

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

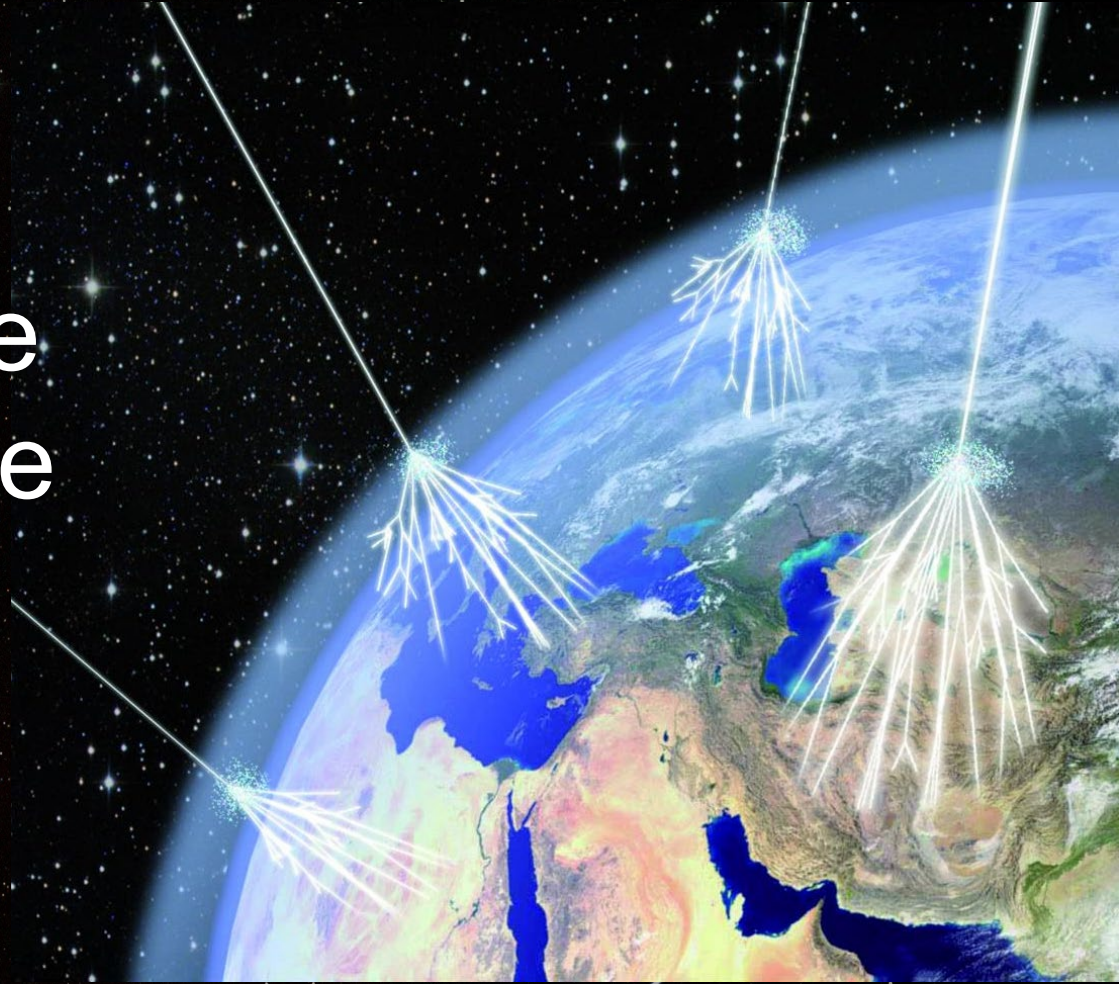
Fisica è rigore nel metodo,
non rigore nel risultato.

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





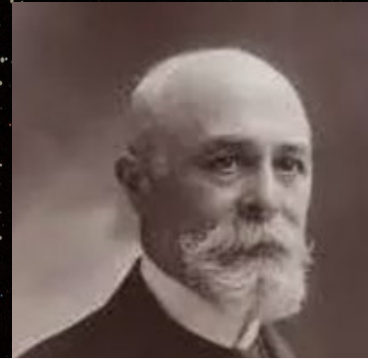
Elettroscopio



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.



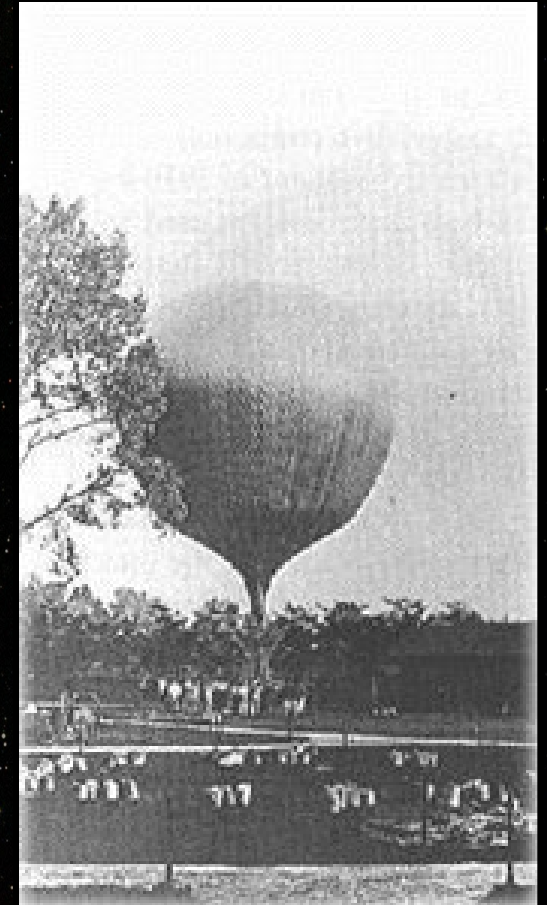
Nel 1898 M. Sklodowska e P. Curie scoprono gli elementi polonio e radio.

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

Si comincia ad utilizzarlo per fare misure...



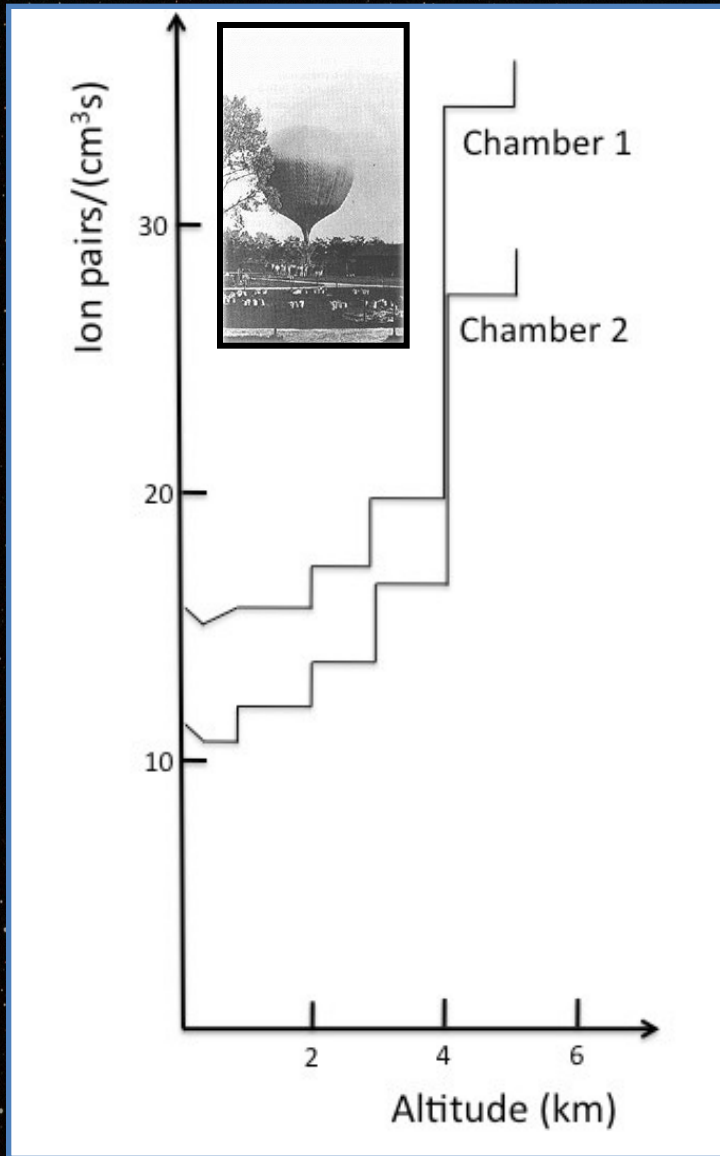
1912: Victor Hess



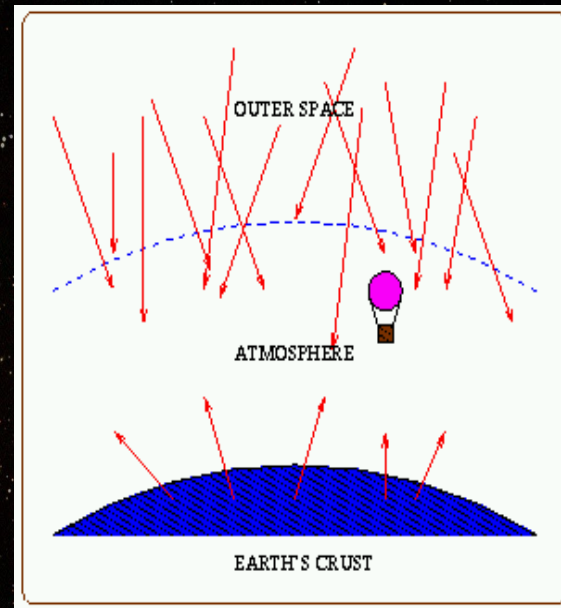
L'austriaco Victor Hess propone un esperimento: la radiazione aumenta o diminuisce in quota?

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!!**

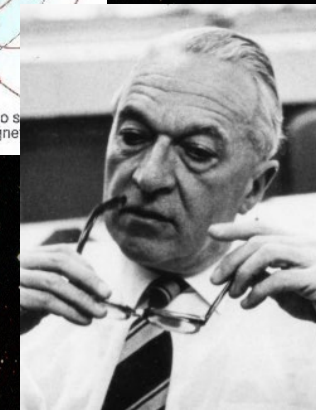
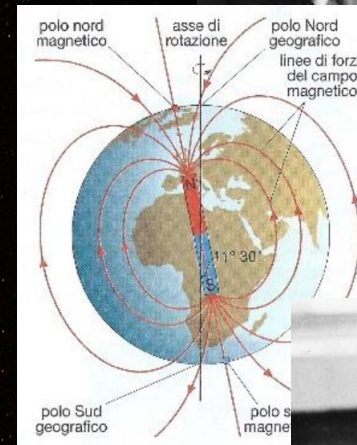


La fisica dei raggi cosmici



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 **sciame di particelle**



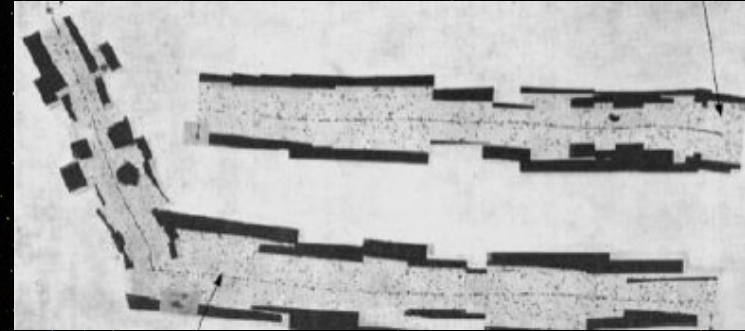
Si sviluppano nuovi tipi di rivelatori: contatori Geiger, camere a nebbia, camere a bolle, camere ad emulsione nucleare...

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

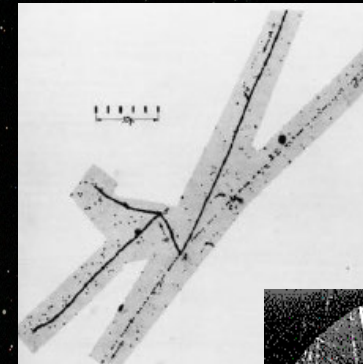
... e la fisica delle particelle elementari

Studiando i raggi cosmici vengono scoperte nuove particelle:

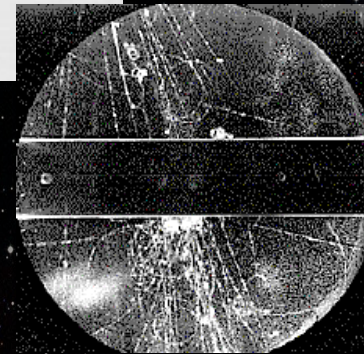
- 1934: Il positrone (Anderson)
- 1937: Il muone, o leptone mu (Neddermeyer & Anderson)
- 1947: Il pione (o mesone p), il primo mesone, scoperto da Lattes, Occhialini & Powell (previsto da Yukawa nel 1935)
- 1947: Il kaone (o mesone K), la prima particella strana (Rochester & Butler)
- 1951: L'iperone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



Pioni carichi



Mesoni K



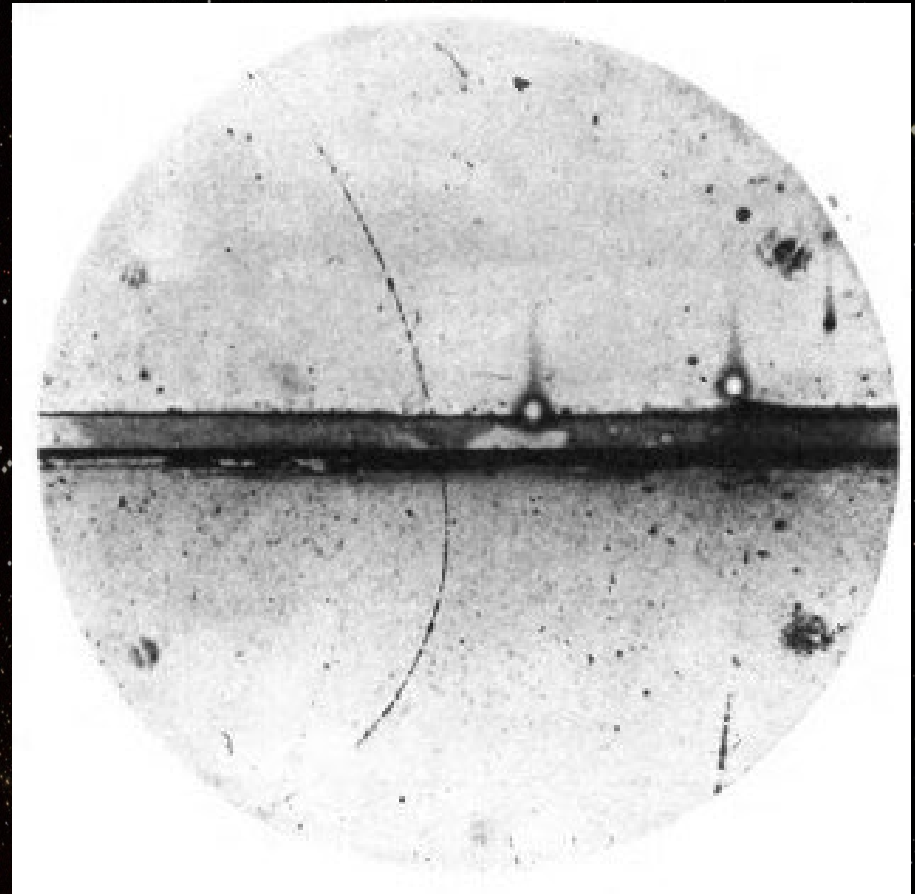
Iperoni (Λ, Σ, Ξ)

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!

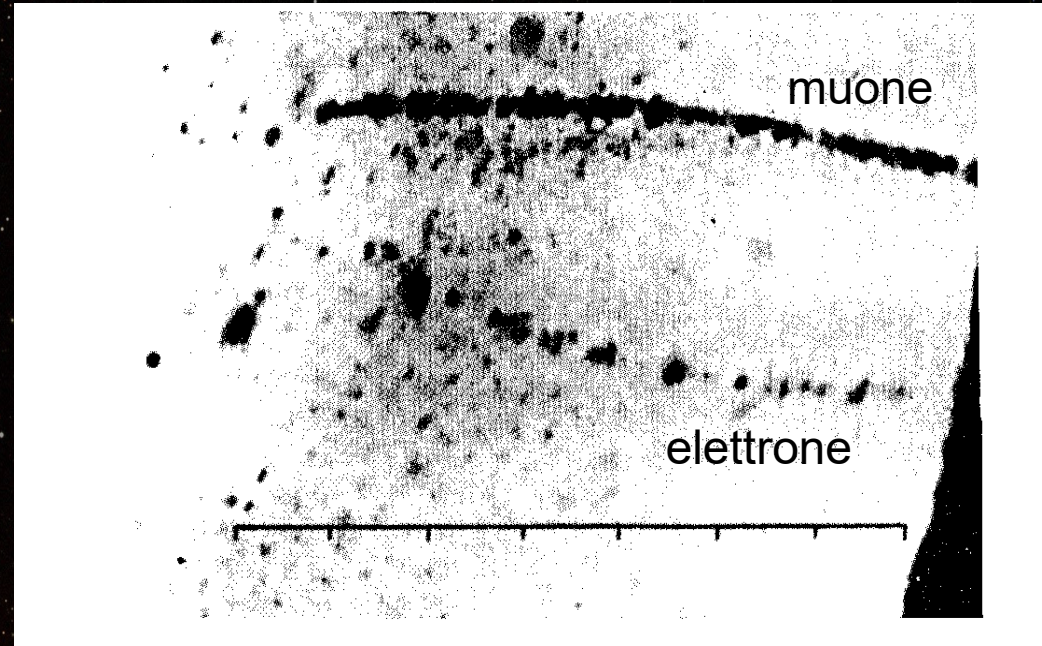


Il muone: cugino pesante dell'elettrone

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."



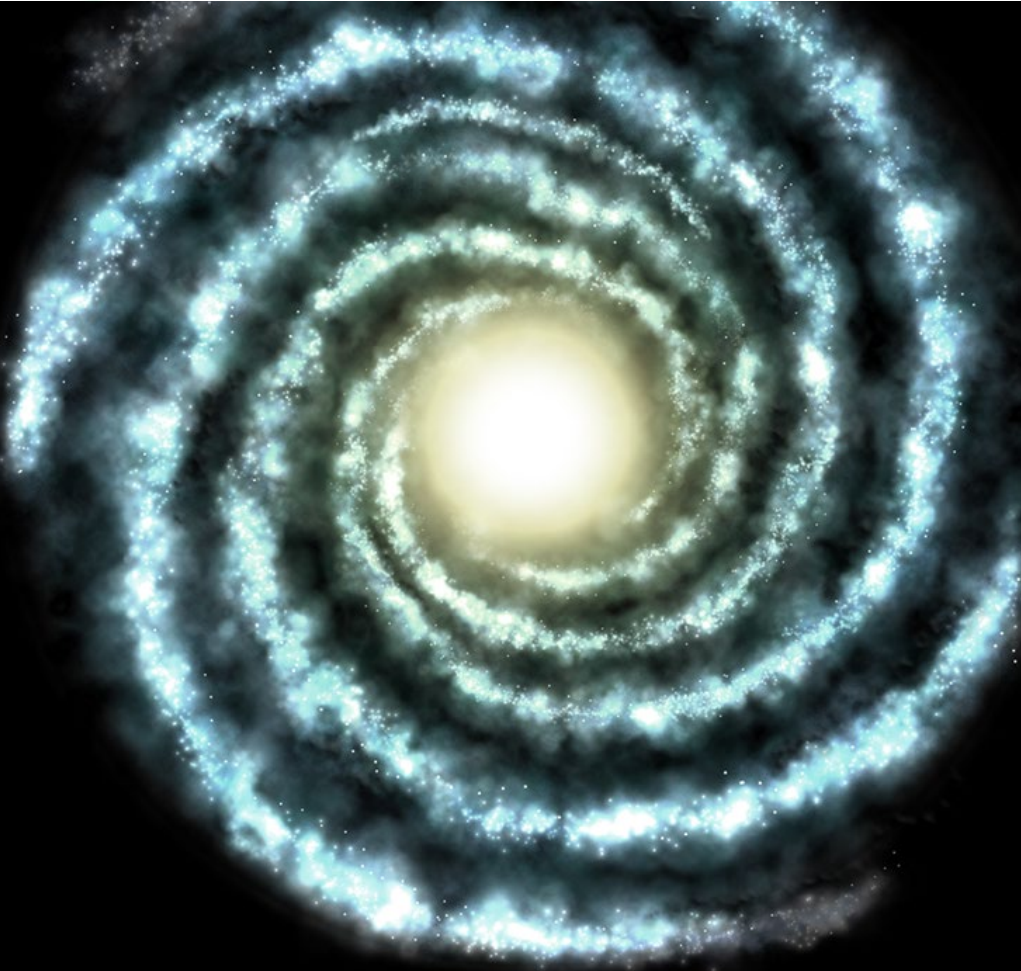
I raggi cosmici sono particelle elettricamente cariche di origine extraterrestre che colpiscono la Terra da ogni direzione

An illustration of the Earth from space, showing the blue atmosphere and green/brown continents. Three bright white lines representing cosmic rays enter from the top of the frame and strike the Earth's surface. From each impact point, a fan of smaller white lines radiates outwards, representing secondary particles. The background is a dark starry sky.

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*.

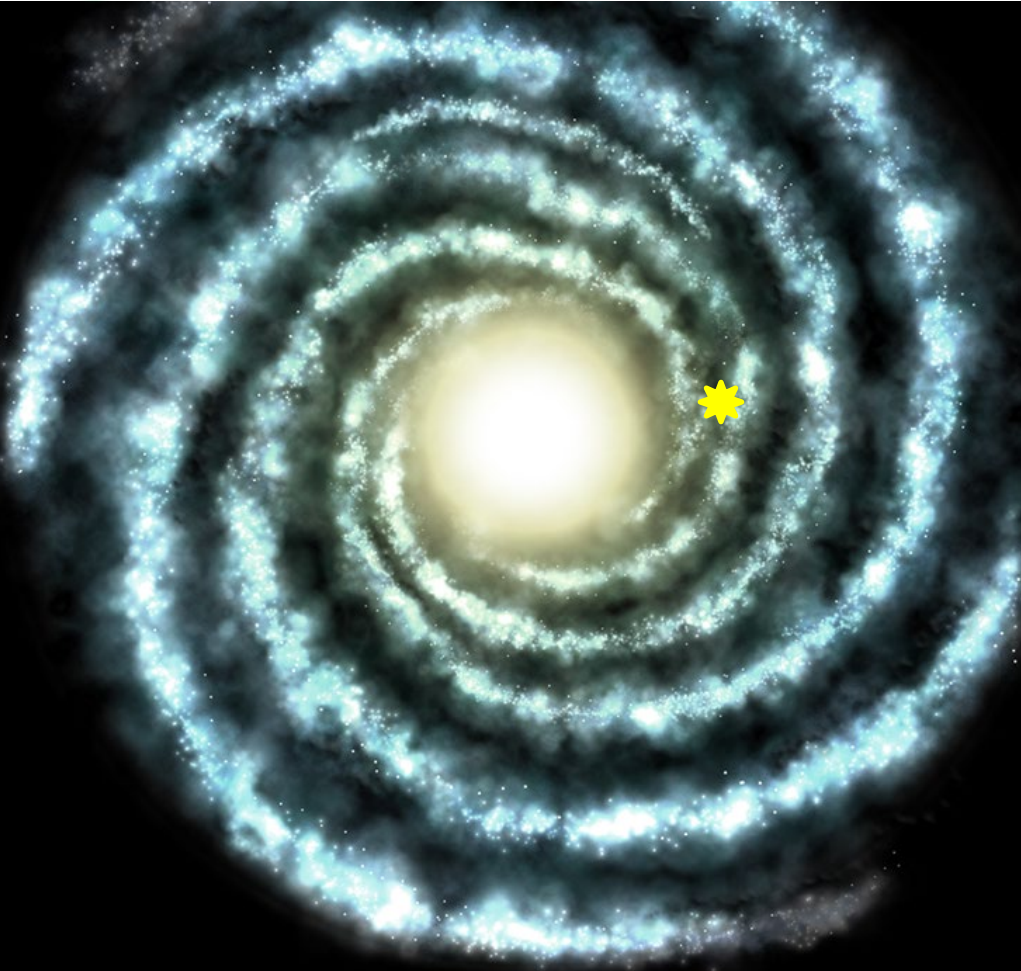
Il viaggio dei raggi cosmici

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)

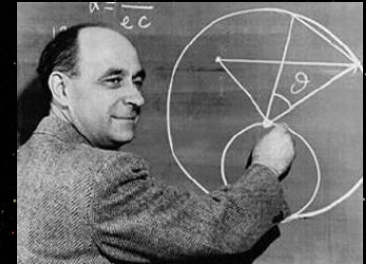
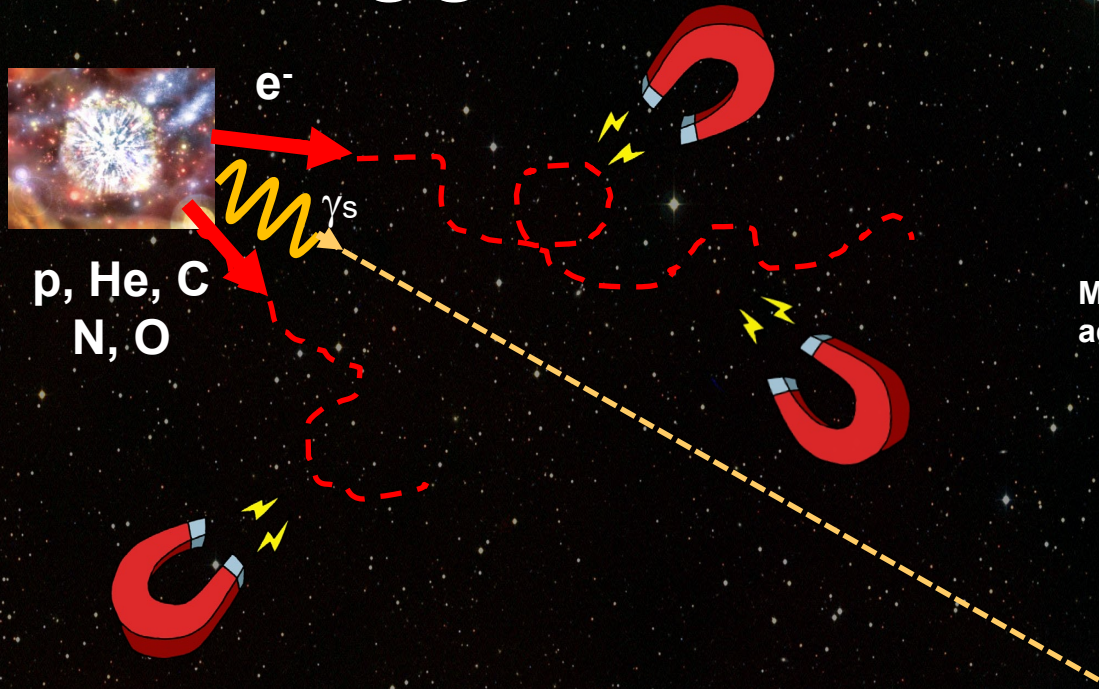


Il viaggio dei raggi cosmici

La magia
della notte



Raggi cosmici accelerati

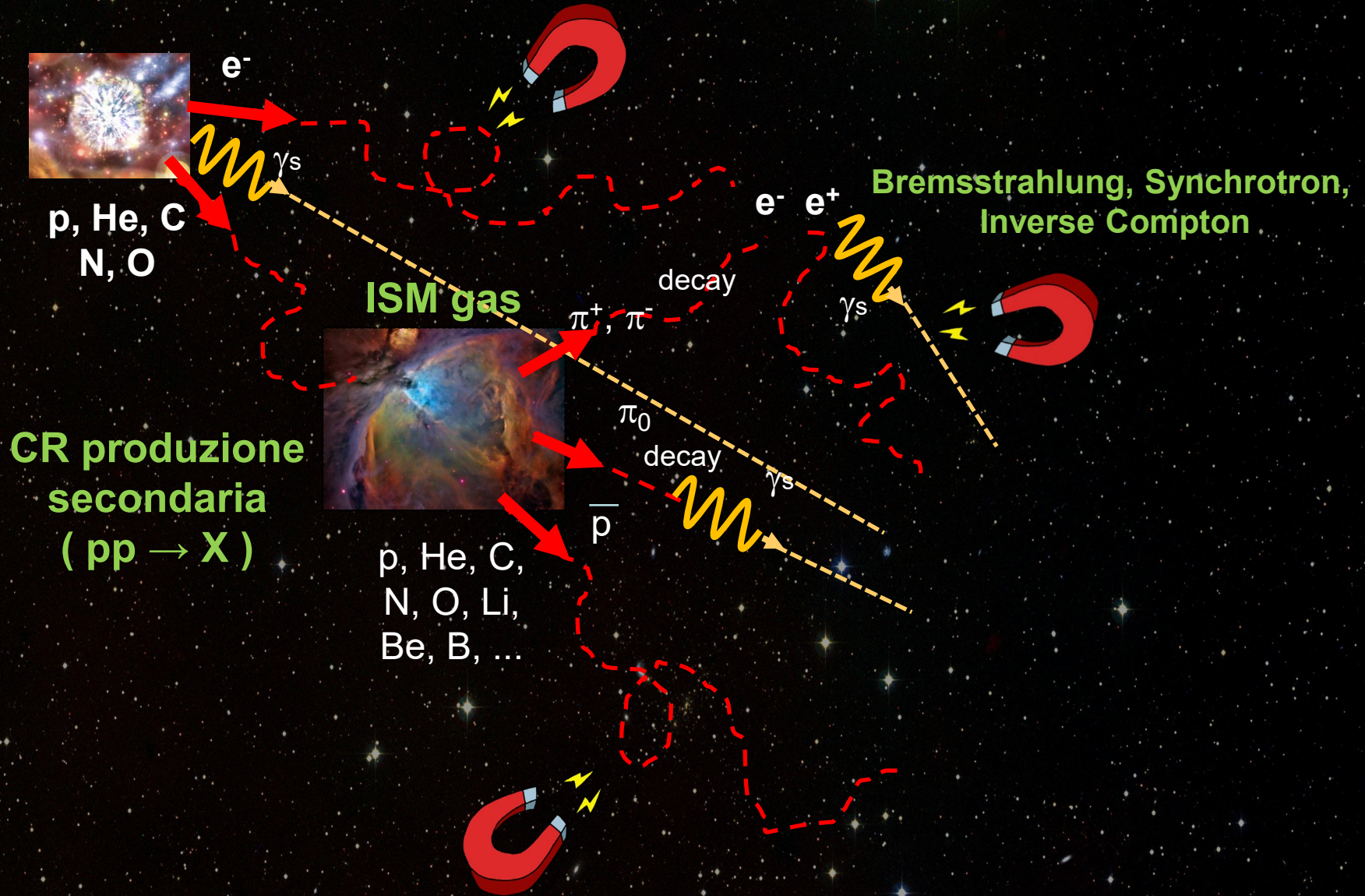


Meccanismo di accelerazione di **Fermi**

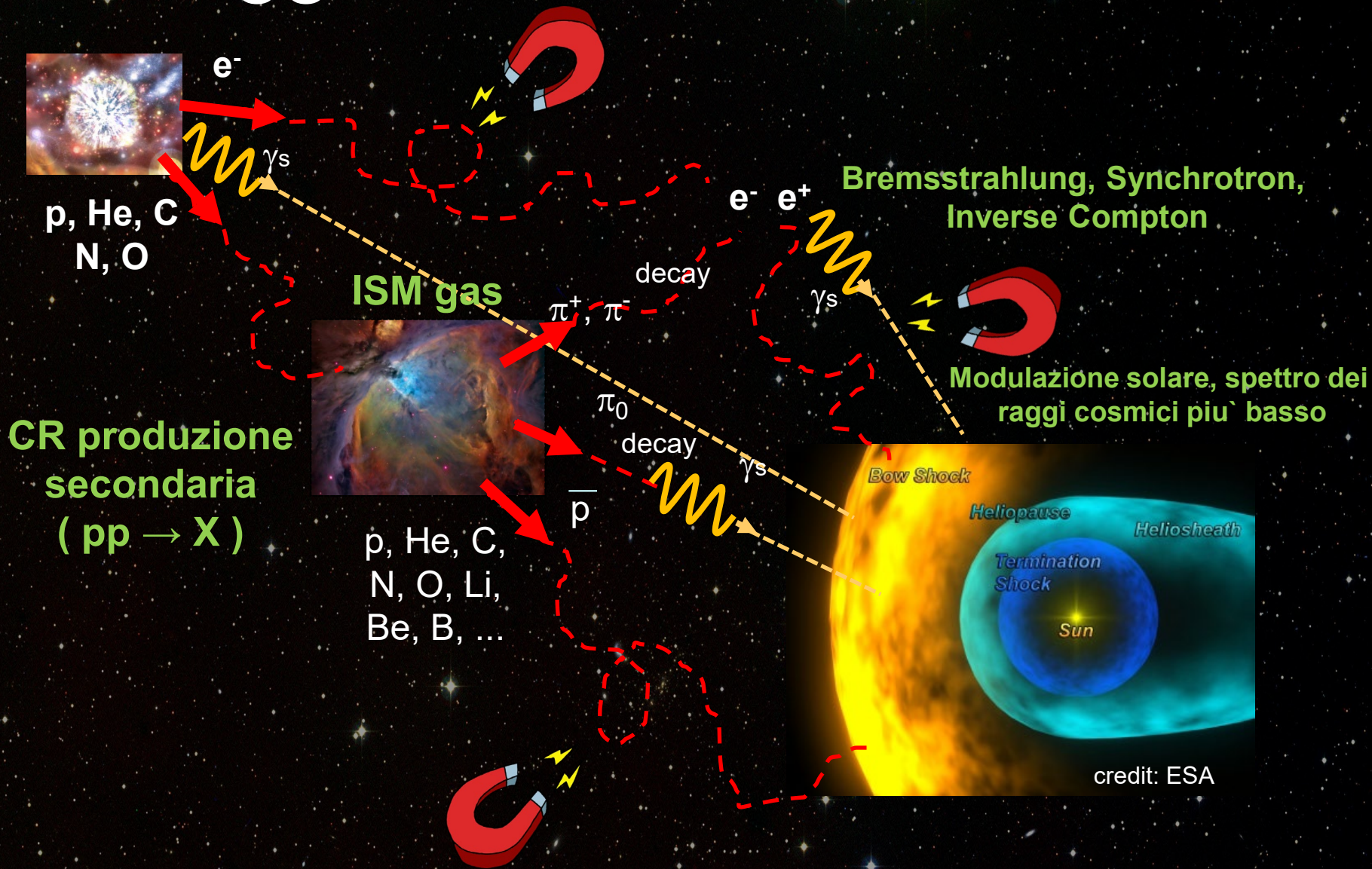
La traiettoria è deviata dai **campi magnetici** della galassia

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

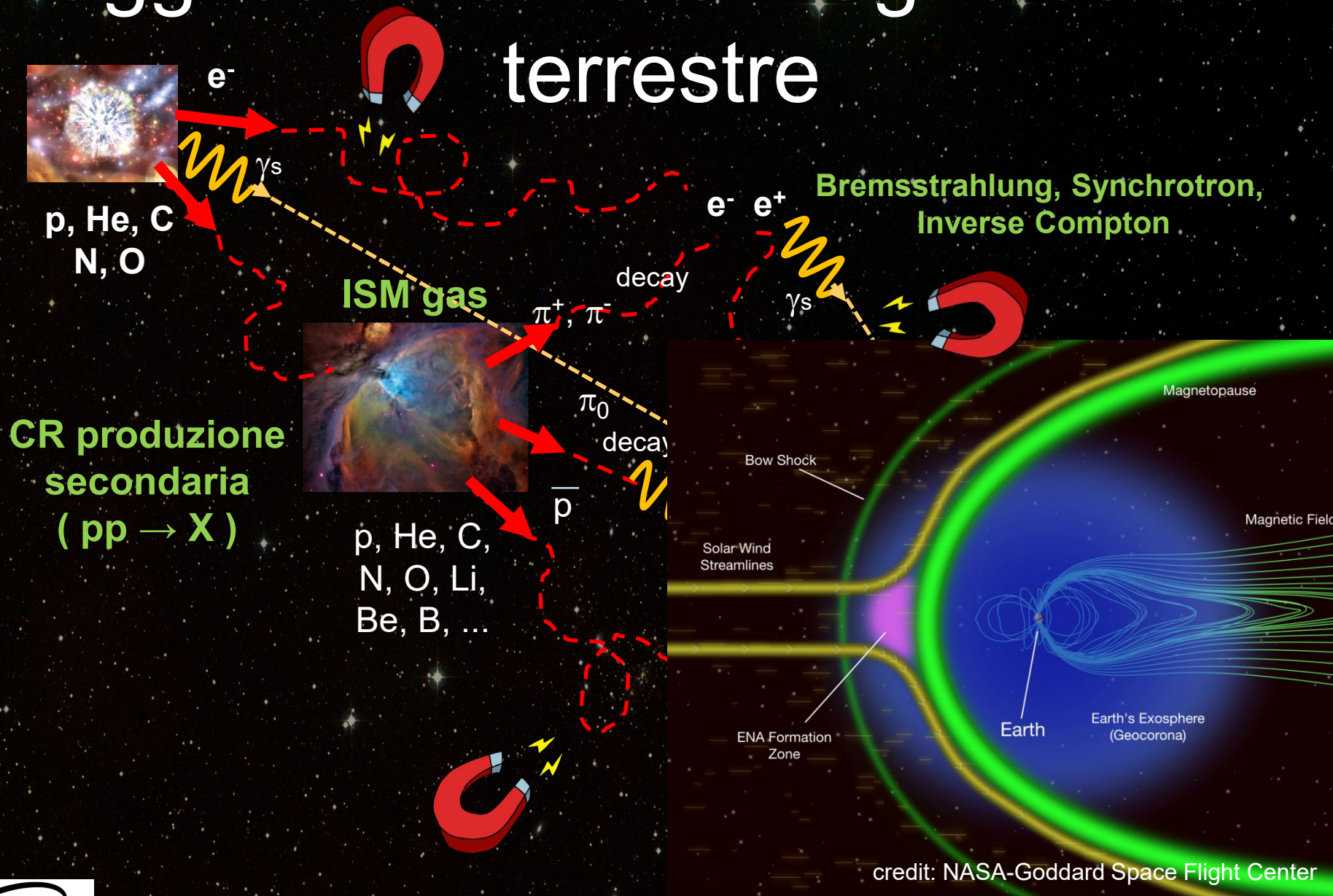
Raggi cosmici prodotti da interazioni



Raggi cosmici nell'eliosfera



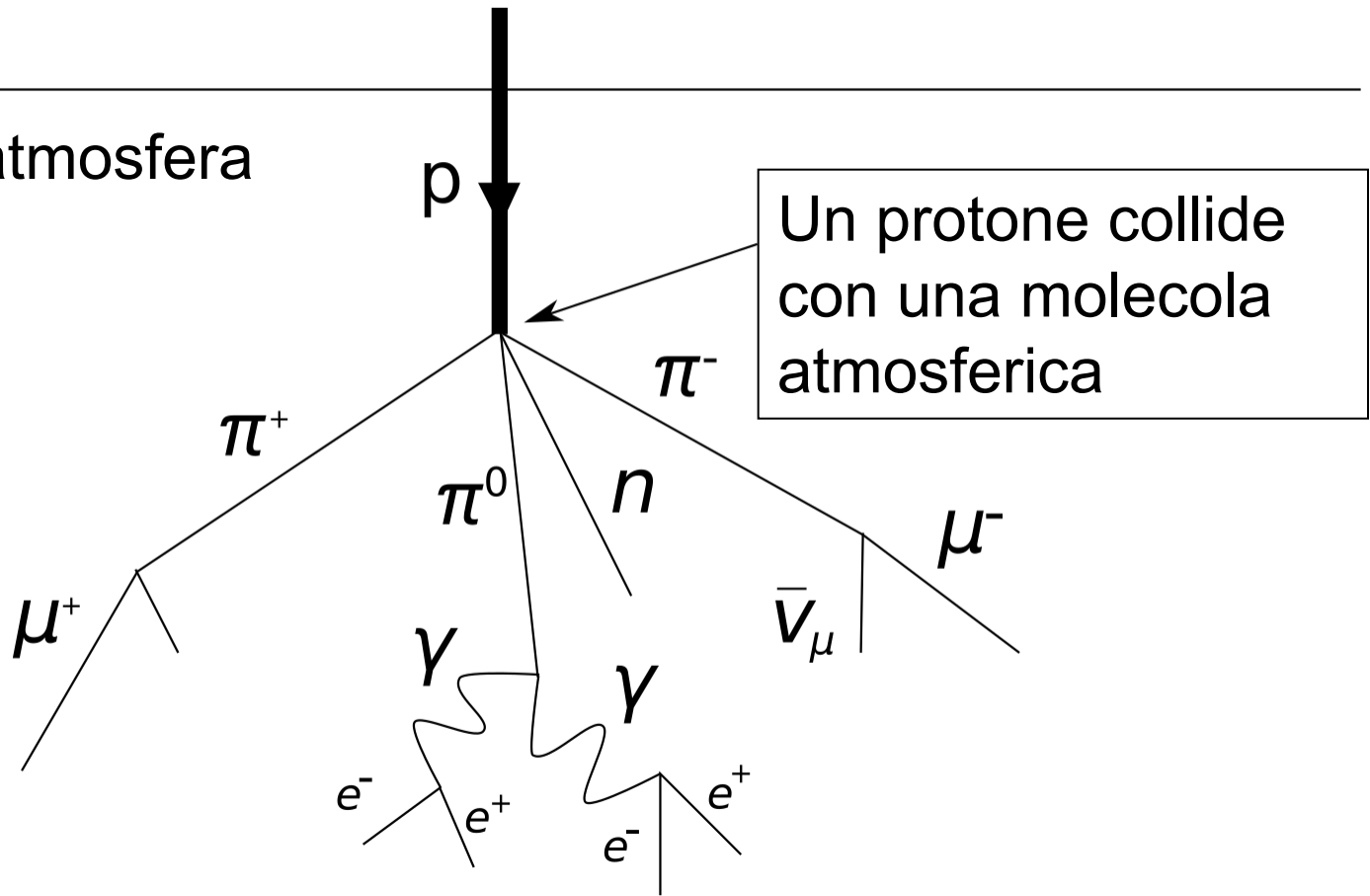
Raggi cosmici nella magnetosfera terrestre



credit: NASA-Goddard Space Flight Center

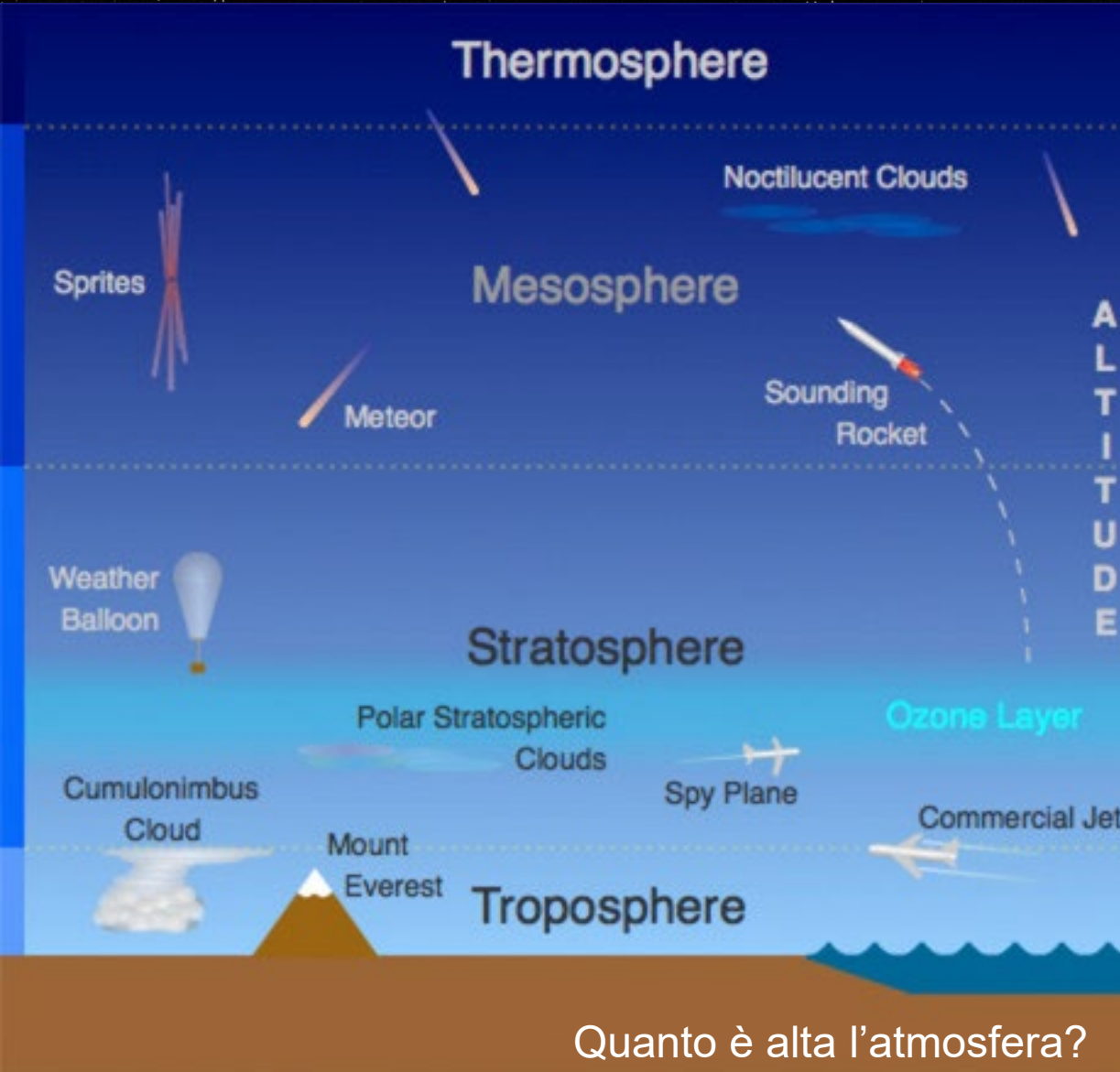
... e raggiungono la Terra, prima interazione:

Limite dell'atmosfera

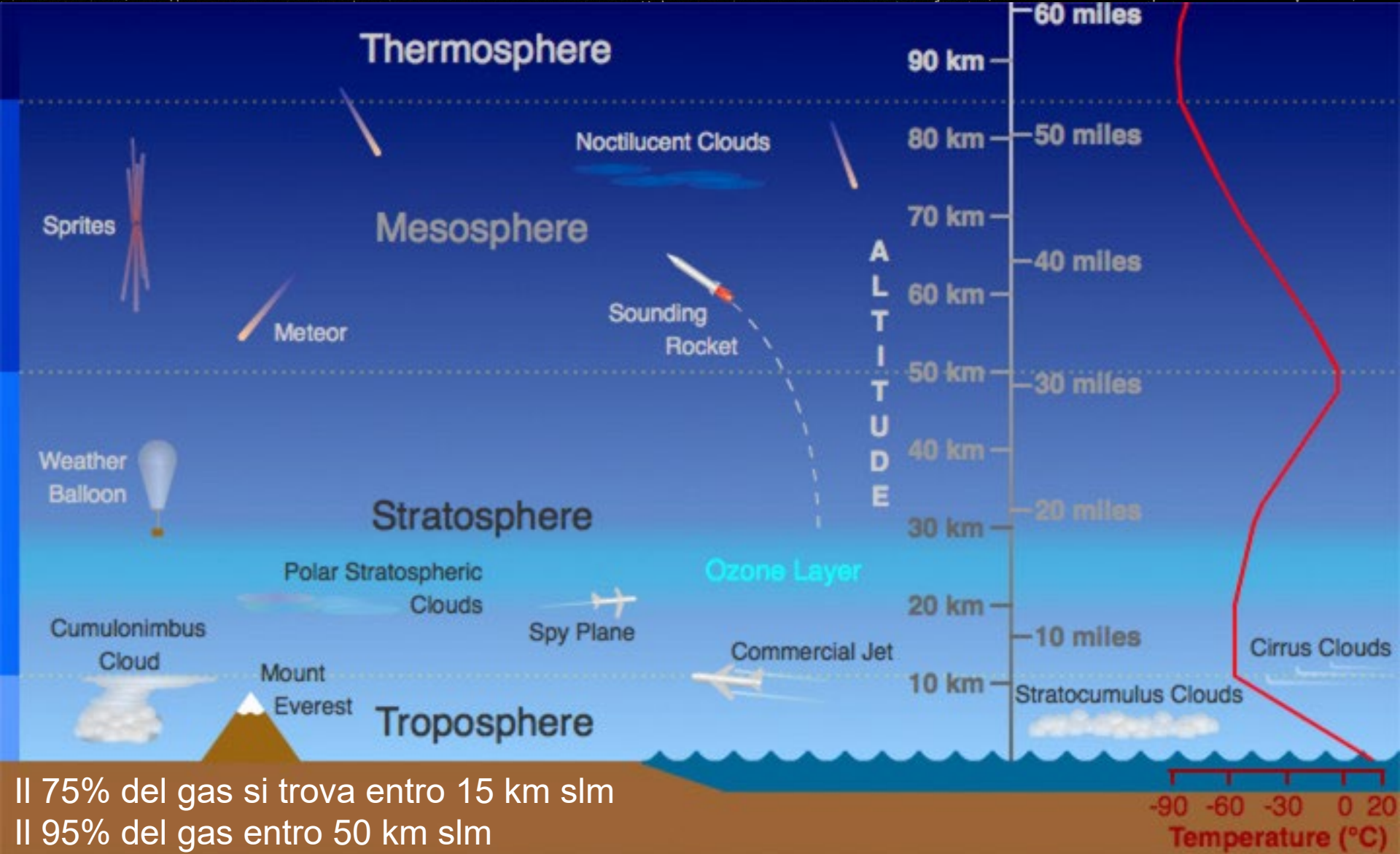


1937: Pierre Auger conclude che esistono dei raggi cosmici "primari" che interagiscono con gli strati superiori dell'atmosfera e iniziano una "cascata" di interazioni secondarie che alla fine porta a terra una "doccia" di muoni, elettroni e fotoni

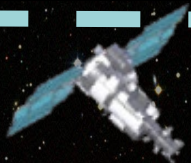
L'atmosfera terrestre



L'atmosfera terrestre



~500 km



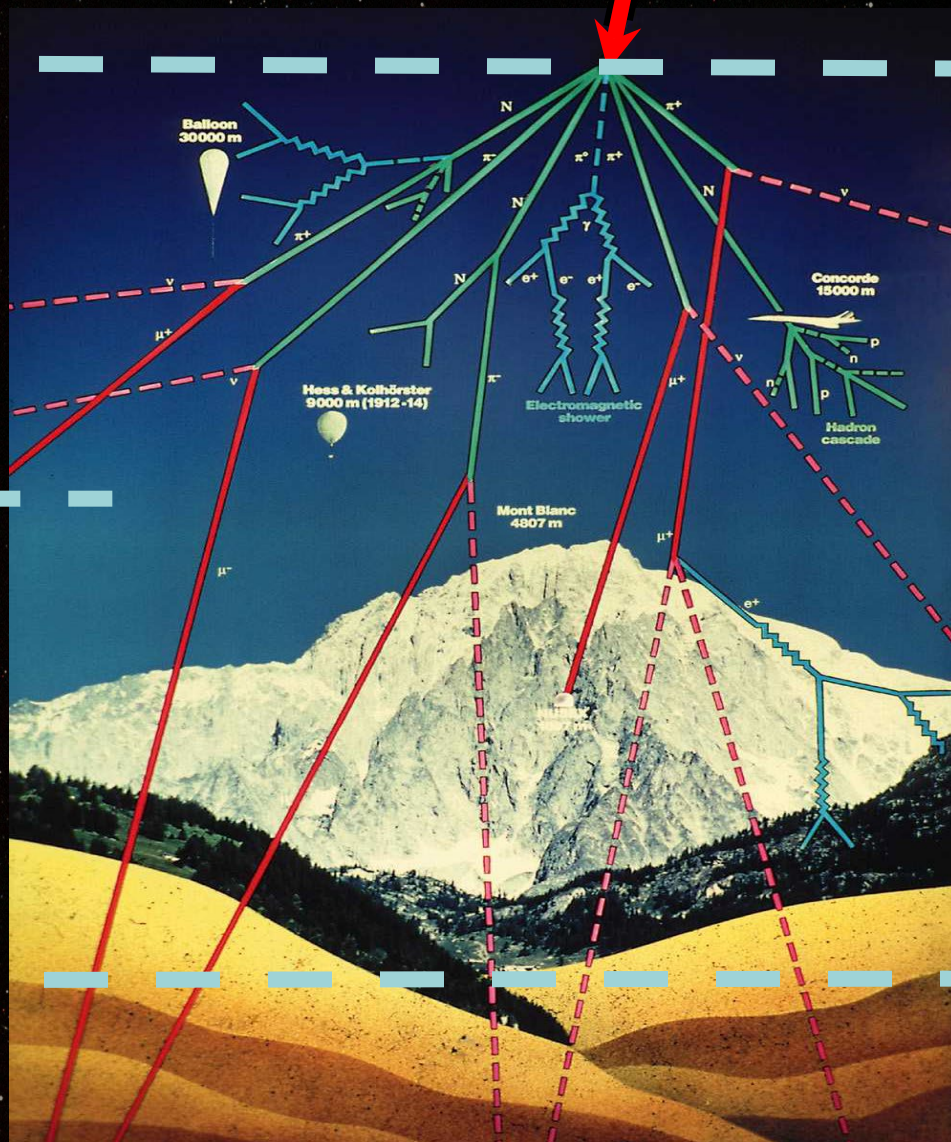
Raggio cosmico primario

Limite dell'atmosfera

~50 km



~5 km



0 m

Capacità di attraversare i materiali

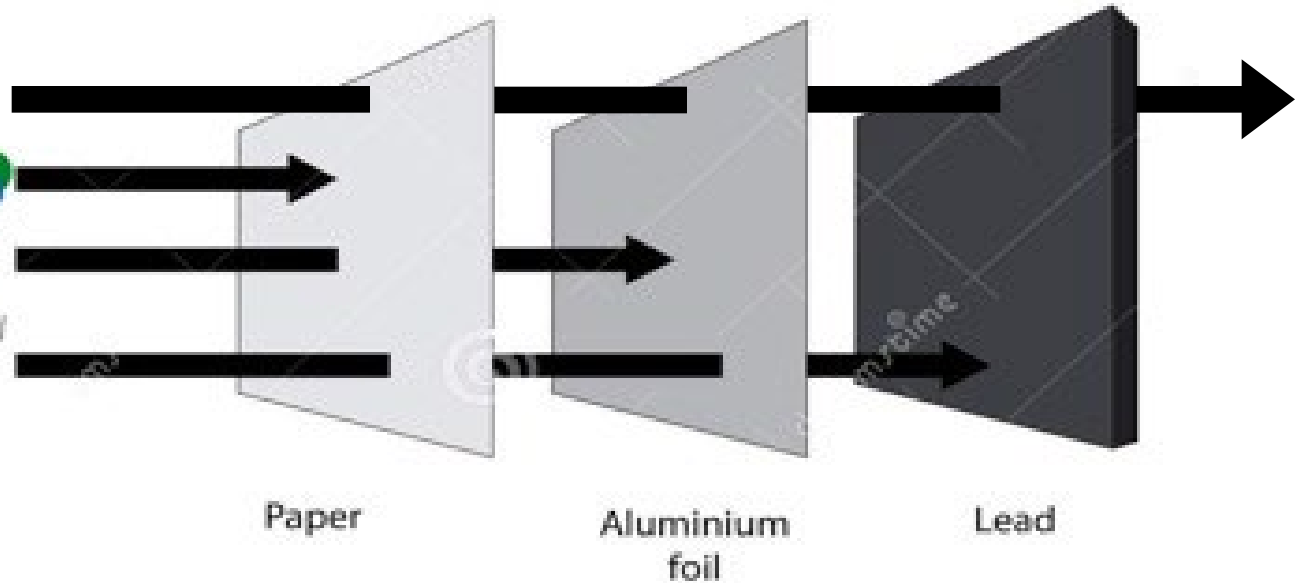
Radioactivity Penetration Range

Muone

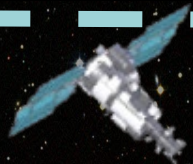
Alpha particles

Beta particles

Gamma rays



~500 km



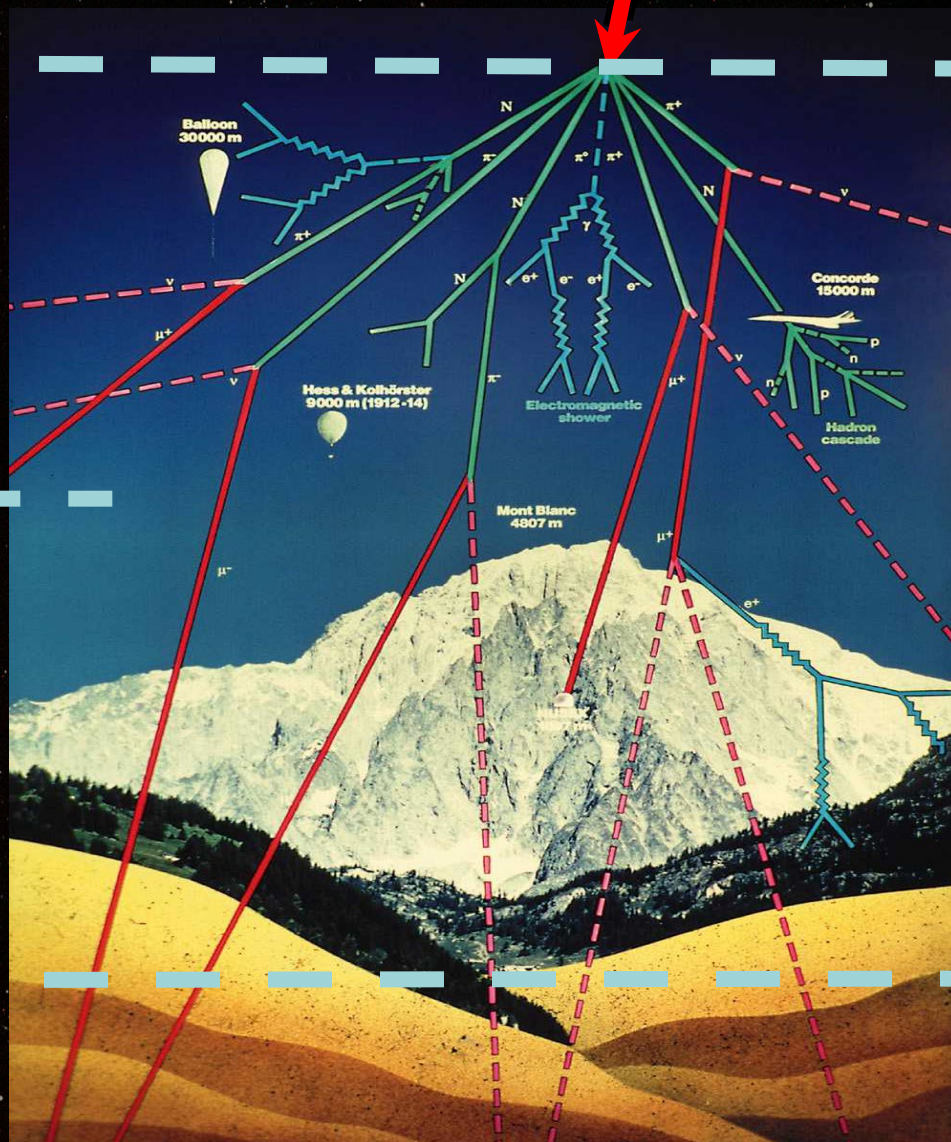
Raggio cosmico primario

Limite dell'atmosfera



~50 km

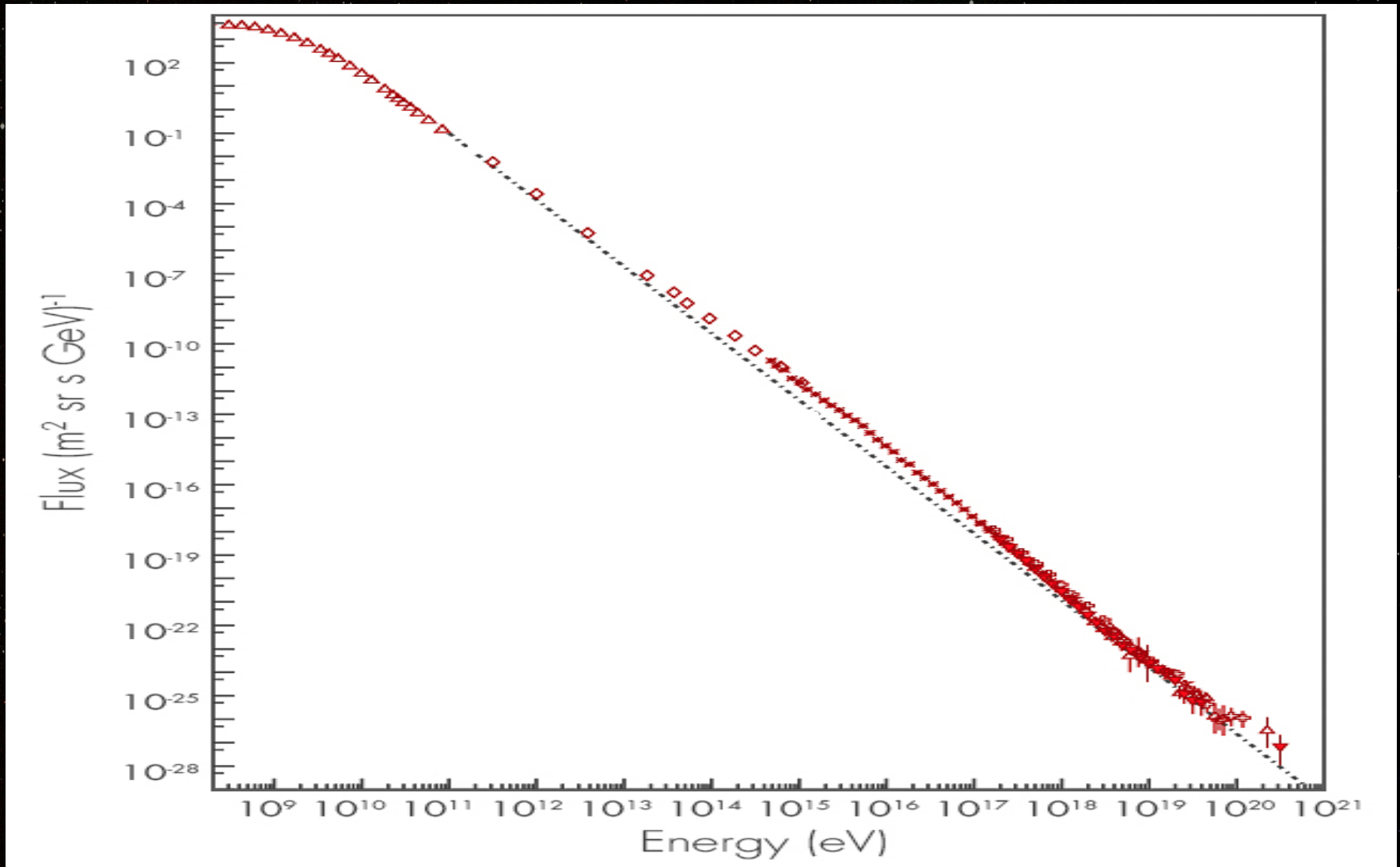
~5 km



Ground

0 m

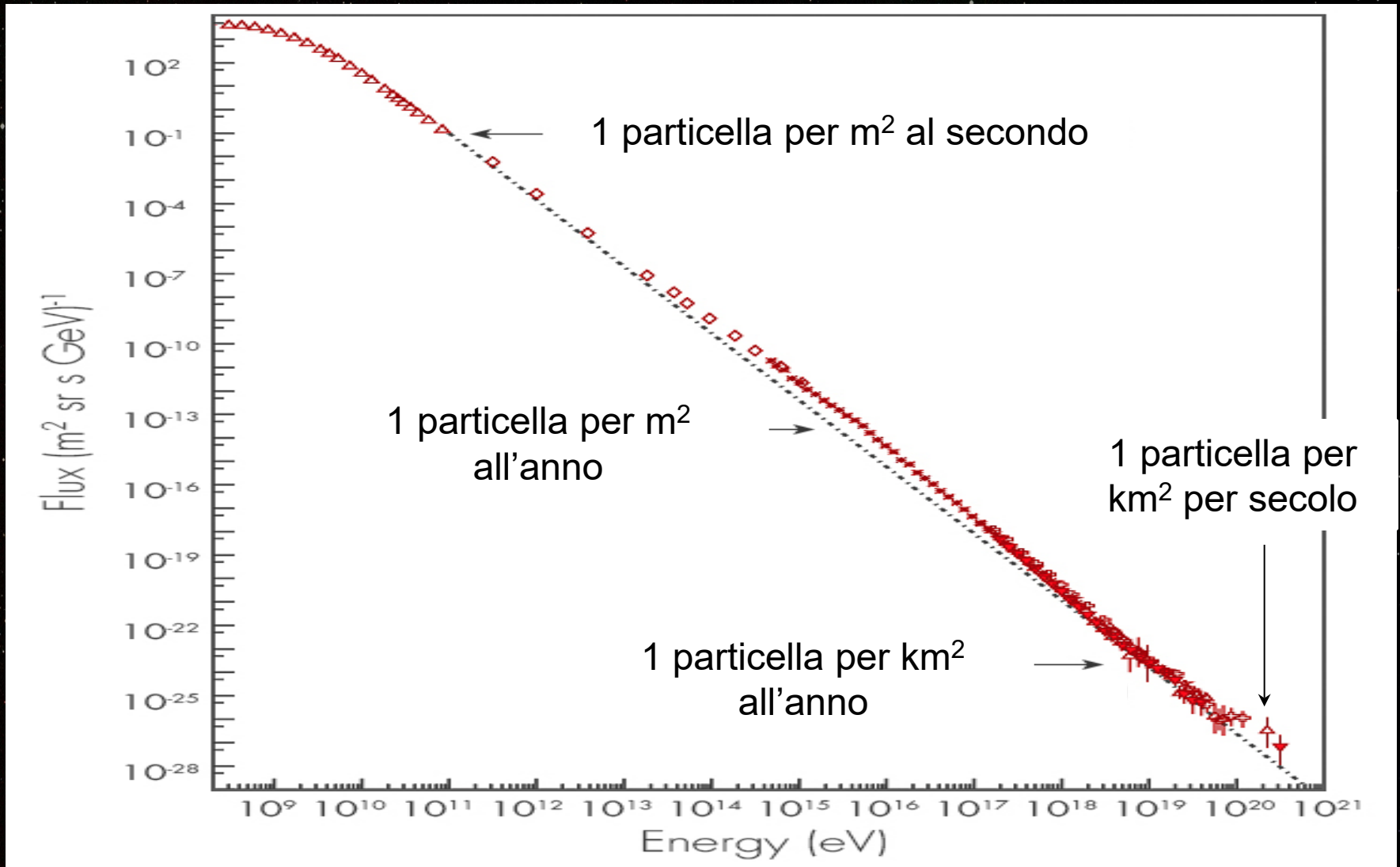
Quanti sono i raggi cosmici?



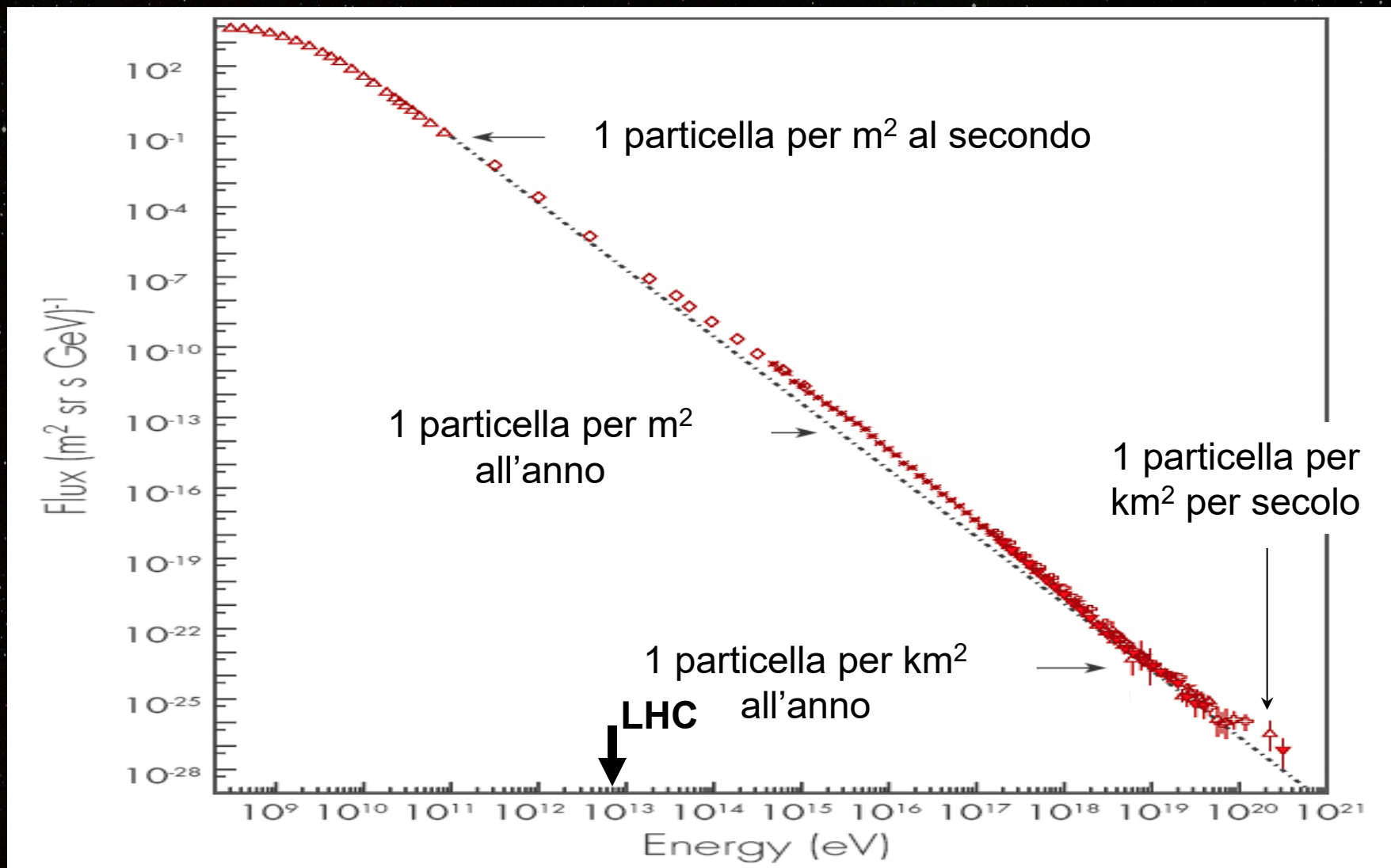
6×10^{18} eV = 1 Joule : energia cinetica di una massa di
100 grammi che cade da un metro

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

Quanti sono i raggi cosmici?



Quanti sono i raggi cosmici?

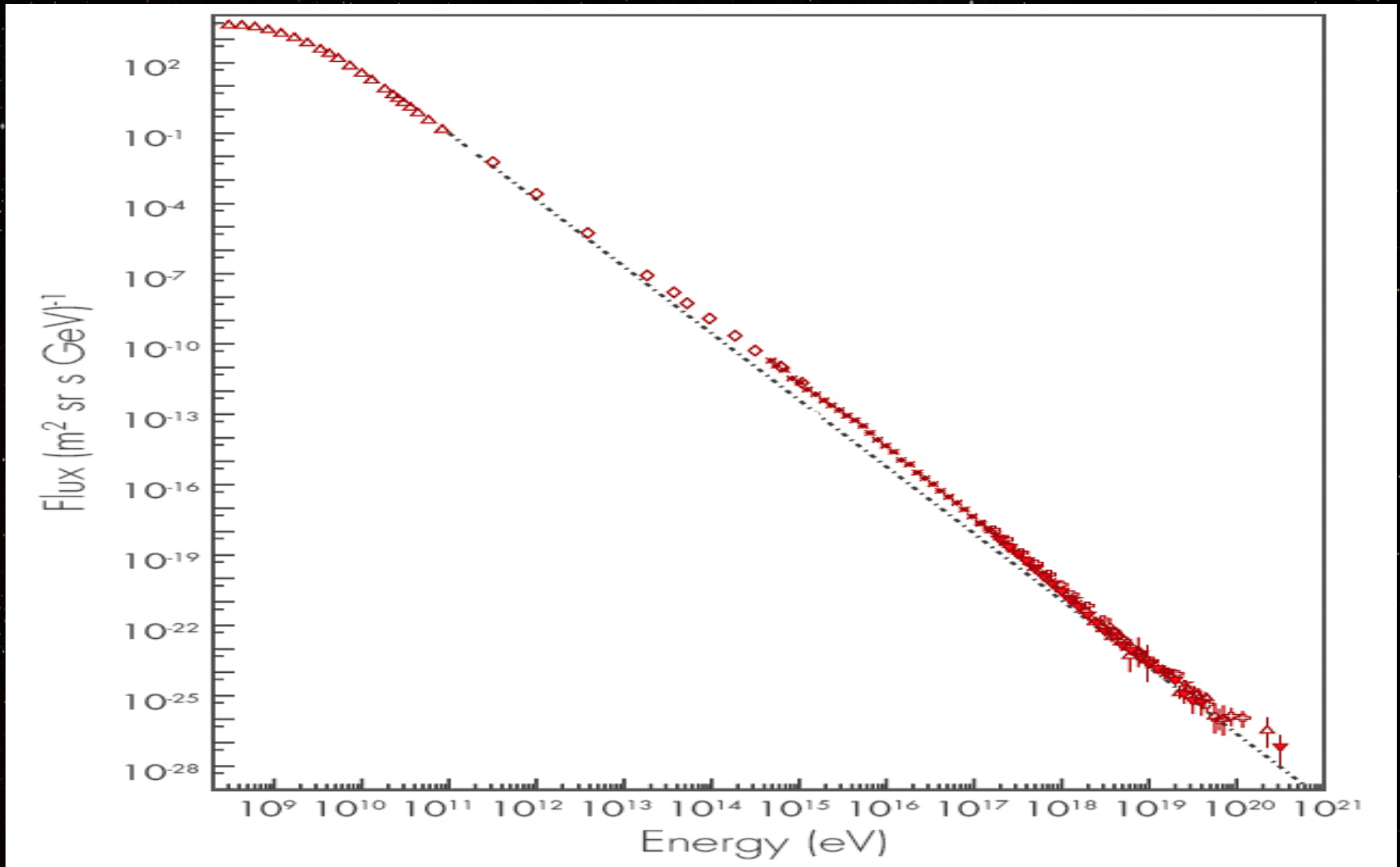


E al suolo?

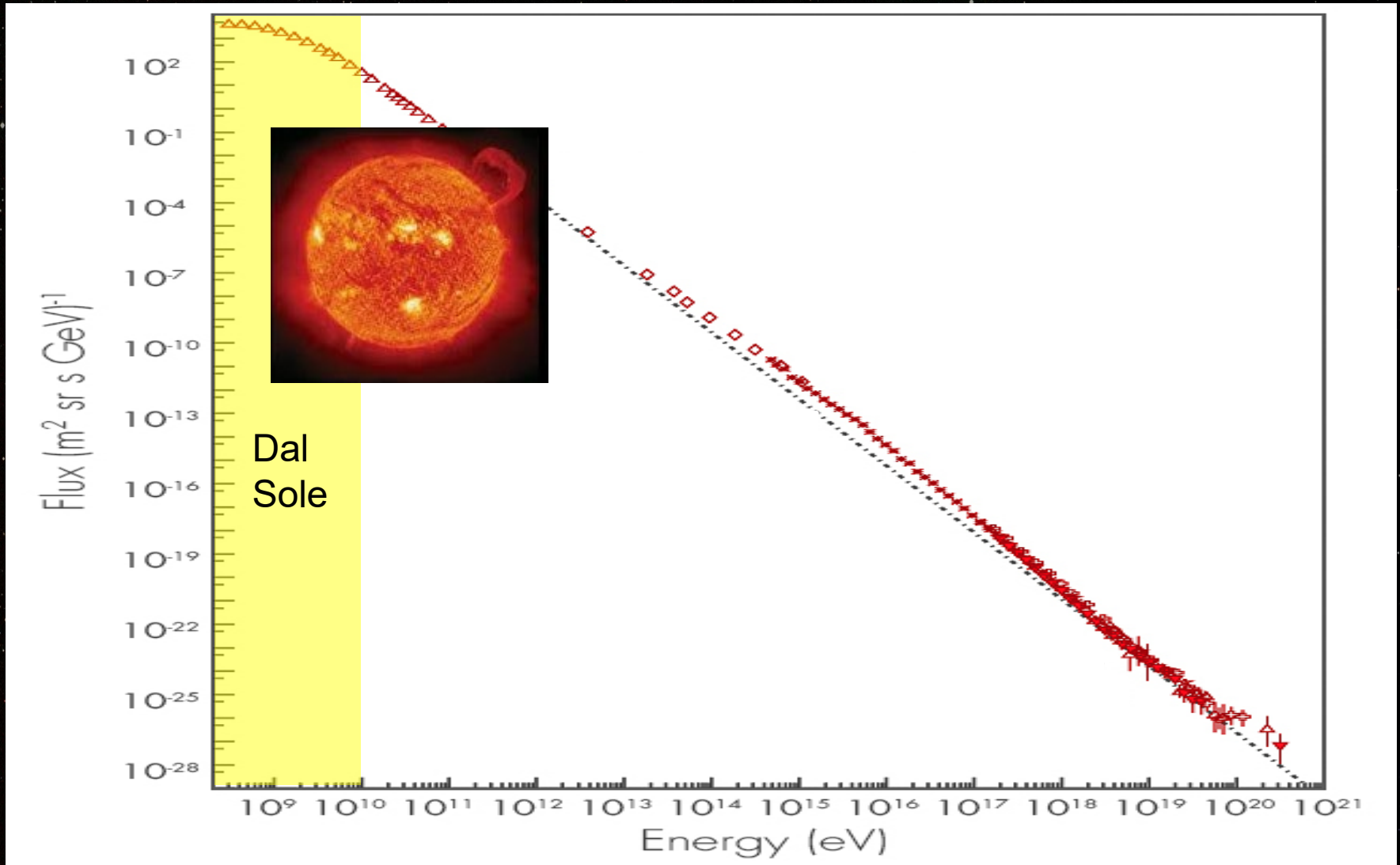
A livello del mare circa:
160 muoni al secondo per m^2
(1 muone al minuto per cm^2)



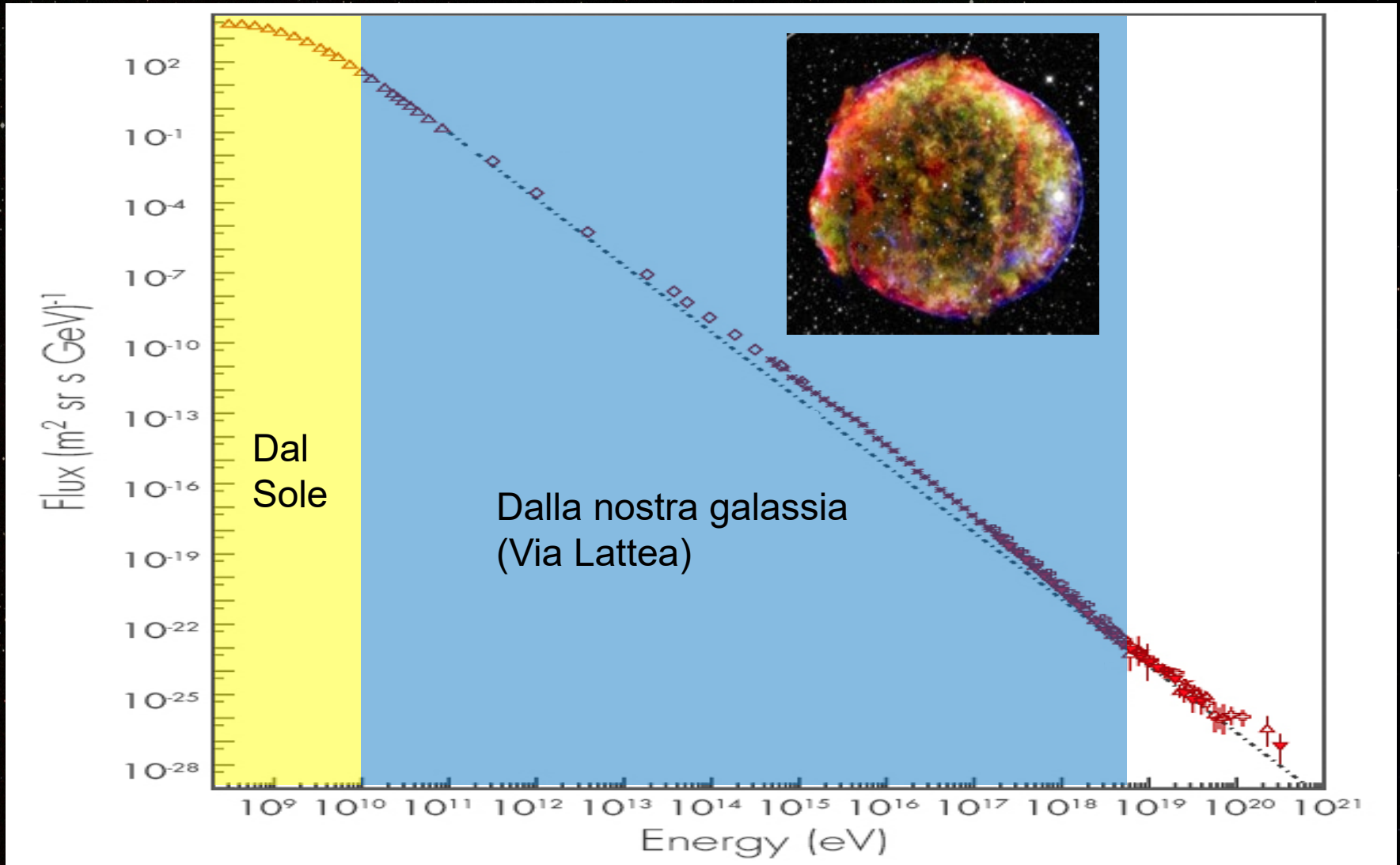
Da dove vengono i raggi cosmici?



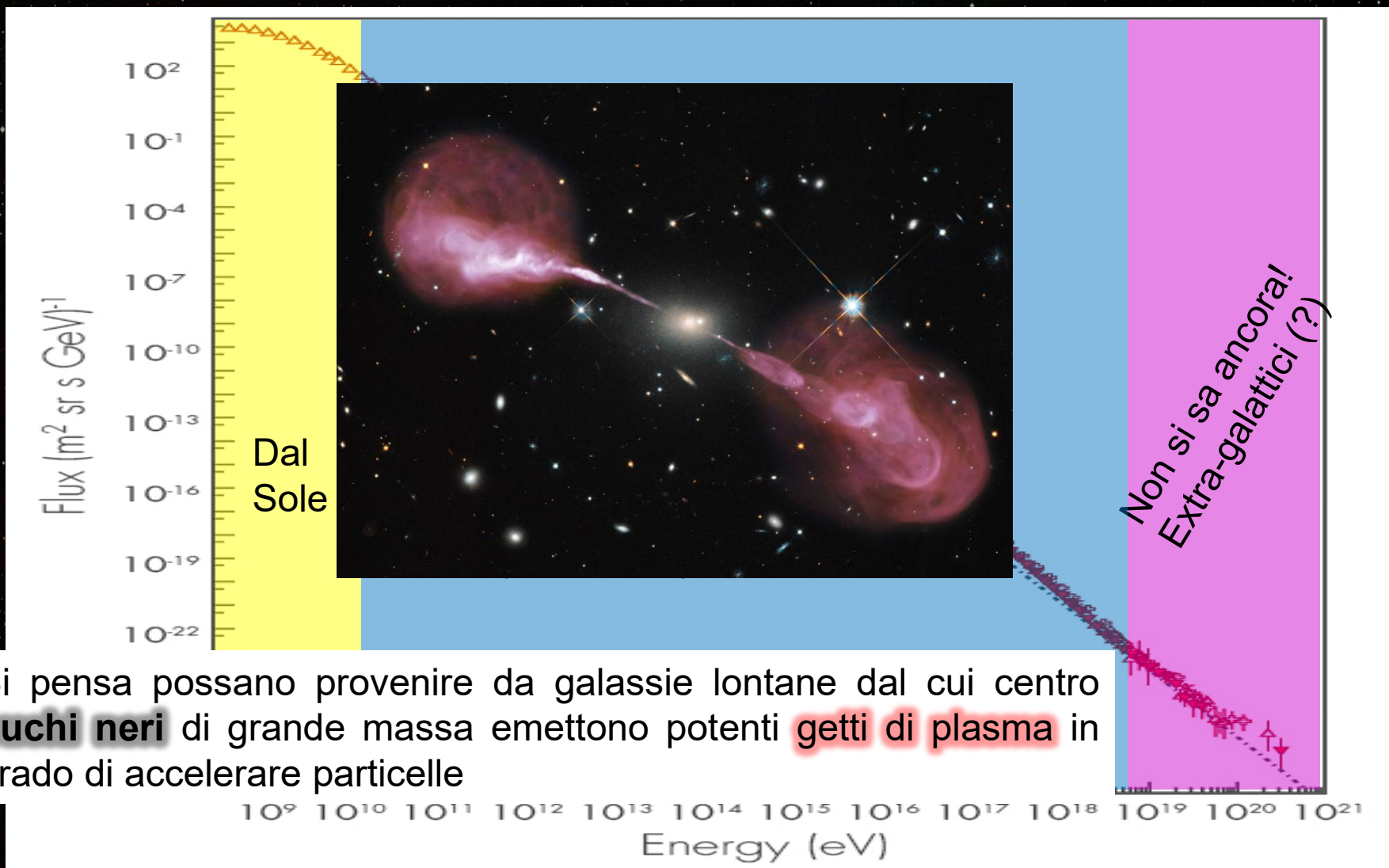
Da dove vengono i raggi cosmici?



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

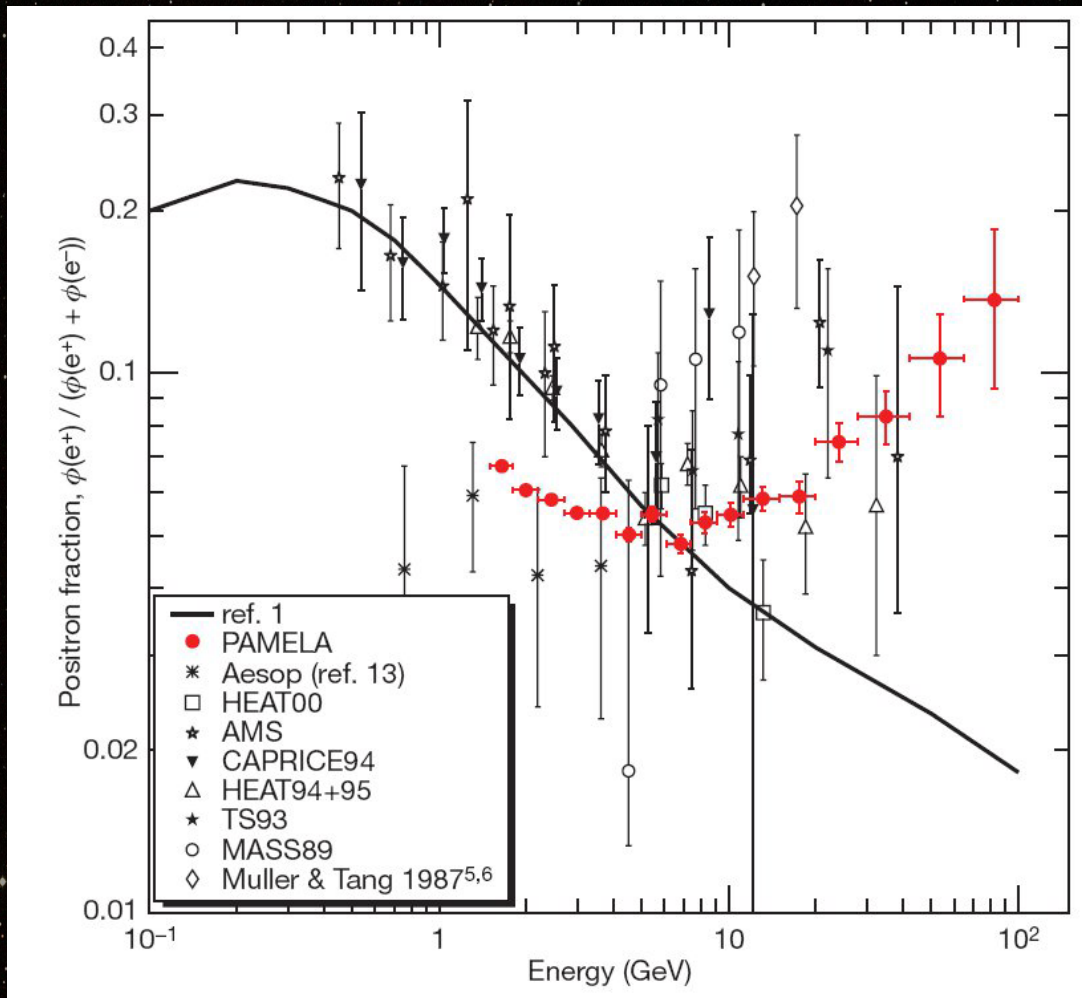
Per la loro composizione

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
	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	91.2 GeV/c ²		
-1	-1	-1	0		
1/2	1/2	1/2	1		
e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson		
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	80.4 GeV/c ²	
	0	0	0	± 1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
			GAUGE BOSONS		

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)

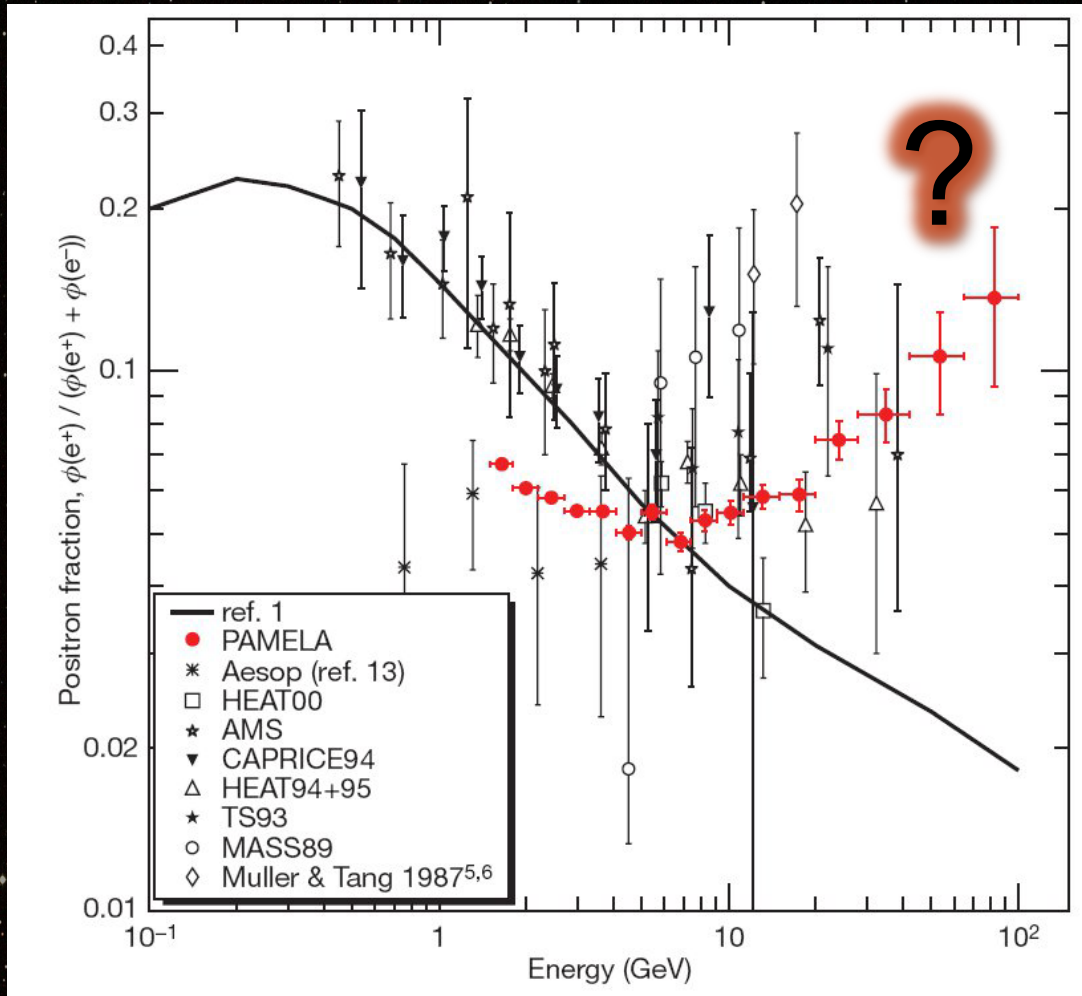
Nei raggi cosmici: eccesso di positroni!



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

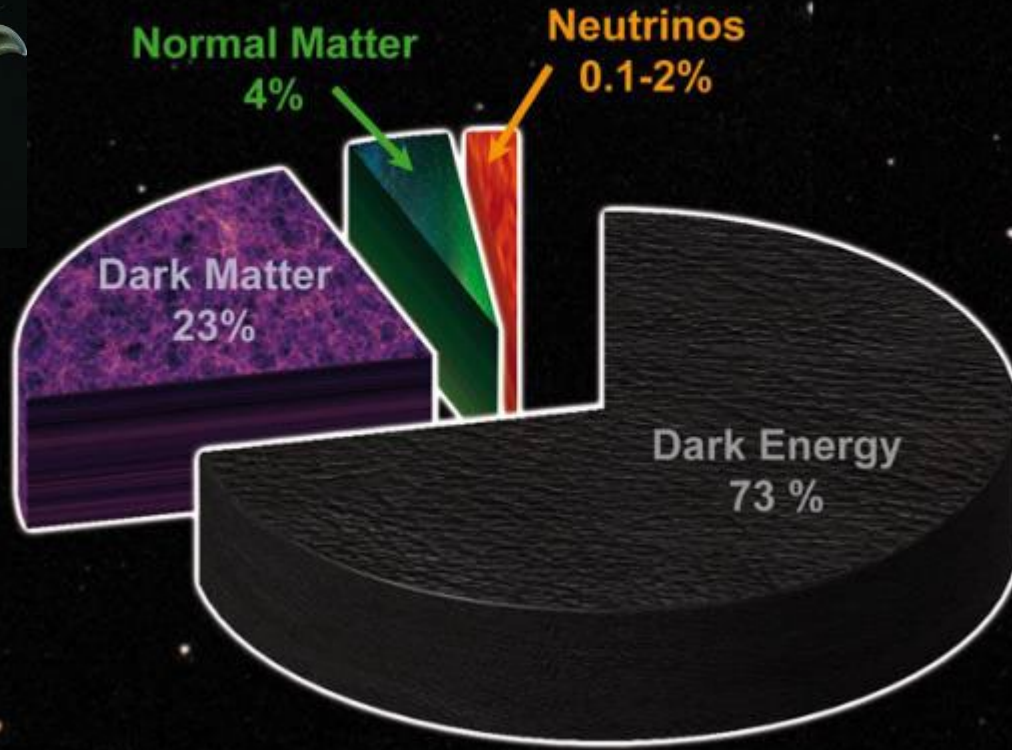
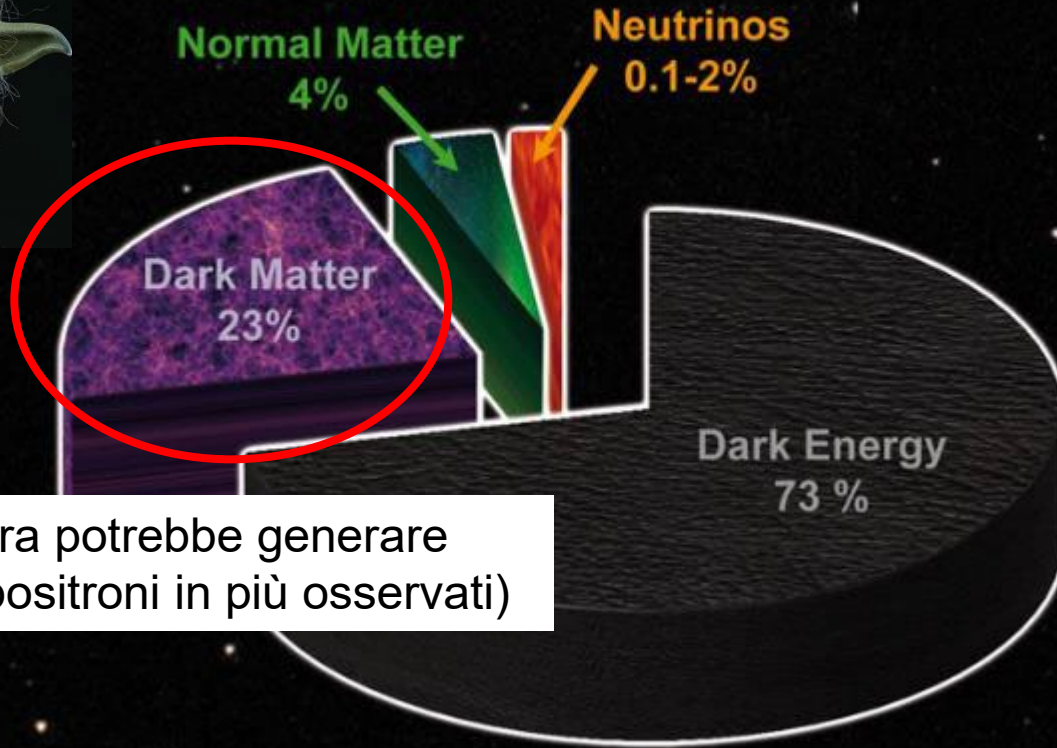


Figura di Elena Vahnuccini (INFN Firenze)



Conosciamo circa il 4% della composizione dell'Universo

STAR
WARS



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

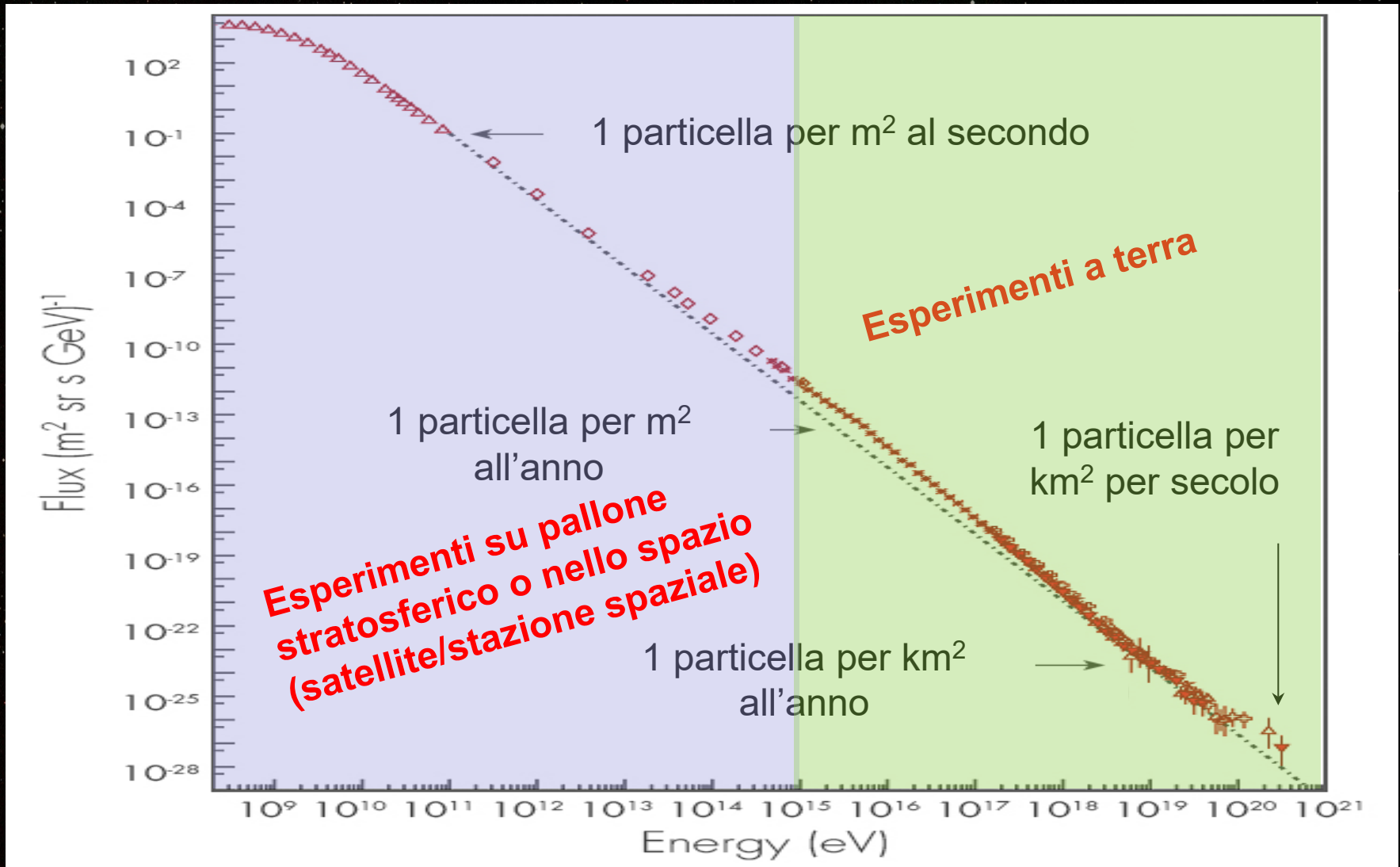
Figura di Elena Vahnuccini (INFN Firenze)



Rivelatori di raggi cosmici



Tipologie di esperimenti



Esperimenti nello spazio

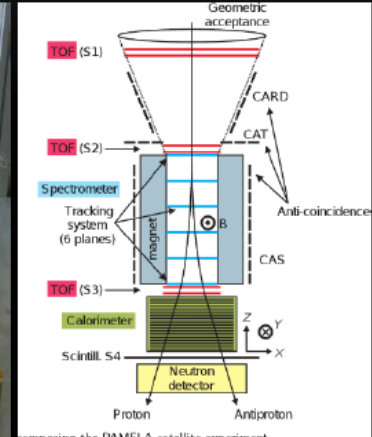
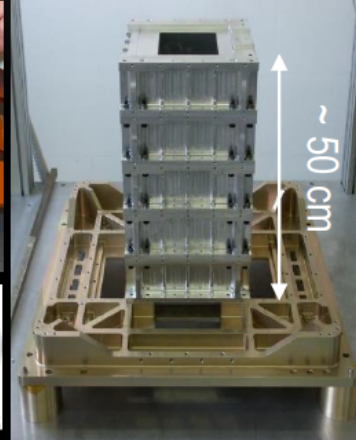
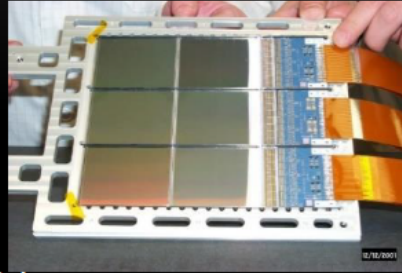


Figura di Elena Vanhuccini (INFN Firenze)



➤ 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

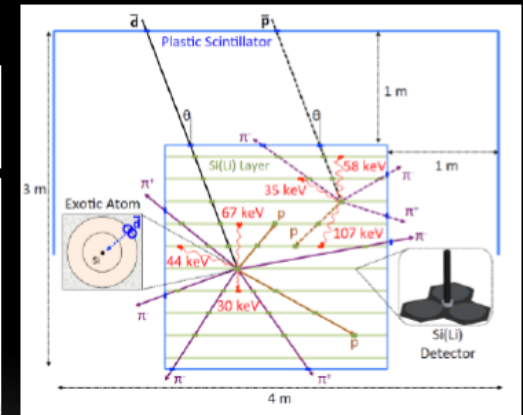
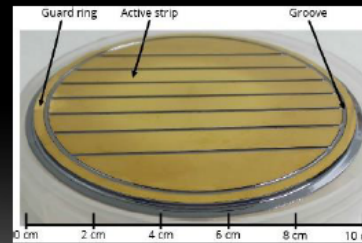


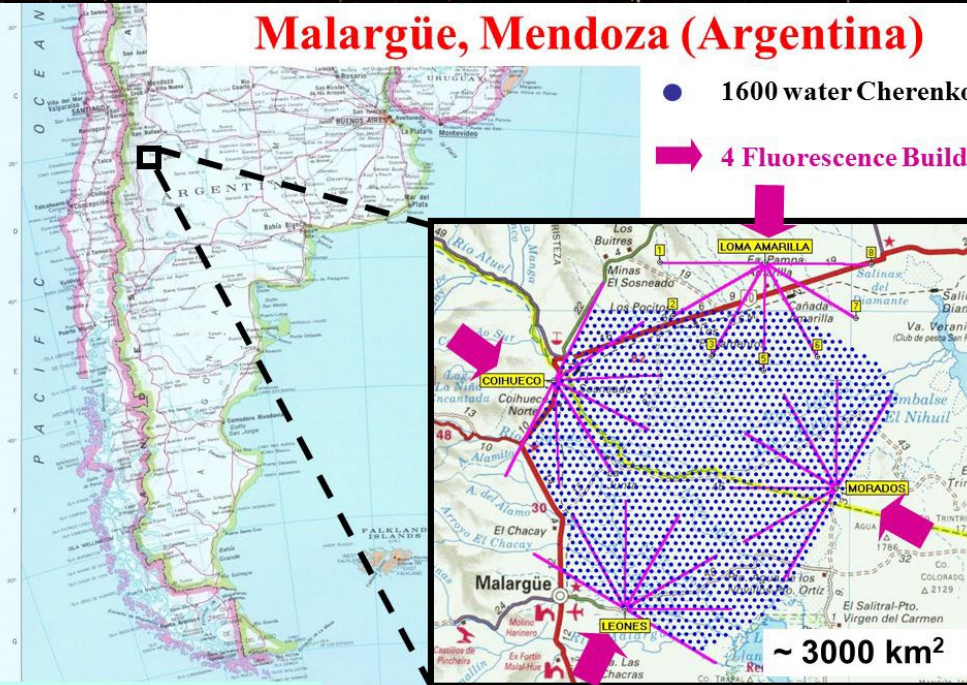
Figura di Elena Vannuccini (INFN Firenze)

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/km² secolo) occorre strumentare superfici > 1000 km².

Malargüe, Mendoza (Argentina)



35.5° S, 69.3° W
1400 m a.s.l. (880 g cm⁻²)

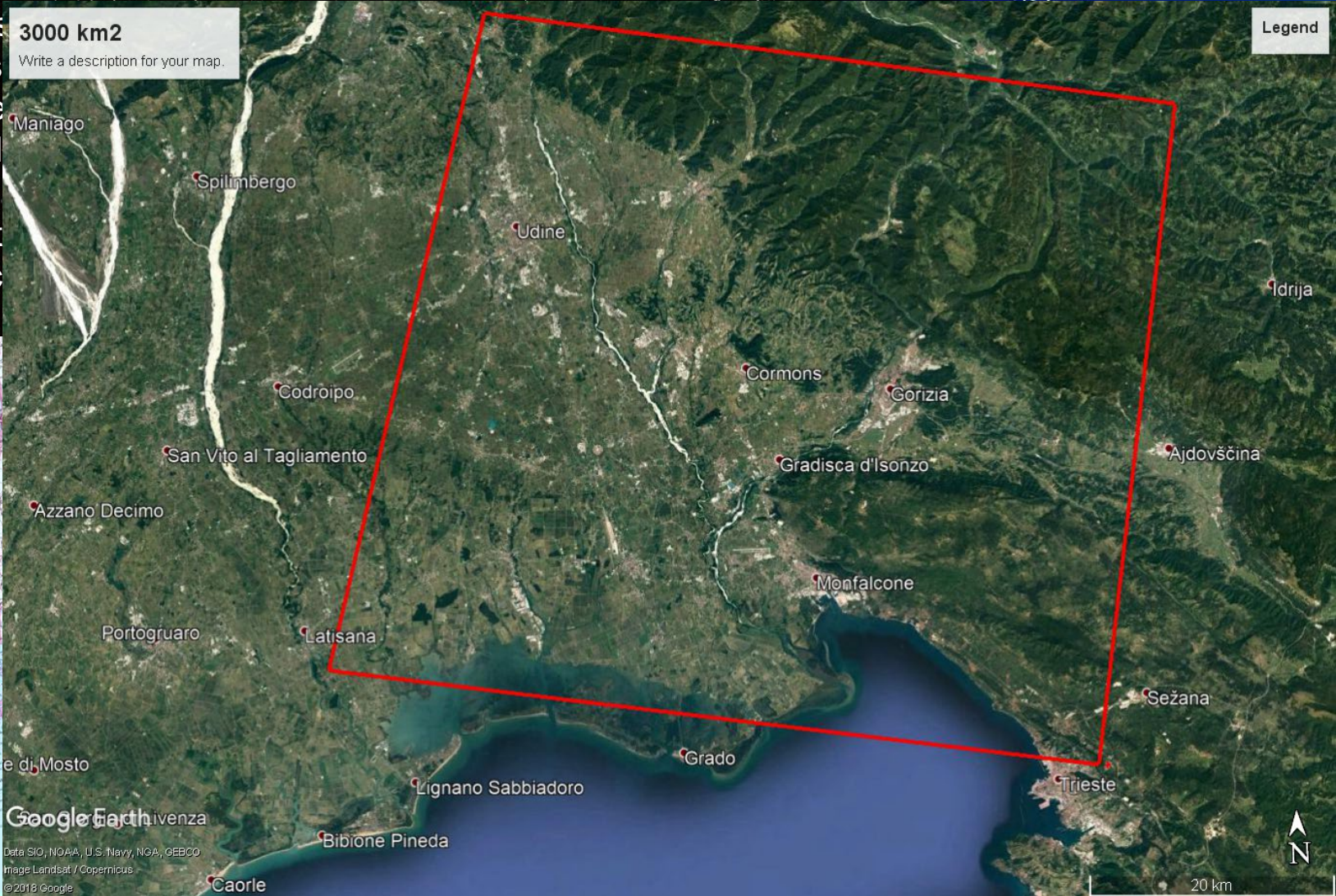


Esperimenti a terra

L'es
oss
ene
pall
Dat
occ

3000 km²

Write a description for your map.



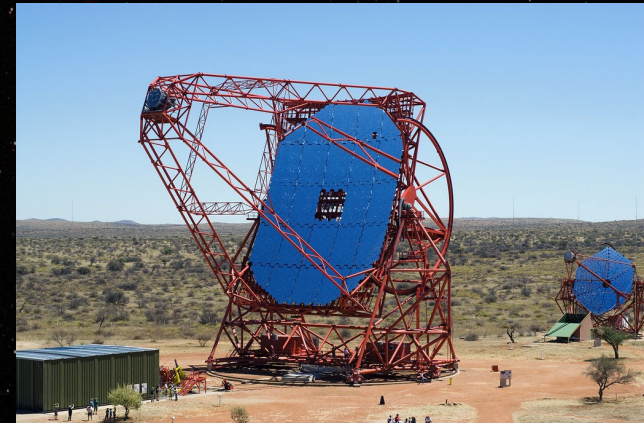
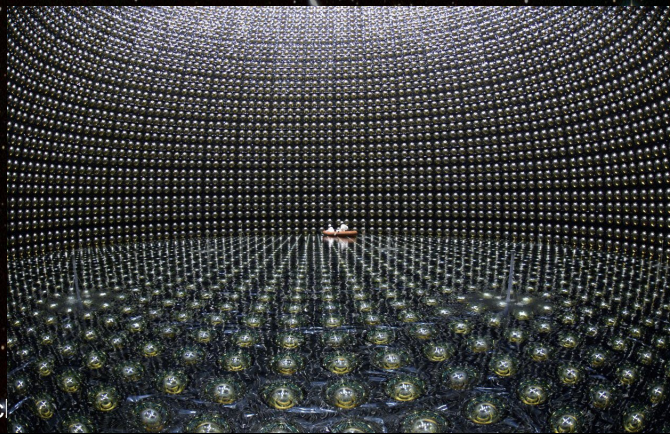
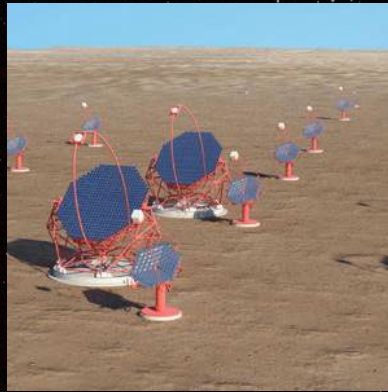
35.5° S, 69.3° W
1400 m a.s.l. (880 g cm⁻²)

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

Grandi esperimenti, grandi collaborazioni

PAMELA Collaboration

Italy



Bari



Florence



Frascati



Naples



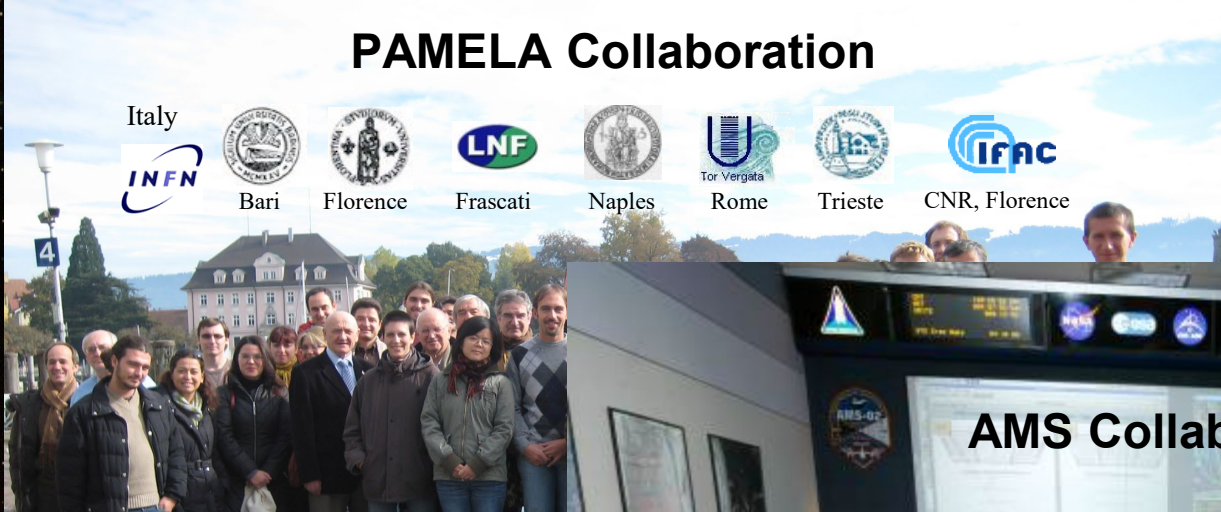
Rome



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!

