

Distribuzione angolare dei raggi cosmici

Bini Irene

February 13, 2024

Contents

1	Introduzione e apparato sperimentale	2
2	Preparativi	2
3	Stima dell'efficienza	3
3.1	Efficienza fotomoltiplicatore 2	3
3.2	Efficienza fotomoltiplicatore 1	5
3.3	Analisi aggiuntive sull'efficienza	6
4	Presa dati	8
5	Distribuzione angolare	11
6	Conclusioni	12

1 Introduzione e apparato sperimentale

L'obiettivo di questa esperienza è stato determinare la distribuzione angolare dei raggi cosmici, in particolare dei muoni, che sono la componente di raggi cosmici che riescono a raggiungere la superficie terrestre. Per farlo, si determina la distribuzione spaziale e, successivamente, quella angolare.

L'apparato sperimentale utilizzato è composto da:

- Odometro, BICRON BC408: Barra di scintillatore plastico a sezione quadrata ($4 \times 4 \text{ cm}^2$), di lunghezza $\sim 280 \text{ cm}$ e larghezza $\sim 8 \text{ cm}$. Viene letta alle due estremità da due PMT (Photomultiplier Tube) che indicheremo come PMT1 e PMT2.
- Fotomoltiplicatore mobile (PMT3) con scintillatore plastico di piccole dimensioni ($6 \times 20 \text{ cm}^2$). Si può posizionare sopra la barra facendolo scorrere per posizionarlo in qualsiasi punto.
- Scheda di acquisizione Domino Ring Sampler (DRS4) che consente di digitalizzare fino a 4 segnali analogici con frequenza massima 5 Gs/s.
- Moduli logici NIM (discriminatore, multiscalar e unità di coincidenza)
- Oscilloscopio per la calibrazione ed il debug dell'apparato.

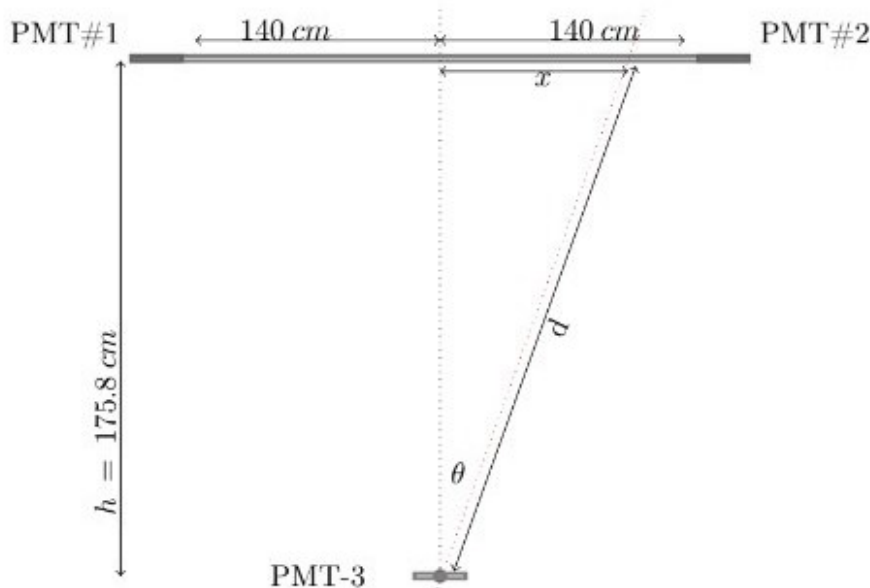


Figure 1: Schema dell'apparato sperimentale per la misura della velocità dei raggi cosmici

L'obiettivo è calcolare la differenza temporale dei segnali dei due fotomoltiplicatori alle estremità della barra per individuare la posizione in cui il raggio cosmico l'ha attraversata. Un terzo scintillatore posto in basso ci permetterà infine di determinare un secondo punto della traiettoria e da qui di ricostruire la direzione di provenienza del raggio cosmico. Prima però, è necessario preparare e calibrare il set up sperimentale.

2 Preparativi

La prima cosa da fare è assicurarsi che l'apparato sperimentale sia funzionante. Colleghiamo i tre fotomoltiplicatori agli ingressi del discriminatore e successivamente colleghiamo l'altro ingresso, tramite una T e una resistenza da 50Ω per evitare rimbalzi, ai vari canali dell'oscilloscopio in modo da visualizzare il segnale. Controlliamo dunque la corretta visualizzazione dei tre canali e verifichiamo che siano visibili le coincidenze temporali date dal passaggio di una particella ionizzante attraverso la barra.

Il passo successivo consiste nell'impostare la larghezza dell'impulso discriminato visualizzandolo sull'oscilloscopio. Si scelgono le seguenti larghezze:

- PMT1 $\rightarrow \omega_1 = 100 \text{ ns}$,
- PMT2 $\rightarrow \omega_2 = 100 \text{ ns}$,
- PMT3 $\rightarrow \omega_3 = 50 \text{ ns}$.

Collegiamo adesso, per tutti e tre i fotomoltiplicatori, uno dei quattro output del discriminatore al multiscalar al fine di trovare i conteggi in singola. Prendiamo poi due unità di coincidenza per misurare le coincidenze doppie e triple. Dato che vogliamo usare le differenze di tempo per ricostruire la posizione, poniamo cura nello scegliere cavi di uguale lunghezza per ciascuno dei tre canali in modo da non dover tenere di conto di ulteriori sfasamento nei tempi. A questo punto il set up è pronto.

3 Stima dell'efficienza

Il primo passo è valutare l'efficienza dei PMT1 e PMT2, posti alle estremità della barra di scintillatore plastico. L'obiettivo è di determinare il punto di lavoro ottimale per entrambi, scegliendo una determinata soglia di trigger e voltaggio di alimentazione da fissare per il resto delle misure. Per prima cosa dobbiamo impostare il sistema per osservare almeno qualche raggio cosmico e di lì cercheremo di ottimizzare la configurazione.

PMT1 e PMT2 sono collegati entrambi alla stessa barra di scintillatore, per questo motivo i dati ottenuti sono correlati dato che, una volta che un raggio cosmico colpisce la barra, la luce si propagherà in essa arrivando ad entrambi. Quindi, ci aspettiamo coincidenze molto elevate tra il primo e il secondo. PMT3 è invece collegato ad uno scintillatore con dimensioni decisamente minori rispetto a quelle della barra. Per questo, è molto probabile che i raggi cosmici siano rilevati dal primo e dal secondo scintillatore ma non dal terzo. Di conseguenza, per una stima più accurata dell'efficienza è utile ripetere le misure posizionando il terzo fotomoltiplicatore a varie altezze della barra e di vedere le differenze in base alla posizione.

3.1 Efficienza fotomoltiplicatore 2

Poniamo inizialmente il PMT3 al centro della barra, precisamente ad altezza 140 cm dato che la lunghezza totale della barra è 280 cm. Il PMT1 è posto all'estremo sinistro della barra (0 cm) mentre il PMT2 all'estremo destro (280 cm). Colleghiamo le uscite dei discriminatori 1 e 3 all'unità di coincidenza e le uscite di tutti e tre a un'altra unità di coincidenza. Andiamo quindi ad acquisire il rate in singola dei tre PMT, le coincidenze doppie 1-3, le doppie 1-2, e le triple. Poniamo le soglie del discriminatore inizialmente a -40 mV ed acquisiamo i dati per 100 s variando la tensione del PMT2 nel range 1200 – 1800 V. La tensione degli altri due PMT invece la impostiamo a 1500 V e rimarrà fissa. Si pone il trigger sulle coincidenze triple in modo da acquisire i cosmici che passano al centro della barra. Con i dati ottenuti calcoliamo l'efficienza utilizzando la formula

$$\epsilon_2 = \frac{\#tripli - \#accidentali}{\#doppi13}, \quad (1)$$

nel quale abbiamo utilizzato le coincidenze accidentali calcolate precedentemente con la formula

$$\#accidentali = \frac{\#Cont1 \#Cont3 (\omega_1 + \omega_3 - 2\Delta t)}{100 \text{ s}} \quad (2)$$

e sapendo che le larghezze dell'impulso sono citate nella sezione "preparativi" (2). L'evento trigger che stabilisce il passaggio del raggio cosmico attraverso il PMT3 è la coincidenza dei tre segnali e fa partire un impulso discriminato di larghezza ω_i . Scegliendo una larghezza più piccola, veniva contata un'unica coincidenza più di una volta perché l'inizio del rimbalzo del segnale era successivo nel tempo alla risalita del primo impulso discriminato, dunque ne conseguiva un secondo impulso discriminato. In questo modo le misure venivano compromesse. Δt è invece il tempo di sovrapposizione minimo dei due impulsi affinché siano considerati in coincidenza (nel nostro caso abbiamo scelto 2 ns). L'incertezza associata all'efficienza è

$$\sigma_{\epsilon_2} = \sqrt{\frac{\epsilon_2(1 - \epsilon_2)}{\#doppi13}}. \quad (3)$$

In questo modo otteniamo il grafico dell'efficienza in funzione del voltaggio (figura (2)). Ripetiamo le misure cambiando il valore di soglia a -60 mV ottenendo la figura (3) e successivamente ponendo il valore di soglia a -80 mV ottenendo la figura (4).

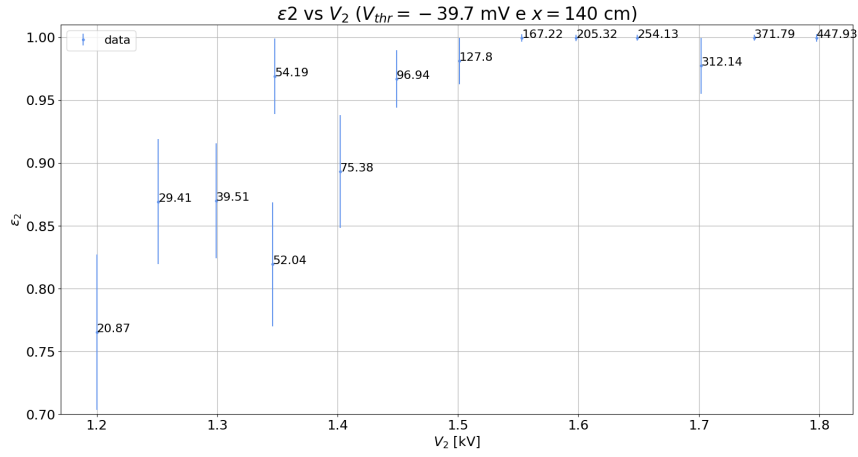


Figure 2: Efficienza del PMT2 in funzione del voltaggio di alimentazione con PMT3 posizionato ad $x = 140$ cm e ad una soglia del discriminatore di -40 mV. A fianco ad ogni dato è stato stampato il rate di eventi visti dal PMT2.

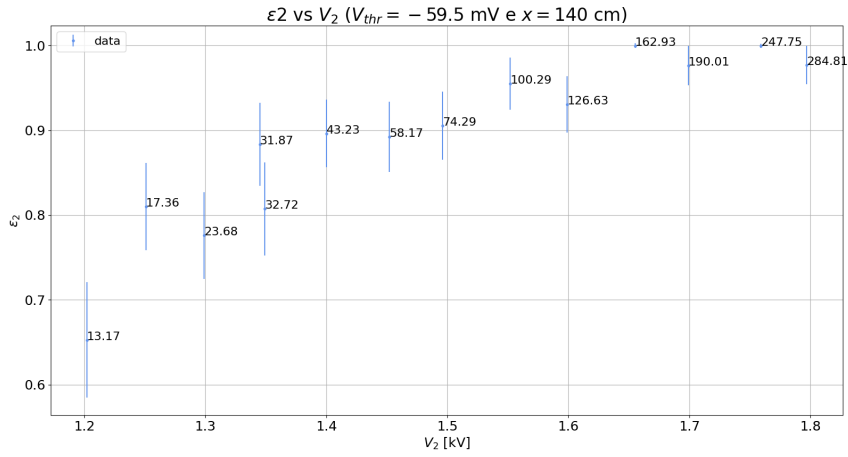


Figure 3: Efficienza del PMT2 in funzione del voltaggio di alimentazione con PMT3 posizionato ad $x = 140$ cm e ad una soglia del discriminatore di -60 mV. A fianco ad ogni dato è stato stampato il rate di eventi visti dal PMT2.

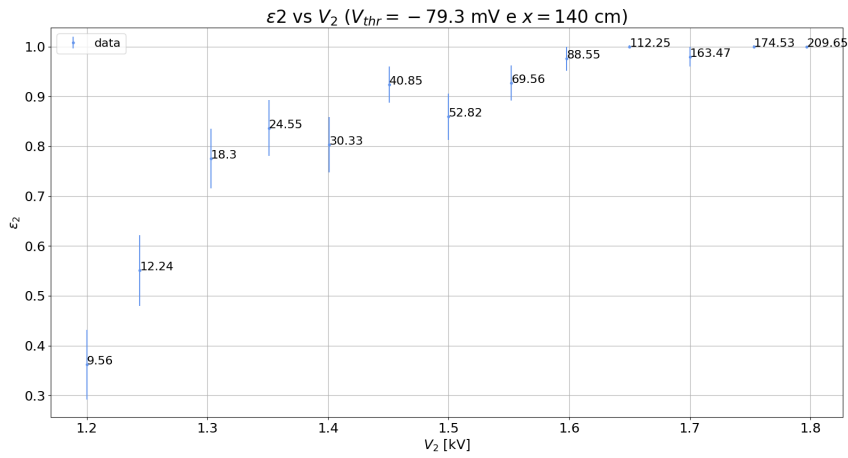


Figure 4: Efficienza del PMT2 in funzione del voltaggio di alimentazione con PMT3 posizionato ad $x = 140$ cm e ad una soglia del discriminatore di -80 mV. A fianco ad ogni dato è stato stampato il rate di eventi visti dal PMT2.

3.2 Efficienza fotomoltiplicatore 1

Concluse le prese dati, re-impostiamo il PMT2 alle condizioni iniziali, ovvero con voltaggio 1500 V circa e soglia del discriminatore a -40 mV ed eseguiamo con il PMT1 le stesse analisi svolte per il PMT2. Osserviamo anche in questo caso le curve di efficienza in funzione del voltaggio per soglia di -40 mV (figura (5)), per soglia di -60 mV (figura (6)) e per soglia di -80 mV (figura (7)).

Dall'esame delle tre curve per ognuno dei due PMT, scegliamo il punto di lavoro e la soglia di discriminazione in modo di avere la massima efficienza con un rate in singola accettabile, ovvero inferiore a qualche centinaio di Hz. Come punto di lavoro è stato scelto 1500 V mentre come soglia -40 mV. In questo modo abbiamo una frequenza di conteggi che si aggira tra i 100 – 200 Hz ed efficienza ~ 1 . Questo è un punto di lavoro ottimale dato che riusciamo a massimizzare l'efficienza senza spingere l'apparato verso tensioni limite.

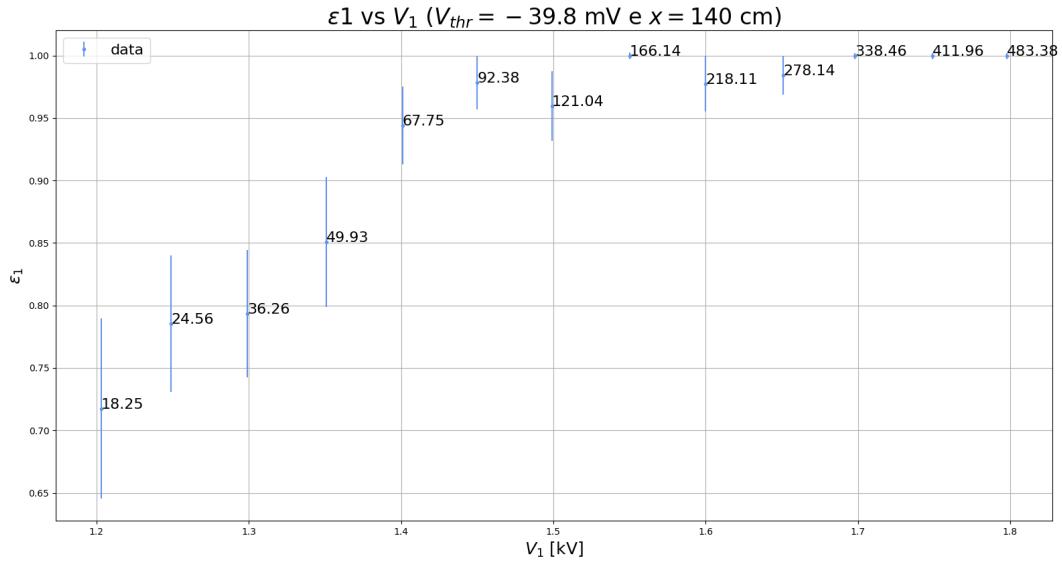


Figure 5: Efficienza del PMT1 in funzione del voltaggio di alimentazione con PMT3 posizionato ad $x = 140$ cm e ad una soglia del discriminatore di -40 mV. A fianco ad ogni dato è stato stampato il rate di eventi visti dal PMT1.

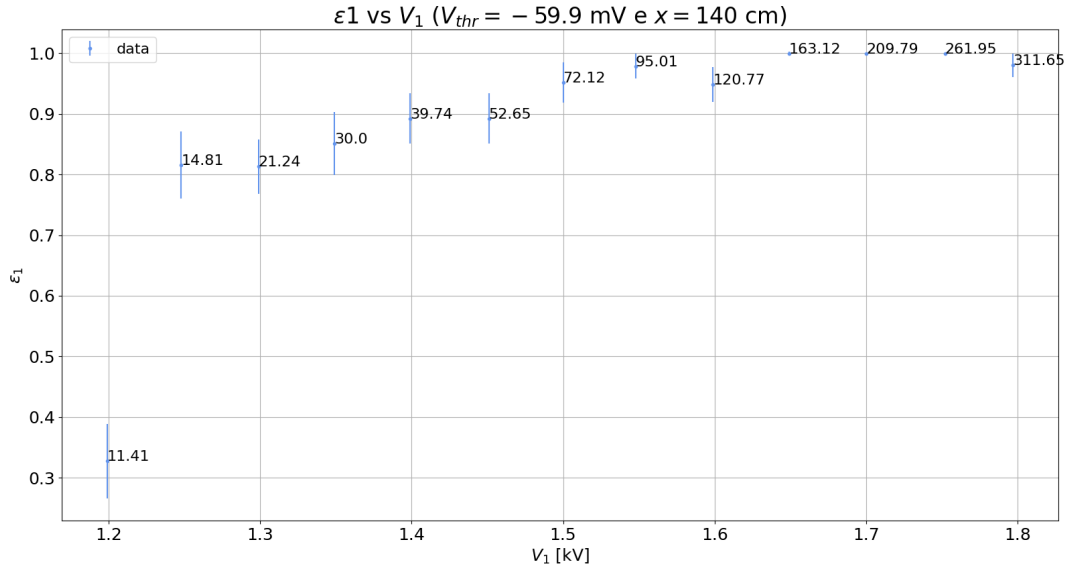


Figure 6: Efficienza del PMT1 in funzione del voltaggio di alimentazione con PMT3 posizionato ad $x = 140$ cm e ad una soglia del discriminatore di -60 mV. A fianco ad ogni dato è stato stampato il rate di eventi visti dal PMT1.

3.3 Analisi aggiuntive sull'efficienza

Adesso vogliamo verificare che i parametri appena scelti siano buoni anche per PMT3 posto in posizioni diverse lungo la barra di scintillatore. Quindi, tenendo la soglia del discriminatore fissata al valore scelto di -40 mV, si sposta il PMT3 in altre posizioni lungo la barra scintillante in modo da osservare il comportamento dell'efficienza al variare della posizione. Spostiamo inizialmente il PMT3 a ridosso del PMT1 e costruiamo il grafico dell'efficienza al variare del voltaggio sia per il PMT1 (figura (8)), che per il PMT2 (figura (9)). In questo caso osserviamo un'efficienza costante a ~ 1 per il PMT1. Questo perché, prendendo le coincidenze triple, prendiamo tutti quei raggi cosmici che vengono letti dal PMT3 che è attualmente posto in corrispondenza dell'PMT1. Quindi se i raggi vengo letti dal PMT3, la probabilità che vengano letti anche dal PMT1 è molto alta. Successivamente si sposta il PMT3 a ridosso del PMT2 ottenendo la figura (10) per il PMT1 e la figura (11) per il PMT2. In questo caso, i ruoli si sono invertiti; infatti ho un'efficienza costante e ~ 1 per il PMT2 per lo stesso motivo spiegato sopra.

Anche in queste due posizioni osserviamo che per voltaggi di ~ 1500 V l'efficienza sta tra 0.9 e 1. Per cui confermiamo questo punto di lavoro.

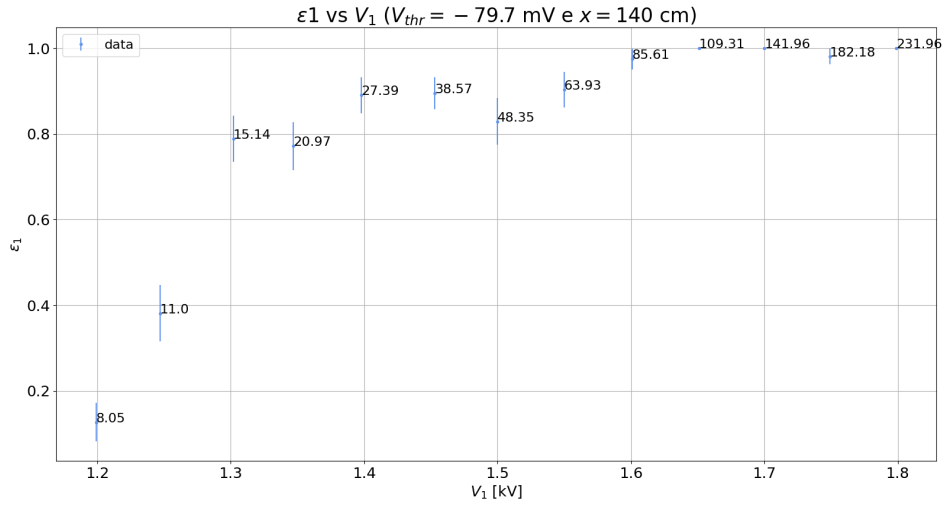


Figure 7: Efficienza del PMT1 in funzione del voltaggio di alimentazione con PMT3 posizionato ad $x = 140$ cm e ad una soglia del discriminatore di -80 mV. A fianco ad ogni dato è stato stampato il rate di eventi visti dal PMT1.

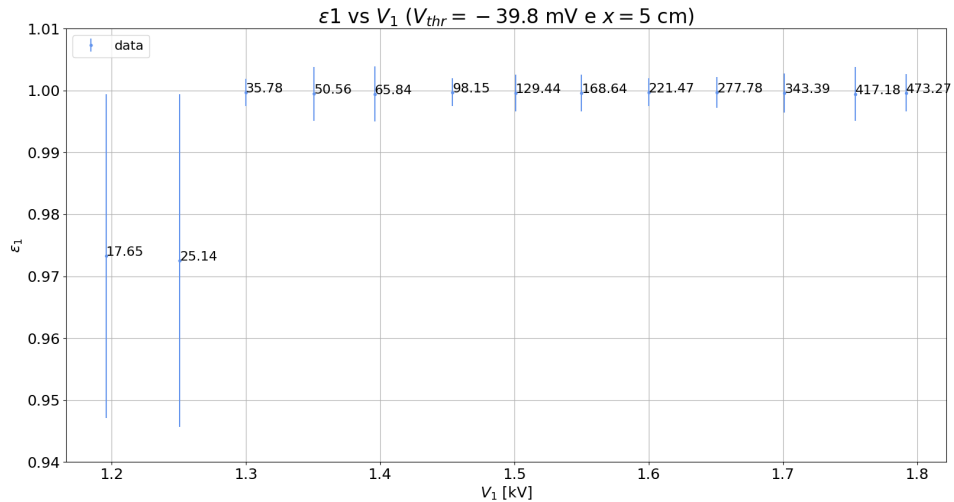


Figure 8: Efficienza del PMT1 in funzione del voltaggio di alimentazione con PMT3 posizionato ad $x = 5$ cm. A fianco ad ogni dato è stato stampato il rate di eventi visti dal PMT1.

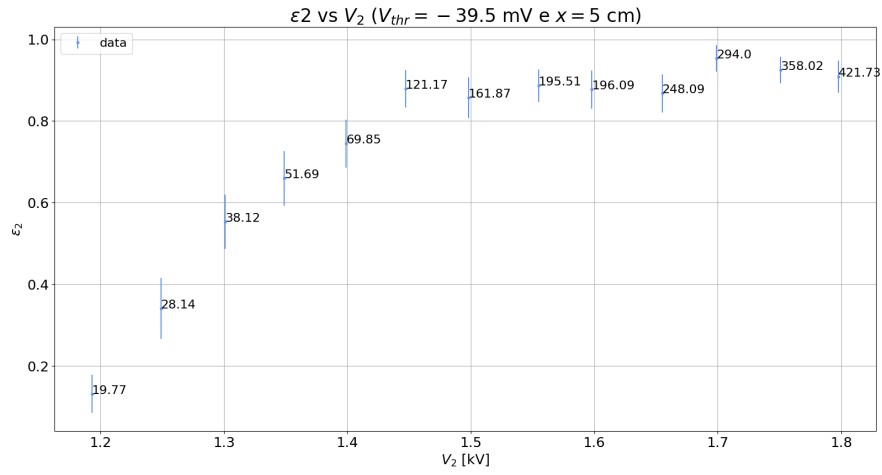


Figure 9: Efficienza del PMT2 in funzione del voltaggio di alimentazione con PMT3 posizionato ad $x = 5$ cm. A fianco ad ogni dato è stato stampato il rate di eventi visti dal PMT2.

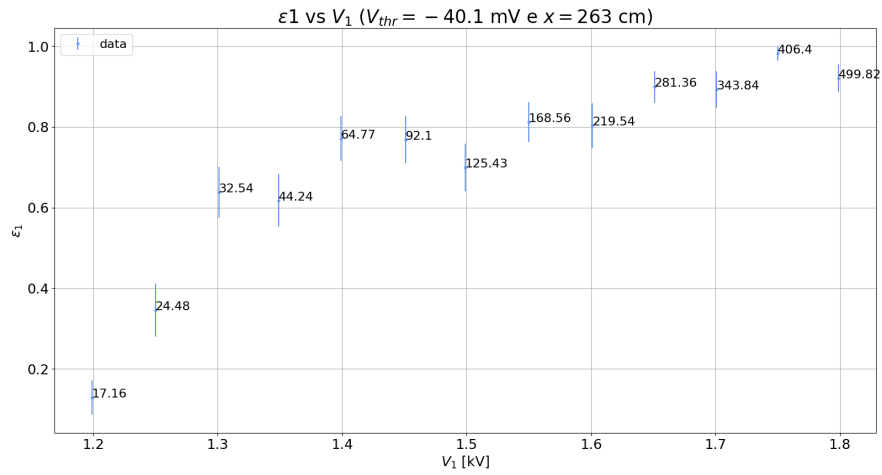


Figure 10: Efficienza del PMT1 in funzione del voltaggio di alimentazione con PMT3 posizionato ad $x = 263$ cm. A fianco ad ogni dato è stato stampato il rate di eventi visti dal PMT1.

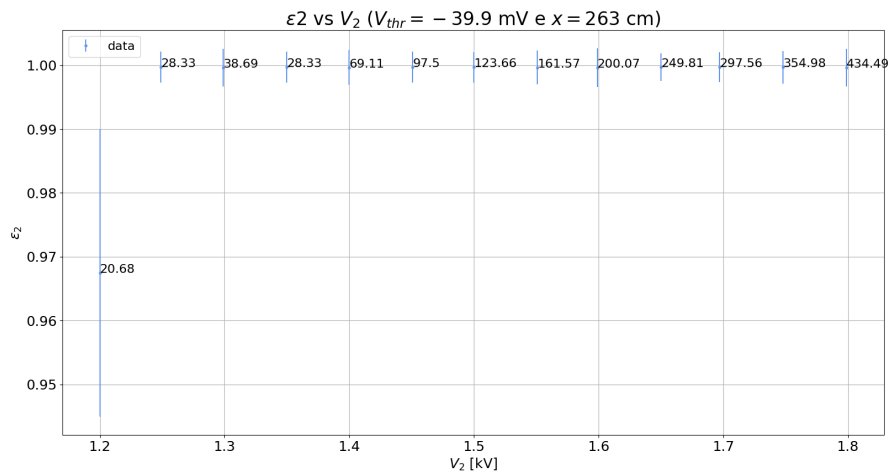


Figure 11: Efficienza del PMT2 in funzione del voltaggio di alimentazione con PMT3 posizionato ad $x = 263$ cm. A fianco ad ogni dato è stato stampato il rate di eventi visti dal PMT2.

4 Presa dati

Passiamo all'acquisizione dei dati tramite l'utilizzo del DRS, ovvero Domino Ring Sampler, che ci permette di digitalizzare i segnali analogici. Uno dei problemi principale riscontrati è che il segnale acquisito deve avere ampiezza massima $V_{pp} = 1$ V altrimenti si ha saturazione. Infatti, soprattutto quando posizioniamo il PMT3 alle estremità della barra, quasi tutti i segnali risultano saturati. Questo perché l'ampiezza del segnale dei canali 1 e 2 è maggiore più ci si avvicina al proprio fotomoltiplicatore con il PMT3. Viaggiando nella barra, la luce viene attenuata, ma se consideriamo i raggi che arrivano proprio in prossimità dei PMT 1 e 2 non si ha attenuazione e dunque il segnale sarà più grande. Infatti, anche il rapporto tra le altezze degli impulsi dei canali 1 e 2 ci potrebbe fornire informazioni sulla posizione in cui la barra viene colpita. Sarà parte dell'analisi dati eliminare i segnali saturati e tenere solo quelli buoni.

Il primo obiettivo è quello di trovare la velocità di propagazione dei raggi cosmici nella barra. Per fare questo consideriamo che il raggio cosmico arrivi in una certa posizione x della barra. Il segnale dei PMT 1 e 2 si hanno ai tempi

$$t_1 = t_0 + \frac{l/2 + x}{v} + \Delta t_1, \quad (4)$$

$$t_2 = t_0 + \frac{l/2 - x}{v} + \Delta t_2 \quad (5)$$

dove l è la lunghezza totale della sbarra, v è la velocità di propagazione, t_0 è il riferimento dei tempi, e i due Δt sono ritardi introdotti dal meccanismo di fotomoltiplicazione e di trasmissione nei cavi del PMT. Quindi, se si sottrae tra loro le equazioni (4) e (5) si ottiene

$$t_1 - t_2 = \frac{2x}{v} + \Delta t_1 - \Delta t_2. \quad (6)$$

Abbiamo dunque bisogno dei tempi in funzione della posizione del PMT3 per trovare la velocità di propagazione. Per fare questo mettiamo il PMT3 in varie posizioni x note e produciamo il grafico $t_1 - t_2$ verso x . Però dobbiamo prima di tutto trovare un modo di determinare i due tempi.

Procediamo quindi posizionando il PMT3 a diverse distanze e acquisendo tra i 1000 e i 50000 eventi in base alla distanza dal centro, in modo da avere un numero considerevole di eventi non saturati come accennato in precedenza. Selezioniamo gli eventi in cui il raggio cosmico attraversi sia la paletta scintillante 3 che la barra scintillante e produca segnali da ognuno dei tre fotomoltiplicatori. Utilizziamo quindi il trigger interno del DRS con coincidenza tripla. Successivamente, gli eventi saturati vengono scartati. In tabella (1) è stato inserito il numero degli eventi non saturati ed effettivamente utilizzati per ogni presa dati.

Posizione del PMT3 [cm]	Campionamenti	Non saturati PMT1	Non saturati PMT2	Utilizzati
10 ± 1	50000	3725	44312	3190
30 ± 1	10000	1188	8864	1049
60 ± 1	20000	6513	17722	5841
80 ± 1	2500	1422	2226	1283
100 ± 1	2000	1440	1746	1314
120 ± 1	2000	1589	1745	1448
130 ± 1	1420	1163	1221	1051
140 ± 1	2000	1695	1683	1518
150 ± 1	1551	1336	1325	1211
160 ± 1	2000	1730	1610	1480
180 ± 1	5000	4461	3743	3417
200 ± 1	2200	1979	1466	1360
220 ± 1	9000	8049	4709	4264
250 ± 1	10000	9009	2514	2218
250 ± 1	20000	17895	4700	4114

Table 1: In questa tabella è stato inserito il numero di eventi non saturati (quindi utilizzabili per il calcolo della velocità) per ognuno dei due PMT. Nella colonna "Utilizzati" è stato inserito il numero di eventi cui non ho saturazione per entrambi i PMT, escludendo gli eventi in cui uno dei due è saturato e l'altro no. Per quanto riguarda la posizione del PMT3 si intende la sua posizione sulla barra di scintillatore con riferimento a 0 cm la posizione del PMT1 mentre $x = 280$ cm la posizione del PMT2. Ci si associa un'incertezza di 1 cm perché le misure sono approssimative.

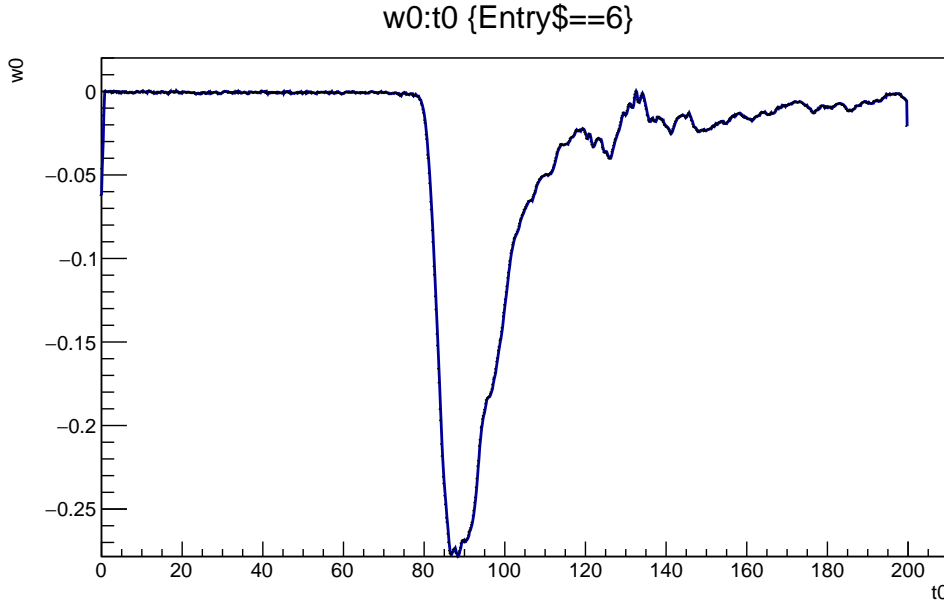


Figure 12: Cattura di una forma d'onda dalla quale è stato preso l'istante di tempo e il relativo voltaggio a soglia fissata

A questo punto abbiamo dei dati salvati in file con formato binario che convertiamo in file root per poterli analizzare. Per ognuno dei tre canali e ogni evento abbiamo una forma d'onda. Si riporta un esempio di una delle forme d'onda del canale CH1 in figura (12).

Da queste forme d'onda possiamo determinare i tempi t_1 e t_2 dell'equazione (6). Abbiamo però il problema di dover assegnare un tempo ad un segnale che ha un'estensione temporale finita, un'ampiezza variabile a cui è sovrapposto un rumore casuale. La prima strategia che utilizziamo è quella di assegnare come tempo l'istante in cui il segnale attraversa una soglia fissa come fa un discriminatore. Scegliamo infatti inizialmente proprio lo stesso valore scelto come soglia del discriminatore, ovvero -40 mV. Successivamente però ci rendiamo conto che una parte dei segnali acquisiti ha come ampiezza massima quel valore e venivano scartati, quindi decidiamo di cambiare soglia mettendo -30 mV. In questo modo abbiamo però tanti istanti di tempo quanti sono il numero di eventi. Possiamo dunque procedere calcolando il baricentro temporale dell'evento eseguendo una media pesata sull'ampiezza per ottenere un unico valore di tempo per ogni presa dati da associare a tale posizione. Eseguiamo dunque uno scan in voltaggio fino al valore di soglia salvando il valore di voltaggio a meno del piedistallo e l'istante di tempo associato. Successivamente con tali valori per ogni evento calcoliamo

$$t = \frac{\sum t_i (V_i - p)}{\sum V_i - p} \quad (7)$$

dove V_i sono le tensioni campionate agli istanti t_i . Per p si intende il piedistallo che è stato calcolato facendo una media dei primi circa 100 valori di voltaggio che fluttuavano intorno allo 0, come visibile in figura (12), associandoci come incertezza la deviazione standard. Questo procedimento è stato fatto sia per le forme d'onda del canale 1, che per quelle del canale 2, trovando gli istanti di tempo scritti in tabella (2).

Passiamo adesso al calcolo delle incertezze da associare. Il DRS campiona 200 ns in 1024 punti e ciò che ci aspettiamo è che questi punti siano equidistanti, ma non è quello che invece si osserva. Come incertezza sui tempi per ogni evento, associamo quindi una media tra i valori di questa fluttuazione, ovvero

$$\sigma_{t_i} = \frac{\sum_{j=0}^{1023} (t_j - j \frac{1024}{200})}{1024}. \quad (8)$$

Per quanto riguarda invece i voltaggi corrispondenti, si associa come incertezza una media tra la differenza tra il valore V_{i+1} e il valore di V_i , ovvero

$$\sigma_{V_i} = \frac{\sum_{j=0}^{1023} \frac{(V_{j+1} - V_j)}{2}}{1024}, \quad (9)$$

sommandoci in quadratura anche l'incertezza del piedistallo calcolata precedentemente. Successivamente si propaga l'incertezza per associarne una ai tempi finali.

Costruiamo un istogramma dei tempi e uno dei voltaggi per ogni presa dati. Riportiamo quello relativo ad $x = 60$ cm nelle figure (13) e (14).

Posizione del PMT3 [cm]	t_1 [ns]	σ_{t_1} [ns]	t_2 [ns]	σ_{t_2} [ns]
10 ± 1	67.0288	0.0009	81.2284	0.0008
30 ± 1	66.994	0.003	81.342	0.002
60 ± 1	69.6826	0.0005	81.8623	0.0004
80 ± 1	72.444	0.003	81.996	0.002
100 ± 1	75.855	0.003	82.403	0.002
120 ± 1	78.5315	0.0023	82.4487	0.0018
130 ± 1	80.3731	0.0032	82.8522	0.0026
140 ± 1	81.646	0.002	82.675	0.002
150 ± 1	82.6969	0.0025	82.4109	0.0025
160 ± 1	82.802	0.002	81.049	0.002
180 ± 1	83.0796	0.0008	78.4741	0.0009
200 ± 1	82.945	0.002	75.412	0.002
220 ± 1	82.9157	0.0006	72.4178	0.0008
250 ± 1	82.628	0.001	67.550	0.001

Table 2: In questa tabella si inserisce tempi

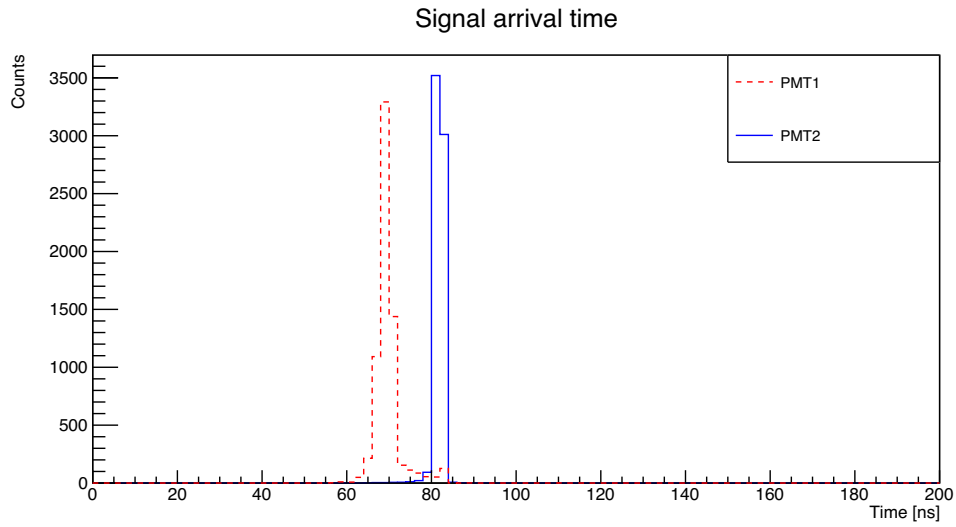


Figure 13: istogramma dei tempi t_1 e t_0 riportati in tabella (2).

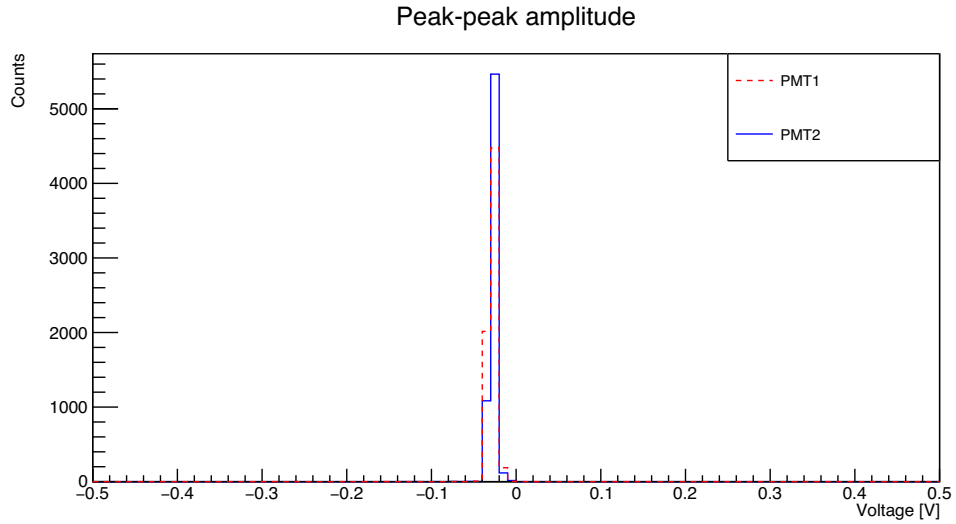


Figure 14: istogramma dei voltaggi corrispondenti ai tempi riportati in tabella (2). Sono stati presi considerando il valore subito successivo alla soglia di -30 mV dunque ci si aspetta un numero elevato di conteggi in corrispondenza di quel valore.

A questo punto, dato che abbiamo trovato i tempi t_1 e t_2 per ogni x , costruiamo il grafico di $t_1 - t_2$ in funzione di x . Scegliamo di eseguire un fit con modello lineare $y = mx + q$ e poniamo:

- $y = t_1 - t_2$,
- $m = \frac{2}{v}$,
- $q = \Delta t_1 - \Delta t_2$.

Riportiamo il grafico ottenuto in figura (15). In questo modo abbiamo ottenuto una stima della velocità di propagazione dei raggi cosmici nella barra $13.98 \pm 0.07 \frac{cm}{ns}$. L'intercetta della retta utilizzata come modello ci fornisce una stima dei ritardi introdotti dal meccanismo $\Delta t_1 - \Delta t_2 = -21.0 \pm 0.1$ ns. Non è necessario trovare i due Δt separatamente ai fini del calcolo della distribuzione angolare.

Fit lineare con Grafico dei Residui

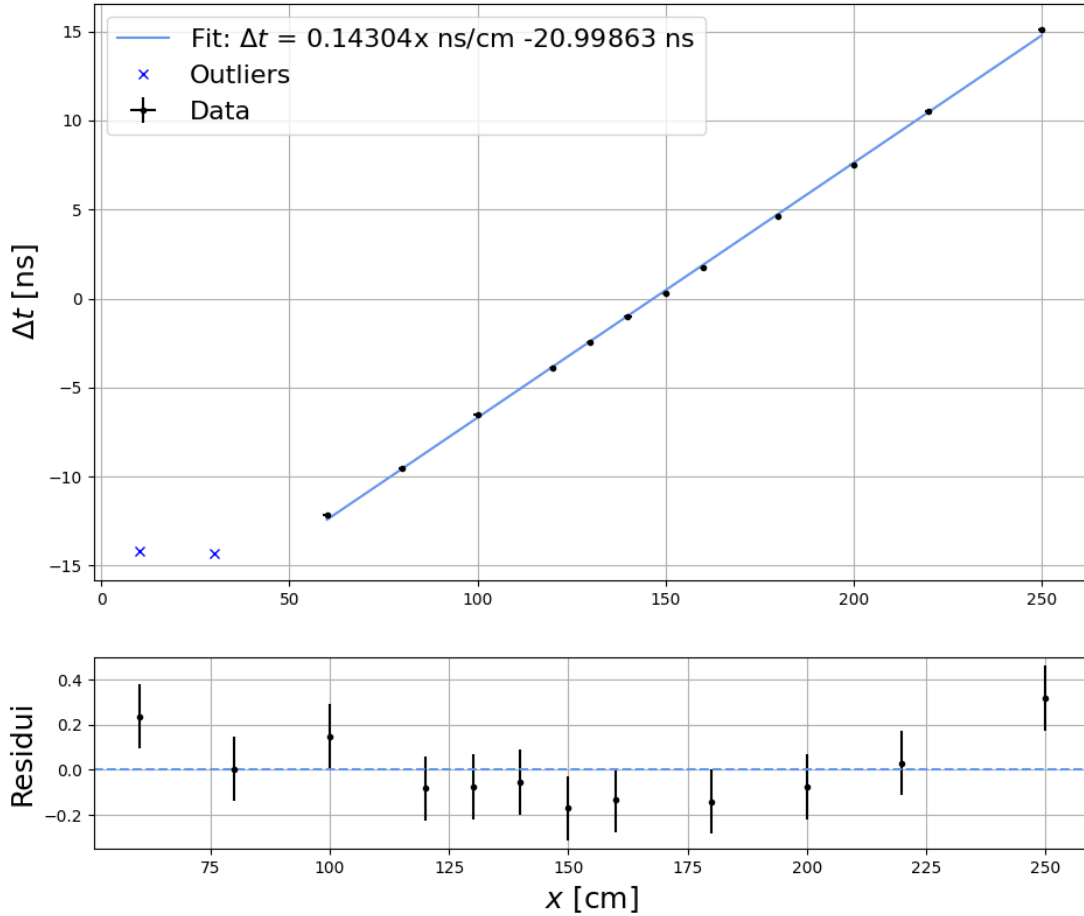


Figure 15: Misura della velocità di propagazione dei raggi cosmici nel materiale scintillante utilizzando la differenza dei tempi necessari ad arrivare alle due estremità in funzione della posizione di incidenza del raggio.

Per $x = 5$ cm e $x = 30$ cm si hanno due outliers in quanto non seguono l'andamento del resto dei dati.

Abbiamo quindi deciso di escludere i primi due dati dal fit.

5 Distribuzione angolare

L'ultima parte di questa esperienza consiste nel determinare la distribuzione angolare dei raggi cosmici. Disponiamo il PMT3 in prossimità del pavimento, orientato ortogonalmente alla barra. Scegliamo di posizionarlo il più possibile in corrispondenza di $x = 0$. Il punto x scelto condiziona l'intervallo angolare dei cosmici raccolti. Considerando la barra lunga $l = 280$ cm ed elevata dal pavimento di $h = 190$ cm, se si posiziona il PMT3 al centro ($x = 140$ cm) si raccoglie raggi cosmici nell'intervallo $[-\phi, \phi]$ con

$$\phi = \arctan \frac{x}{h} = 35^\circ. \quad (10)$$

Questo non è un intervallo ottimale dato che ci aspettiamo una simmetria nella distribuzione degli angoli rispetto a $\phi = 0$. La strategia più conveniente sarebbe prendere l'intervallo più ampio possibile da 0° a un angolo θ . Abbiamo quindi deciso di posizionarlo ad $x = 10$ cm in modo tale che l'intervallo di angoli è $[\varphi, \theta]$ con

$$\varphi = \arctan \frac{-x}{h} = -3^\circ \sim -0.05 \text{ rad}, \quad (11)$$

$$\theta = \arctan \frac{l-x}{h} = 55^\circ \sim 1 \text{ rad}. \quad (12)$$

In questo modo riusciamo ad acquisire un maggior numero di informazioni prendendo anche raggi cosmici arrivati più radenti alla barra.

Acquisiamo anche in questo caso le coincidenze triple ed otteniamo circa 15000 eventi di cui i non saturati sono 6270. Sappiamo dunque che i raggi cosmici raccolti sono arrivati in prossimità del pavimento sul PMT3. Il secondo punto della traiettoria che ci permetterà poi di trovare l'angolo di arrivo del raggio cosmico è sulla barra. Per trovare il punto preciso, si utilizza nuovamente l'equazione (6). Per ogni evento, sceglie nuovamente gli istanti di tempo t_1 e t_2 successivi alla soglia di -30 mV e, conoscendo adesso sia la velocità v che i ritardi introdotti Δt_1 e Δt_2 , si ottiene la posizione x dove il raggio ha incontrato la barra con un semplice calcolo. L'angolo di incidenza si ottiene con

$$\tan \theta = \frac{x - x_3}{d}. \quad (13)$$

Riempiamo un istogramma con gli angoli relativi ad ogni evento ed eseguiamo un fit con modello gaussiano ottenendo il grafico in figura (16).

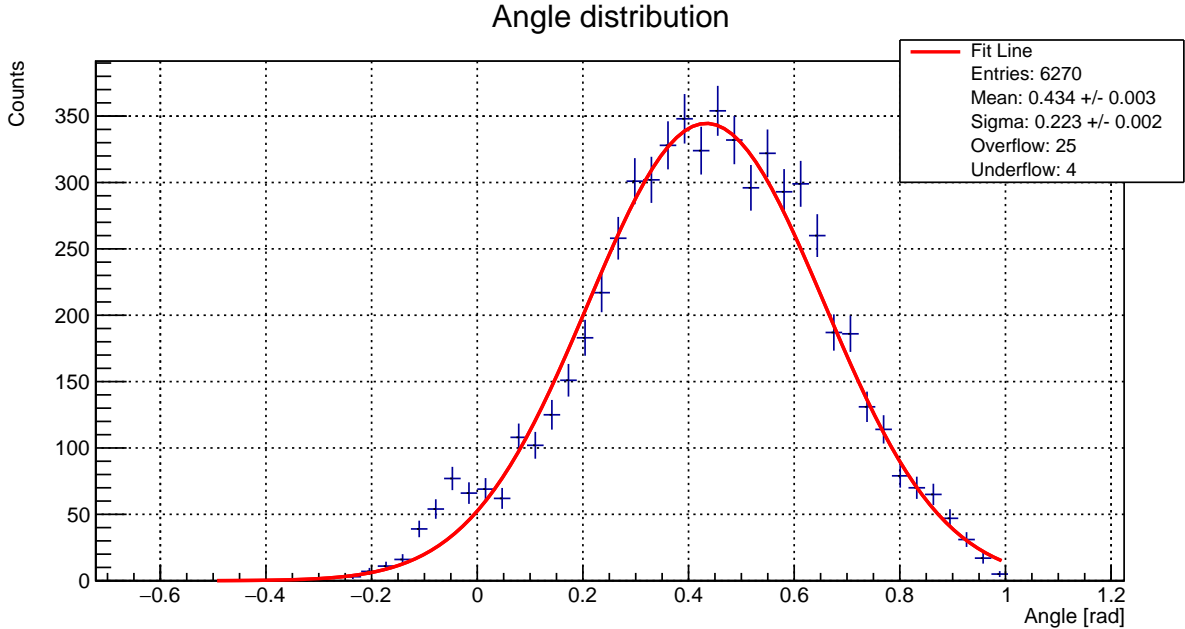


Figure 16: Fit della distribuzione angolare dei raggi cosmici

6 Conclusioni

Dall'analisi delle forme d'onda acquisite tramite il DRS, abbiamo quindi ottenuto la distribuzione angolare dei raggi cosmici a livello del mare. Osserviamo che la distribuzione non è costante, ma si ha un numero maggiore di conteggi per i raggi passanti al centro della barra e una diminuzione man mano che ci si allontana.

Per quanto riguarda il valore della velocità trovato, $13.98 \pm 0.07 \frac{cm}{ns}$, dovrebbe essere compatibile con la velocità della luce fratto l'indice di rifrazione della barra. Essendo uno scintillatore plastico, l'indice di rifrazione è $n \sim 1.58$ perciò si ottiene $v = \frac{c}{n} \sim 19 \frac{cm}{ns}$. I due valori non sono compatibili ma, la velocità appena calcolata è la velocità che avrebbe un raggio che percorre il minimo cammino all'interno della barra. I raggi cosmici, però, non percorrono il cammino minimo ma rimbalzano, dunque la loro velocità è chiaramente inferiore.