

# Descrizione dell'accettanza geometrica del Cosmic Ray Cube e distribuzione dell'angolo zenitale per le misure inclinate a 0, 15, 30, 45 e 60 gradi

S. X. Di Febbo<sup>1\*</sup>, N. Capponcelli<sup>1</sup> and V. Pugliese<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Liceo Scientifico G. Galilei, Napoli, Italia

\*E-mail: difebbo.sofiaxinya@liceogalileinapoli.edu.it

**Abstract.** Il progetto OCRA (Outreach Cosmic Ray Activities) è un progetto che vede la partecipazione di 26 sedi locali dell'INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) ed è dedicato a docenti di matematica e fisica e studenti della scuola superiore di secondo grado. L'obiettivo è scoprire cosa sono i raggi cosmici, da dove provengono e, in particolare, studiare il flusso dei muoni che compongono i raggi cosmici. Gli studenti, guidati dai ricercatori, utilizzano il CRC (Cosmic Rays Cube), un rivelatore di muoni portatile, per svolgere un'attività sperimentale di presa dati e analisi. In particolare quest'articolo approfondisce la descrizione dell'accettanza geometrica del CRC e il modo in cui varia la distribuzione dell'angolo  $\theta$  al variare dell'inclinazione del CRC.

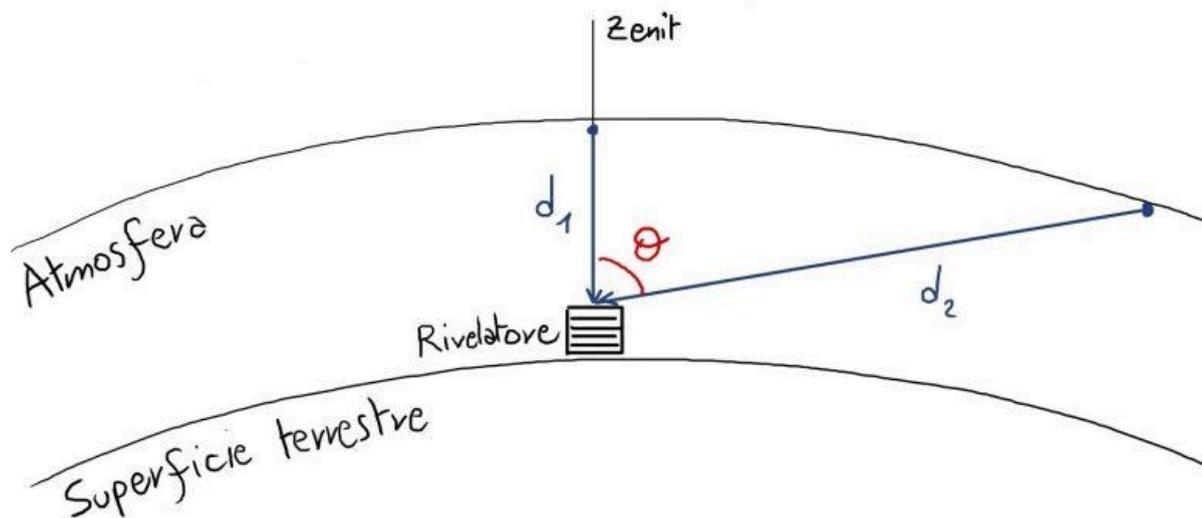
## 1. Introduzione

I raggi cosmici sono particelle e nuclei atomici di alta energia che, muovendosi quasi alla velocità della luce, colpiscono la terra da ogni direzione. La loro origine è ancora oggi incerta, anche se si ritiene che gran parte di essi siano prodotti nelle esplosioni di supernovae, eventi in grado di accelerare particelle ad altissime energie e diffonderle in tutte le direzioni nello spazio. I raggi cosmici che colpiscono lo strato esterno dell'atmosfera sono detti "raggi cosmici primari" e sono principalmente protoni di alta energia. Nel loro rapido viaggio verso la superficie terrestre, essi collidono con gli atomi dei gas atmosferici, creando, attraverso uno spettacolare processo moltiplicativo, cascate di nuove particelle ed antiparticelle che costituiscono i "raggi cosmici secondari". Al livello del mare le particelle secondarie, più facilmente misurabili, sono i muoni. Queste particelle sono simili agli elettroni, ma hanno una massa 200 volte superiore. Il muone, inoltre, è una particella caratterizzata da una vita media di circa 2 milionesimi di secondo, passato questo tempo dalla loro creazione, decade ossia scompare e al suo posto appaiono altre tre particelle: un elettrone e due neutrini. [1]

Il flusso di muoni è misurato in funzione dell'angolo d'arrivo e non è uniformemente distribuito sul terreno. 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  $\theta = 0^\circ$  ossia per particelle che arrivano perpendicolarmente alla superficie terrestre. Il flusso diminuisce

continuamente all'aumentare dell'angolo theta tra la direzione di incidenza e lo zenit. A  $90^\circ$  il flusso è minimo e la distribuzione dei valori misurati può essere descritta con una funzione  $\cos^2(\theta)$ . [2]

Ciò accade perché i muoni che arrivano perpendicolarmente alla superficie della Terra percorrono la distanza più breve nell'atmosfera, mentre per angoli di incidenza elevati rispetto allo zenit la distanza da percorrere è più lunga. (Fig. 1) Maggiore è l'angolo  $\theta$ , maggiore è la distanza percorsa e maggiore è la probabilità che i muoni decadono prima di raggiungere la superficie terrestre. Il flusso di muoni è, di conseguenza, inferiore. [3]



**Figura 1.** Rappresentazione dei cammini ( $d_1$  e  $d_2$ ) effettuati da due muoni prodotti in atmosfera e diretti verso il rivelatore posto sulla superficie terrestre.

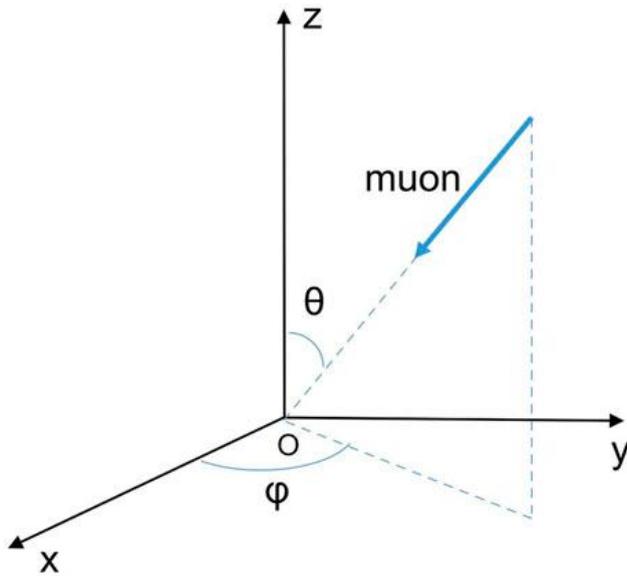
### 1.1 International Cosmic Day

Il 26 novembre, in occasione della “Giornata internazionale dedicata ai raggi cosmici”, abbiamo analizzato i dati raccolti utilizzando il CRC. Abbiamo misurato il flusso dei muoni, che vengono prodotti quando i raggi cosmici interagiscono con l’atmosfera, e cercato di capire come dipende dalla direzione di origine. I muoni, a livello del mare, sono in numero di diverse centinaia per secondo per metro quadrato di superficie. Attraverso l’analisi dei dati raccolti abbiamo capito che la velocità del muone dipende dall’angolo zenit. Questa attività ci ha avvicinati al mondo della ricerca scientifica, accompagnandoci tra i misteri dell’Universo racchiusi nei raggi cosmici.

## 2. Metodi di ricerca

Durante la fase di analisi dati si osserva che per determinare la traiettoria 3D della particella all’interno del Cosmic Ray Cube, una volta determinate le funzioni:

- $x = m_{zx} + q_x \rightarrow$  retta che determina la proiezione della traiettoria del muone sul piano ZX
  - $y = m_{zy} + q_y \rightarrow$  retta che determina la proiezione della traiettoria del muone sul piano ZY
- da queste è possibile determinare gli angoli  $\theta$  e  $\varphi$  sfruttando le coordinate polari. (Fig. 2)



**Figura 2.** Rappresentazione della direzione di un muone al livello del mare e formazione degli angoli theta  $\theta$  e phi  $\varphi$  .

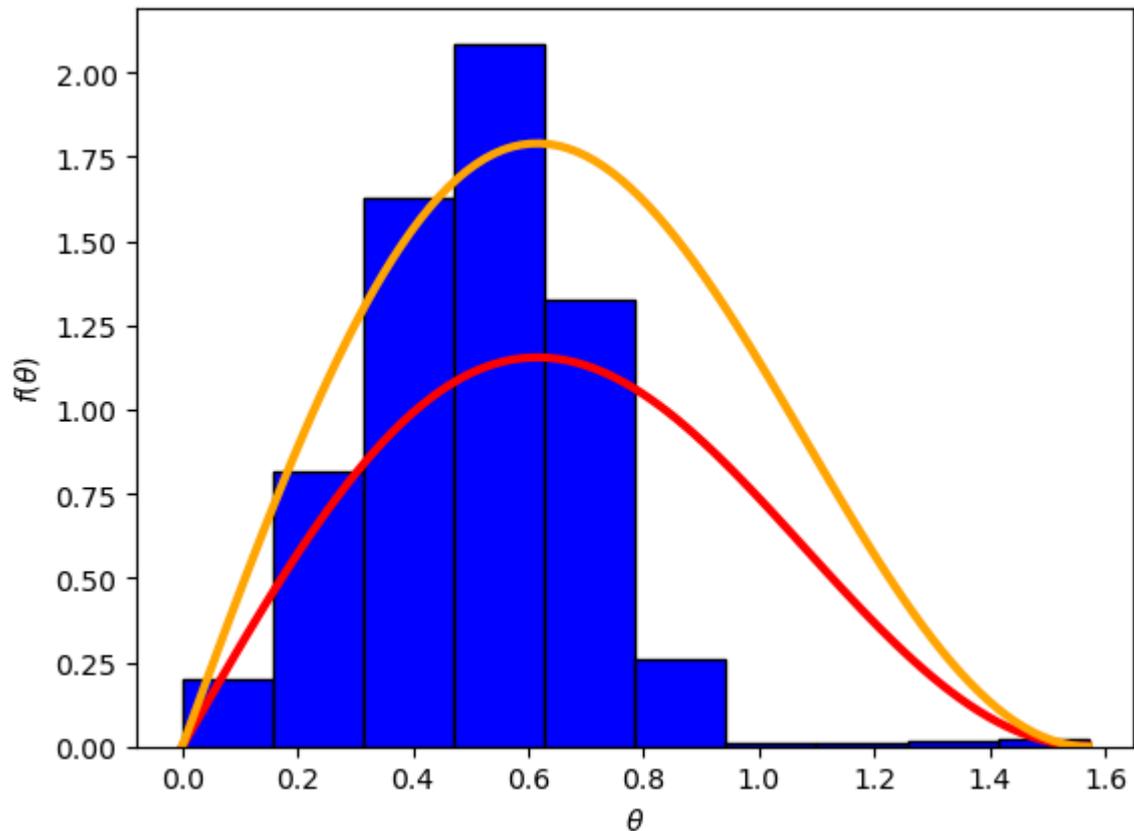
Come mostrato nella figura 2, il piano xOy è a livello del mare e l'asse z è perpendicolare al livello del mare. L'angolo phi  $\varphi$  è definito come l'angolo tra la proiezione della direzione di un muone sul piano xOy e l'asse x, mentre l'angolo theta  $\theta$  è definito come l'angolo tra l'asse z e la direzione di un muone. Quest'ultimo è l'angolo di zenith che indica quanto la retta è inclinata rispetto alla perpendicolare al CRC.

Utilizzando dati raccolti sperimentalmente abbiamo calcolato il valore degli angoli theta e phi utilizzando le seguenti formule:

$$\theta = \arccos \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{mzx^2} + \frac{1}{mzy^2} + 1^2}} \quad \varphi = \arctan2(mzx, mzy)$$

### 3. Risultati

Osserviamo che la distribuzione degli angoli theta dei muoni raccolti mostra un picco a  $30^\circ$ . Questo dato era prevedibile in quanto la geometria dei rivelatori come il Cosmic Ray Cube limita lo spazio di fase angolare. A causa della loro forma cubica i rivelatori registrano soltanto una piccola parte dei muoni che colpiscono lo strumento ovvero quelli che giungono ad un inclinazione che va da  $0^\circ$  a  $45^\circ$  con un picco a  $30^\circ$ , che corrispondono a 0,5 radianti. (Fig. 4). La probabilità che il muone colpisca almeno 4 piani diminuisce al crescere dell'angolo di incidenza per un puro fattore geometrico.

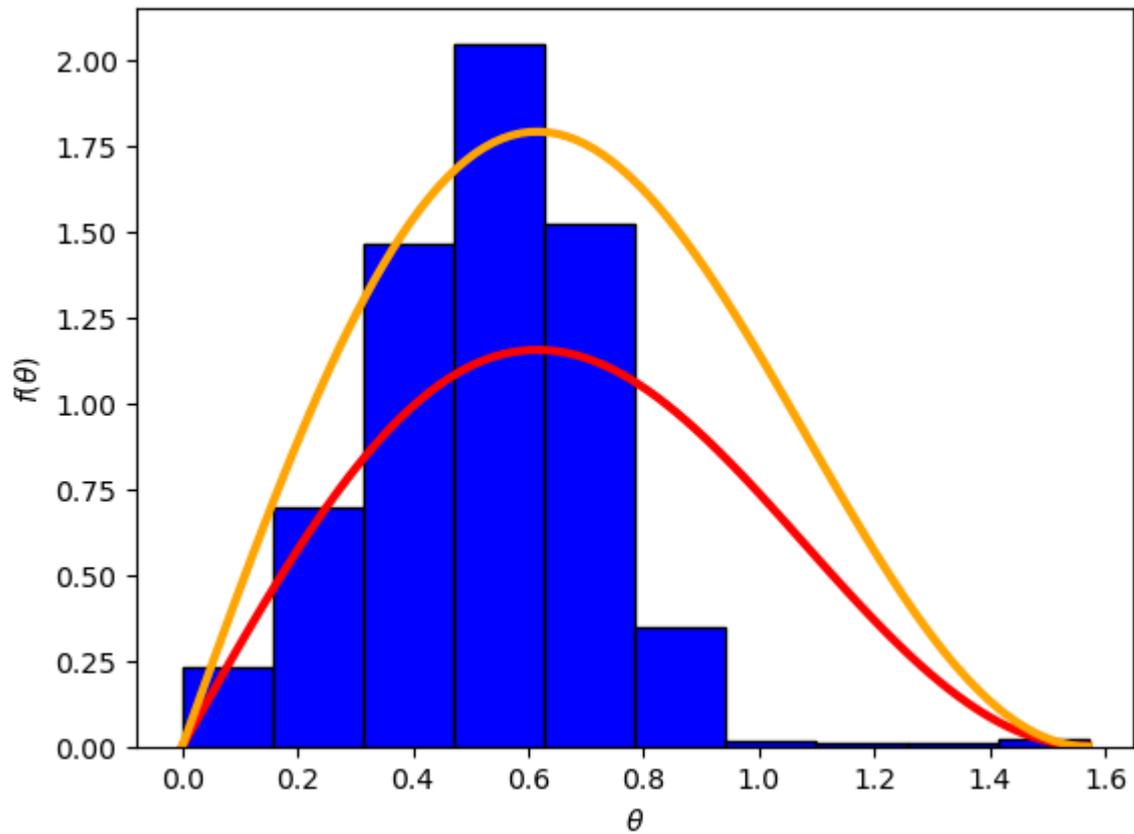


**Figura 3.** Grafico che esprime il flusso di muoni che vengono rivelati dal Cosmic Ray Cube inclinato di  $0^\circ$  al variare dell'angolo theta espresso in radianti.

Dal grafico in figura 3 è evidente come il flusso di muoni presenti un picco a  $30^\circ$  (corrispondenti a 0,5 radianti) e che vengano rilevati muoni principalmente in un intervallo che va da  $0^\circ$  (corrispondenti a 0 radianti) e  $45^\circ$  (corrispondenti a 0,8 radianti)

Per un flusso omogeneo di muoni attraverso la superficie di uno scintillatore con simmetria rotazionale intorno alla direzione verticale, il fattore geometrico o l'accettanza geometrica è definita come:

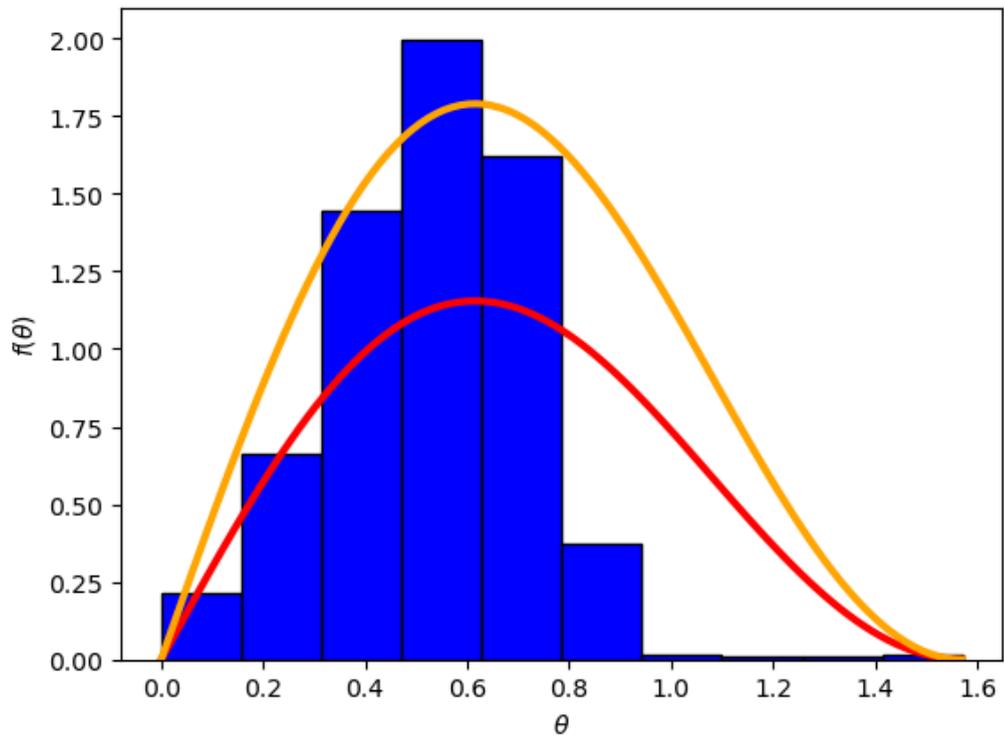
$$g = \frac{\text{flusso di muoni che attraversa lo scintillatore superiore e inferiore}}{\text{flusso di muoni attraverso lo scintillatore superiore}} \quad [4]$$



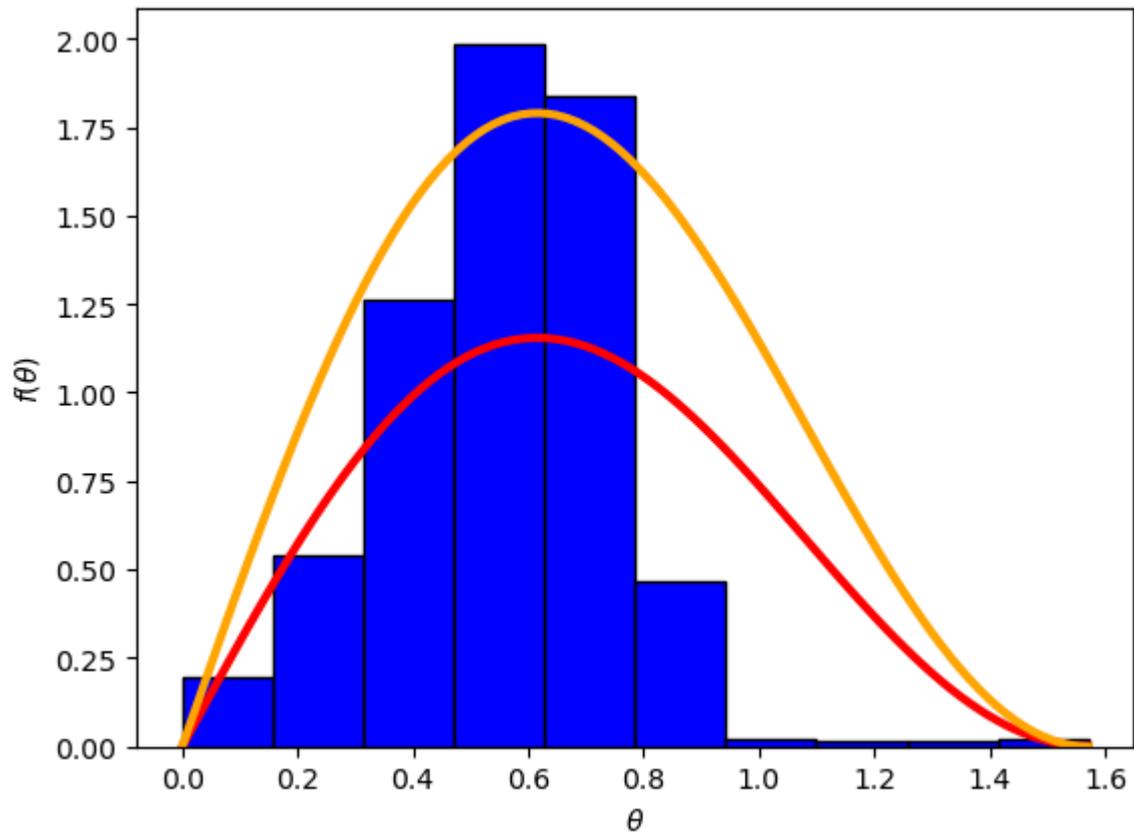
**Figura 4.** Grafico che esprime il flusso di muoni che vengono rivelati dal Cosmic Ray Cube inclinato di  $45^\circ$  al variare dell'angolo theta espresso in radianti.

Dal grafico in figura 4, si osserva che al variare dell'inclinazione del Cosmic Ray Cube la distribuzione in theta non cambia, cioè si registrano sempre eventi da  $0^\circ$  a  $45^\circ$  con un picco a  $30^\circ$ .

Stessa cosa accade anche se incliniamo il CRC di  $30^\circ$  (Fig. 5) oppure se incliniamo il rivelatore di  $60^\circ$  (Fig.6).

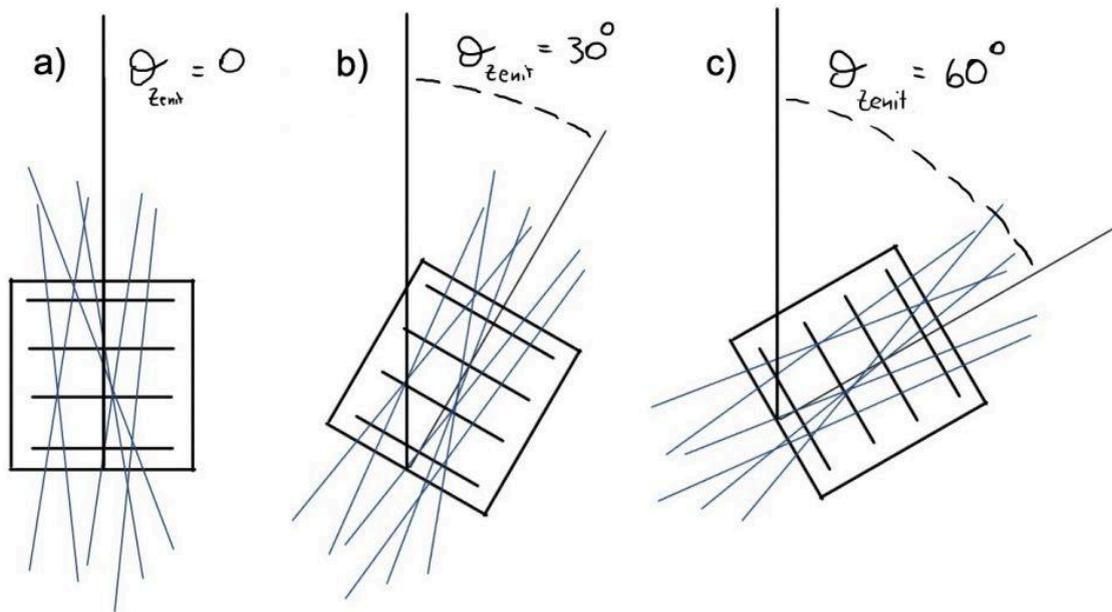


**Figura 5.** Grafico che esprime il flusso di muoni che vengono rivelati dal Cosmic Ray Cube inclinato di  $30^\circ$  al variare dell'angolo theta espresso in radianti.



**Figura 6.** Grafico che esprime il flusso di muoni che vengono rivelati dal Cosmic Ray Cube inclinato di  $60^\circ$  al variare dell'angolo theta espresso in radianti.

Ciò si verifica perché l'angolo theta che stiamo descrivendo è solidale all'asse del telescopio e la porzione di angolo solido che osserviamo è sempre la stessa. (Fig. 7)



**Figura 7.** Flusso di muoni che viene rilevato dal Cosmic Ray Cube al variare dell'angolo di inclinazione dello strumento

Il rivelatore, inizialmente posizionato con l'asse parallelo allo zenit locale (a), viene inclinato ad angoli via via sempre maggiori:  $30^\circ$  (b),  $60^\circ$  (c). In questo caso, possiamo non considerare l'accetanza del rivelatore perché inclinandolo coerentemente con l'intervallo angolare che vogliamo misurare, i muoni con l'angolo d'incidenza richiesto vedranno sempre la stessa area.

#### 4. Conclusione

In questo articolo abbiamo approfondito lo studio della traiettoria del flusso di muoni che viene rilevato dal Cosmic Ray Cube concentrandoci sulla sua traiettoria. Attraverso un'analisi dati abbiamo calcolato l'angolo theta e l'angolo phi che ci hanno permesso di tracciare una retta che rappresenti in maniera approssimata la direzione dei muoni. Grazie allo studio dell'angolo theta abbiamo compreso come la costruzione geometrica del Cosmic Ray Cube condizioni l'accetanza geometrica dello strumento e, dunque, il numero di muoni che vengono rilevati. In base ai dati raccolti abbiamo osservato come la distribuzione di theta non varia al variare dell'inclinazione del Cosmic Ray Cube poiché la porzione di angolo solido che osserviamo è sempre la stessa. Questa attività ci ha portato molto più vicino al mondo della ricerca scientifica. La storia della ricerca sui raggi cosmici è una vera e propria avventura e per noi è stato importante averne fatto parte.

#### Bibliografia

[1] INFN - Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

[2] "The online laboratories for OCRA - Outreach Cosmic Ray Activities INFN project" for the Ocra Collaboration, Carla Aramo et al. (2021)

[3] Analyzing cosmic-ray muons in the experimental paths of the “Mathematical High School” Project - C. Aramo, R. Colalillo, F.S. Tortoriello, I. Veronesi (2023)

[4] Lateral distribution of cosmic ray muons underground: Results from the CosmoALEPH Experiment - Tcaciuc, Rodica (Siegen U.) - (2006)