

Misure di Raggi Cosmici a Orvieto con i Laboratori Nazionali di Frascati

Leonardo Battistelli¹, Sara Belcapo¹, Ferdinando Esposito¹, Lorenzo Ghezzi¹, Desirée Sensi¹,
Mario Anelli², Claudio Gatti²

¹ *IISST - Liceo Majorana, Orvieto*

² *LNF - INFN, Via E. Fermi 40, I-00044 Frascati, Italy*

Abstract

Questa relazione é stata scritta da un gruppo di studenti che hanno partecipato ad uno stage organizzato presso il Liceo Ettore Majorana di Orvieto nel Dicembre 2014.

Lo stage, inserito in una serie di iniziative organizzate da Giuseppe De Ninno e Adele Riccetti in occasione di "Orvieto Scienza 2015", voleva avvicinare questo gruppo di studenti al mondo della fisica delle particelle elementari con una attività sperimentale e didattica.

Contattati tramite Pasquale Di Nezza, coordinatore di "Scienza Per Tutti", abbiamo proposto un percorso di scoperta degli sciame cosmici ispirato all'articolo di Pierre Auger "Extensive Cosmic-Ray Showers" pubblicato sulla Review of Modern Physics Vol. 11 del 1939. In questo articolo di sole 4 pagine Auger, dotato di pochi contatori Geiger-Muller e di una incredibile intuizione, riesce a determinare le proprietà dei raggi cosmici primari e degli sciame da essi prodotti.

Per svolgere l'attività sperimentale abbiamo allestito un piccolo apparato con alcuni rivelatori a scintillatore e un'opportuna elettronica per elaborare i segnali. Quindi, nell'arco di un pomeriggio, una notte di presa dati ed una mattina, abbiamo in parte ripercorso il ragionamento e le misure di Auger fino a stimare quanti raggi cosmici primari e con quale energia colpiscono l'atmosfera e quante particelle e quale estensione ha lo sciame prodotto.

Pensiamo che la miglior testimonianza della riuscita di questa esperienza venga dalle parole di uno dei ragazzi che hanno passato molte ore a raccogliere dati, fare conti e ragionamenti: << A parte la suggestione che un esperimento come questo può esercitare su uno studente del Liceo, mi ha colpito in particolare come un argomento così complesso possa essere stato affrontato da noi in modo relativamente semplice>>. (M. Anelli, C. Gatti)

Misure di Raggi Cosmici a Orvieto con i Laboratori Nazionali di Frascati

Leonardo Battistelli, Sara Belcapo, Ferdinando Esposito, Lorenzo Ghezzi, Desirée Sensi
IISST – Liceo Majorana, Orvieto

Uno dei metodi per rivelare e identificare le particelle alle quali è esposto il nostro pianeta, i raggi cosmici, si utilizza un rivelatore di particelle, costituito da uno scintillatore e da un fototubo, collegato a un oscilloscopio ed ad una opportuna elettronica per elaborare i segnali.

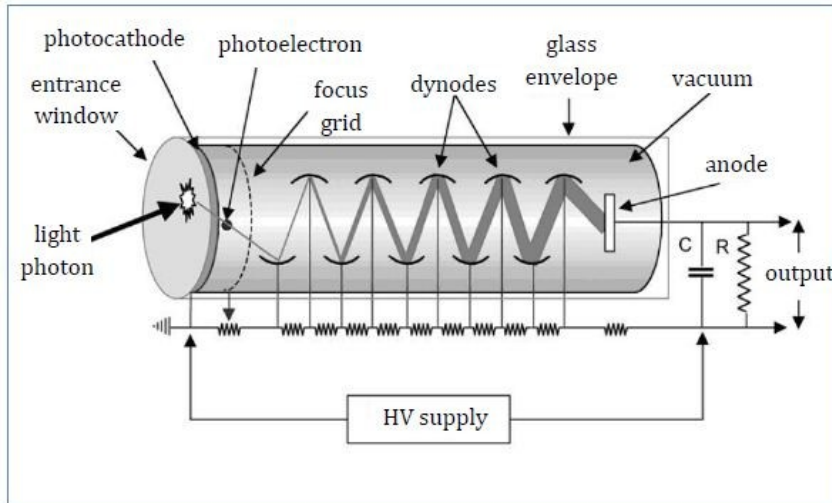


Illustration 1: Schema di funzionamento di un fototubo.

fotocatodo si trovano delle placchette di metallo, i dinodi, poste a potenziale elettrico crescente, che attraggono il foto-elettrone. Una volta raggiunto il primo dinodo e avendo acquisito abbastanza energia, il foto-elettrone urta gli elettroni del metallo estraendone alcuni. Ognuno di questi elettroni si dirigerà verso il dinodo successivo ove provocherà la fuoriuscita di altri elettroni. Il susseguirsi di più dinodi crea un processo "a cascata" risultante in una amplificazione esponenziale della carica elettrica (si riscontrano amplificazioni dell'ordine di 10^7).

Per evitare perdite di luce lo scintillatore viene prima schermato con materiale riflettente. Inoltre, onde evitare l'innescimento del processo a cascata da luce proveniente dall'ambiente esterno, esso è ricoperto con del nastro isolante nero.

Il segnale elettrico generato può essere visualizzato con un oscilloscopio.

Lo scintillatore è composto da un materiale che emette impulsi di luce quando viene attraversato da particelle cariche, convertendo parte della loro energia cinetica in luce rilevabile.

Il fototubo è un dispositivo in grado di trasformare un segnale luminoso in un segnale elettrico. Quando la luce, in questo caso proveniente da uno scintillatore, investe la finestrella di ingresso, il fotocatodo, viene emesso un elettrone dalla parte opposta, detto fotoelettrone. Oltre il

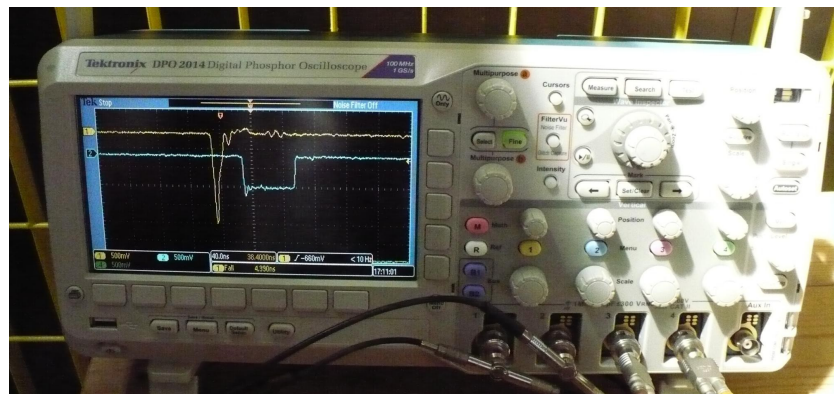
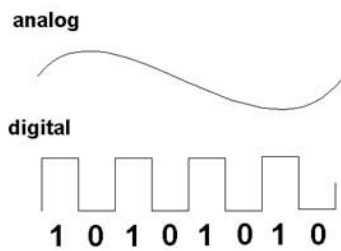


Illustration 2: Immagine all'oscilloscopio di un segnale analogico e del segnale generato dal discriminatore.



Per poter elaborare i segnali analogici provenienti dai fototubi, occorre prima trasformarli in segnali digitali. Questa operazione viene effettuata da un dispositivo chiamato discriminatore, che prendendo in ingresso dei segnali analogici, genera un segnale digitale "1" di una certa lunghezza se il segnale analogico supera una certa soglia. Un segnale digitale è un segnale che può assumere solo due valori: 0 e 1. Quando si ha 1 come output significa che è stato rilevato un segnale, mentre se si ha 0 significa

che non è stato rilevato alcun segnale.

È possibile combinare più segnali digitali associati a due o più rivelatori. Questa operazione viene ottenuta mediante dei dispositivi chiamati unità logiche. Le unità logiche prendono in ingresso due o più segnali e generano in uscita un segnale digitale 1 se, ad esempio, sono presenti in ingresso tutti segnali "1", e "0" altrimenti. In questo modo è possibile determinare quando c'è stato il passaggio contemporaneo di particelle in tutti i rivelatori. Questa operazione di sovrapposizione di segnali è detta coincidenza.

Tramite un contatore collegato ai rivelatori si può misurare il numero di coincidenze in un determinato intervallo di tempo.



Illustration 3: Elettronica per l'elaborazione dei segnali. Da sinistra: un discriminatore; due unità logiche; un fan-in/fan-out; un contatore; un alimentatore HV.

Se si sovrappongono due rivelatori e si crea una coincidenza con i loro segnali, in modo tale da limitare i conteggi dovuti al rumore, si contano 113 coincidenze in 30 secondi. Ci si pongono diversi quesiti:

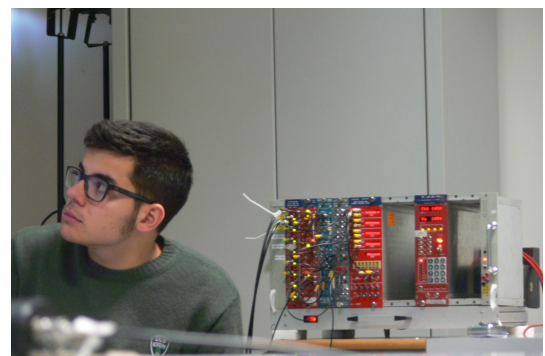
1. queste particelle arrivano dall'alto o dal basso?
2. quante particelle attraversano in un minuto un centimetro quadrato?
3. queste particelle arrivano singolarmente o in sciame?
4. se arrivano in sciame, lo fanno con la stessa frequenza delle singole particelle?
5. qual è la loro estensione?
6. la densità varia da sciame a sciame?



Per rispondere alla prima domanda, è stato necessario capire quale dei rivelatori è attraversato prima. I due segnali, entro pochi nanosecondi, arrivano nello stesso momento poiché i rivelatori sono a una distanza minima tra di loro. Assumendo che queste particelle viaggino alla velocità della luce, percorrono 30 centimetri in un nanosecondo; per rilevare delle differenze dovrebbero distare di almeno 3 metri. Però, c'è un problema di accettazione: allontanando i rivelatori si riduce l'angolo solido da essi coperto, cioè si perdono le particelle più inclinate. Infatti, distanziandole di circa 50 centimetri, le coincidenze si riducono a 10.

Comunque, distanziandole di circa 3 metri, ci si accorge che c'è un anticipo di 7-8 nanosecondi. **Si capisce che le particelle arrivano dall'alto** perché il segnale corrispondente al rivelatore posto in alto è in anticipo rispetto a quello posto in basso.

Nel tentativo di individuare quante particelle attraversano un centimetro quadrato ogni minuto, vengono sovrapposti i due rivelatori in modo da avere una superficie di contatto uguale a 116.8 cm^2



Si effettuano cinque misurazioni che portano ai seguenti risultati:

Particelle che attraversano la superficie in 60 s	particelle che attraversano un cm ² in 60 s
132	1.130
127	1.087
150	1.284
130	1.113
130	1.113
media	media
133.8	1.145
fluttuazione tipica	fluttuazione tipica
11.57	0.099

In conclusione le particelle che attraversano un cm² in 60 s sono dell'ordine di una.

I dati riportati non tengono conto dei segnali ottenuti a causa del rumore, ossia tutti quei casi in cui il segnale non viene inviato in seguito al passaggio di una particella in entrambi i rivelatori, ma è causato dallo strumento stesso. Quando una particella attraversa un rivelatore viene generato un segnale logico che dura 80 ns. Tuttavia è possibile che in questo intervallo di tempo un altro rivelatore generi un segnale non causato dal passaggio di una particella, ma dal rumore. Tutti i casi in cui si verifica ciò non vanno presi in esame e tolti dai dati. È possibile trovare il numero di misurazioni dovute al solo rumore utilizzando la seguente formula:

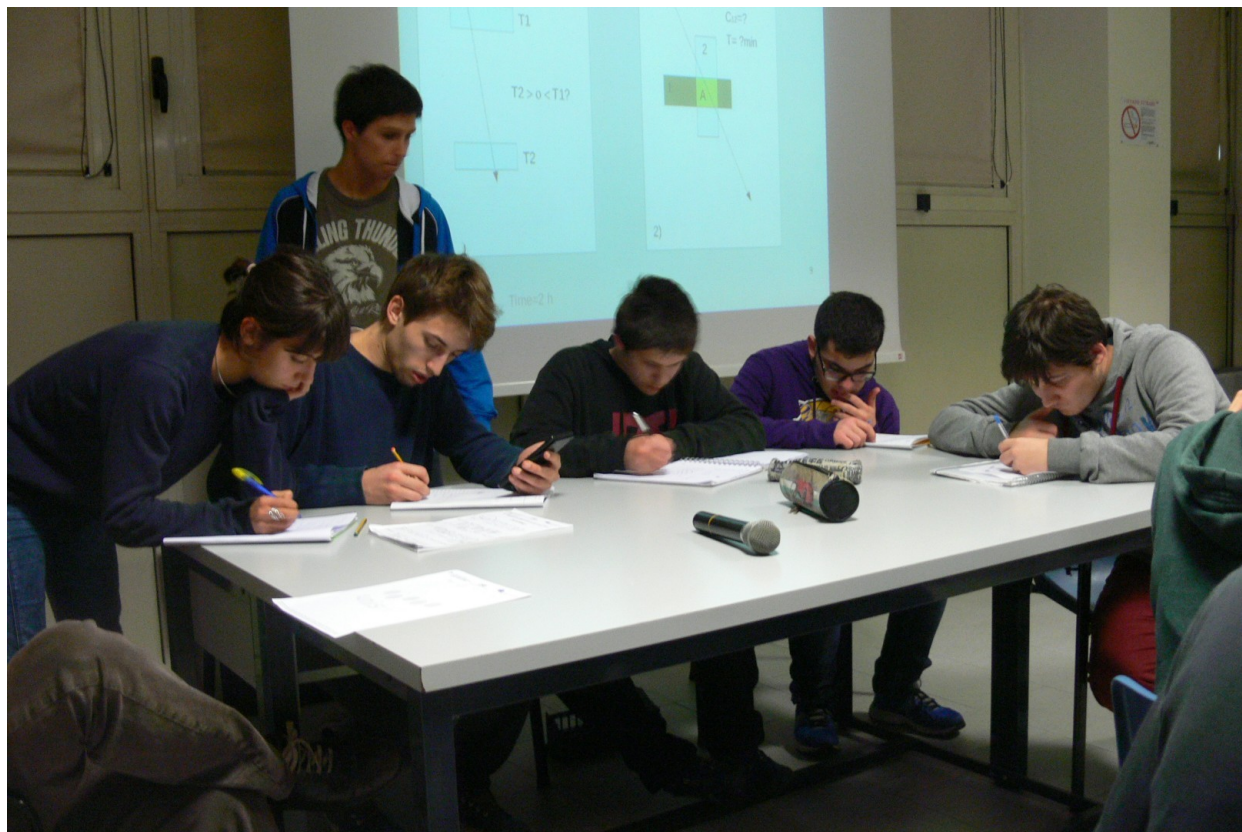
$$n = 2 \times f_a \times f_b \times t_{\text{segnale}} \times t_{\text{rilevazione}}$$

dove f_a e f_b sono le frequenze dei conteggi (in "singola") dei rivelatori che sono dominati dal rumore (in questo caso entrambi hanno frequenza uguale a 20Hz), t_{segnale} è l'intervallo di tempo in cui il segnale logico si trova nello stato "1" (la larghezza del segnale) e $t_{\text{rilevazione}}$ è il tempo per cui è effettuata la misura. Sostituendo i dati nella relazione si ottiene:

$$n = 2 \times (20\text{Hz}) \times (20\text{Hz}) \times 80 \times 10^{-9}\text{s} \times 60\text{s} = 3.84 \cdot 10^{-4}/\text{min}$$

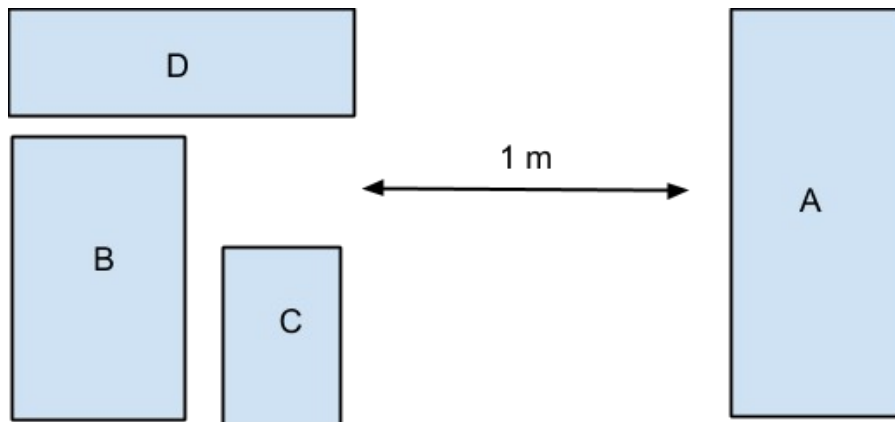
ossia 0.02 misurazioni all'ora. È evidente quindi come in questo caso **i segnali dovuti al rumore possono essere considerati pari a zero.**

Per scoprire se le particelle arrivano singolarmente o in sciame vengono posti quattro rivelatori, di diversa estensione, a diverse distanze (verranno chiamati A, B, C e D per comodità). Le superfici sono:



Rivelatore	Area (cm ²)
A	420
B	256
C	100
D	161

Il sistema composto da essi si può rappresentare in questo modo:



Vengono creati dei "canali" che inviano un segnale al contatore ogni volta che i rivelatori corrispondenti a quel particolare canale avvertono contemporaneamente il passaggio di una particella. I canali sono:

- canale 1: A e D
- canale 2: A e C
- canale 3: A e B
- canale 4: A, B e C



In 105 minuti, i segnali rilevati dai canali sono i seguenti:

canale	volte
1	101
2	53
3	80
4	9

Risulta quindi una frequenza delle coincidenze pari a circa 1/minuto. Possiamo dire che le particelle non giungono singolarmente bensì in sciame, la cui frequenza è minore di quella che corrisponde agli arrivi singoli (ovvero 1 particella/secondo).

Sapendo che la probabilità si ricava mediante la formula $P=A\rho$ dove A è la superficie in m^2 e ρ la densità in $1/m^2$, e che la probabilità di due eventi simultanei è il prodotto delle probabilità singole, si può calcolare il numero di coincidenze C che ci aspettiamo con C_{12} (due rivelatori) e C_{123} (tre rivelatori):

$$C_{AB}=A_A A_B \rho^2 t$$

$$C_{ABC}=A_A A_B A_C \rho^3 t$$

Dividendo membro a membro si ricava che $A_B \rho = C_{ABC}/C_{AB}$

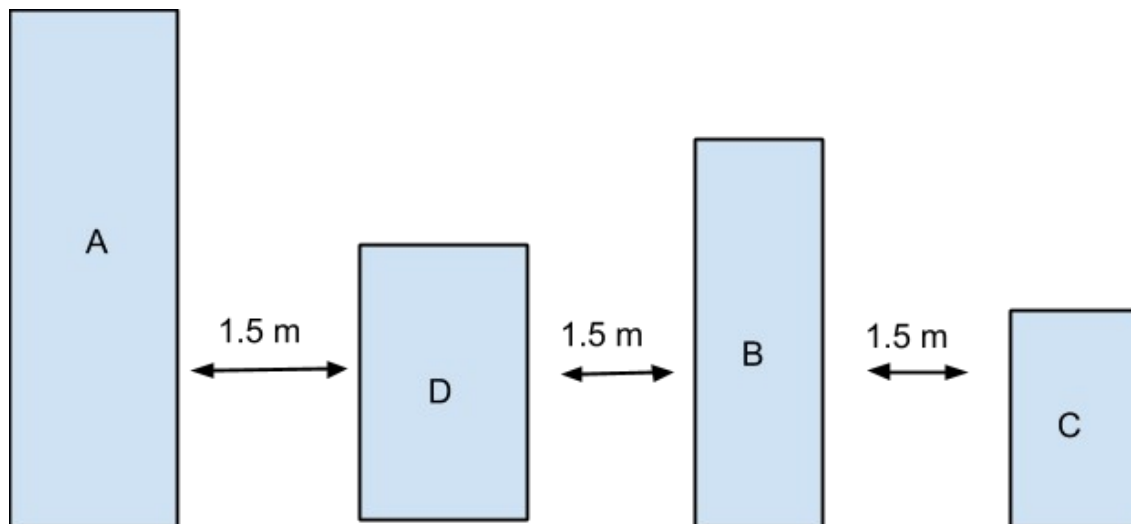
da cui $\rho = 6.6 /m^2$

Ora possiamo trovare la frequenza degli sciami

$$f=C_{AC}/(A_A A_C \rho^2 t)=25/\text{min}$$

* * *

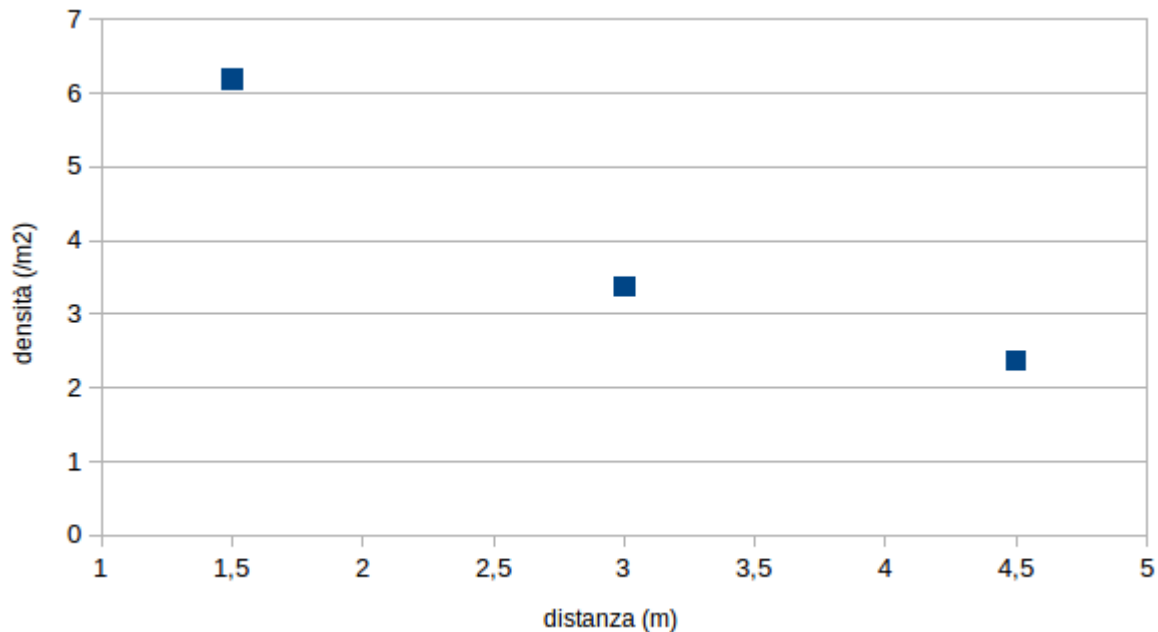
Per cercare una stima dell'estensione degli sciami, si dispongono i quattro contatori a una distanza di circa 1.5 metri l'uno dall'altro e li si lascia acquisire dati per 15h44', per analizzare come variano le coincidenze in base alla distanza. I rivelatori vengono posti secondo questo schema:



Nelle 16 ore di raccolta dati, mediante gli stessi canali utilizzati precedentemente, sono state rilevate le seguenti coincidenze:

canale	numero coincidenze (N)
1 (A e D)	753
3 (A e B)	327
2 (A e C)	179
4 (A, B e C)	80

canale	area (m ²)	frequenza (al minuto)	tempo (minuti)	densità (1/m ²)
1	0.0161	20	944	6.1930
2	0.01	20	944	3.3828
3	0.0256	20	944	2.3782
4				



Aumentando progressivamente la distanza tra due rivelatori, la densità locale dello sciame assume valori minori. Con 4,5 m di distanza troviamo una densità diminuita di circa un fattore 2: possiamo assumere che la densità vada come il reciproco della radice della distanza (come osservato con misure a maggiori distanze da P.Auger). Una stima del raggio dello sciame si ottiene considerando la distanza alla quale la densità locale diventa pari a un ordine di

grandezza (1/10) più piccola di quella osservata a brevi distanze ($d \sim 1$ m). **Otteniamo così una stima del raggio dello sciame pari a 10^2 m.**

* * *

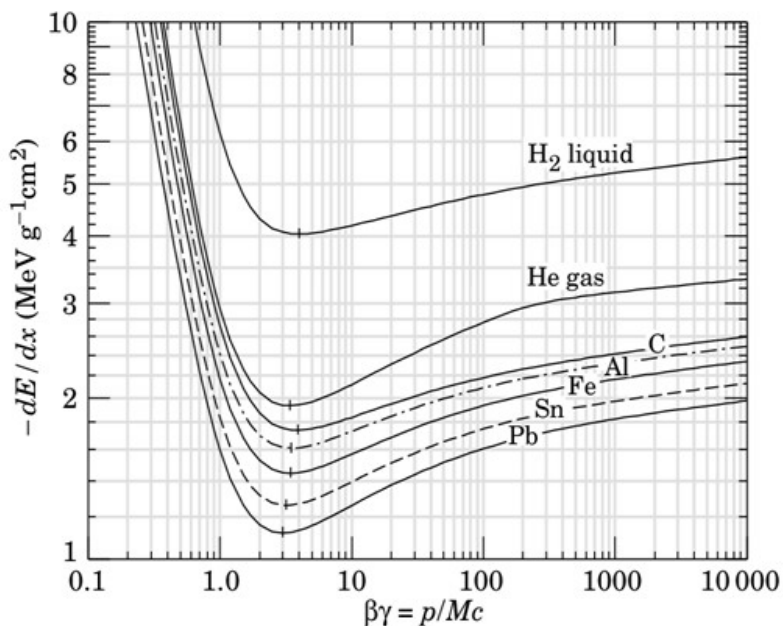
Il prossimo obiettivo è stimare l'energia degli sciame cosmici

Sappiamo che una particella, attraversando la materia, perde energia a causa delle interazioni con gli elettroni del materiale attraversato. L'idea è quindi quella di variare lo spessore del piombo tra due scintillatori ed effettuare conteggi. Per ogni spessore di piombo soltanto le particelle con un'energia sufficiente verranno conteggiate da entrambi gli scintillatori. Cerchiamo dunque di acquisire più informazioni su come le particelle perdono energia passando nel piombo.

La prima indicazione che possiamo ricavare sulla perdita di energia si ottiene studiando l'interazione con l'elettrone: quando la particella urta gli elettroni, gli trasferisce in un tempo Δt quantità di moto, quindi energia cinetica. Considerando che la massima interazione tra elettrone e particella avviene alla minima distanza, ad una distanza che chiameremo b , l'intervallo di tempo nel quale viene fornito un impulso ($\Delta P = F \cdot \Delta t$) agli elettroni è $\Delta t = 2b/v$. In questo tempo Δt l'elettrone acquista una energia cinetica pari a

$$\frac{1}{2} m_e v_e^2 = \frac{\Delta P^2}{2 m_e} = \frac{(F \cdot \Delta t)^2}{2 m_e} \sim \frac{1}{v^2}$$

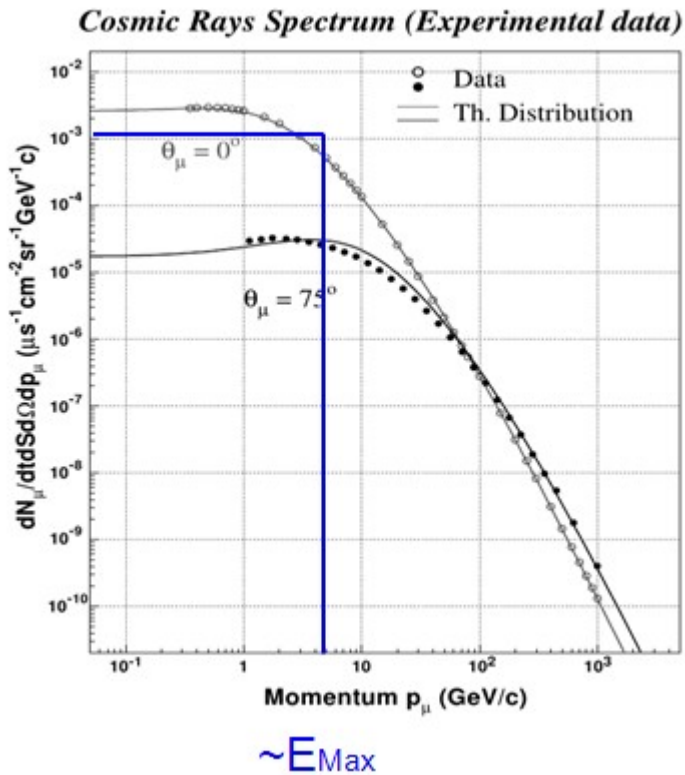
La perdita di energia della particella quindi diminuisce all'aumentare del quadrato della sua velocità, perché, essendo più breve il tempo di interazione, l'impulso fornito è minore.



Il grafico a sinistra esprime la perdita di energia per centimetro di materia, diviso la densità del materiale, (dE/dx) in funzione della velocità della particella, espressa in $\beta(v/c)$ dove v è la velocità della particella e c la velocità di propagazione di un'onda elettromagnetica nel vuoto). Notiamo che la curva che si ottiene è pressochè identica per tutti i materiali solidi e rispetta quanto detto: la perdita di energia dE/dx diminuisce all'aumentare della velocità. L'unità di misura sull'asse x è espressa in unità c : raggiunta la velocità della luce, dove dE/dx è minimo, la perdita di energia tende ad aumentare per effetti relativistici

secondo il fattore γ , in quanto la velocità della particella non può aumentare oltre c ma la sua quantità di moto p cresce insieme alla massa. A seguito di quanto detto, se consideriamo la particella come relativistica possiamo assumere dE/dx uguale al minimo, ossia 1,122. La

perdita di energia della particella, inoltre, è proporzionale alla densità del materiale: più elettroni incontra sulla sua traiettoria più perderà energia.



Date le considerazioni precedenti, per ogni diversa altezza del piombo avremo $\Delta E = (dE/dx) \rho_{Pb} h$, che ci dà 13 MeV/cm.

Facciamo ora l'ipotesi che la distribuzione in energia delle particelle che arrivano al rivelatore sia in prima approssimazione piatta fino a un valore E_{max} , ossia, per ogni intervallo di energia fino a un certo livello massimo, abbiamo lo stesso numero di particelle. Possiamo pensarla come un'approssimazione di ordine zero che ci serve giusto per stimare l'ordine di grandezza dell'energia caratteristica delle particelle dello sciame che arrivano al rivelatore. Questa ipotesi non è però tanto lontana dalla realtà, come si vede dal grafico che mostra la distribuzione in energia dei muoni cosmici.

Allora, se schermiamo con il Pb fino a una frazione E/E_{max} dell'energia massima, perderemo una uguale frazione di conteggi rispetto ai conteggi senza schermatura. Ci aspettiamo quindi un andamento proporzionale tra numero di conteggi e altezza del Pb.

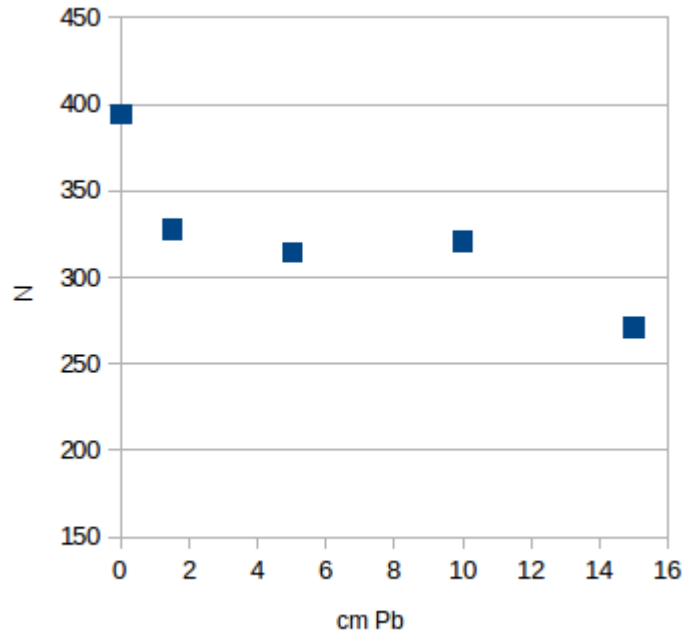
In altre parole, utilizzando due misure diverse possiamo ricavare E_{max} con una semplice proporzione:

$$\Delta N/N = \Delta E/E_{Max}$$

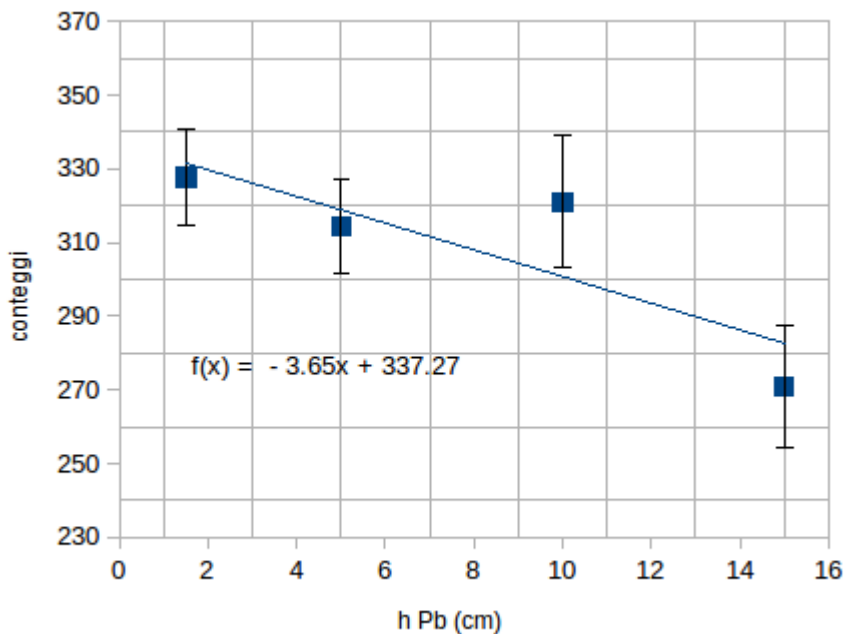


Abbiamo ottenuto i seguenti dati, con conteggi su $\Delta t=20$ min e $\Delta t=10$ min.

spessore Pb(cm)	n	errore
15	271	16,5
10	321	17,9
5	315	12,7
1,5	328	12,9
0	394	14,2



Notiamo che, come previsto, il numero delle coincidenze diminuisce in modo lineare all'aumentare dello spessore del piombo, con una probabile sovrafluttuazione per la misura a 10 cm, effettuata su un $\Delta t=10$ min. Una anomalia che emerge è la drastica diminuzione del numero di coincidenze passando da 0 a 1,5 cm. Questo calo delle coincidenze è dovuto alla presenza di una componente di particelle a bassa energia che, in assenza di materiale schermante tra i due scintillatori, vengono rivelate, causando un sovrannumero di conteggi. Questo non accade per le misure successive, perché già 1 cm di piombo è sufficiente a bloccare queste particelle. Questa componente a bassa energia è dovuta a una o più cause: poiché la misura è stata effettuata in un luogo chiuso, alcuni



cosmici possono interagire con il materiale del soffitto originando particelle secondarie con un'energia molto bassa; Lo sciame prodotto nell'atmosfera dai raggi cosmici è esso stesso formato da particelle di bassa energia, tipicamente fotoni ed elettroni. Converrà quindi fare un fit lineare dei conteggi da 2 cm di Pb in poi, come mostrato in figura.

Dobbiamo calcolare $\Delta N/N$, e scegliendo i valori di $h_1=1.5$ cm e $h_2=15$ cm, troviamo

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{3.65 \cdot (1.5 - 15)}{337 - 3.65 \cdot 1.5} = 15\%$$

Avremo poi $\Delta E = 13 \text{ MeV/cm} \times 13.5 \text{ cm} = 175 \text{ MeV}$, che ci dà $E_{\text{max}} = 1.2 \text{ GeV}$

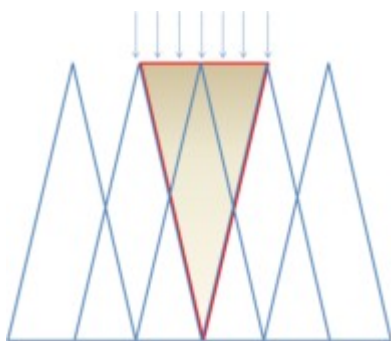
Possiamo ora effettuare una stima dell'energia totale di uno sciame. Dal momento che il valore di E_{max} trovato è solo un ordine di grandezza, possiamo considerarlo come l'energia caratteristica di ogni particella dello sciame. Possiamo allora calcolare l'energia totale dello sciame come somma delle energie delle sue singole particelle, e cioè come

$$\text{Energia Totale Sciame} \sim E_{\text{Max}} \pi R^2 \rho$$

dove $\pi R^2 \rho$ è infatti il numero di particelle che compongono lo sciame.

Eseguendo i calcoli (con l'estensione e la densità dello sciame ricavati in precedenza), troviamo $E_{\text{sciame}} = 10^4 \text{ GeV} = 10^{13} \text{ eV}$. Noi ci troviamo pressoché al livello del mare, possiamo quindi ipotizzare che il 90% dello sciame sia stato assorbito dall'atmosfera, con il che arriviamo a una **stima dell'energia del cosmico primario di 10^{14} eV** .

* * *



Vogliamo ora dare una stima del flusso dei primari in quota. Se prendiamo come raggio dello sciame al livello del mare $R=50\text{m}$, quindi una superficie di 10^4m^2 , inversamente le particelle che contiamo in un punto a terra possono provenire dai primari che in quota erano distribuiti su una uguale superficie. Noi abbiamo trovato conteggi tipici dell'ordine di 10/min, se li riportiamo a un anno e dividiamo per 10^4 m^2 , otteniamo una **stima per il flusso di primari:**
tra 10^2 e 10^3 primari/(m^2 anno) per energie tra 10^{13} e 10^{14} eV .