

# **LABORATORIO DI FISICA NUCLEARE E SUBNUCLEARE I**

## **ESPERIENZA RAGGI COSMICI**

**PROVENIENZA DEI RAGGI COSMICI PRIMARI**

Emanuele Angelino

Stefano Ebagezio

Alvaro Ortega Rivera

Marta Tornago

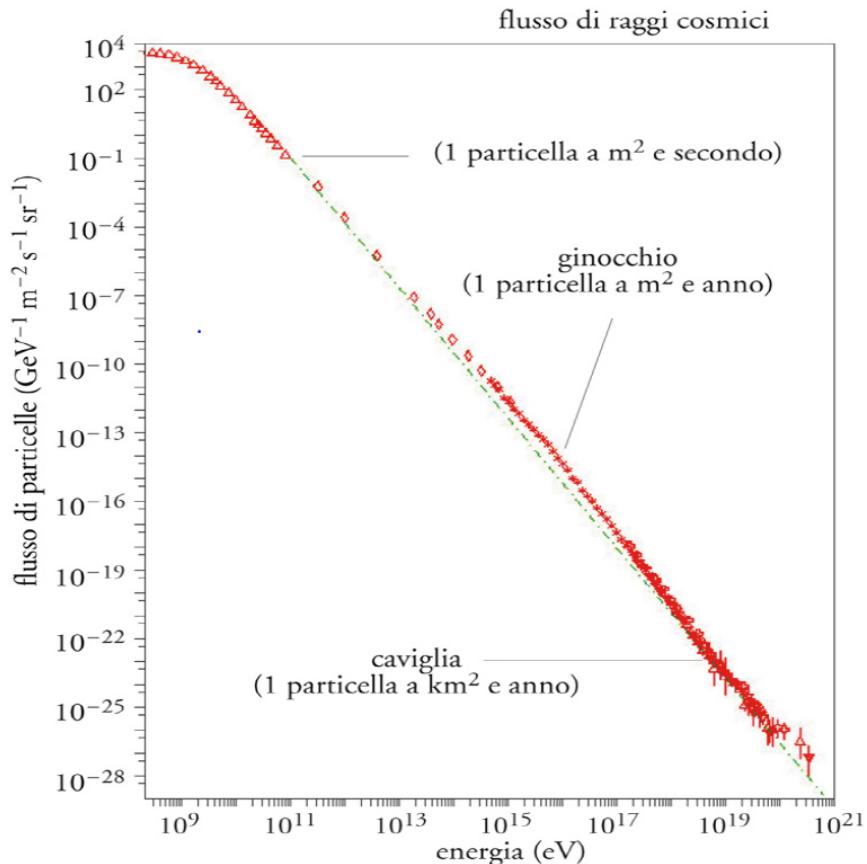
# Sommario

<b>Introduzione.....</b>	<b>3</b>
<b>Obiettivo dell'esperienza.....</b>	<b>5</b>
<b>Apparato sperimentale.....</b>	<b>5</b>
<b>Coincidenze .....</b>	<b>7</b>
<b>Procedura sperimentale .....</b>	<b>8</b>
Taratura degli scintillatori.....	8
Taratura del TDC.....	13
Coincidenze multiple .....	15
Tempo morto .....	16
Coincidenza quintupla .....	16
<b>Analisi dati .....</b>	<b>18</b>
Analisi degli spettri di singola particella .....	18
Correzione dei tempi del TDC.....	20
Distribuzione angolare dei raggi cosmici primari .....	22
Spessore medio di uno sciame .....	24
Centro di gravità .....	25
Distribuzione laterale .....	26
<b>Conclusioni.....</b>	<b>28</b>

## Introduzione

I raggi cosmici sono nuclei di vari elementi chimici prodotti e accelerati da diversi oggetti astrofisici, quali le supernovae, che si propagano nello spazio. La loro origine può essere galattica o extragalattica. Essendo particelle cariche il loro percorso viene deviato dai campi magnetici con cui interagiscono. La direzione d'arrivo di tali particelle non dipende quindi dalla sorgente da cui sono state prodotte.

Nel grafico seguente si rappresenta lo spettro in energia dei raggi cosmici che giungono sulla Terra.

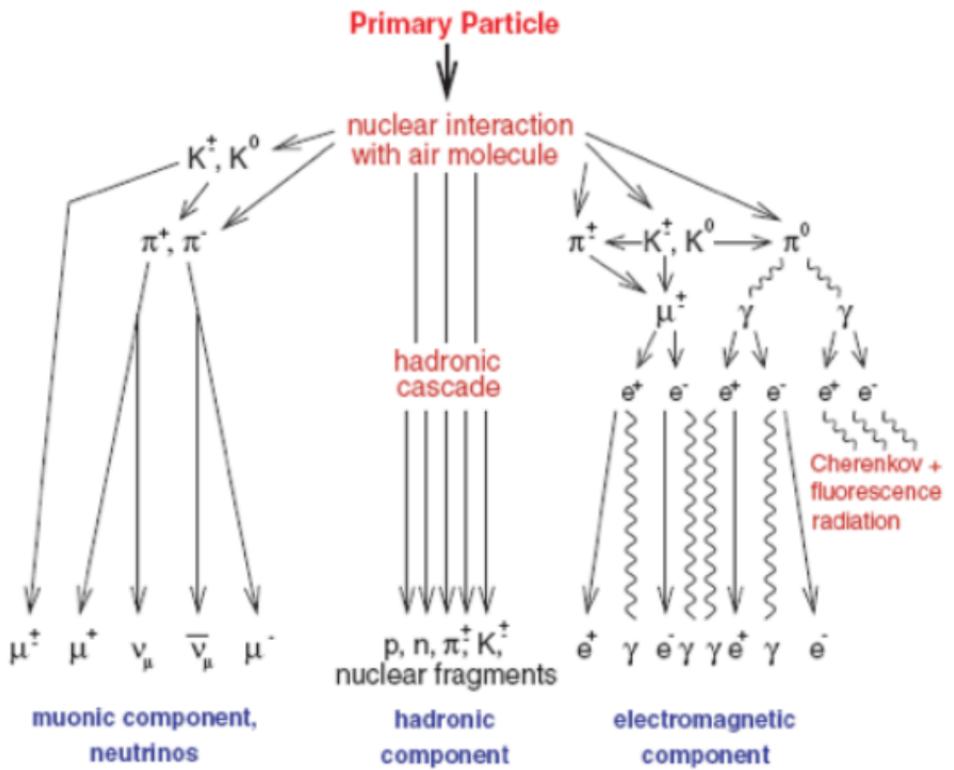


Il flusso dei raggi cosmici segue la legge di potenza  $E^{-\gamma}$  con  $\gamma$  pari a 2,7 nella parte a energie inferiori, 3,1 dopo il ginocchio e nuovamente 2,7 dopo la caviglia. I cambi di pendenza dipendono dal tipo e dall'origine delle particelle.

I raggi cosmici si distinguono in primari e secondari. I primi sono generati dalle sorgenti astrofisiche, mentre gli altri vengono prodotti dall'interazione dei primari con le particelle dell'atmosfera. Questi ultimi costituiscono lo sciame di particelle che giunge sulla superficie terrestre. Tale fenomeno prende il nome di Extensive Air Shower (EAS).

La cascata ha un numero di particelle massimo a una certa quota, dopodiché gradualmente diminuisce perché queste vengono riassorbite.

Lo sciame è formato da una componente adronica nella parte centrale e lateralmente da una componente muonica (data da  $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu$ ) e elettromagnetica (data da  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ ,  $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$ ).



I muoni tendono a essere riassorbiti meno degli elettroni, per cui il numero degli elettroni al suolo è decisamente inferiore rispetto al massimo, mentre il numero di muoni al suolo equivale a circa (80-90) % del massimo.

È possibile individuare la direzione di arrivo dei raggi cosmici primari a partire dalla misura dei tempi di transito delle particelle nei rivelatori. In questa esperienza si rivela la componente elettromagnetica e muonica dello sciame; ci si aspetta che quest'ultima sia dominante in relazione alla quota a cui sono posti i rivelatori.

## Obiettivo dell'esperienza

Determinazione della distribuzione zenitale dei raggi cosmici primari e di alcune caratteristiche dello sciame, quali lo spessore, l'età e il raggio della sezione.

## Apparato sperimentale

L'apparato è costituito da cinque scintillatori inorganici che rivelano la componente elettromagnetica e muonica dello sciame, posti sul tetto dell'edificio e disposti come in figura:



1:  $(L/2, L/2)$

2:  $(L, L)$

3:  $(0, L)$

4:  $(0, 0)$

5:  $(L, 0)$

L è la distanza media tra i rivelatori esterni su uno stesso lato. Infatti, durante lo svolgimento dell'esperienza si è considerata l'area su cui sono disposti i rivelatori come quadrata, anche se in realtà questa risulta solo un'approssimazione, dal momento che le distanze tra i rivelatori assumono valori differenti.

Le misure reali delle distanze sono le seguenti:

$$L_{34} = (11,39 \pm 0,01) \text{ m}$$

$$L_{45} = (11,62 \pm 0,01) \text{ m}$$

$$L_{52} = (11,91 \pm 0,01) \text{ m}$$

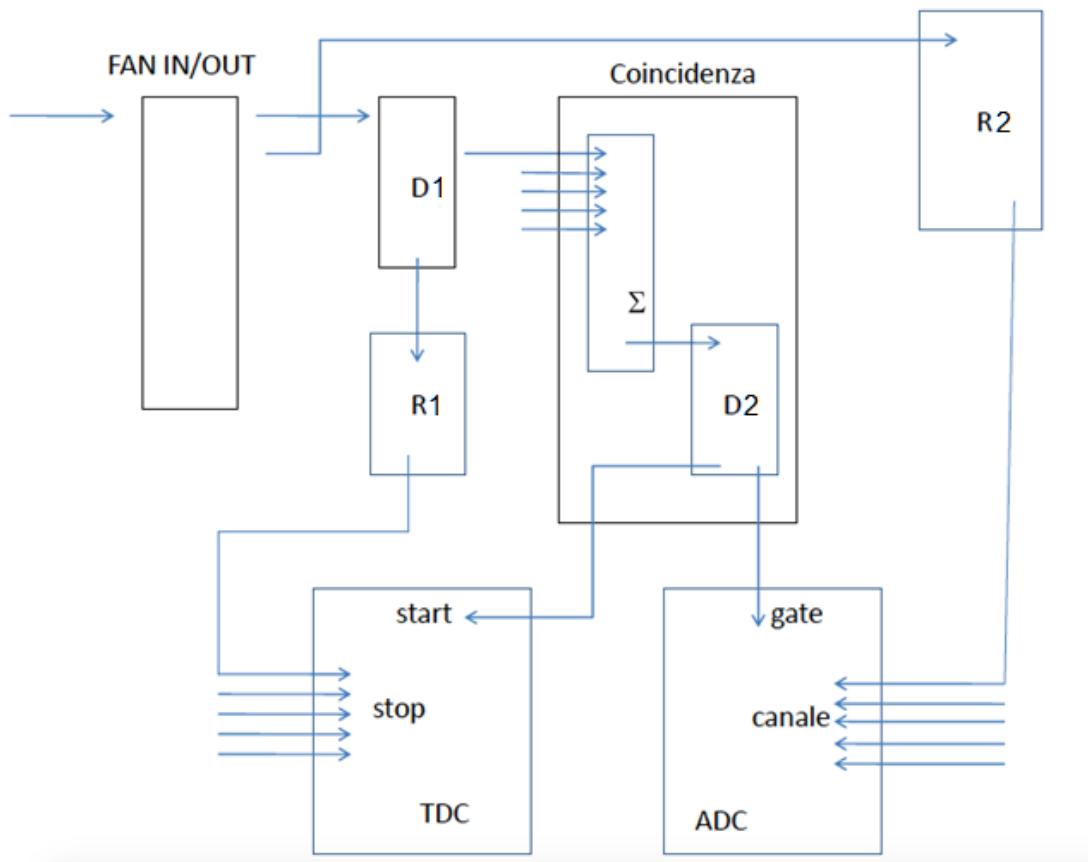
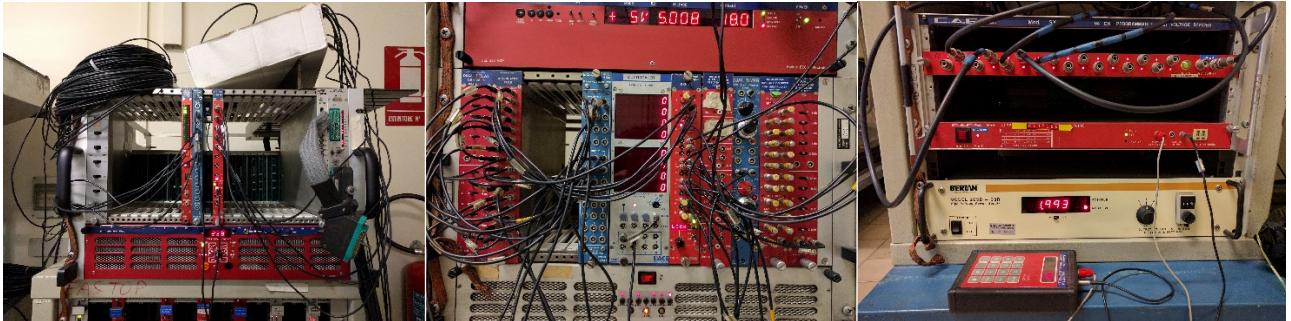
$$L_{23} = (11,64 \pm 0,01) \text{ m}$$

Il valore medio utilizzato risulta essere  $L = (11,64 \pm 0,26) \text{ m}$ .

Gli scintillatori misurano  $(80 \times 80 \times 4) \text{ cm}^3$ . Sono inseriti in scatole contenenti piramidi ricoperte di vernice riflettente che ha lo scopo di convogliare al fototubo i fotoni di scintillazione, generati al passaggio di un muone.

I segnali generati dai fotomoltiplicatori vengono trasferiti mediante cavi coassiali alla catena di elettronica situata nel laboratorio dei raggi cosmici al quarto piano.

La catena di elettronica è strutturata nel seguente modo:



- Ogni segnale analogico proveniente da ciascun scintillatore viene diviso in due copie in un FAN IN/FAN OUT, costituito da un amplificatore e un attenuatore.
- Una delle due copie passa attraverso il discriminatore D1 che converte i segnali analogici in segnali logici di tipo NIM di larghezza di circa 100 ns, a condizione che il segnale in ingresso superi la soglia fissata. Il discriminatore ha due uscite di cui una va al sommatore e l'altra al TDC.
- Al sommatore  $\Sigma$  arrivano tutti i segnali provenienti dai rivelatori collegati i quali, poi, passano al discriminatore D2. Fissando opportunamente la soglia di questo discriminatore è possibile ottenere la coincidenza dei segnali in ingresso al sommatore. I due segnali in uscita dal discriminatore vanno uno all'ADC e l'altro al TDC.
- Il segnale proveniente dalla coincidenza determina lo start del TDC, mentre una delle due copie del segnale proveniente dal FAN IN/FAN OUT, dopo essere stata adeguatamente ritardata, stabilisce lo stop. Da questa configurazione risulta che, mentre lo start è unico ed è determinato dall'arrivo

dell'ultimo segnale al sommatore, ogni scintillatore invia un segnale di stop. Il TDC è un modulo di tipo CAMAC.

- La seconda copia del segnale analogico in uscita dal FAN IN/FAN OUT, dopo essere stata opportunamente ritardata, viene mandata all'ADC. La conversione viene effettuata solo se il segnale ricade all'interno di un gate temporale di lunghezza fissata ( $\approx 200$  ns) il cui inizio è determinato dal secondo segnale uscente dalla coincidenza.
- I segnali di ADC e TDC vengono inviati al calcolatore.

## Coincidenze

Le coincidenze vengono utilizzate per distinguere muoni provenienti da uno stesso sciame da quelli rivelati in modo casuale. Infatti, ci si aspetta che al passaggio di uno sciame più scintillatori rivelino un evento a una distanza di tempo non superiore alla larghezza dei segnali in ingresso all'elettronica di coincidenza.

È possibile che vengano rilevate delle false coincidenze dovute al rumore o al passaggio casuale di muoni.

Il rate di false coincidenze per una coincidenza n-upla è dato da:

$$U_n = (2\Delta t)^{n-1} \prod_i f_i$$

Dove  $\Delta t$  è la larghezza di ogni segnale e  $f_i$  è il rate di eventi rivelati per l'i-esimo scintillatore.

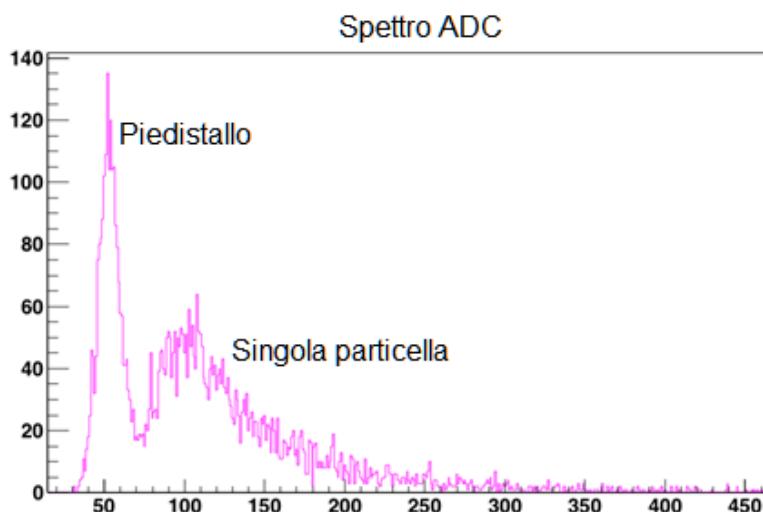
Ipotizzando di avere un rate di eventi di circa 100 Hz e svolgendo i calcoli si ottiene che per una falsa coincidenza doppia  $U_2 \approx 0,01$  Hz, confrontabile con quello dello sciame pari a 0,03 Hz. In questo modo risulta difficile distinguere le false coincidenze dal passaggio di uno sciame.

Considerando una coincidenza quintupla, invece, si ha  $U_5 \approx 10^{-14}$  Hz, quindi del tutto trascurabile rispetto al rate di eventi.

## Procedura sperimentale

### Taratura degli scintillatori

In questa prima fase occorre assicurarsi che gli scintillatori lavorino nella migliore configurazione possibile. Questa si realizza quando è possibile distinguere nello spettro dell'ADC la curva del segnale della singola particella dal piedistallo, ovvero dal rumore generato dall'elettronica, come nell'esempio in figura.



Inoltre occorre fare in modo da avere un rate di eventi di circa 100 Hz, che corrisponde alla frequenza attesa di muoni rivelati alla nostra quota.

Tale configurazione si ottiene scegliendo opportunamente la soglia del discriminatore e la tensione di alimentazione del fotomoltiplicatore, che ne determina il guadagno.

### Canale 1

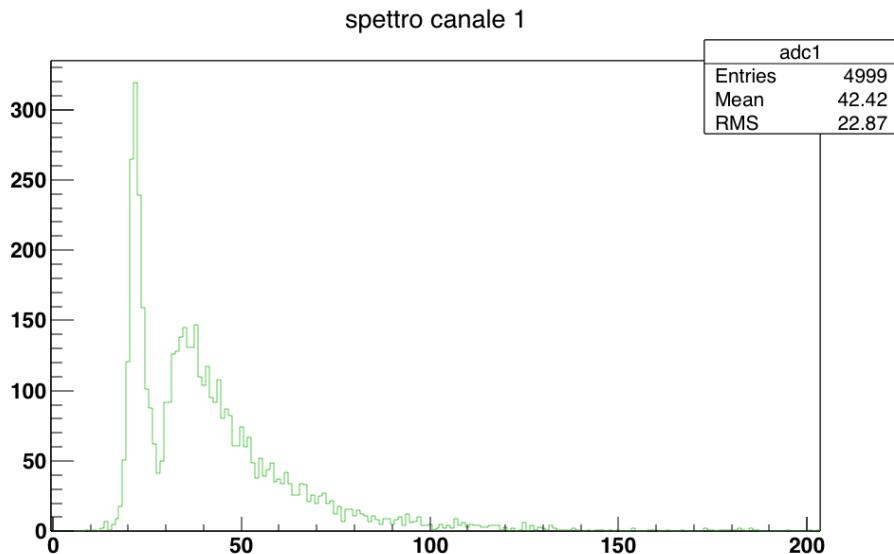
Inizialmente si effettuano acquisizioni per circa 10 secondi per diversi valori di tensione e soglia.

Soglia (mV)	Tensione (V)	Rate (Hz)
$80 \pm 1$	$1969 \pm 1$	$194 \pm 4$
$83 \pm 1$	$1969 \pm 1$	$140 \pm 4$
$85 \pm 1$	$1969 \pm 1$	$133 \pm 4$
$90 \pm 1$	$1969 \pm 1$	$102 \pm 3$
$95 \pm 1$	$1969 \pm 1$	$87 \pm 3$
$100 \pm 1$	$1969 \pm 1$	$70 \pm 3$

Gli errori su soglia e tensione sono determinati dalla sensibilità dello strumento, mentre quelli sul rate si calcolano a partire dalla radice quadrata degli eventi registrati.

Per i valori di soglia di 85 mV, 90 mV e 95 mV, a cui corrispondono i valori di rate più vicini a quelli attesi, si effettuano delle acquisizioni di 2000 eventi per osservare lo spettro dell'ADC.

Il valore di soglia per cui lo spettro risulta migliore è 90 mV. Per tale valore si effettua, quindi, un'acquisizione di 5000 eventi, da cui si è ottenuto il seguente spettro dell'ADC.

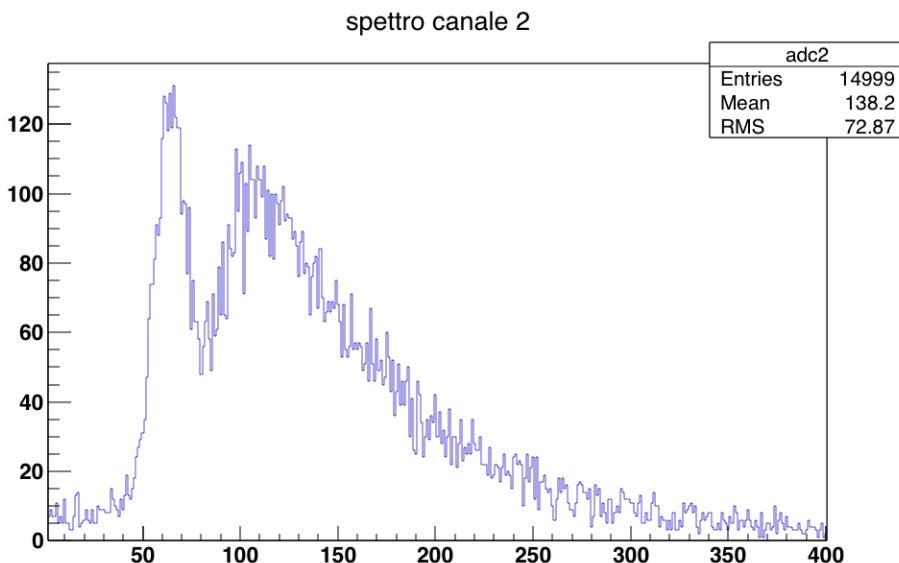


Seguendo lo stesso procedimento per gli altri canali si ottengono i risultati riportati di seguito.

### Canale 2

Soglia (mV)	Tensione (V)	Rate (Hz)
80±1	1972±1	67±3
60±1	1972±1	102±3
55±1	1972±1	110±3
50±1	1972±1	142±4
45±1	1972±1	219±5

Lo spettro dell'ADC è ottenuto con soglia 55 mV e con un'acquisizione da 15000 eventi:



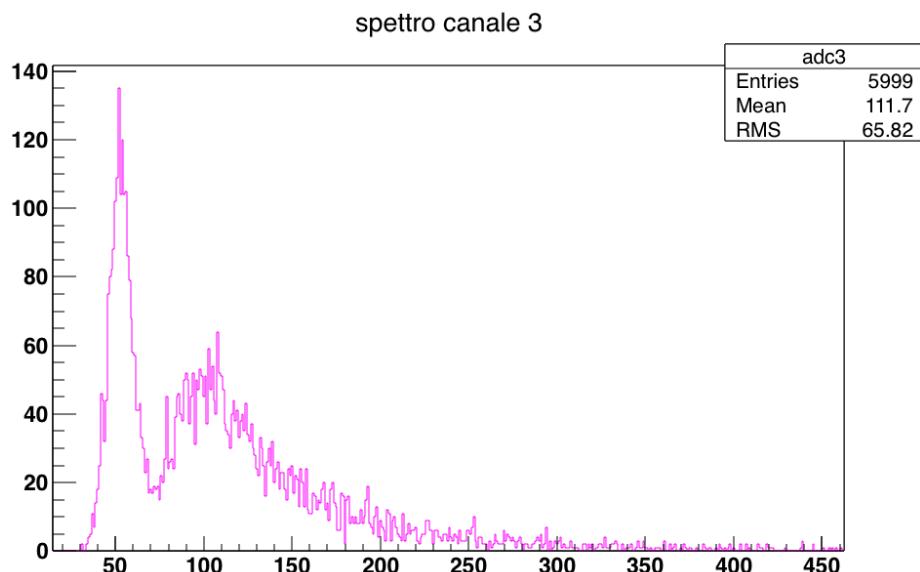
### Canale 3

Soglia (mV)	Tensione (V)	Rate (Hz)
85±1	1900±1	257±5
110±1	1930±1	136±4
120±1	1950±1	130±4
125±1	1960±1	120±3
115±1	1960±1	211±5
120±1	1960±1	146±4
130±1	1960±1	94±3
135±1	1960±1	77±3

La variazione di tensione nel corso della presa dati è finalizzata a una migliore distinzione delle curve relative alla singola particella e al rumore.

La configurazione finale scelta ha soglia 130 mV, tensione 1960 V e, rispetto a quelle precedenti, questa viene privata di 12 dB di attenuazione per garantire una maggiore separazione tra la singola particella e il piedistallo.

Lo spettro di ADC ottenuto con un'acquisizione da 6000 eventi è il seguente.

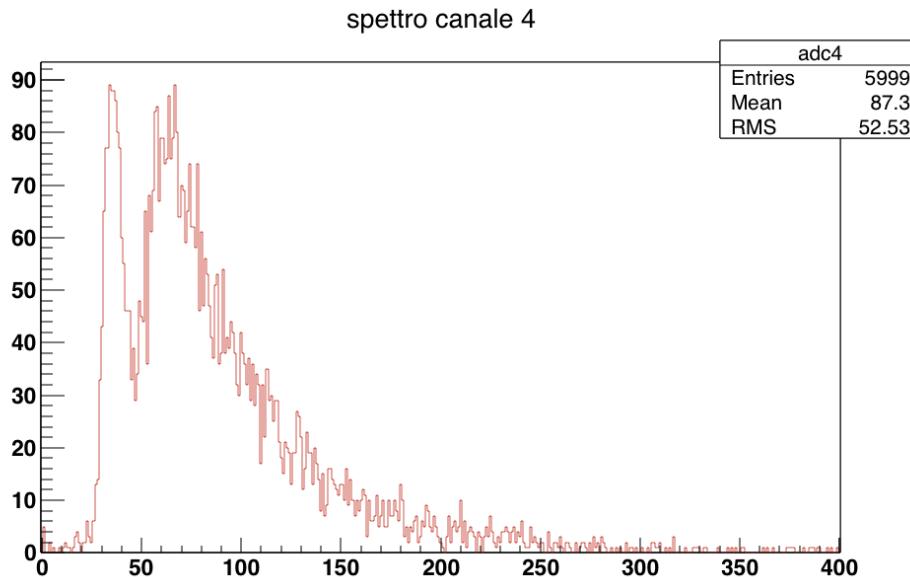


### Canale 4

Soglia (mV)	Tensione (V)	Rate (Hz)
100±1	1952±1	163±4
100±1	1977±1	194±5
115±1	1977±1	148±4
105±1	1977±1	188±4 *
110±1	1977±1	158±4 *
125±1	1990±1	134±4 *

\*misure effettuate togliendo un'attenuazione di 12 dB

La configurazione finale scelta ha soglia 125 mV, tensione 1990 V ed è stata privata di un'attenuazione di 12 dB. Lo spettro dell'ADC ottenuto con un'acquisizione di 6000 eventi è il seguente.



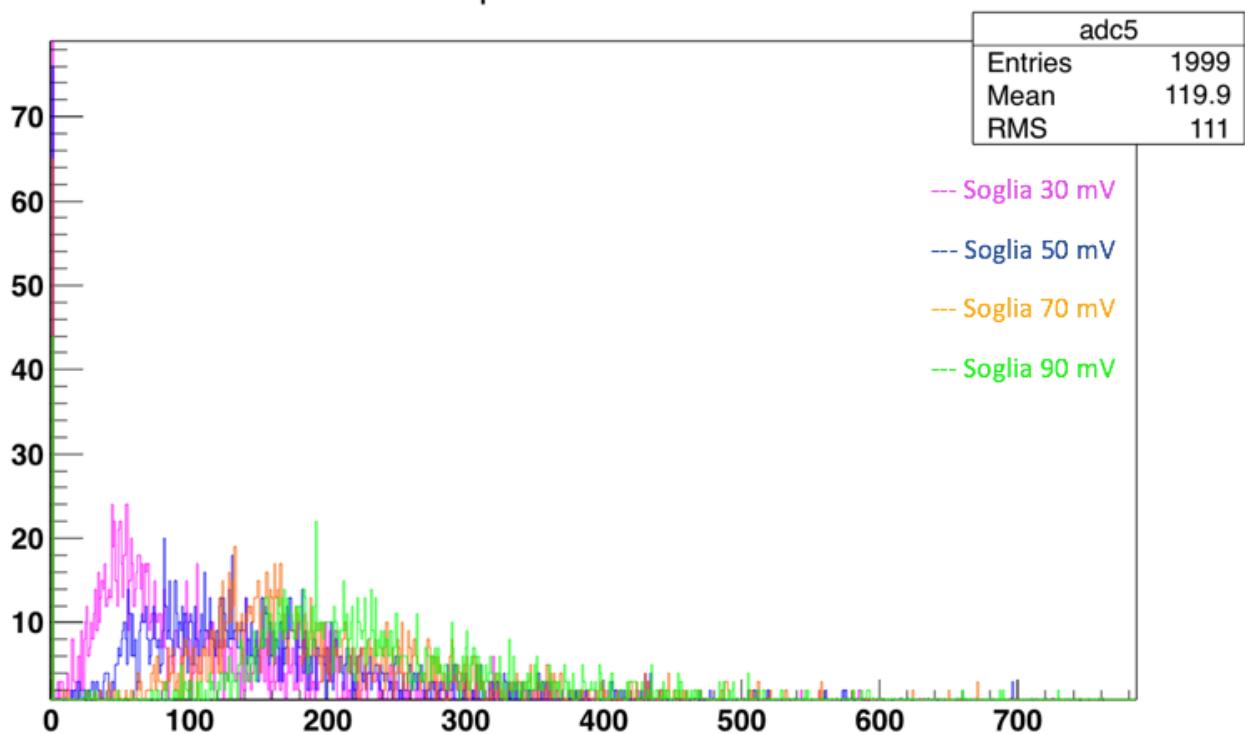
### Canale 5

Soglia (mV)	Tensione (V)	Rate (Hz)
50±1	1954±1	101±3
45±1	1980±1	122±4
40±1	1900±1	112±3
20±1	2000±1	369±6
100±1	2000±1	40±2
50±1	2100±1	157±4
60±1	2100±1	125±4
70±1	2100±1	101±3
80±1	2100±1	88±3
90±1	2100±1	73±3
100±1	2100±1	57±2
30±1	2100±1	287±5

In questo caso nessuna configurazione ha permesso di distanziare nettamente il picco del rumore dalla curva della singola particella. Per tentare di risolvere il problema si è aumentato il valore della tensione, senza ottenere risultati soddisfacenti.

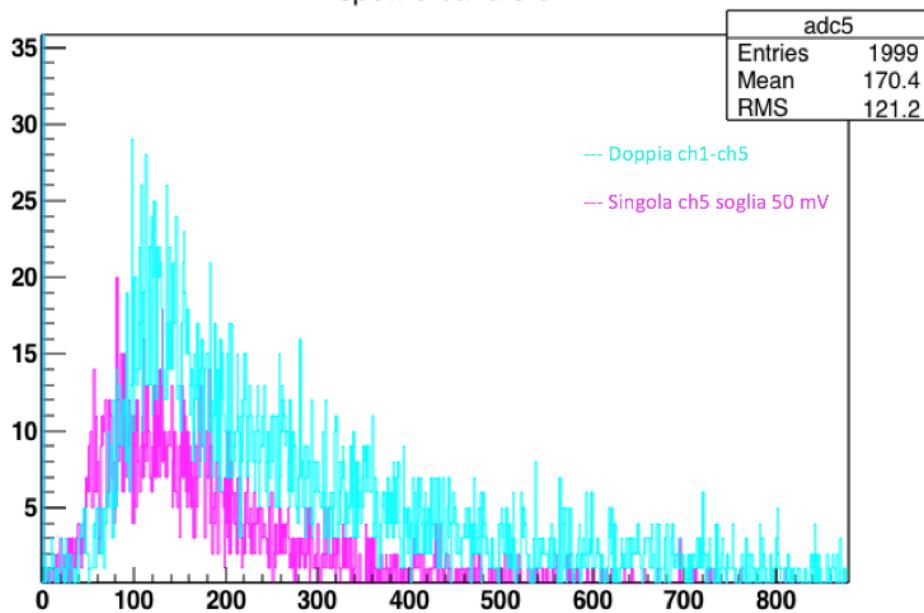
Sovrapponendo gli spettri dell'ADC a tensione 2100 V con soglie 30 mV, 50 mV, 70 mV e 90 mV si è identificata una regione intorno al canale 100 in cui è possibile che sia situata la curva di singola particella.

spettro canale 5



Per verificare quale soglia sia più adeguata, viene confrontato lo spettro per ognuna con quello risultante da un'acquisizione in coincidenza doppia del canale 5 con il canale 1.  
Si osserva che lo spettro di singola che meglio si adatta a quello della doppia è quello con soglia 50 mV, come si può osservare in figura.

spettro canale 5



Tuttavia, per evitare di tagliare eventi effettivamente legati al passaggio di una particella, si sceglie di lavorare impostando come soglia per il quinto scintillatore 30 mV. Infatti, nello spettro con soglia 50 mV non è possibile osservare il picco del rumore, quindi la curva della singola particella potrebbe risultare tagliata. È possibile che con soglia 30 mV venga conteggiato del rumore in singola, ma con le coincidenze di livello superiore questo verrà sicuramente filtrato.

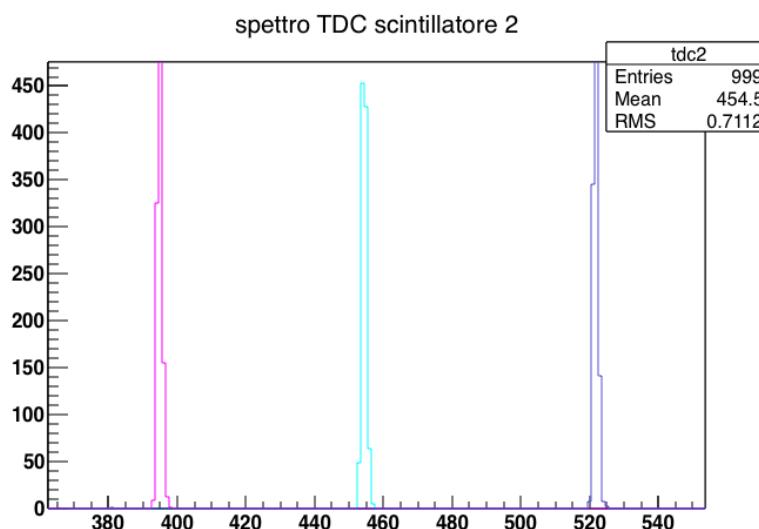
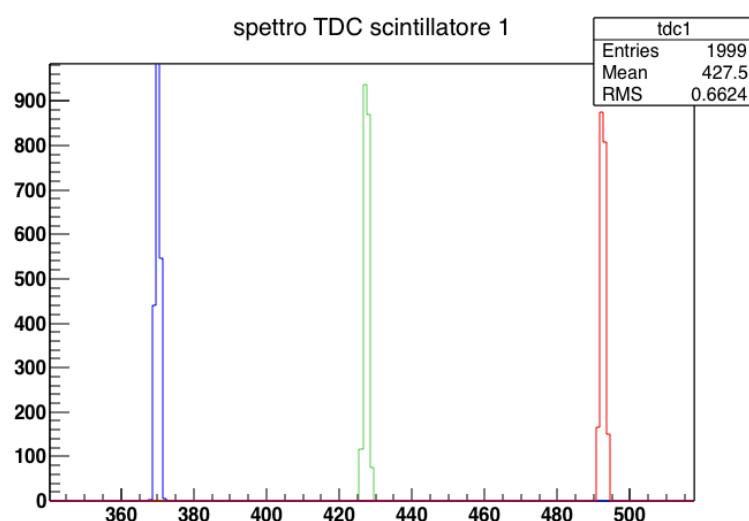
Quindi la configurazione finale ha soglia 30 mV e tensione 2100 V.

### Taratura del TDC

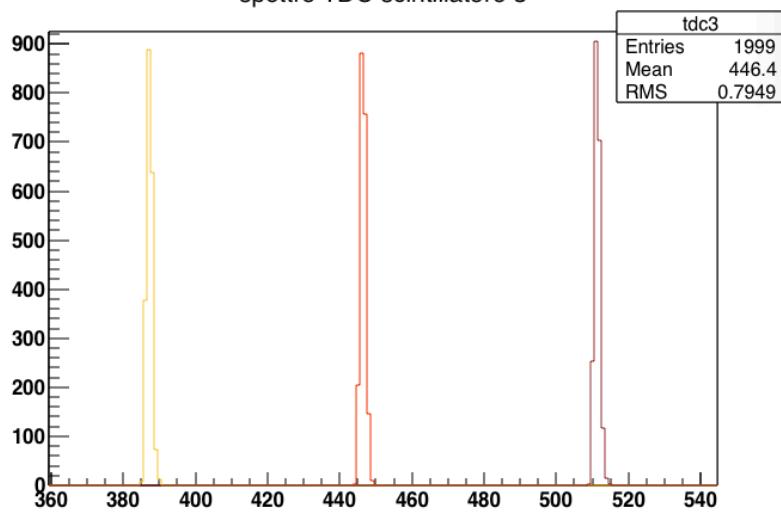
Poiché nella fase finale dell'esperienza è necessario conoscere l'istante in cui viene registrato ogni evento, occorre studiare la risposta del TDC per ottenere la conversione canali-tempo. Inoltre, si vuole verificare che la risposta sia lineare nella regione di interesse.

Per fare ciò si osserva lo spettro del TDC per ogni canale con la configurazione inalterata e, successivamente, aggiungendo un ritardo prima all'ingresso dello start del TDC e poi a quello dello stop. Ciò viene effettuato inserendo un cavo coassiale con ritardo di 15 ns.

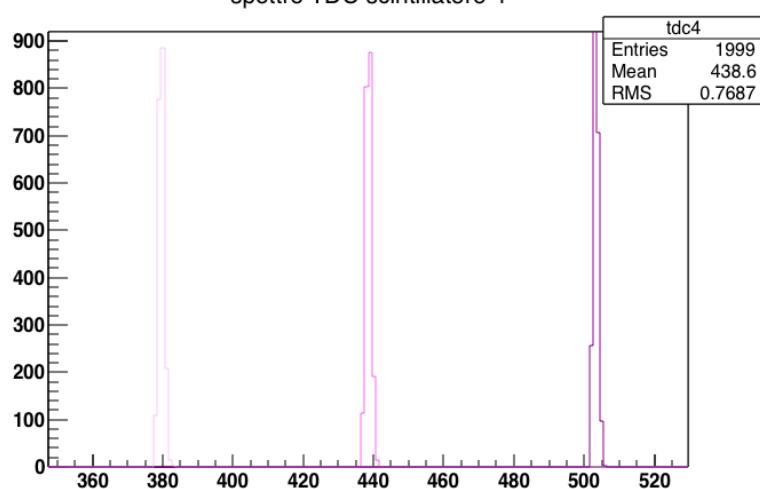
Nei grafici che seguono il picco a sinistra rappresenta il segnale dato dal ritardo sullo start, quello in centro il segnale in configurazione inalterata e quello a destra il segnale dato dal ritardo sullo stop.



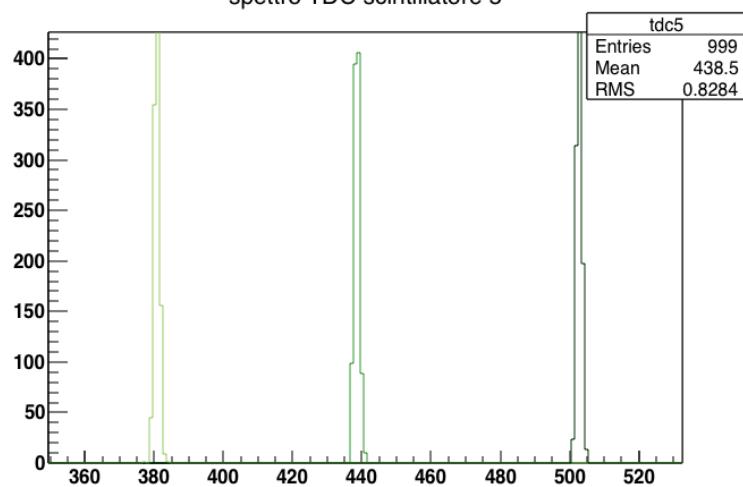
spettro TDC scintillatore 3



spettro TDC scintillatore 4



spettro TDC scintillatore 5



La tabella riporta i valori ottenuti e il fattore di conversione in nanosecondi/canale per ogni rivelatore.

Rivelatore	t senza ritardo (ch)	t ritardo start (ch)	t ritardo stop (ch)	ns/ch start	ns/ch stop	Media (ns/ch)
1	446±1	387±1	511±1	0,25±0,03	0,23±0,02	0,24±0,03
2	438±1	379±1	503±1	0,25±0,03	0,23±0,02	0,24±0,03
3	427±1	370±1	492±1	0,26±0,03	0,23±0,02	0,25±0,03
4	454±1	394±1	521±1	0,25±0,03	0,22±0,02	0,24±0,03
5	438±1	380±1	502±1	0,26±0,03	0,23±0,02	0,25±0,03

L'errore sulla media di nanosecondi per canale è stato calcolato supponendo di avere un'incertezza di 1 ns sul ritardo del cavo coassiale e di 1 ch sul picco del TDC e scelto come il maggiore degli errori sui valori di ns/ch per start e stop.

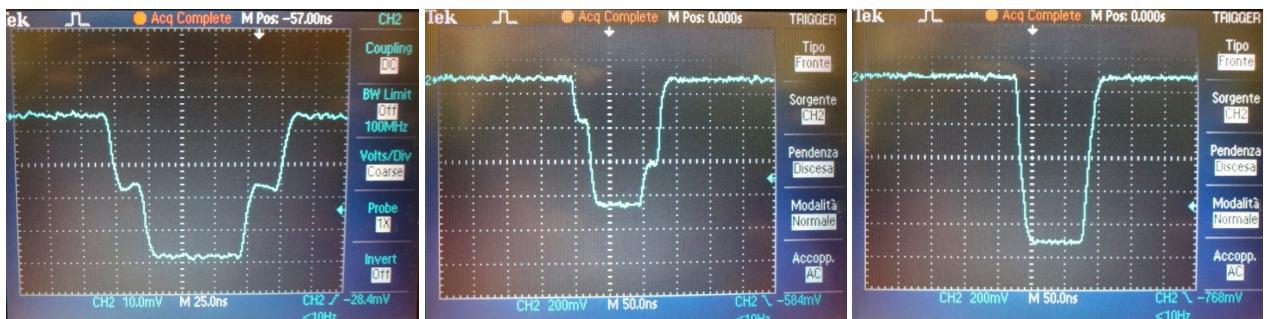
Si assume, quindi, il valore ( $0,24 \pm 0,03$ ) ns/ch come fattore di conversione per il TDC.

### Coincidenze multiple

Vengono di seguito riportati le configurazioni e i risultati ottenuti effettuando acquisizioni in coincidenze doppie, triple e quadruple.

Coincidenza	Soglia (mV)
Doppia	30
Tripla	50
Quadrupla	70

La scelta della soglia è stata effettuata osservando il segnale in uscita dalla coincidenza sull'oscilloscopio, di cui vengono riportate alcune immagini.



Coincidenza	Rate (Hz)
1 3	$0,12 \pm 0,03$
1 5	$0,15 \pm 0,04$
2 4	$0,15 \pm 0,04$
3 4	$0,16 \pm 0,04$
2 3	$0,10 \pm 0,03$
1 2 3	$0,20 \pm 0,04$
2 3 4	$0,17 \pm 0,04$
1 3 4	$0,17 \pm 0,04$
2 3 4 5	$0,100 \pm 0,002$

Si osserva che i rate di doppie e triple sono confrontabili e sono molto minori delle singole, come atteso. Il rate di quadruple sembra essere troppo simile a quello delle triple e troppo lontano da quello delle quintuple successivamente misurato ( $\approx 0,02$  Hz). Come verrà specificato in seguito, ciò potrebbe essere dovuto alla soglia inadeguata del modulo di coincidenza, che può aver determinato l'inclusione di coincidenze triple nei conteggi.

## Tempo morto

Per valutare il tempo morto del sistema di acquisizione del calcolatore, si confronta il numero di eventi acquisiti in un intervallo di tempo con quelli rilevati nello stesso intervallo dall'elettronica.

Per effettuare i calcoli si suppone che il sistema di acquisizione del calcolatore sia non paralizzabile, che gli eventi si distribuiscano casualmente nel tempo e che il tempo morto dell'elettronica sia trascurabile.

La formula utilizzata per calcolare il tempo morto è, quindi:

$$T_{morts} = \frac{R_{elet} - R_{calc}}{R_{elet} * R_{calc}}$$

dove  $R_{elet, calc}$  sono i rate misurati per i due sistemi di acquisizione.

Le acquisizioni sono state effettuate in configurazione di singola.

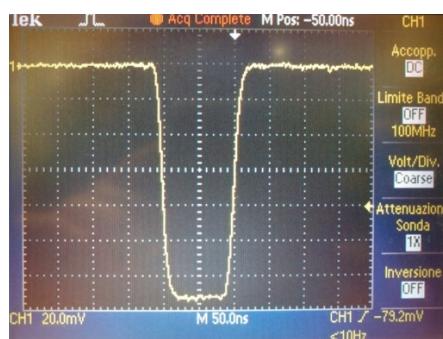
# eventi calcolatore	# eventi elettronica	Tempo acquisizione (ms)	Rate calcolatore (Hz)	Rate elettronica (Hz)	Tempo morto (s)
2000	7215	53029±200	37,7±0,1	136,1±0,5	0,0192±0,0002
2000	7529	55690±200	35,9±0,1	135,2±0,5	0,0204±0,0002
2000	7400	55738±200	35,9±0,1	132,8±0,5	0,0203±0,0002

Per il calcolo degli errori, si è considerato un errore di 200 ms sul tempo di acquisizione dato dal tempo di risposta degli operatori.

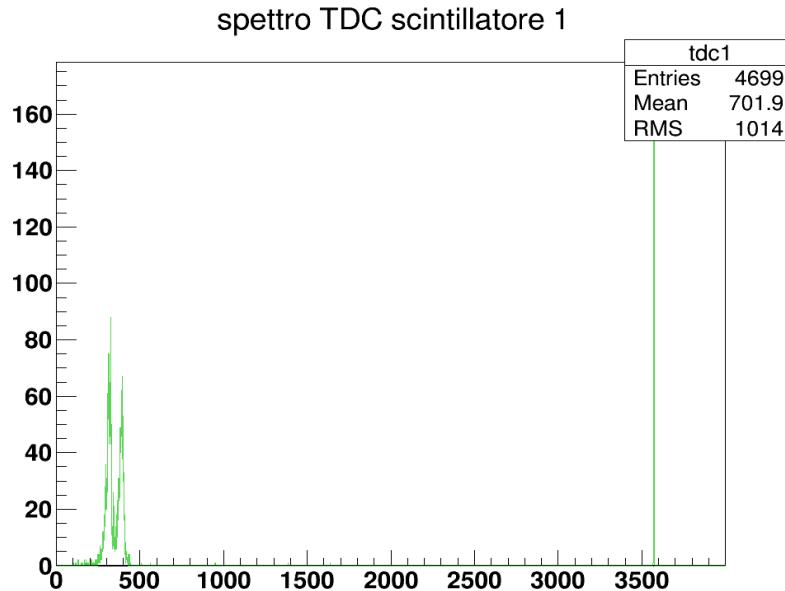
Il valore medio del tempo morto è  $(0,0200\pm0,0006)$  s, dove l'errore è dato dalla semidisersione dei valori trovati.

## Coincidenza quintupla

Inizialmente si è effettuata un'acquisizione in coincidenza quintupla impostando la soglia a 95 mV. Osservando lo spettro del TDC si è notata la presenza di un numero eccessivo di eventi a fondo corsa, dovuti al fatto che la soglia impostata non era sufficiente a tagliare le quadruple. Tale inconveniente è probabilmente dovuto alla diversa risposta dell'oscilloscopio rispetto all'elettronica di acquisizione.



Effettuando una nuova acquisizione con soglia 120 mV, si osservano nuovamente problemi relativi al rilevamento delle quadruple. Infatti nello spettro del TDC compaiono due picchi. Ciò è dovuto al fatto che la soglia scelta si trova in corrispondenza dell'ampiezza tipica del segnale di quadrupla, la quale aumenta leggermente nella durata dell'impulso. Perciò lo start, in alcuni eventi, risulta ritardato, in quanto scatta solo quando il segnale di quadrupla supera la soglia.



Effettuando un'ulteriore misura con una soglia di 130 mV, si ottiene uno spettro di sole quintupole. Non sono più presenti infatti le anomalie riscontrate in precedenza.

In questa configurazione il rate di eventi è di  $(0,022 \pm 0,002)$  Hz, a differenza di quello riscontrato con soglie inferiori, di circa 0,06 Hz.

Scartando gli eventi con almeno uno dei conteggi di TDC a fine corsa si osserva una buona compatibilità tra le posizioni del muro dello spettro del TDC nelle diverse acquisizioni. L'analisi dei dati viene quindi svolta utilizzando solo gli eventi di quintupla per ogni acquisizione.

## Analisi dati

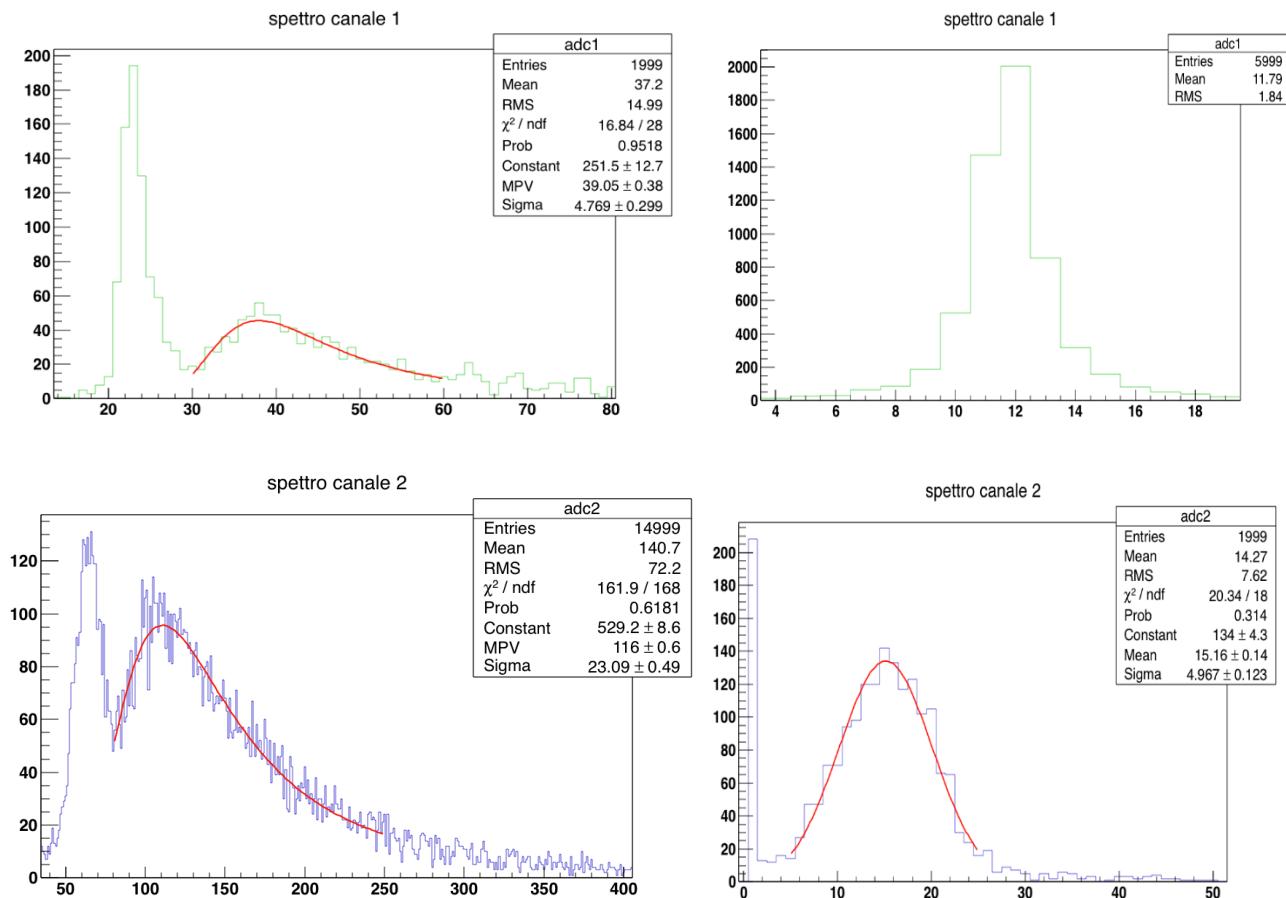
Per svolgere tutte le operazioni necessarie all'analisi dati, è stato usato il programma in ROOT allegato in appendice.

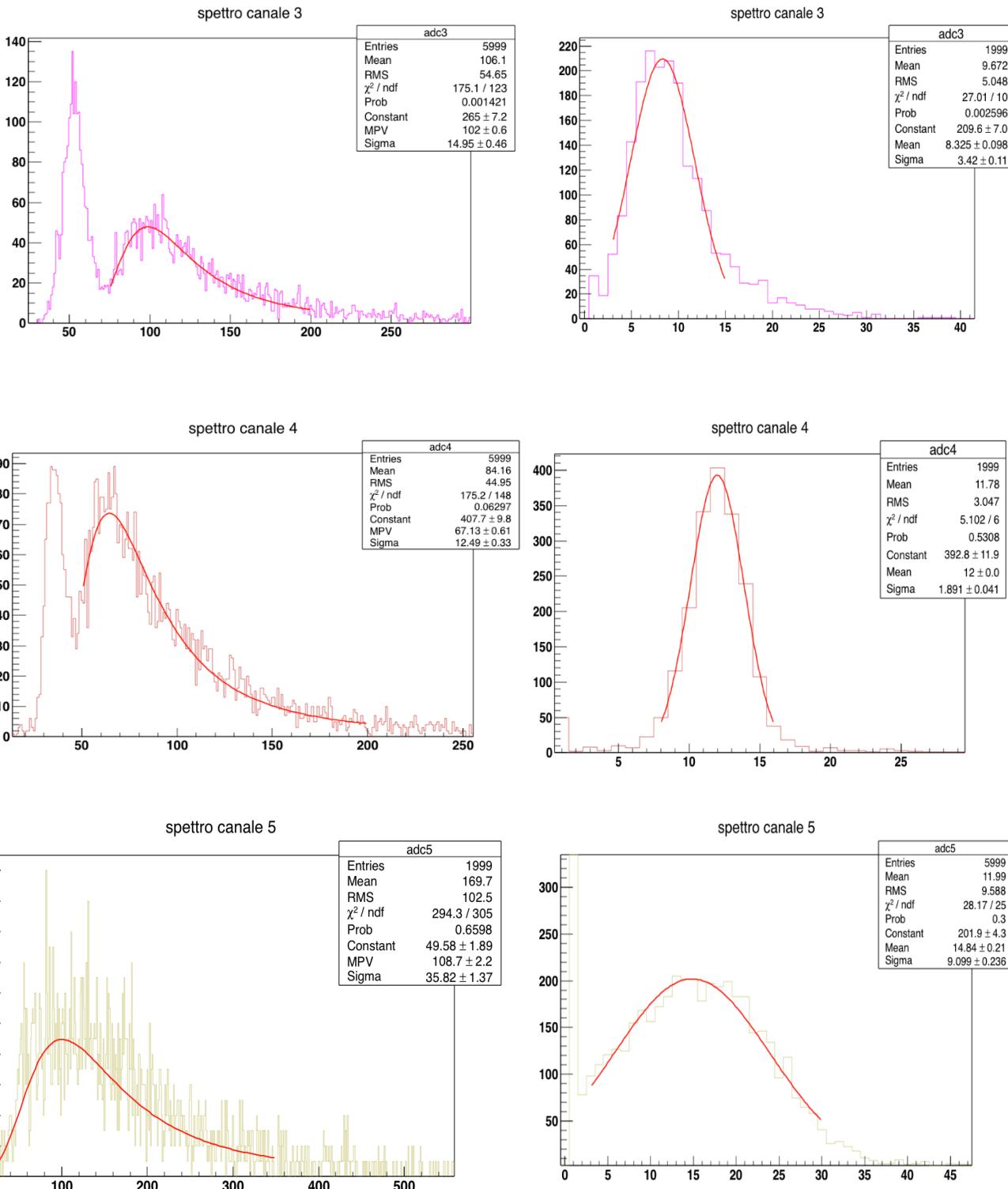
### Analisi degli spettri di singola particella

Nella fase di analisi si effettua un fit delle curve di singola particella con una distribuzione di Landau e si assume il suo valore medio come corrispondente all'energia della particella per ciascun rivelatore. Inoltre si osserva la posizione del piedistallo dato dal rumore dell'elettronica effettuando, se necessario, un fit gaussiano.

Per il primo canale si è osservato che nei giorni successivi alla taratura il rate con la configurazione sopra riportata risultava eccessivo e nello spettro non era più possibile distinguere la curva della singola particella dal piedistallo. Ciò può essere dovuto all'aver effettuato la taratura subito dopo l'accensione del sistema, quando il guadagno dello scintillatore non aveva ancora raggiunto il suo valore massimo. Si è quindi definita una nuova configurazione con soglia 100 mV e tensione invariata.

Si riporta l'analisi degli spettri acquisiti.





In generale il test  $\chi^2$  effettuato da ROOT mostra una buona compatibilità dei dati sperimentali con le distribuzioni considerate.

Si riporta la tabella riassuntiva delle configurazioni di lavoro e dei risultati ottenuti dall'analisi per i vari rivelatori.

Rivelatore	Soglia (mV)	Tensione (V)	Valor medio Landau (ch)	Piedistallo (ch)	# <sub>max</sub> particelle rivelabili
1	100	1969	39±5	12±2	50
2	55	1990	116±23	15±5	17
3	130	1960	102±15	8±4	19
4	125	1990	67±12	12±2	30
5	30	2100	109±36	15±9	18

L'errore che viene associato al valor medio della distribuzione di Landau è la sua deviazione standard, mentre quello associato alla posizione del piedistallo viene scelto come la minima deviazione standard delle gaussiane utilizzate per i fit.

Il numero massimo di particelle rivelabili è calcolato come:

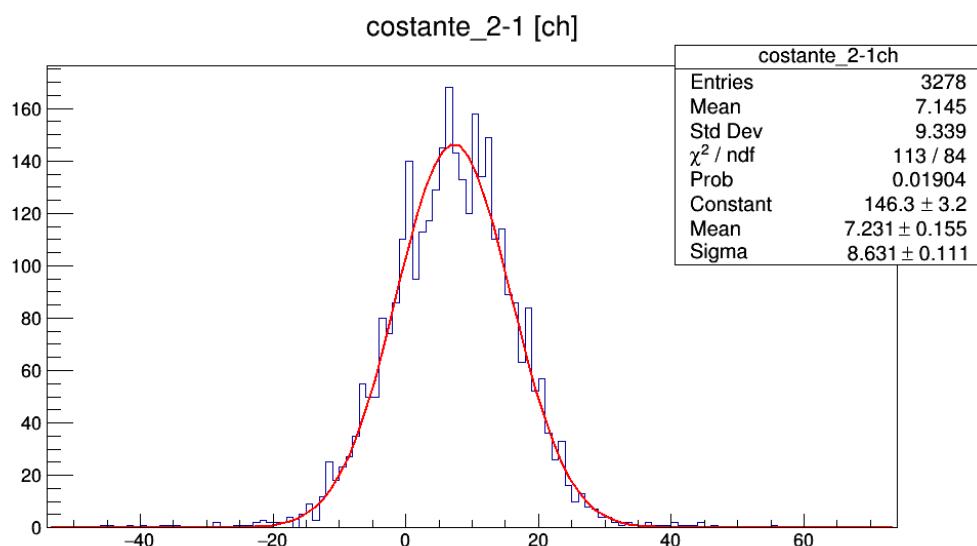
$$\#_{max} = \frac{2000 - p}{\mu_L}$$

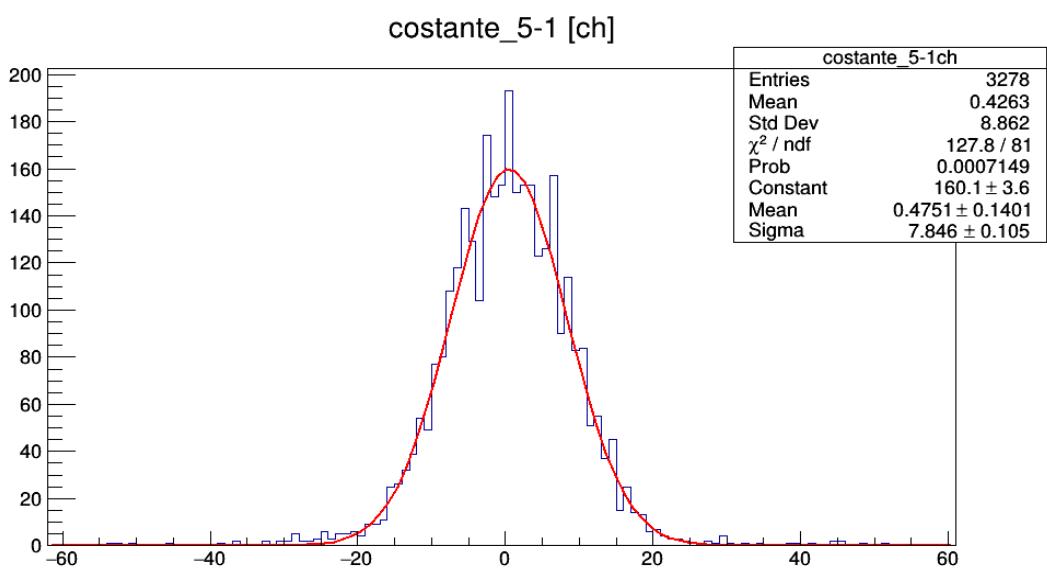
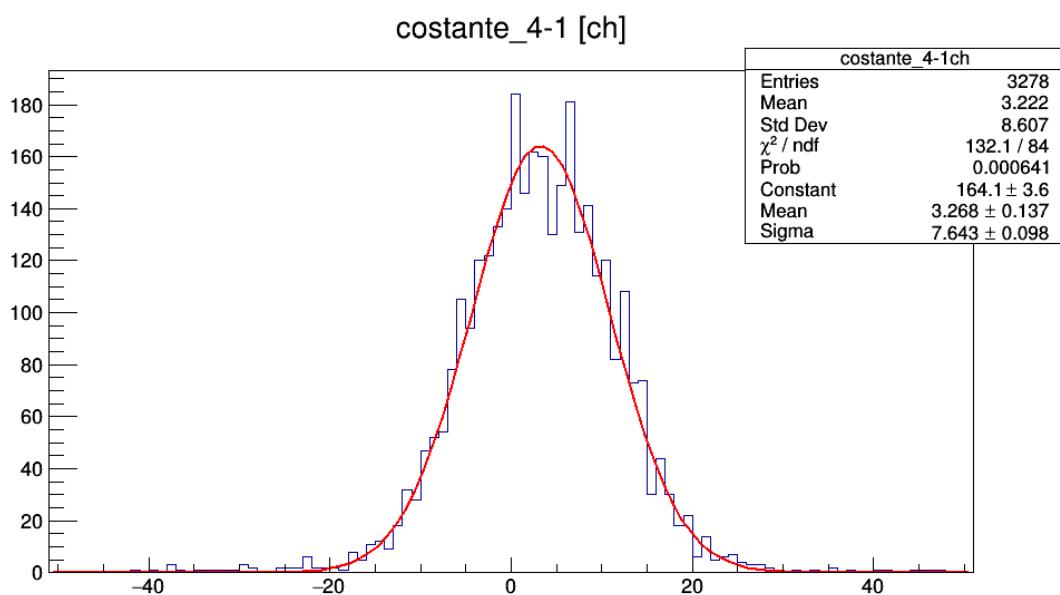
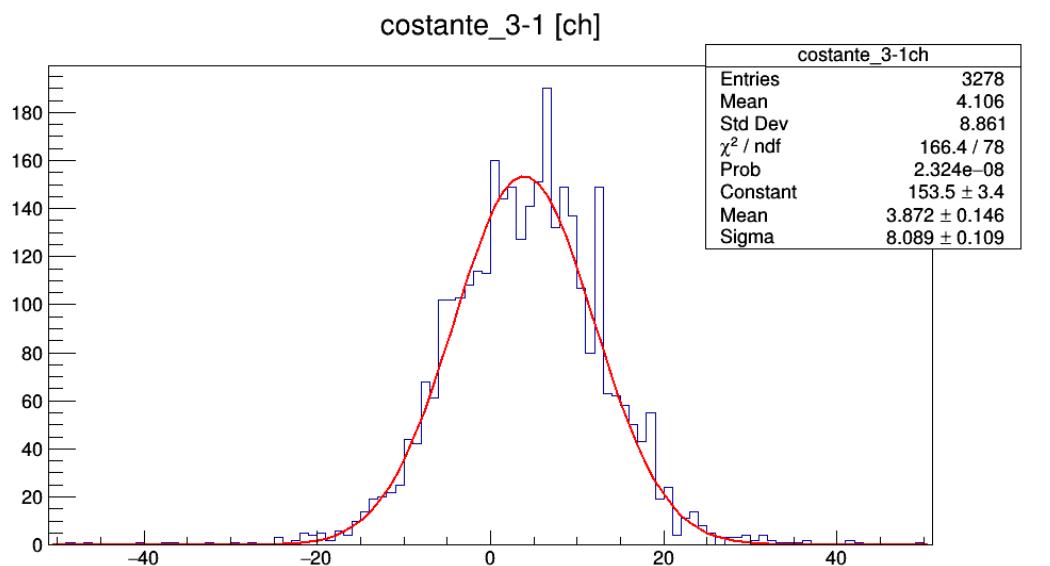
dove 2000 è il numero massimo di canali dell'ADC, p è il canale corrispondente al piedistallo e  $\mu_L$  è il valore medio della distribuzione di Landau associata alla singola particella.

### Correzione dei tempi del TDC

Si calcolano le differenze di tempo relative all'istante in cui uno stesso evento viene rivelato da scintillatori diversi. Si utilizza come istante di riferimento quello del rivelatore centrale (1). Per ogni rivelatore esterno viene inserita in un istogramma la differenza di tempo di arrivo di ogni evento con il centrale. Di tale istogramma si effettua un fit gaussiano e si assume il valore medio della distribuzione come il ritardo temporale di rivelazione, dal momento che ci si aspetterebbe che la gaussiana sia centrata in zero supponendo che i raggi cosmici siano isotropi in  $\varphi$ .

In questa fase si sono convertiti i valori in canali dello spettro del TDC in valori di tempo utilizzando il fattore di conversione precedentemente ottenuto.





Anche in questo caso il test  $\chi^2$  indica compatibilità dei dati con l'ipotesi di andamento gaussiano.

Differenza temporale	Valore medio (ns)	Sigma (ns)
$t_2 - t_1$	$7,2 \pm 0,2$	$8,6 \pm 0,1$
$t_3 - t_1$	$3,9 \pm 0,1$	$8,1 \pm 0,1$
$t_4 - t_1$	$3,3 \pm 0,1$	$7,6 \pm 0,1$
$t_5 - t_1$	$0,5 \pm 0,1$	$7,8 \pm 0,1$

Si osserva che per tutti i rivelatori è presente un ritardo rispetto al centrale, probabilmente dovuto a differenze relative all'elettronica di ciascuno di essi.

Nelle fasi successive dell'analisi i tempi del TDC verranno quindi corretti sottraendo loro il ritardo ottenuto.

### Distribuzione angolare dei raggi cosmici primari

Per ottenere la distribuzione angolare relativa alla direzione di arrivo dei raggi cosmici primari si ipotizza che il fronte dello sciame sia piano alla quota dei rivelatori e che possa essere quindi rappresentato dall'equazione:

$$Ax + By + Cz + D = 0$$

dove  $A = \sin \vartheta \cos \varphi$ ,  $B = \sin \vartheta \sin \varphi$ ,  $C = \cos \vartheta$  e  $A^2 + B^2 + C^2 = 1$

Si definisce come distanza di un punto dal piano  $d = |Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D|$ .

Evento per evento si trovano i coseni direttori A, B e C, da cui si ricavano le distribuzioni angolari in  $\theta$  e  $\varphi$ . È possibile calcolare A e B in funzione degli intervalli di tempo tra l'arrivo degli stop al TDC, mentre C si ottiene a partire dai risultati ottenuti per A e B.

La distanza tra due punti è

$$ct_{ij} = d_i - d_j$$

Si definiscono quindi i tempi di arrivo t utilizzando:

$$\begin{aligned} ct_{24} &= d_2 - d_4 = AL + BL \\ ct_{53} &= d_5 - d_3 = AL - BL \end{aligned}$$

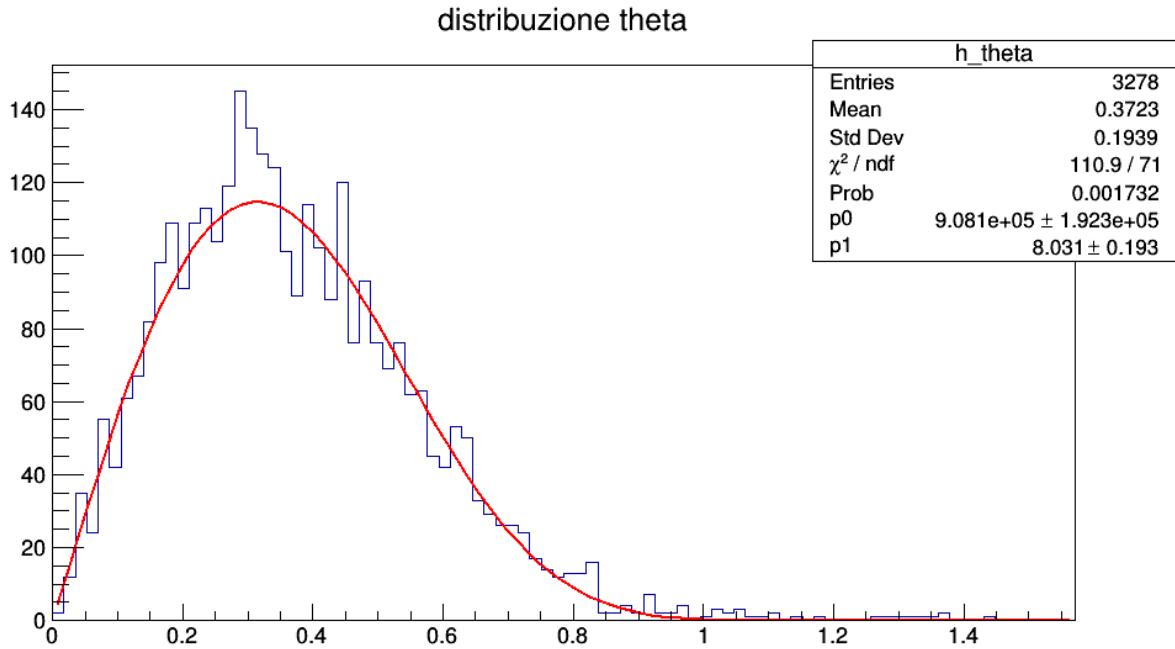
Da cui si ottiene:

$$\begin{aligned} A &= \frac{c}{2L}(t_{53} + t_{24}) \\ B &= \frac{c}{2L}(t_{24} - t_{53}) \\ C &= \sqrt{1 - A^2 - B^2} = \sqrt{1 - \frac{c^2}{4L^2}[(t_{53} + t_{24})^2 + (t_{24} - t_{53})^2]} \end{aligned}$$

Gli angoli  $\theta$  e  $\varphi$  si calcolano come:

$$\begin{aligned} \theta &= \cos^{-1} C \\ \varphi &= \tan^{-1} \frac{B}{A} \end{aligned}$$

Inserendo i valori di  $\theta$  e  $\varphi$  calcolati per ciascun evento nel relativo istogramma si ottengono i seguenti andamenti.



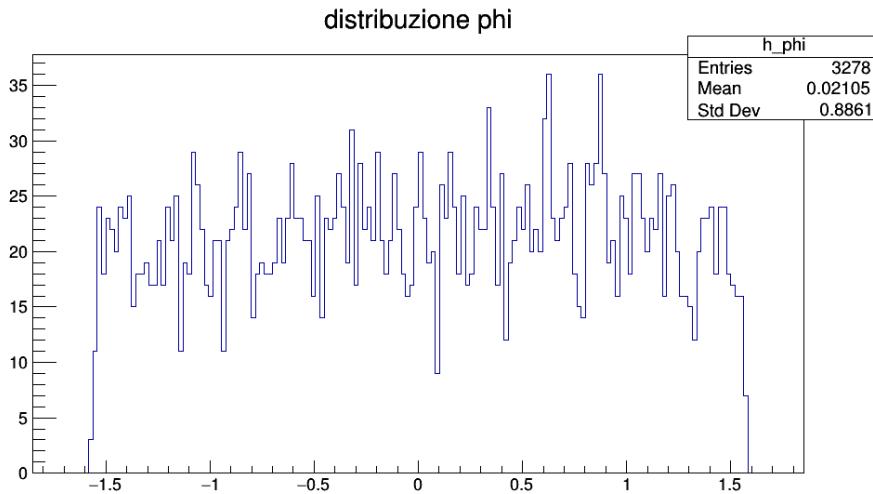
La distribuzione attesa per  $\theta$  è data dall'espressione:

$$y = p_0 \sin \vartheta \cos \vartheta e^{-\frac{p_1}{\cos \vartheta}}$$

dove  $p_0$  è una costante moltiplicativa e  $p_1 = x_0/\lambda$ , con  $x_0$  proiezione lungo la verticale della distanza percorsa e  $\lambda$  lunghezza di attenuazione.

Tale espressione considera gli effetti dovuti all'assorbimento dei raggi cosmici in atmosfera e la dipendenza dall'angolo solido del numero di eventi incidenti sulla superficie di arrivo.

Considerando il valore del  $\chi^2$  ottenuto è possibile affermare che l'andamento dei dati sperimentali è compatibile con la distribuzione attesa.



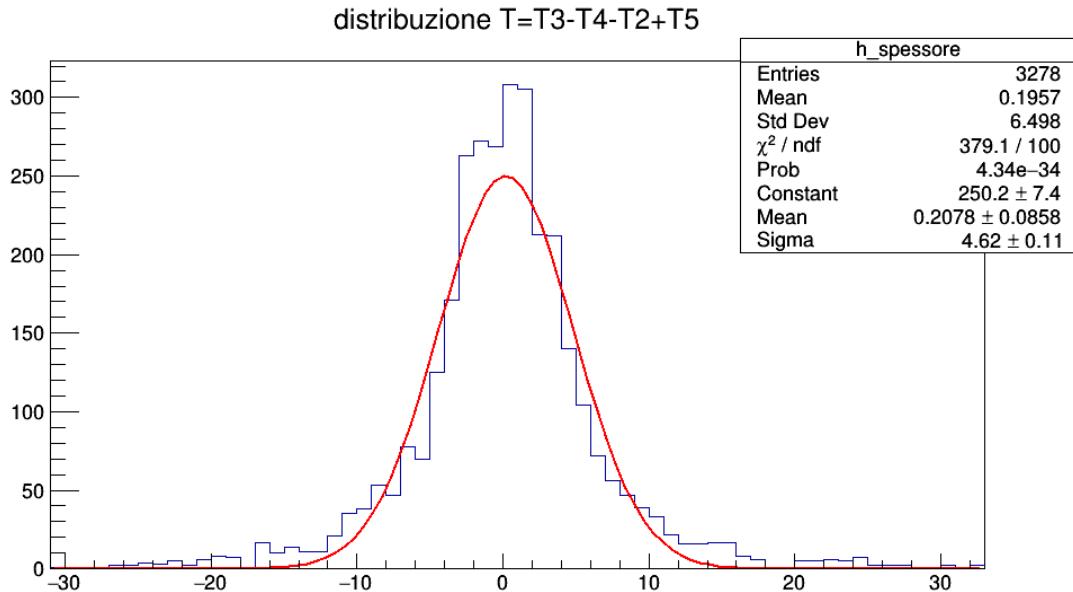
L'andamento dei dati sperimentali rispetta anche la distribuzione azimutale attesa dei raggi cosmici, ovvero una distribuzione uniforme.

## Spessore medio di uno sciame

È possibile calcolare lo spessore medio di uno sciame a partire dai tempi di arrivo degli eventi registrati dal TDC. Ipotizzando che il piano su cui si trova l'apparato sia un quadrato perfetto è possibile affermare che:

$$t_3 - t_4 = t_2 - t_5$$

Si definisce, quindi, la grandezza  $t = t_3 - t_4 - t_2 + t_5$ , che, se calcolata per ogni evento e inserita in un istogramma, ci si aspetta fornisca una gaussiana centrata in zero.



I dati sono compatibili con una distribuzione gaussiana, il cui valore medio ottenuto dal fit è  $(0.21 \pm 0.09)$  ns. La differenza tra questo risultato e il valore atteso è giustificabile considerando che le lunghezze dei lati dell'area su cui si trova l'apparato non sono uguali, infatti la distanza tra i rivelatori 2 e 5 e quella tra i rivelatori 3 e 4 differiscono di circa mezzo metro.

Lo spessore dello sciame dipende dalla deviazione standard di questa distribuzione, che deriva da quelle dei tempi di arrivo dell'evento a ciascun rivelatore:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{t_2}^2 + \sigma_{t_3}^2 + \sigma_{t_4}^2 + \sigma_{t_5}^2}$$

Supponendo che le deviazioni standard delle distribuzioni dei tempi di arrivo siano uguali:

$$\sigma = 2\sigma_{t_i}$$

Dal momento che ciascuna  $\sigma_{t_i}$  dipende dal tempo che in media impiega uno sciame ad attraversare un rivelatore, da essa si ricava il valore dello spessore medio dello sciame stesso:

$$\Delta s = \frac{c}{2}\sigma$$

Lo spessore medio ottenuto a partire dai dati sperimentali è  $(0.69 \pm 0.02)$  m, compatibile con il valore atteso dell'ordine del metro.

## Centro di gravità

Per verificare che il core dello sciame sia all'interno dell'array di rivelatori, è possibile calcolare il centro di gravità, i cui valori medi di x e y si ottengono dalle seguenti espressioni:

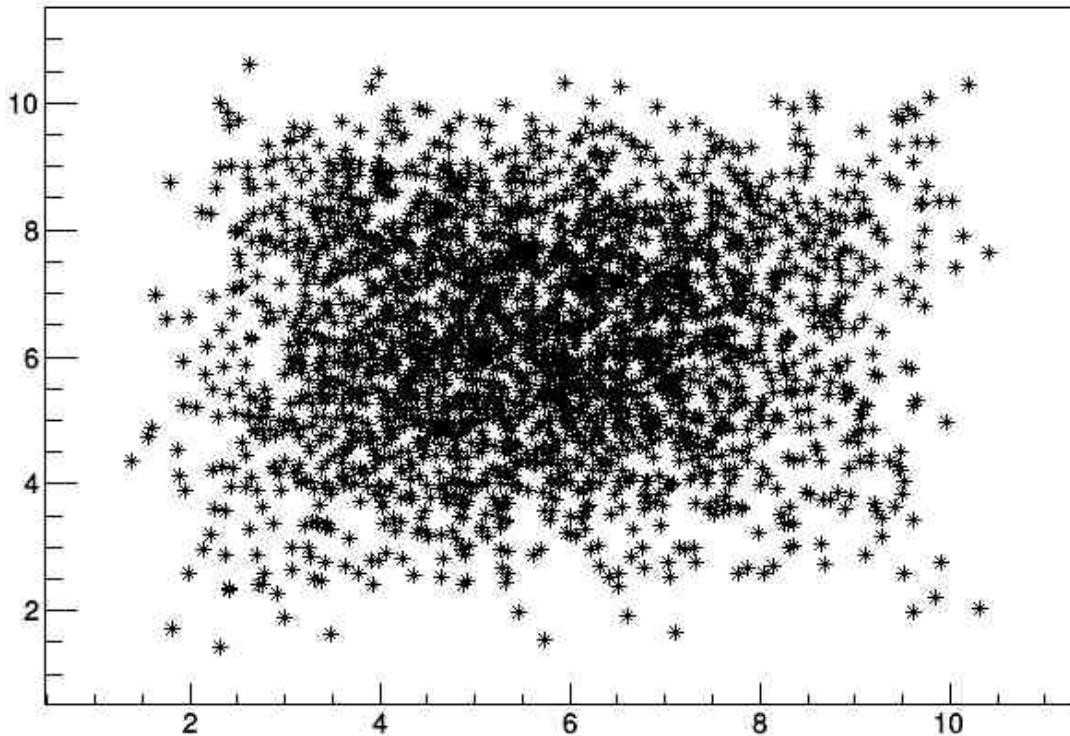
$$\hat{x} = \frac{\sum_i x_i n_i}{\sum_i n_i} \quad \hat{y} = \frac{\sum_i y_i n_i}{\sum_i n_i} \quad i = 1, \dots, 5$$

dove  $x_i$  e  $y_i$  sono le coordinate dei rivelatori e  $n_i$  le particelle rivelate per ciascun evento, mentre l'indice  $i$  è riferito al rivelatore.  $n_i$  viene calcolato a partire dal canale  $ch_{ADC}$  dello spettro dell'ADC corrispondente a ciascun evento:

$$n_i = \frac{ch_{ADC} - ch_{ped}}{ch_{part}}$$

dove  $ch_{ped}$  è il canale in cui si trova il piedistallo e  $ch_{part}$  quello corrispondente al valore medio della distribuzione di Landau che fornisce il valore in energia della singola particella per ciascun rivelatore.

Di seguito si riporta il grafico ottenuto dai punti calcolati.

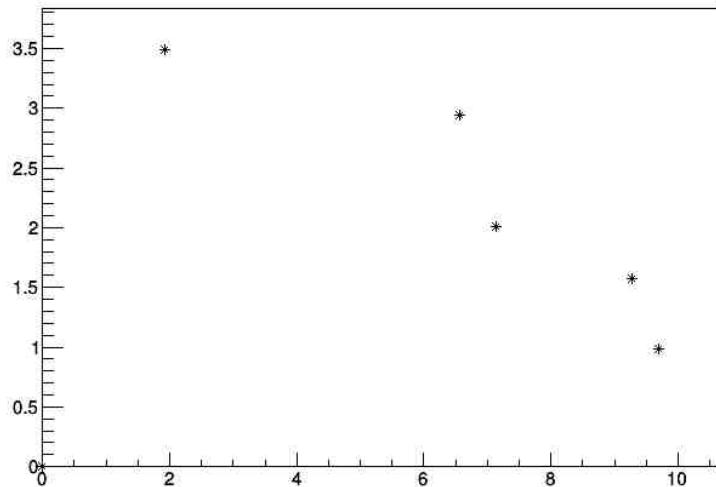


## Distribuzione laterale

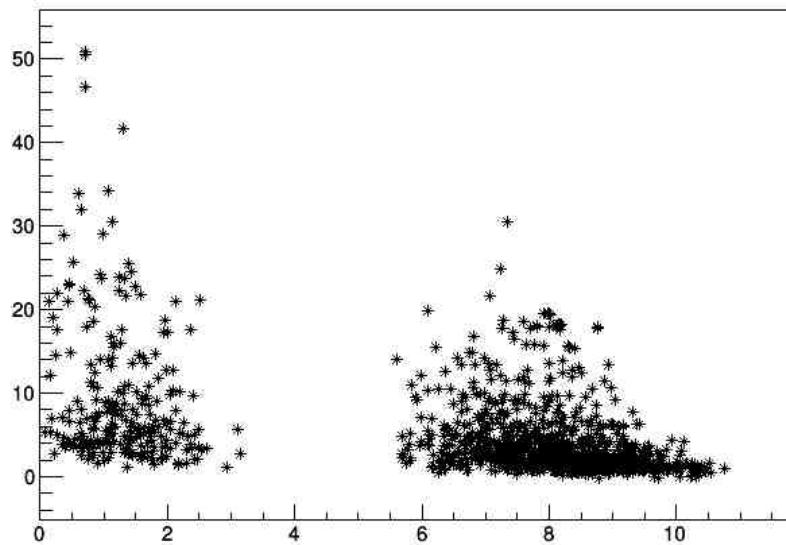
La distribuzione laterale dei raggi cosmici si ottiene rappresentando il numero di particelle rivelate in funzione della distanza degli scintillatori dal centro di gravità dell'evento.

Vengono selezionati soltanto gli eventi per i quali il rivelatore centrale rileva un maggior numero di particelle rispetto agli esterni, per assicurarsi che il centro di gravità si trovi all'interno della superficie dell'apparato.

Inizialmente si sceglie di rappresentare la distribuzione laterale per un singolo evento, che appare come nella seguente figura.



Può risultare interessante, inoltre, analizzare un grafico che includa tutti gli eventi rivelati, che si riporta di seguito.

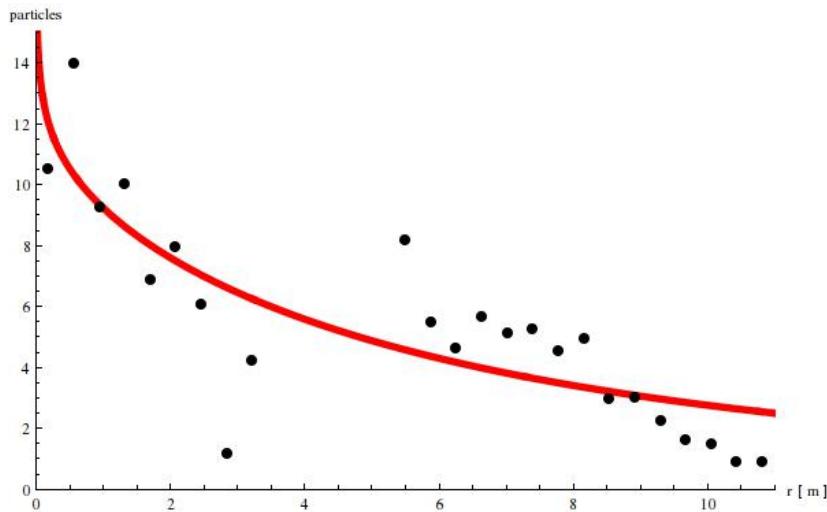


Dopodiché si è ritenuto opportuno dividere l'intero range delle distanze sulle ascisse in intervalli, assegnando a ciascuno di essi il numero di particelle dato dal valore medio dei punti compresi all'interno del bin.

Si riporta di seguito il grafico finale ottenuto con il fit con la distribuzione attesa data dalla legge:

$$\rho = \frac{k}{2\pi r_0^2} \left(\frac{r}{r_0}\right)^{s-2} \left(1 + \frac{r}{r_0}\right)^{s-4,5}$$

dove  $k$  è una costante moltiplicativa,  $r_0$  è il raggio massimo dello sciame e  $s$  corrisponde alla sua età.



I valori dei parametri ottenuti dal fit sono:

$$k = 8,18 \quad r_0 = 18,07 \text{ m} \quad s = 1,9$$

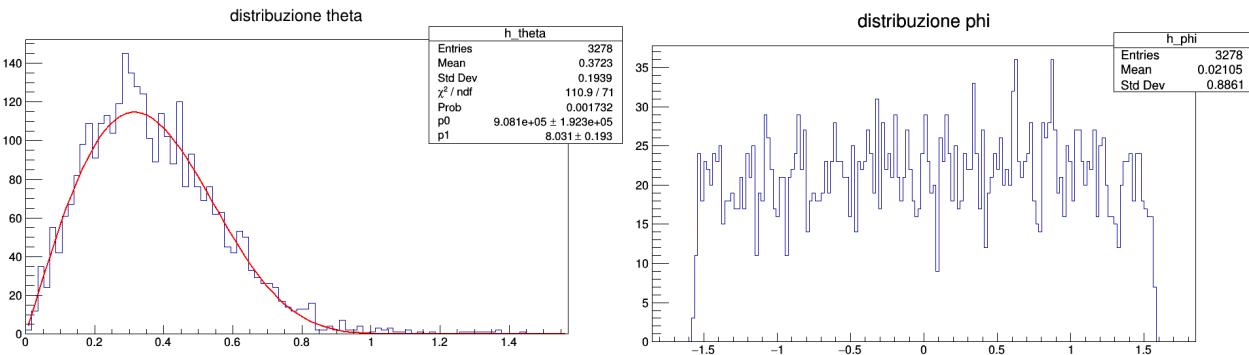
Nonostante le difficoltà nel definire errori appropriati per i vari punti e quindi quantificare la bontà del fit, si osserva che la curva riproduce abbastanza bene i dati sperimentali.

## Conclusioni

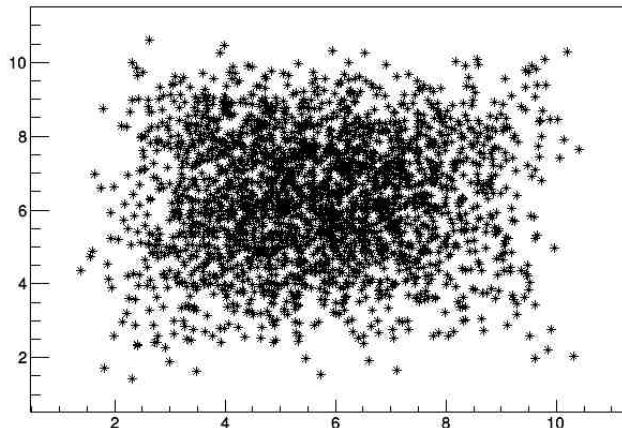
In quest'esperienza si è calibrato il sistema per definire le condizioni di lavoro dell'apparato sperimentale, fissando la tensione fornita ai fotomoltiplicatori e le soglie dei discriminatori per ciascuno degli scintillatori e per le coincidenze.

Si è sviluppato un programma in ROOT per l'analisi dei dati sperimentalni che ha fornito i seguenti risultati:

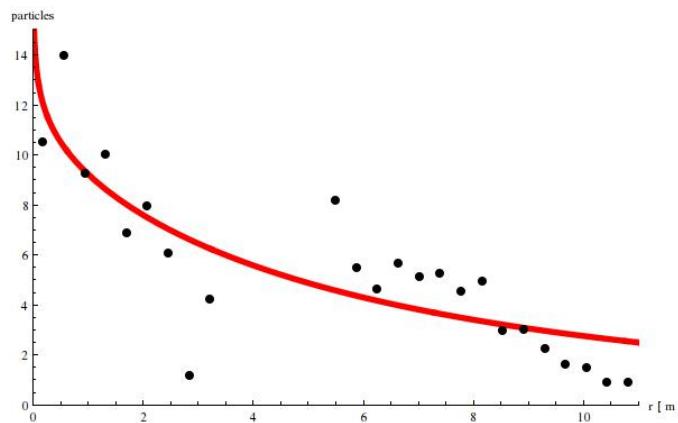
- verifica dell'andamento previsto per le distribuzioni zenithale e azimutale dei raggi cosmici primari



- calcolo dello spessore medio di uno sciame, corrispondente a  $(0.69 \pm 0.02)$  m
- determinazione del centro di gravità per ogni evento



- verifica dell'andamento della distribuzione laterale dei raggi cosmici



```
//  
// Semplice macro root per leggere i files ADC.dat e TDC.dat  
// e creare alcuni istogrammi con root  
//  
// usage:  
// >root  
// root[0] .x analisi_template2.C  
  
#include "TMath.h"  
#include "TF1.h"  
#include "TMath.h"  
#include "TGraph.h"  
#include "TH1D.h"  
#include "TFile.h"  
#include "Riostream.h"  
#include "TObject.h"  
#include <vector>  
#include "TCanvas.h"  
#include "TROOT.h"  
  
using namespace std;  
  
//funzione viene utilizzata per effettuare il fit della distribuzione angolare  
  
Double_t funzione(Double_t*x, Double_t*par){  
    return par[0]*TMath::Sin(2*x[0])*TMath::Exp(-par[1]/TMath::Cos(x[0]));  
}  
  
//  
  
//inzio dell'analisi dati  
  
void analisi_template2_v3(){  
    gROOT->Reset();  
  
    string file_adc="ADC_tutti.dat";  
    string file_tdc="TDC_tutti.dat";  
  
    Int_t counter = 0;  
    Double_t Fconv = 0.24; //fattore di conversione canale TDC -> ns  
  
    Double_t c = 0.3; //velocita' della luce in m/ns  
  
    Double_t l = 11.64; //distanza media tra gli scintillatori in m  
  
    Double_t adc_peds[5]={12.,15.,8.,12.,15.}; //posizioni dei piedistalli in canali per ogni rivelatore  
    Double_t adc_mu[5]={39.,116.,102.,67.,109.}; //centroidi delle Landau in canali per la singola di ogni  
    //rivelatore  
  
    //coordinate dei rivelatori  
  
    Double_t x[5]={l/2., l,l,0,0};  
    Double_t y[5]={l/2.,l,0,0,l};  
  
    //coordinate dei centri di gravita'  
  
    Double_t xb=0;  
    Double_t yb=0;  
    Double_t nTot=0;  
  
    //importa da file tdc e adc  
  
    ifstream in1 (file_tdc.c_str());  
    ifstream in2 (file_adc.c_str());  
  
    //crea file root output
```

```

TFile *out=new TFile("out_file.root","recreate");

//crea istogrammi spettri adc e tdc

TH1D *h_adc1 = new TH1D ("h_adc1","adc1",2500,-300,2200);
TH1D *h_adc2 = new TH1D ("h_adc2","adc2",2500,-300,2200);
TH1D *h_adc3 = new TH1D ("h_adc3","adc3",2500,-300,2200);
TH1D *h_adc4 = new TH1D ("h_adc4","adc4",2500,-300,2200);
TH1D *h_adc5 = new TH1D ("h_adc5","adc5",2500,-300,2200);
TH1D *h_adc6 = new TH1D ("h_adc6","adc6",2500,-300,2200);

TH1D *h_tdc1 = new TH1D ("h_tdc1","tdc1",5000,0,5000);
TH1D *h_tdc2 = new TH1D ("h_tdc2","tdc2",5000,0,5000);
TH1D *h_tdc3 = new TH1D ("h_tdc3","tdc3",5000,0,5000);
TH1D *h_tdc4 = new TH1D ("h_tdc4","tdc4",5000,0,5000);
TH1D *h_tdc5 = new TH1D ("h_tdc5","tdc5",5000,0,5000);
TH1D *h_tdc6 = new TH1D ("h_tdc6","tdc6",5000,0,5000);

//crea istogrammi per la correzione del tdc

TH1D *R2ch = new TH1D ("costante_2-1ch","costante_2-1 [ch]",600,-300,300);
TH1D *R3ch = new TH1D ("costante_3-1ch","costante_3-1 [ch]",600,-300,300);
TH1D *R4ch = new TH1D ("costante_4-1ch","costante_4-1 [ch]",600,-300,300);
TH1D *R5ch = new TH1D ("costante_5-1ch","costante_5-1 [ch]",600,-300,300);

//crea istogrammi distribuzioni angolari

TH1D *h_theta = new TH1D ("h_theta","distribuzione theta",90,0,TMath::Pi()/2);
TH1D *h_phi = new TH1D ("h_phi","distribuzione phi",180,TMath::Pi()/2,TMath::Pi()/2);

//crea istogramma per il calcolo dello spessore

TH1D *h_spessore = new TH1D ("h_spessore","distribuzione T=T3-T4-T2+T5",600,-300,300);

//crea grafico centro di gravita'

TGraph* cg = new TGraph();

Int_t Nev, time2, tdc1, tdc2, tdc3, tdc4, tdc5, tdc6;
Int_t Nev_adc, adc1, adc2, adc3, adc4, adc5, adc6;

//vettori contenenti i valori di adc e tdc

vector <Double_t> tdc[5];
vector <Double_t> ADC[5];

//vettore per la distribuzione laterale

vector <Double_t> coorlat[2];

//array del numero di particelle per ogni rivelatore

Double_t n[5];

//loop lettura files

while (1) {

    in1 >> Nev >> time2 >> tdc1 >> tdc2 >> tdc3 >> tdc4 >> tdc5 >> tdc6;
    in2 >> Nev_adc >> adc1 >> adc2 >> adc3 >> adc4 >> adc5 >> adc6;

    if (in1.eof() || in2.eof() ) break;

    if (tdc1 < 2000 && tdc2 < 2000 && tdc3 < 2000 && tdc4 < 2000 && tdc5 < 2000
        && adc1>2 && adc2>2 && adc3>2 && adc4>2 && adc5>2 ) { // cuts!!!!!
        //riempie istogrammi

        h_adc1->Fill(adc1);
        h_adc2->Fill(adc2);
}

```

```

h_adc3->Filladc3);
h_adc4->Filladc4);
h_adc5->Filladc5);
h_adc6->Filladc6);

h_tdc1->Filttdc1);
h_tdc2->Filttdc2);
h_tdc3->Filttdc3);
h_tdc4->Filttdc4);
h_tdc5->Filttdc5);
h_tdc6->Filttdc6);

//riempie dei vettori con i valori TDC e ADC

tdc[0].push_back(tdc1*Fconv);
tdc[1].push_back(tdc2*Fconv);
tdc[2].push_back(tdc3*Fconv);
tdc[3].push_back(tdc4*Fconv);
tdc[4].push_back(tdc5*Fconv);

if (adc1 < 2000 && adc2 < 2000 && adc3 < 2000 && adc4 < 2000 && adc5 < 2000){ //cuts!!!!!
    ADC[0].push_backadc1);
    ADC[1].push_backadc2);
    ADC[2].push_backadc3);
    ADC[3].push_backadc4);
    ADC[4].push_backadc5);

}

//riempie gli istogrammi per la correzione del tdc

R2ch -> Fill((tdc2 - tdc1)*Fconv);
R3ch -> Fill((tdc3 - tdc1)*Fconv);
R4ch -> Fill((tdc4 - tdc1)*Fconv);
R5ch -> Fill((tdc5 - tdc1)*Fconv);

}

}

//Fit gaussiani per la correzione del tdc

Double_t mean2[3];
Double_t mean3[3];
Double_t mean4[3];
Double_t mean5[3];
Double_t meant[3];

TF1* gaussch = new TF1("gausch", "gaus", -200, 200);
R2ch->Fit("gausch", "MER");
R2ch->Draw();
gaussch->GetParameters(&mean2[0]);

R3ch->Fit("gausch", "MER");
R3ch->Draw();
gaussch->GetParameters(&mean3[0]);

R4ch->Fit("gausch", "MER");
R4ch->Draw();
gaussch->GetParameters(&mean4[0]);

R5ch->Fit("gausch", "MER");
R5ch->Draw();
gaussch->GetParameters(&mean5[0]);



Int_t test = 0;

for(UInt_t i=0; i<tdc[0].size(); i++){

```

```

//sottrae il ritardo dato dal valor medio delle gaussiane agli elementi dei vector del tdc

tdc[1][i]-=mean2[1];
tdc[2][i]-=mean3[1];
tdc[3][i]-=mean4[1];
tdc[4][i]-=mean5[1];

//calcola gli intervalli di tempo tra l'arrivo degli stop

Double_t t24 = tdc[1][i] - tdc[3][i];
Double_t t53 = tdc[4][i] - tdc[2][i];

//calcola theta e phi

Double_t theta = TMath::ACos(TMath::Sqrt(1-(c*c/(4*l*l))*((t53+t24)*(t53+t24)+(t24-t53)*(t24-t53))));
Double_t phi = TMath::ATan((t24-t53)/(t24+t53));

//riempie gli istogrammi di theta e phi

h_theta -> Fill(theta);
h_phi -> Fill(phi);

//calcola la distribuzione di T=T3-T4-T2+T5

Double_t t = tdc[2][i]-tdc[3][i]-tdc[1][i]+tdc[4][i];

//riempie l'istogramma per il calcolo dello spessore

h_spessore -> Fill(t);

//calcola il centro di gravita' per ogni evento

for(Int_t j=0; j<5; j++){
    n[j] = ADC[j][i];
    n[j]=(n[j]-adc_peds[j])/adc_mu[j]; //numero di particelle rivelate

    xb+=n[j]*x[j];
    yb+=n[j]*y[j];
    nTot=nTot+n[j];
}

//coordinate del centro gravita'

xb=xb/nTot;
yb=yb/nTot;

//considera gli eventi per cui il rivelatore centrale ha contato piu' particelle

if(n[0]>n[1] && n[0]>n[2] && n[0]>n[3] && n[0]>n[4]){
    //calcola i punti della distribuzione laterale

    for(Int_t k=0; k<5; k++){
        Double_t r = TMath::Sqrt((xb-x[k])*(xb-x[k])+(yb-y[k])*(yb-y[k]));
        coorlat[0].push_back(r);
        coorlat[1].push_back(n[k]);
    }
}
nTot = 0;
}

```

```
//calcola la media dei punti della distribuzione laterale in un intervallo di distanze
Int_t nbin = 30; //numero di intervalli in cui e' divisa la distanza totale

for(Int_t m=0; m<nbin; m++){
    Double_t npart = 0;
    Int_t count = 0;

    for(UInt_t s=0; s<coorlat[0].size(); s++){
        if(coorlat[0][s]>=m*l/nbin && coorlat[0][s]<(m+1)*l/nbin){
            npart += coorlat[1][s];
            count++;
        }
    }

    Double_t xl = (m+0.5)*l/nbin;
    Double_t yl = npart/count;

    cout<<endl<<endl<<"Le coordinate del punto "<<test<<" sono: ("<<xl<<" , "<<yl<<")";
    if(yl>0){
        test++;
        laterale->SetPoint(test,xl,yl);
    }
}

//fit della distribuzione angolare di theta
TF1* disttheta = new TF1("disTheta", funzione, 0, 1.7, 2);
h_theta->Fit("disTheta","MER");

//fit gaussiano per il calcolo dello spessore
TF1* gausst = new TF1("gaust","gaus",-200,200);
h_spessore->Fit("gaust","MER");
h_spessore->Draw();
gausst->GetParameters(&meant[0]);

//calcola lo spessore dello sciame
Double_t spessore = (c/2)*meant[2];

cout<<endl<<endl<<"Lo spessore di uno sciame in media e': "<<spessore<<endl<<endl;

//salva gli istogrammi nel file root di output
R2ch -> Write();
R3ch -> Write();
R4ch -> Write();
R5ch -> Write();

h_adc1->Write();
h_adc2->Write();
h_adc3->Write();
h_adc4->Write();
h_adc5->Write();
h_adc6->Write();

h_tdc1->Write();
h_tdc2->Write();
h_tdc3->Write();
h_tdc4->Write();
h_tdc5->Write();
h_tdc6->Write();
```

```
h_theta->Write();
h_phi->Write();
cg->Draw("A*");
h_spessore->Write();
//chiude il file root di output
out->Close();
}
```