

INTERNATIONAL COSMIC DAY

La rivelazione dei muoni cosmici

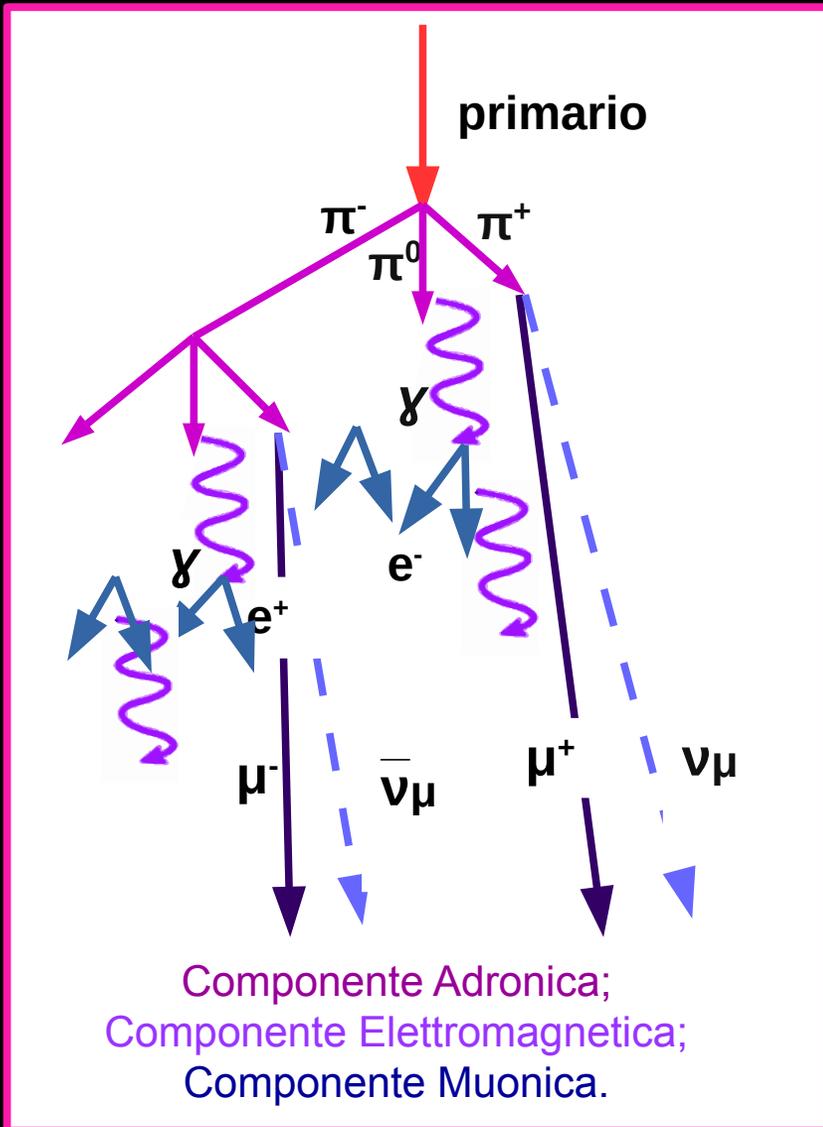
Roberta Colalillo
26 Novembre 2024



In cooperation with
many networks and partners



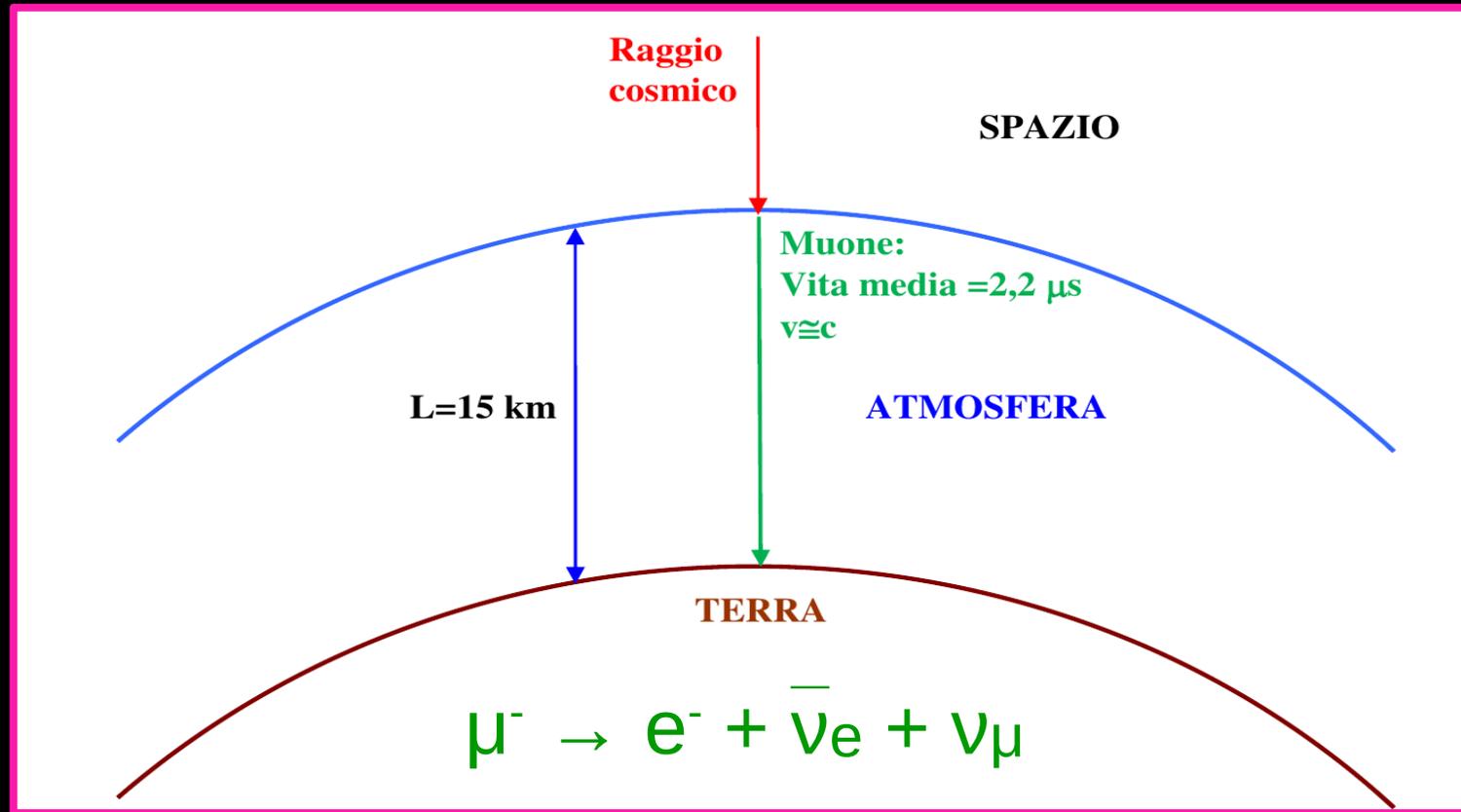
Gli sciami atmosferici estesi e la componente muonica



- Cosa sono i **muoni** e quali sono le loro caratteristiche principali?
- sono particelle simili agli elettroni, ma hanno una massa 200 volte maggiore;
 - attraversano i materiali perdendo poca energia;
 - ogni minuto veniamo attraversati da migliaia 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.

Flusso muoni al livello del mare:
1 μ /(cm² minuto)

Il mistero dei muoni: come fanno ad arrivare fino a noi?



Il mistero dei muoni: come fanno ad arrivare fino a noi?

Quanta strada possono fare i muoni prima di decadere?

$$S = v \cdot t_0 \sim c \cdot t_0 = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s} \sim 660 \text{ m}$$



In 1 s, circa 5000 muoni ci hanno attraversato.

Ma l'atmosfera non era spessa circa 15000 m?
Come fanno i muoni ad arrivare a terra se muiono dopo 660 m?

La fisica classica non funziona quando gli oggetti sono molto veloci.

La relatività ristretta (1905)



Lo spazio e il tempo non sono grandezze assolute, cambiano mettendosi in un diverso sistema di riferimento.

Il tempo si dilata

$$t = \gamma t_0$$

Lo spazio si restringe

$$L = L_0/\gamma$$

$$\gamma = 1/\sqrt{1-v^2/c^2} \geq 1$$

Se $v \ll c$, $v^2/c^2 \rightarrow 0$, $\gamma \rightarrow 1$ fisica classica
Se gli oggetti vanno piano, non ci accorgiamo di questi effetti.

$\gamma=25$ se $v=0.9992c$ come nel caso del nostro muone.

Sistema di riferimento dell'osservatore

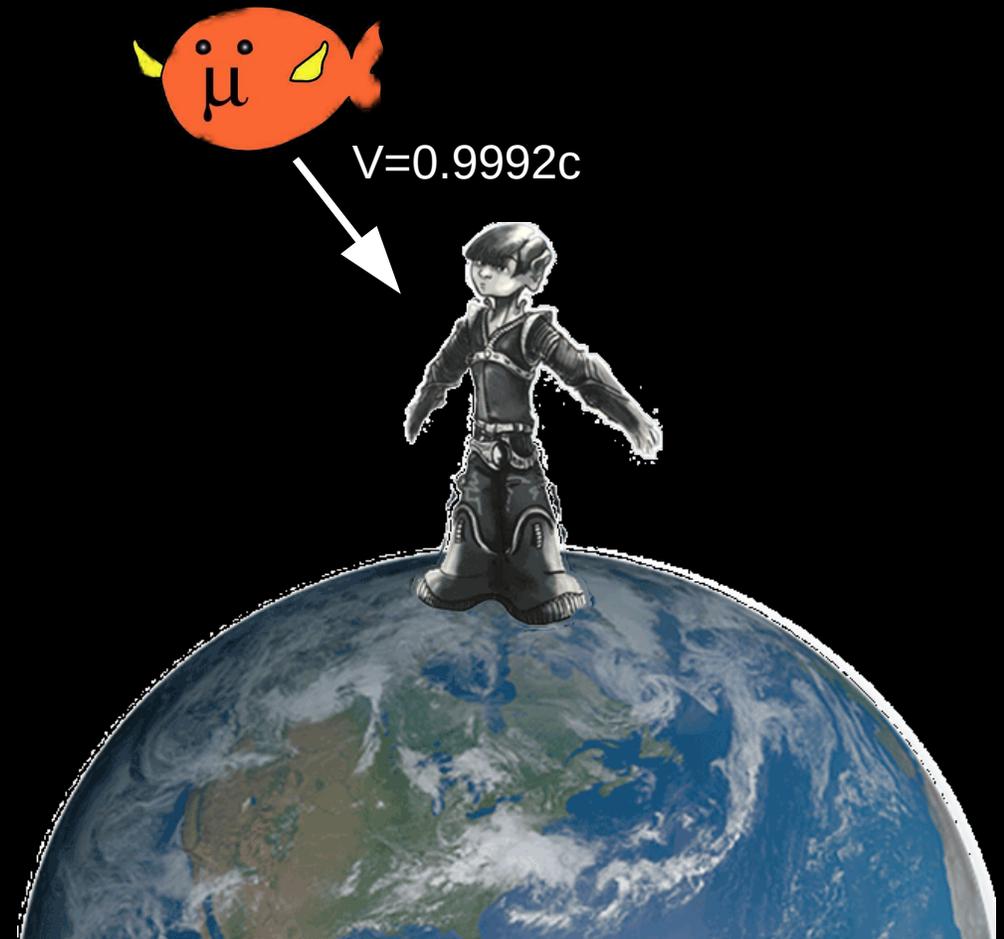
$\gamma=25$ se $v=0.9992c$ come nel caso del nostro muone

t_0 = tempo "proprio" dell'evento:
un evento che accade in un luogo, visto
da un osservatore che sta fermo in quel
luogo avrà una certa durata t_0

$$t = \gamma \cdot t_0 = 25 \cdot 2.2 \mu\text{s} = 55 \mu\text{s}$$

$$S = v \cdot t = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 55 \cdot 10^{-6} \text{ s} \sim 16 \text{ km}$$

Il tempo di vita per i muoni si è dilatato
e circa il 40% arriva sulla Terra.



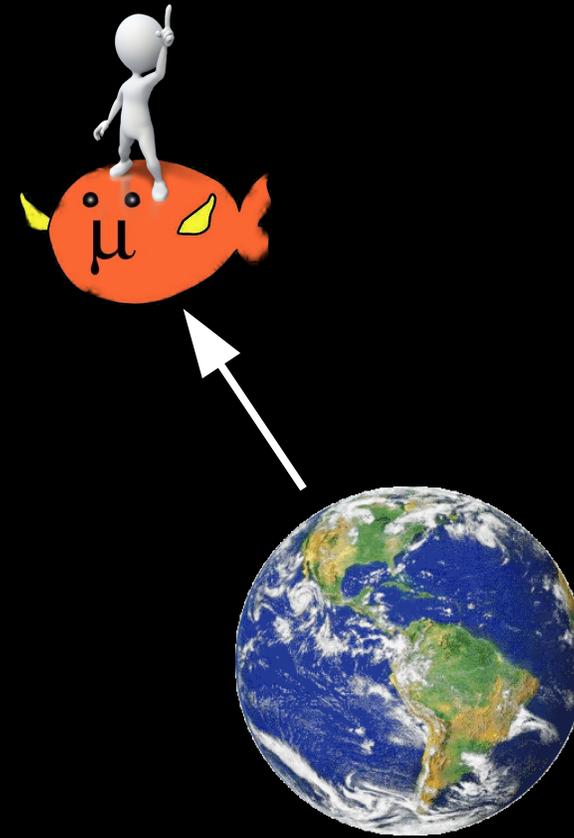
Sistema di riferimento solidale al muone

$\gamma=25$ se $v=0.9992c$ come nel caso del nostro muone

Le lunghezze, come ad esempio lo spessore dell'atmosfera, che per l'osservatore solidale al muone è in movimento, si accorciano.

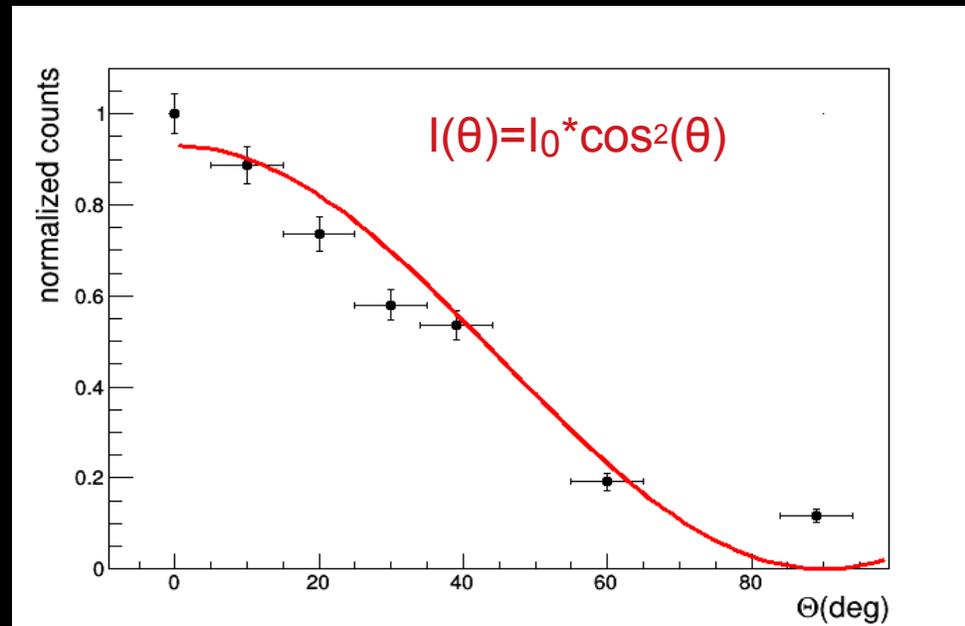
$$L = L_0/\gamma = 15000 \text{ m}/25 = 600 \text{ m}$$

Per i muoni l'atmosfera è spessa 600 m, possono percorrerla tutta e raggiungere la Terra in $2.2 \mu\text{s}$.



Il flusso di muoni in funzione dell'angolo di zenit

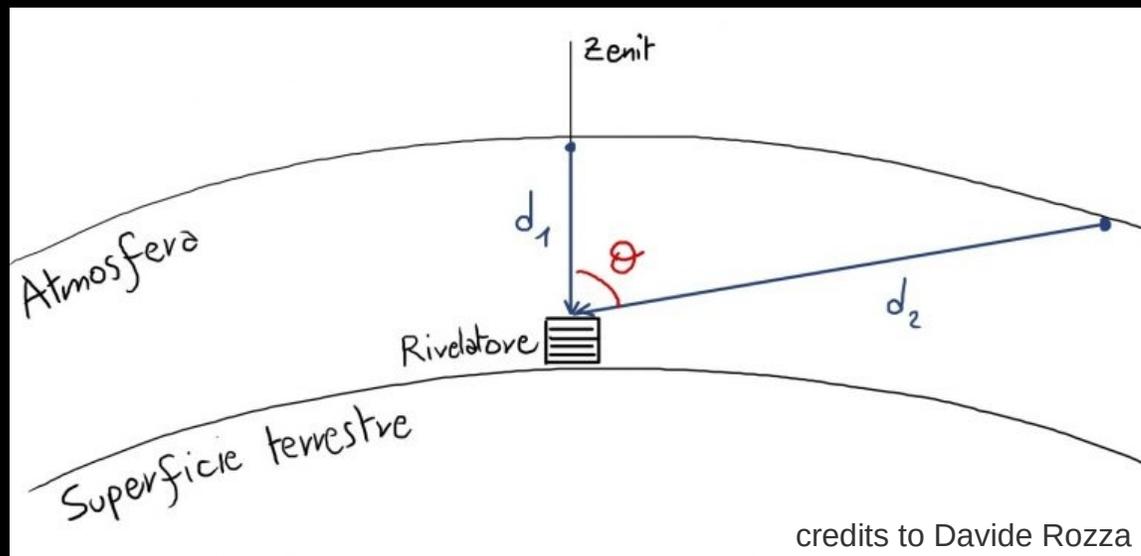
Il flusso di muoni a terra non è uniformemente distribuito al variare dell'angolo di incidenza. Analizzando le direzioni di arrivo di queste particelle in funzione dell'angolo che esse formano con lo zenit locale, si scopre che il flusso massimo si ha per $\theta=0^\circ$ ossia per particelle che arrivano perpendicolarmente alla superficie terrestre. Il flusso diminuisce continuamente all'aumentare dell'angolo tra la direzione di incidenza e lo zenit. A 90° il flusso è minimo.



Il flusso di muoni in funzione dell'angolo di zenit

Diversi effetti sono responsabili di questo comportamento, tra questi, il cammino percorso dalle particelle cosmiche attraverso l'atmosfera:

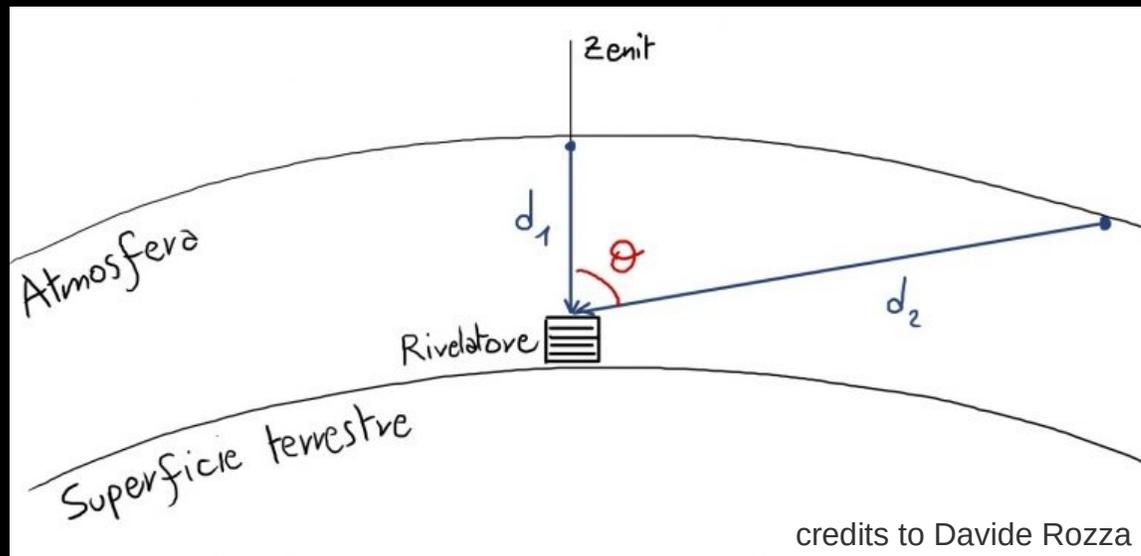
al crescere dell'angolo di zenit, la distanza tra il punto di produzione del muone in atmosfera e il rivelatore sulla superficie terrestre cresce a sua volta.



Con un angolo di incidenza di circa 90° (proviamo con 88°), che distanza deve percorrere il muone attraverso l'atmosfera per raggiungere la superficie terrestre? (spessore atmosfera = 15 km)

Il flusso di muoni in funzione dell'angolo di zenit

Con un angolo di incidenza di circa 90° , il muone dovrebbe percorrere circa 400 km in atmosfera per raggiungere la superficie terrestre invece di 15 km. Solo muoni molto energetici riescono a coprire questo percorso prima di decadere.

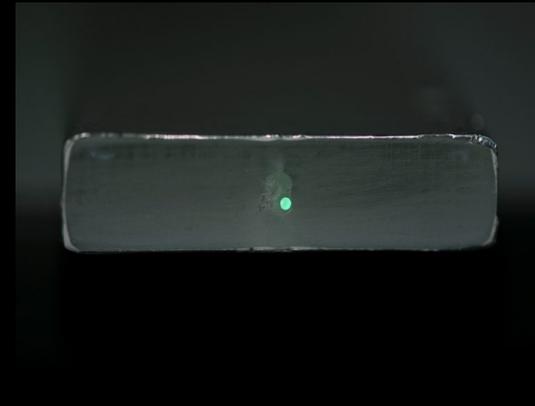
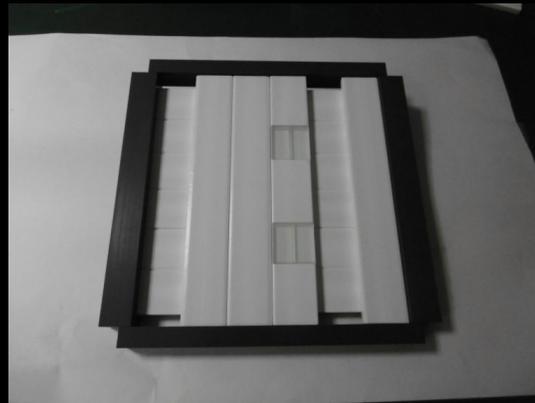


In conclusione, maggiore è l'angolo dallo zenit, maggiore è la distanza percorsa e maggiore sarà la probabilità che i muoni decadano prima di raggiungere la superficie terrestre e quindi il flusso sarà minore.

Cosmic Ray Cube (CRC): un rivelatore portatile per muoni cosmici



Il rivelatore è un cubo di lato 30cm, costituito da quattro moduli distanziati tra loro di 7 cm. Ogni modulo è costituito da 2 piani, ciascuno costituito da 6 bacchette scintillanti sovrapposte e posizionate ortogonalmente tra loro per consentire una lettura bidimensionale dei nostri dati
→ cioè possiamo leggere la traccia del muono su due piani, il piano zx e il piano zy.



Come si fanno le misure?

Il rivelatore può lavorare in diverse condizioni di trigger, cioè un dato può essere salvato se si accendono due piani, tre piani o quattro piani.

Noi chiediamo che ci sia almeno un led acceso per ciascuno dei quattro piani in modo da diminuire il fondo dovuto ad altre particelle che attraversano il rivelatore, ma non sono muoni.

Il numero di muoni (conteggi, C) incidenti nel rivelatore in un intervallo di tempo (T) prende il nome di rate ($R=C/T$) espresso in particelle al secondo. I passi da fare sono i seguenti:

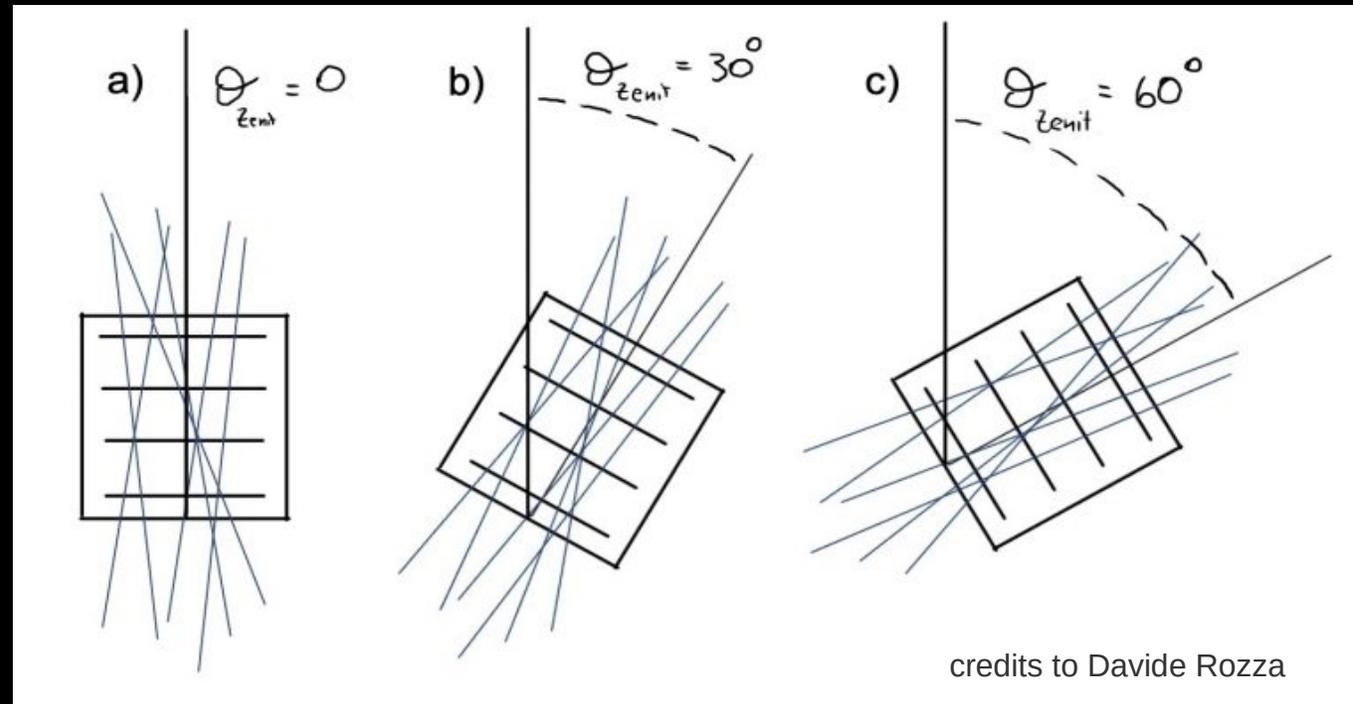
- Prendo dati per un tempo T ;
- Conto il numero di particelle registrate C ;
- Calcolo il rate R delle particelle come: $R = C / T$ (particelle/secondo).

Esempio:

- Prendo dati per 100 secondi ($T=100$ secondi);
- Lo strumento registra $C=1000$ particelle;
- $R = C / T = 1000/100 = 10$ particelle/secondo;
- Fissato un tempo, misurare la dipendenza dei conteggi dall'angolo di inclinazione.

Come si fanno le misure?

Il rivelatore, inizialmente posizionato con l'asse parallelo allo zenit locale (a), viene inclinato ad angoli via via sempre maggiori: 30° (b), 60° (c) fino a posizionarlo orizzontalmente.

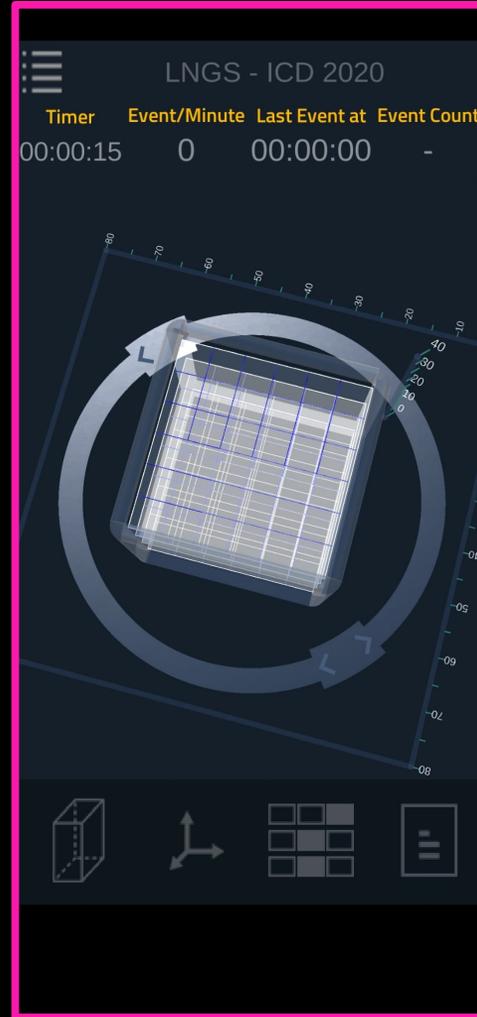


Come si fanno le misure?

Organizziamo e analizziamo i nostri dati

<i>fx</i>	A	B	C	D
2				
3	angle* [deg]	counts [in 100 s]	counts [in 100 s]	counts [in 100 s]
4	0	64	71	66
5	15	59	73	55
6	30	52	56	60

L'app "Cosmic Rays Live"



Scarica da play store:



Approfondimenti

Approfondimento sui raggi cosmici:

<https://web.infn.it/OCRA/particelle-dallo-spazio/>

Misura dei muoni in funzione dell'angolo di zenit:

<https://web.infn.it/OCRA/misura-dei-muoni-in-funzione-dellangolo-di-zenith/>

Cosmic Ray Cube e **ricostruzione tracce**:

<https://web.infn.it/OCRA/misura-della-rate-di-muoni-cosmici/>