quad (4)$$

$$t_3 = t_0 + TOF + \tau_3 \quad (5)$$

dove τ_i sono i vari ritardi dovuti esclusivamente alla trasmissione, cioè il tempo necessario al segnale luminoso di andare dal punto di incidenza al fotocatodo del PMT e da esso poi raggiungere gli strumenti di presa dati; si assume il PMT-3 Prompt. v_l è la velocità della luce nella barra scintillante misurata nella sezione 3 e TOF il tempo di volo di una particella. Da questi 3 tempi serve trovare un'espressione che leghi prima i Δt misurabili alla posizione di passaggio della particella nella barra e successivamente alla velocità delle particelle⁷

$$\Delta t_{12} = t_1 - t_2 = t_0 + \frac{x}{v_l} + \tau_1 - t_0 - \frac{x}{v_l} - \tau_2 = 2\frac{x}{v_l} + R_{12} \quad (6)$$

$$\Delta t_{31} = t_3 - t_1 = t_0 + TOF + \tau_3 - t_0 - \frac{x}{v_l} - \tau_1 = TOF - \frac{x}{v_l} R_{31} \quad (7)$$

$$\Delta t_{32} = t_3 - t_2 = t_0 + TOF + \tau_3 - t_0 + \frac{x}{v_l} - \tau_2 = TOF + \frac{x}{v_l} R_{32} \quad (8)$$

Quindi per la posizione abbiamo:

$$x = (\Delta t_{12} - R_{12}) \frac{v_l}{2} \quad (9)$$

Per i tempi di volo possiamo utilizzare sia il ritardo Δt_{31} che Δt_{32} oppure mediare quest'ultimi per ricavare un'espressione indipendente dal calcolo della posizione ma unicamente dalle misure sui Δt :

³Qua mi riferisco unicamente alla parte di curva prima del minimo che si trova intorno a circa $3-4\beta\gamma$

⁴vedi l'appendice A per ulteriori dettagli

⁵Se consideriamo anche una velocità di $10 \frac{cm}{ns}$, che a posteriori è molto bassa, in realtà passa dal centro della barra dopo una frazione di ns, dunque un ritardo molto molto piccolo

⁶Sulla barra scintillante dell'esperienza il centro corrispondeva a 140cm di distanza dal PMT-1 e 140 dal PMT-2, figura 1

⁷Nelle seguenti espressioni appariranno termini come Δt_{31} o come R_{12} , in questi casi si deve fare attenzione all'ordine delle cifre a pedice. Per esempio $R_{12} = \tau_1 - \tau_2 \neq \tau_2 - \tau_1 = R_{21}$, quindi $R_{12} = -R_{21}$

$$TOF_1 = \Delta t_{31} + \frac{x}{v_l} - R_{31} \quad (10)$$

$$TOF_2 = \Delta t_{32} + \frac{x}{v_l} - R_{32} \quad (11)$$

$$TOF = \frac{TOF_1 + TOF_2}{2} = \frac{\Delta t_{31} + \Delta t_{32} - R_{31} - R_{32}}{2} \quad (12)$$

La velocità sarà dato da:

$$v = \frac{d}{TOF} = \frac{\sqrt{x^2 + h^2}}{TOF} \quad (13)$$

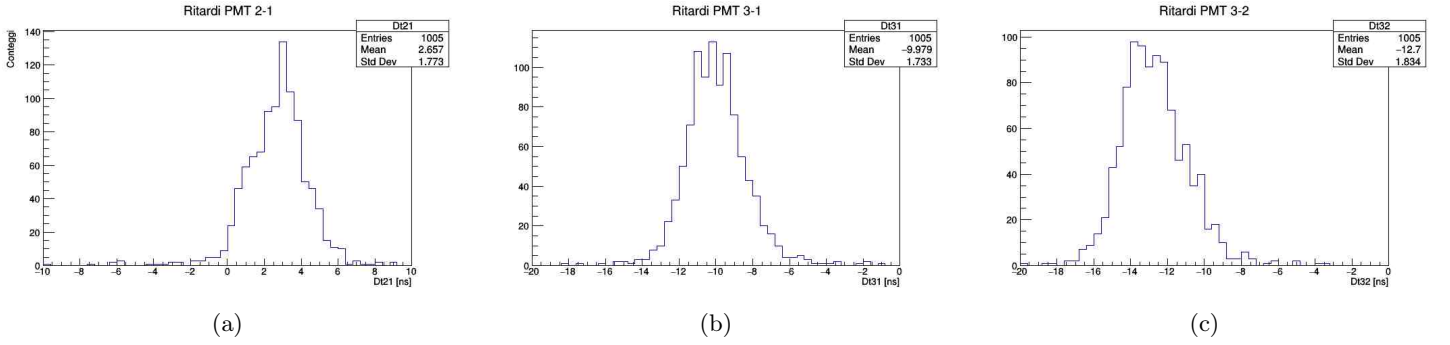
dove h è l'altezza della barra scintillante dal PMT-3, x la posizione rispetto al centro della barra scintillante e possiamo scegliere una delle misure di tempo di volo in equazioni 10,11,12

4.3 Misure

Misura del TimeStamp Per misurare l'istante in cui passa un segnale (per definizione 50% del minimo del segnale) è stato considerato il baricentro della discesa del segnale con qualche dato in più sia a tempi maggiori del minimo che a tempi minori dell'inizio del segnale. In particolare un campione prima della partenza del segnale e 3 dopo il minimo del segnale⁸

Ritardi R_{ij} ; $i,j=1,2,3$ Per misurare i Ritardi dovuti alla trasmissione del segnale (R_{ij} in equazione 13) è stato posizionato il PMT-3 sul centro della barra scintillante lunga triggerando sulle triple C_{123}

Ritardi PMT, $\tau_i - \tau_j$



Per ogni istogramma come quello di figura 12a sono stati eseguiti dei fit con una gaussiana per stimare i ritardi tra i PMT

Rit 2-1 [ns]	Rit 3-1 [ns]	Rit 3-2 [ns]
$2,74 \pm 1,42$	$-10,0 \pm 1,48$	$-12,8 \pm 1,65$

E dunque la distribuzione di velocità è

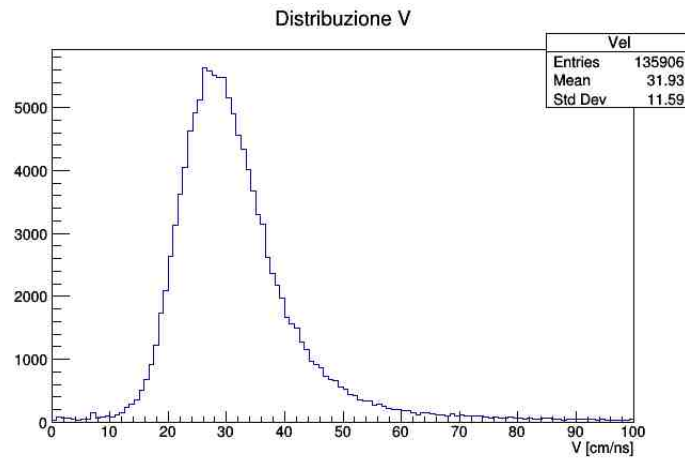


Figura 13: In questo istogramma sono stati usati tutti i dati a nostra disposizione anche di prese dati differenti

⁸Vedi appendice A.4

4.4 Eventi Ultrarelativistici

Conti sul Piombo Osservando la figura 13 è stato deciso di tagliare gli eventi con velocità inferiore a $20 \frac{cm}{ns}$

$$v = 20 \frac{cm}{ns} \Rightarrow \beta \simeq \frac{2}{3} \Rightarrow \gamma \simeq 1,3$$

$$p = \gamma m \beta \simeq 94.5 \frac{MeV}{c}$$

Dal sito PDG⁹ si vede che impulsi di circa 100MeV per essere teoricamente frenati necessitano di uno spessore di Piombo (per unità di densità, CSDA range) di $1,521 \frac{g}{cm^2}$, perciò sapendo che la densità del piombo vale $11,35 \frac{g}{cm^3}$ si ricava che per frenare le particelle con $v < 20 \frac{cm}{ns}$ servono almeno 1,2-1,4 cm di piombo.

Così sono state posizionate tra il PMT-3 e PMT-4 7 lastre di piombo di 2 cm ciascuna

2 Metodi Data la bassa efficienza del PMT-4 sono stati pensati due metodi per valutare la quantità di particelle che vengono assorbite dalle lastre di Piombo.

Il primo metodo è quello di confrontare due istogrammi normalizzati di quadruple senza piombo e quadruple con il piombo¹⁰. In questa maniera si eviterebbe il problema di conteggi minori dovuti all'efficienza del PMT-4 in quanto inclusi nei dati.

In alternativa si potrebbe stimare l'efficienza del PMT-4 tramite rapporto di coincidenze triple e quadruple di una presa dati senza piombo lungo la traiettoria, e successivamente si misureranno i rapporti tra coincidenze Triple e Quadruple di prese dati con il Piombo dividendo per l'efficienza precedentemente stimata.

Metodo 1, Rapporto quadruple normalizzate

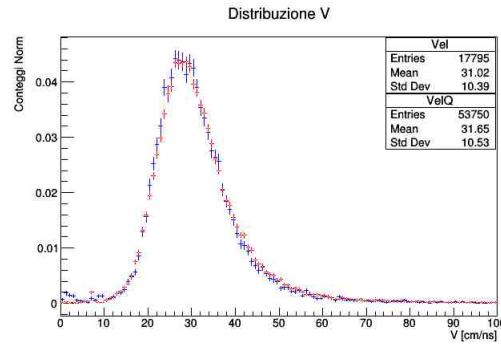


Figura 14: In blu la distribuzione normalizzata delle velocità degli eventi senza piombo, in rosso con il piombo. Integrale sotto il grafico $\sim 0,97$ per entrambe le distribuzioni

È stato eseguito un fit dei dati di V di figura 14, considerando i dati più vicini ad assomigliare ad una gaussiana¹¹. Media e deviazione standard sono riportate in tab 4.4

C_{1234} senza Pb [$\frac{cm}{ns}$]	$29,6 \pm 6,9$
C_{1234} con Pb [$\frac{cm}{ns}$]	$30,1 \pm 7,3$

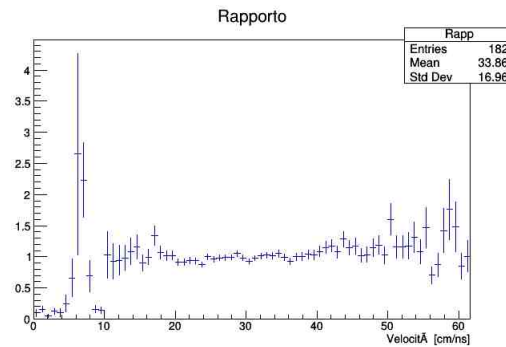


Figura 15: Rapporto $\frac{Quadruple con Pb}{Quadruple senza Pb}$.

Metodo 2, Misura dell'efficienza

Si prova questo metodo per poter utilizzare lo stesso set di eventi così da evitare problemi di incontrare statistiche molto lontane tra loro

⁹In particolare alla pagina https://pdg.lbl.gov/2020/AtomicNuclearProperties/MUE/muE_lead_Pb.pdf, pagina relativa a come si comportano i muoni in funzione della loro energia nel piombo

¹⁰Per quadruple intendiamo coincidenze tra tutti i 4 PMT, C_{1234}

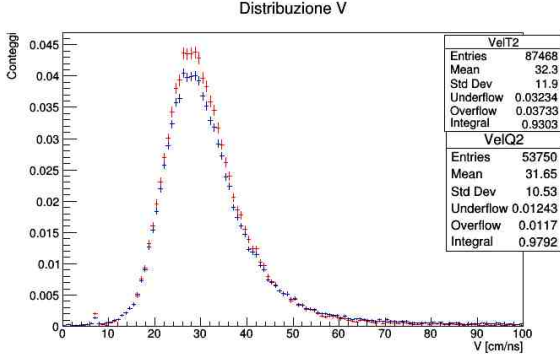
¹¹È stato scelto il range nelle ascisse in base alla DevStd segnata in figura. È stato scelto di fare un fit della curva compresa entro 2 sigma dalla media, perciò circa compresa tra 5 e 55 $\frac{cm}{ns}$

Efficienza PMT-4 Sapendo che le quadruple lette valgono:

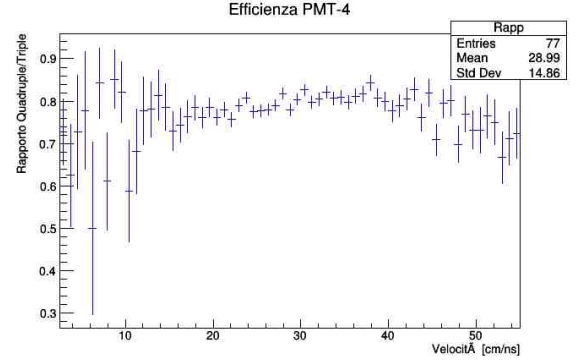
$$N_{Quadruple} = N_{Eventpositivi} * Eff \quad (14)$$

Allora il numero di eventi che passano il Pb vale:

$$\frac{N_{Eventpositivi}}{N_{Triple}} = \frac{N_{Quadruple}}{Eff} * \frac{1}{N_{Triple}} \quad (15)$$



(a) In rosso i dati delle quadruple, in blu le triple

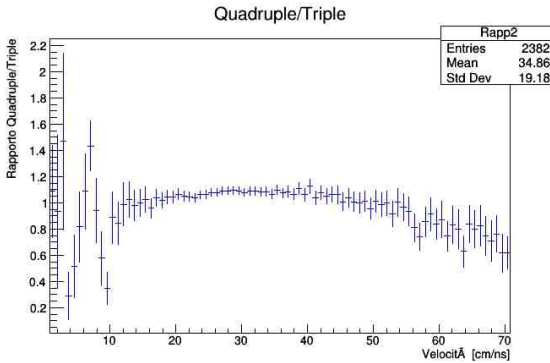


(b) Rapporto $\frac{Quadruple}{Triple}$ senza Piombo tra i PMT. Gli errori sono stati valutati con la formula: $\sigma_{eff} = \sqrt{eff(1-eff)/N_{Triple}}$

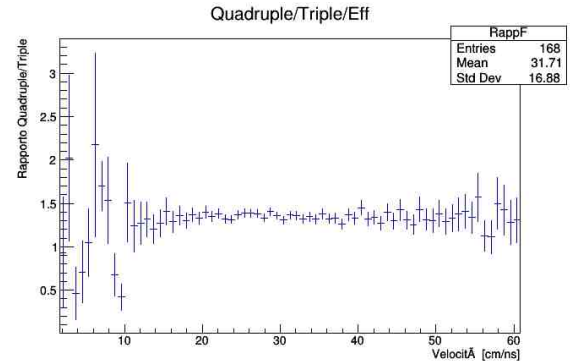
Dalla figura 16b si misura un'efficienza per il PMT-4 di circa il 79%, stimata tramite fit di una retta costante su tutti i dati.

Da due fit sui dati in figura 16a delle triple e delle quadruple si nota che le velocità medie sono tra loro confrontabili; $30,0 \pm 7,2 \frac{cm}{ns}$ per entrambe le curve.

Infine eseguendo il rapporto tra gli istogrammi e dividendolo per l'efficienza(come da equazioni 15) otteniamo i seguenti grafici(17a e 17b):



(a)



(b)

Figura 17

5 Attenuazione

L'efficienza di rivelazione è data anche dalla probabilità del segnale luminoso di raggiungere gli estremi dello scintillatore. L'energia persa segue teoricamente un andamento esponenziale del tipo

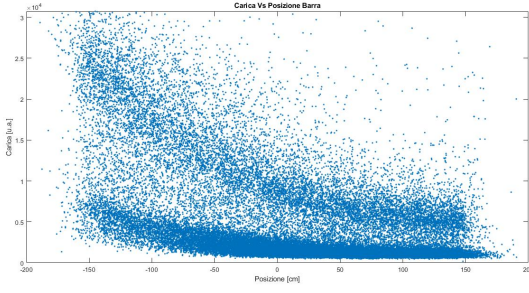
$$L(x) = L_0 e^{-\frac{x}{l}} \quad (16)$$

Dove L_0 è la luminosità iniziale del segnale e l la lunghezza di attenuazione¹²

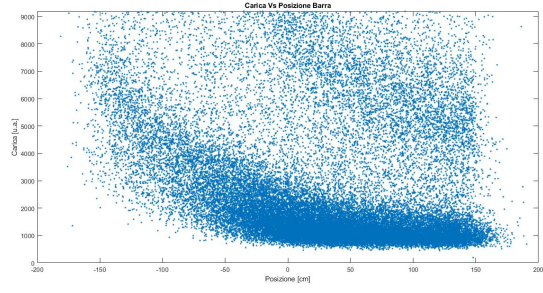
5.1 Dipendenza dalla posizione

Per questa misura sono stati presi alcuni ritardi tra PMT-1 e PMT-2, se ne è ricostruito la posizione di incidenza nella barra usando l'equazione 9 e si è eseguito uno scatterplot delle cariche viste da un PMT, in questo caso il PMT-1

¹²Si definisce lunghezza di attenuazione la lunghezza per il quale la luminosità si riduce di un fattore $\frac{1}{e}$



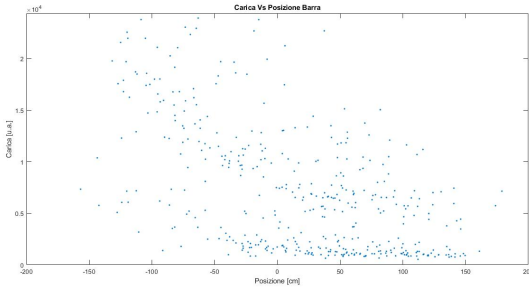
(a)



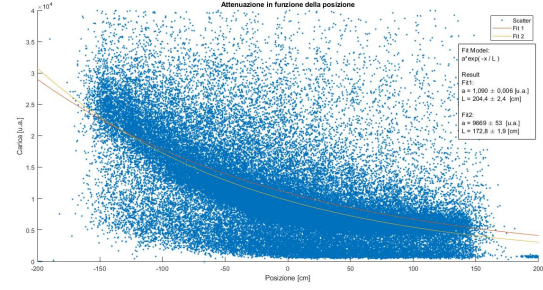
(b) Zoom sui dati inferiori

Dalla figura 18a si nota un andamento di tipo esponenziale e due zone differenti che seguono lo stesso andamento come si vede dalla figura 18b. Tutti quei segnali sappiamo non essere dipendenti dalla luce perché i conteggi in singola con luce a accesa o spenta non sono variati.

È stata fatta una prova per vedere quali fossero segnali di rumore unicamente entranti nella barra scintillante provando le coincidenze triple con gli stessi dati.



(a) Coincidenze triple ricavate dai dati della figura 18a



(b) Dati riferiti alle triple prese per la distribuzione di V con il piombo

Nonostante il riconoscimento delle triple dei dati in figura 18a notiamo dallo scatterplot 19a la presenza di segnali rivelati ad energie inferiori, e come si vede maggiormente dalla figura 19b questi dati sono effettivamente delle particelle passanti per il sistema poiché ottenuti tramite coincidenze triple tra i PMT(1-2-3).

Per valutare l'effettivo andamento dei dati sono stati provati due fit con il modello di equazione 16($L_0 = a$).

Nel caso del Fit-1 sono stati tagliati i dati a bassa intensità, nel secondo, Fit-2 sono stati considerati anche quelli.¹³

I risultati segnati in figura sembrano avvicinarsi alla lunghezza di attenuazione segnata nel datasheet della barra di 210 cm

5.2 Dipendenza dall'angolo

Per valutare l'attenuazione del segnale luminoso all'interno della barra scintillante si deve tenere di conto anche della dipendenza dall'angolo con il quale la particella incide sulla barra

Per visualizzare quale fosse la dipendenza dall'angolo di incidenza della particella sulla barra è stato necessario eliminare prima la dipendenza dalla posizione. Un diverso angolo di incidenza nella barra implica un percorso della particella più o meno lungo e quindi un fascio luminoso più o meno energetico

Sapendo che la carica vista dal PMT-1 segue la legge:

$$C_1(x) = C_1 f(\theta) e^{-\frac{L}{L_0} + x} \quad (17)$$

mentre per il PMT-2:

$$C_2(x) = C_2 f(\theta) e^{-\frac{L}{L_0} - x} \quad (18)$$

dove $f(\theta)$ è una dipendenza dall'angolo in questione. Facendo il prodotto tra le due cariche si ricava:

$$C_1(x)C_2(x) = f(\theta)^2 C_1 C_2 e^{-\frac{L}{L_0}} \quad (19)$$

Dove però anche C_1 e C_2 dipendono da θ e quindi il prodotto tra gli integrali del segnale diventa una funzione solo di theta.

Per trasformare la variabile posizione (x) in θ :

$$\cos(\theta) = \frac{h}{d} \quad (20)$$

dove h è l'altezza della barra scintillante dal PMT-3

¹³La figura è uno zoom di tutti i dati per evidenziare la zona comprendente la quantità maggiore di dati. Ci sono alcuni dati evidentemente molto lontani dalla realtà che sono stati eliminati da entrambi i fit.

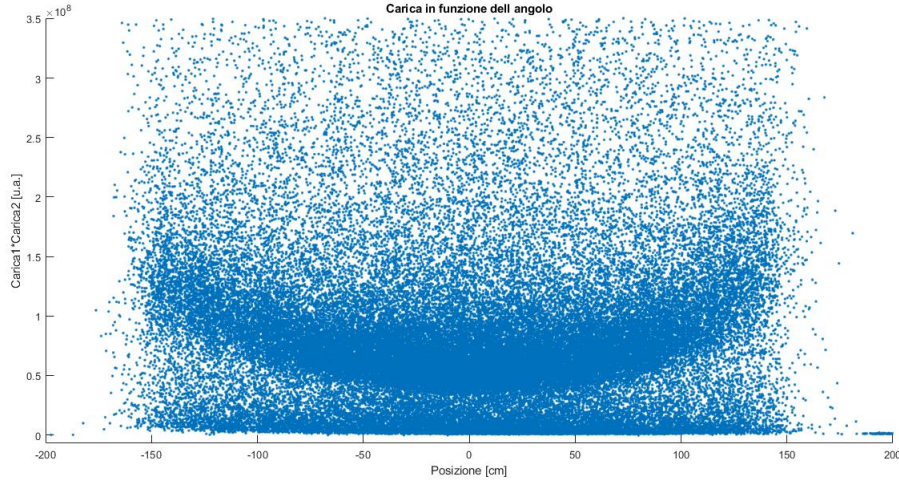


Figura 20: Qua è riportata la dipendenza ancora da x ma è sufficiente un cambio di variabile 20 per vedere la dipendenza dall'angolo

Dai dati usati in figura 20 è stato inoltre possibile valutare quanti fossero gli eventi a cariche maggiori rispetto a quelli minori tramite la visualizzazione con un istogramma.

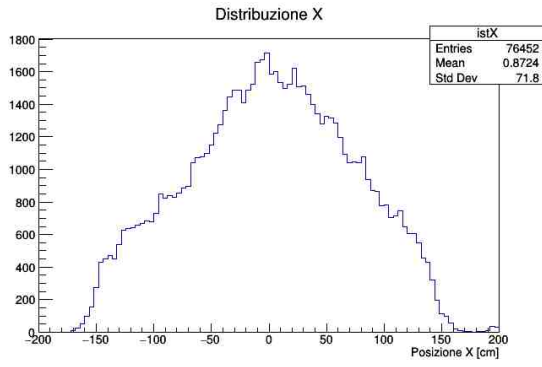
È stata stimata una percentuale di circa l' 80% di particelle con cariche maggiori rispetto al totale osservando un istogramma con il prodotto delle cariche osservate

$$OltreUnaSoglia[\%] = \frac{CaricheAlte}{TotEventi} \simeq \frac{61810}{76452} = 80\% \quad (21)$$

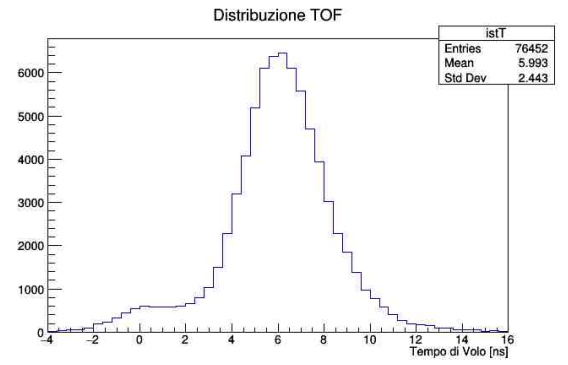
Commento finale Per quanto riguarda i comportamenti dell'attenuazione del segnale luminoso nella barra scintillante i due fit provati in figura 19b mostrano come l'andamento possa essere buono in quanto, seppur le misure non siano accurate, non sono stati riscontrati comportamenti stravaganti.

Per quanto riguarda la fascia di dati a cariche inferiori, visibile in tutti i grafici di questa sezione (5), sappiamo non essere dovuti solo a rumore in quanto presenti anche negli scatter plot ottenuti con eventi di triple tra PMT(1-2-3) con i PMT come in figura 9, e sappiamo non dipendere nemmeno dalla luce poiché una semplice verifica di conteggi a luce accesa e spenta non mostra sostanziali differenze.

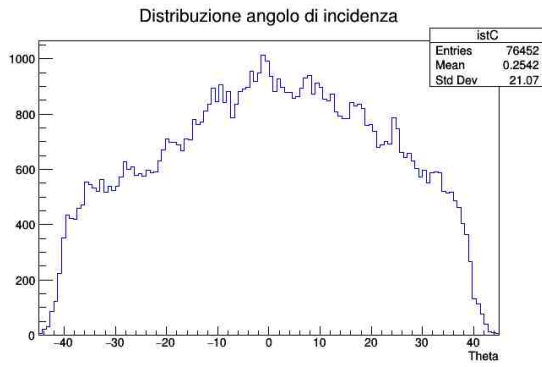
6 Altre distribuzioni



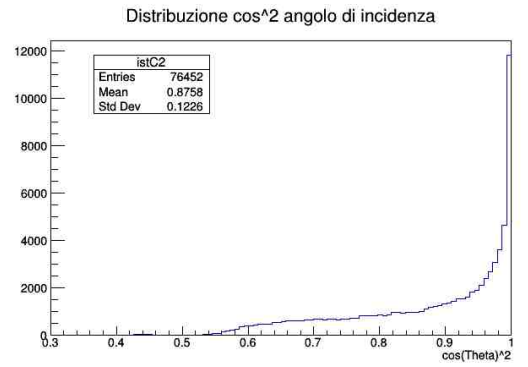
(a) Ricavata con l'equazione 9



(b) Tempo di volo misurato con l media tra TOF_1 e TOF_2 come in equazione 12



(a) $\theta = \arccos(\frac{h}{d})$



(b)

7 Conclusioni

Distribuzione di V

La distribuzione di V di figura 13 sembra ben centrata su una media di circa $30 \frac{cm}{ns}$ con una larghezza che non spaventa. Infatti se pensiamo che i tempi di volo per particelle relativistiche sono di circa 6-8 ns (Valori stimati e anche visibili in figura 21b), con errori di circa 2ns dovuti alla larghezza degli istogrammi dei ritardi (vedi per esempio 4.3) si hanno errori del 30-40%, riportati sulla velocità ricaviamo un'ampiezza a metà altezza di una decina di ns. Per quanto riguarda la coda della distribuzione di V che troviamo per velocità molto maggiori della luce non sembra implicata ad un'incorretta stima della posizione di incidenza ma piuttosto ad errori nella distribuzione di TOF (Vedi 21a per la posizione e 21b per il tempo di volo).

La normalizzazione sembra essere corretta ed equa in entrambi i casi con e senza Piombo in quanto gli integrali della distribuzione valgono entrambi 0,97

Eventi Ultrarelativistici

Metodo 1 Dai risultati ottenuti con il primo metodo si nota dalla figura 15 che le particelle con velocità inferiori a $10 \frac{cm}{ns}$ sembrano essersi fermate nel piombo non raggiungendo il PMT-4, questo potrebbe aver determinato l'aumento della velocità media da $29,6 \pm 6,9$ a $30,1 \pm 7,3 \frac{cm}{ns}$; un aumento dell' 1,6% sulle medie stimate.

Quello che invece non piace sono le velocità comprese tra 10 e $20 \frac{cm}{ns}$. In questa regione seppur gli errori sulle misure siano abbastanza grandi dovremmo aver visto una salita verso un rapporto pari ad 1 cosa che invece non si riesce a vedere

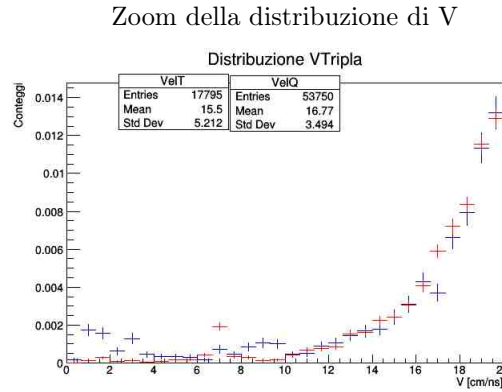


Figura 23: I dati in figura corrispondono a circa il 7% di tutti i dati presi. Le prese dati sono durate da uno (per quelli Blu, senza piombo) a 3 giorni (per quelli rossi con il piombo)

Facendo uno zoom sulle velocità minori di 20, vedi immagine 23, si vede come data la statistica degli eventi entrati in gioco in quanto troviamo in proporzione per alcune velocità (come 6 o $17 \frac{cm}{ns}$) più eventi che hanno passato il piombo di quelli che effettivamente lo potrebbero aver raggiunto dall'alto (quindi che sono arrivati al PMT3)

Metodo 2 Per questo secondo metodo mettiamo a confronto le figure in sezione 4.4.

Partiamo direttamente dal rapporto tra quadruple e triple di figura 17a, come nella situazione precedente descritta nel precedente paragrafo troviamo che per $v < 10 \frac{cm}{ns}$ la curva tende con alta incertezza a restare più bassa di 1. la maggior differenza si nota per velocità maggiori di $40 \frac{cm}{ns}$ dove si nota come il rapporto scende gradualmente sotto l'unità del rapporto $\frac{quadruple}{triple}$.

Se confrontiamo questi effetti con il grafico per l'efficienza del PMT-4, figura 8, si nota che per velocità basse si ha molta confusione e non si può definire un andamento o un comportamento particolare, mentre per alte velocità si ha nuovamente una discesa. Infatti osservando il rapporto $\frac{quadruple}{triple}$ corretto con l'efficienza, figura 17b, si può dire come l'efficienza abbia corretto ed influenzato maggiormente la regione di velocità ultrarelativistiche mentre lascia invariata la zona a $v < 10 \frac{cm}{ns}$. Infine osservando le distribuzioni di velocità in figura 16a si nota una differenza tra gli integrali misurati sotto la curva: 0,93 per la distribuzione di v delle triple, mentre 0,98 per la distribuzione di v delle quadruple.

Quello che si potrebbe andare ad affermare è che il Piombo potrebbe aver frenato alcune particelle a bassa velocità, in particolare però al di sotto dei $10 \frac{cm}{ns}$ piuttosto che di $20 \frac{cm}{ns}$, mentre l'efficienza del PMT-4 abbia influenzato le particelle ultrarelativistiche facendo inoltre incrementare il peso del numero di particelle nelle distribuzioni normalizzate, ciò ha fatto sì che, nella validità dell'analisi effettuata, si ottenesse un numero maggiore di quadruple che di triple e l'effetto dell'efficienza non abbia influenzato il comportamento dei dati per basse velocità

A Problemi affrontati

La procedura seguita per migliorare i nostri calcoli e individuare gli errori parte dal riconoscimento dell'evento presumibilmente ricostruito male o che riporta come risultato una velocità molto lontana dalle aspettative. Dopo l'individuazione di uno di questi eventi semplicemente si visualizza con un semplice plot dei dati dell'evento e interpretandolo si prova a capire quale possa essere il problema in analisi o in presa dati che ha portato a quell'errore.

Alcuni errori sono stati commessi nei codici di analisi dati e successivamente rimossi, altri invece sono stati causati dalle caratteristiche dell'ADC.

Qua sono riportate alcune correzioni e errori commessi in ordine di come sono stati trovati.

Durante la descrizione dei problemi saranno indicate alcune delle funzioni scritte e utilizzate per l'analisi dati, spero di inserire il link del repository online per una visualizzazione

A.1 Coincidenze casuali: "ADC Record Length"

Il primo problema è legato alla lunghezza del record di dati che l'ADC restituisce ogni qual volta scatti il trigger impostato generalmente su una tripla C_{123} .

Una delle cause che faceva risultare una particella ultrarelativistica era che nello stesso record di dati non vi era solo l'evento triggerante ma anche un secondo evento (a volte una doppia o anche un segnale rivelato in un unico PMT). Questa "coincidenza casuale" faceva sì che il codice di analisi dati riportasse come Δt un intervallo di tempo tra due impulsi relativi a due eventi diversi e non allo stesso.

Infatti facendo un semplice conto la possibilità che due eventi fossero registrati nello stesso record di dati non è così bassa. Partiamo dal fatto che un record è lungo 1030 punti, cioè, sapendo che l'ADC campiona con una frequenza di 250MHz ogni campione disterà temporalmente dai vicini 4 ns, e quindi in totale si ha una finestra in tempi di $4,12 \mu s$. Andando a calcolare le coincidenze casuali con questa finestra temporale di $4 \mu s$ si ottiene:

$$f_{cas} = f_1 * f_1 * \tau = 10^4 * 10^{-6} = 10^{-2} \quad (22)$$

cioè 1 ogni 100 eventi potrebbe presentare due eventi su un unico record di dati che dovrebbe corrispondere ad una sola tripla, ad un solo evento.¹⁴ Per rimediare a questo problema è stato pensato di scrivere una funzione che funzionasse come un trigger sui dati da analizzare, questo ha permesso di trovare eventuali coincidenze tra segnali provenienti da PMT che non erano messi in coincidenza tramite il modulo NIM apposito.

Per riuscire in questo è stato necessario discriminare i minimi relativi dei record di dati e discriminare i minimi di rumore da quelli dovuti a particelle.

Facendo questa operazione è stato possibile eliminare segnali come quelli in figura 24

Falsa tripla

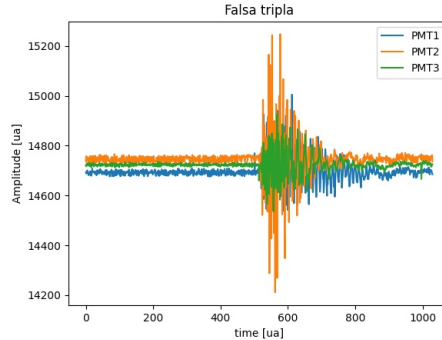


Figura 24: Sono stati trovati con percentuali sotto l'1% segnali di questo tipo in tutte le prese dati

A.2 Analisi dati, Ricerca dei minimi

Più volte in analisi dati come visto precedentemente (A.1) è stato necessario determinare una certa soglia per discriminare quale fosse un minimo del segnale, oppure quale fosse l'inizio o la fine di un segnale.

Function: GestioneOff Ogni evento ricostruito dall'ADC si presentava rialzato dallo 0 di un offset di circa 14700 ua. Per sistemare questo offset è stato necessario settare delle soglie molto intuitive per decidere quali dati fossero di rumore e quali di un segnale.¹⁵ Da questa prima discriminazione è stato ricavato un offset (media dei valori del rumore) e una sigma (deviazione standard di questi valori). Questa sigma è stata usata per discriminare i dati di un segnale da quelli di rumore.

¹⁴In questo calcolo teniamo di conto di un solo Scintillatore e dell'ordine di grandezza dei cps di quest'ultimo, e nel caso in questione, per le scelte fatte per eseguire il conto, le coincidenze possono solo aumentare.

¹⁵In realtà ne sono state settate 2 una superiore e una inferiore, il perché sarà spiegato più avanti

Function: ThrsDet Un'altra idea per ricercare i minimi relativi dei record¹⁶ è stata quella di valutare quante sigma entrassero dentro il minimo assoluto di ogni record di dati cioè fare il rapporto:

$$\frac{\text{Sigma}}{\text{Absolutemin}}$$

è stato scelto di fare un istogramma di questi risultati e selezionare una soglia il più bassa possibile per perdere meno eventi possibile¹⁷.

A.3 Segnali mal riprodotti, "ADC Sample Rate"

L'altra limitazione che è stata affrontata è quella dovuta al rate di campionamento dell'ADC.

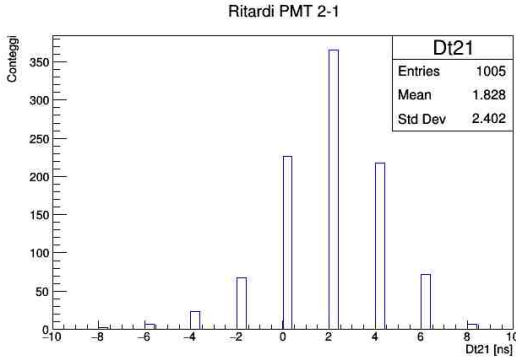
L'ADC N6725S campiona con una frequenza di 250MHz cioè un campione ogni 4 ns e sapendo che i segnali sono in media lunghi dai 15 a 20 ns e sono di tipo impulsivo, la ricostruzione di questi, in particolare del picco, da parte dello strumento non è ottimale.

Time stamp Di solito con time-stamp di un segnale impulsivo si considera l'istante in cui esso raggiunge il 50% in ampiezza del valore minimo del segnale. Inoltre si considera inizio e fine del segnale quando questi sono compresi rispettivamente tra il 10% e il 90%.

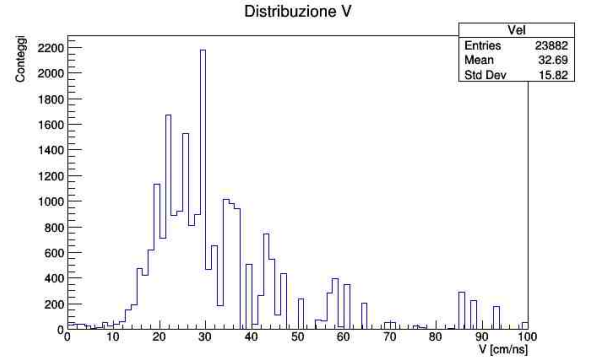
Queste due operazioni però non sono state possibili in quanto determinati segnali impulsivi raggiungevano il minimo partendo da sotto il 10% con un solo dato dell'ADC, cioè con un tempo inferiore a 4ns e questo valeva sia per segnali poco energetici che per alcuni molto energetici che non venivano riconosciuti dalle funzioni.

Per misurare il TimeStamp sono state fatte diverse prove, se ne mostrano le differenze tramite gli istogrammi dei ritardi tra le trasmissioni di PMT-2 e PMT-1 e la distribuzione di V¹⁸

Media della discesa del segnale



(a)



(b)

Figura 25: Per fare queste misure i time stamp sono stati valutati prendendo il punto medio del tempo di discesa del segnale senza eliminare i punti sopra il 90% e sotto il 10%. Quindi a partire dal primo punto distante più di una sigma fino al minimo

Rit 2-1 [ns]	Rit 3-1 [ns]	Rit 3-2 [ns]
$2,13 \pm 2,25$	$-9,07 \pm 2,19$	$-11,0 \pm 2,53$

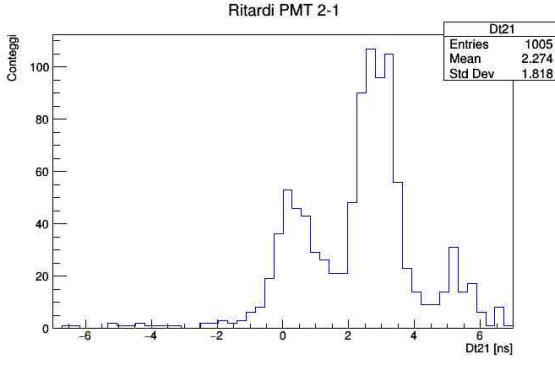
I dati sono eccessivamente discreti e la riproduzione di V troppo larga e con picchi troppo marcati

¹⁶Per la ricerca dei minimi relativi sono state provate due funzioni ugualmente funzionanti, una scritta individualmente e un'altra che è la funzione find_peaks contenuta nel modulo python scipy.signal

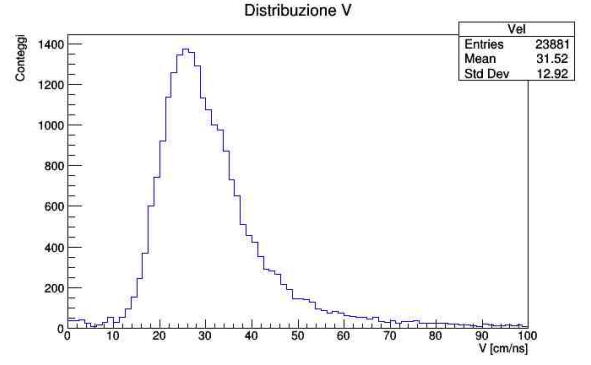
¹⁷Come si vede nelle funzioni ...Recognize() è stata scelta per tutti i PMT una soglia di 15 Sigma

¹⁸il calcolo di TimeStamp ha una propria funzione TimeStampMeas. Inoltre le funzioni che determinano l'inizio e la fine di un segnale che utilizzano la sigma si chiamano findstart e findstop

Baricentro della discesa del segnale



(a)

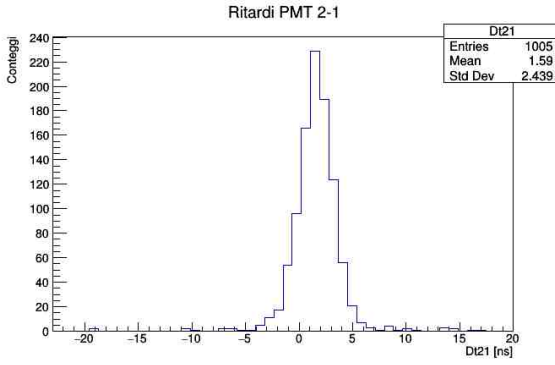


(b)

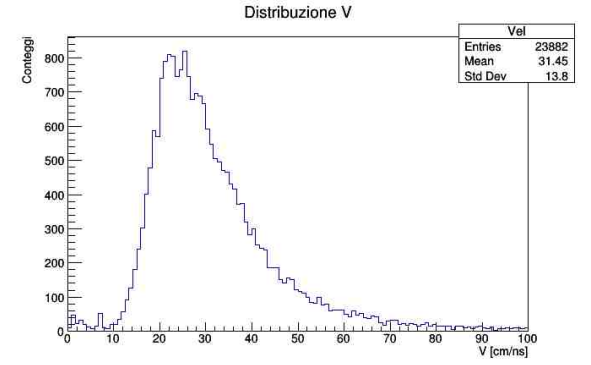
Figura 26: Per fare queste misure i time stamp sono stati valutati prendendo il baricentro della parte di segnale dalla partenza fino al minimo

Rit 2-1 [ns]	Rit 3-1 [ns]	Rit 3-2 [ns]
$2,23 \pm 1,72$	$-9,47 \pm 1,81$	$-11,7 \pm 2,06$

Baricentro del segnale



(a)



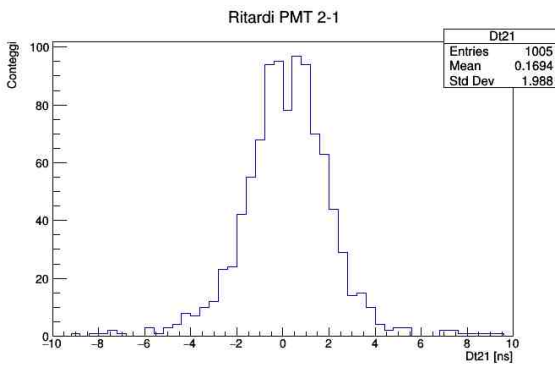
(b)

Figura 27: Per fare queste misure i time stamp sono stati valutati prendendo il baricentro di tutto il segnale ovvero dal primo valore oltre una sigma dallo zero e fino all'ultimo trovato

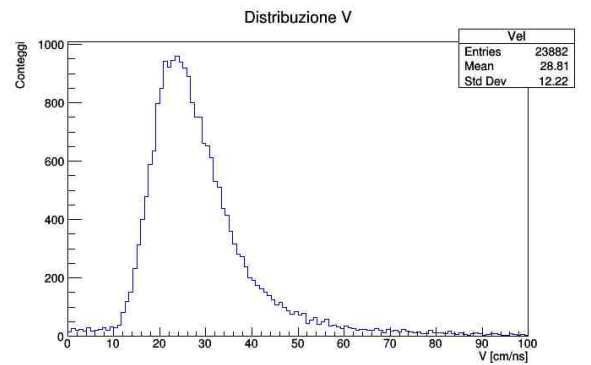
Rit 2-1 [ns]	Rit 3-1 [ns]	Rit 3-2 [ns]
$1,58 \pm 1,56$	$-13,3 \pm 2,07$	$-14,9 \pm 2,13$

L'intento è quello di ricercare il momento in cui passa il segnale per intero

Baricentro del segnale con qualche dato in più



(a)



(b)

Figura 28: Per fare queste misure i time stamp sono stati valutati prendendo il baricentro di tutto il segnale considerando l'inizio e la fine 5 unità di tempo in più, cioè 20 ns sia a destra che a sinistra del segnale

Rit 2-1 [ns]	Rit 3-1 [ns]	Rit 3-2 [ns]
$0,19 \pm 1,64$	$-14,8 \pm 2,17$	$-14,9 \pm 2,31$

Aumentando il range rispetto al caso in figura 27 si vuole mediare qualche cattivo comportamento da parte del segnale

Baricentro della discesa del segnale con qualche dato in più

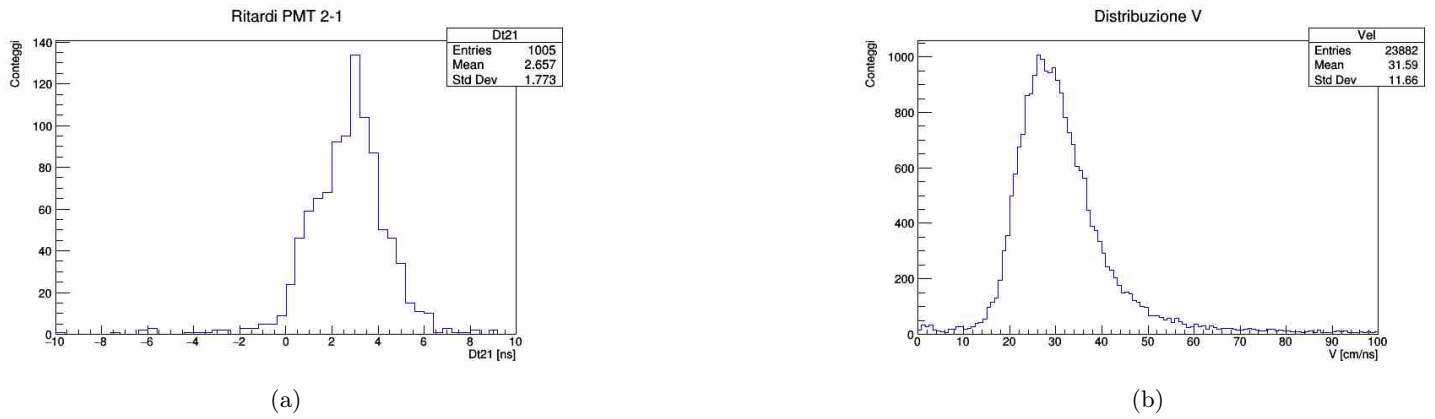


Figura 29: Per fare queste misure i time stamp sono stati valutati prendendo il baricentro della discesa negativa del segnale considerando quindi come inizio l'inizio del segnale più un'unità di tempo, mentre come fine il minimo del segnale più 3 punti

È stata fatta questa prova per rimanere il più fedeli possibile alla definizione di TimeStamp e considerare una parte di segnale equa per tutti i segnali, nonostante questi non abbiano alcune volte un picco ben riprodotto, inoltre in questa maniera non si considerano nel conto dell'integrale alcuni ringing del segnale successivi al minimo di esso

Rit 2-1 [ns]	Rit 3-1 [ns]	Rit 3-2 [ns]
$2,74 \pm 1,42$	$-10,0 \pm 1,48$	$-12,8 \pm 1,65$

A.4 Scelta calcolo Time-Stamp

La scelta tra i vari metodi di calcolo del TimeStamp è stata fatta considerando i risultati ottenuti tramite fit delle distribuzioni dei ritardi tra i PMT e la relativa ricostruzione della distribuzione di V.

È stato scelto di utilizzare il metodo tramite integrazione di una parte più ampia della discesa del segnale, in particolare 4ns(1 campione dell'adc) prima dell'inizio del segnale e 12 ns dopo il minimo di esso (3 campioni oltre).

In questa maniera oltre che rimanere il più possibile fedeli alla definizione di TimeStamp si considera una parte di segnale che a meno di ampiezze differenti, che nel caso della ricerca del baricentro non influisce in modo determinante, rimane molto simile tra i vari segnali. Inoltre si potrebbero mediare eventuali problemi di ricostruzione del picco e non considerare alcuni fastidiosi ringing che può presentare il segnale.

Repository

Ho inserito un repository online al link:

<https://github.com/AndreaForesi/LabIntFon20-21.git>

Verificarne l'aggiornamento e la riutilizzabilità