Misuriamo i raggi cosmici

**(DR: ci sarà una parte comune a tutti i percorsi (raggi cosmici, muoni, flussi, rate), ma qui ci può essere un richiamo sintetico come quello sotto riportato fino alla misura sperimentale)**

**Cosa dobbiamo misurare?**

I raggi cosmici primari (come già visto in *{link RCprimari\_nuova\_pagina}*) non riescono a raggiungere la superficie terrestre perché interagiscono (si scontrano) con gli atomi dell’atmosfera creando una cascata di particelle secondarie. Questi sciami di particelle secondarie durano pochi miliardesimi di secondo e, una volta arrivati a terra, possono coprire un’area di diversi chilometri quadrati. Tra le particelle cariche che arrivano a terra, i muoni sono quelli più facilmente misurabili. Nonostante risultino invisibili all’occhio umano, il metodo usato dai ricercatori, per evidenziarne il passaggio, consiste nel farle interagire con la materia sensibile (particolari materiali che diano un segnale elettrico o luminoso una volta che vengono attraversati da queste particelle). La registrazione di questi fenomeni fornisce ai ricercatori informazioni sul passaggio delle particelle e dell’energia che hanno rilasciato. Questa strumentazione prende il nome di rivelatore (detector in inglese). Il rivelatore utilizzato in questa esperienza è il CosmicRayCube (CRC - *{link pagina\_Attanasio}*).

**Muoni:**

Ricapitoliamo velocemente quali sono le caratteristiche delle particelle che andremo ad osservare, i muoni *{link parte comune muoni}*:.

* sono simili agli elettroni, ma hanno una massa 200 volte maggiore;
* attraversano materiali poco densi (come le pareti degli edifici e i nostri corpi) perdendo poca energia;
* ogni minuto veniamo attraversati da centinaia di muoni, essi contribuiscono alla dose di radioattività naturale a cui siamo soggetti;
* nonostante abbiano una vita media di 2.2 milionesimi di secondo, arrivano fino alla superficie della terra e si fermano dopo aver attraversato decine di metri sottoterra in strati di roccia.

**Ci sono molte misure fisiche possibili legate ai raggi cosmici:**

Con un semplice apparato sperimentale (semplice rispetto ai grandi rivelatori usati nello spazio o a terra *{link esperimenti INFN}*), il CRC, sono possibili diverse misure relative ai muoni dei raggi cosmici, come, ad esempio, la misura del rate dei muoni in funzione dell'angolo di arrivo, della quota/altezza dalla superficie terrestre, dello spessore di materia attraversato (aria, acqua, terreno, edifici)... Di seguito ci concentreremo sulla misura dell’intensità dei muoni in funzione dell’angolo di zenith.

**Misura del flusso di raggi cosmici in funzione dell’angolo di zenit**

Il flusso di muoni a terra non è uniformemente distribuito. Analizzando le direzioni di arrivo di queste particelle in funzione dell’angolo che esse formano con lo zenit locale, si scopre che il flusso massimo si ha per θ=0° ossia per particelle che arrivano perpendicolarmente alla superficie terrestre. Il flusso diminuisce continuamente all’aumentare dell’angolo tra la direzione di incidenza e lo zenit. A 90° il flusso è minimo. Come è spiegato in *Review of Particle Data* (1), la distribuzione dei valori misurati può essere descritta usando una funzione cos².

Diversi effetti sono responsabili di questo comportamento, tra questi, il cammino percorso dalle particelle cosmiche attraverso l’atmosfera (considerazioni geometriche e sulla vita del muone).



I muoni, prodotti a 15 km di altezza nell’atmosfera, sono il prodotto di decadimenti di altre particelle come pioni e kaoni prodotti nell’interazione tra i raggi cosmici primari e gli atomi nell’atmosfera. Come si vede da *{link Fabio}* facendo uso della sola interpretazione fisica classica, queste particelle non potrebbero arrivare a terra (visto che la loro vita è di solo 2,2 μs), ma l’interpretazione fornita da Einstein con la relatività speciale ci spiega come fanno i muoni, che si muovono a velocità prossime a quelle della luce, a percorrere tutta l’atmosfera fino ad arrivare alla superficie terrestre.

Quindi ci aspettiamo di vedere solo i muoni che riescono a percorrere lo strato di atmosfera prima del loro decadimento. Con angoli di incidenza elevati, rispetto allo zenit, la distanza dal luogo di origine dei muoni nell’atmosfera al rivelatore sulla superficie terrestre viene estesa. Con un angolo di incidenza di 90°, la distanza che il muone deve percorrere attraverso l’atmosfera fino alla superficie della terra è di circa 400 km (anziché 15 km). Solo pochi alti picchi di energia riescono a coprire questo percorso. In conclusione, maggiore è l’angolo dallo zenit, maggiore è la distanza percorsa, maggiore sarà la probabilità che i muoni decadano prima di raggiungere la superficie terrestre e quindi il flusso sarà minore.

LA MISURA DEI RAGGI COSMICI

Che cosa misuriamo con i nostri telescopi?

Di solito con i rivelatori usati per la divulgazione, come il CRC, misuriamo il numero di CONTEGGI in un certo tempo.

I raggi cosmici che misuriamo sono muoni, le particelle dello sciame che arrivano fino al livello del mare e che hanno un’energia media di circa 4 GeV (4000000000 eV cioè 4 x 109 eV).

Vedremo più avanti cosa intendiamo per conteggi, cioè come si misura il numero di muoni che attraversano il nostro rivelatore.

Cerchiamo prima di capire meglio cos’è il numero che otteniamo.

Di solito la misura dei raggi cosmici che arrivano a terra viene espressa in termini di FLUSSO di particelle.

Con i nostri rivelatori misuriamo il RATE dei conteggi cioè il numero di particelle che attraversano il rivelatore in un secondo.

* Il flusso *F* è definito come il numero di particelle *N* che attraversano una superficie *A* in un tempo *T* entro un angolo solido 𝜴, quindi:

\ F=\frac{N}{AT𝜴} [\]

Dove:

*A* è espressa in \*m^2(\)*

*T* in *s*

 𝜴 in *sr* (steradianti)

quindi *F* si esprime in [m-2 s-1 sr-1].

Il prodotto *Ax*𝜴 definisce l’ACCETTANZA di uno strumento o FATTORE GEOMETRICO cioè la regione in cui le particelle possono essere effettivamente rivelate.

Negli articoli scientifici si riporta che il flusso dei raggi cosmici a livello del mare è \approx(\) 70 m-2 s-1 sr-1, questo in pratica vuol dire che un rivelatore orizzontale di area pari a 1 cm2 è attraversato da circa un muone al minuto.

* Nel nostro caso misuriamo un numero N che ci dice quante particelle hanno attraversato complessivamente il rivelatore in un certo intervallo di tempo ΔT. Spesso nei grafici viene riportato il rate di conteggi cioè il rapporto tra il numero di conteggi e il tempo di misura:

\ R=\frac{N}{ΔT} [\]

e la misura è quindi espressa in hertz, Hz ([s-1]).

Per fare un esempio, se si stabilisce un intervallo di tempo in cui fare le misure pari a ΔT = 100 s, e si misura un numero di conteggi N pari a 60, allora il rate dei muoni è di 0.6 Hz.

COME MISURIAMO I MUONI

Come facciamo a misurare il numero di muoni che arrivano sul nostro strumento?

Di solito per la misura si utilizza un TELESCOPIO cioè un dispositivo costituito da un certo numero di rivelatori disposti in modo da selezionare le particelle provenienti da una certa direzione.

Come definisco la misura? Quando ho l’incremento del conteggio che mi dice che è passato un muone?

Qui entra in gioco il concetto di COINCIDENZA che in fisica sperimentale è un concetto molto importante.

Ogni singolo rivelatore ha un rate di conteggi casuali, dovuto al rumore elettronico intrinseco, che sovrasta il rate dei conteggi dovuti al passaggio dei muoni.

Per essere sicuri che il conteggio registrato sia dovuto effettivamente al passaggio di un muone, selezioniamo gli eventi in cui due o più rivelatori del nostro telescopio hanno registrato un segnale quasi simultaneamente (entro un intervallo di tempo dell’ordine di centinaia di nanosecondi). Per questi eventi si dice che si è avuta una coincidenza doppia (2 rivelatori hanno risposto simultaneamente) o tripla (3 rivelatori) o multipla (più rivelatori). In questo modo si escludono con alta probabilità i segnali casuali.

Le coincidenze vengono fatte da un particolare circuito elettronico che ha tanti ingressi, ognuno collegato a uno dei rivelatori del telescopio, e che, quando a ciascun ingresso è presente contemporaneamente (cioè entro un intervallo di tempo piccolo e fissato) un segnale proveniente dal corrispondente rivelatore, emette in uscita un impulso elettrico che va ad incrementare il nostro contatore.

In conclusione definisco sperimentalmente di aver visto un “muone” quando si verifica una coincidenza tra i piani del rivelatore.

In questo percorso vogliamo misurare l’intensità dei muoni in funzione

dell’angolo di provenienza, verificando se la legge 𝐈 = 𝐈𝟎𝐜𝐨𝐬𝟐(𝜽) è corretta

**LA TECNICA SPERIMENTALE**

L’Intensità di muoni incidenti può essere definita come il numero di particelle (muoni) al secondo (I=N/T)

• Prendo dati per un tempo T

• Conto il numero di particelle registrate

• Calcolo l’intensità I del flusso di particelle:

I = N / T (part/sec)

Esempio:

Prendo dati per 100 secondi (T=100 secondi)

Lo strumento registra N=1000 particelle

I = N / T = 1000/100 = 10 particelle/secondo

(inserire qualche spunto di ragionamento nel passaggio tra numero di muoni e tempo di conteggio-propagazione degli errori (obiettivo perché misuriamo per 100 sec e non per 10))

•Fissato un tempo, misurare la dipendenza dei conteggi dall’angolo di inclinazione;

• misurare a vari angoli (? Quali quanti). – L’angolo è uguale a quello di zenit? come è legato alla direzione di arrivo? quali sono gli errori che incidono sulla misura dell’angolo. Ci possono essere sistematiche?

**Raccolta dati:**

Per questa parte dell’esperienza è conveniente utilizzare un foglio di calcolo, puoi usare quello che preferisci o che usi già, per esempio excel, Calc o un foglio di lavoro google.

Noi li abbiamo inseriti in un foglio di lavoro google che trovi in: [shorturl.at/kvEO0](http://shorturl.at/kvEO0)

Quando sono presenti più misure dello stesso angolo. Come puoi stimare la misura? Tieni conto che alcune misure di N potrebbero riferirsi a tempi di acquisizione diversi (l’intervallo di conteggio è indicato tra parentesi nella legenda).

- *La migliore stima del valore vero è la media aritmetica dei valori ottenuti nelle varie misure*

riempi una tabella con i dati (theta, I )

Ogni misura sperimentale di una grandezza è affetta da un errore. Bisogna stimare l’errore delle singole misure. Nella prossima sezione ti forniamo qualche spunto di ragionamento.

**Errori e Limitazioni della misura** (breve discussione da mettere da parte?)

**Errori sistematici -** Un evento viene registrato se il segnale misurato da tutti i pieni di misura avviene entro una finestra temporale. Quando il rivelatore è orientato verso lo zenit solo muoni provenienti dall’alto possono attraversare il rivelatore perché la terra agisce da filtro. Quando il sistema di rivelazione viene ruotato sempre più muoni “orizzontali” possono attraversare il rivelatore in entrambe le direzioni, tuttavia l’angolo di apertura del rivelatore risente dell’effetto di filtro della terra.

La misura di theta che viene fornita è quella dell’angolo tra lo zenith e l’asse dello strumento. E se il rivelatore non fosse perfettamente perpendicolare al terreno? Come potresti verificarlo dai tuoi dati?

**Errori statistici**

“La misura dei muoni corrisponde ad un processo poissoniano”. Gli istogrammi di misure ripetute mostrano un andamento a campana in cui le caratteristiche principali sono la posizione del massimo e la larghezza della campana. Cioè si può sintetizzare l’insieme delle nostre misure con due numeri: un parametro di posizione e un parametro di larghezza o dispersione. Il primo ci dà il valore più plausibile della misura, mentre il secondo indica l’incertezza sulla singola misura.

Noi misuriamo il numero di raggi cosmici che provengono dallo spazio nello stesso intervallo di tempo. Se ripetiamo la misura diverse volte, non otteniamo sempre lo stesso risultato ma possiamo fare delle considerazioni di carattere statistico cioè possiamo dire quale è la probabilità di avere un certo risultato.

La distribuzione di probabilità che descrive, con buona approssimazione, i fenomeni di conteggio di raggi cosmici è la distribuzione di POISSON ( *link pagina\_statistica*).

La distribuzione di probabilità di Poisson si applica quando si ha a che fare con eventi rari riferiti ad uno specifico intervallo di tempo. In particolare si ricorre a questa distribuzione statistica quando:

· Il verificarsi di un evento in un certo intervallo di tempo non ha alcun effetto sulla sua probabilità di verificarsi una seconda volta nello stesso intervallo di tempo o in un altro (eventi indipendenti);

· la probabilità che un evento si verifichi in un certo intervallo di tempo cresce proporzionalmente al crescere dell’intervallo di tempo stesso;

· la probabilità che un evento si verifichi più volte nello stesso intervallo o in una parte di esso è trascurabile. Cioè ci si deve aspettare una Poissoniana ogni volta in cui il numero di eventi possibili è grande ma quelli che in media si verificano sono rari.

Il modo più immediato di ottenere il parametro di posizione è con la media aritmetica, per il parametro di dispersione invece si considerano gli “scarti” cioè quanto ogni singola misura devia rispetto al valore medio e si definisce la deviazione standard.

L’errore statistico associato a questo tipo di distribuzione è √N, dove N è il numero di eventi per ogni misura.

- *L’errore statistico della misura dei conteggi, (segue la statistica di Poisson) è pari alla radice quadrata del numero di conteggi (/T cosa misura il CRC?)*

- *La migliore stima del valore vero è la media aritmetica dei valori ottenuti nelle varie misure*

*Se volessimo avere errori relativi confrontabili per ogni misura cosa potremmo fare durante la misura?*

**ANALISI DEI DATI**

1. Calcolare l’intensità del flusso di particelle cosmiche: I = N / T (part/sec)

2. Disegnare il grafico: intensità (asse Y) in funzione di inclinazione theta (asse x)

Ma cosa ci aspettiamo? (dipendenza da cos2(theta))

Può essere pratico anche calcolare altre grandezze

cos2(theta))

Cosa aspettarsi in un grafico intensità Vs cos2(theta) …

I dati sono approssimabili ad una retta? Calcola la regressione lineare.

***Inserire qualche considerazione sull’accettanza geometrica?***

*Approfondimento con la formula di Sullivan?*

***Fare una serie di domande che suggeriscano la problematica!***

***Mostrare la soluzione analitica con la regressione lineare? App calcolo***

**Bibliografia**

(1) C. Patrignani et al. (Particle Data Group), Chinese Physics C, 40, 100001 (2016): *Review of Particle Physics -29. Cosmic Rays.*