

# Introduzione alla misura del flusso di muoni

Emiliano Mocchiutti  
*INFN Trieste, Italia*

Discover Cosmic Rays 21 Novembre 2023 – Trieste

**INTERNATIONAL  
COSMIC DAY**

# In questa presentazione

- ❑ Introduzione
- ❑ La camera a nebbia
- ❑ La misura: teoria
- ❑ Il metodo, “cosmic rays cube”
- ❑ La misura
- ❑ Conclusioni

# Introduzione

**Non abbiate paura di fare domande  
anche durante la presentazione!**

# L'obiettivo di oggi

Fisica dei raggi cosmici:

misura del “flusso di muoni” in funzione  
dell’angolo di incidenza

# Lo scienziato “osserva” non “vede”

## Osservare

Vocabolario on line

-A +A 

**osservare** v. tr. [dal lat. *observare*, comp. di *ob-* e *servare* «serbare, custodire, considerare»] (*io osservo*, ecc.). –

1.

**a.** Guardare, esaminare, considerare con attenzione, anche con l'aiuto di strumenti adatti, al fine di conoscere meglio, di rendersi conto di qualche cosa, di rilevare i particolari, o per formulare giudizi e considerazioni di varia natura: *o. un quadro*; *o. i movimenti di un insetto*; *o. il funzionamento di un motore*; *o. le stelle a occhio nudo, col telescopio*; *o. al microscopio, col cannocchiale*. Talora fa riferimento più all'attenzione della mente che a quella dell'occhio: *o. gli effetti di una reazione chimica*; *o. l'andamento di un fenomeno*.

## Vedere

Vocabolario on line

-A +A 

**vedere** v. tr. [lat. *vidēre*] (pres. indic. *vedo* [letter. *veggo*, ant. o poet. *véggio*], *vedi* [ant. *véi*, *vé*], *vede*, *vediamo* [ant. o poet. *veggiamo*], *vedéte*, *vedono* [letter. *véggono*, ant. o poet. *véggiono*]; pres. cong. *io, tu, egli véda* [letter. *végga*, ant. o poet. *véggia*], *vediamo* [ant. o poet. *veggiamo*], *vediate* [ant. o poet. *veggiate*], *vedano* [letter. *véggano*, ant. o poet. *véggiano*]; imperat. *vedi* [ant. *ve'*], *vedéte*; fut. *vedrò, vedrài*, ecc. [ant. *vederò, vederài*, ecc.]; condiz. *vedrèi, vedrésti*, ecc. [ant. *vederèi, vederésti*, ecc.]; pass. rem. *vidi* [ant. *vedètti, vedéi, véddi, viddi*], *vedésti, vide* [ant. *vedètte*], *vedémmo* [ant. *viddimmo*], *vedéste, videro* [ant. *vedètero, vederono, vidono*]; part. pres. *veggènte*, soprattutto con uso di sost., accanto a *vedènte* (v. le due voci); part. pass. *visto* o, meno pop., *veduto*; ger. *vedèndo* [letter. *veggèndo*]). –

1. Percepire stimoli esterni per mezzo della funzione visiva.

# Strumenti

Oggi useremo due strumenti:

- 1) La camera a nebbia (solo osservazione)
- 2) Il “cosmic rays cube” (lo useremo per la misura)

# La camera a nebbia

# La camera a nebbia (o “di Wilson”)

Le camera a nebbia è un dispositivo per la visualizzazione delle tracce lasciate da particelle cariche elettricamente in una “nebbia” di alcool isopropilico.

# La camera a nebbia (o “di Wilson”)

Le camera a nebbia è un dispositivo per la visualizzazione delle tracce lasciate da particelle cariche elettricamente in una “nebbia” di alcool isopropilico.

La “nebbia” che generiamo è uno strato di vapore supersaturo di alcool isopropilico.

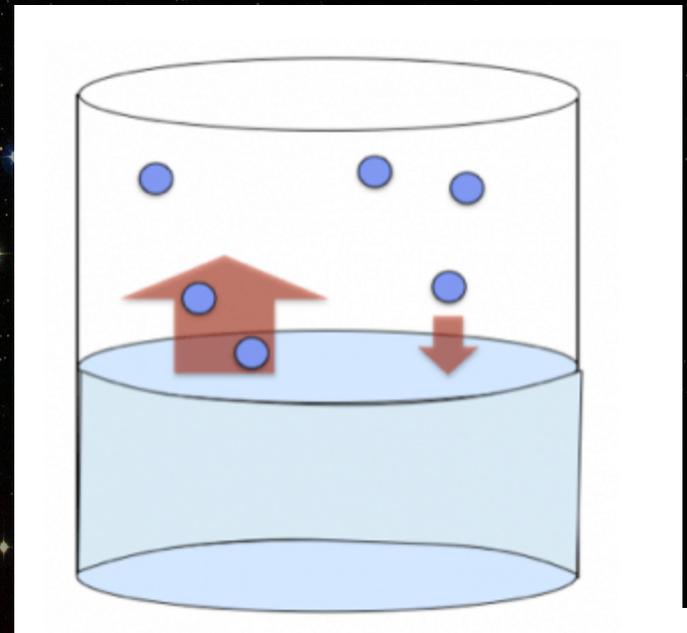
# La camera a nebbia (o “di Wilson”)

Le camera a nebbia è un dispositivo per la visualizzazione delle tracce lasciate da particelle cariche elettricamente in una “nebbia” di alcool isopropilico.

La “nebbia” che generiamo è uno strato di vapore supersaturo di alcool isopropilico.

**Vapore supersaturo: condizione in cui il numero di molecole del gas è maggiore del numero di molecole che servirebbero per far condensare il gas stesso.**

**Condizione MOLTO instabile.**



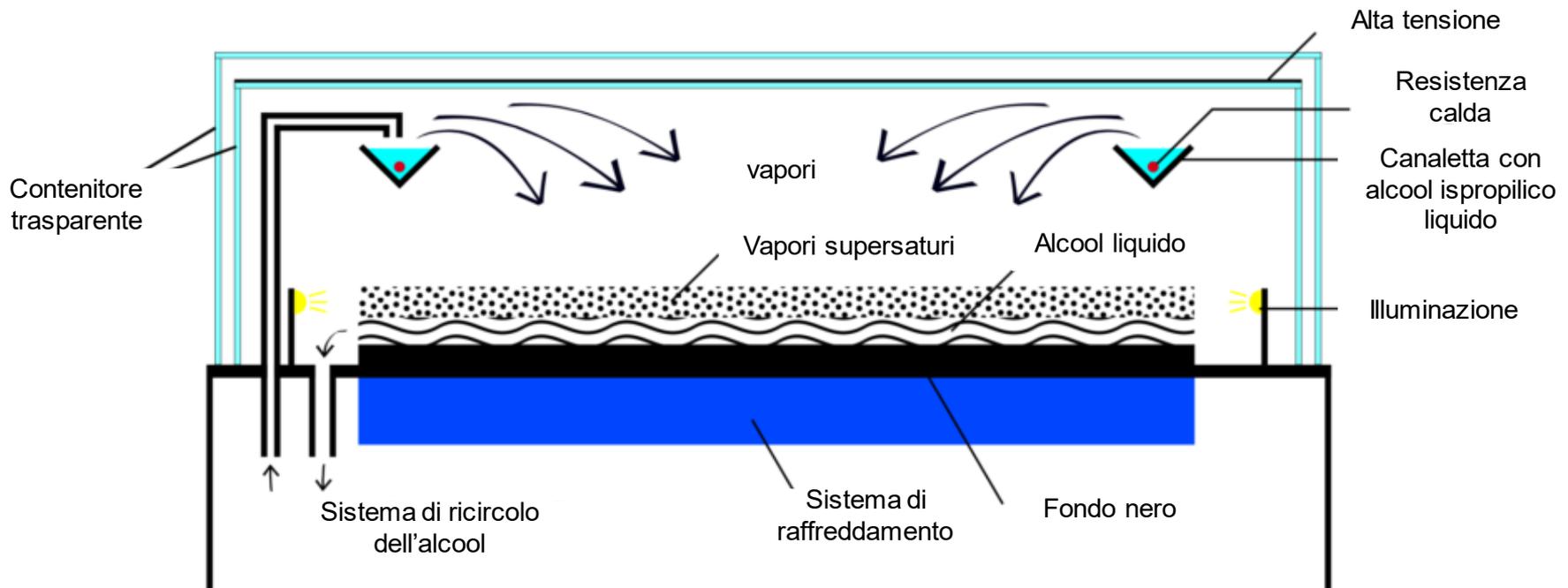
# La camera a nebbia (o “di Wilson”)

Se particelle caricate elettricamente attraversano lo strato di vapore saturo il vapore condensa improvvisamente, ossia passa dallo stato di vapore allo stato liquido.

Di conseguenza è possibile vedere la traccia lasciata dalle particelle sotto forma di strisce bianche brillanti.

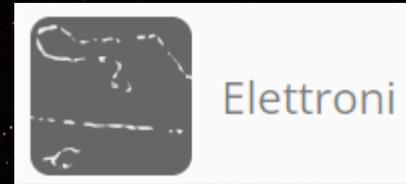
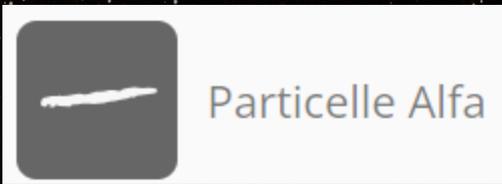
La traccia bianca osservata è un raggruppamento di gocce molto piccole di alcool isopropilico formate dalla condensazione improvvisa generate dalle particelle cariche.

# La camera a nebbia (o “di Wilson”)

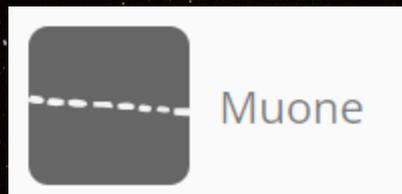


# La camera a nebbia (o “di Wilson”)

Usando sorgenti radioattive osserveremo particelle alfa (nuclei di elio) ed elettroni



Togliendo le sorgenti potremo osservare i muoni



# La misura: teoria



# Esistono i raggi cosmici



- 1) Esistono i raggi cosmici, particelle che vengono dallo spazio; a terra arrivano i muoni

# Il metodo scientifico



- 1) Esistono i raggi cosmici, particelle che vengono dallo spazio; a terra arrivano i muoni

# Da che direzione arrivano?



- 1) Esistono i raggi cosmici, particelle che vengono dallo spazio; a terra arrivano i muoni
- 2) A livello del suolo, i muoni arrivano da tutte le direzioni? Se sì, nello stesso numero da ogni direzione?

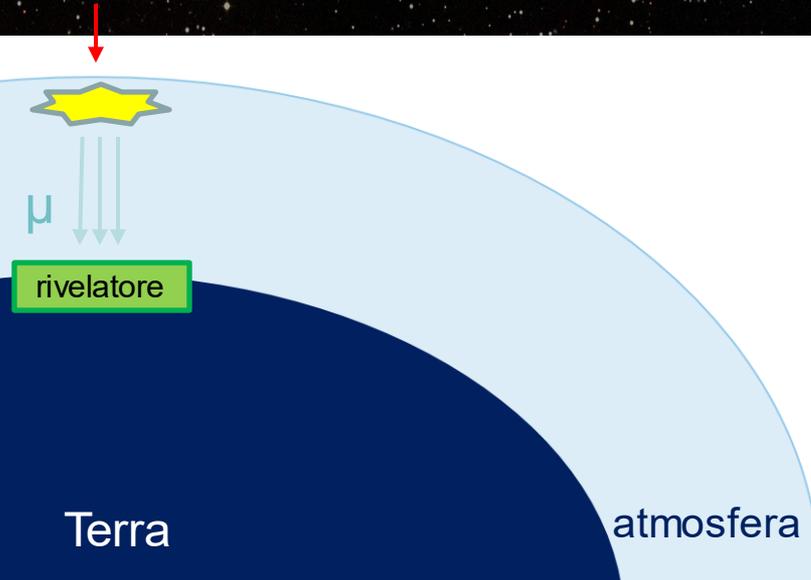
# Dobbiamo formulare un'ipotesi



- 1) Esistono i raggi cosmici, particelle che vengono dallo spazio; a terra arrivano i muoni
- 2) A livello del suolo, i muoni arrivano da tutte le direzioni? Se sì, nello stesso numero da ogni direzione?

# Ipotesi

protone

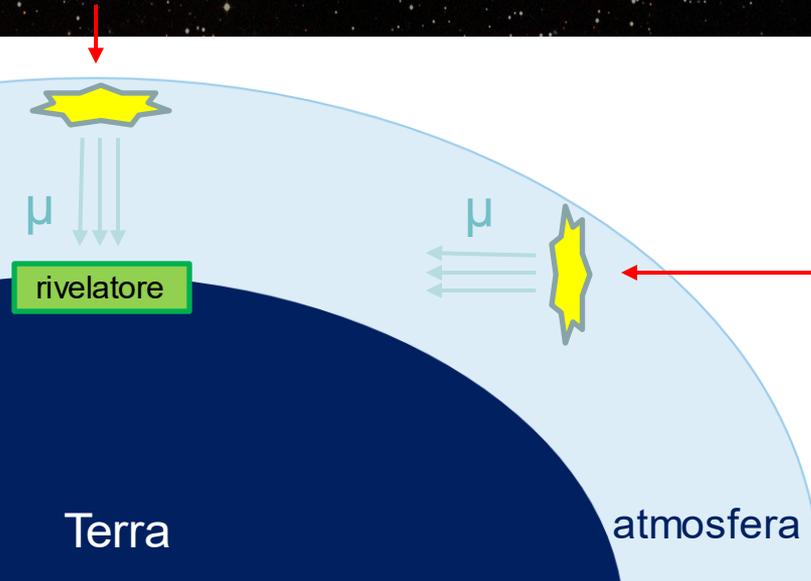


*Domanda: A livello del suolo, i muoni arrivano da tutte le direzioni? Se sì, nello stesso numero da ogni direzione?*

- i raggi cosmici primari: 90% protoni
- interagiscono immediatamente appena raggiungono il bordo esterno dell'atmosfera terrestre
- i prodotti finali di interazione che misuriamo sono quasi tutti muoni che interagiscono meno con l'atmosfera
- i muoni vanno tutti nella stessa direzione del protone iniziale e non cambiano direzione attraversando l'atmosfera
- i protoni dallo spazio arrivano allo stesso modo da tutte le direzioni

# Ipotesi

protone



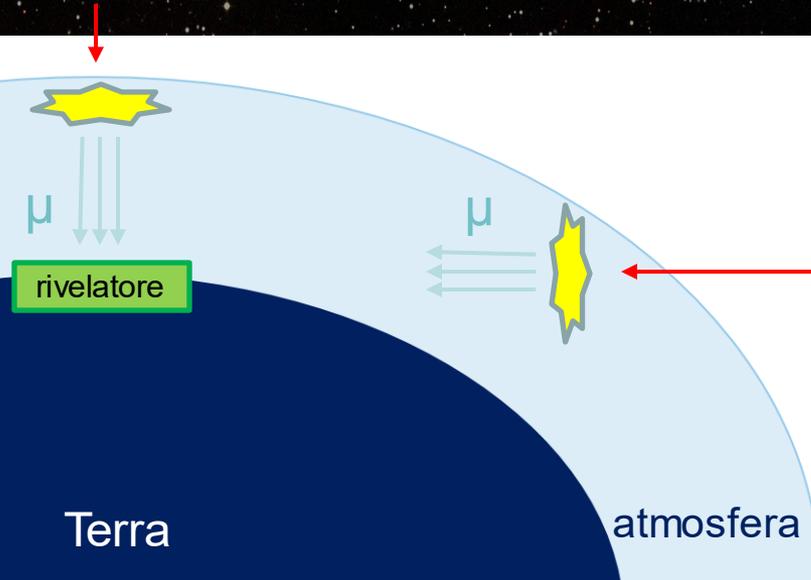
protone

*Domanda: A livello del suolo, i muoni arrivano da tutte le direzioni? Se sì, nello stesso numero da ogni direzione?*

- i raggi cosmici primari: 90% protoni
- interagiscono immediatamente appena raggiungono il bordo esterno dell'atmosfera terrestre
- i prodotti finali di interazione che misuriamo sono quasi tutti muoni che interagiscono meno con l'atmosfera
- i muoni vanno tutti nella stessa direzione del protone iniziale e non cambiano direzione attraversando l'atmosfera
- i protoni dallo spazio arrivano allo stesso modo da tutte le direzioni

# Ipotesi

protone



protone

*Domanda: A livello del suolo, i muoni arrivano da tutte le direzioni? Se sì, nello stesso numero da ogni direzione?*

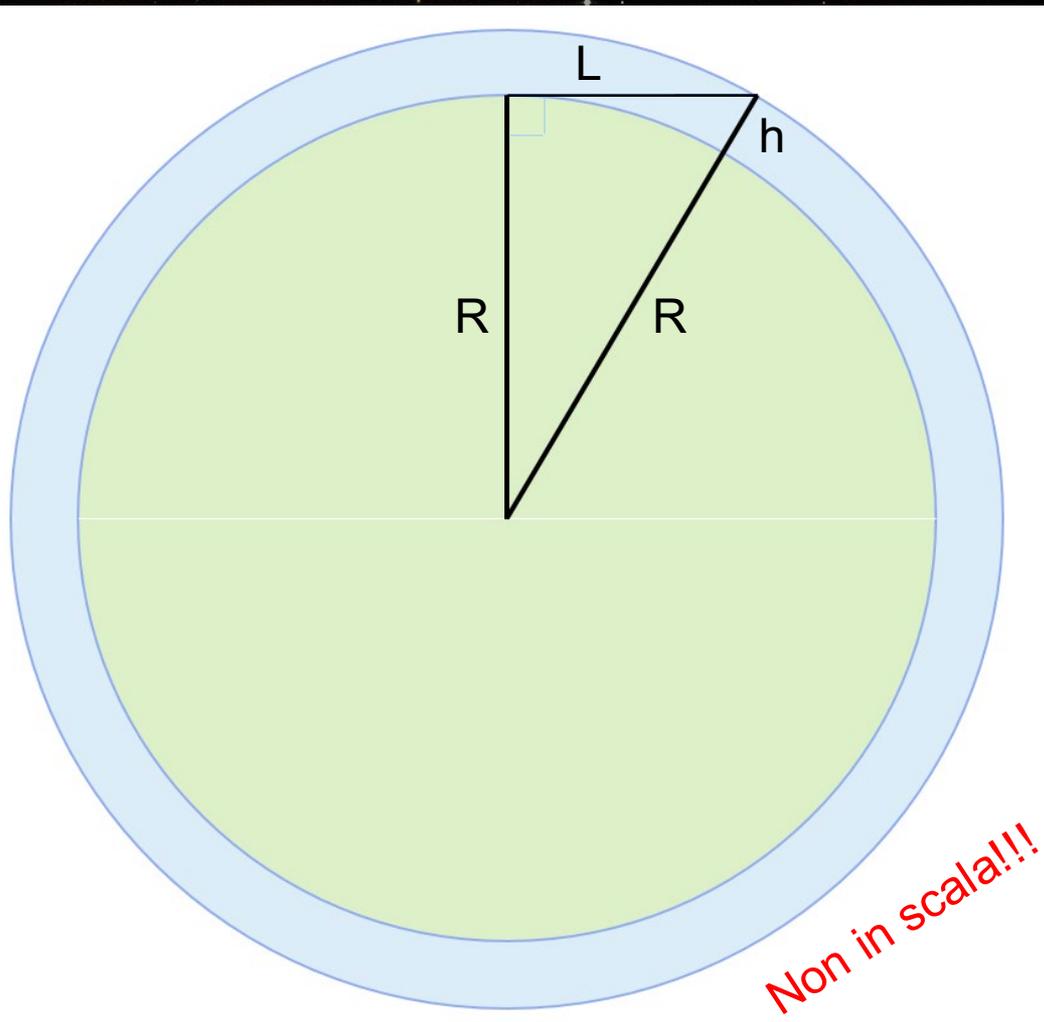
**I muoni che arrivano "orizzontalmente" attraversano più atmosfera**

- i raggi cosmici primari: 90% protoni
- interagiscono immediatamente appena raggiungono il bordo esterno dell'atmosfera terrestre
- i prodotti finali di interazione che misuriamo sono quasi tutti muoni che interagiscono meno con l'atmosfera
- i muoni vanno tutti nella stessa direzione del protone iniziale e non cambiano direzione attraversando l'atmosfera
- i protoni dallo spazio arrivano allo stesso modo da tutte le direzioni

# Ipotesi

Domanda: A livello del suolo, i muoni arrivano da tutte le direzioni? Se sì, nello stesso numero da ogni direzione?

Quelli che arrivano “orizzontalmente” attraversano più atmosfera



Muone verticale:  
Attraversa uno spazio  $h$

$h$  = altezza dell'atmosfera  $\approx 40$  km  
 $R$  = raggio della terra  $\approx 6371$  km

$$L^2 = (R+h)^2 - R^2$$

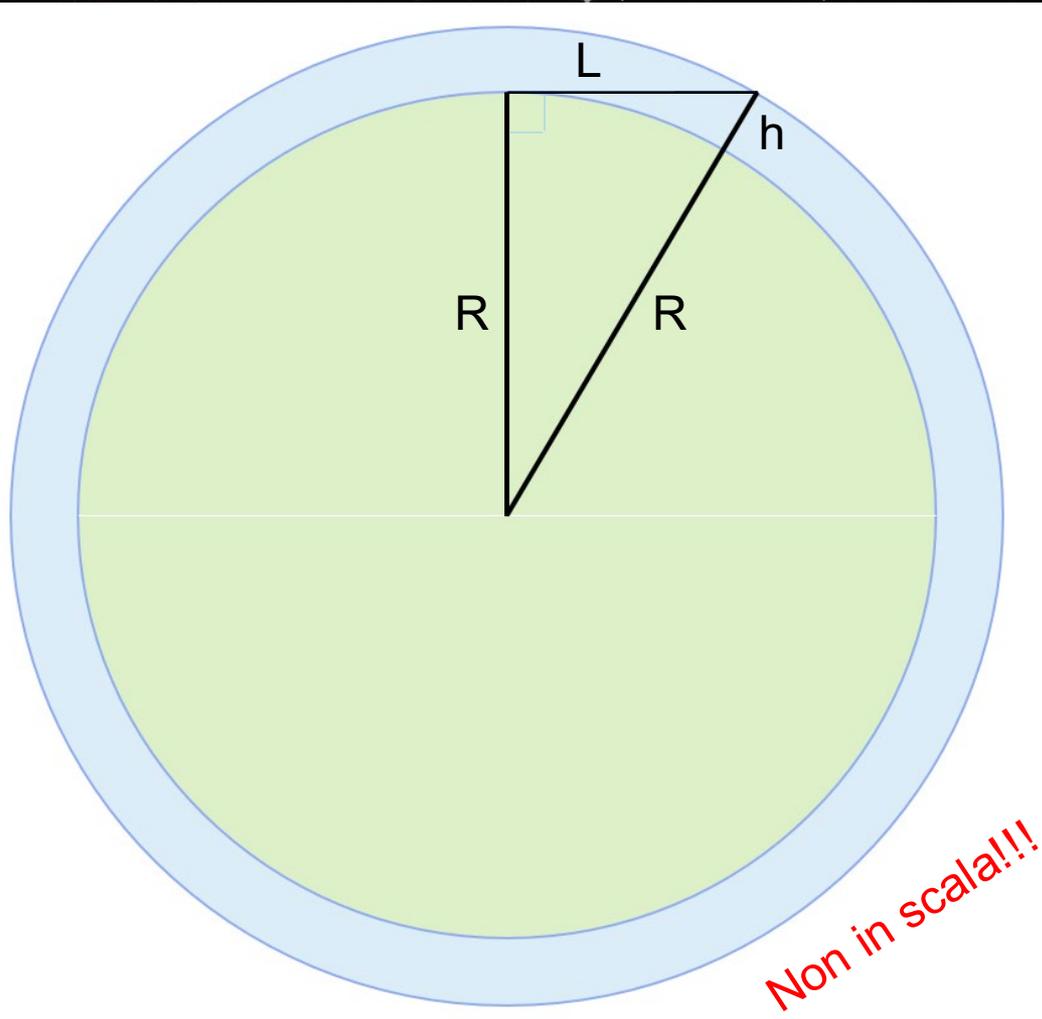
$L \approx 713$  km

Muone orizzontale attraversa uno spazio molto maggiore  $L \approx 18 \cdot h$

# Ipotesi

Domanda: A livello del suolo, i muoni arrivano da tutte le direzioni? Se sì, nello stesso numero da ogni direzione?

Quelli che arrivano “orizzontalmente” attraversano più atmosfera



Muone verticale:  
Attraversa uno spazio  $h$

$h$  = altezza dell'atmosfera  $\approx 40$  km  
 $R$  = raggio della terra  $\approx 6371$  km

$$L^2 = (R+h)^2 - R^2$$

$L \approx 713$  km

Muone orizzontale attraversa uno spazio molto maggiore  $L \approx 18 \cdot h$

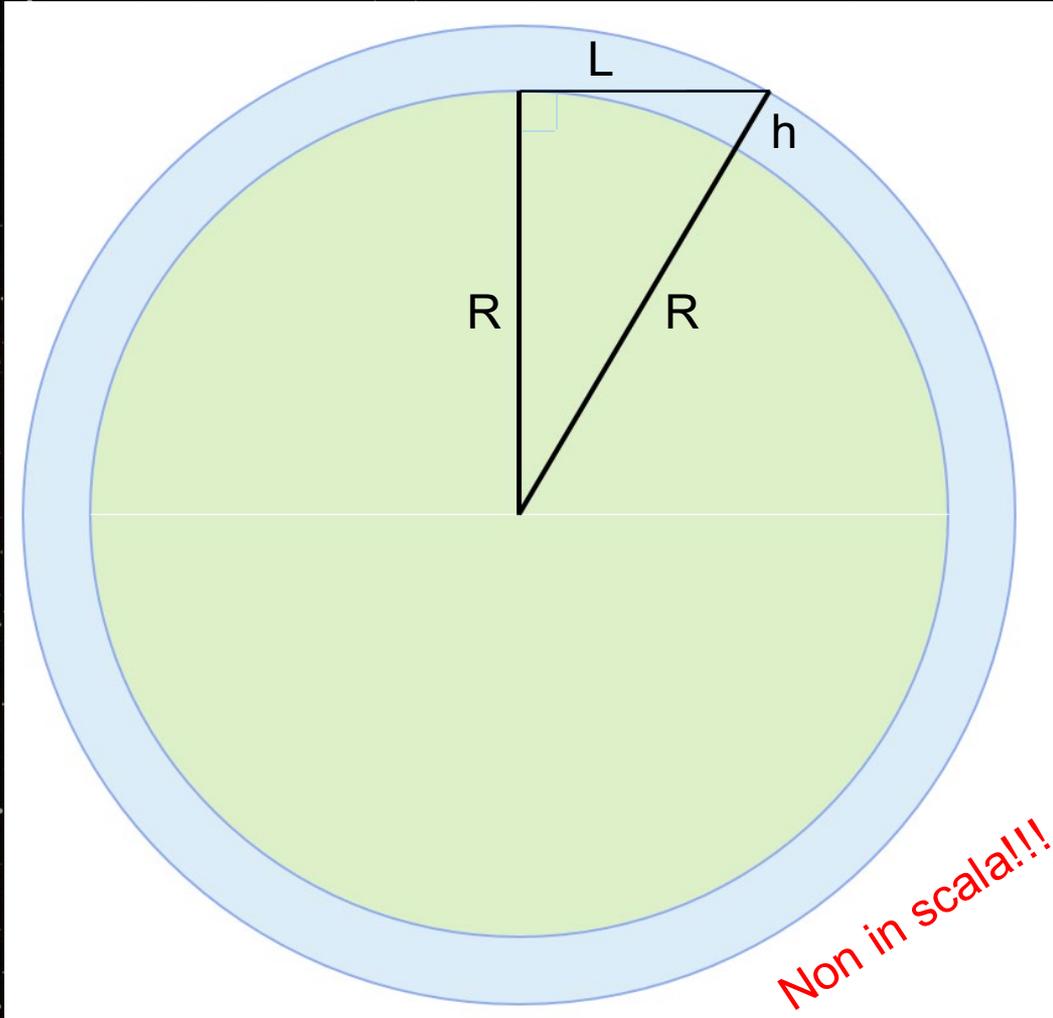
**Quindi arriveranno più muoni dall'alto (verticalmente) e meno dai lati (orizzontalmente)**

# Ipotesi

Ipotesi 1: arriveranno più muoni dall'alto (verticalmente) e meno dai lati (orizzontalmente)

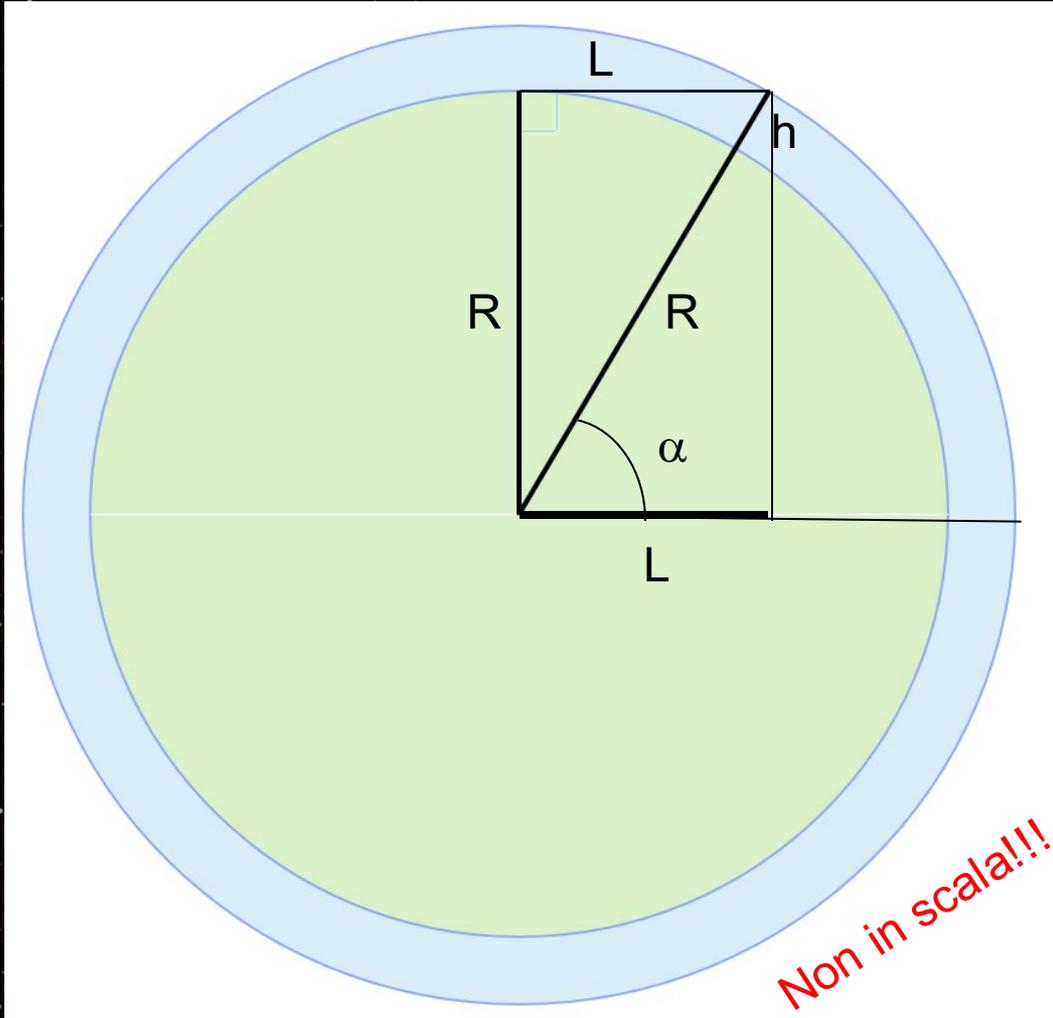
# Ipotesi

Ipotesi 1: arriveranno più muoni dall'alto (verticalmente) e meno dai lati (orizzontalmente)



# Ipotesi

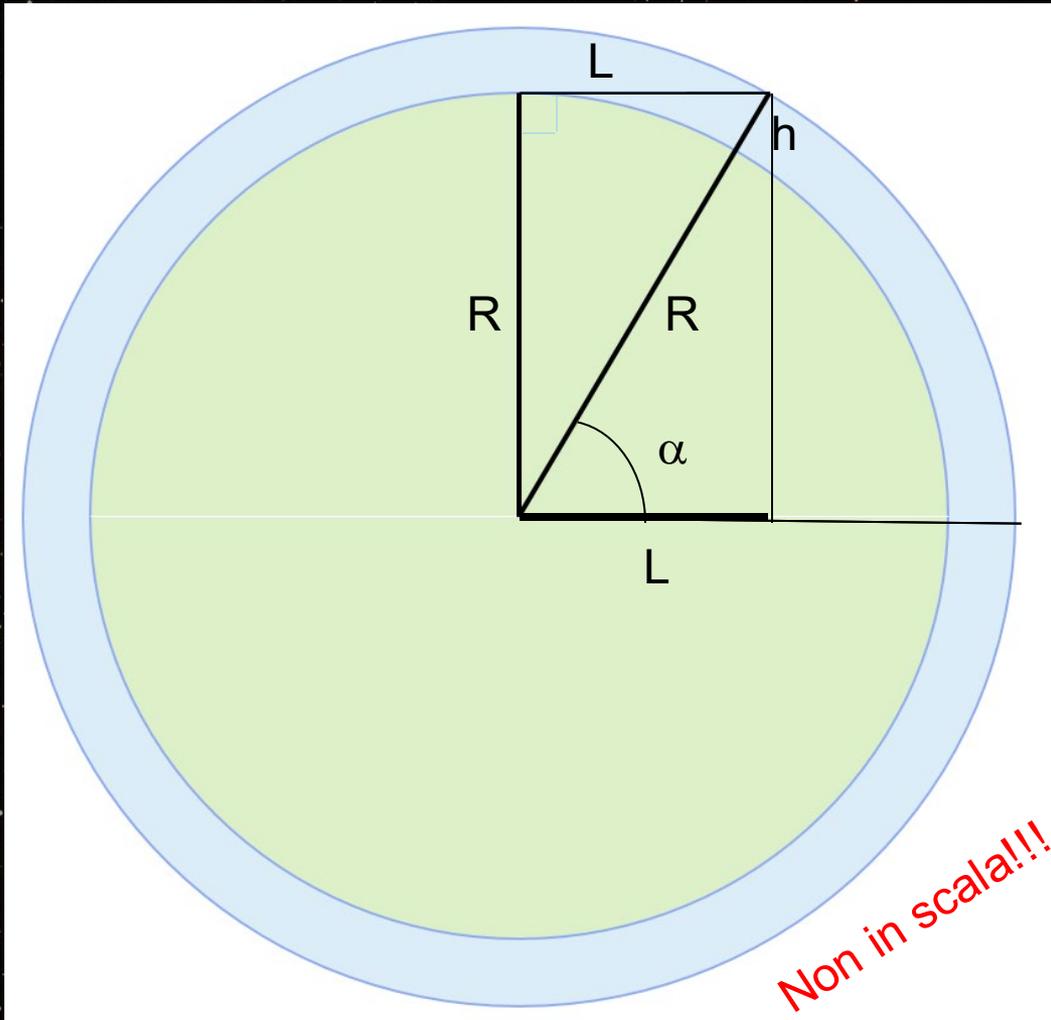
Ipotesi 1: arriveranno più muoni dall'alto (verticalmente) e meno dai lati (orizzontalmente)



Che cosa è  $L$  in funzione di  $S=R+h$  e di  $\alpha$ ?

# Ipotesi

Ipotesi 1: arriveranno più muoni dall'alto (verticalmente) e meno dai lati (orizzontalmente)



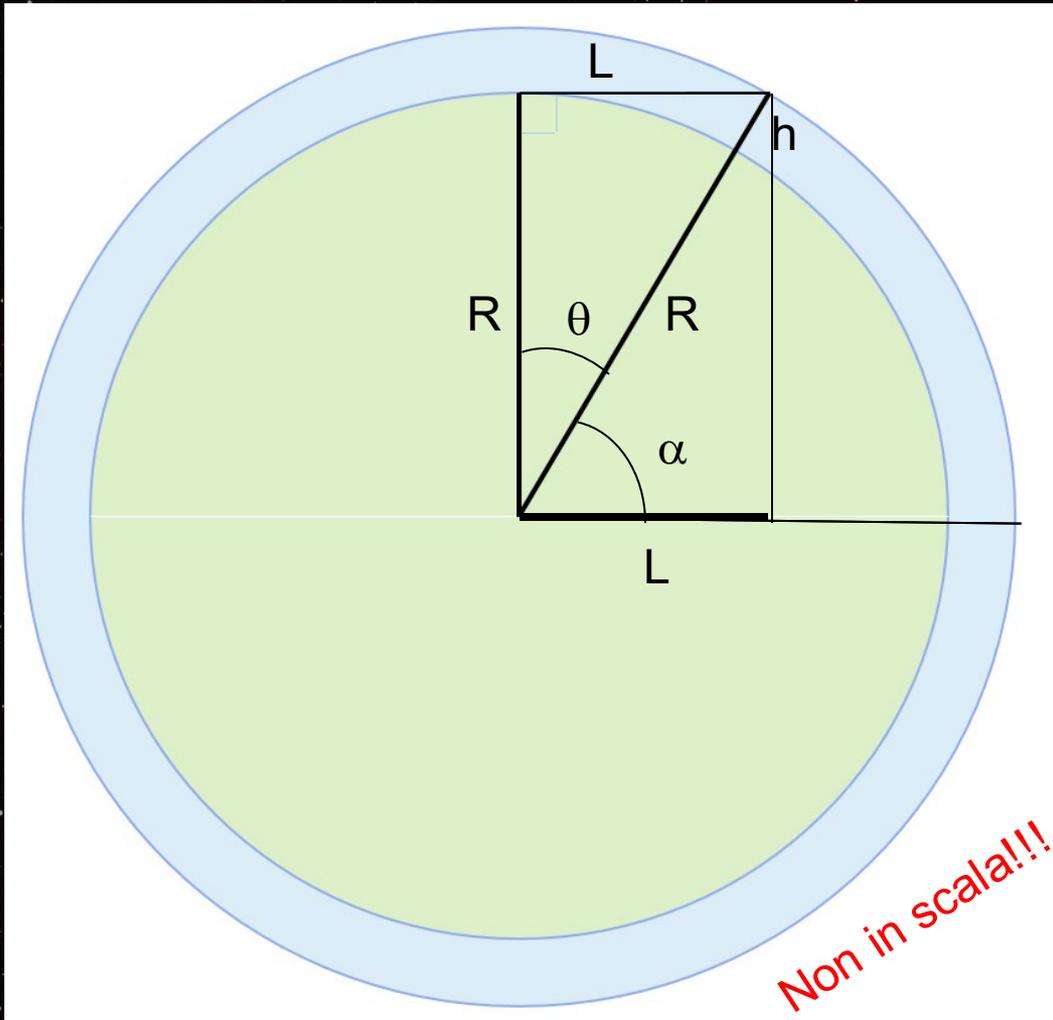
Che cosa è  $L$  in funzione di  $S=R+h$  e di  $\alpha$ ?

$$L = S \cdot \cos(\alpha)$$

Il numero diminuisce secondo una qualche funzione di  $\cos(\alpha)$

# Ipotesi

Ipotesi 1: arriveranno più muoni dall'alto (verticalmente) e meno dai lati (orizzontalmente)



Che cosa è  $L$  in funzione di  $S=R+h$  e di  $\alpha$ ?

$$L = S \cdot \cos(\alpha)$$

Il numero diminuisce secondo una qualche funzione di  $\cos(\alpha)$

Il numero di muoni segue questo andamento:

$$\text{Flusso}(\theta) = \text{Flusso}_v \cdot \cos^2(\theta)$$

# Ipotesi

**Ipotesi 1: arriveranno più muoni dall'alto (verticalmente) e meno dai lati (orizzontalmente)**

**Ipotesi 2: deve esserci una dipendenza dal coseno quadrato dell'angolo del numero di muoni che arrivano**

# Le ipotesi



- 1) Esistono i raggi cosmici, particelle che vengono dallo spazio
- 2) A livello del suolo, arrivano da tutte le direzioni? Se sì, nello stesso numero da ogni direzione?
- 3) Ipotesi: ne arrivano di più osservando verso l'alto con una dipendenza dal coseno quadrato dell'angolo

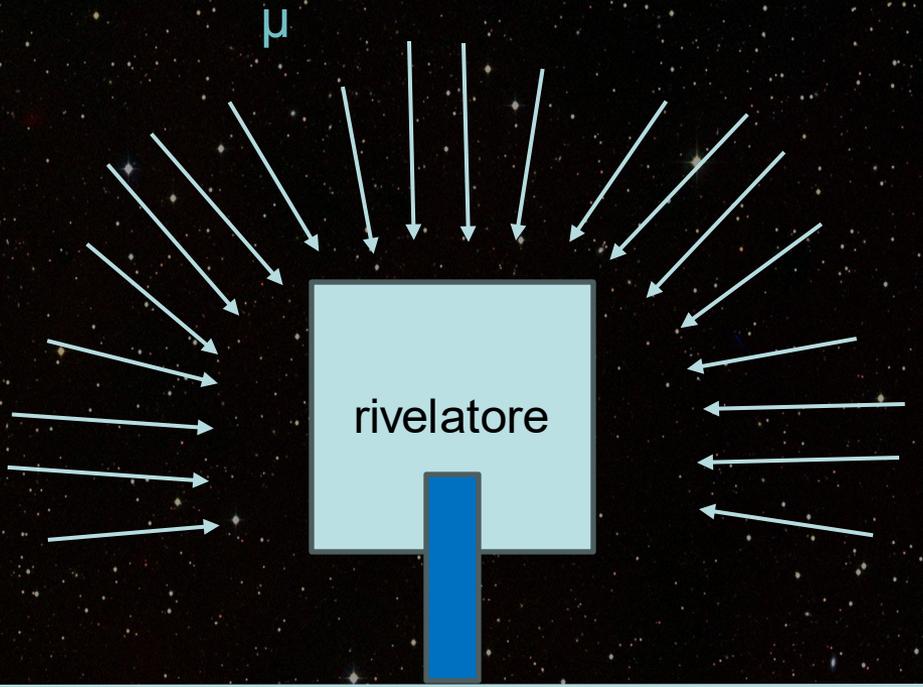
# Fare gli esperimenti



- 1) Esistono i raggi cosmici, particelle che vengono dallo spazio
- 2) A livello del suolo, arrivano da tutte le direzioni? Se sì, nello stesso numero da ogni direzione?
- 3) Ipotesi: ne arrivano di più osservando verso l'alto con una dipendenza dal coseno quadrato dell'angolo

# Il metodo, “cosmic rays cube”

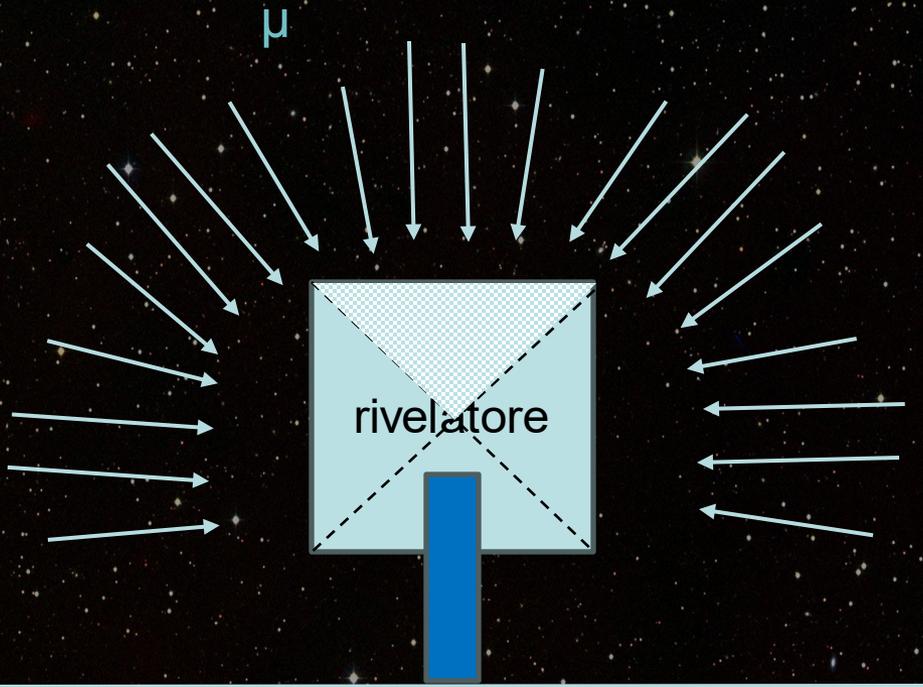
# L'apparato sperimentale



Abbiamo bisogno di uno strumento che :

- sia in grado di osservare i muoni
- sia in grado di capire da dove vengono

# L'apparato sperimentale



Abbiamo bisogno di uno strumento che :

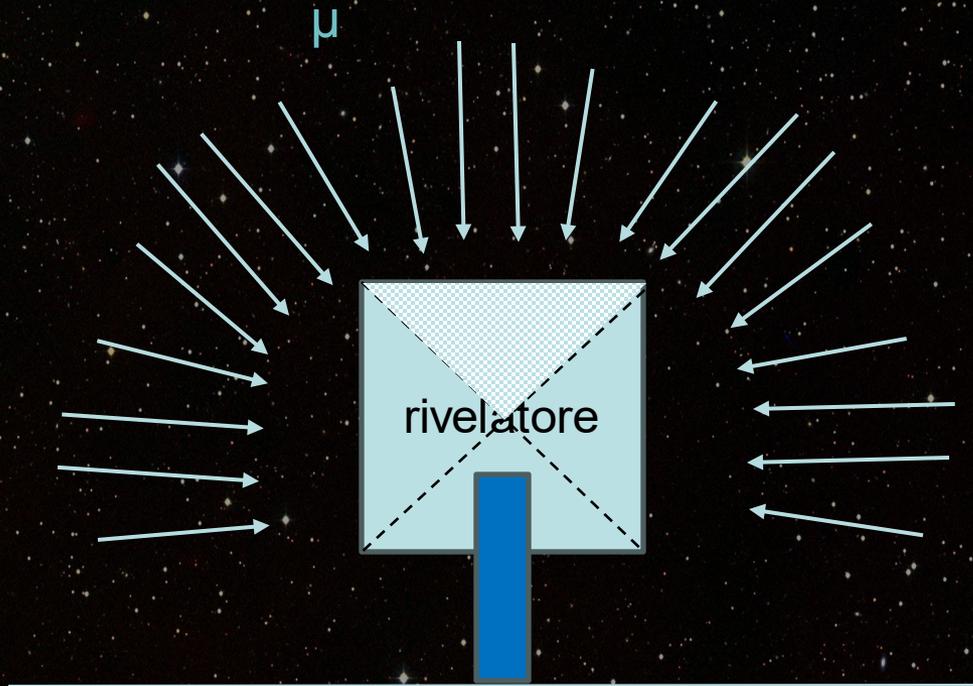
- sia in grado di osservare i muoni
- sia in grado di capire da dove vengono

Come un telescopio

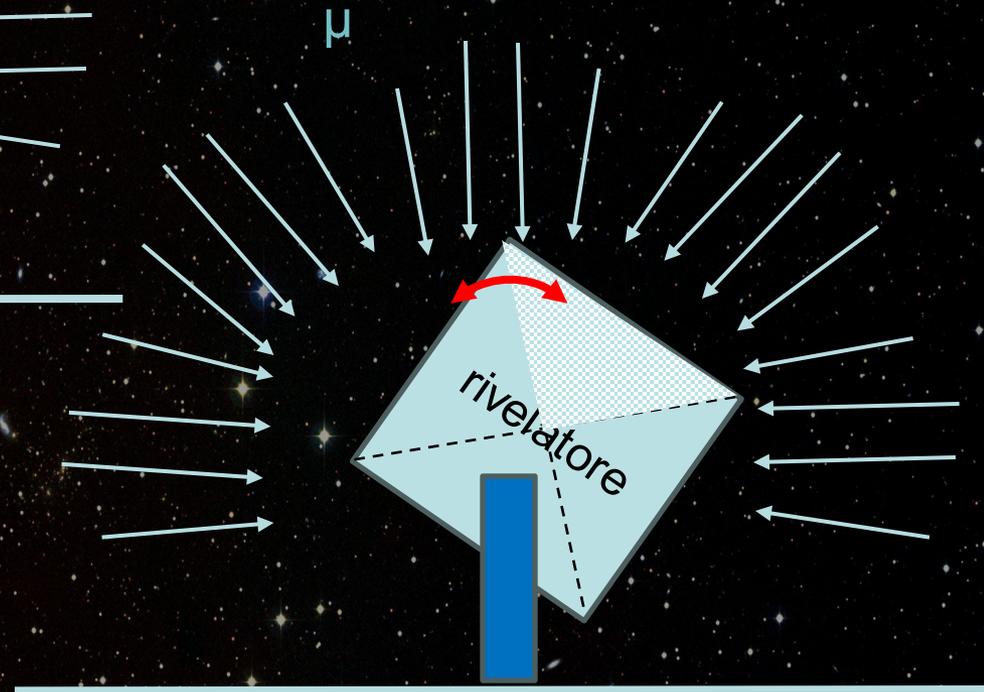
# L'apparato sperimentale

Abbiamo bisogno di uno strumento che :

- sia in grado di osservare i muoni
- sia in grado di capire da dove vengono



Come un telescopio



# L'apparato sperimentale



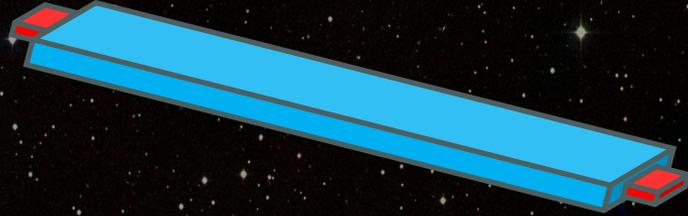
Abbiamo bisogno di uno strumento che :

- sia in grado di osservare i muoni
- sia in grado di capire da dove vengono

**Per osservare le particelle cariche: scintillatori plastici**

Gli scintillatori plastici sfruttano, per segnalare il passaggio di una particella carica, la luminescenza del materiale, ossia la capacità di produrre un fotone ogni qual volta un suo elettrone decade, dopo essere stato eccitato dalla collisione con una particella elementare (v. presentazione di Gianluigi)

# Il cosmic rays cube

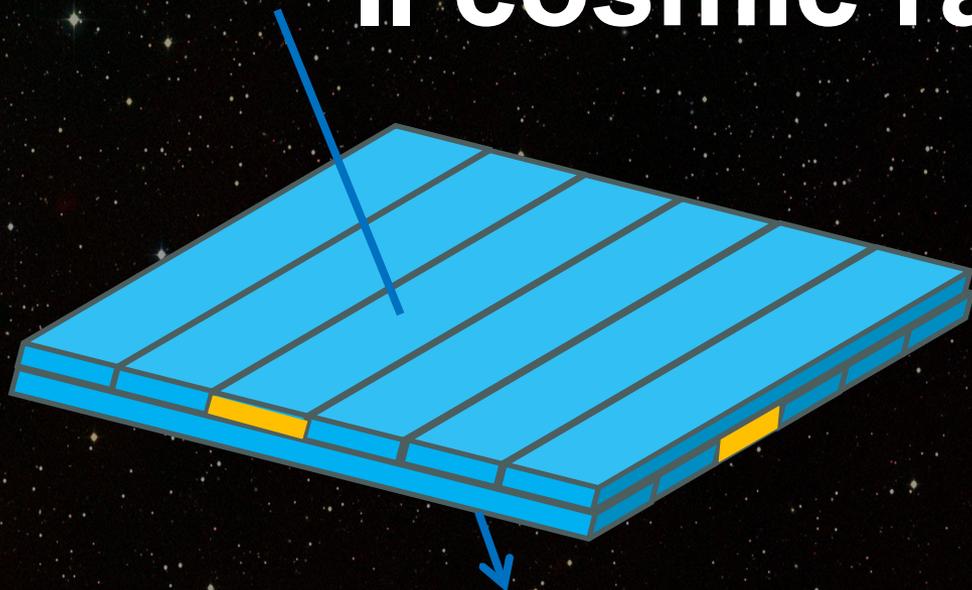


Abbiamo bisogno di uno strumento che :

- sia in grado di osservare i muoni
- sia in grado di capire da dove vengono

Scintillatori di dimensione  $26 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$  il cui segnale viene raccolto sui lati minori da due rivelatori che si chiamano “fotomoltiplicatori al silicio” (Silicon PhotoMultiplier, SiPM, v. presentazione di Gianluigi), lo trasformano in due segnali elettrici che vengono passati ad un computer. Il computer controlla e formatta i dati per poi salvarli su un file (di testo nel nostro caso).

# Il cosmic rays cube



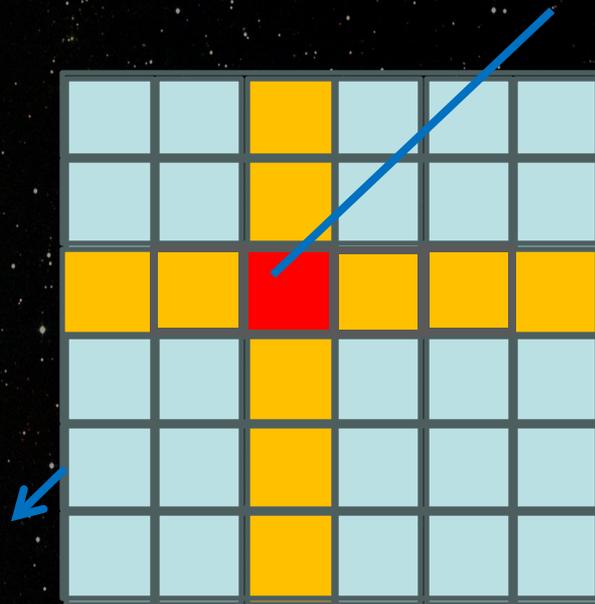
Abbiamo bisogno di uno strumento che :

- sia in grado di osservare i muoni
- sia in grado di capire da dove vengono

Quattro moduli composti da due piani di scintillatori attaccati tra di loro di dimensione totale  $26 \times 26 \text{ cm}^2$

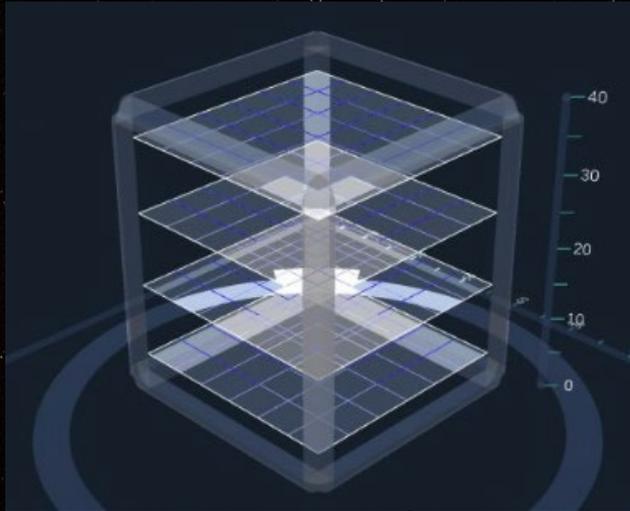
Ogni piano è formato da 6 barre di scintillatore di dimensioni  $26 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$

I due piani di ciascun modulo hanno le barre disposte ortogonalmente tra di loro (idealmente formano una scacchiera per cui possiamo identificare univocamente ciascuna casella)



Distanza tra i moduli: 7 cm

# Il cosmic rays cube



Abbiamo bisogno di uno strumento che :

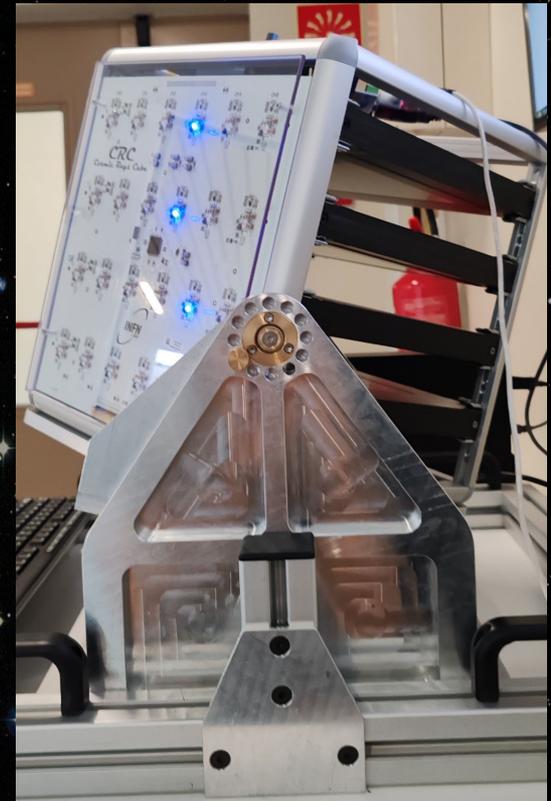
- sia in grado di osservare i muoni
- sia in grado di capire da dove vengono

Quattro moduli composti da due piani di scintillatori attaccati tra di loro di dimensione totale  $26 \times 26 \text{ cm}^2$

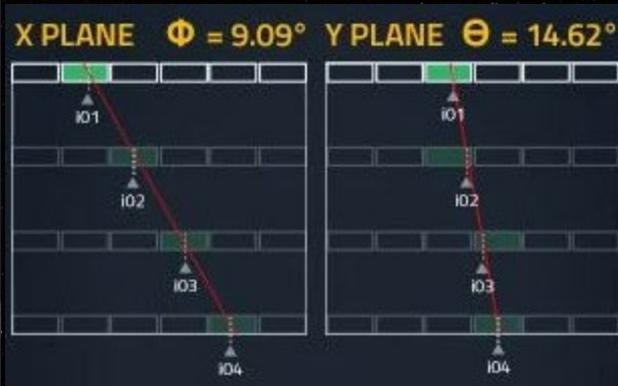
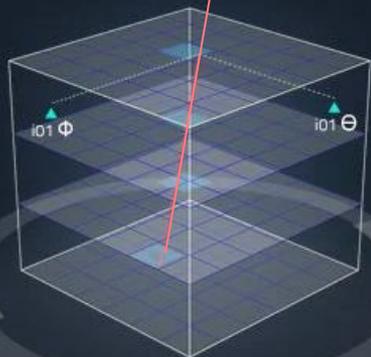
Ogni piano è formato da 6 barre di scintillatore di dimensioni  $26 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$

I due piani di ciascun modulo hanno le barre disposte ortogonalmente tra di loro (idealmente formano una scacchiera per cui possiamo identificare univocamente ciascuna casella)

Distanza tra i moduli: 7 cm



# Il cosmic rays cube



Abbiamo bisogno di uno strumento che :

- sia in grado di osservare i muoni
- sia in grado di capire da dove vengono

Quattro moduli composti da due piani di scintillatori attaccati tra di loro di dimensione totale  $26 \times 26 \text{ cm}^2$

Ogni piano è formato da 6 barre di scintillatore di dimensioni  $26 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$

I due piani di ciascun modulo hanno le barre disposte ortogonalmente tra di loro (idealmente formano una scacchiera per cui possiamo identificare univocamente ciascuna casella)

Distanza tra i moduli: 7 cm



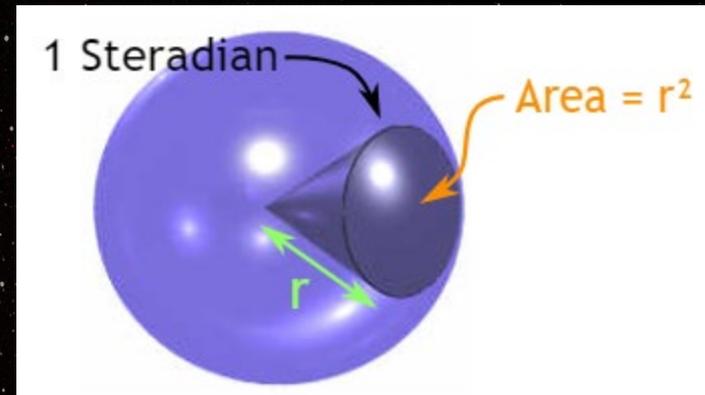
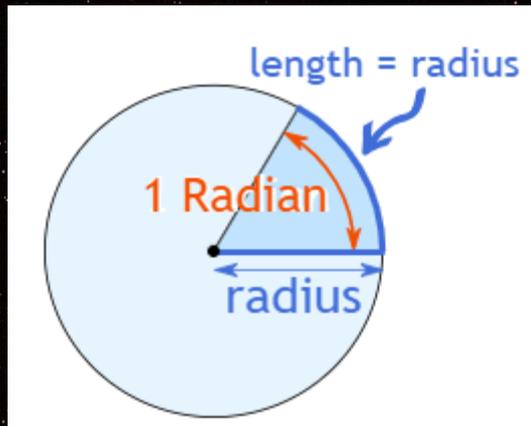
# La misura

# La misura

Vogliamo misurare il “flusso di muoni” in funzione dell’angolo di incidenza

Che cosa è il flusso di muoni?

**Flusso:** numero di muoni che arrivano su una superficie di un  $\text{m}^2$  in un secondo in un angolo solido (tridimensionale) di uno steradiante (equivalente al radiante ma in 3D).



# La misura

Vogliamo misurare il “flusso di muoni” in funzione dell’angolo di incidenza

Che cosa è il flusso di muoni?

**Flusso: numero di muoni che arrivano su una superficie di un  $m^2$  in un secondo in un angolo solido (tridimensionale) di uno steradiante (equivalente al radiante ma in 3D).**

Il flusso di muoni a livello del mare è di circa un muone ogni minuto su una superficie di un  $cm^2$ .

# La misura

Vogliamo misurare il “flusso di muoni” in funzione dell’angolo di incidenza

Per ottenere il flusso, quindi, avremo bisogno di:

1. Contare il numero di muoni (N)

$$F = \frac{N}{A \cdot t}$$

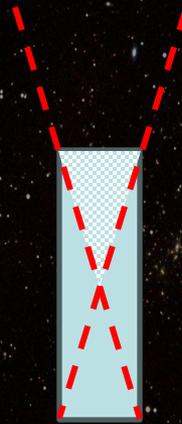
# La misura

Vogliamo misurare il “flusso di muoni” in funzione dell’angolo di incidenza

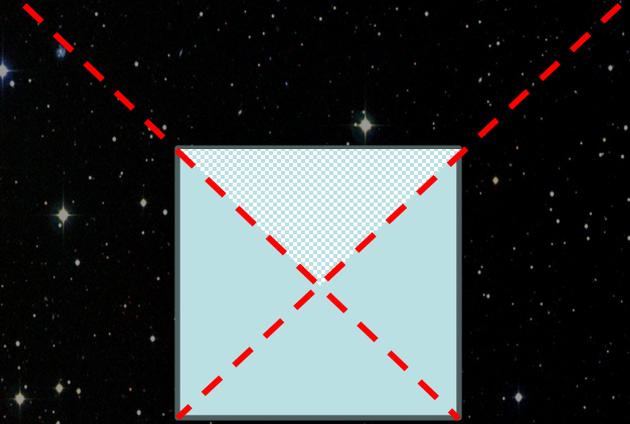
Per ottenere il flusso, quindi, avremo bisogno di:

1. Contare il numero di muoni (N)
2. Calcolare la cosiddetta “accettanza” dello strumento, ossia il suo angolo solido (A)

$$F = \frac{N}{A}$$



$A=10 \text{ m}^2 \text{ sr}$



$A=500 \text{ m}^2 \text{ sr}$

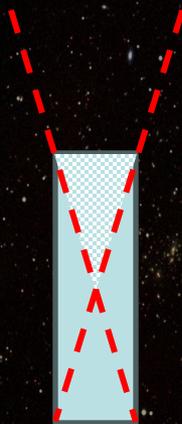
# La misura

Vogliamo misurare il “flusso di muoni” in funzione dell’angolo di incidenza

Per ottenere il flusso, quindi, avremo bisogno di:

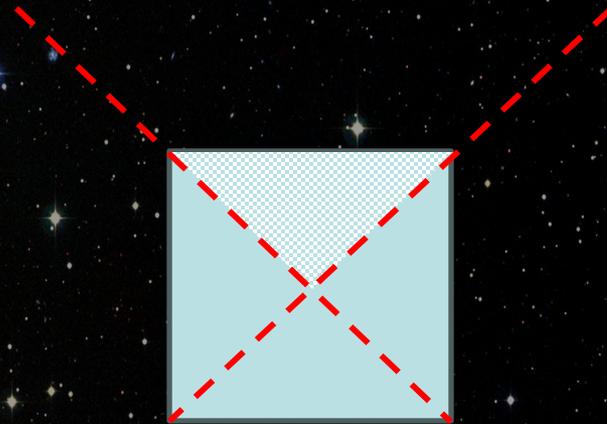
1. Contare il numero di muoni (N)
2. Calcolare la cosiddetta “accettanza” dello strumento, ossia il suo angolo solido (A)
3. Tenere conto del tempo di misura (T)

$$F = \frac{N}{A \cdot T}$$



$A=10 \text{ m}^2 \text{ sr}$

$N=2000$  per  $T=200 \text{ s}$

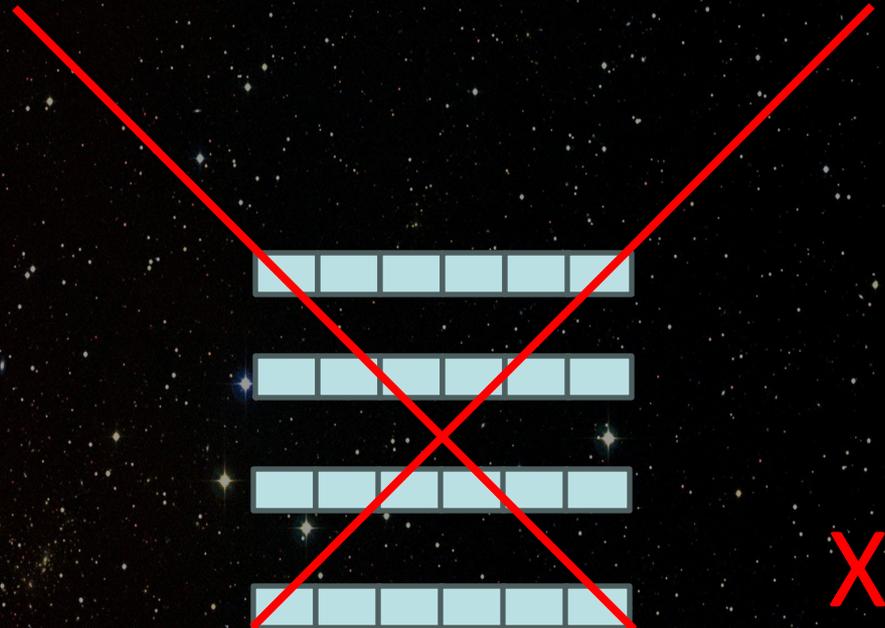
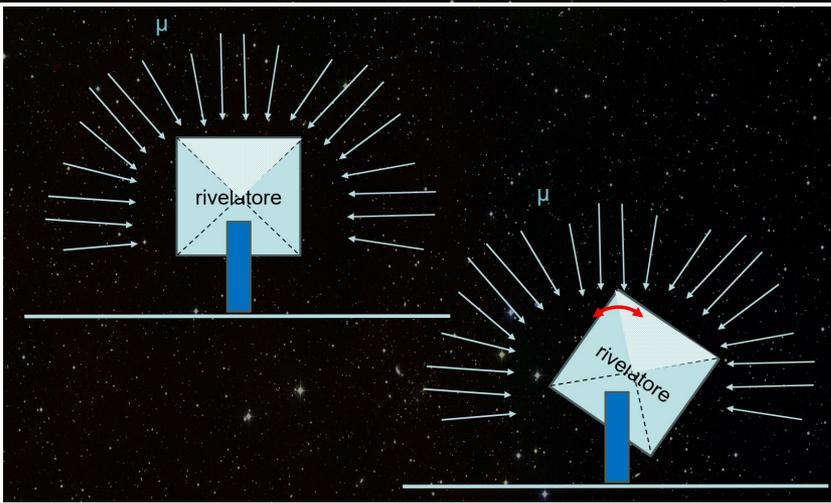


$A=500 \text{ m}^2 \text{ sr}$

$N=1000$  per  $T=2 \text{ s}$

# L'accettanza

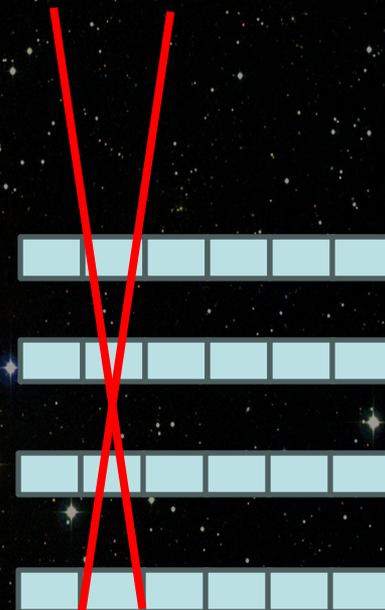
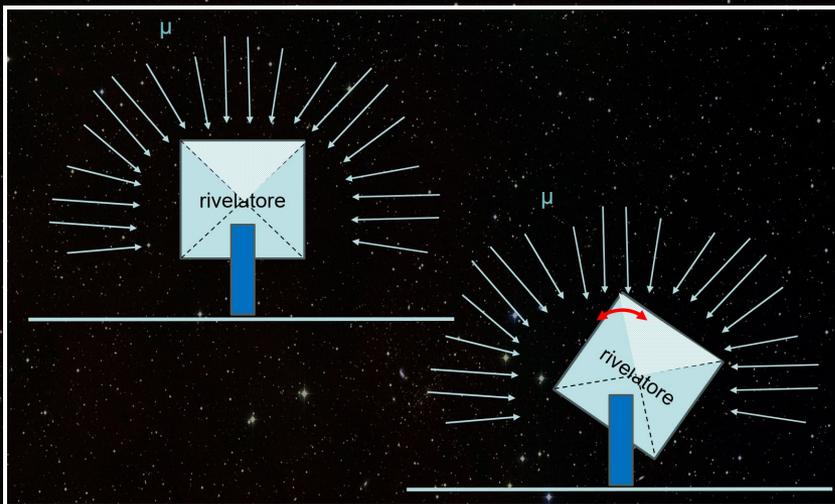
Vogliamo misurare il "flusso di muoni" in funzione dell'angolo di incidenza



Accettanza grande: più statistica ma poca direzionalità

# L'accettanza

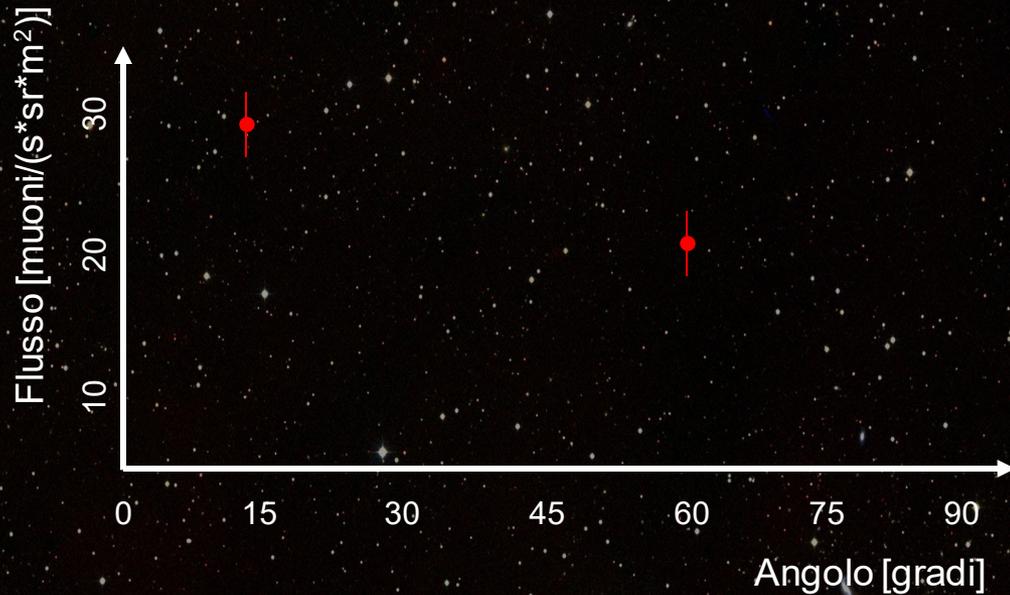
Vogliamo misurare il "flusso di muoni" in funzione dell'angolo di incidenza



Piccola accettazione: meno statistica ma grande direzionalità

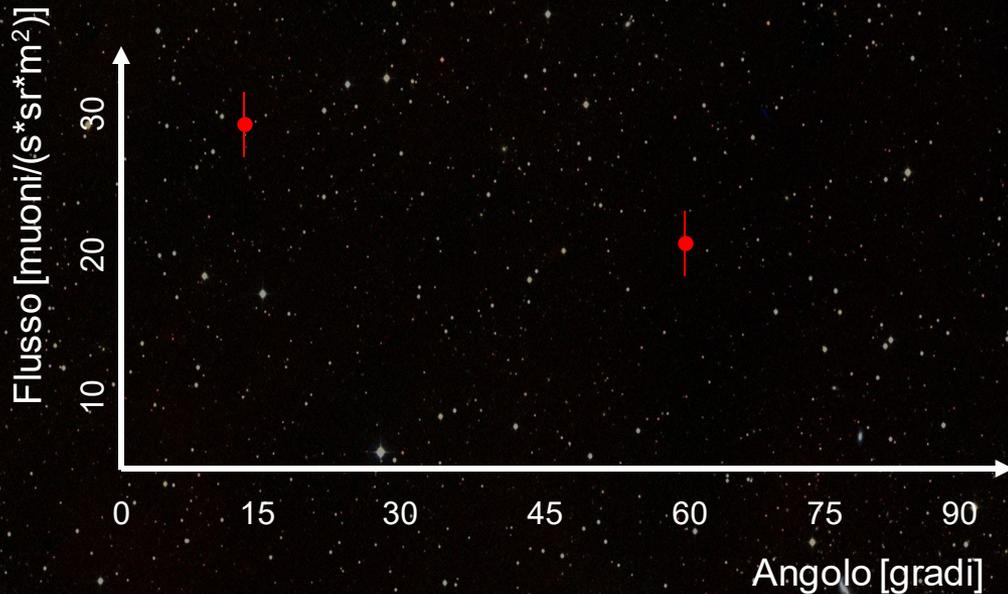
# Quante misure?

Vogliamo misurare il “flusso di muoni” in funzione dell’angolo di incidenza



# Quante misure?

Vogliamo misurare il “flusso di muoni” in funzione dell’angolo di incidenza



**Angoli di misura: 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90 gradi**

# Svolgimento

- 1) Vi dividerete in gruppi
- 2) Ciascun gruppo prenderà le misure ad un certo angolo
- 3) Nel frattempo, a rotazione, potrete vedere le camera a nebbia
- 4) Come vi spiegherà Riccardo, userete degli strumenti che abbiamo preparato su internet per caricare i dati che avete preso e fare l'analisi fino ad ottenere i flussi a diversi angoli e produrre delle figure con i risultati e trarre le conclusioni
- 5) Preparerete una breve relazione
- 6) Questo pomeriggio presenteremo i risultati in collegamento remoto



# Conclusioni

# Conclusioni

Esistono i raggi cosmici: particelle cariche che arrivano, principalmente, dalla Galassia e dal Sole.

Possiamo osservarli e studiarli con diversi strumenti, ad esempio la camera a nebbia o il nostro “cosmic rays cube”

Ci siamo chiesti quanti muoni arrivano dalle diverse direzioni e abbiamo fatto delle ipotesi

Quindi misureremo il flusso di muoni in funzione della loro direzione di arrivo usando il cosmic rays cube

Dopo aver preso i dati, li analizzeremo e vedremo se le nostre ipotesi erano corrette o meno

