

Il Cosmic Ray Cube e il telescopio per muoni cosmici della metropolitana di Toledo: misure a confronto

Emilia Lobasso, Lorenzo Pucci, Viola Volpe

4A, Liceo Scientifico Galileo Galilei, Napoli

volpe.viola@liceogalileinapoli.edu.it

lobasso.emilia@liceogalileinapoli.edu.it

pucci.lorenzo@liceogalileinapoli.edu.it

I muoni sono particelle subatomiche cariche che si formano nell'atmosfera superiore attraverso l'interazione dei raggi cosmici con i nuclei atomici nell'alta atmosfera. Queste particelle, pur avendo una vita media relativamente breve, riescono a raggiungere la superficie terrestre a causa della loro velocità estremamente elevata, e vengono spesso utilizzate in esperimenti di fisica delle particelle, come quelli legati alla rivelazione e alla misurazione della radiazione cosmica. In questa relazione svolgeremo un'analisi comparativa delle misurazioni dei raggi cosmici effettuate da due diversi rivelatori, il Cosmic Ray Cube (CRC) e il telescopio di Toledo, con particolare attenzione ai dati raccolti per raggi incidenti perpendicolarmente ($\theta = 0^\circ$, $\phi = 0^\circ$), al fine di valutare la coerenza, la calibrazione e l'affidabilità dei due strumenti. Nel contesto della misurazione è importante considerare che diversi fattori ambientali e strutturali possano influenzare i risultati delle osservazioni.

1. Introduzione

I raggi cosmici sono particelle ad alta energia provenienti dallo spazio, principalmente protoni e nuclei leggeri, che interagendo con l'atmosfera terrestre generano sciame di particelle secondarie rilevabili al suolo. In questo lavoro analizzeremo i dati raccolti da due strumenti: il Cosmic Ray Cube (CRC) e il telescopio per raggi cosmici di Toledo. Il CRC, grazie alla misura degli angoli zenitale (θ) e azimutale (ϕ), fornisce una rappresentazione tridimensionale del flusso di particelle. Il telescopio di Toledo, pur simile, ha una configurazione e sensibilità diverse. L'obiettivo è confrontare i dati di entrambi i rivelatori per $\theta = 0^\circ$ e $\phi = 0^\circ$, condizione ideale per valutare l'affidabilità e la calibrazione degli strumenti.

1.1 Fattori strutturali

Il rivelatore della stazione di Toledo installato sotto 40 m di roccia può rivelare la presenza di muoni che hanno una massa 200 volte quella dell'elettrone e che vivono solo 2.2 us. Esso è simile al Cosmic Ray Cube, ma rispetto ai 4 piani del CRC è costituito da 10 piani, realizzati da bacchette di materiale scintillante plastico che emette un debole impulso di luce quando è attraversato da particelle cariche come i muoni. Le barre sono disposte ortogonalmente tra loro sul piano orizzontale (direzione x e y) ed ognuna è otticamente accoppiata con una fibra ottica ad un fotomoltiplicatore a silicio che assorbe la luce emessa dallo scintillatore e la trasforma in un segnale elettrico che, attraverso una scheda di elettronica, rileva il passaggio della particella carica. Quando un muone attraversa il telescopio, viene quindi

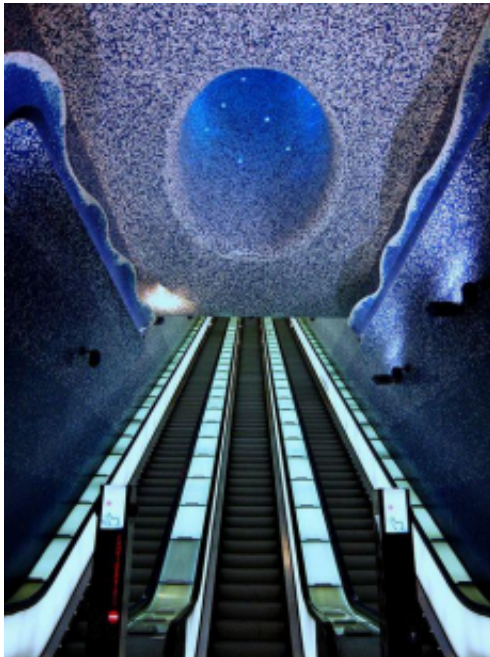
visualizzata una traccia luminosa tramite i 200 LED presenti (Fig.1).

Inoltre, il telescopio è accoppiato ad un Totem touchscreen multimediale che permette l'acquisizione dei dati del telescopio tramite una connessione seriale, la ricostruzione della direzione di provenienza dei muoni e la visualizzazione della loro traccia sullo schermo (Fig.2). Richiedendo che almeno su sei piani del telescopio ci sia un LED acceso, si ottiene una rate di 4 eventi al minuto.



1.2 Fattori ambientali

Il CRC a 0° opera in condizioni di campo aperto, ma la sua misurazione potrebbe essere influenzata da variabili come la posizione geografica e la profondità del sito, situato in un'area priva di ostacoli significativi. Al contrario, il telescopio di Toledo, potrebbe essere influenzato dalla collina del Vomero o dal foro sul soffitto della stazione.



Tali fattori possono influire sulla propagazione delle particelle e sulla calibrazione degli strumenti, creando potenziali discrepanze tra i dati ottenuti dai due dispositivi.

2. Metodi di ricerca

I dati utilizzati per questa analisi sono stati ottenuti dal sito web OCRA, tramite un *notebook* di Google Collab utilizzando il linguaggio di programmazione Python; seguendo attentamente i passaggi dell'analisi riportati nel *notebook* abbiamo ottenuto un che fornisce le informazioni sulle direzioni di arrivo dei muoni rilevati dal telescopio di Toledo.

Per analizzare tanti dati, li suddividiamo in intervalli che ci aiutano a organizzarli e

interpretarli meglio. In questo caso, abbiamo separato gli eventi di arrivo dei muoni in base alla loro inclinazione, creando intervalli di angoli e contando quanti eventi ci sono in ogni intervallo.

Questo processo è chiamato distribuzione di frequenze. Per visualizzare i dati, usiamo un istogramma, un grafico in cui gli intervalli di valori sono sulle ascisse (X) e le frequenze sulle ordinate (Y). Un aspetto importante è il binning, che consiste nel decidere quanti e quali intervalli usare. Dopo aver creato l'istogramma, cerchiamo una curva che si adatti meglio ai dati; un metodo comune per farlo

è il best fit, cioè trovare la curva che si avvicina di più ai dati.

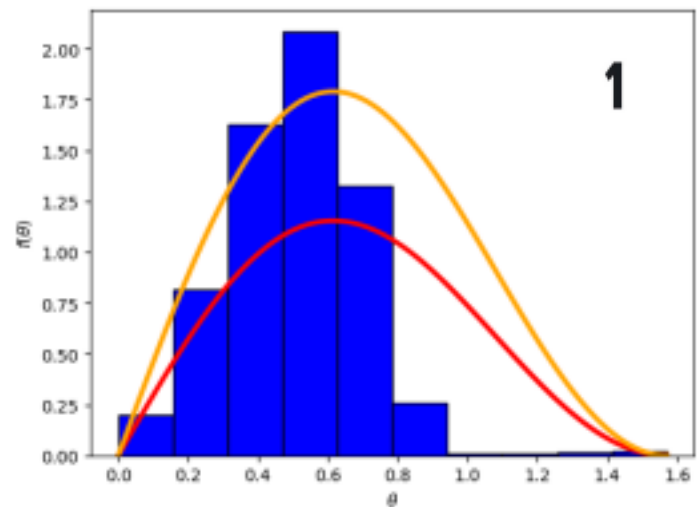
3. Risultati

3.1 Confronto tra i grafici di θ a 0° del CRC e del telescopio di Toledo

Nella **figura 1** (theta a zero gradi) notiamo come:

L'**asse delle ascisse** (x) rappresenta l'angolo di inclinazione dei muoni rispetto a un riferimento, cioè l'asse (o orientamento) del rivelatore. Esso è riportato in radianti.

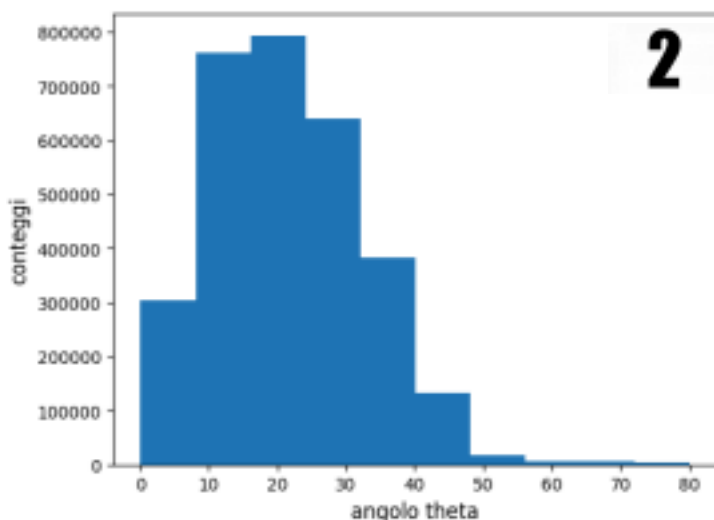
L'**asse delle ordinate** (y) rappresenta la distribuzione angolare, ovvero fornisce informazioni su come i muoni, che passano attraverso il CRC, si distribuiscono in base all'angolo rispetto a un riferimento fisico (come la direzione di incidenza).



Il **picco massimo** che appare al centro del grafico rappresenta l'angolo in cui il flusso di muoni è massimo; indica dunque che c'è una maggiore concentrazione di muoni in quella direzione angolare (circa $34,39^\circ$). Un picco centrale suggerisce che il rivelatore è più ottimizzato o più efficiente in quella direzione.

I **minimi** indicano angoli in cui il flusso di muoni è minimo. Potrebbero esserci angoli specifici per cui il numero di muoni rilevati è ridotto, per esempio, a causa di fenomeni di geometria (angoli fuori dalla direzione ottimale di rilevamento), oppure a causa di effetti fisici come l'assorbimento o il blocco dei muoni. Questi picchi minimi potrebbero anche suggerire una configurazione in cui il rivelatore non è particolarmente sensibile o non è allineato in modo favorevole rispetto al flusso di muoni.

Le due curve rappresentano invece i diversi andamenti dell'**accetanza geometrica**; essa si riferisce alla capacità di un sistema o di un rivelatore di "rilevare" particelle o eventi che attraversano una determinata area, ed è legata alla geometria del sistema di rilevamento. In altre parole, descrive quanto "grande" è l'area in cui un determinato evento (ad esempio, un muone) ha la possibilità di essere osservato.



Nella **figura 2** (theta a zero gradi del telescopio di Toledo) notiamo come:

L'**asse delle ascisse** (x) rappresenta l'angolo di inclinazione dei muoni rispetto a un riferimento, riportato in questo caso in gradi.

L'**asse delle ordinate** (y) rappresenta il conteggio dei muoni che attraversano una determinata area rispetto all'inclinazione del sistema (nel nostro caso 0°).

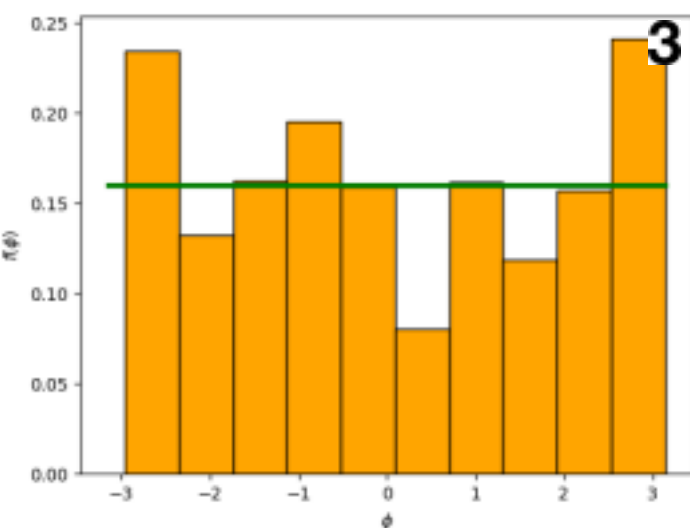
Rispetto al grafico precedente, il picco

massimo appare spostato verso sinistra (poco più di 20°).

Questo potrebbe esser dovuto a vari motivi:

- La **geometria del rilevatore**: La posizione del picco può dipendere da come è progettato il rilevatore. Ogni rilevatore ha una "accettanza geometrica" che può essere diversa a seconda dell'orientamento e della costruzione.
- L'**angolo di osservazione** rispetto alla superficie terrestre: il CRC potrebbe essere posizionato in un posto dove i muoni arrivano con un angolo maggiore rispetto al telescopio di Toledo.
- La **profondità** (o l'altitudine) del telescopio può influenzare il percorso dei muoni, poiché a diverse altitudini la densità atmosferica cambia, alterando la propagazione dei muoni attraverso l'atmosfera. Anche la **presenza di mare e rilievi** e in generale le condizioni atmosferiche possono alterare la densità atmosferica in quella zona e la probabilità di interazione dei muoni nell'atmosfera.
- La **dimensione** e la **configurazione** del telescopio e del CRC, che potrebbero raccogliere muoni da angoli differenti.

3.2 Confronto tra i grafici di Φ a 0° del CRC e del telescopio di Toledo



Nella **figura 3** (phi a zero gradi del CRC) notiamo come, similmente alla figura 1:

L'**asse delle ascisse** (x) rappresenta l'angolo di inclinazione dei muoni rispetto a un riferimento, riportato in radianti.

L'**asse delle ordinate** (y) rappresenta la distribuzione angolare, come i muoni, che passano attraverso il CRC, si distribuiscono in base all'angolo rispetto a un riferimento fisico (come la direzione di incidenza).

Rispetto al grafico precedente, notiamo come in questo caso i **picchi massimi** siano agli estremi; ciò indica una maggiore concentrazione di muoni in quella direzione angolare o potrebbe suggerire che il rilevatore è più sensibile agli angoli estremi.

Il **picco minimo**, circa al centro del grafico, è posto in questo caso intorno ai 30° , diversamente rispetto al grafico della figura 1. La distribuzione è però in questo caso più lineare e simmetrica.

La linea raffigurata è inoltre una linea di distribuzione che indica l'andamento generale del grafico.

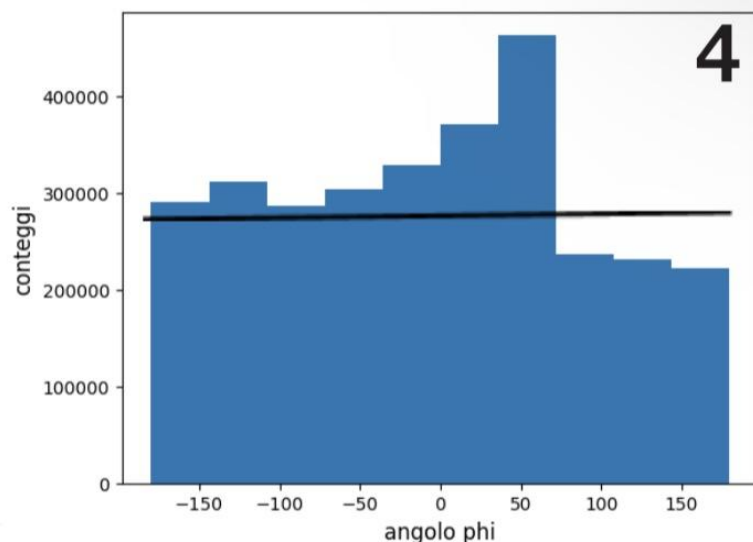
Nella **figura 4** (phi a zero gradi del telescopio di Toledo), notiamo come, similmente alla figura 2: L'asse delle ascisse (x) rappresenta l'angolo di inclinazione dei muoni rispetto a un riferimento, riportato in questo caso in gradi.

L'asse delle ordinate (y) rappresenta il conteggio dei muoni che attraversano una determinata area rispetto all'inclinazione del sistema (nel nostro caso 0°).

Rispetto al grafico precedente, abbiamo un solo picco massimo più centrale (poco più di 50°), dopo il quale si va via via diminuendo fino al picco minimo (poco più di 150°). Anche in questo caso, come nella figura 3, l'andamento generale è abbastanza lineare rispetto ai grafici di theta. Noi abbiamo provato a ipotizzare una linea di distribuzione che mostrasse in maniera più evidente l'andamento generale del grafico.

Come abbiamo visto nella figura 2, le motivazioni di tali differenze potrebbero essere dovute a:

- La **geometria del rilevamento** del CRC e del telescopio di Toledo;
- Le caratteristiche specifiche di **accettanza geometrica** e la sensibilità angolare;
- Le **condizioni atmosferiche locali** e la **posizione geografica** dei telescopi.



4. Conclusione

Dall'analisi dei dati raccolti attraverso il CRC e il telescopio di Toledo, emerge un chiaro quadro della distribuzione angolare dei muoni in relazione alla geometria dei rivelatori e alle condizioni ambientali. I grafici mostrano differenze significative tra i due dispositivi, attribuibili principalmente a fattori strutturali e ambientali.

Nel caso del CRC, i picchi centrali e i minimi angolari suggeriscono che il rivelatore è ottimizzato per rilevare muoni in una direzione angolare specifica ($\sim 34,39^\circ$), con la sua efficienza variabile a seconda della geometria e della sensibilità angolare. Al contrario, il telescopio di Toledo mostra un picco massimo spostato verso angoli inferiori ($\sim 20^\circ$), il che potrebbe essere spiegato dalla diversa posizione geografica, altitudine e configurazione del dispositivo. Le condizioni geografiche, come la presenza di mare e rilievi, influenzano la propagazione dei muoni, creando variazioni nei dati osservati.

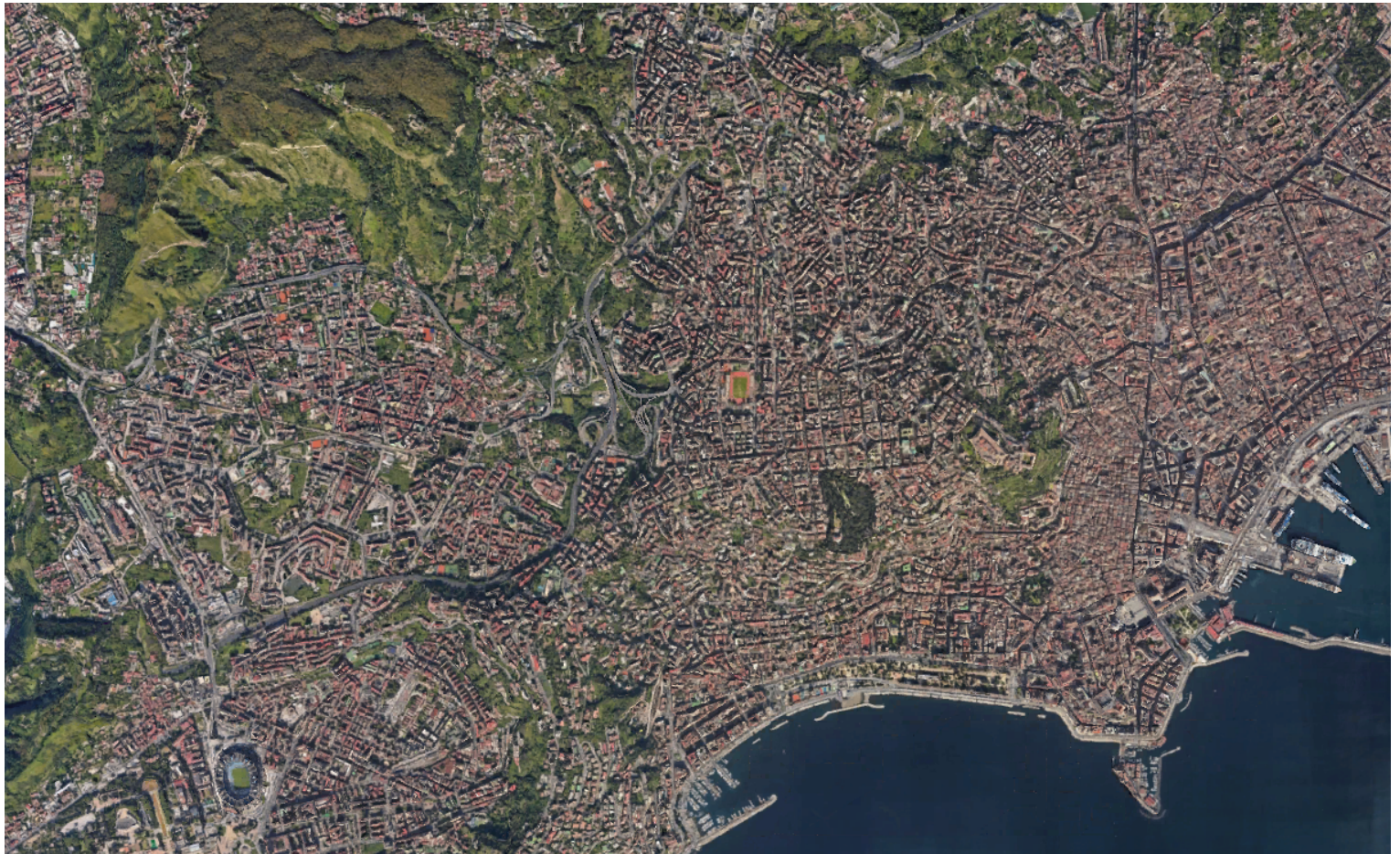
Inoltre, l'analisi delle distribuzioni angolari per l'angolo ϕ (Figura 3 e Figura 4) evidenzia una simmetria diversa tra i due rivelatori, con il CRC che presenta una distribuzione più marcata agli angoli estremi e il telescopio che mostra un andamento più centrale. Questi risultati confermano che la geometria e la sensibilità angolare dei rivelatori, insieme ai fattori ambientali come la topografia e l'altitudine, sono determinanti nel comportamento del flusso di muoni.

In sintesi, i dati raccolti mostrano l'importanza di considerare sia le caratteristiche strutturali dei rivelatori sia le condizioni ambientali nel confronto dei risultati ottenuti da diversi dispositivi. Le differenze osservate tra il CRC e il telescopio di Toledo sono spiegabili attraverso variabili fisiche e geometriche, che influenzano direttamente la capacità di rilevamento e la distribuzione angolare dei muoni.

Viste satellitari di Toledo e della collina del Vomero dall'alto e dal livello del mare



Vista satellitare dei Camaldoli e del Vomero



Fonti

[1] <https://web.infn.it/OCRA/misura-della-distribuzione-angolare-dei-muoni/>