

# I raggi cosmici

Emiliano Mocchiutti  
*INFN Trieste*

26 Novembre 2024 – ICD 2024

# In questa presentazione

- ❑ **Introduzione**
- ❑ **La scoperta dei raggi cosmici**
- ❑ **La fisica della astroparticelle**
- ❑ **Rivelatori di raggi cosmici**

# Introduzione

# La scienza è rigore non certezza

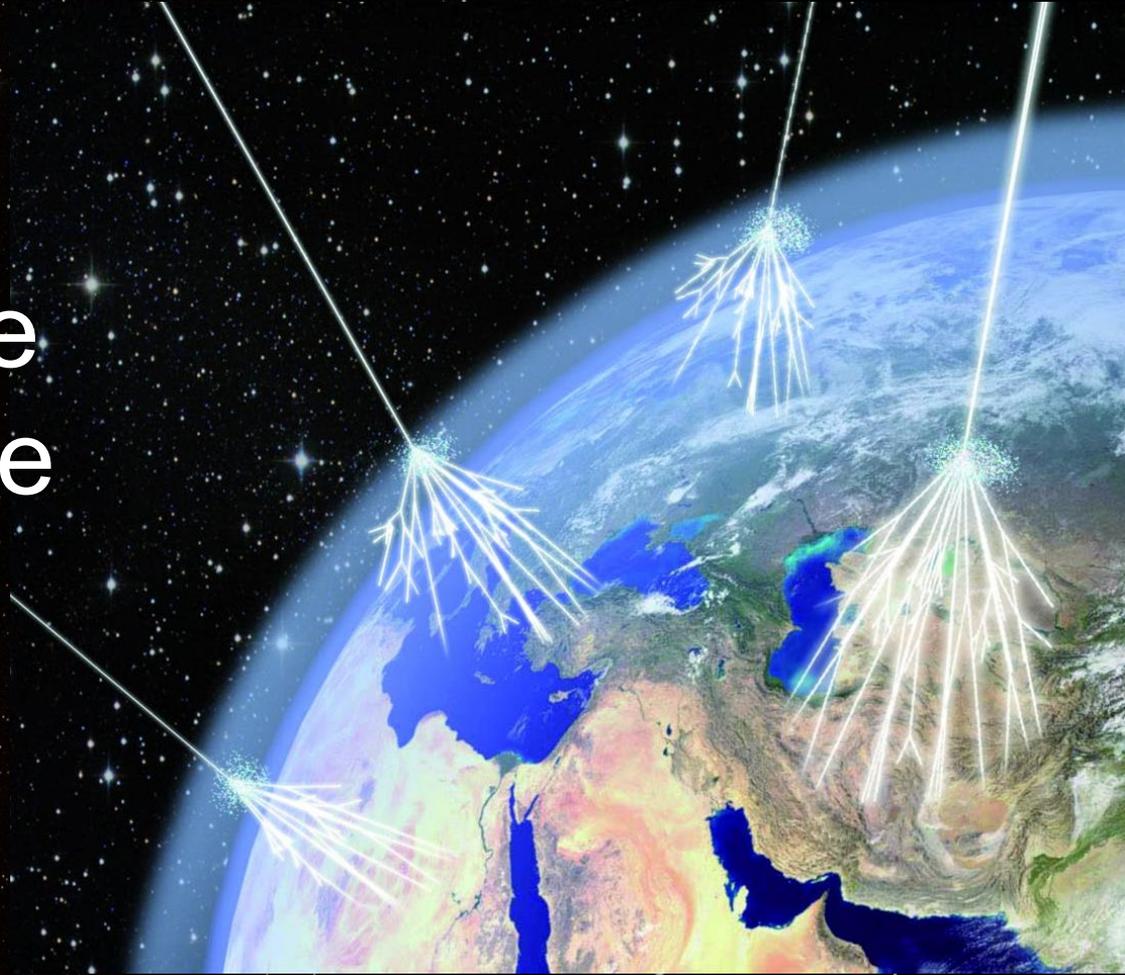
Fisica è rigore nel metodo,  
*non* rigore nel risultato.

Fisica è fare le domande  
giuste, non ottenere  
risposte certe e indiscutibili.

Fisica è dubbio, è senso  
critico, è curiosità, è sfidare  
il “senso comune”, è cercare  
di andare dove nessuno è mai arrivato, è (cercare di)  
non avere pregiudizi,...



I raggi cosmici  
sono particelle  
elettricamente  
cariche di origine  
extraterrestre che  
colpiscono la  
Terra da ogni  
direzione



# La scoperta dei raggi cosmici





# Elettroscopio



T. Cavallo, 1780  
Perfezionato, in seguito, da A. Volta

# Inizi del '900, Marie e Pierre Curie

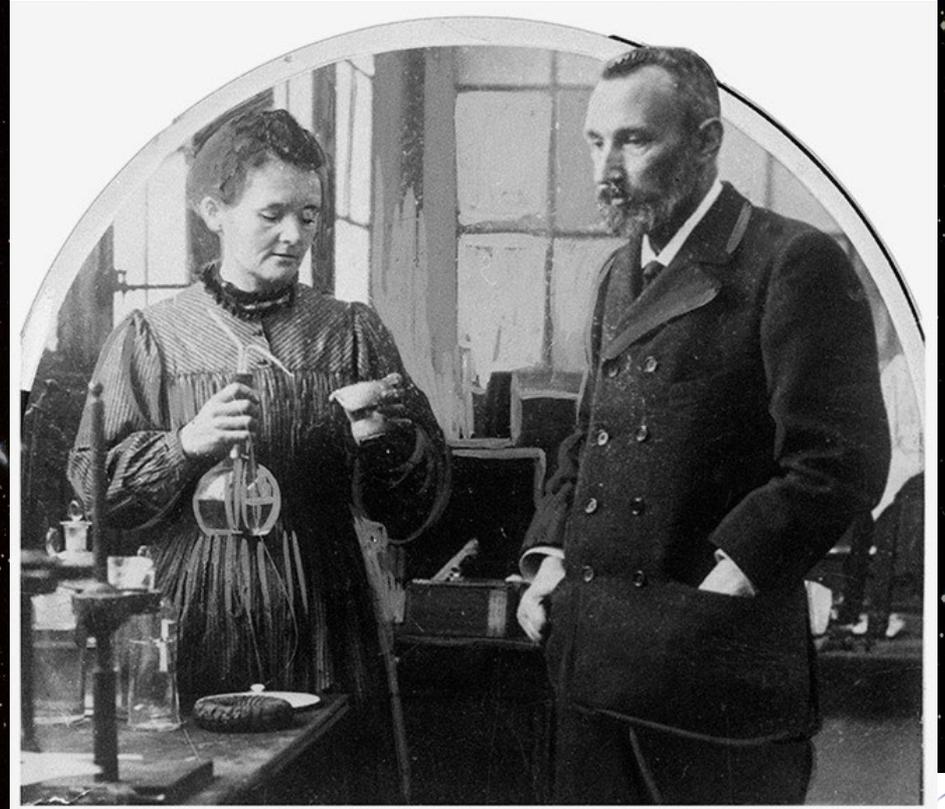
Nel 1896 A. H. Becquerel scopre il fenomeno della radioattività naturale, studiando l'uranio.



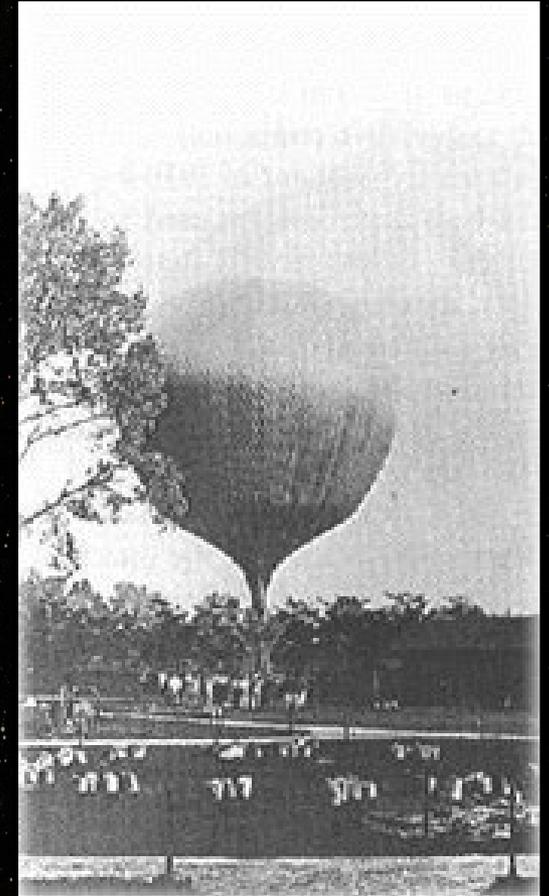
Nel 1898 M. Sklodowska e P. Curie scoprono gli elementi polonio e radio.

Il fenomeno di scarica spontanea dell'elettroscopio a foglie d'oro viene attribuito alla radioattività naturale.

Si comincia ad utilizzarlo per fare misure...



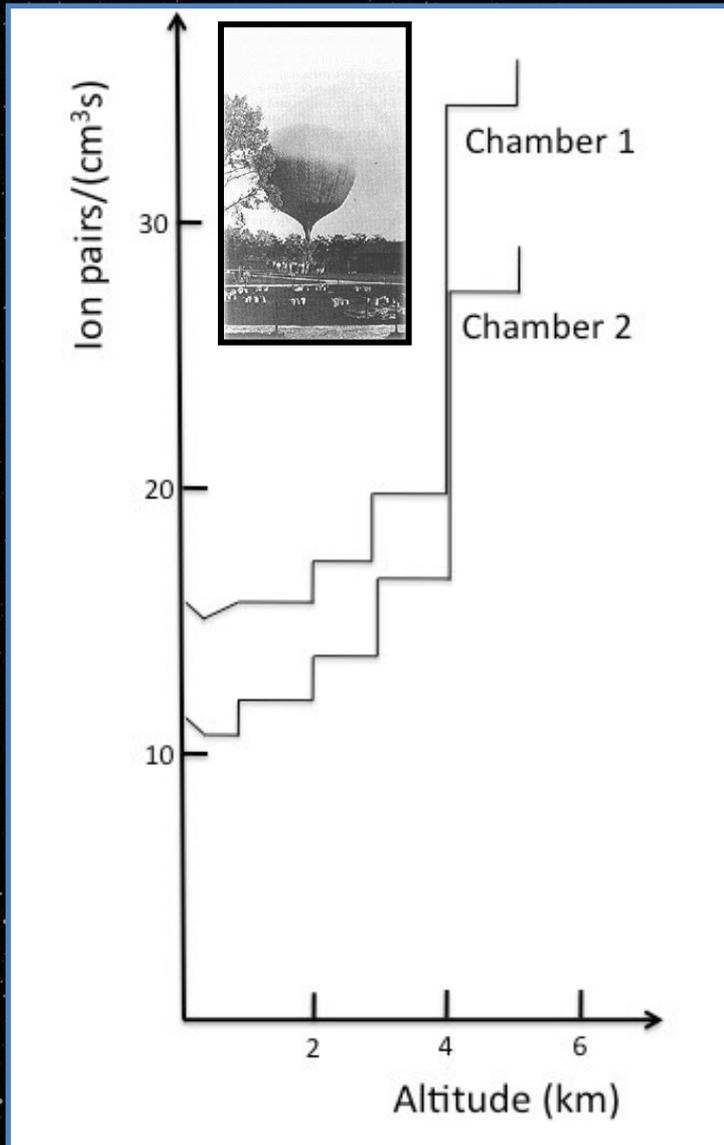
# 1912: Victor Hess



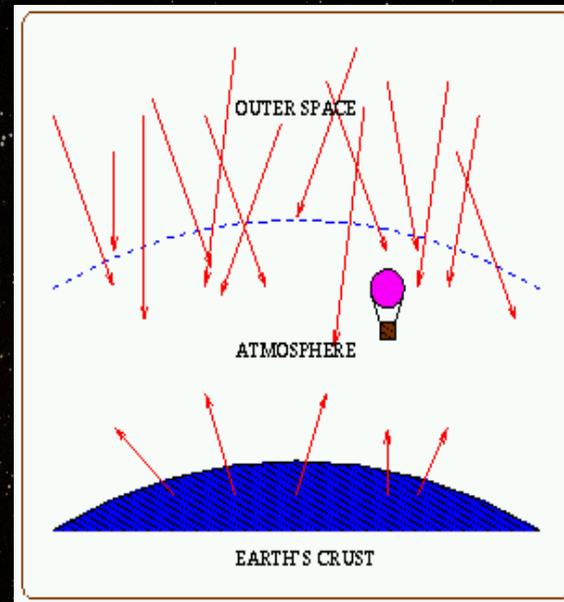
L'austriaco Victor Hess propone un esperimento: la radiazione aumenta o diminuisce in quota?

Nel 1912 Hess fa 7 voli. Nel volo finale, nell'agosto 1912, raggiunge i 5300 metri.

# 1912: Victor Hess



I risultati mostrano che la radioattività cresce rapidamente oltre i 3000 metri  
Hess conclude che parte della radiazione viene dal suolo, e parte dall'alto (fuori dalla Terra).  
La radiazione è **cosmica!!**

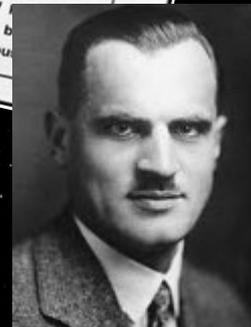
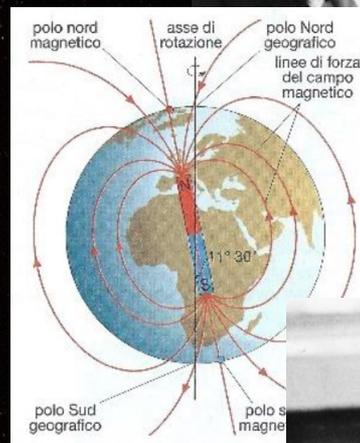


# La fisica dei raggi cosmici



# Nasce la fisica dei raggi cosmici...

- 1925: **Robert Millikan** conia il termine “**raggi cosmici**”, sono raggi gamma (Millikan) o particelle cariche (Compton)?
- 1928: **Jacob Clay** dimostra che i **raggi cosmici sono particelle cariche** (effetto geomagnetico)
- 1933: **Luis Alvarez e Arthur Compton** scoprono che sono prevalentemente particelle **positive** (effetto est-ovest, previsto da Bruno Rossi)
- 1933: **Bruno Rossi** scopre che entrando nell'atmosfera producono **sciami di particelle**



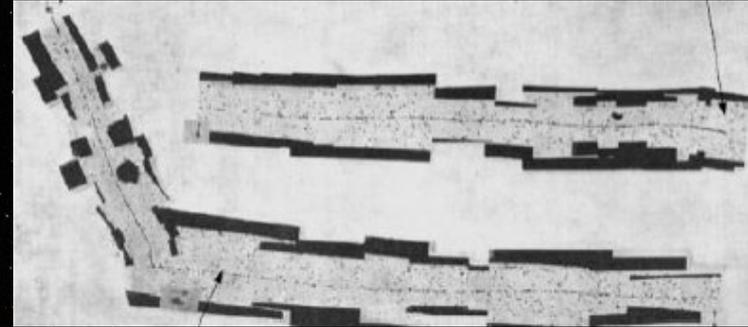
Si sviluppano nuovi tipi di rivelatori: contatori Geiger, camere a nebbia, camere a bolle, camere ad emulsione nucleare...

Bruno Rossi perfeziona e rende pratico il “circuitto di coincidenza” (inventato da Walther Bothe)

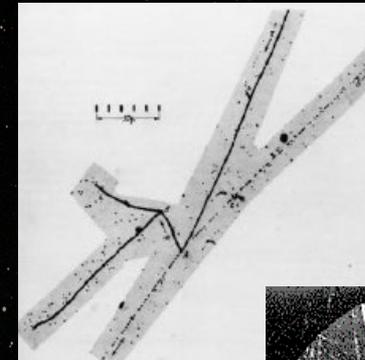
# ... e la fisica delle particelle elementari

Studiando i raggi cosmici vengono scoperte nuove particelle:

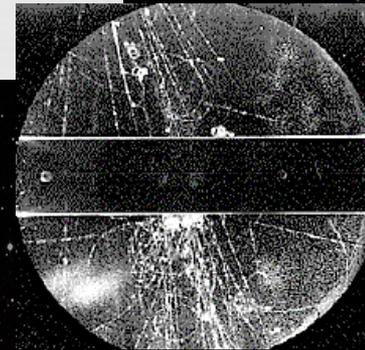
- 1934: Il positrone (Anderson)
- 1937: Il muone, o leptone mu (Neddermeyer & Anderson)
- 1947: Il pione (o mesone p), il primo mesone, scoperto da Lattes, Occhialini & Powell (previsto da Yukawa nel 1935)
- 1947: Il kaone (o mesone K), la prima particella strana (Rochester & Butler)
- 1951: L'iperone  $\Lambda$ , il primo barione strano (Armenteros)
- 1954: Violazione della simmetria di parità (G-stack, la prima collaborazione Europea)



Pioni carichi



Mesoni K



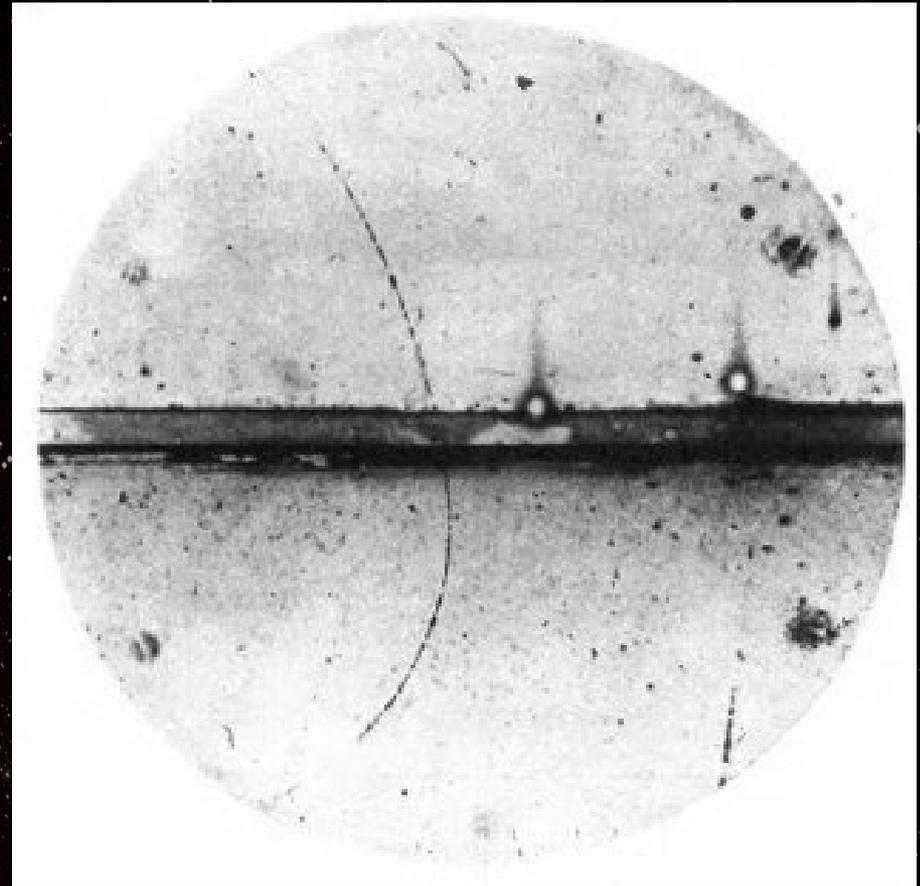
Iperoni ( $\Lambda, \Sigma, \Xi$ )

# L'antimateria: il positrone

Fotografia scattata da **Anderson** in una **camera a nebbia** di un raggio cosmico anomalo:

- dalla direzione di curvatura in campo magnetico si conclude che la particella ha carica positiva
- dalla raggio di curvatura si capisce che la massa è quella dell'elettrone
- dallo spessore della traccia si conclude che ha carica uno (come l'elettrone)

E' un elettrone positivo, il positrone!

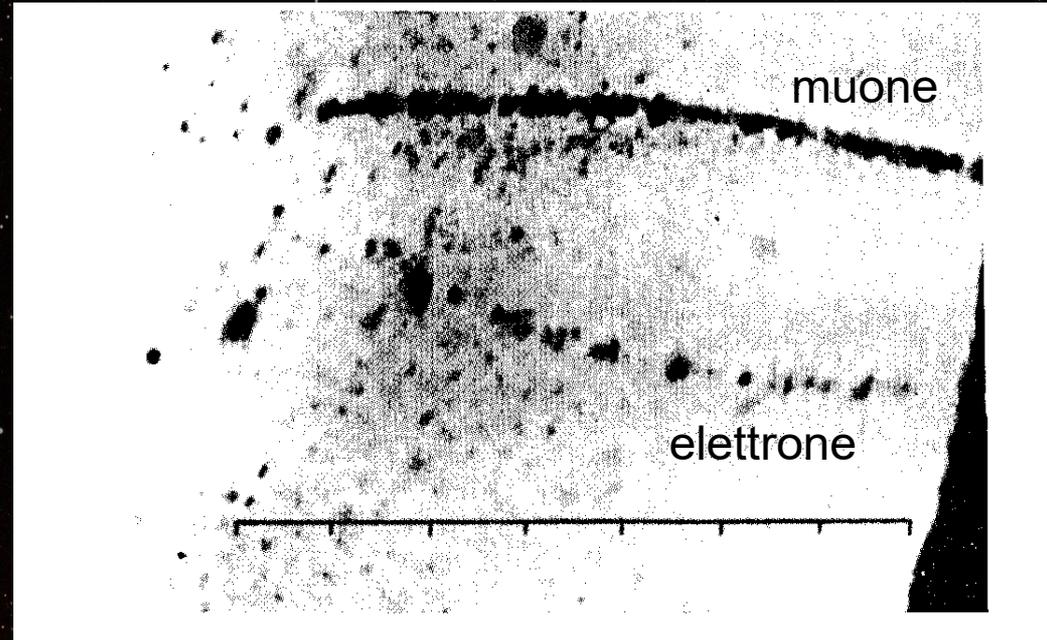


# Il muone: cugino pesante dell'elettrone

Fotografia scattata da **Neddermayer** e **Anderson** in una **camera a nebbia** di un raggio cosmico anomalo e di un elettrone (1937):

- dalla direzione di curvatura in campo magnetico si conclude che la particella ha carica positiva
- dalla raggio di curvatura si capisce che la massa è maggiore dell'elettrone ma inferiore a quella di un protone
- dallo spessore della traccia si conclude che ha carica uno (come l'elettrone)

È il primo muone (positivo) osservato!



I muoni, molto simili agli elettroni ma:

- 1) Hanno una massa circa 200 volte maggiore
- 2) Decadono in  $2 \mu\text{s}$  (in elettroni e neutrini)
- 3) Interagiscono molto meno con la materia

# Il premio Nobel per la fisica 1936

## The Nobel Prize in Physics 1936



Photo from the Nobel Foundation archive.

Victor Franz Hess

Prize share: 1/2



Photo from the Nobel Foundation archive.

Carl David Anderson

Prize share: 1/2

The Nobel Prize in Physics 1936 was divided equally between Victor Franz Hess "for his discovery of cosmic radiation" and Carl David Anderson "for his discovery of the positron."



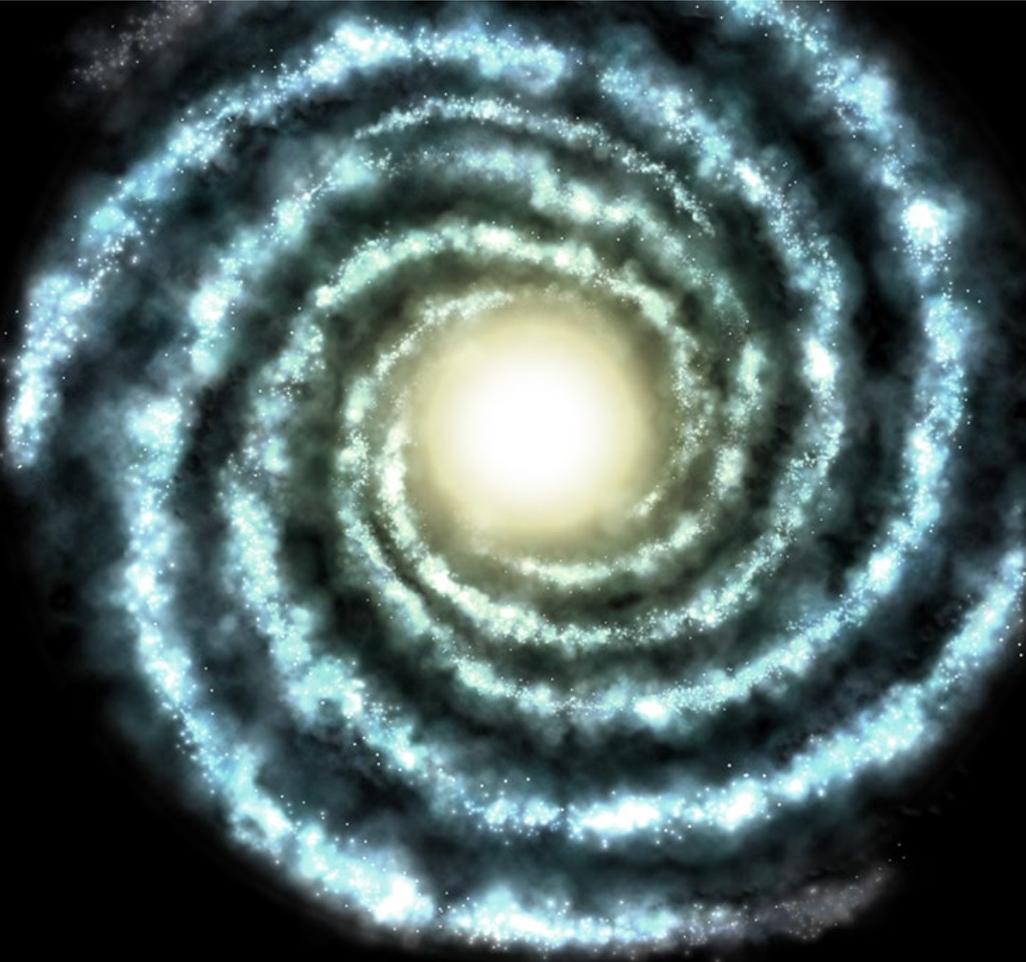
I raggi cosmici sono particelle elettricamente cariche di origine extraterrestre che colpiscono la Terra da ogni direzione



Attorno al 1950 è abbastanza assodato che *i raggi cosmici primari sono particelle cariche*, nella maggior parte *protoni* (~90%), *nuclei di elio* (~9%) e una piccola percentuale di *altri nuclei ed elettroni*.

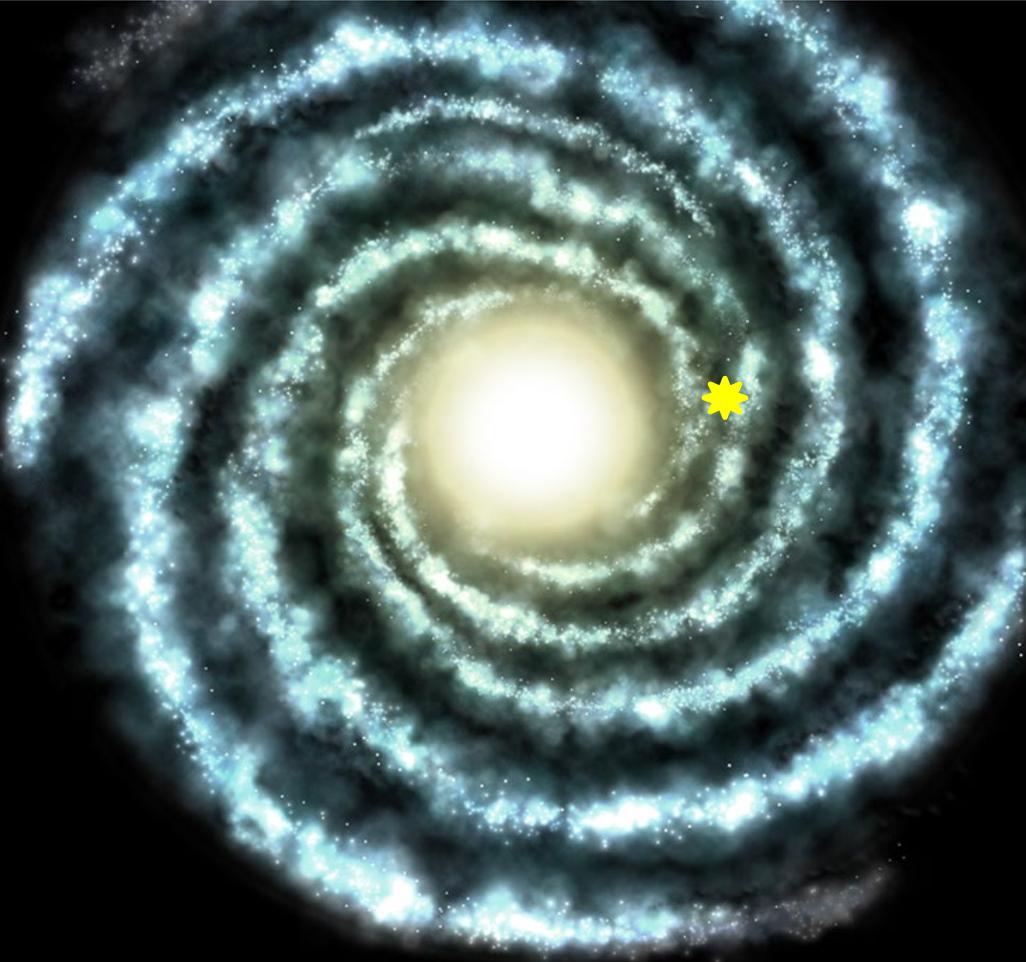
# Il viaggio dei raggi cosmici

La maggior parte dei raggi cosmici ha origine da esplosioni di **supernovae** della nostra **galassia** (la Via Lattea)



# Il viaggio dei raggi cosmici

La maggior parte dei raggi cosmici ha origine da esplosioni di **supernovae** della nostra **galassia** (la Via Lattea)

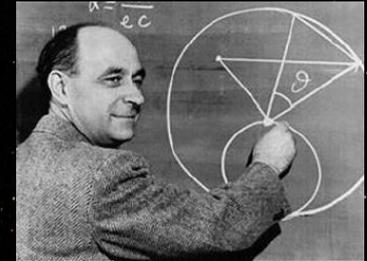
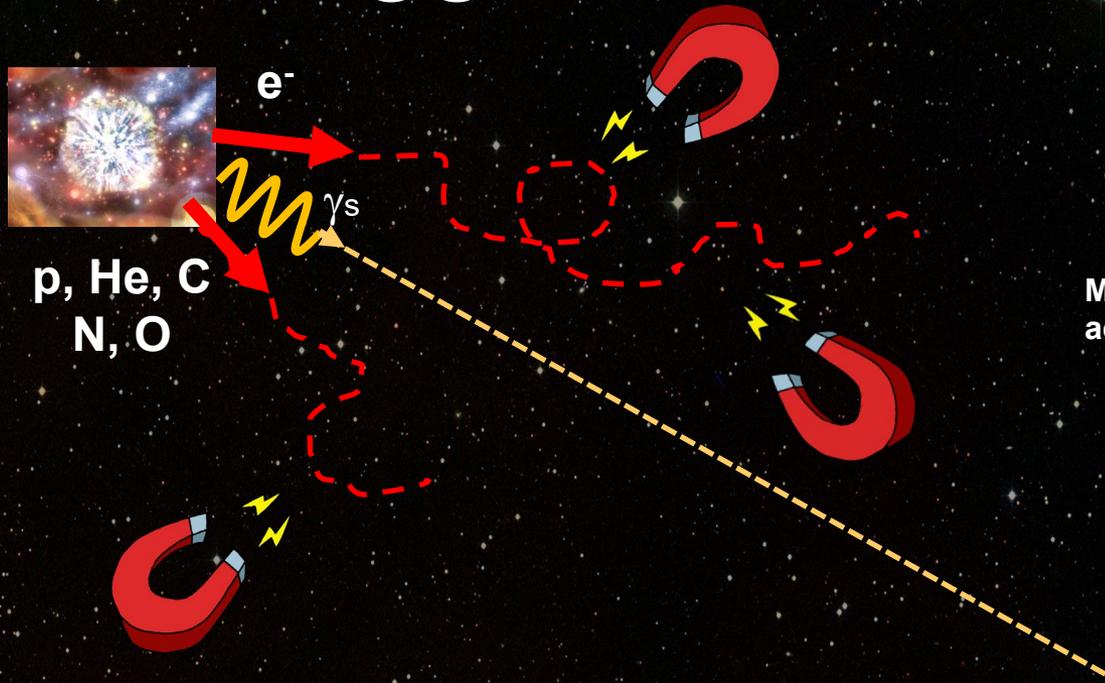


# Il viaggio dei raggi cosmici

La magia  
della notte



# Raggi cosmici accelerati

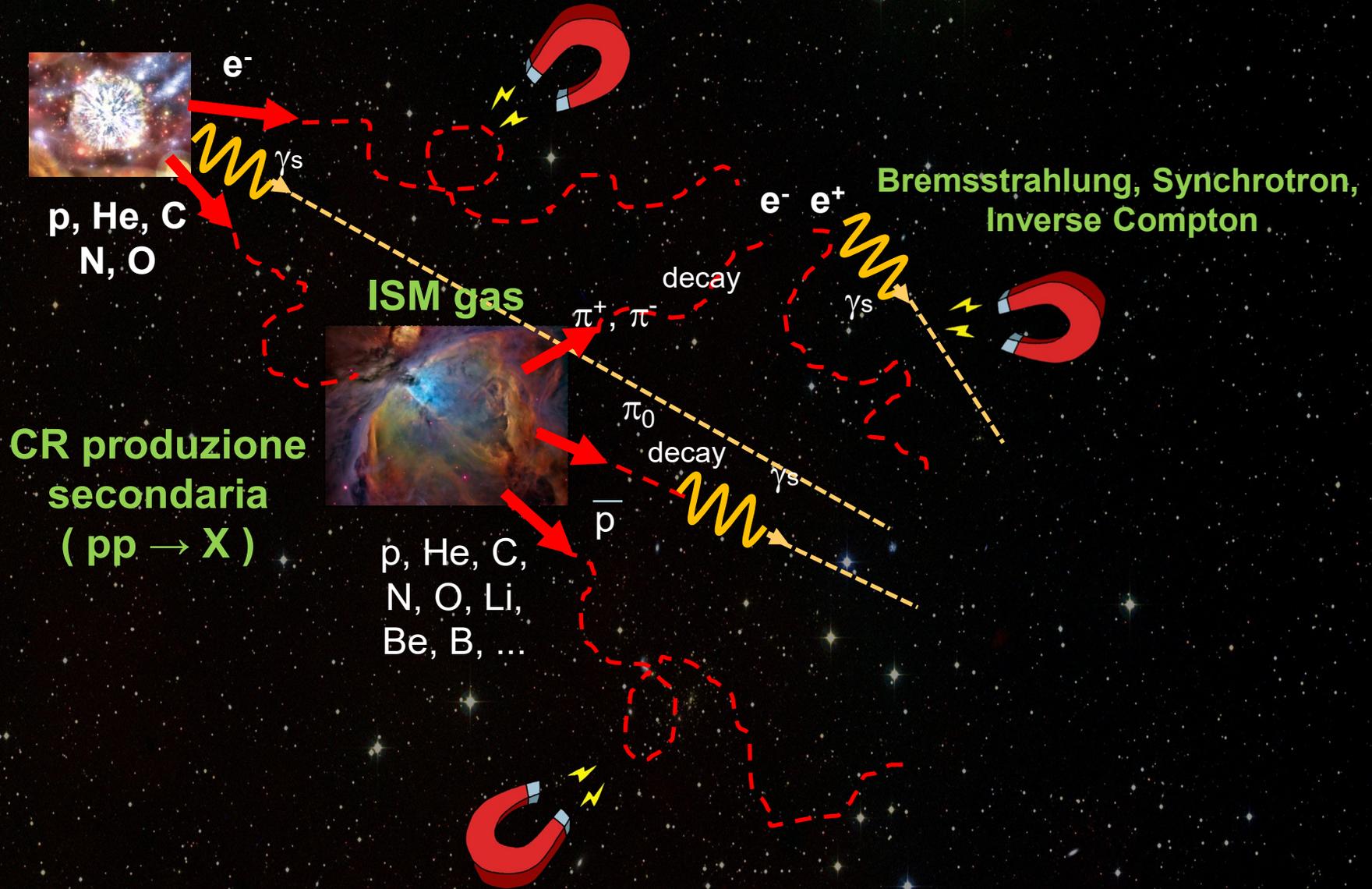


Meccanismo di accelerazione di **Fermi**

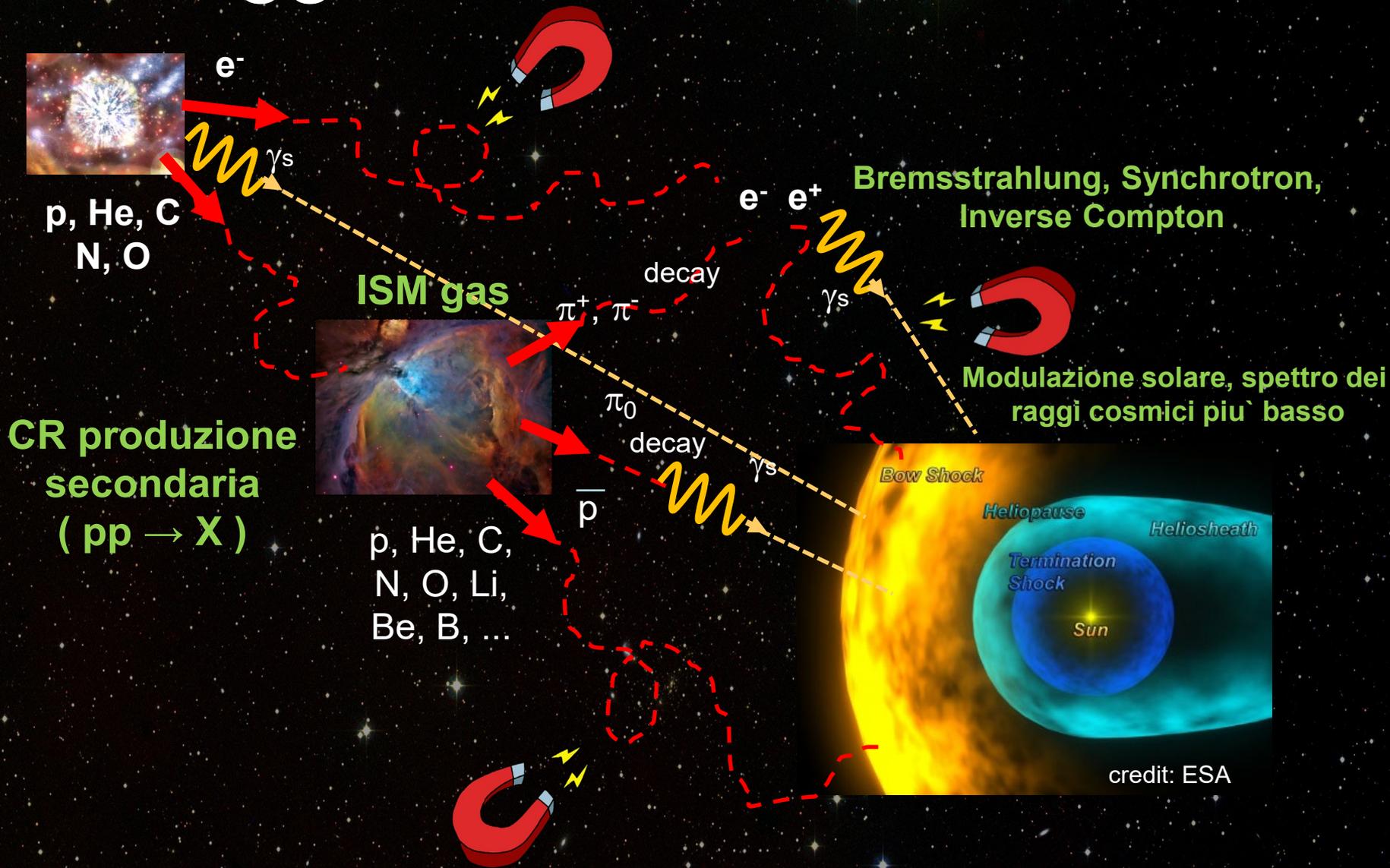
La traiettoria è deviata dai **campi magnetici** della galassia

Una volta emessi, i raggi cosmici rimangono confinati nella galassia dai campi magnetici per circa **10 milioni di anni**

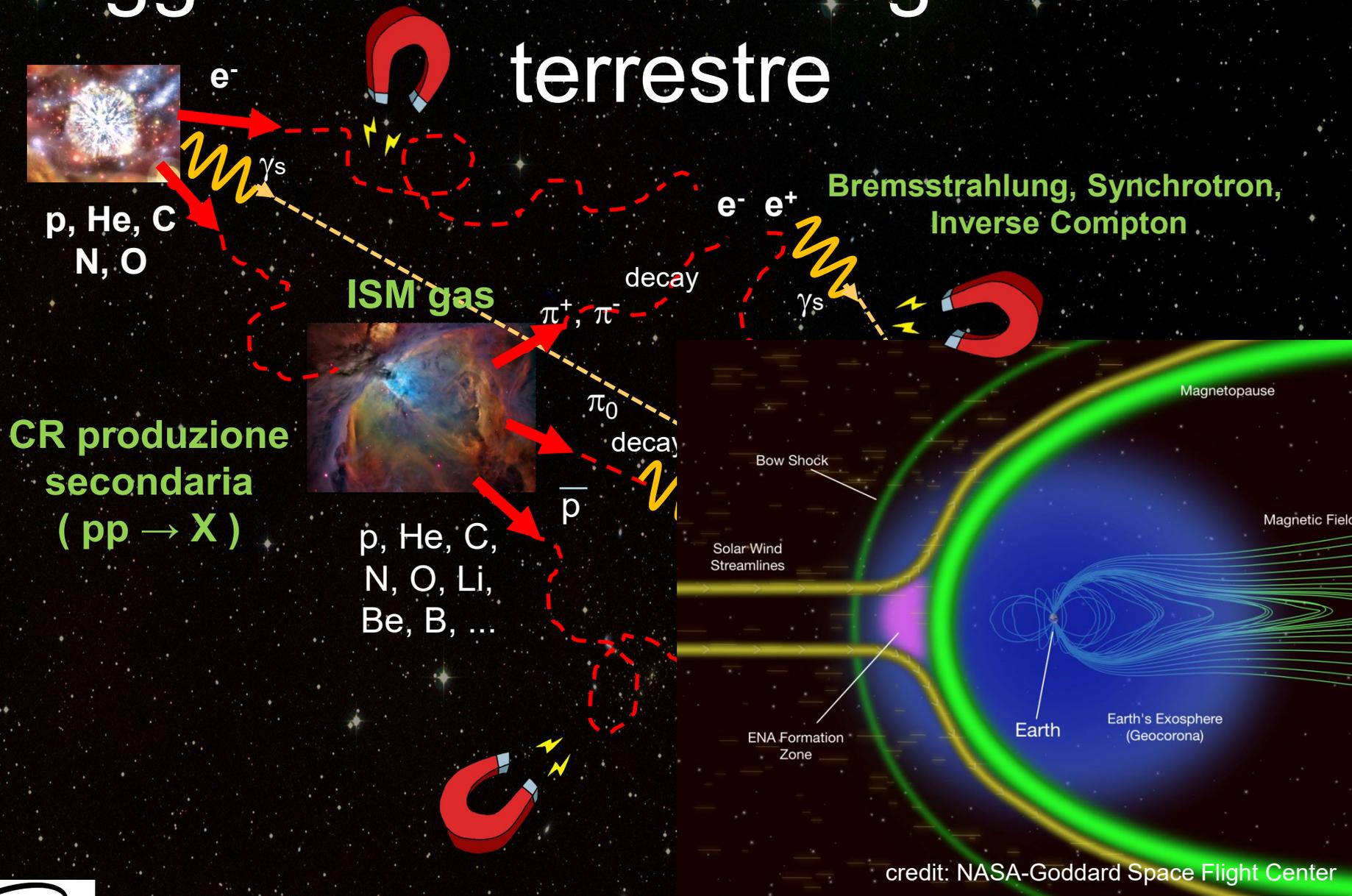
# Raggi cosmici prodotti da interazioni



# Raggi cosmici nell'eliosfera



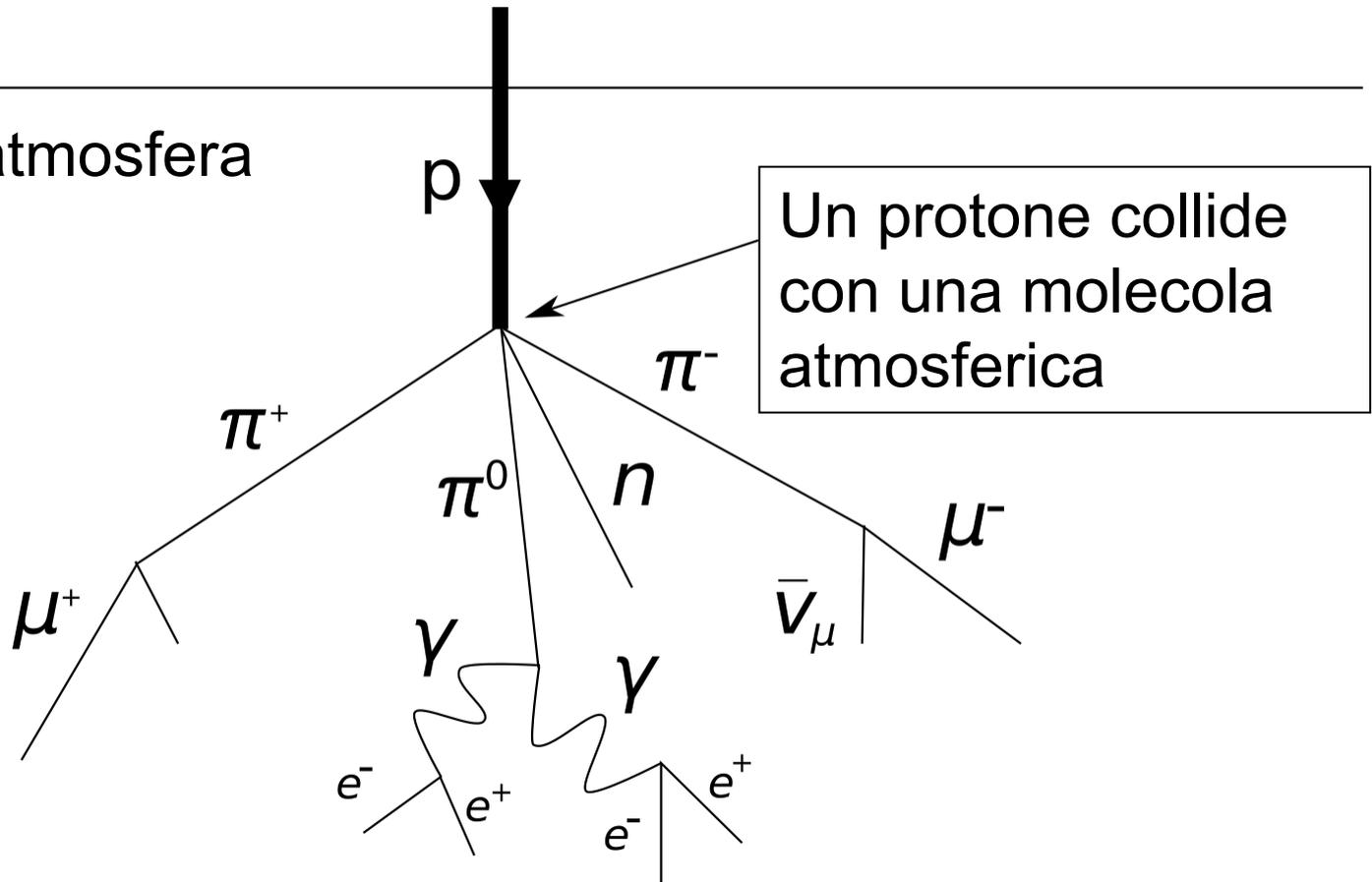
# Raggi cosmici nella magnetosfera terrestre



credit: NASA-Goddard Space Flight Center

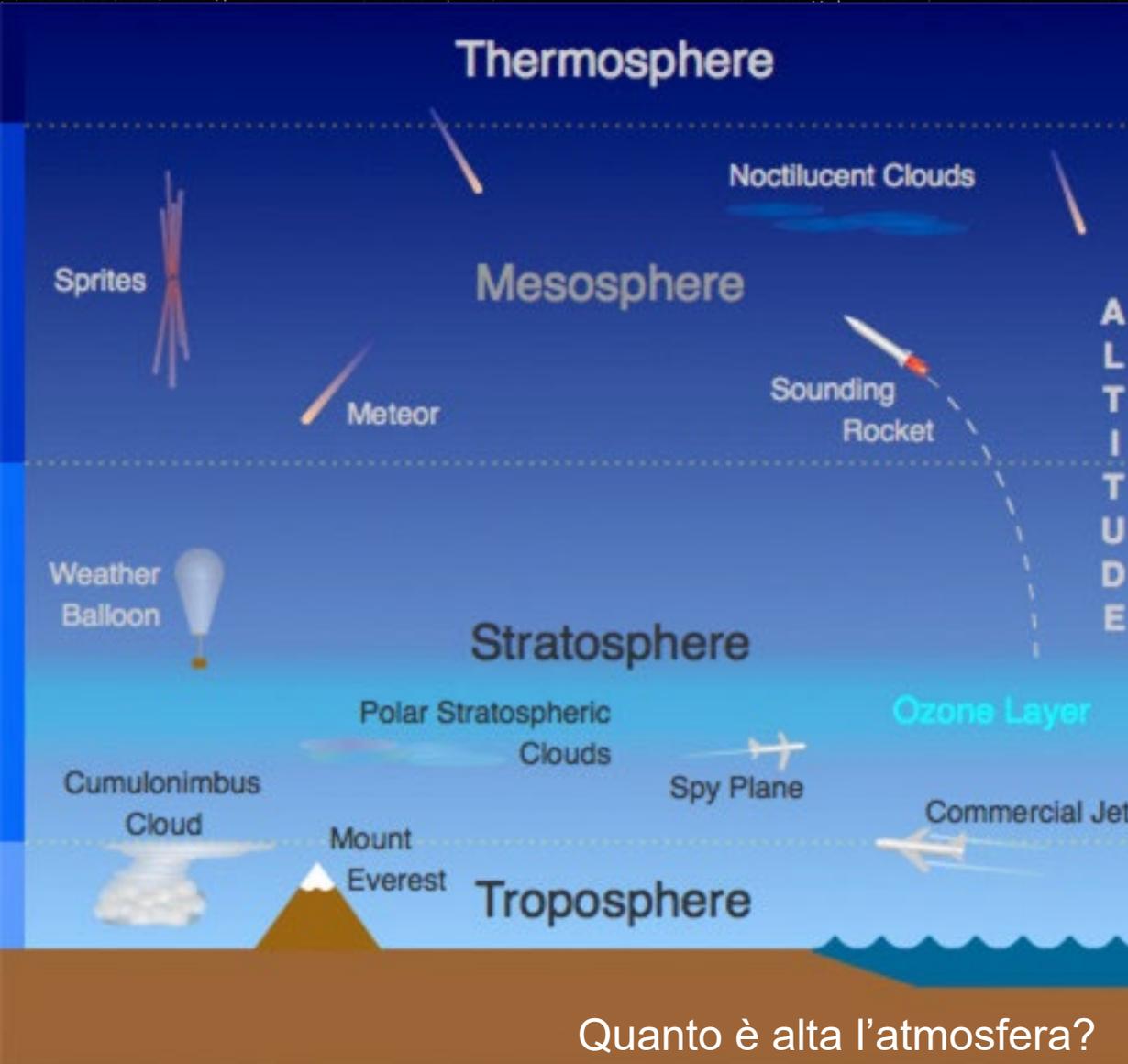
# ... e raggiungono la Terra, prima interazione:

Limite dell'atmosfera

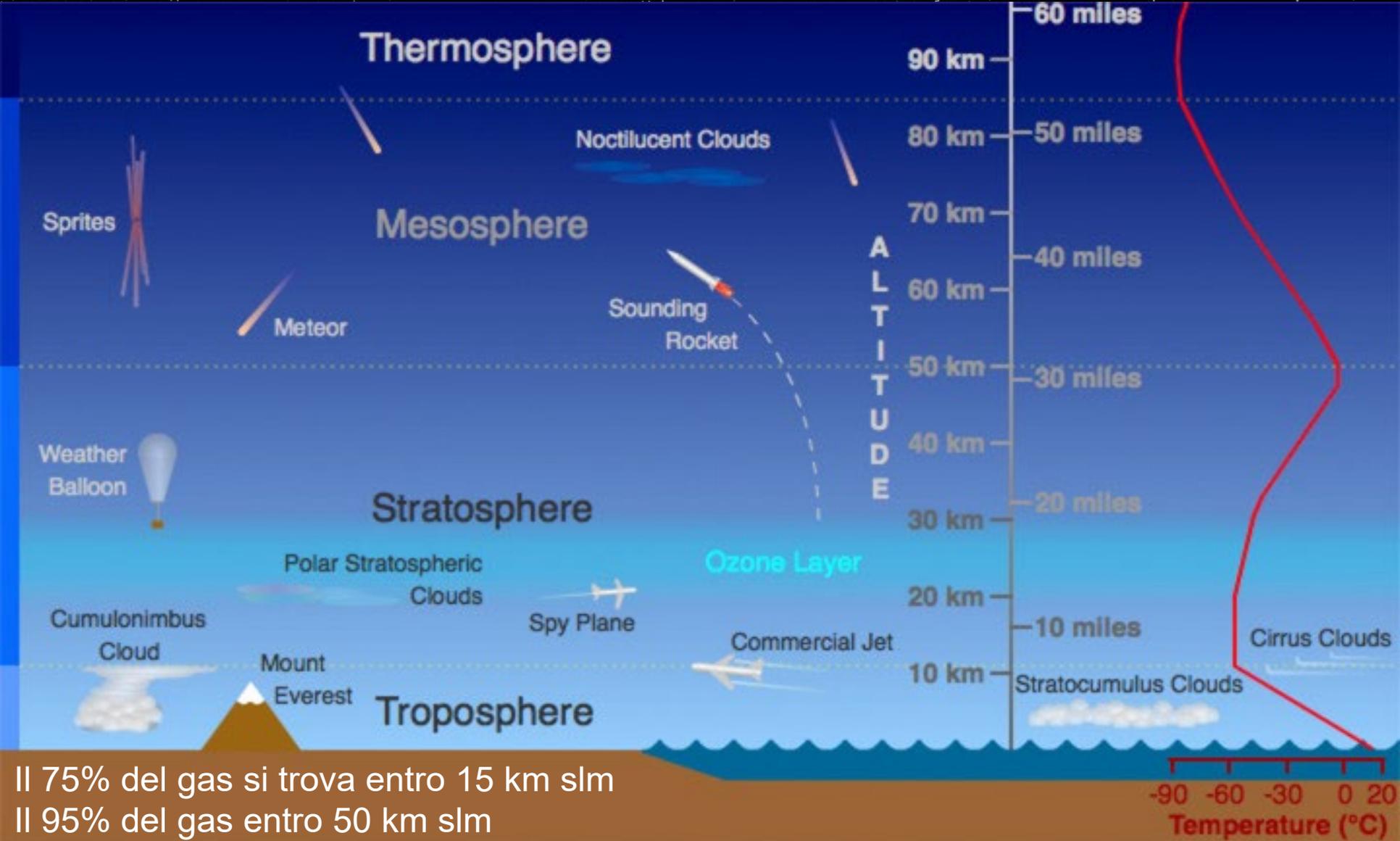


1937: Pierre Auger conclude che esistono dei raggi cosmici "primari" che interagiscono con gli strati superiori dell'atmosfera e iniziano una "cascata" di interazioni secondarie che alla fine porta a terra una "doccia" di muoni, elettroni e fotoni

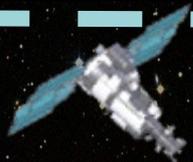
# L'atmosfera terrestre



# L'atmosfera terrestre



~500 km



Raggio cosmico primario

Limite dell'atmosfera



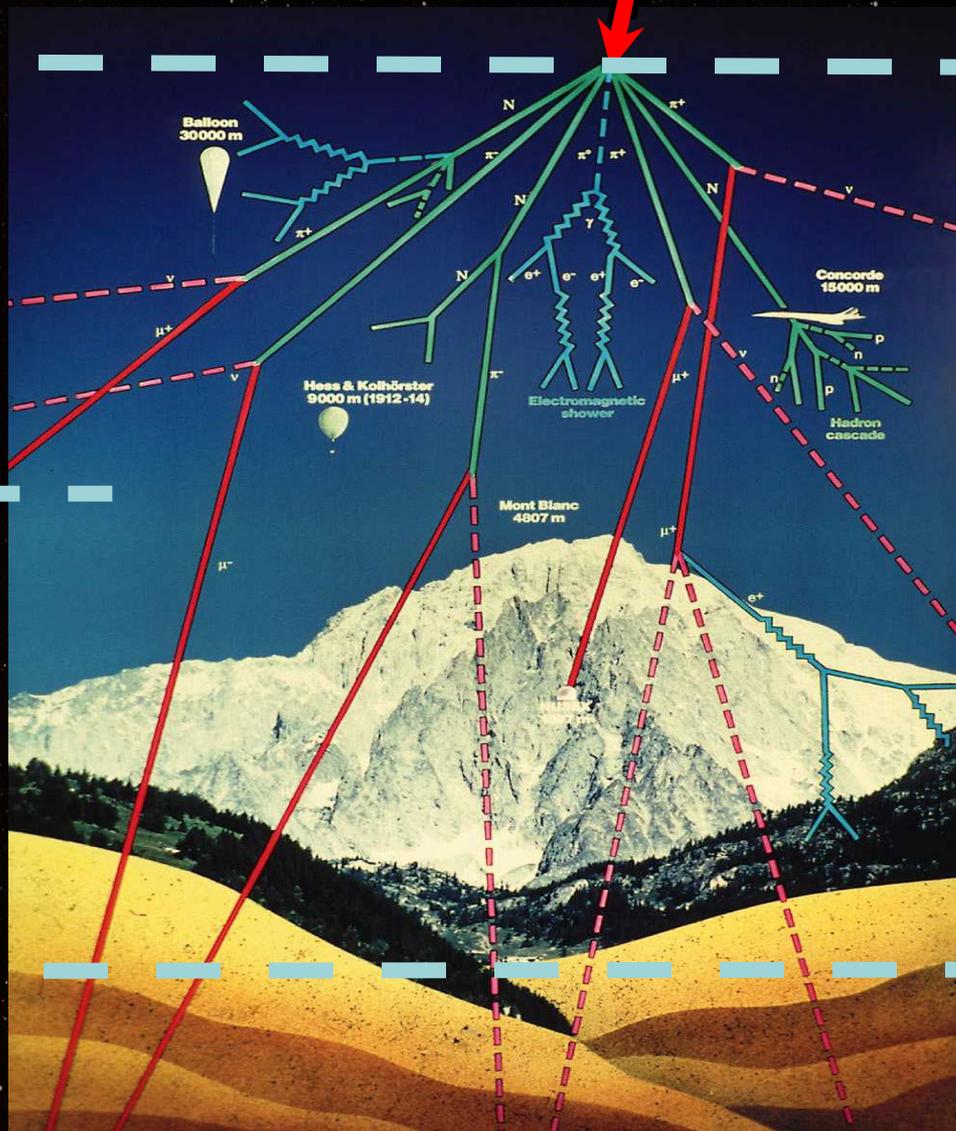
~50 km

~5 km



Ground

0 m



# Capacità di attraversare i materiali

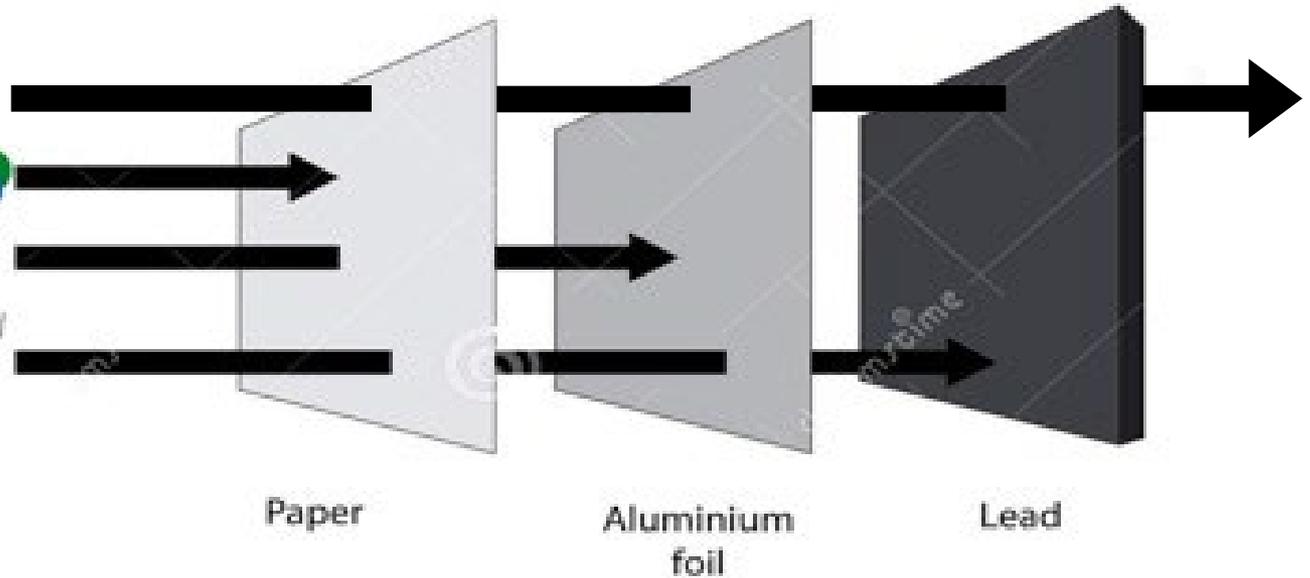
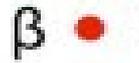
## Radioactivity Penetration Range

Muone

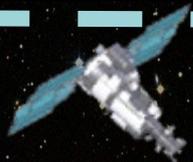
Alpha particles

Beta particles

Gamma rays



~500 km



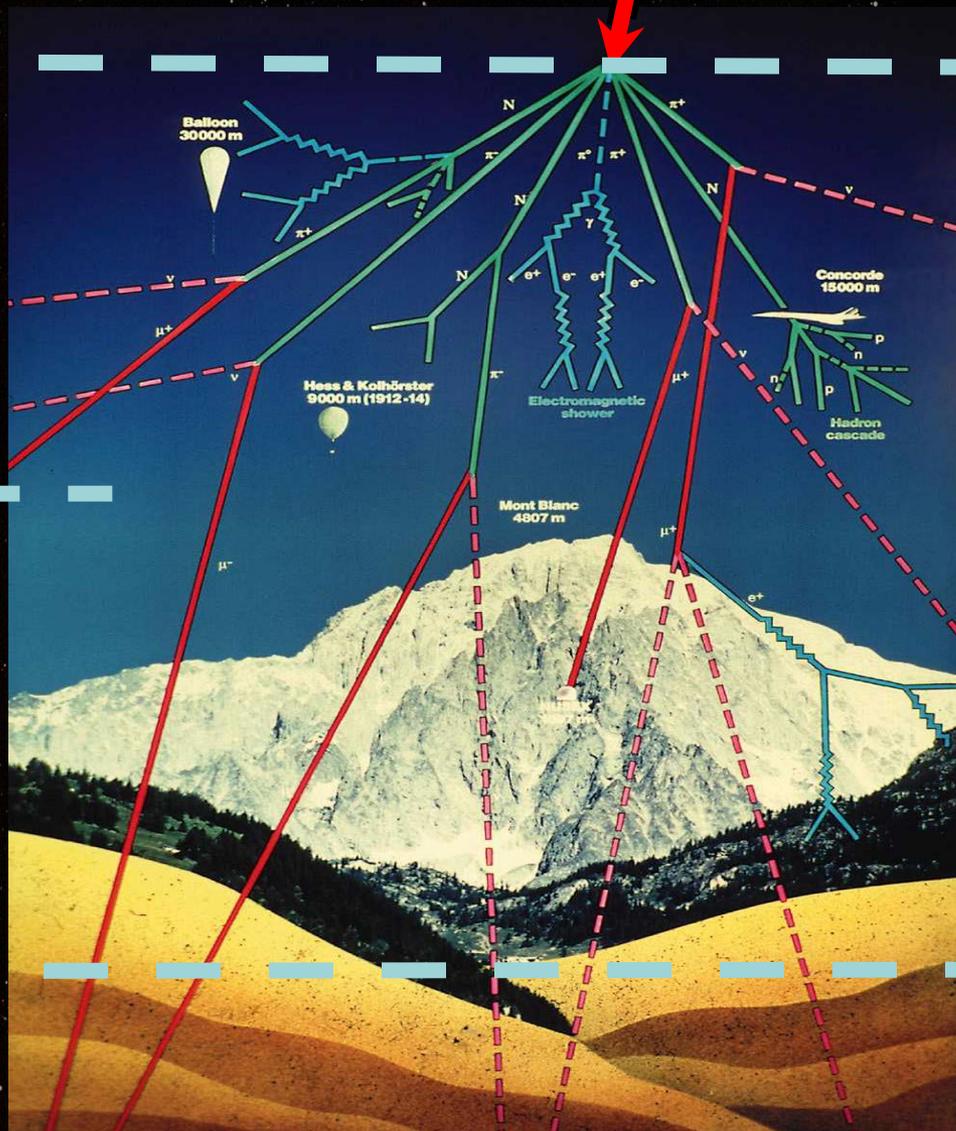
Raggio cosmico primario

Limite dell'atmosfera



~50 km

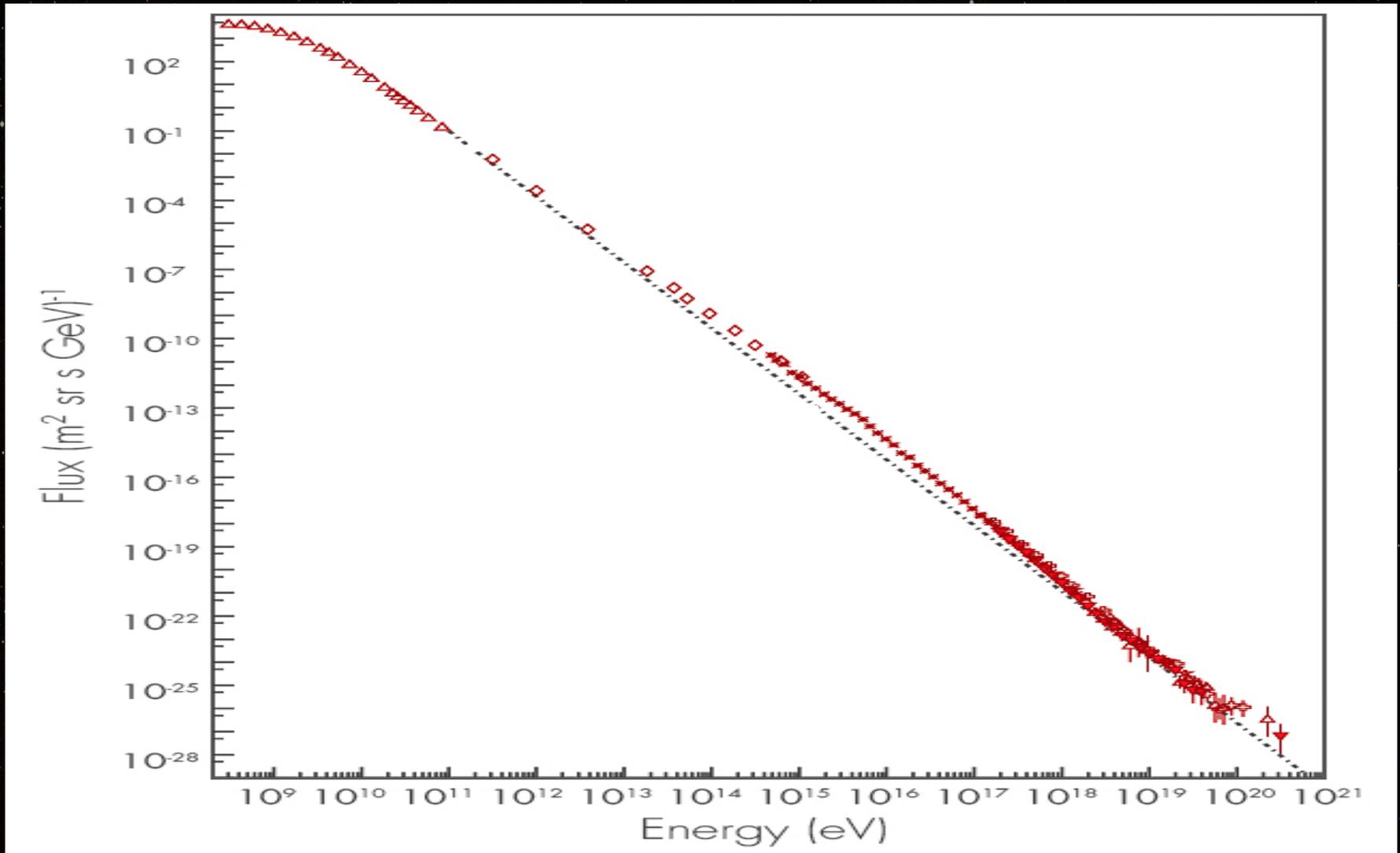
~5 km



Ground

0 m

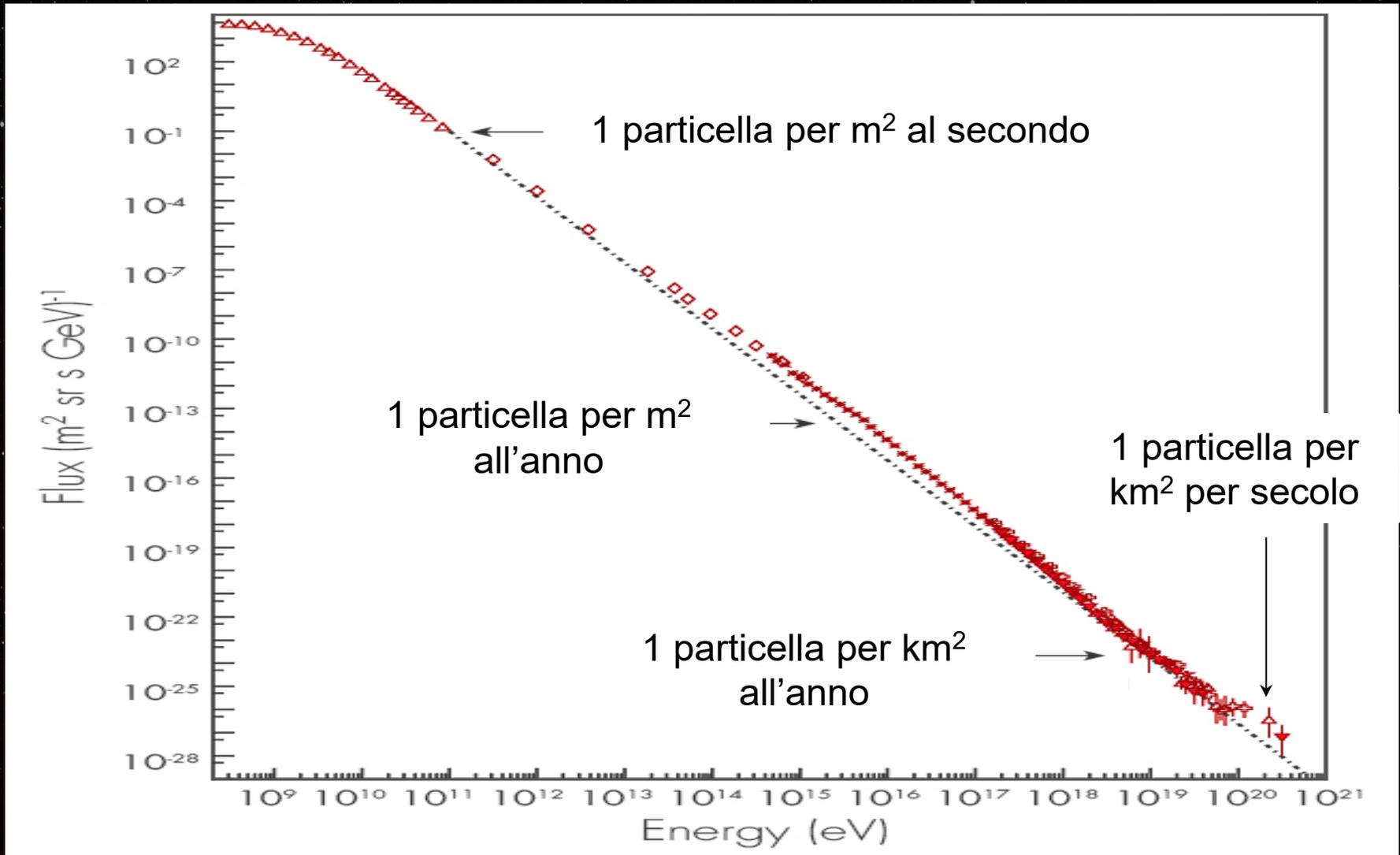
# Quanti sono i raggi cosmici?



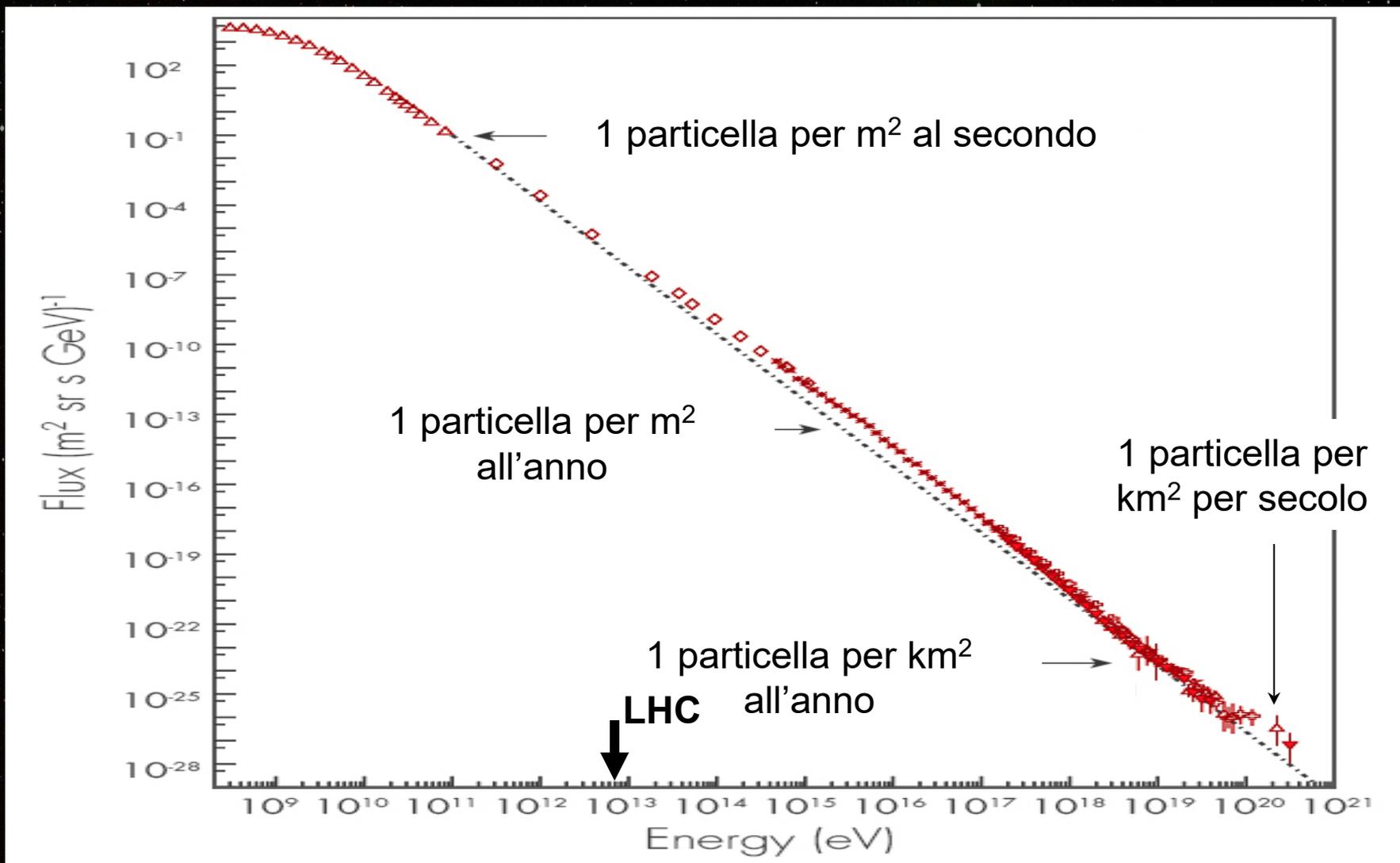
$6 \times 10^{18}$  eV = 1 Joule : energia cinetica di una massa di  
100 grammi che cade da un metro

Emiliano Mocchiutti, INFN Trieste, 26.11.2024 – International Cosmic Day 2024

# Quanti sono i raggi cosmici?



# Quanti sono i raggi cosmici?

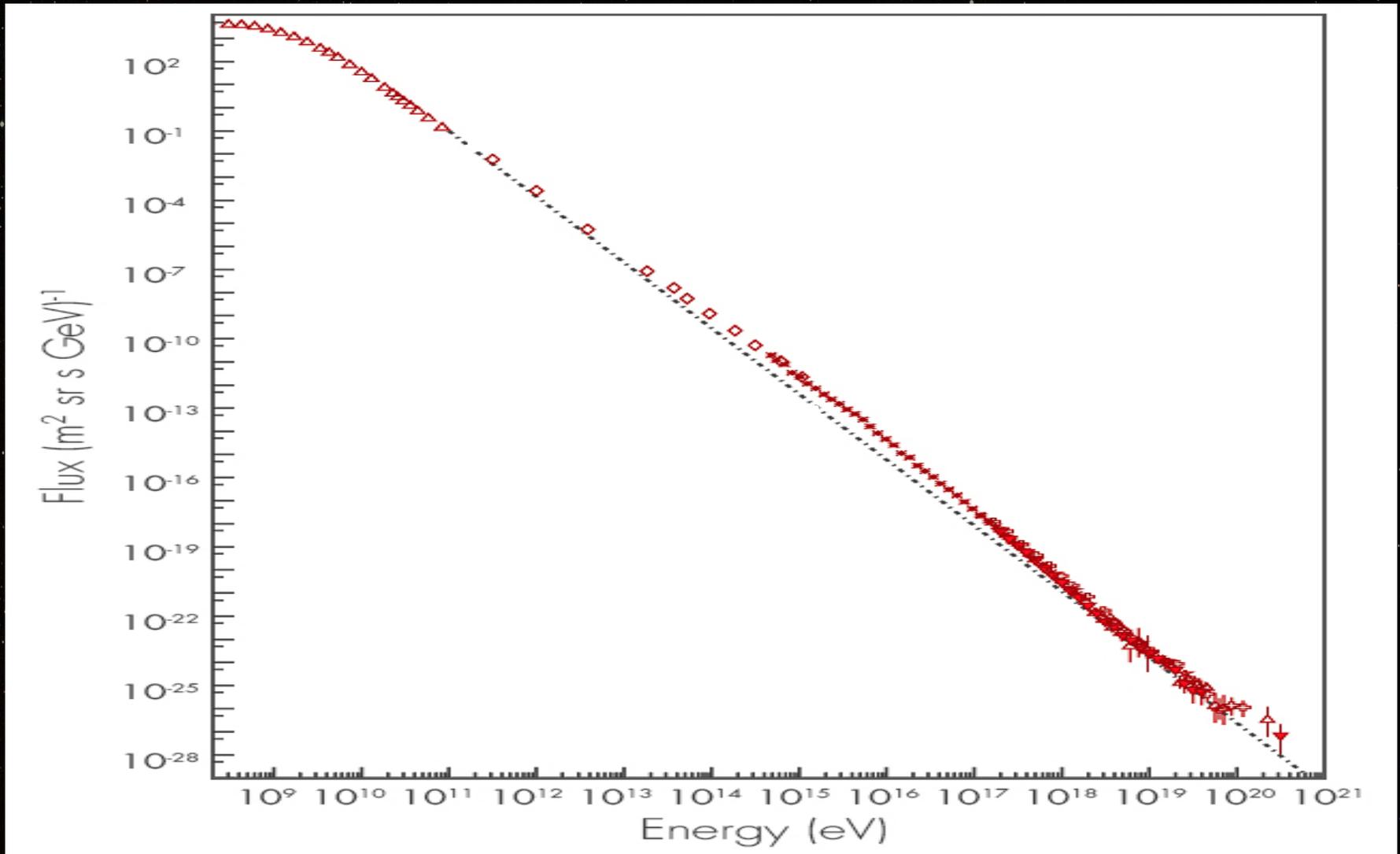


# E al suolo?

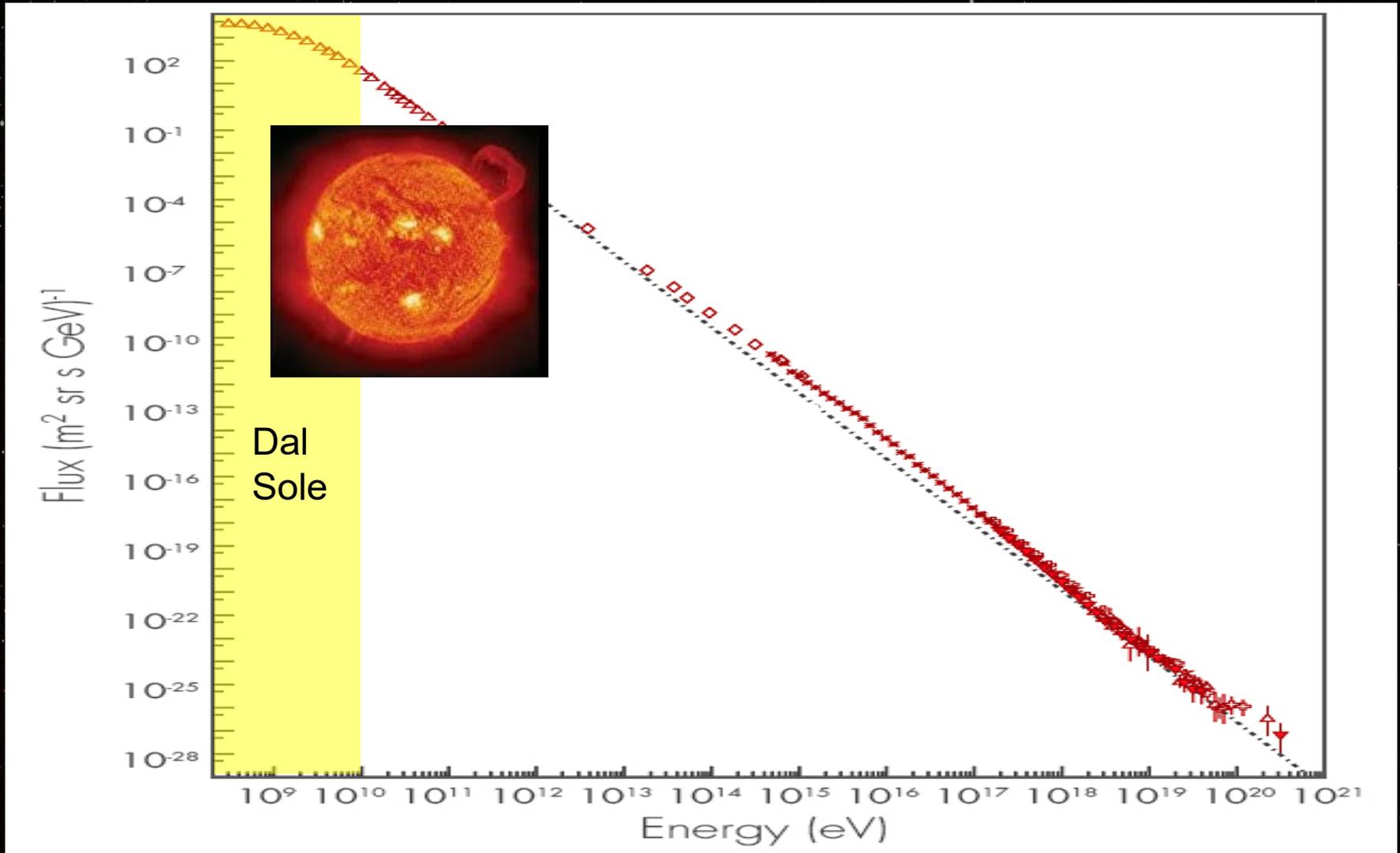
A livello del mare circa:  
160 muoni al secondo per  $m^2$   
(1 muone al minuto per  $cm^2$ )



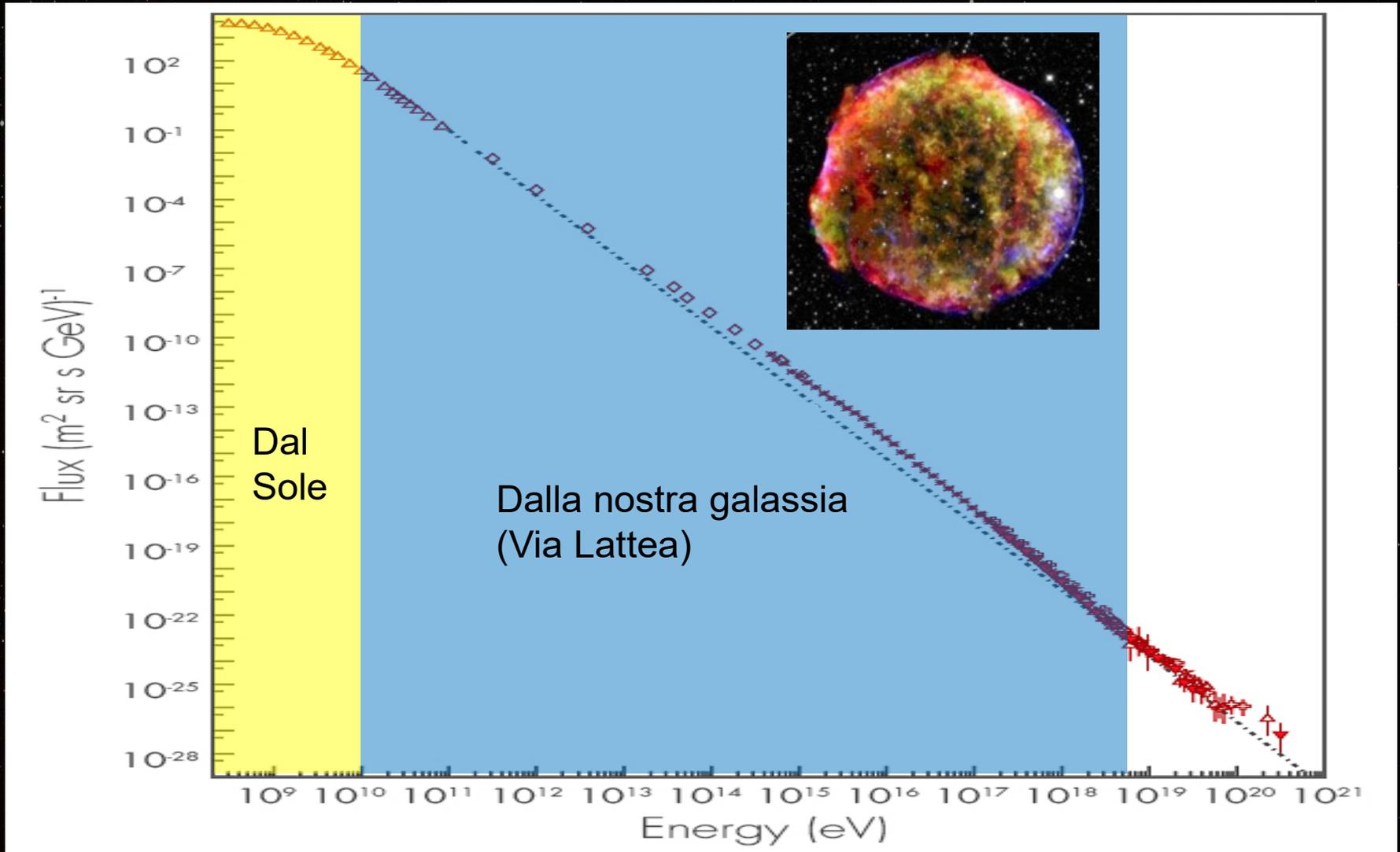
# Da dove vengono i raggi cosmici?



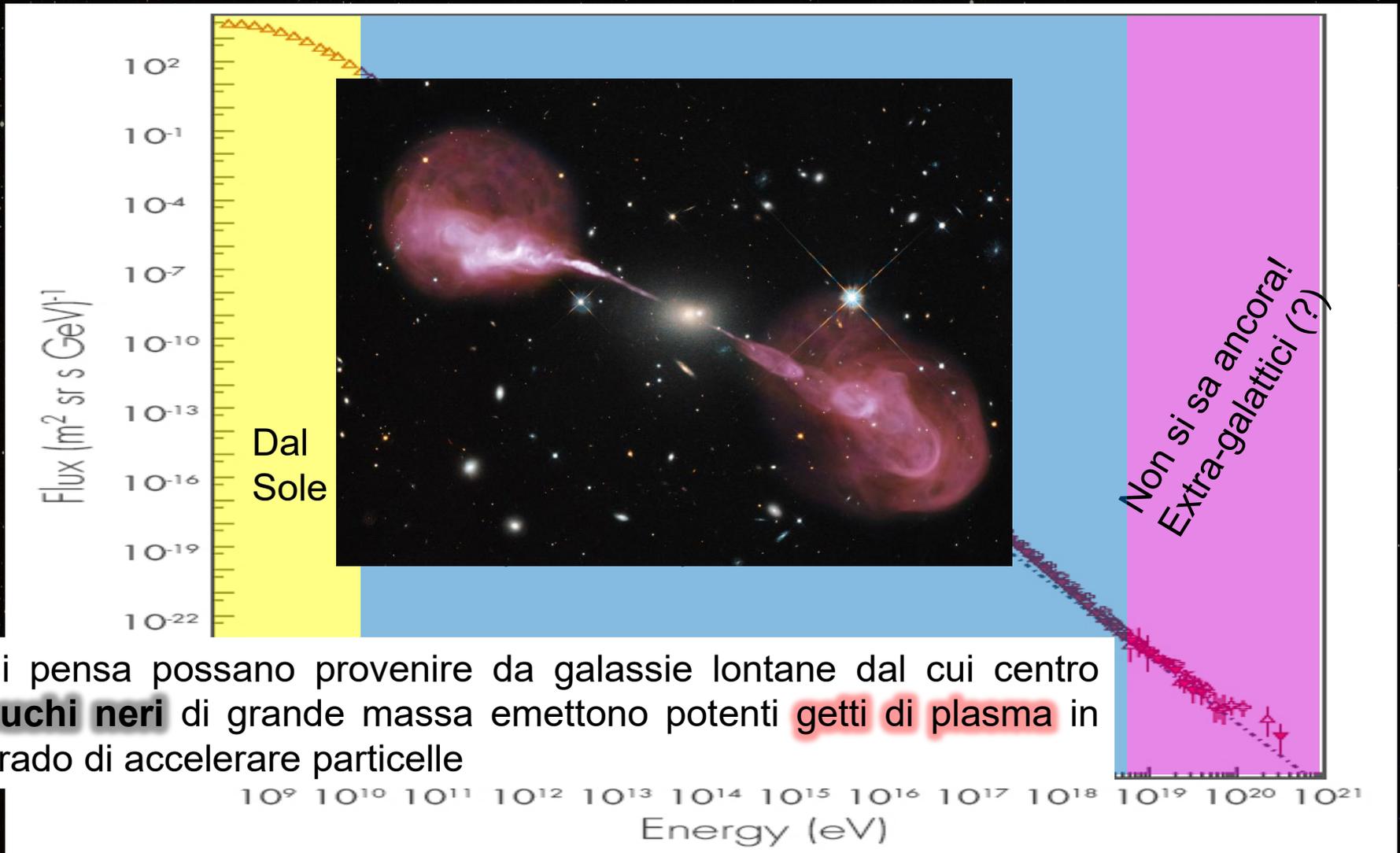
# Da dove vengono i raggi cosmici?



# Da dove vengono i raggi cosmici?



# Da dove vengono i raggi cosmici?



# Perché studiamo ancora i raggi cosmici?

# Per la loro composizione

Sono un campione di **materiale galattico**  
proveniente da luoghi remoti della Via Lattea



**RAGGI COSMICI**  
Distanza 3 miliardi di UA  
Ø Galassia



**METEORITI**  
Distanza 200 UA  
Ø Sistema Solare



1 UA (Unità Astronomica) = distanza Terra Sole

Figura di Elena Vannuccini (INFN Firenze)

# Per la loro composizione



...ogni 1000  
particelle:

**2 antiparticelle**



Figura di Elena Vannuccini (INFN Firenze)

La composizione dei raggi cosmici è quasi  
uguale a quella del Sistema Solare

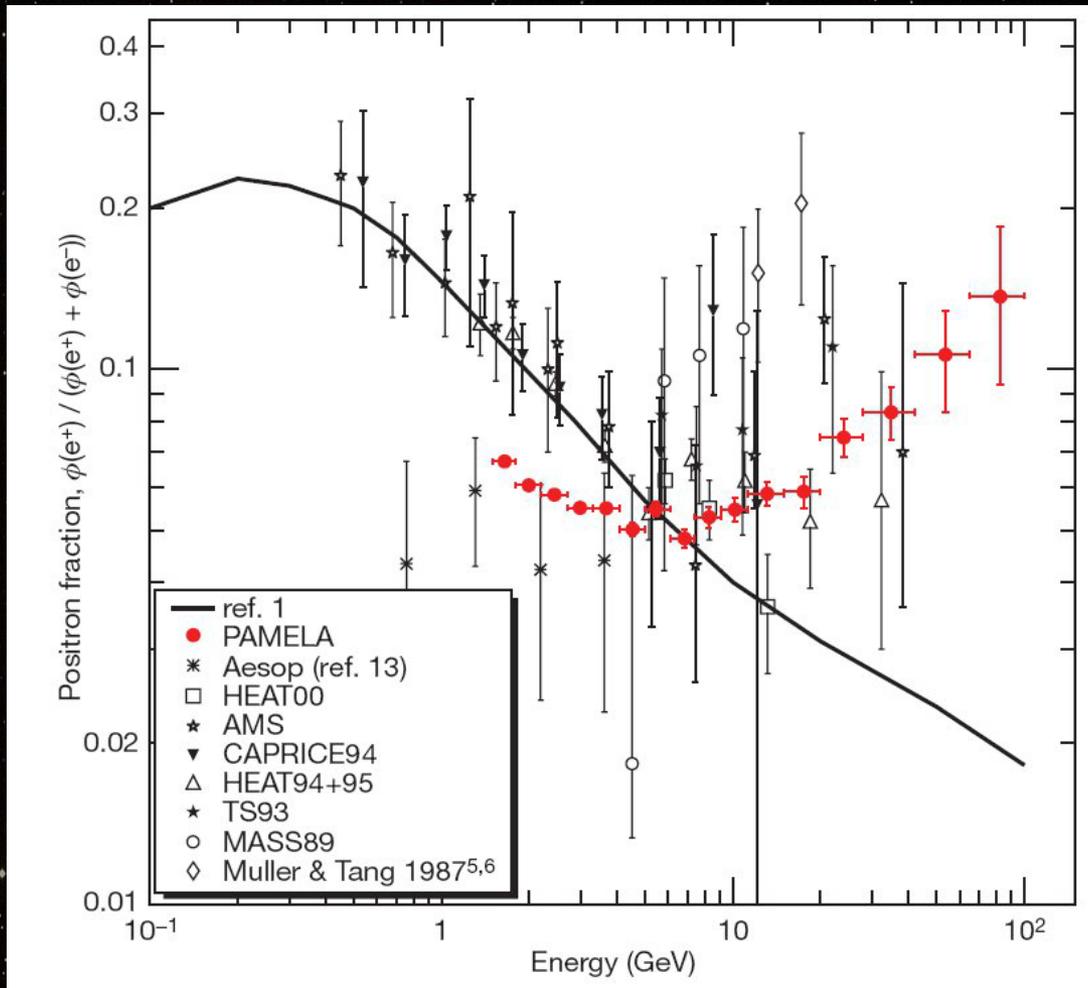
# Per la loro composizione

mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> Higgs boson
<b>QUARKS</b>	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b><math>\gamma</math></b> photon	
0.511 MeV/c <sup>2</sup>	105.7 MeV/c <sup>2</sup>	1.777 GeV/c <sup>2</sup>	91.2 GeV/c <sup>2</sup>		
-1	-1	-1	0		
1/2	1/2	1/2	1		
<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b>Z</b> Z boson		
<b>LEPTONS</b>	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	80.4 GeV/c <sup>2</sup>	
	0	0	0	$\pm 1$	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson	
			<b>GAUGE BOSONS</b>		

Una **antiparticella** per ogni quark e per ogni leptone

(tutti noi, tutti gli oggetti, tutta la terra è formata da tre particelle: quark up, quark down, elettrone)

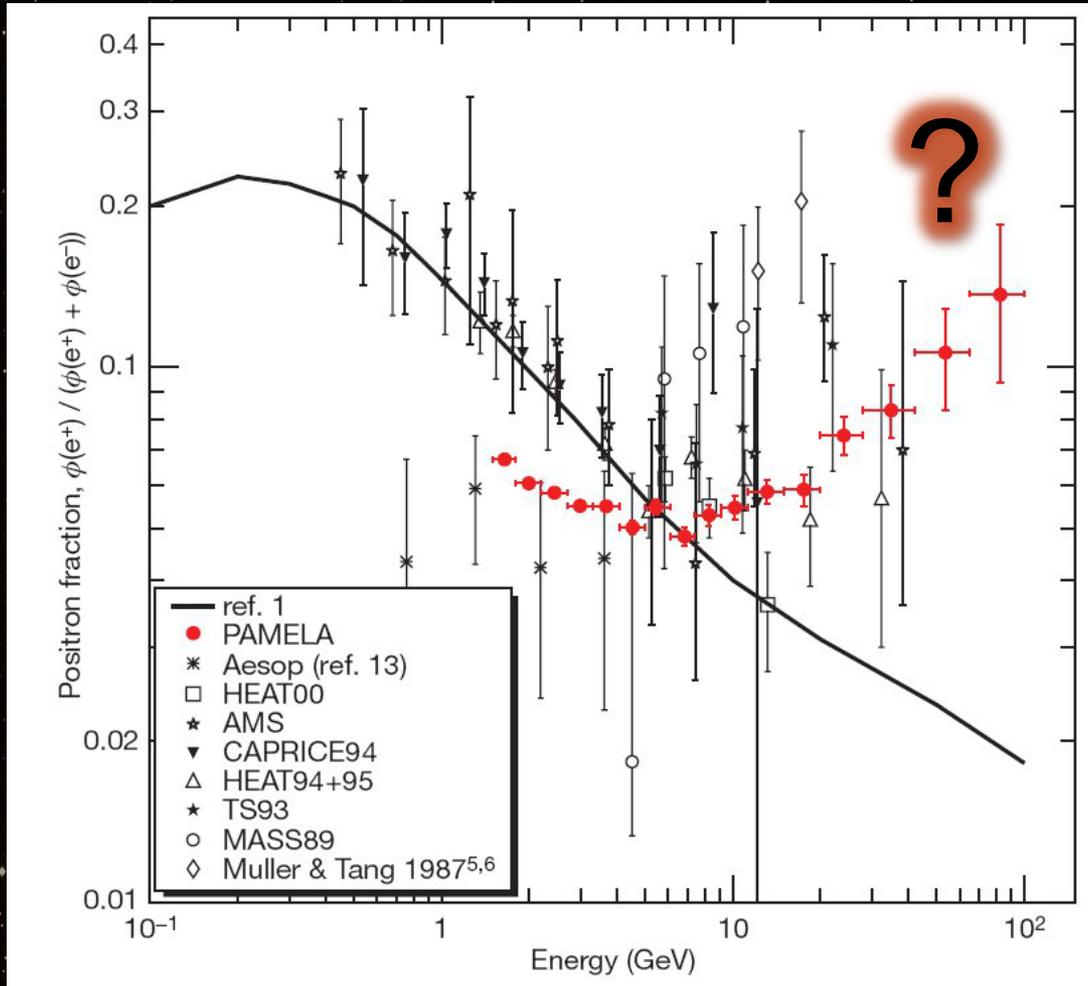
# Nei raggi cosmici: eccesso di positroni!



Esperimento PAMELA

Analisi dati fatta qua a Trieste principalmente da me e il mio collega Mirko Boezio

# Nei raggi cosmici: eccesso di positroni!



Esperimento PAMELA

Analisi dati fatta qua a Trieste principalmente da me e il mio collega Mirko Boezio

# Conosciamo circa il 4% della composizione dell'Universo

STAR  
WARS

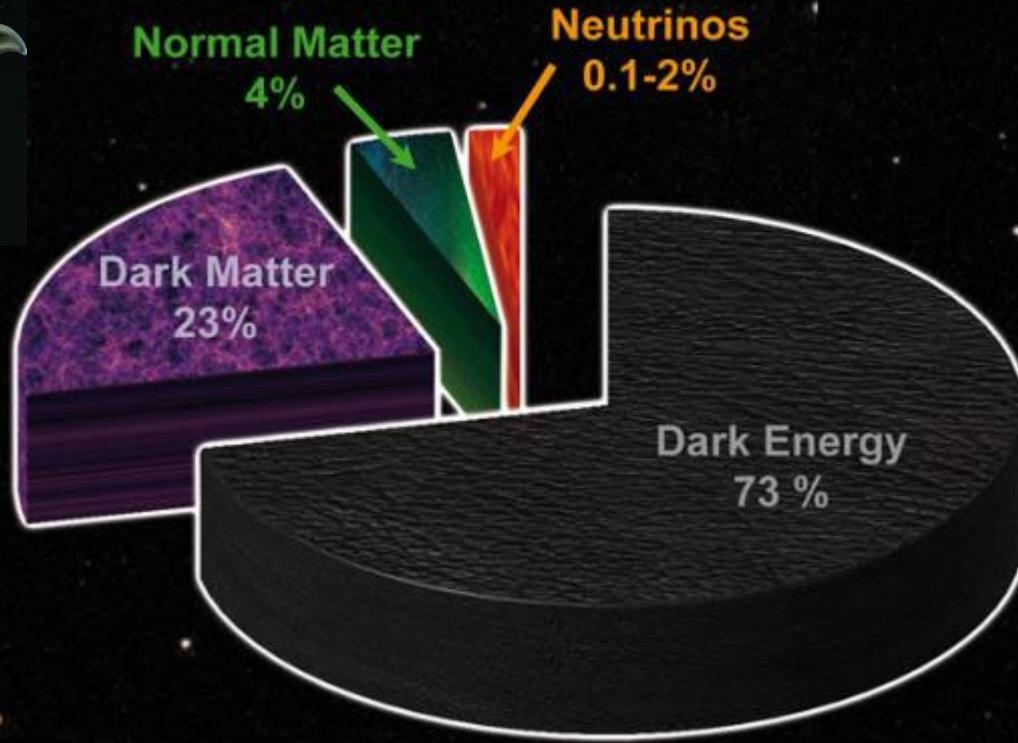
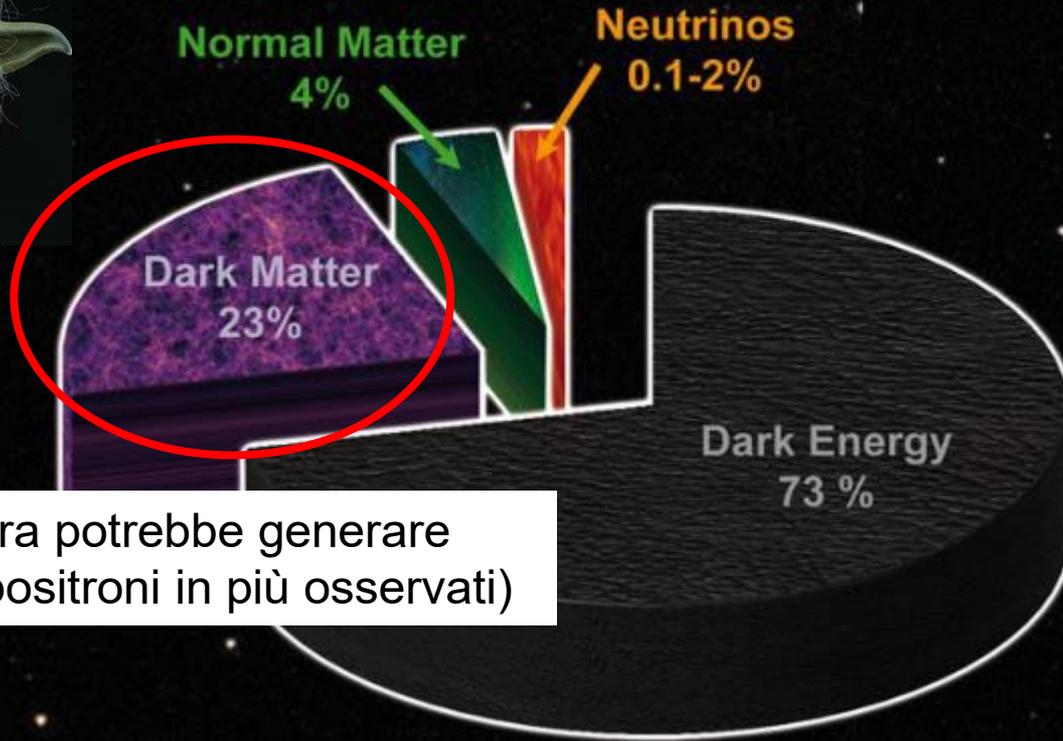


Figura di Elena Vahnuccini (INFN Firenze)



# Conosciamo circa il 4% della composizione dell'Universo

STAR  
WARS

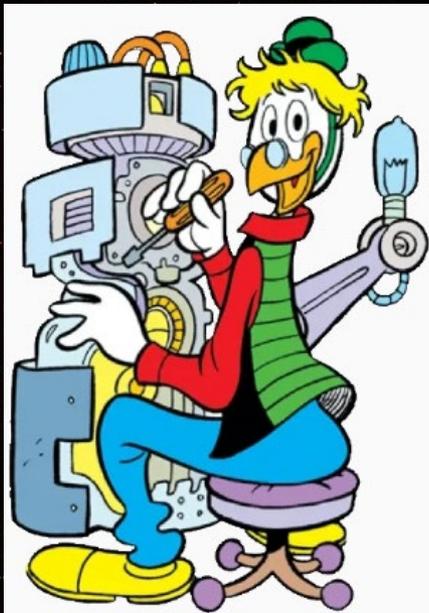


La materia oscura potrebbe generare antiparticelle (i positroni in più osservati)

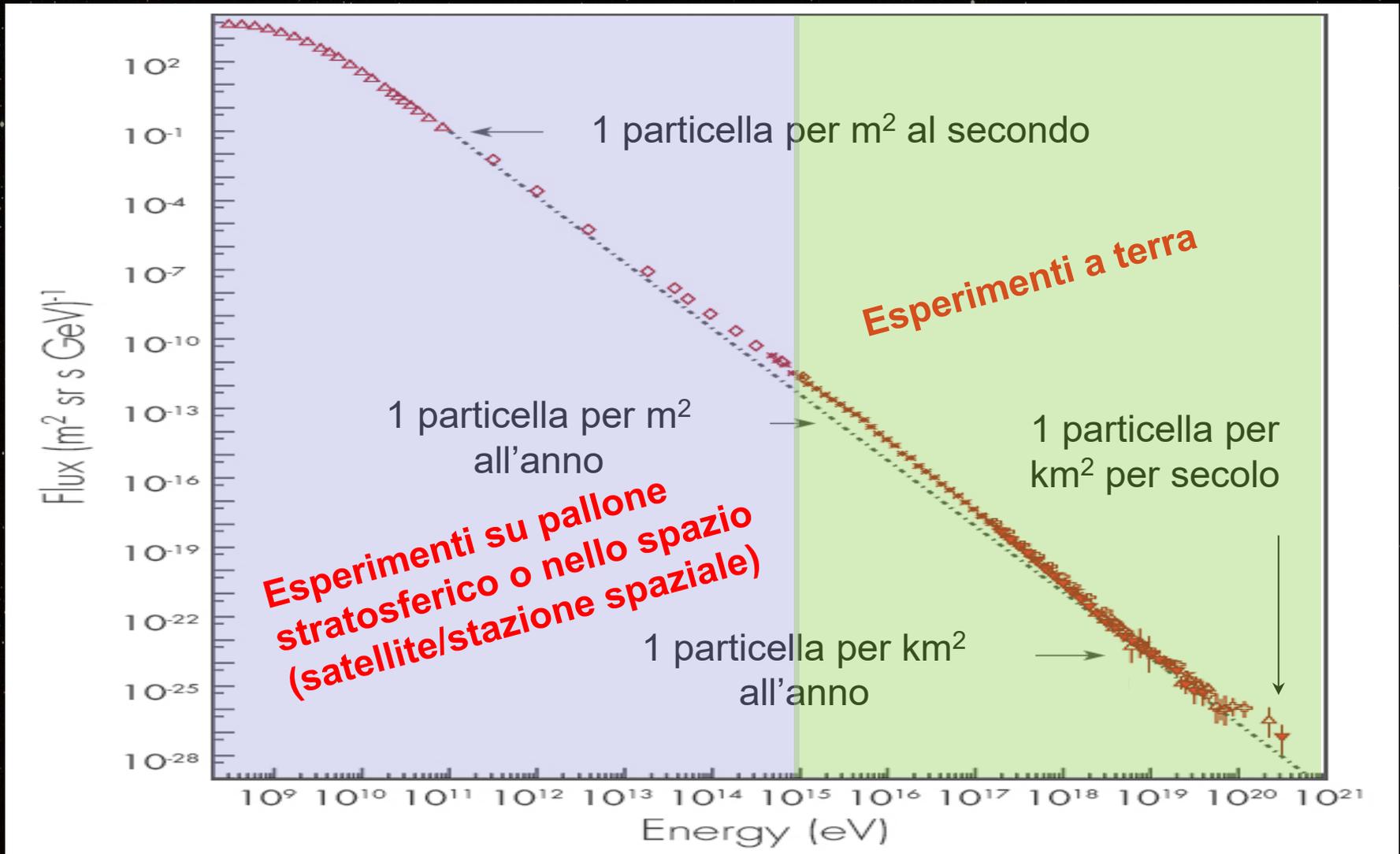
Figura di Elena Vahnuccini (INFN Firenze)



# Rivelatori di raggi cosmici



# Tipologie di esperimenti



# Esperimenti nello spazio

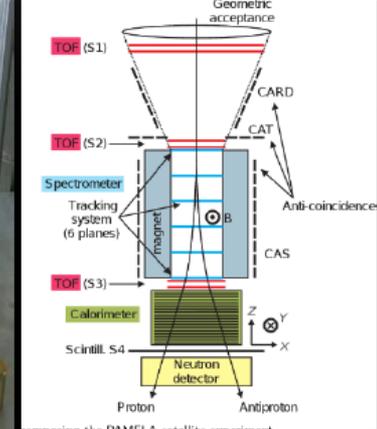
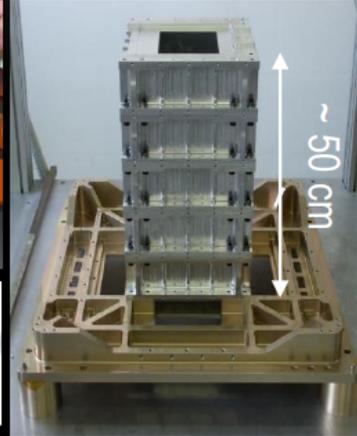
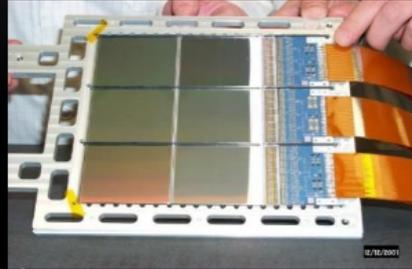


Figura di Elena Vanhuccini (INFN Firenze)



➤ Misure di antimateria con l'esperimento PAMELA

- Dal 2006 al 2016 a bordo di un satellite russo
- Spettrometro magnetico a micro-strip di silicio costruito a Firenze
- Scoperta dell'eccesso di positroni!!
- Calorimetro elettromagnetico costruito a Trieste



➤ Ricerca di antinuclei con l'esperimento GAPS

- Volo su pallone in Antartide previsto per fine ~~2021~~ 2024
- Rivelazione basata sul processo di annichilazione

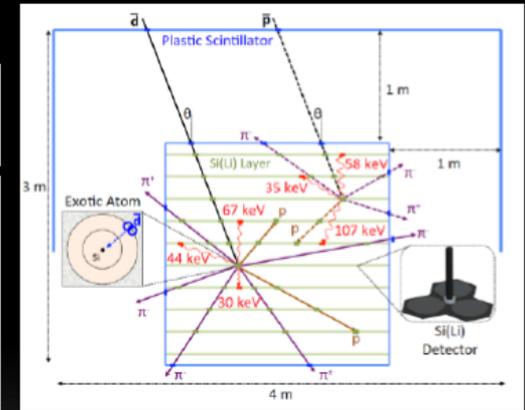
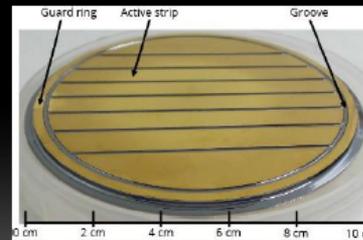


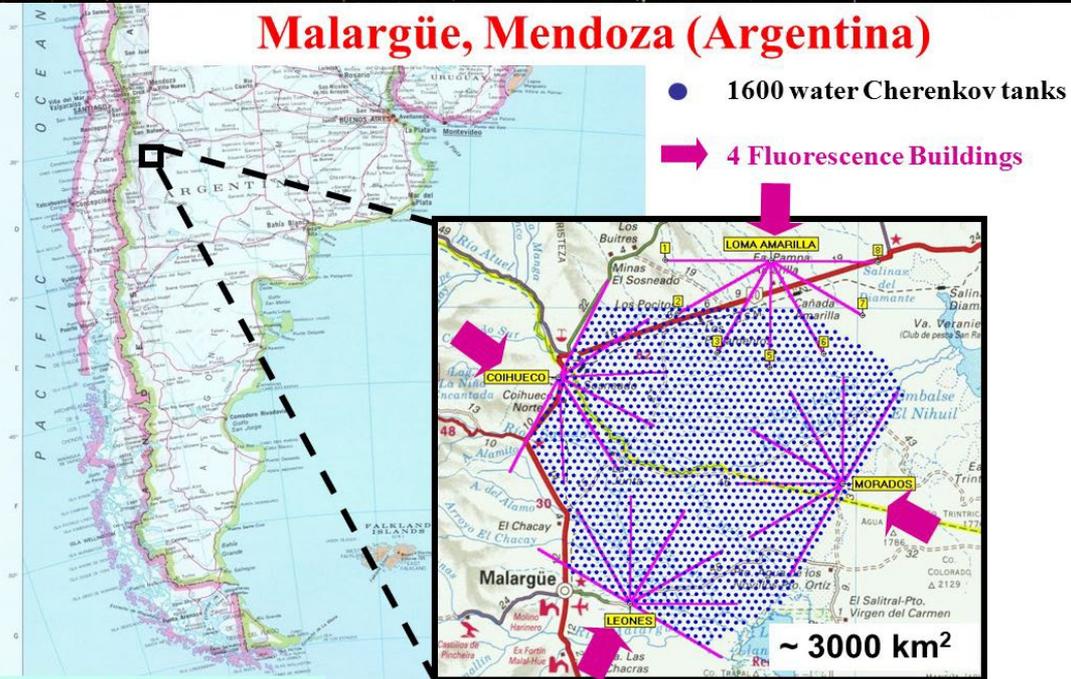
Figura di Elena Vannuccini (INFN Firenze)

# Esperimenti a terra

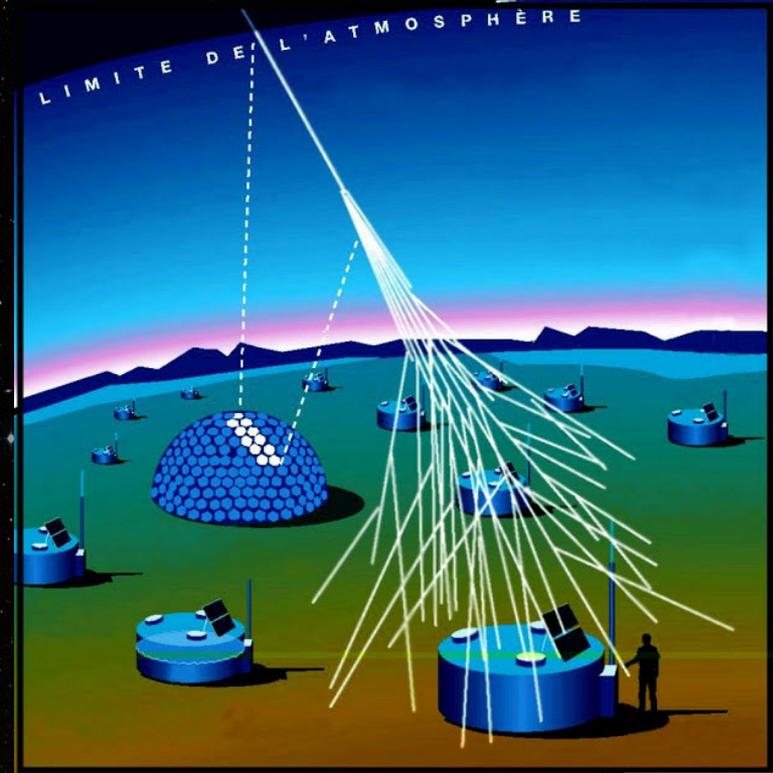
L'esperimento Auger è stato costruito per osservare a terra raggi cosmici di altissima energia ( $E > 10^{18}$  eV)

Date le basse frequenze (1 evento/km<sup>2</sup> secolo) occorre strumentare superfici  $> 1000$  km<sup>2</sup>.

## Malargüe, Mendoza (Argentina)



35.5° S, 69.3° W  
1400 m a.s.l. (880 g cm<sup>-2</sup>)

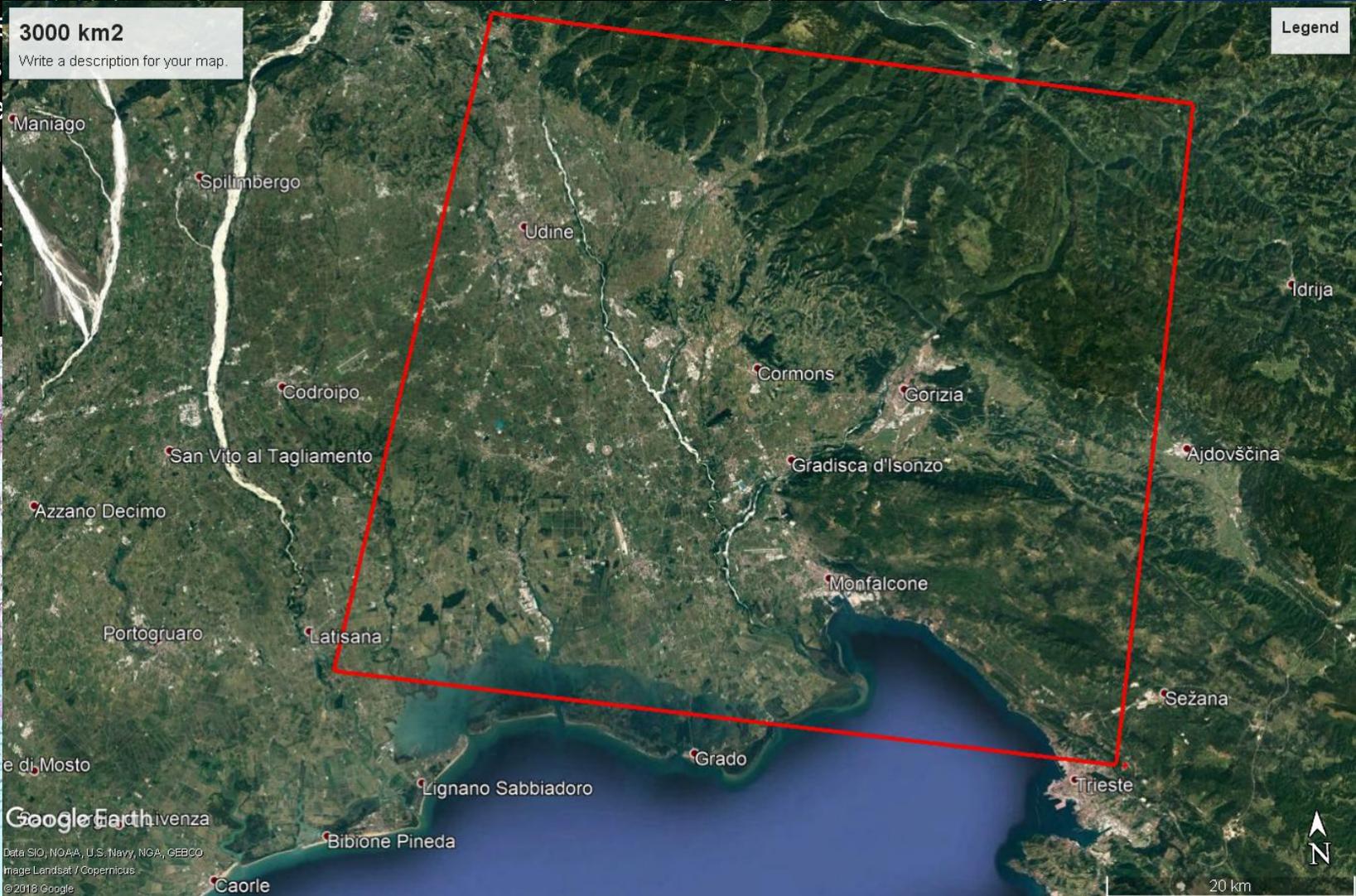


# Esperimenti a terra

L'es  
oss  
ene  
pall  
Dat  
occ

3000 km<sup>2</sup>

Write a description for your map.



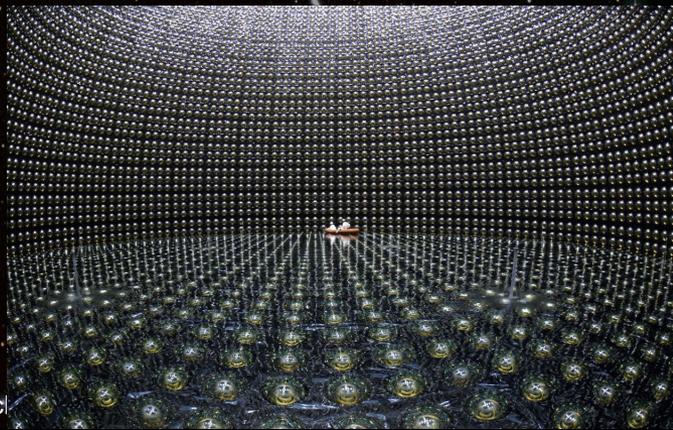
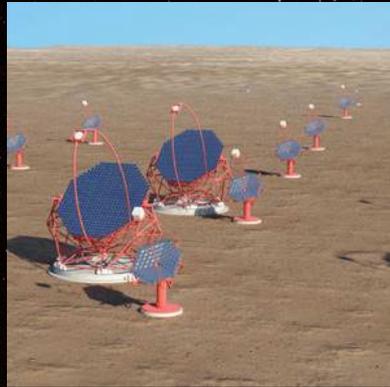
35.5° S, 69.3° W  
1400 m a.s.l. (880 g cm<sup>-2</sup>)

# Solo particelle cariche?

Per definizione i raggi cosmici sono particelle cariche.

Ma la Terra è raggiunta da un numero molto superiore di fotoni (di ogni energia) e altre particelle neutre, come i neutrini.

Tantissimi esperimenti, a terra e nello spazio, sono dedicati a queste altre particelle!  
(v. presentazione di Francesco questo pomeriggio)



# Grandi esperimenti, grandi collaborazioni

## PAMELA Collaboration

Italy



Bari



Florence



Frascati



Naples



Rome



Trieste



CNR, Florence



Germany:



Siegen

Sweden:



KTH, Stockholm

Russia:



Moscow / St. Petersburg

# Grandi esperimenti, grandi collaborazioni

## PAMELA Collaboration

Italy



Bari



Florence



Frascati



Naples



Rome



Trieste



CNR, Florence



Germany:



Siegen

Sweden:



## AMS Collaboration



Emiliano Mo

# Grandi esperimenti, grandi collaborazioni

## PAMELA Collaboration

Italy



Bari



Florence



Frascati



Naples



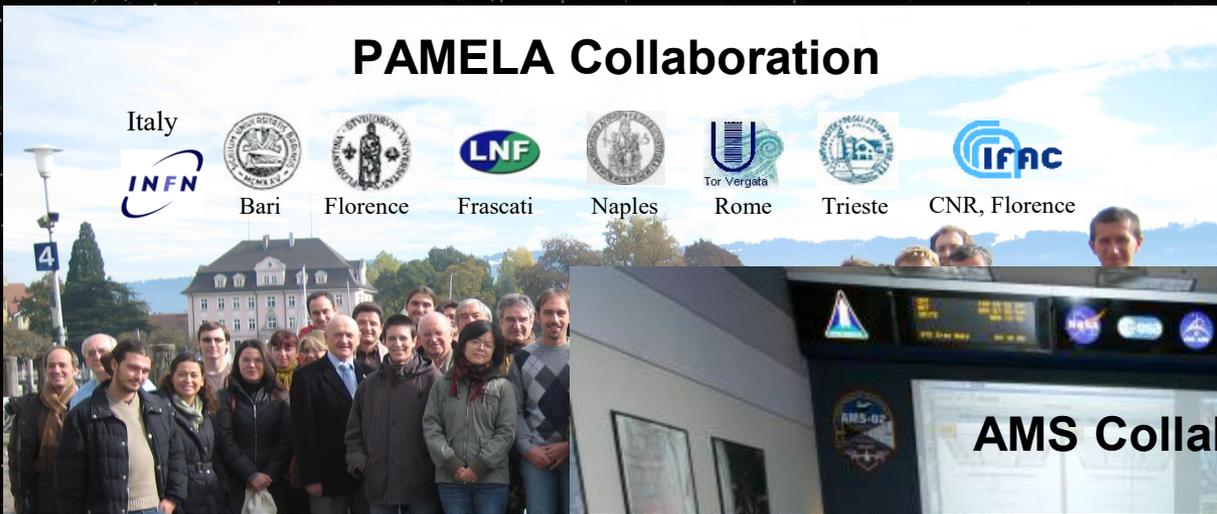
Rome



Trieste



CNR, Florence



## AMS Collaboration



## Pierre Auger Collaboration



# Conclusioni

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

I raggi cosmici interagiscono con l'atmosfera terrestre e, a livello del mare, arriva su di noi una continua «doccia» di particelle secondarie, la maggior parte muoni.

I muoni sono simili agli elettroni, solo di massa maggiore e molto più penetranti.

Esistono molti strumenti per studiare i raggi cosmici, dallo spazio e da terra.

C'è ancora molto da capire e studiare!

