



Misure di EAS mediante l'apparato a sciame del Laboratorio Raggi cosmici del Dipartimento di Fisica

Tesi di Laurea: Nicola Costantino
19 Ottobre 2018

Relatore: Prof. Mario Edoardo Bertaina

Correlatore: Dott. Matteo Battisti

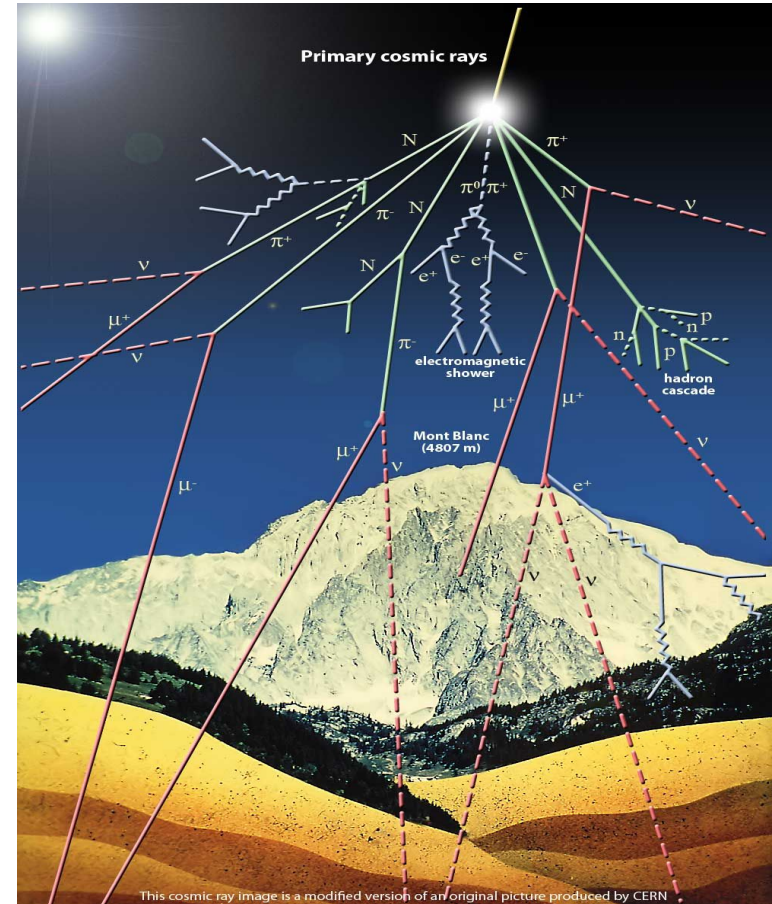
Obiettivo della tesi

Mediante l'utilizzo dell'apparato EAS (sciame atmosferici estesi) posizionato sul tetto del Dipartimento di Fisica e presso il Laboratorio Raggi Cosmici, studiare:

- la direzione di arrivo dei raggi cosmici;
- il loro flusso;
- la componente carica di superficie e quella penetrante;
- la variazione di conteggi in doppia in occasione di variazioni del Campo Elettrico dovute ad eventi atmosferici.

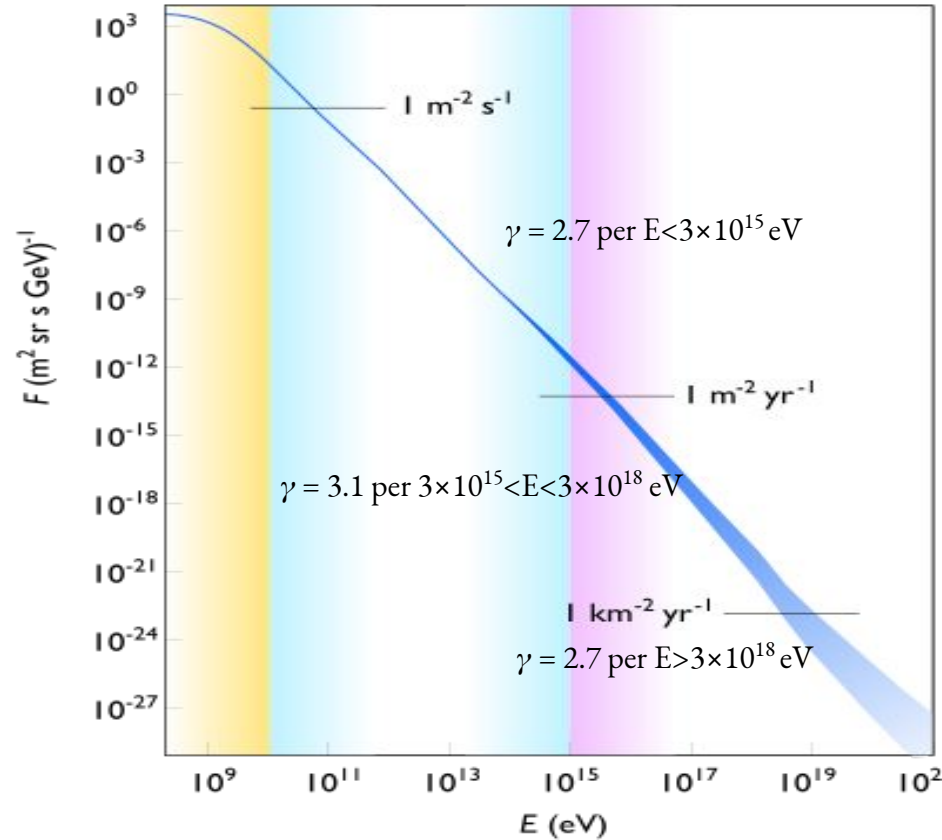
Raggi Cosmici: Cosa sono e da dove provengono

- Particelle cariche ad alta energia, quali protoni, nuclei atomici stabili ed elettroni.
- Spettro di energia da circa 10^9 eV a 10^{20} eV.
- Natura sia galattica che extragalattica.
- Particelle primarie: principalmente protoni seguiti da elettroni, nuclei atomici, raggi gamma.
- Particelle secondarie: dalla interazione fra particelle primarie e molecole dell'atmosfera si forma uno sciame di nuove particelle composte principalmente di elettroni, muoni (μ), mesoni (π , K), fotoni e neutrini.



Spettro energetico differenziale

- Nel grafico viene evidenziato lo spettro energetico differenziale caratteristico dei raggi cosmici (flusso dei raggi cosmici in funzione dell'energia) che, con una origine extrasolare, impattano con l'atmosfera terrestre e poi con la Terra.
- Lo spettro diminuisce rapidamente all'aumentare dell'energia secondo la legge del tipo: $dN/dE \propto E^{-\gamma}$.
- Sono evidenti i due punti in cui si verifica un importante cambiamento della pendenza: Ginocchio ($E \sim 3 \times 10^{15}$ eV; 1 particella $m^{-2}yr^{-1}$) e Caviglia ($E \sim 3 \times 10^{18}$ eV; 1 particella $km^{-2}yr^{-1}$).



Raggi Cosmici: Rivelazione

- Cinque rivelatori a scintillazione posti sul tetto del Dipartimento di Fisica.
- Tre rivelatori a scintillazione posizionati al quarto piano nel Laboratorio Raggi Cosmici.

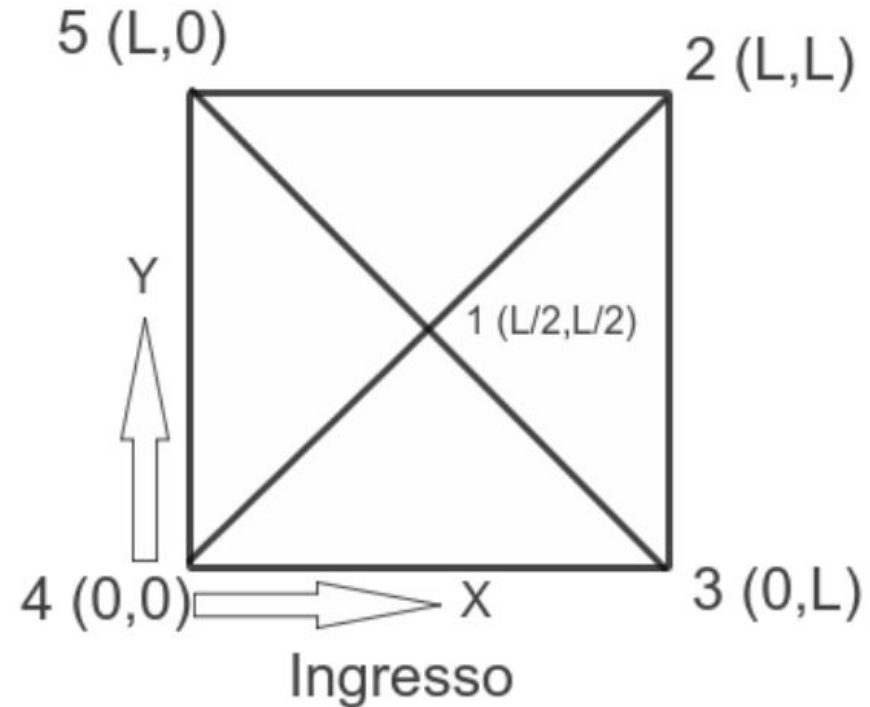
Struttura del rivelatore a scintillazione:

- Scintillatore
- Guida di luce
- Fotomoltiplicatore



Raggi Cosmici: Rivelazione

- I 5 Rivelatori (stazioni) di cariche sono disposti sul tetto di Fisica al centro e ai vertici di un quadrato di lato $L = 12$ m.
- I Rivelatori sono numerati da 1 a 5 ed inseriti in un sistema di riferimento in cui l'origine coincide con il rivelatore numero 4.
- Ognuno dei rivelatori è costituito da uno scintillatore, da un fotomoltiplicatore e da una guida di luce in grado di convogliare la più grande quantità di luce possibile prodotta dallo scintillatore.
- I fotomoltiplicatori sono alimentati ad una tensione di circa 2000 V.



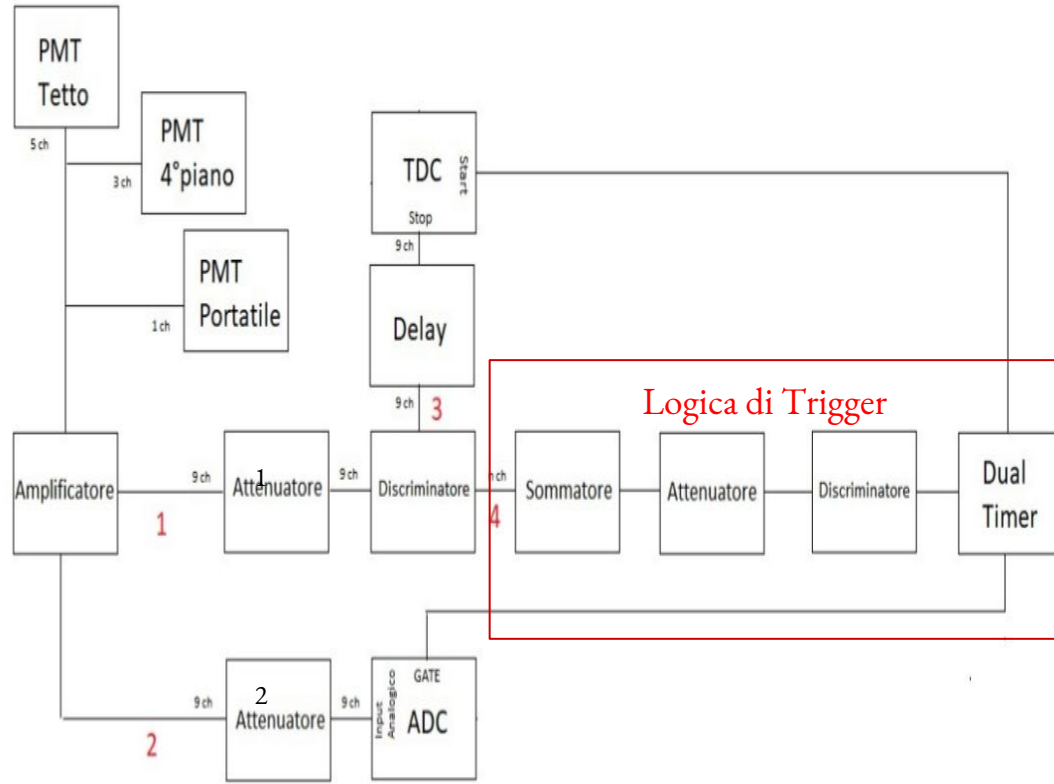
Raggi Cosmici: Rivelazione

- Vista di un contenitore in acciaio di un rivelatore posizionato sul tetto e del relativo fotomoltiplicatore montato sulla sommità dello scintillatore.
- Vista dei tre rivelatori posizionati nel Laboratorio Raggi Cosmici.
- Al lato dei 3 rivelatori è posizionata l'elettronica di acquisizione (moduli CAMAC, NIM, VME) collegata ad un computer per il processamento dei dati.



Catena elettronica

- La logica di trigger consente di salvare un segnale quando una o più stazioni vengono colpite contemporaneamente.
- I segnali provenienti dai rivelatori vengono inviati ad un Amplificatore con doppia uscita.
- Una delle due uscite (2) fornisce il segnale di input all'ADC (Analog to Digital Converter).
- La seconda uscita (1) viene discriminata e sdoppiata.
- Dal discriminatore un segnale ritardato viene inviato (3) allo stop del TDC (Time to Digital Converter). L'altra uscita (4) fornisce il segnale per la logica di trigger.



Misura di singola particella con ADC (Analog to Digital Converter)

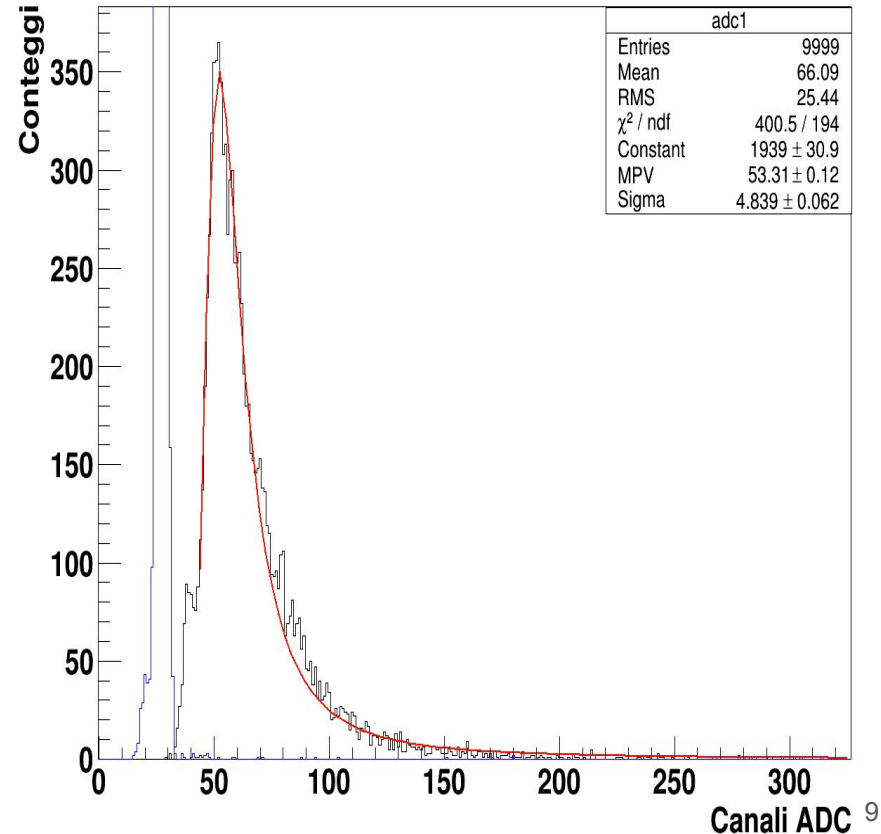
- Viene eseguita per potere distinguere e quindi separare il rumore elettronico, detto pedestal, dal segnale vero e proprio ottenuto dagli eventi registrati da ogni singolo rivelatore.
- Lo scopo delle misure in singola è quello di eseguire la taratura delle otto stazioni per potere determinare il numero di particelle rilevate da ciascuna di esse.
- Il numero di particelle si ricava dalla relazione $N = (CH - CH_p)/(CH_s - CH_p)$
- Il colore blu indica lo spettro del rumore elettronico, il nero lo spettro del segnale ricavato dalla misura in singola, mentre il colore rosso il fit del segnale stesso.

CH = valore misurato

CH_p = picco del rumore elettronico (distribuzione di Gauss)

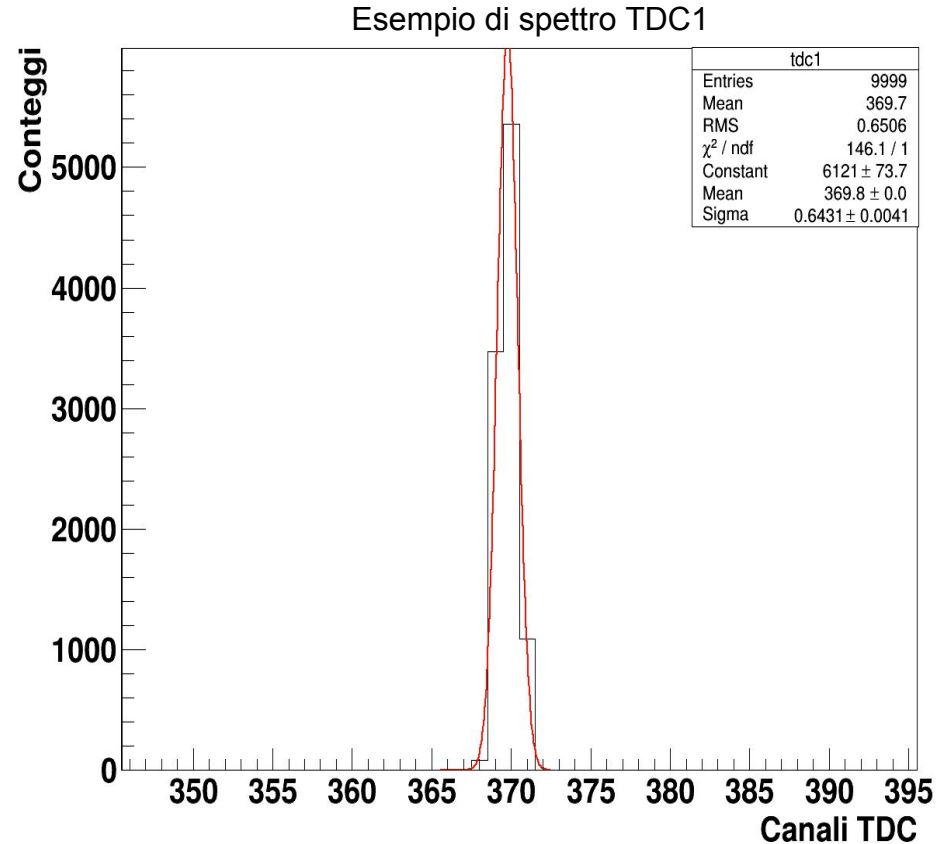
CH_s = picco del fit del segnale (distribuzione di Landau)

Esempio di Spettro di misura in singola



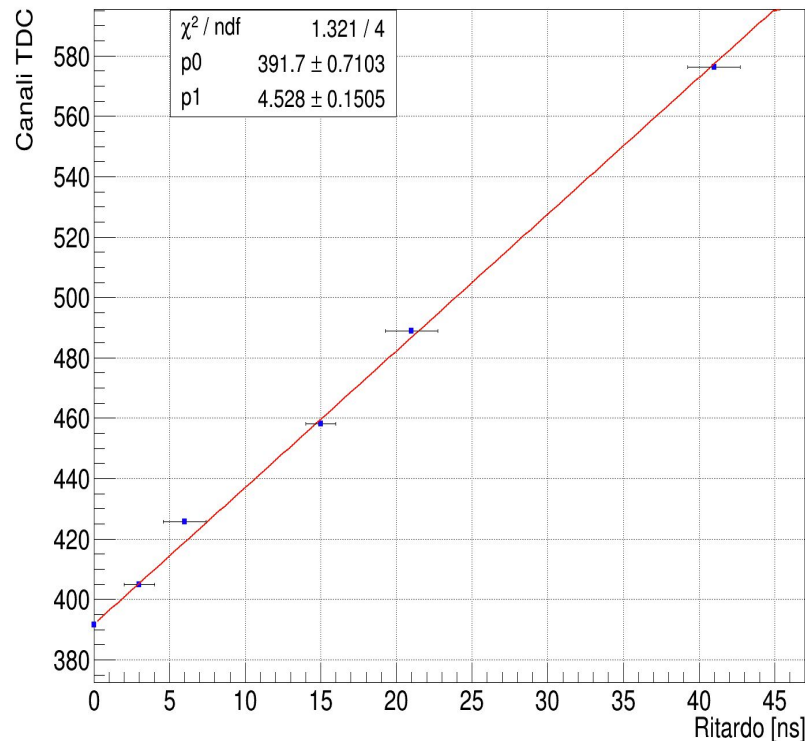
Taratura e verifica linearità TDC (Time to Digital Converter)

- Il TDC determina l'intervallo di tempo fra due impulsi di segnale (segnale di avvio e di arresto).
- La misurazione viene avviata e interrotta quando il fronte di salita o di discesa di un segnale supera una certa soglia.
- Il procedimento di taratura consiste nell'introdurre un ritardo noto al segnale di start o di stop utilizzando un cavo la cui lunghezza determina un ritardo del segnale di 15 ns (tempo di percorrenza di 5 ns/m per 3 m di cavo).



Misure verifica linearità del TDC

- La linearità della risposta del TDC viene verificata applicando al segnale di stop dei ritardi via via crescenti (da 3 ns a 41 ns).
- I ritardi sono ottenuti collegando di volta in volta diversi cavi mediante dei connettori ad I.
- Per ogni valore di ritardo di start e di stop sono stati acquisiti 1000 eventi.
- In figura sono mostrati i risultati ottenuti attraverso i fit lineari.

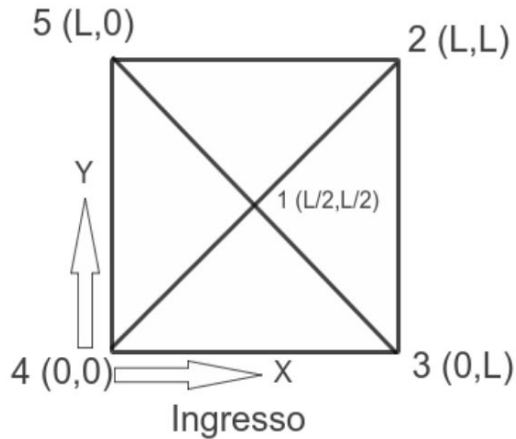


Definizione matematica degli angoli θ (zenitale) e Φ (azimutale)

La superficie dello sciame può essere approssimata ad un piano data la ridotta area efficace di rivelazione.

Equazione di un piano: $Ax+By+Cz+D=0$ con $A=\sin(\theta)\cos(\Phi)$; $B=\sin(\theta)\sin(\Phi)$; $C=\cos(\theta)$;

$$A^2+B^2+C^2=1$$



- Se si assume che i rivelatori siano disposti a formare un quadrato, allora: $d_{2_4} = c(t_2 - t_4)$ e $d_{3_5} = c(t_3 - t_5)$
- distanza di un punto $(x_0 + y_0 + z_0)$ dal piano $d = Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D$
- $c^*t_{2_4} = d_2 - d_4 = AL + BL$ $c^*t_{3_5} = d_3 - d_5 = AL - BL$
- sommando e sottraendo le due ultime relazioni:
 $A = c(t_{2_4} + t_{3_5}) / 2L$ $B = c(t_{2_4} - t_{3_5}) / 2L$
- Dalla relazione $A^2 + B^2 + C^2 = 1$ si ricava $C = (1 - A^2 - B^2)^{1/2}$
- Dalle definizioni dei coseni direttori si calcola:
 $\theta = \cos^{-1}(C)$ $\Phi = \tan^{-1}(B/A)$

L'area di raccolta è $\propto \sin(\theta)\cos(\theta)$, quindi $\propto \sin(2\theta)$, per cui il massimo della distribuzione si dovrebbe ottenere per $\theta = 45^\circ$. In realtà ciò non è esatto perché, al crescere dell'inclinazione θ , aumenta lo spessore dell'atmosfera attraversata dai raggi cosmici.

Legge che regola l'assorbimento: $y = p_0 \sin(\theta)\cos(\theta)e^{-p_1/\cos(\theta)}$

Distribuzione angolare del flusso dei Raggi Cosmici secondo l'angolo θ

Dai dati desunti dal TDC si possono ricavare le direzioni di incidenza dello sciame.

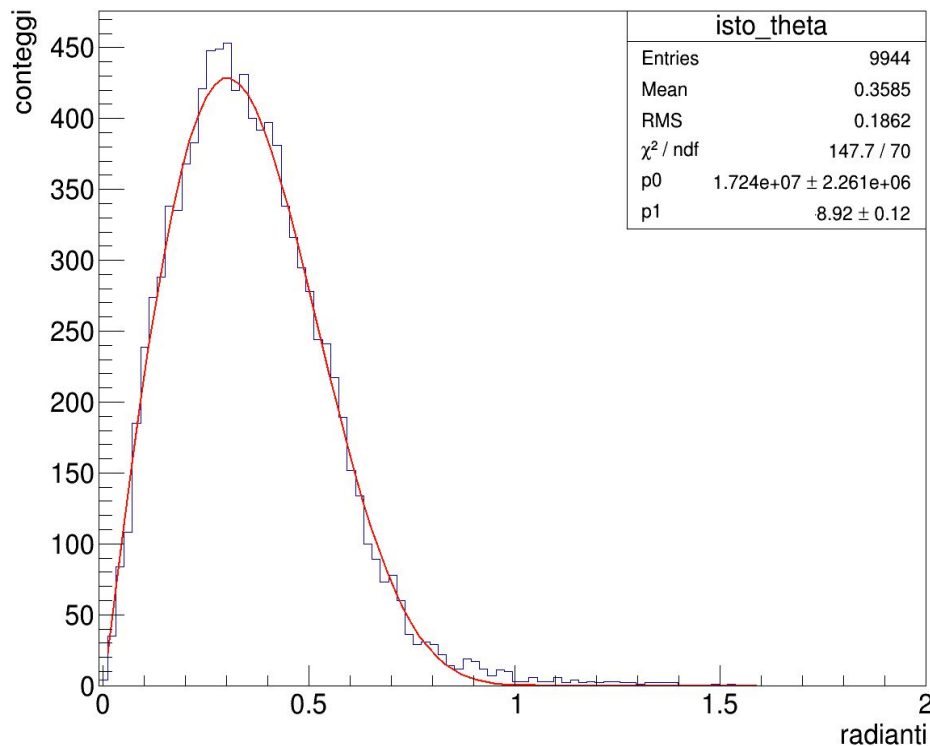
La distribuzione angolare segue la seguente legge: $y = p_0 \sin(\theta) \cos(\theta) e^{-p_1/\cos(\theta)}$

$p_0 \propto$ al numero di eventi incidenti .

$p_1 = x_0/\lambda$

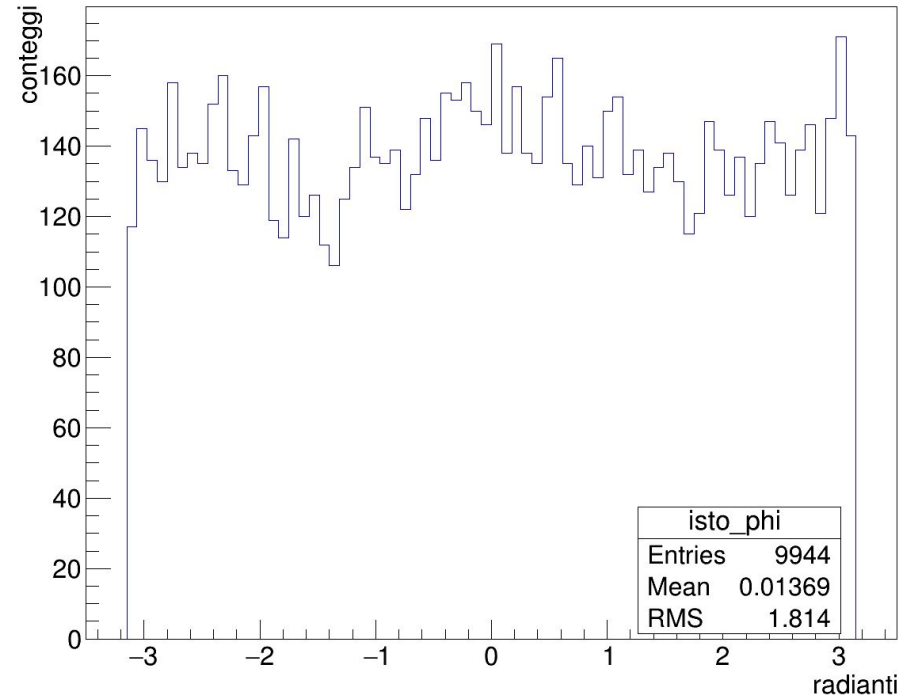
x_0 = spessore medio atmosfera espresso in g/cm^2 .

λ = lunghezza di attenuazione protone $\sim 120 \text{ g}/\text{cm}^2$.



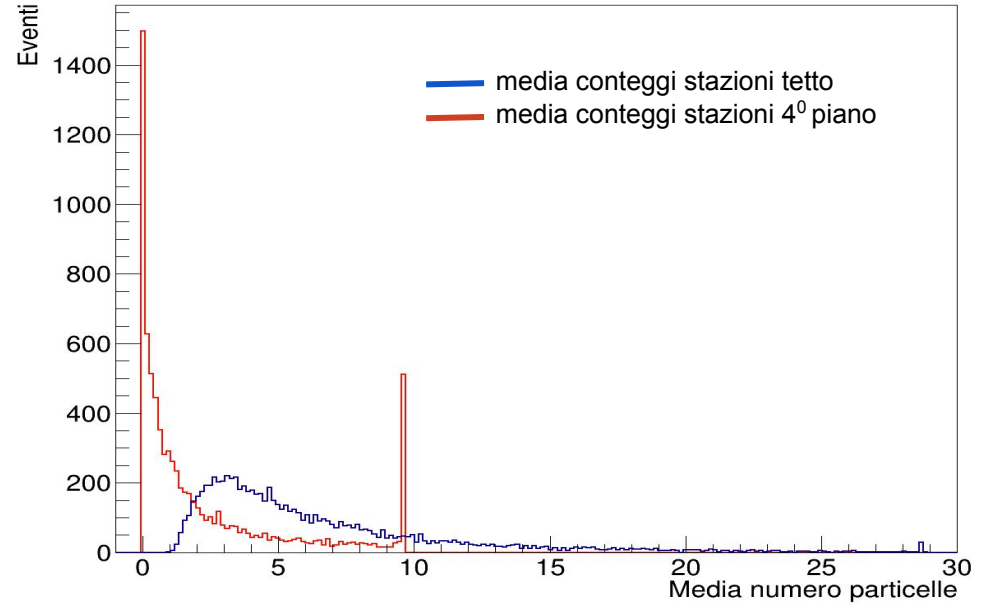
Distribuzione angolare del flusso di Raggi Cosmici secondo l'angolo Φ

- La distribuzione angolare in Φ risulta in sostanza piatta e conferma l'ipotesi di irraggiamento isotropo.
- Si evince come gli sciame di particelle impattino sui rivelatori da ogni direzione (Φ), mentre l'inclinazione (θ) dello sciame rispetto alla verticale segue una distribuzione ben definita.



Confronto rivelatori tetto e rivelatori 4° piano (componente carica superficie e penetrante)

- In blu è contrassegnata la media dei conteggi dei 5 rivelatori, funzionanti in coincidenza, posti sul tetto di Fisica, mentre in rosso la media dei conteggi dei 3 rivelatori posizionati al 4° piano nel Laboratorio Raggi Cosmici.
- Questo grafico mostra l'effetto penetrante delle particelle cariche (muoni) che una volta rilevate dalle 5 stazioni esterne, penetrano la soletta dell'edificio di Fisica, il 5° piano e il soffitto del 4° piano per essere poi rivelate dai 3 rivelatori presenti nel sottostante Laboratorio Raggi Cosmici.

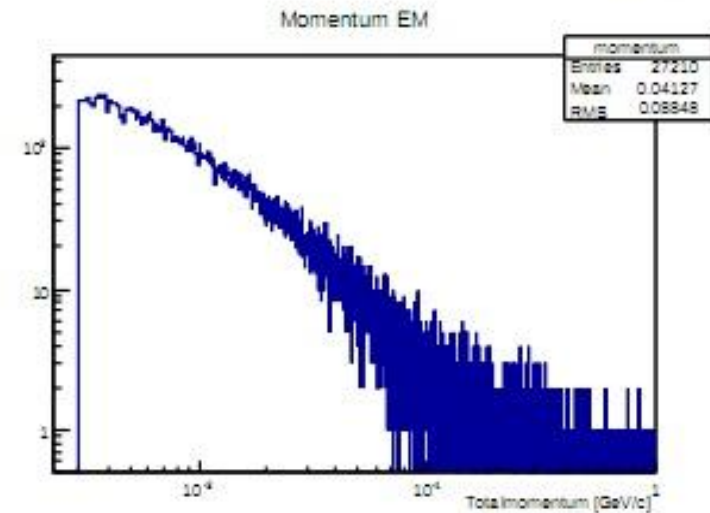
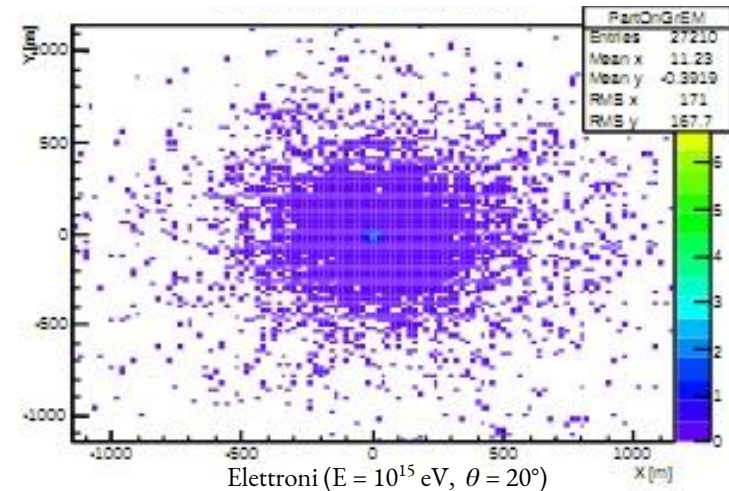


% particelle conteggiate dai rivelatori 4° piano

Totale Eventi raccolti	7862	100,0%
Senza particelle: media <0,33	2426	30,8%
Almeno 1 particella: media da >0,33 a 1	1557	19,8%
Più particelle: media da >1 a saturazione	3284	41,8%
Saturazione	595	7,6%

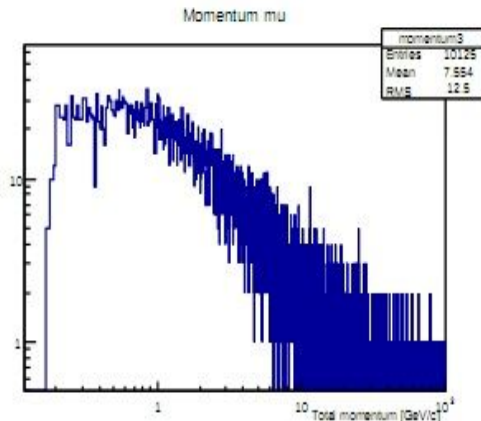
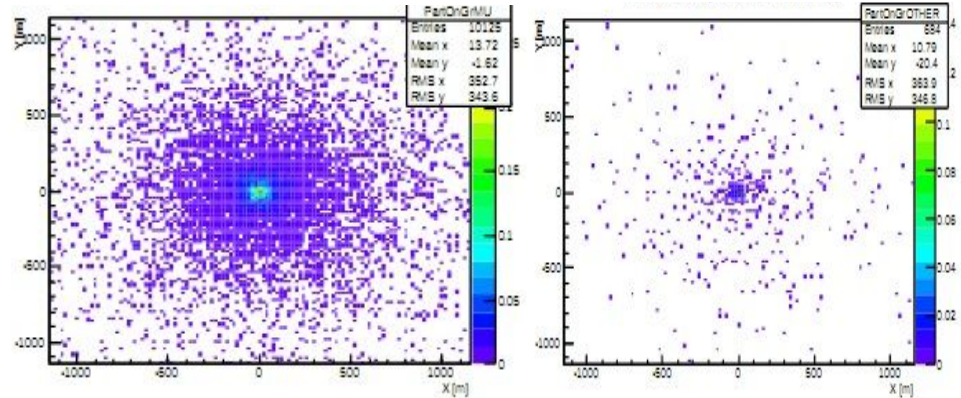
Programma di simulazione CORSIKA

- CORSIKA viene impiegato per simulare i raggi cosmici in atmosfera.
- La simulazione, eseguita da due studenti Erasmus, e comparata ai risultati sperimentali di questa tesi, è stata avviata prendendo in esame particelle primarie di energia dell'ordine di 10^{14} eV, intensificata via via fino a 10^{16} eV.
- Per ogni singola energia sono stati conteggiati gli eventi in funzione di un range di superficie compreso tra 10×10 m² e 200×200 m².
- La figura a lato mostra il corposo addensamento di elettroni nel core dello sciame, che tende sensibilmente ad attenuarsi dopo circa 500 m dal core.
- Si può vedere come il conteggio (numero di eventi) cali rapidamente al crescere del momento elettromagnetico.

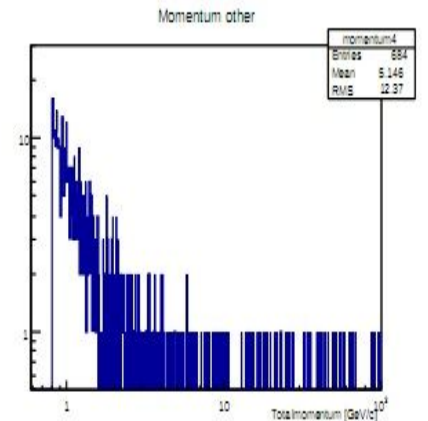


Programma di simulazione CORSIKA

- La componente muonica presenta una distribuzione molto simile a quella elettronica e un core molto denso. La concentrazione muonica si attenua all'aumentare della distanza dal core.
- La componente adronica presenta una distribuzione molto diluita già in prossimità del core.
- Quanto sopra conferma come lo sciame sia in prevalenza composto di elettroni (particelle poco penetranti), muoni (fortemente penetranti) e, infine, di adroni.
- I risultati della simulazione risultano essere in accordo con le misure sperimentali
- Anche per le famiglie adroniche e muoniche il conteggio (numero di eventi) cala rapidamente al crescere dei rispettivi momenti.



Adroni ($E = 10^{15}$ eV, $\theta = 20^\circ$)



Muoni ($E = 10^{15}$ eV, $\theta = 20^\circ$)

Programma di simulazione CORSIKA - Risultati

- Dal punto di vista **sperimentale** la frequenza è di ~ 1 **eventi/min.**
- Dalle **simulazioni** fatte, la sommatoria delle frequenze, per i diversi range di energia considerati ed una superficie, ad esempio, di $100 \times 100 \text{ m}^2$ (vedi tabella) risulta $\sim 0,76$ **eventi/min.**
- I dati presenti in tabella evidenziano come, alle varie energie, gli eventi risultino, percentualmente, più numerosi per determinate superfici di esposizione. Ad esempio, per $E = 10^{14} \text{ eV}$, la superficie con maggiore numero di eventi è $10 \times 10 \text{ m}^2$, mentre per $E = 10^{16} \text{ eV}$ è $200 \times 200 \text{ m}^2$.
- I risultati della simulazione risultano essere in ragionevole accordo con le misure sperimentali.

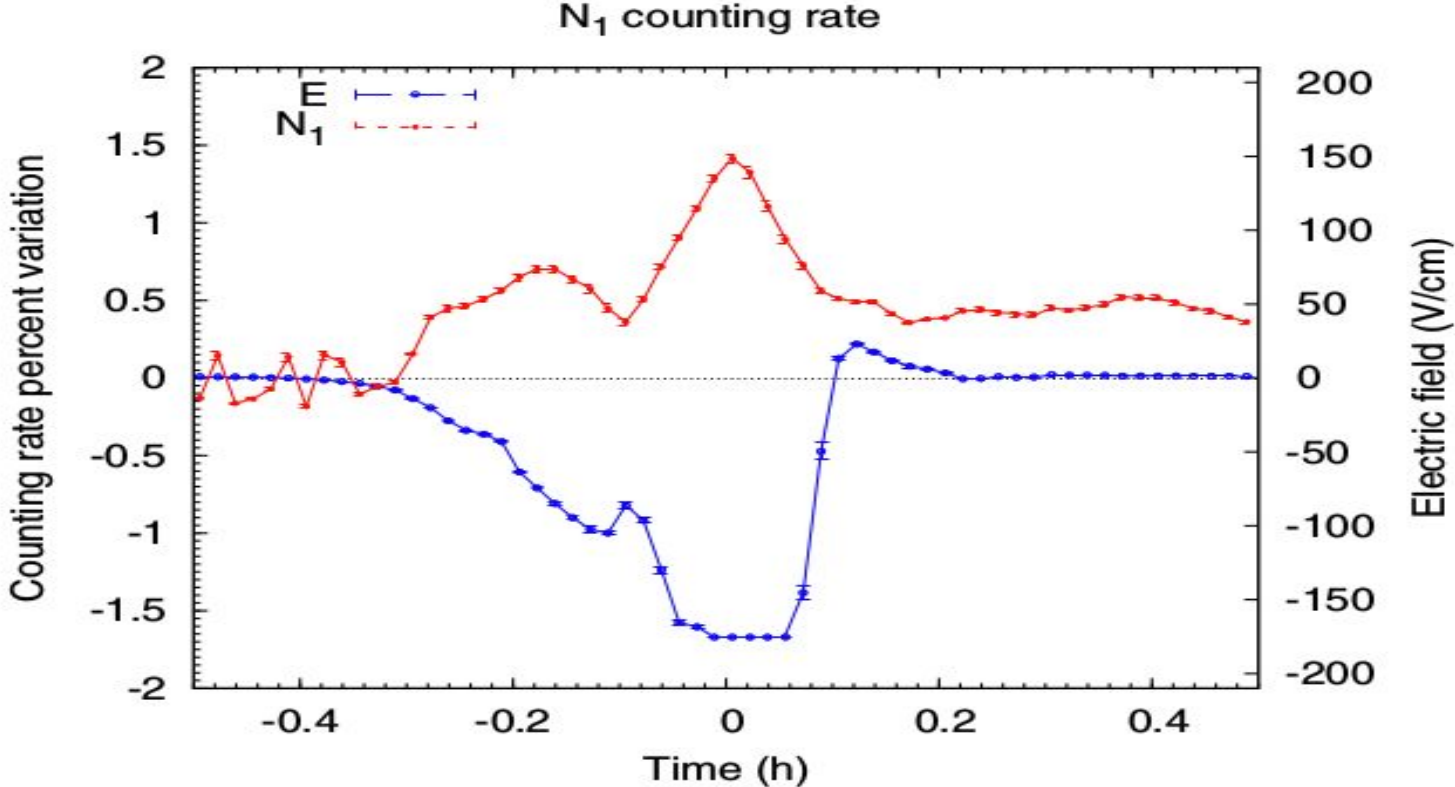
Energy (eV)	Surface(m ²)	Average	Events/s	Events/min	Events/h	Event/min*Average
10 ¹⁴	10x10	41,2	0,02	1,2	72	0,04944
	50x50	1	0,497	29,82	1789	0,02982
	100x100	0,2	2	120	7165	0,024
	200x200	0	8	480	28800	0
2*10 ¹⁴	10x10	215,6	0,0061	0,366	21,96	0,0789096
	50x50	15,4	0,152	9,12	547	0,140448
	100x100	4,8	0,611	36,66	2199	0,175968
	200x200	1,6	2,44	146,4	8784	0,23424
5*10 ¹⁴	10x10	782	0,0012	0,072	4,32	0,056304
	50x50	109	0,032	1,92	115,2	0,20928
	100x100	25	0,128	7,68	461	0,192
	200x200	5,4	0,515	31	1854	0,1674
10 ¹⁵	10x10	983,8	0,0004	0,0238	1,43	0,02341444
	50x50	489,2	0,009	0,54	32,4	0,264168
	100x100	140,8	0,04	2,4	144	0,33792
	200x200	33,6	0,16	9,6	576	0,32256
10 ¹⁶	10x10	1000	0,000005	0,0003	0,018	0,0003
	50x50	986,2	0,000125	0,0075	0,45	0,0073965
	100x100	775,8	0,0005	0,03	1,8	0,023274
	200x200	254,4	0,002	0,12	7,2	0,030528

Antenna monitoraggio Campo Elettrico Atmosferico

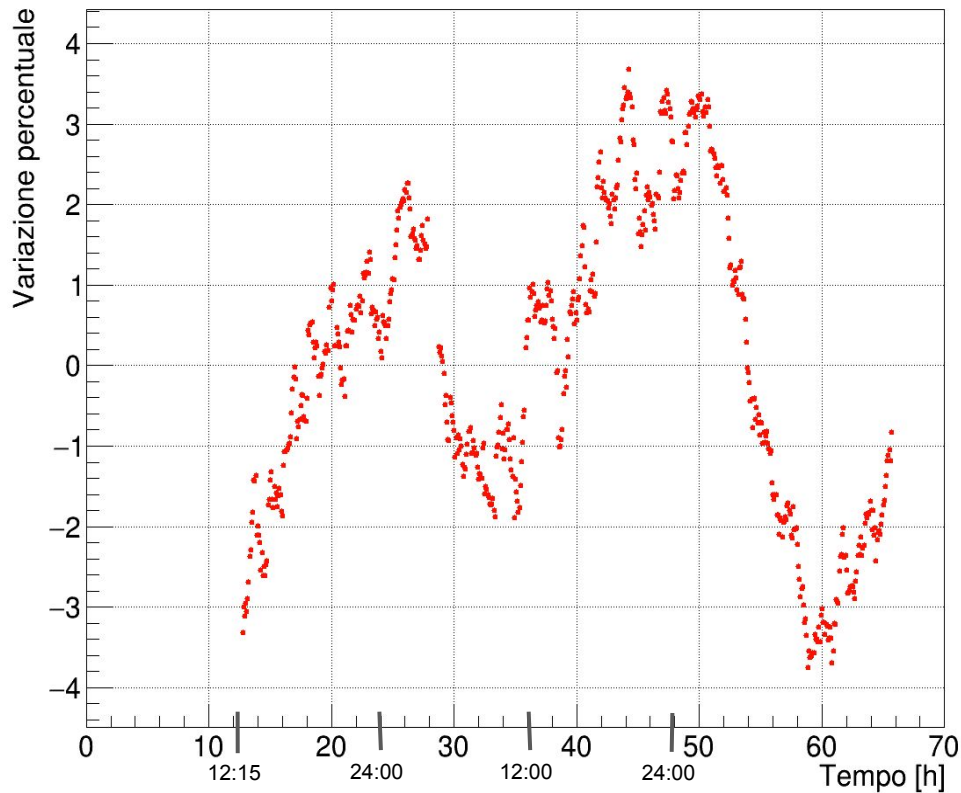
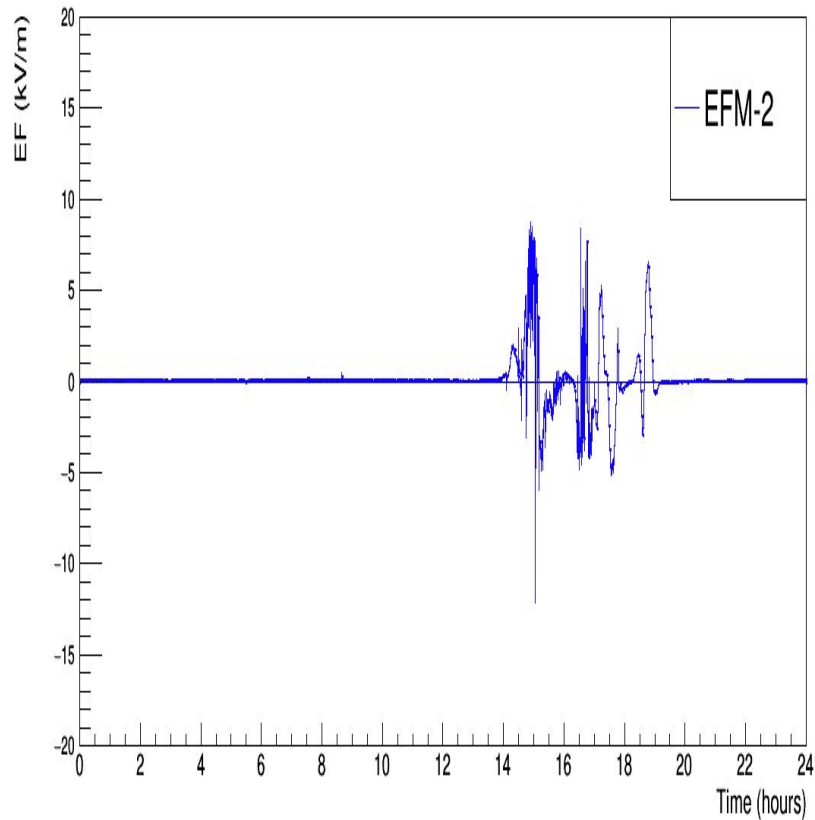
- L'antenna è posta sul tetto del Dipartimento di Fisica.
- Il valore del campo elettrico atmosferico statico, al livello del mare e in assenza di eventi atmosferici, è di $\sim 110 \text{ V/m}$.
- Il campo elettrico massimo rilevato durante il temporale del 28 luglio è stato di $\sim 5 \div 6 \text{ kV/m}$.
- Il campo elettrico, in presenza di forti perturbazioni atmosferiche può raggiungere valori molto superiori ai 20 kV/m , come risulta dagli esperimenti eseguiti da INFN/INAF in Tibet a 4300 m slm .



Progetto ARGO - YBJ (Yangbajing - Tibet 4300 m)



Conteggi al variare del Campo Elettrico per eventi atmosferici (28 luglio 2018)

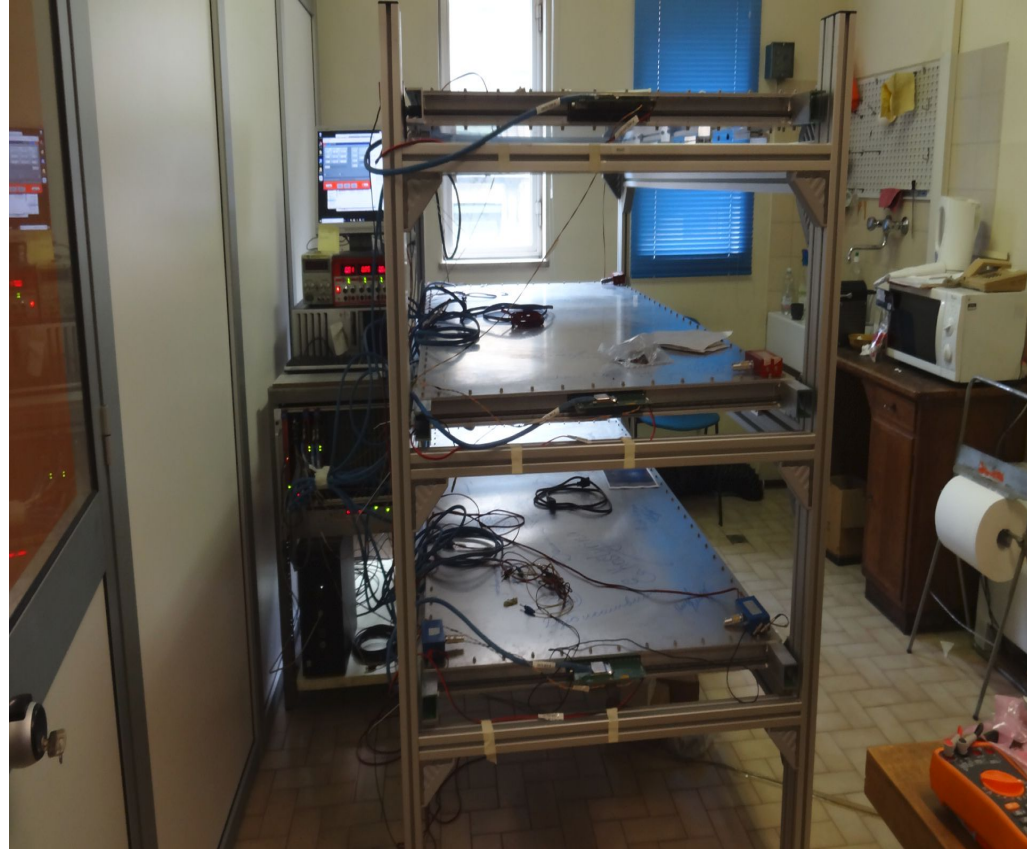


Conclusioni

- I risultati delle misure eseguite in quintupla (5 rivelatori in coincidenza) risultano in linea con la teoria.
- La limitata anisotropia in Φ è attribuibile al fatto che le 5 stazioni sul tetto non sono perfettamente disposte secondo un quadrato perfetto, come da ipotesi iniziale.
- La distribuzione di θ risulta in accordo con le attese.
- Dalle misure in coincidenza dei 5 + 3 rivelatori è stato possibile dimostrare l'effetto penetrante delle particelle cariche. Infatti, la componente composta da elettroni e fotoni, può attraversare solo pochi centimetri di assorbitore, mentre la componente composta da muoni riesce a penetrare spessori di materiali assorbenti di oltre un metro.

Conclusioni

- Per meglio studiare e osservare l'effetto penetrante delle particelle cariche è in avanzata fase di installazione un nuovo telescopio EEE (Extreme Energy Events), composto di 3 rivelatori di muoni sovrapposti e distanziati di 50 cm, aventi ciascuno una superficie di 2 m^2 e una risoluzione molto elevata pari a 1 cm^2 .
- Cio' consentira' di ottenere, oltre ad una elevata risoluzione spaziale, la possibilità di un buon tracciamento delle particelle cariche.



Conclusioni

- Le misure in doppia eseguite per esaminare la variazione dei conteggi, in relazione alla variazione del campo elettrico misurato dall'antenna posta sul tetto del dipartimento di Fisica in presenza di eventi atmosferici, non hanno fornito risultati significativi a causa:
 - dei limiti imposti dai rivelatori ($S < 1 \text{ m}^2$);
 - dalla limitata statistica di eventi registrati durante la perturbazione del campo elettrico atmosferico;
 - dal fatto che le particelle cariche sono in prevalenza muoni che risentono meno dell'influenza del campo elettrico rispetto agli elettroni.
- La variazione dei conteggi in relazione al variare del campo elettrico è invece ben visibile quando gli esperimenti vengono effettuati ad alta quota, come ad esempio in Tibet, circa 4300 m, con rivelatori aventi una superficie dell'ordine del 10^4 m^2 , progetto ARGO, dove gli sciami che raggiungono il suolo sono composti in prevalenza da elettroni/positroni.

Ringraziamenti

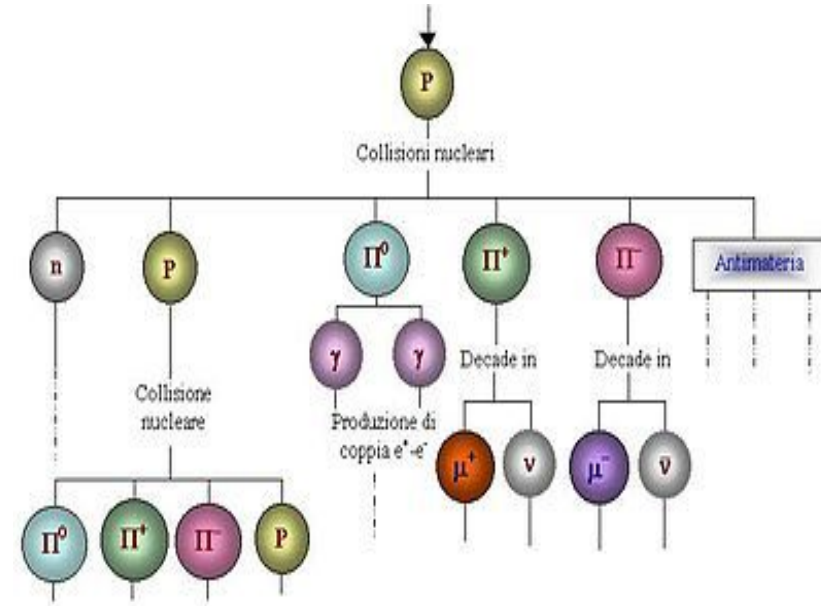
Ringrazio vivamente:

- I professori della commissione di laurea per l'attenzione prestatami;
- il relatore Prof. Mario Edoardo Bertaina per la sua grande gentilezza, disponibilità e per quanto mi ha saputo trasmettere alimentando la mia passione per la Fisica;
- il correlatore dott. Matteo Battisti per la fattiva consulenza e collaborazione informatica;
- la dott.ssa Silvia Vernetto di INFN/INAF per la consulenza e per il materiale inerente i campi elettrici in presenza di eventi atmosferici, che mi ha gentilmente offerto;
- I miei figli Domenico, Lucia e Giovanni per la fiducia che hanno risposto in me e per l'incoraggiamento quando necessario;
- Infine dedico questa tesi alla mia sposa Maria che sarebbe stata felice e orgogliosa di condividere al mio fianco questo particolare momento.

Slide di backup

La cascata pionica

- I pioni carichi generati nelle interazioni anelastiche degli adroni presenti nello sciame decadono in muoni e neutrini, con una vita media di 2.6×10^{-8} s.
- I μ hanno una massa di $105 \text{ MeV}/c^2$ e una vita media $T_0 = 2.197 \mu\text{s}$, ma per effetto della loro velocità relativistica e della dilatazione temporale* $T_1 \sim 64,45 \mu\text{s}$ per l'osservatore ($E_\mu = 3 \text{ GeV}$), possono percorrere circa 20 km raggiungendo il suolo anche se sono generati nelle prime interazioni del primario con i nuclei di atmosfera.
- Interagiscono debolmente (bassa sezione d'urto) e possono essere rivelati anche a grandi profondità (MACRO, LVD, ICECUBE, etc.)



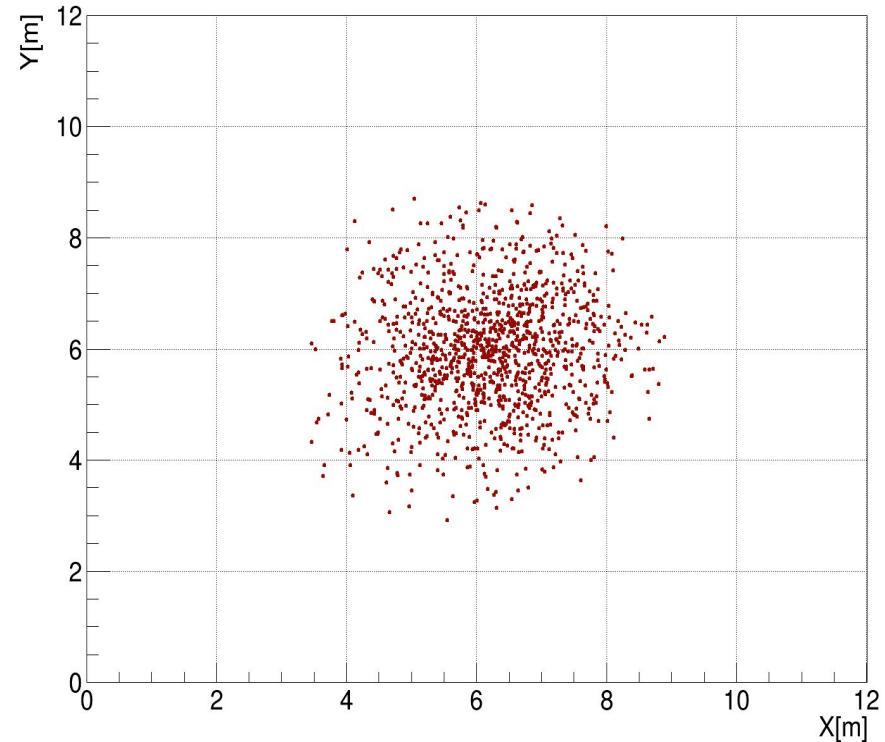
$$* v_\mu = 0,999418c; T_0 = 2,197 \cdot 10^{-6} \text{ s}; T_1 = T_0 / [1 - (v_\mu/c)^2]^{1/2} = 2,197 \cdot 10^{-6} \text{ s} / [1 - (0,999418)^2]^{1/2} = 64,45 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

$$S = v_\mu \times T_1 = 0,999418 \times 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1} \times 64,45 \cdot 10^{-6} \text{ s} \sim 19317 \text{ m}$$

$$E_\mu = 3 \text{ GeV}$$

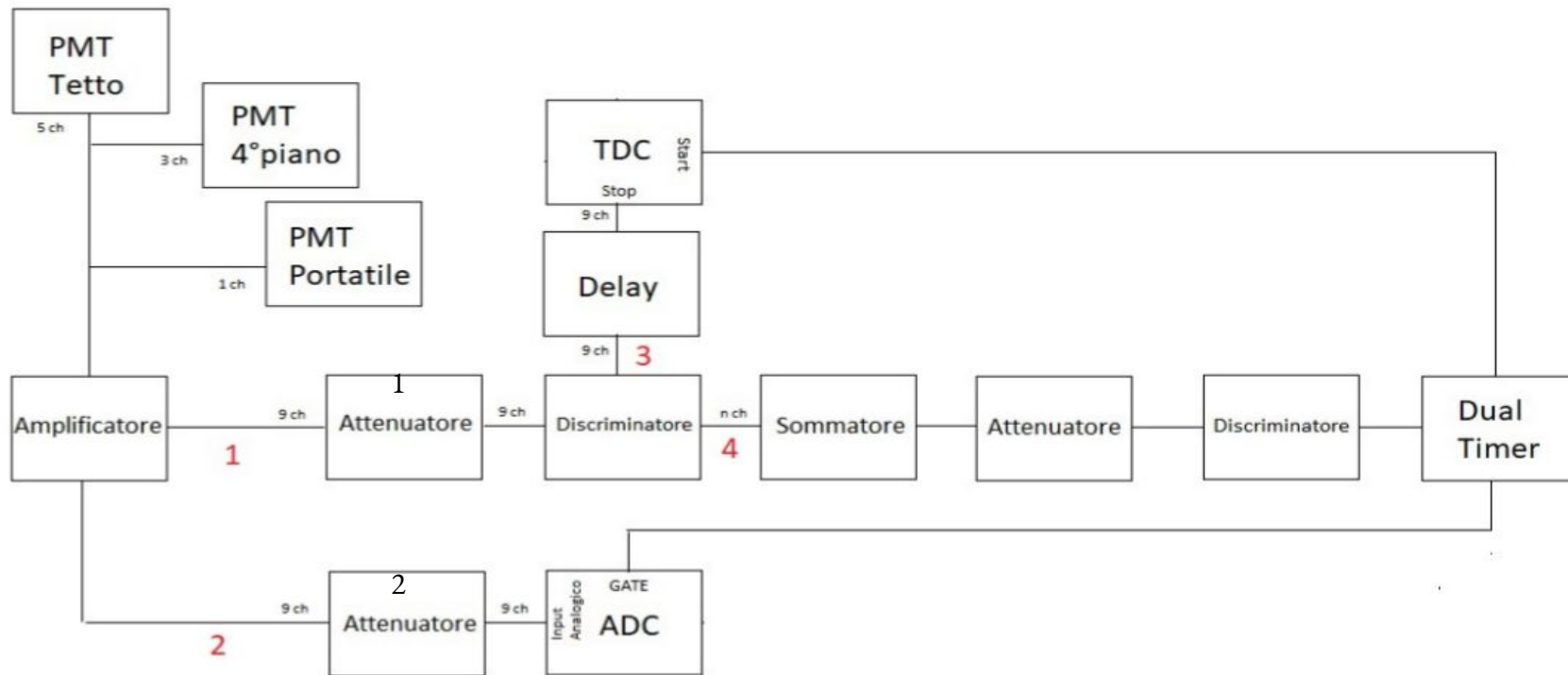
Centro di Gravità

- Si prendono in esame gli eventi in cui il rivelatore centrale (1) ha registrato il maggior numero di particelle
- Condizione necessaria è che durante le misurazioni nessuno dei 5 rivelatori saturi perché si perderebbe il conteggio delle particelle registrate e si falserebbe la media pesata a causa di questa indeterminazione
- Gli eventi si distribuiscono in modo alquanto isotropo attorno al punto di coordinate $L(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0)$
- Si nota una leggera anisotropia perché:
 - 1) le 5 stazioni in concreto non formano un quadrato perfetto;
 - 2) lo scintillatore 2 non è molto efficiente;



$$X[m] = \frac{\sum X_i P_i}{\sum P_i}$$
$$Y[m] = \frac{\sum Y_i P_i}{\sum P_i}$$

Catena elettronica



Progetto ARGO - YBJ (Yangbajing - Tibet 4300 m)



Vista esterna capannone progetto ARGO



Vista interna capannone e dei rivelatori con $S \sim 10^4 \text{ m}^2$