

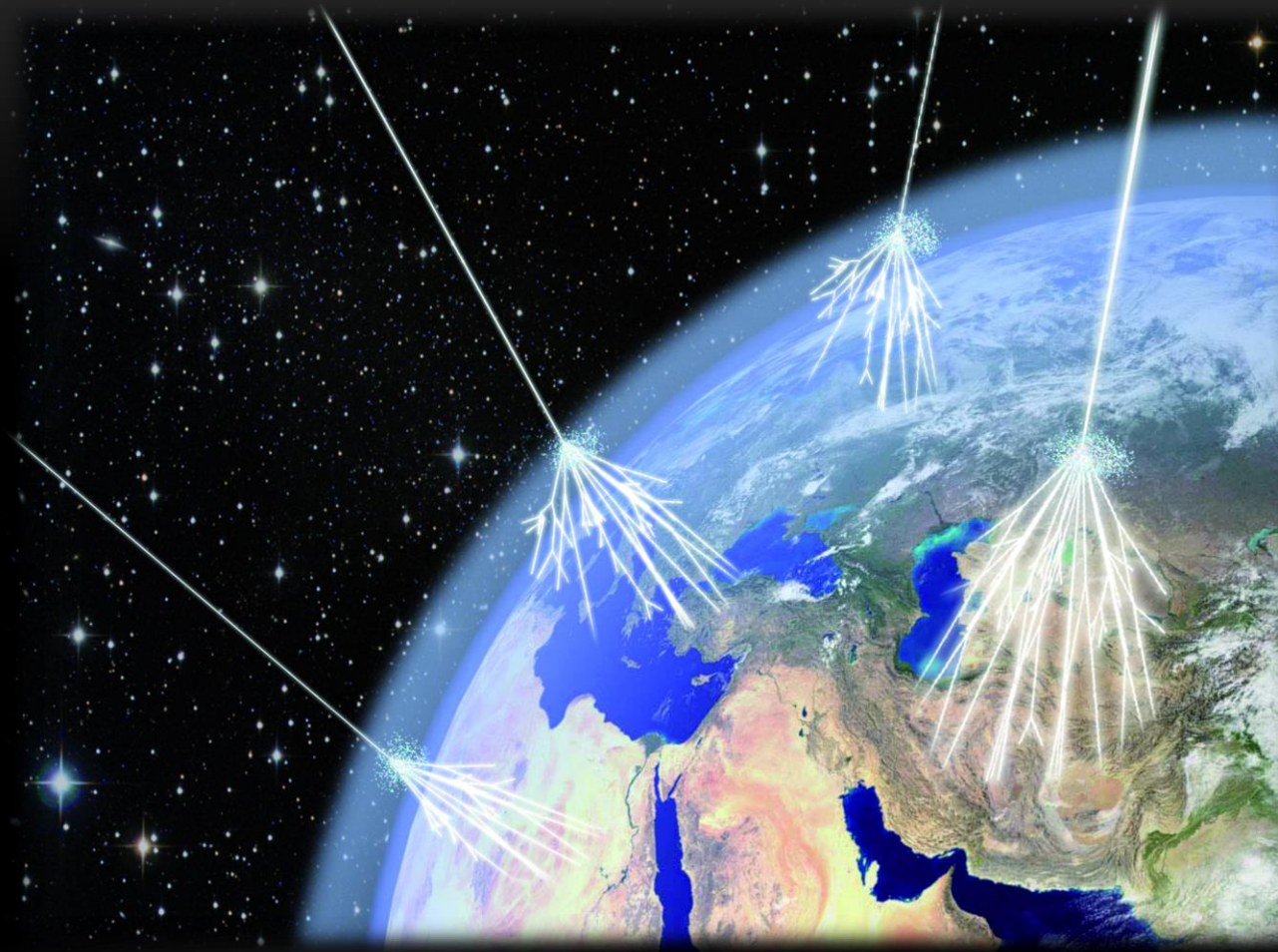
# INTRODUZIONE ALLA FISICA DEI RAGGI COSMICI

Elena Vannuccini



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare  
SEZIONE DI FIRENZE

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



# LA SCOPERTA DEI RAGGI COSMICI

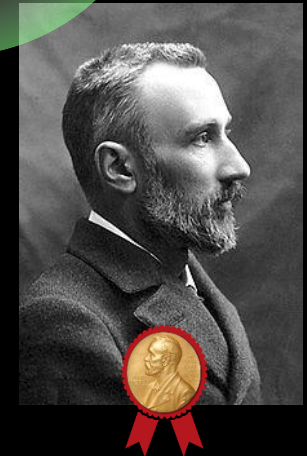
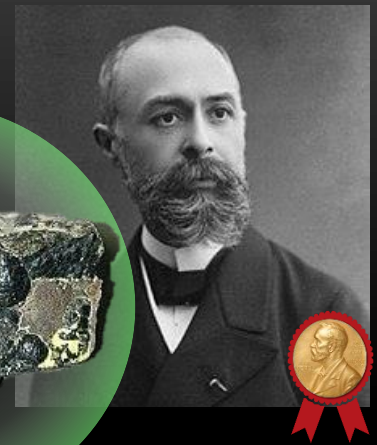
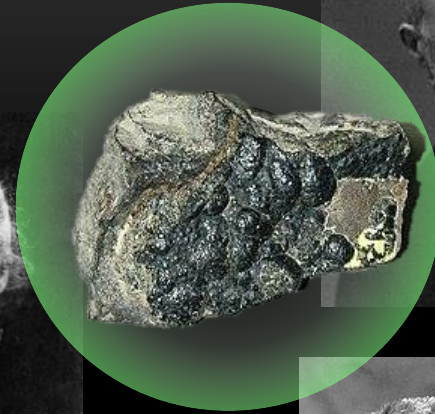


Nel 1896 A. H. Becquerel  
scopre il fenomeno della  
radioattività naturale, studiando  
l'uranio.

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...



Negli anni 1911-1913

**Victor Hess**

in una serie di voli su pallone fino a circa 5.3 km trovò che la radiazione lentamente diminuiva con l'altitudine, ma intorno a **1.5 km** ricominciava a salire.

Hess concluse che l'origine della radiazione fosse **cosmica!!**

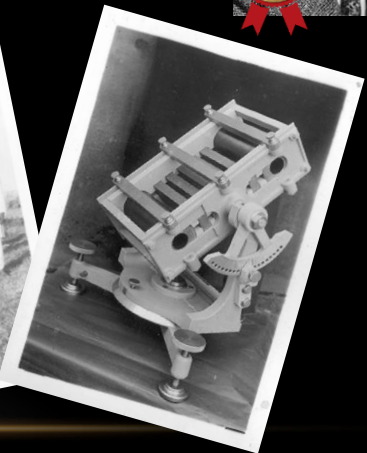
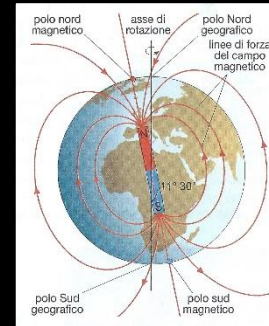
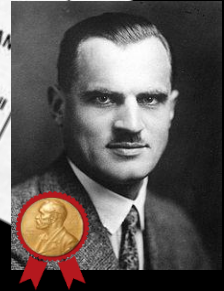
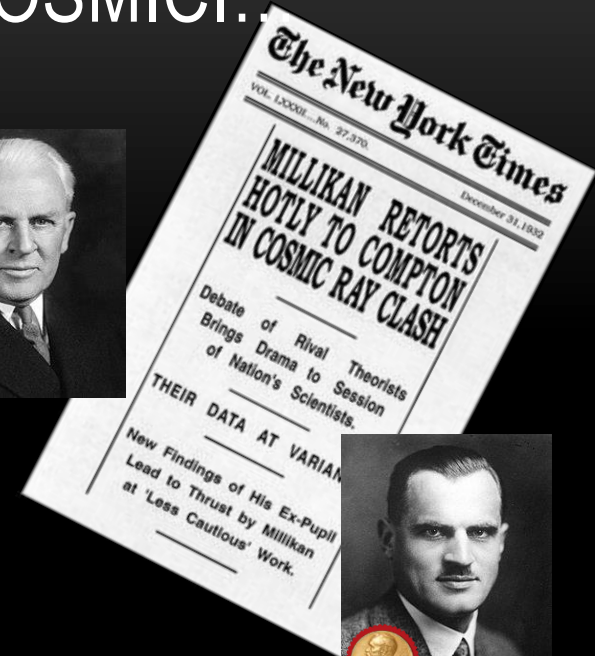
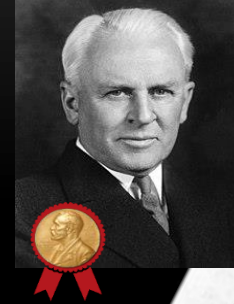


*Premio Nobel*

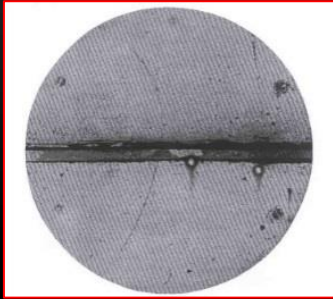


# NASCE LA FISICA DEI RAGGI COSMICI.

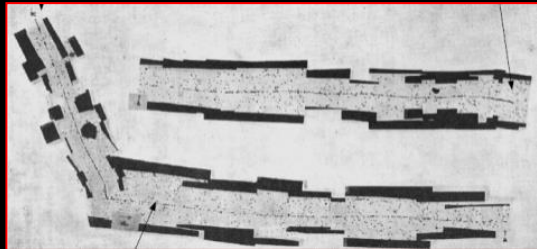
- Nel 1925 **Robert A. Millikan** conia il termine **RAGGI COSMICI**
- Nel 1932 infuria il dibattito sulla natura della radiazione cosmica primaria → Sono raggi gamma (Millikan) o particelle cariche (Compton)?
- Nel 1927 Clay dimostra che i raggi cosmici sono prevalentemente particelle **cariche** (effetto geomagnetico)
- Nel 1933 Compton conclude dal segno dell'asimmetria est-ovest (predetta e misurata da Rossi) che i raggi cosmici primari hanno carica **positiva**
- Nel 1933 **Rossi** osserva gli sciami atmosferici



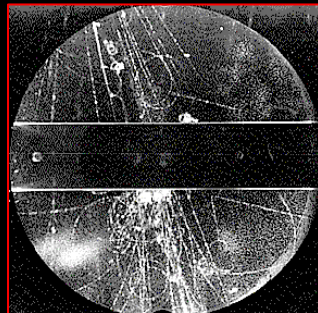
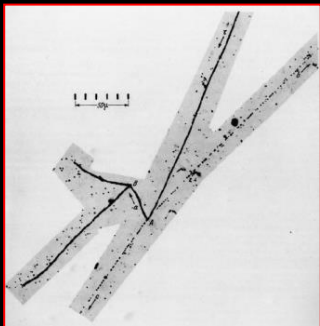
# ...E QUELLA DELLE PARTICELLE ELEMENTARI



**Positrone**



**Pioni carichi**



**Mesoni (K) e iperoni ( $\Lambda, \Sigma, \Xi$ ) pesanti**

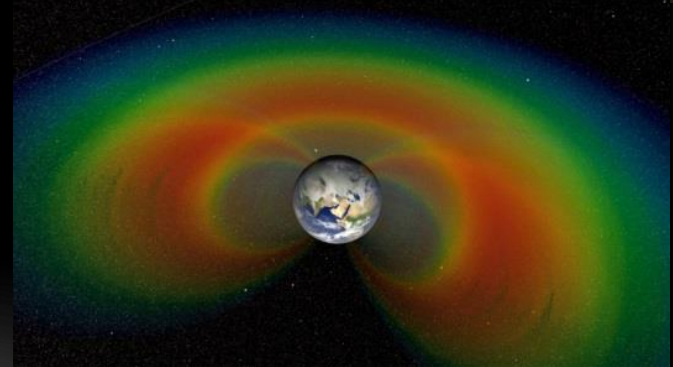
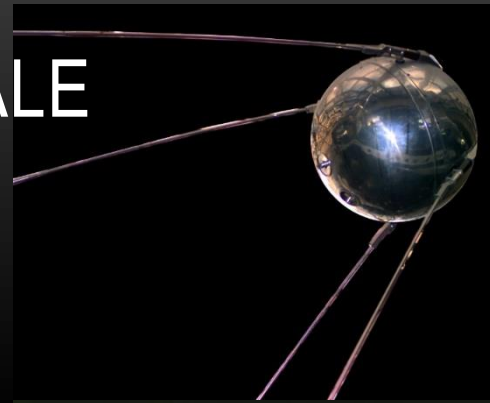
Studiando i raggi cosmici vengono scoperte nuove particelle:

- 1934 positrone
- 1937 muone (o leptone  $\mu$ )
- 1947 pioni (o mesone  $\pi$ )
- 1947 il kaone (o mesone K), la prima particella strana
- 1951 il primo barione strano  $\Lambda$
- ...

Si sviluppano nuovi rivelatori di particelle (contatori Geiger, camera a bolla e a nebbia, emulsion nucleari, circuiti per coincidenze...)

# L'ERA SPAZIALE

- Nel 1957 viene messo in orbita il primo satellite artificiale, lo Sputnik 1
- Nel 1958 il satellite americano Explorer 1 effettua le prime misure di radioattività nello spazio.
- Vengono scoperte le fasce di Van Allen
- ...

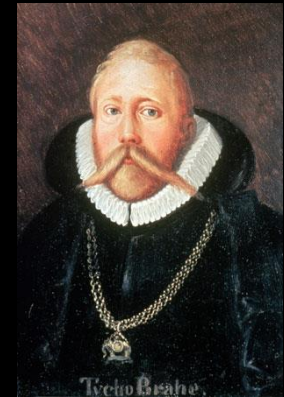
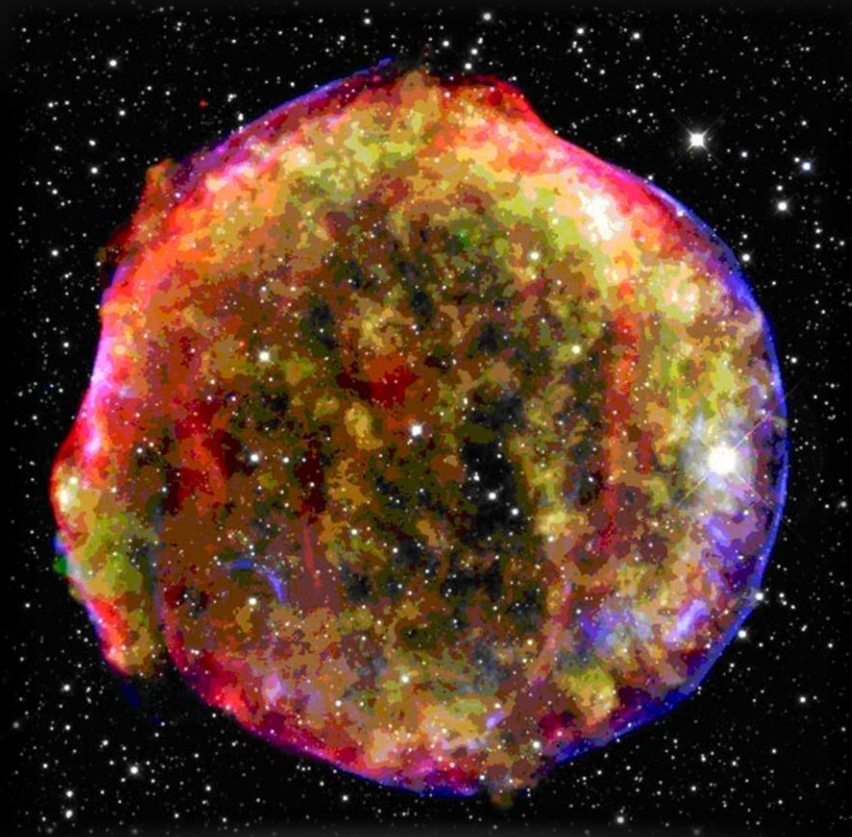




COSA SAPPIAMO OGGI?



La maggioranza dei raggi cosmici ha origine nelle regioni dove nel passato sono avvenute esplosioni di **supernovae**



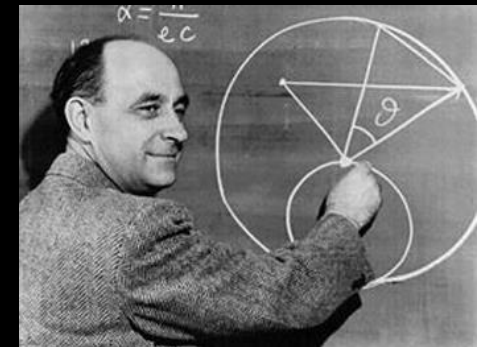
Resto della  
supernova  
Tycho SN 1572  
(spettro X)

L'onda d'urto generata dall'esplosione si espande nel mezzo interstellare per migliaia di anni **accelerando** le particelle fino a velocità prossime a quella della luce

**RAGGI  
COSMICI**

Onda d'urto in  
espansione

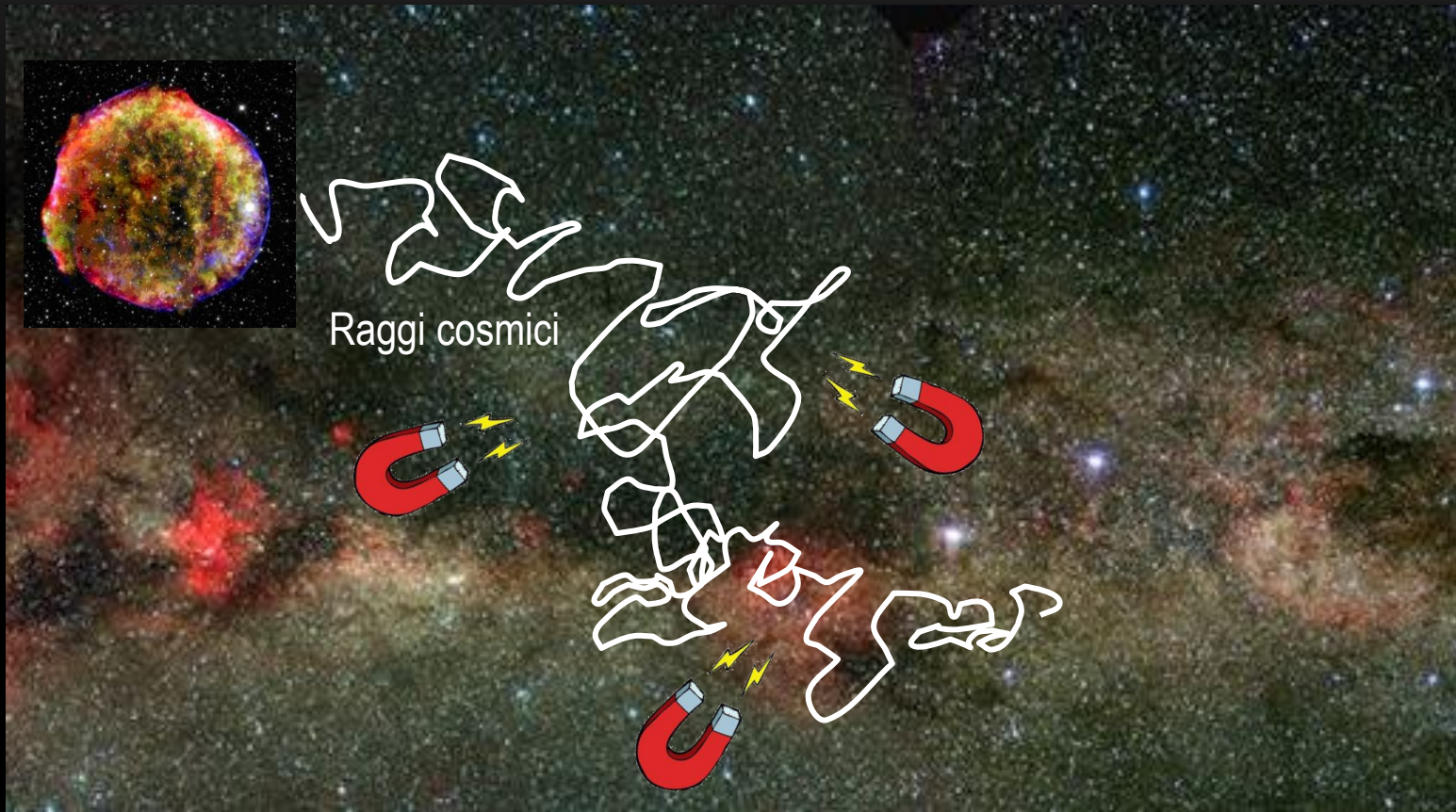
Nuclei atomici  
del mezzo  
interstellare



*Accelerazione di Fermi*

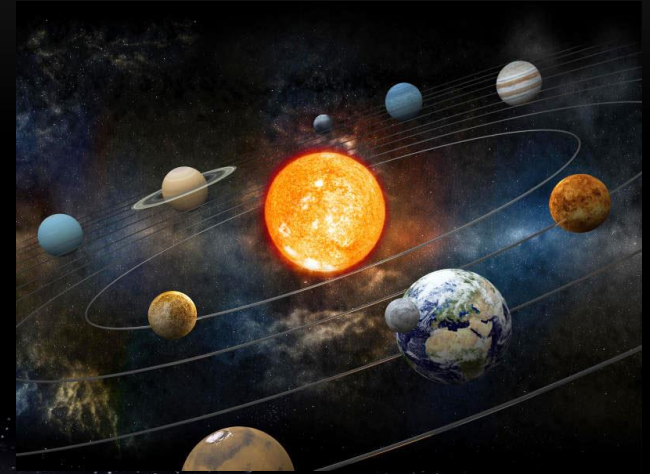
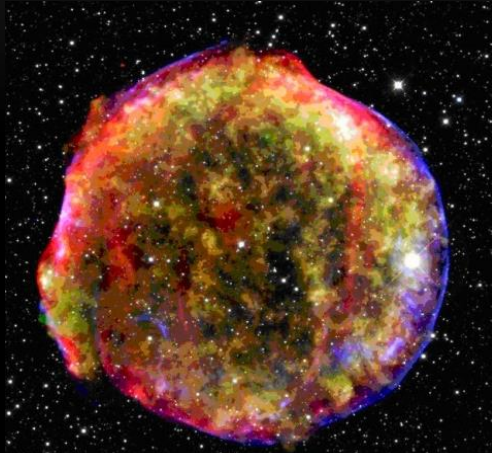


I raggi cosmici sono particelle massive, elettricamente cariche



La traiettoria e` deviata dai campi magnetici

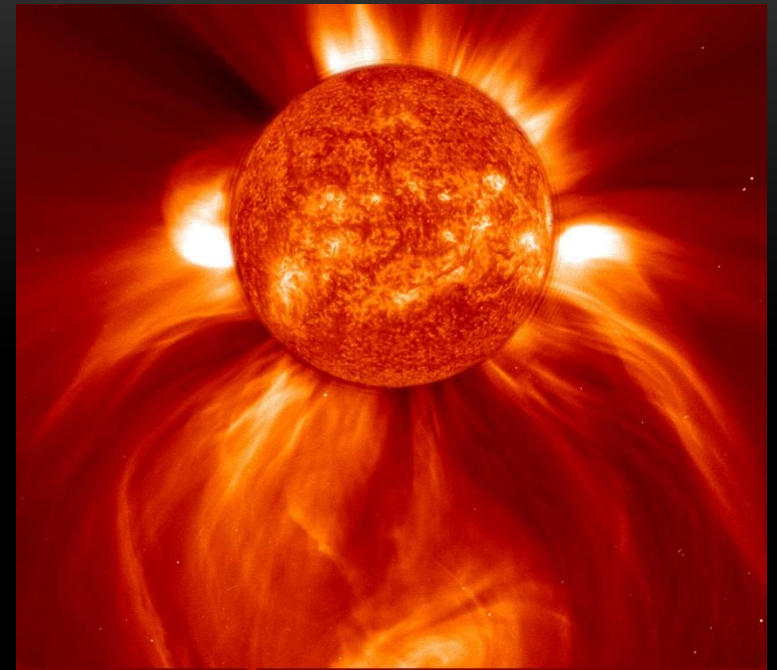
Le supernovae sono localizzate anche all'interno della nostra Galassia  
Una volta emessi dalle sorgenti, rimangono confinati per circa 10 milioni di anni,  
tempo durante il quale possono raggiungere il Sistema Solare



Anche il Sole è una sorgente di raggi cosmici.

Le particelle vengono accelerate durante le eruzioni solari e raggiungono la Terra in poche ore

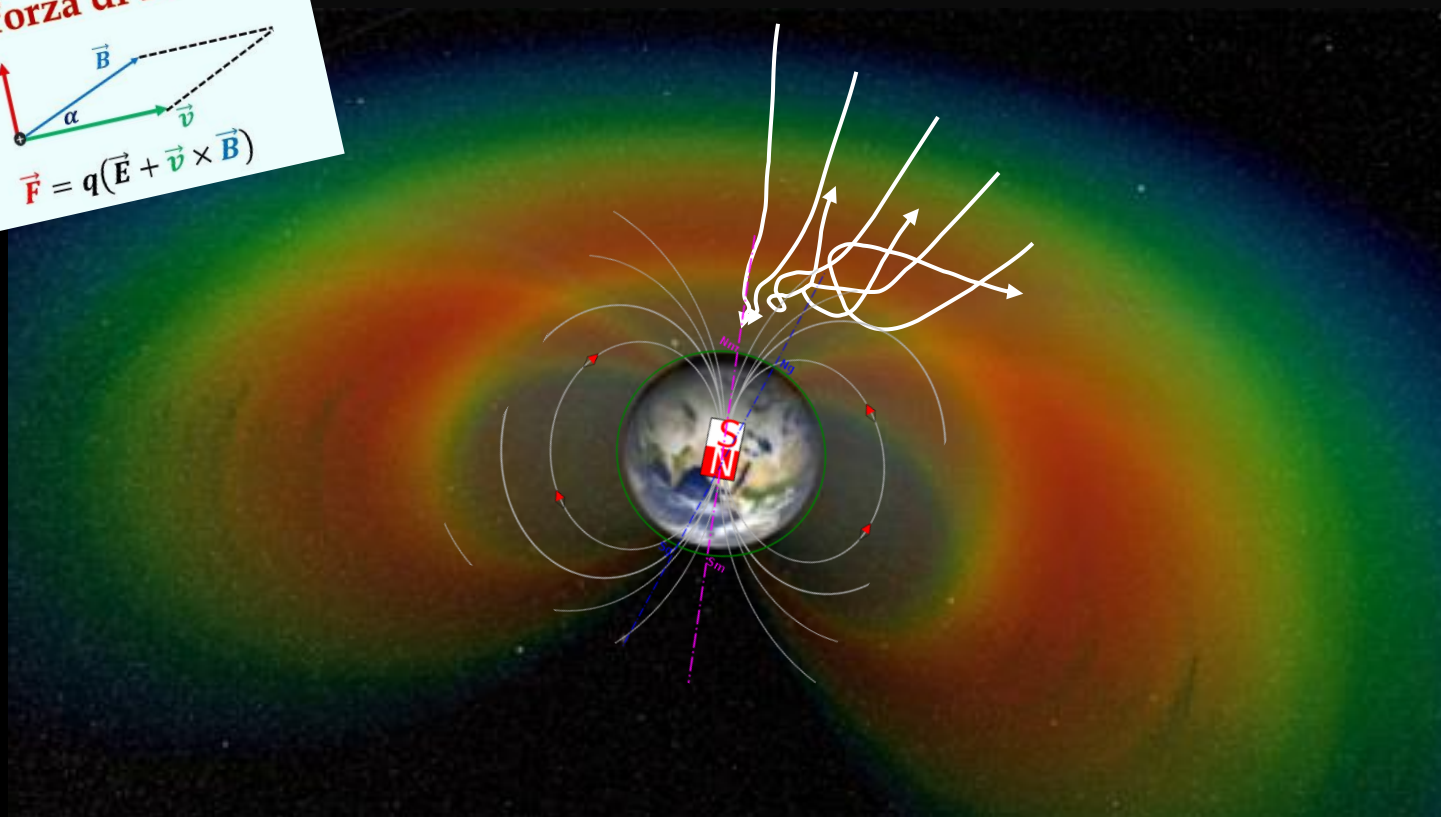
Nell'arco di poche ore il flusso di particelle aumenta fino a 10000 volte!



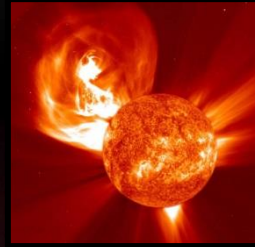
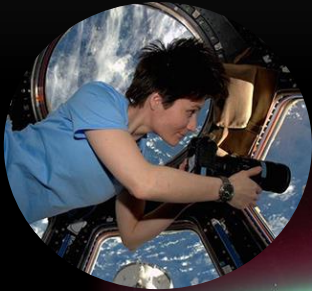
Sole ~ 100 × Terra !!



. Il campo magnetico terrestre ci protegge dalla radiazione cosmica...



Durante le **eruzioni solari**, il flusso di particelle accelerate dal Sole è così intenso che la luce emessa dagli atomi eccitati dell'atmosfera è visibile ad occhio nudo (**aurore polari**)



Aurora australe vista dalla Stazione Spaziale Internazionale



Aurora boreale vista dall'Alaska



PERCHÉ SI STUDIANO I RAGGI COSMICI?

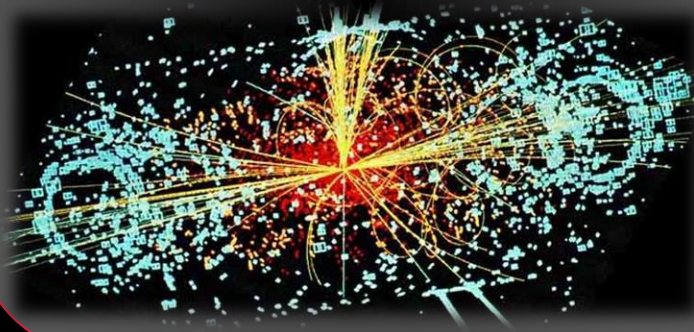


# SI STUDIANO ...PER LA LORO ENERGIA

Sono stati osservati sulla Terra raggi cosmici di energia fino a oltre

$10^{20}$  eV = 100 EeV = 100.000.000.000.000.000.000 eV !!

Migliaia di volte più grande della massima energia ottenuta dall'uomo per una singola particella, che è quella di LHC (Large Hadron Collider)



E' l'energia (macroscopica!) di una palla da tennis che viaggia a 90 km/h.

Energia di  $10^{24}$  atomi (più del numero di granelli di sabbia di tutte le spiagge del mondo!!!) concentrata in un'unica particella

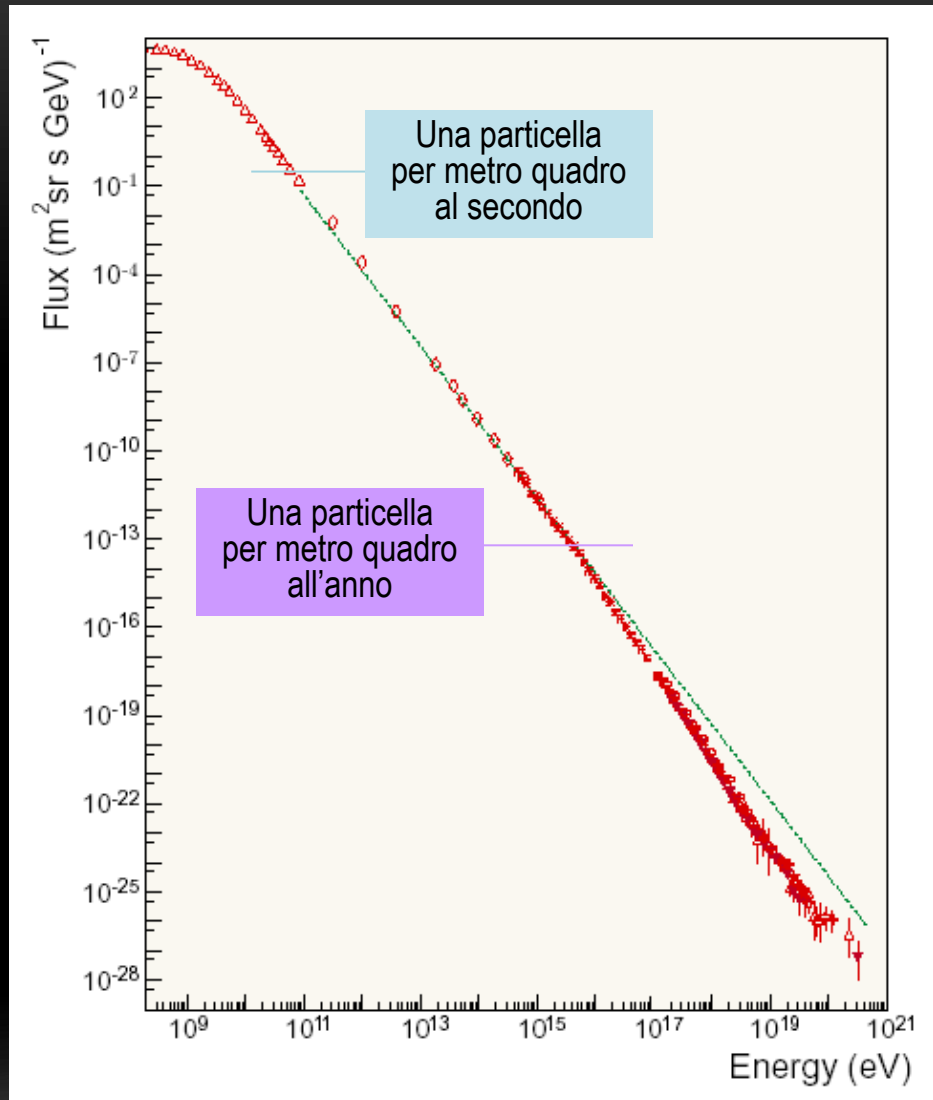


1 eV (elettronvolt)  $\sim 1.6 \cdot 10^{-19}$  J (joules)

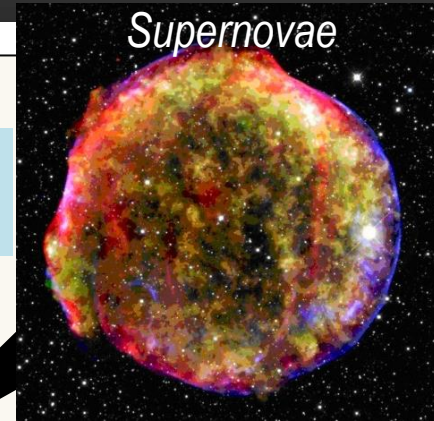
energia di un elettrone accelerato da una differenza di potenziale di 1 V

# Spettro dei raggi cosmici

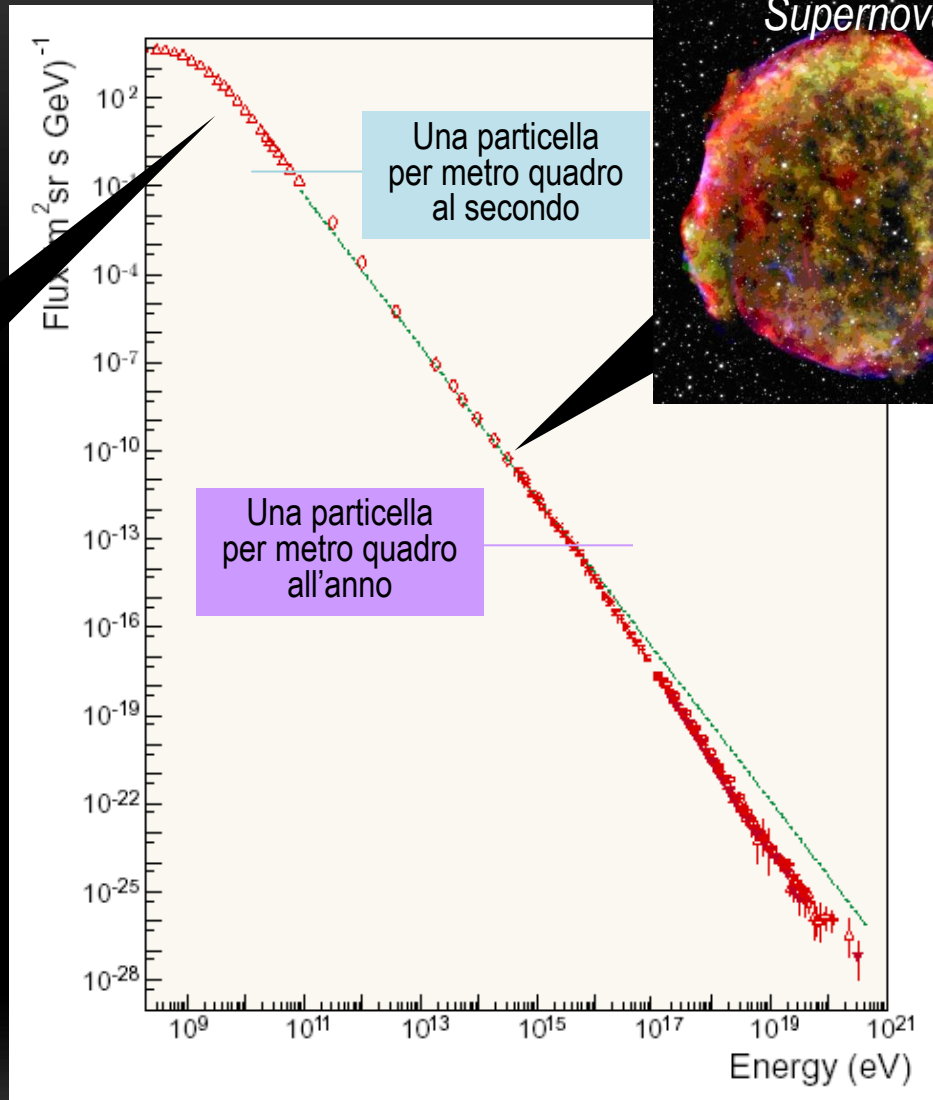
- Esprime l'intensità dei raggi cosmici in funzione della loro energia
- Si estende su 13 decenni di energia!!
- L'intensità diminuisce rapidamente al crescere dell'energia, rendendo impossibile la rivelazione diretta alle energie più alte



# Spettro dei raggi cosmici



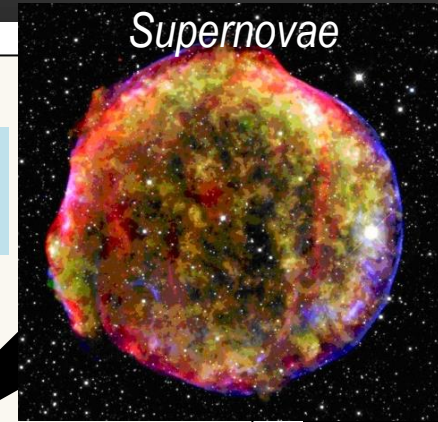
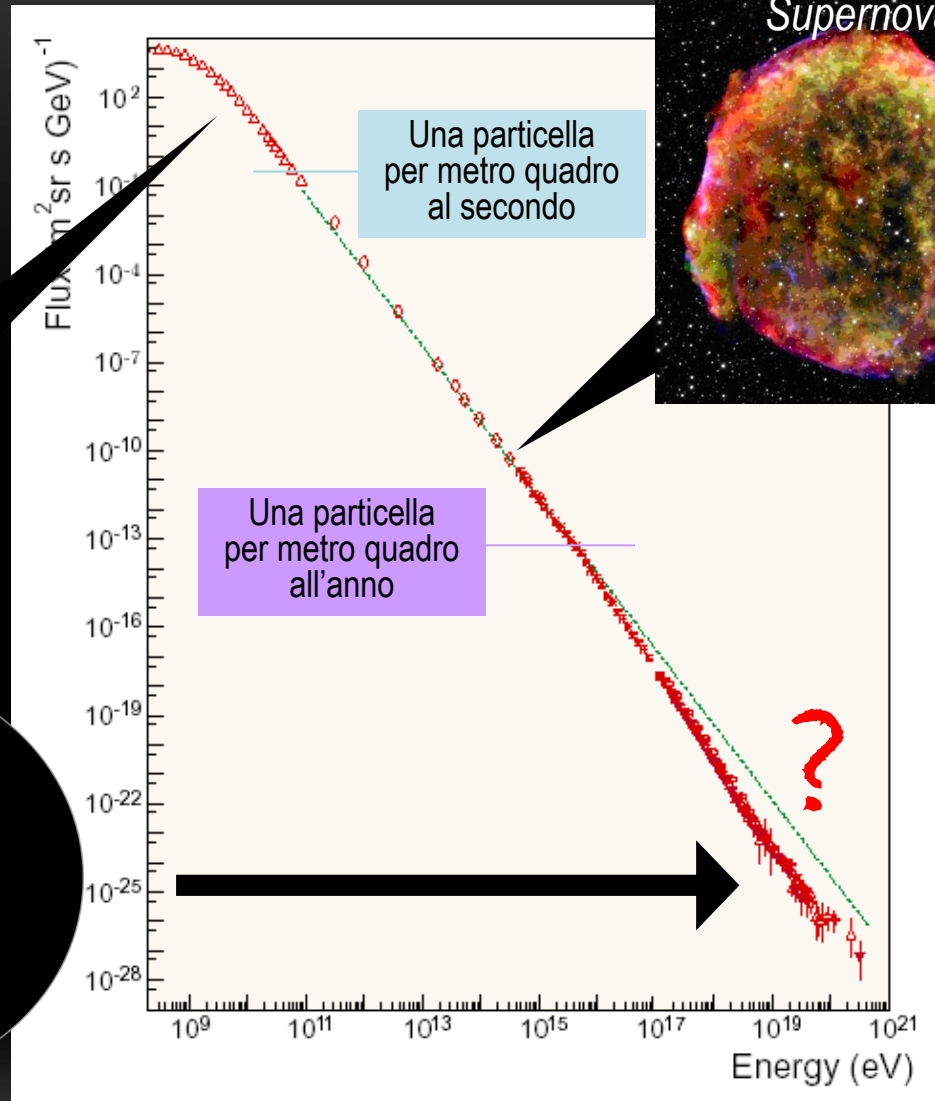
- L'intensità diminuisce rapidamente al crescere dell'energia, rendendo impossibile la rivelazione diretta alle energie più alte



# Spettro dei raggi cosmici



Una particella  
per kilometro  
quadro per  
secolo!!



L'origine dei raggi cosmici di energia estrema è ancora un **mistero...**

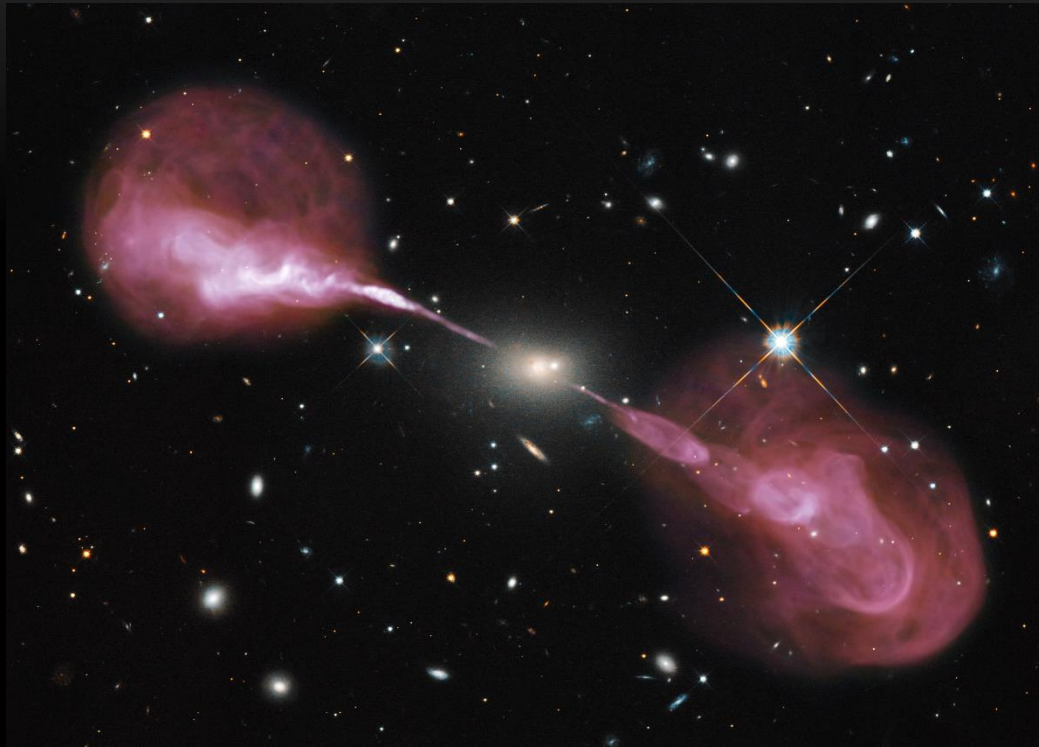


Immagine composta della  
galassia con nucleo attivo  
Hercules A  
(radio e visibile)

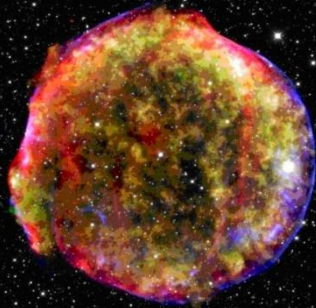
Si pensa provengano da galassie lontane dal cui centro **buchi neri**  
di grande massa emettono potenti **getti di plasma** in grado di  
accelerare particelle

PERCHÉ SI STUDIANO I RAGGI COSMICI?

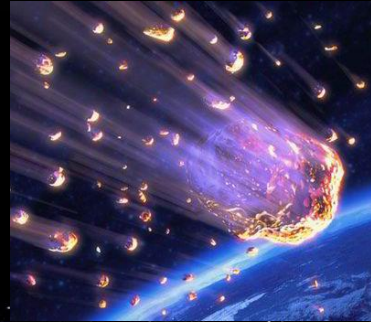


# SI STUDIANO ...PER LA LORO COMPOSIZIONE

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



RAGGI COSMICI  
Distanza 3 miliardi di UA  
Ø Galassia



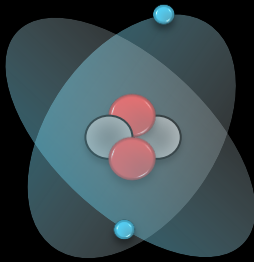
METEORITI  
Distanza 200 UA  
Ø Sistema Solare



1 UA (Unità Astronomica) = distanza Terra Sole




Nei raggi cosmici sono presenti tutti gli elementi che compongono la **materia ordinaria** (atomi)



Si presentano sotto forma di **nuclei completamente ionizzati** (privati di tutti gli elettroni)

860 ×  H

110 ×  He

10 ×  C, O, ...

20 ×  e<sup>-</sup>

---

**1000 ×** **particelle**

+ **componenti rare**  ...



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



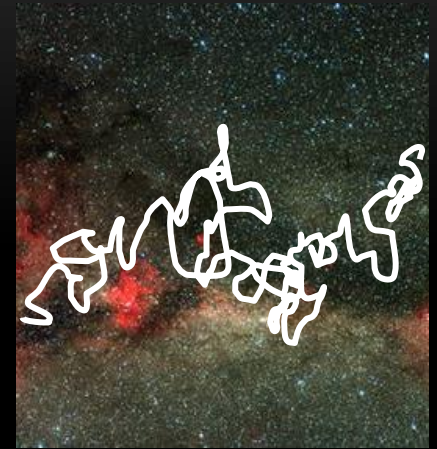
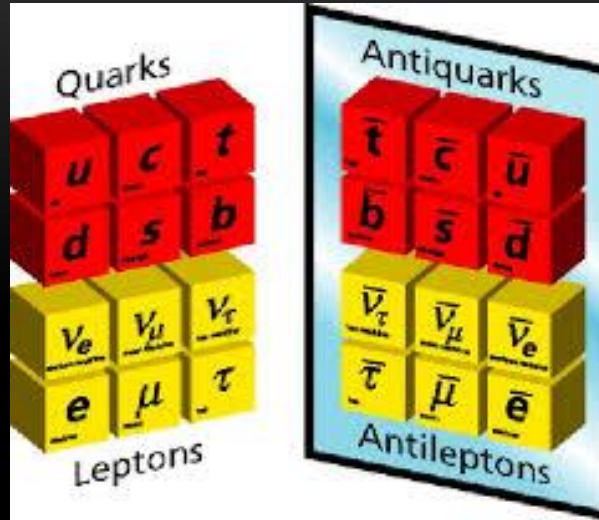
...ogni 1000  
particelle:  
**2 antiparticelle**

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



POSITRON EMISSION TOMOGRAPHY (PET) SCAN

Decadimenti radioattivi



Collisioni dei raggi cosmici con i nuclei del mezzo interstellare.



Acceleratori di particelle

Particle	Charge	Antiparticle
Electron	-	Positron (antielectron)
Proton	+	Antiproton
Neutrino	Spin	Antineutrino

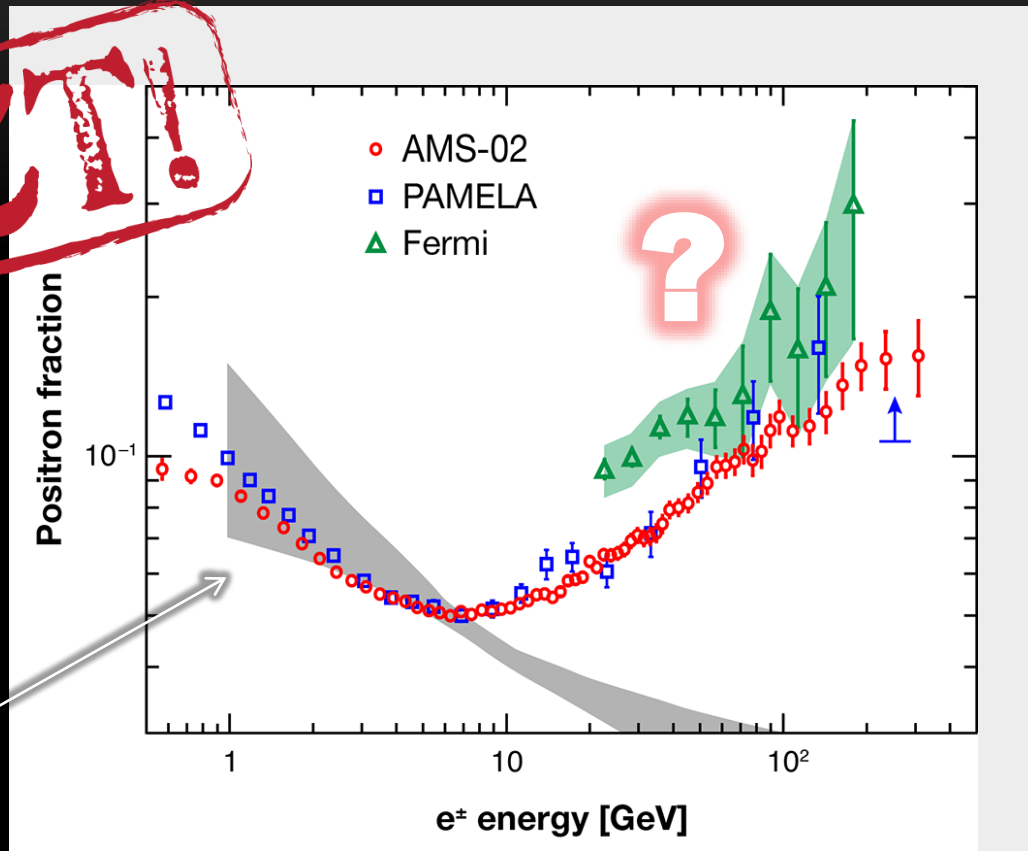
Esiste un'antiparticella per ognuna delle particelle conosciute.

Sono create dalle collisioni di alta energia o dai decadimenti radioattivi

Nei raggi cosmici e' stato osservato un **eccesso** di antiparticelle



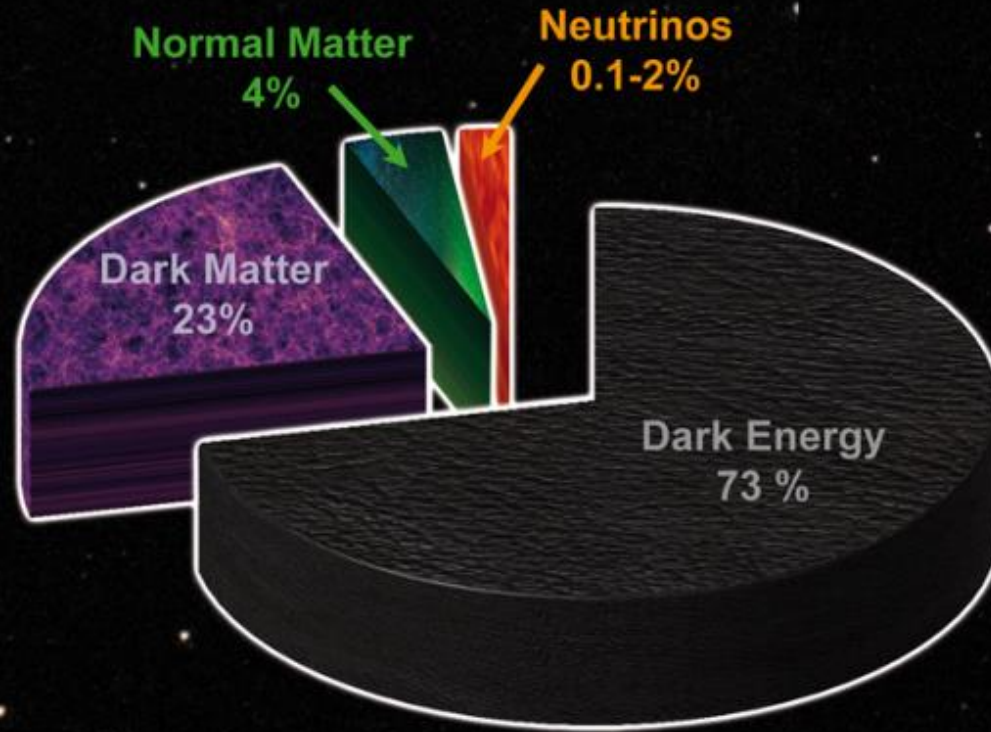
**FACT!**



Positroni prodotti dalle interazioni dei raggi cosmici con il mezzo interstellare

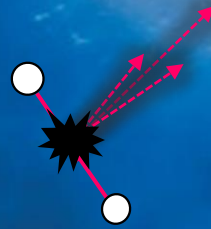
Frazione di positroni sul totale di elettroni e positroni

# La materia ordinaria rappresenta solo qualche % del contenuto dell'Universo



La materia oscura confinata nell'alone galattico potrebbe generare particelle di materia/antimateria, che si sommano ai raggi cosmici di origine galattica

Via Lattea



Alone di materia  
oscura

# COME SI STUDIANO I RAGGI COSMICI?





I raggi cosmici possono essere «catturati» nello spazio a bordo di palloni stratosferici, stazioni spaziali, satelliti e sonde

→ Rivelazione diretta



Telescopio spaziale Fermi



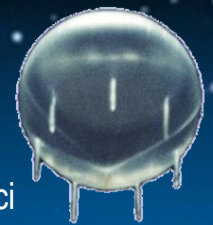
Satellite Resurs-DK1



Telescopio spaziale Wukong (DAMPE)



Futura stazione Spaziale Cinese



Palloni stratisferici



Stazione Spaziale Internazionale



INFN  
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

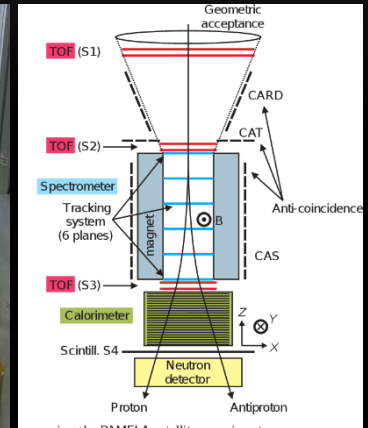
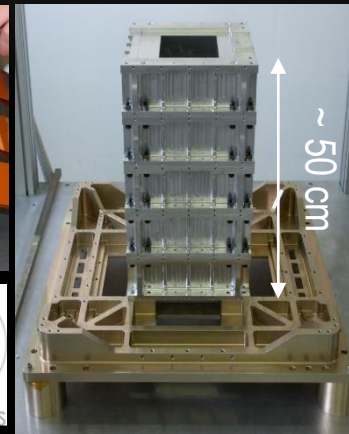
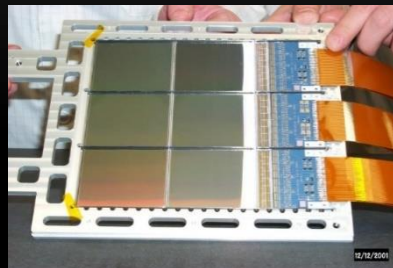


Istituto Nazionale di Fisica Nucleare  
SEZIONE DI FIRENZE



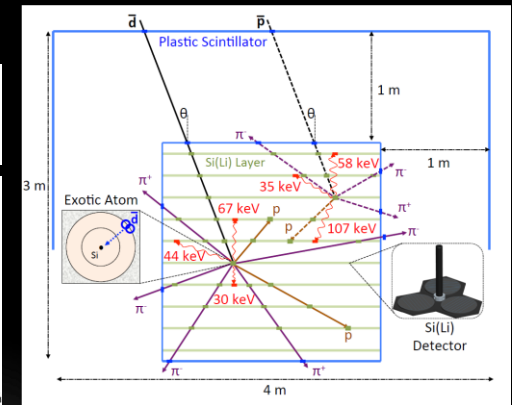
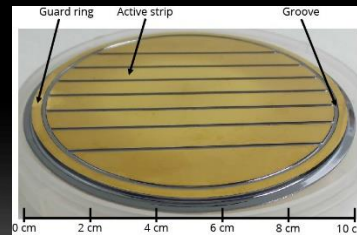
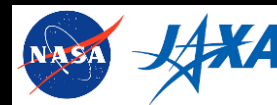
➤ Misure di antimateria con l'esperimento PAMELA

- 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!!



➤ Ricerca di antinuclei con l'esperimento GAPS

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

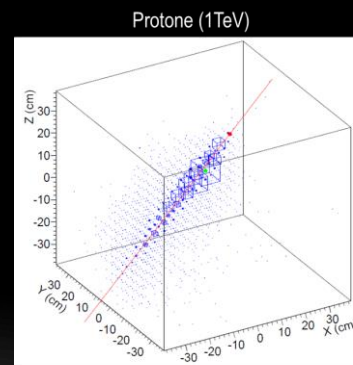
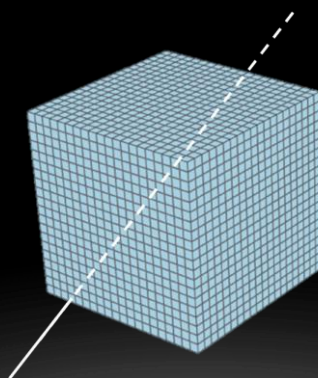
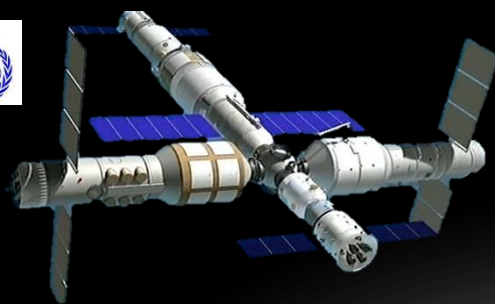
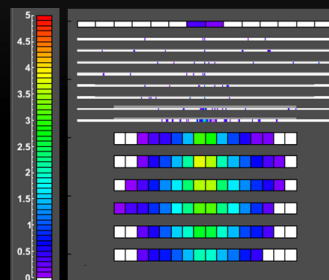




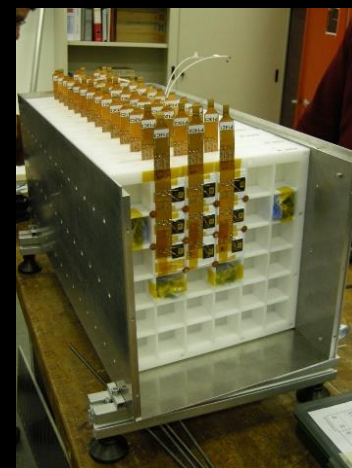
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare  
SEZIONE DI FIRENZE



- Studio del limite energetico della componente galattica mediante misure calorimetriche nello spazio
  - Misure di raggi cosmici di alta energia con l'esperimento CALET, a bordo della ISS
  - Sviluppo di un calorimetro innovativo per l'esperimento HERD, a bordo della futura stazione spaziale cinese

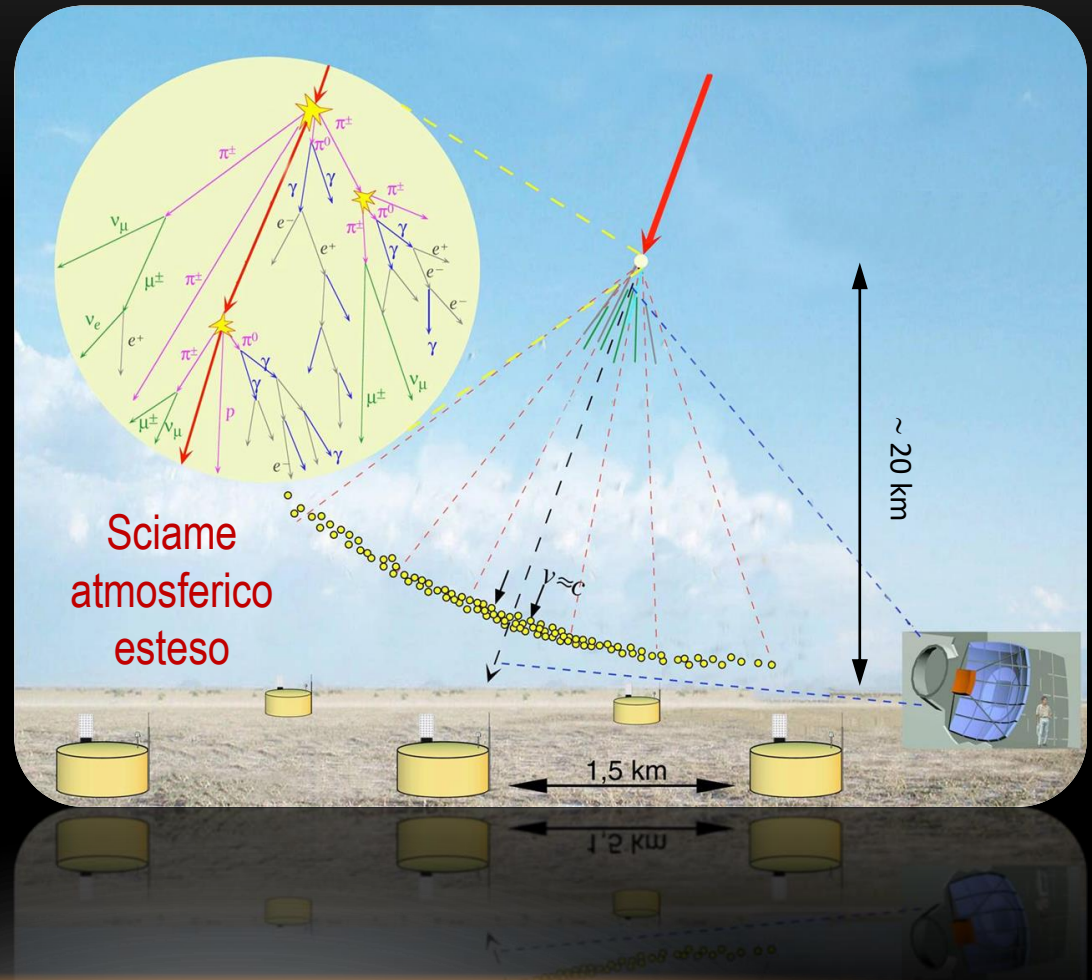


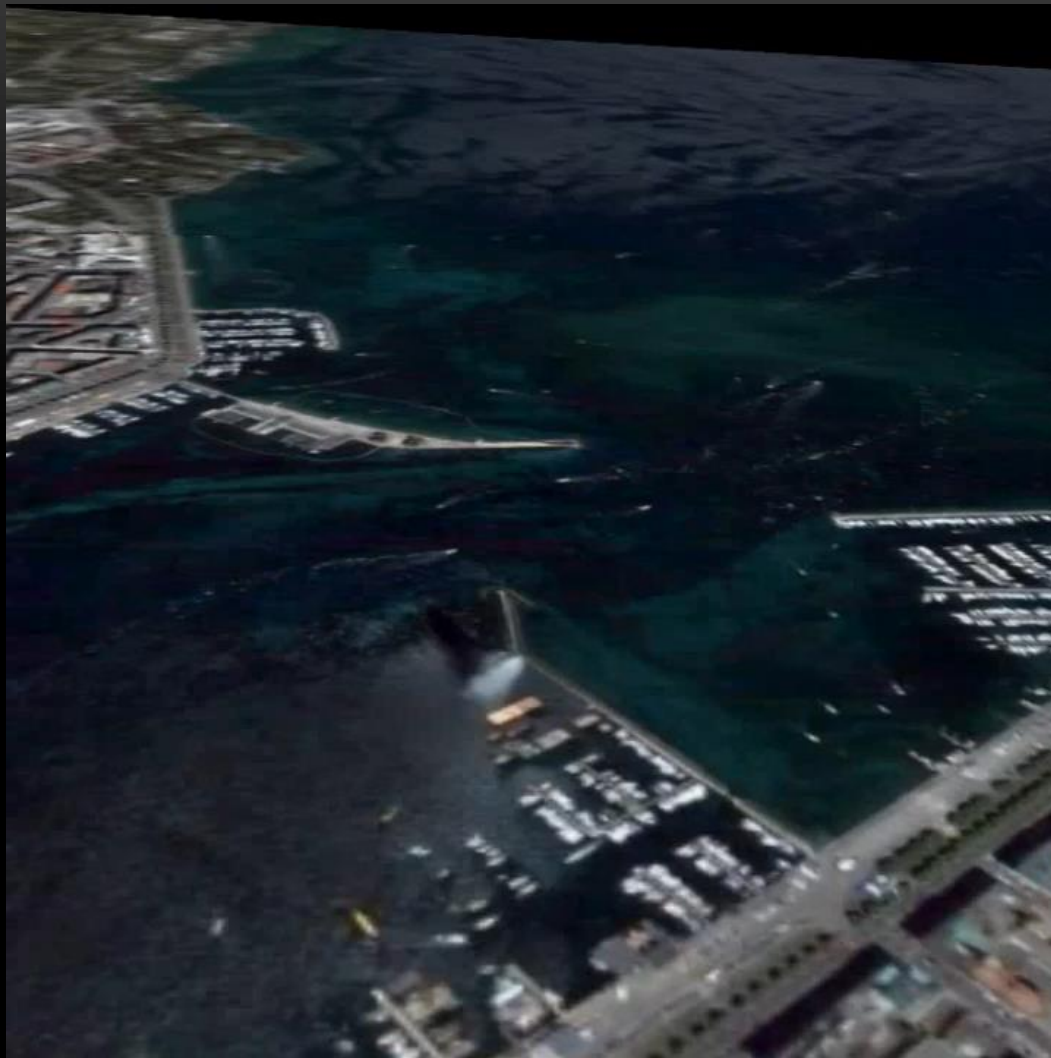
(simulazione)



I raggi cosmici si studiano anche a Terra.

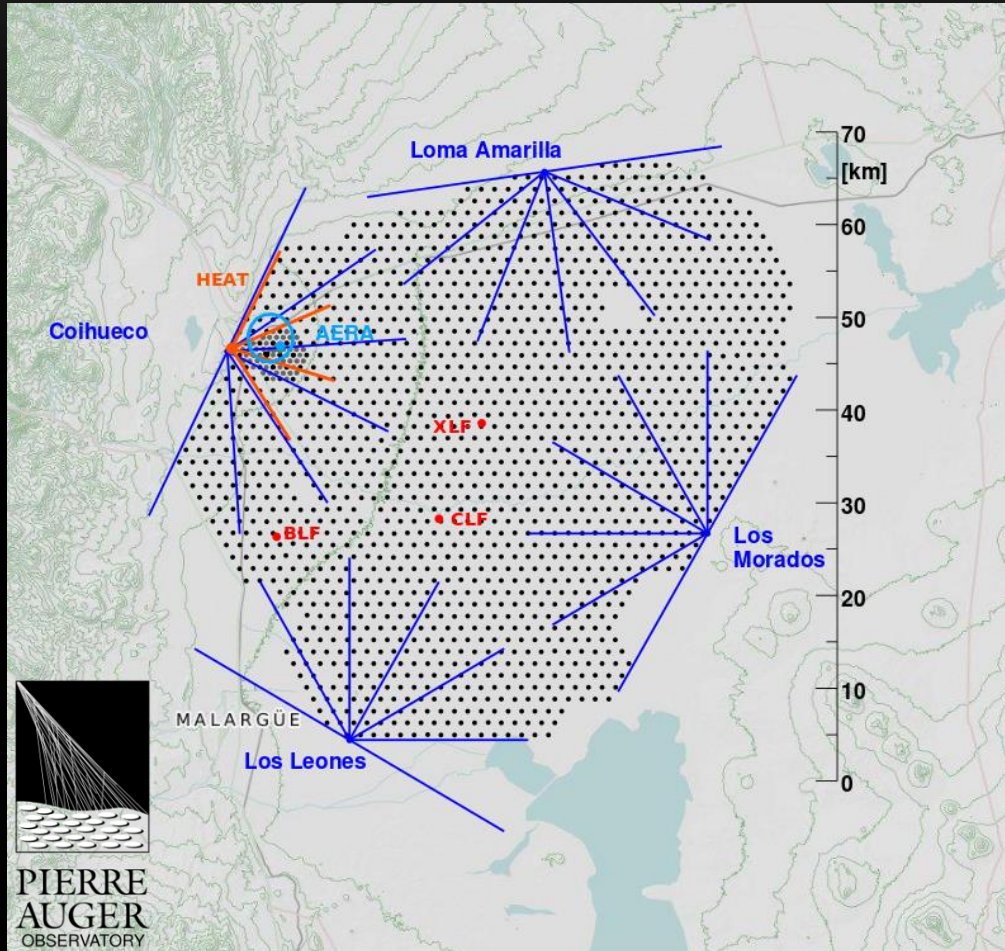
Ad alte energie i raggi cosmici producono un elevato numero di particelle secondarie (milioni!!) che possono essere rivelate in coincidenza al suolo.





Sciame generato da un protone di EeV sopra la città di Ginevra

# Il rivelatore piu` grande del mondo



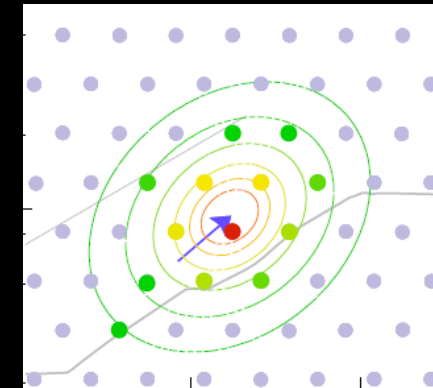
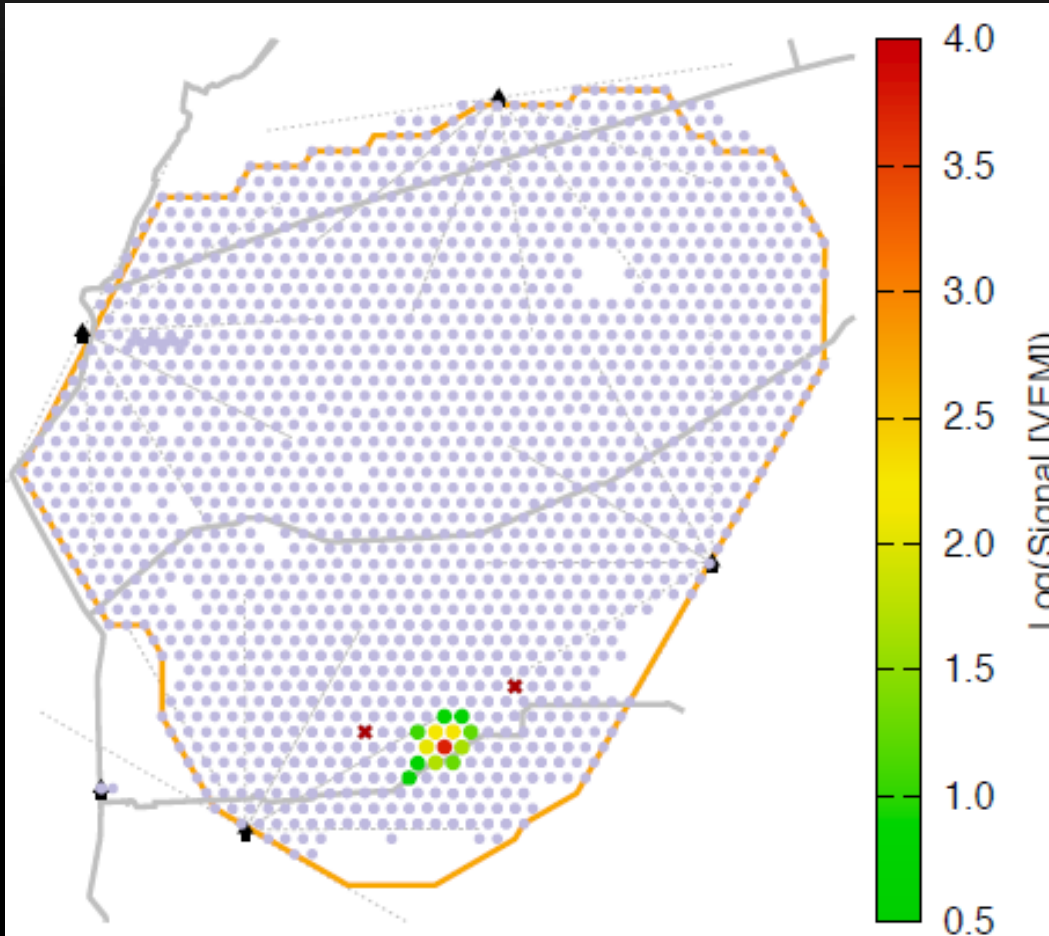
Osservatorio Pier Auger

Situato a Malargue  
(Mendoza, Argentina)

1600 rivelatori di superficie,  
distanti 1.5km, su una  
superficie di 3000km<sup>2</sup>



# Il rivelatore piu` grande del mondo



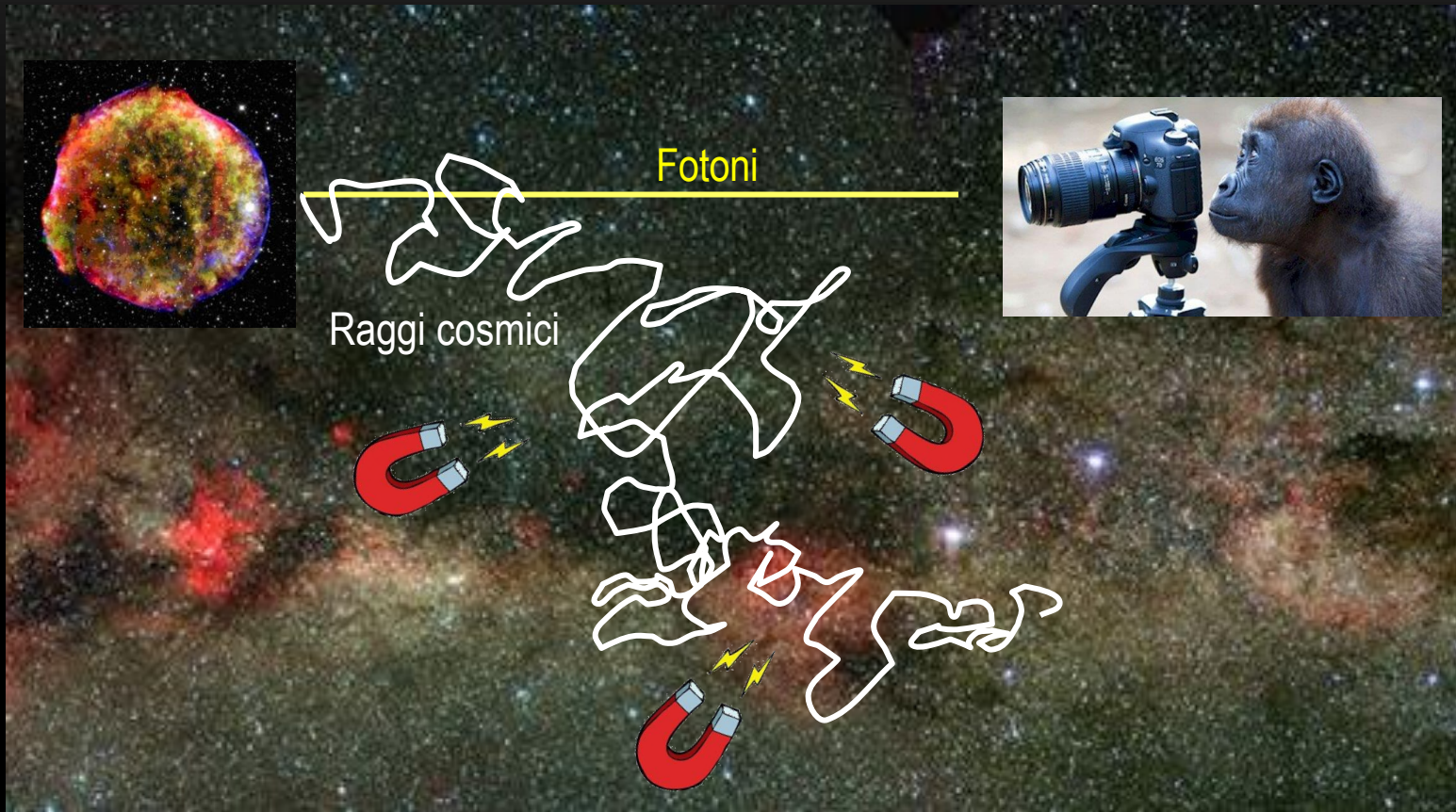
Sciame atmosferico  
generato da un protone  
di altissima energia

A vast field of stars in space, with the word "GRAZIE!" written in white, handwritten-style capital letters in the center. The stars vary in color, including yellow, orange, and blue, and some have prominent diffraction spikes. The background is a deep black, making the individual points of light stand out sharply.

GRAZIE!



I raggi cosmici sono particelle massive, elettricamente cariche



La traiettoria e` deviata dai campi magnetici

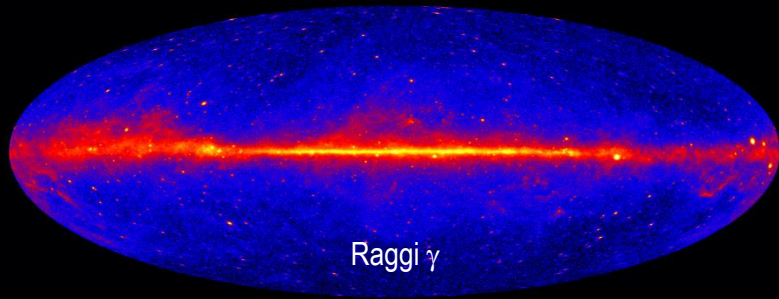
Radiazione elettromagnetica  
(fotoni)



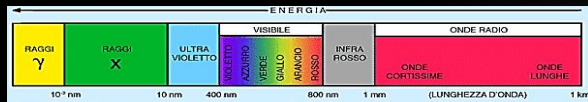
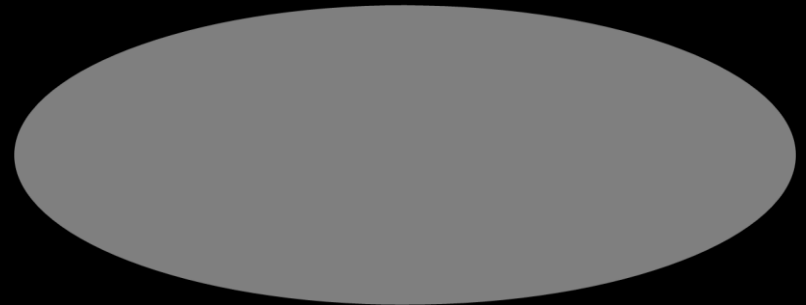
Raggi cosmici



# Radiazione elettromagnetica (fotoni)

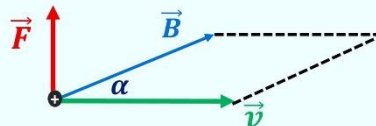


# Raggi cosmici

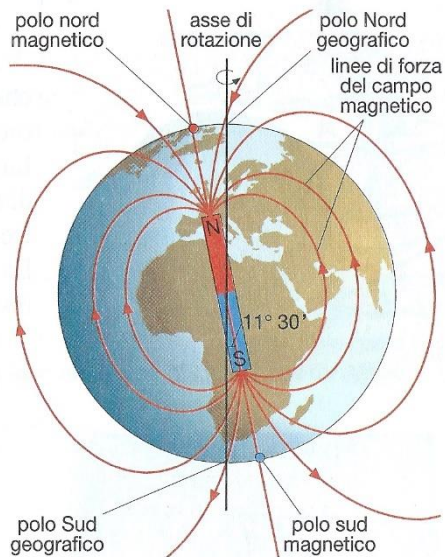
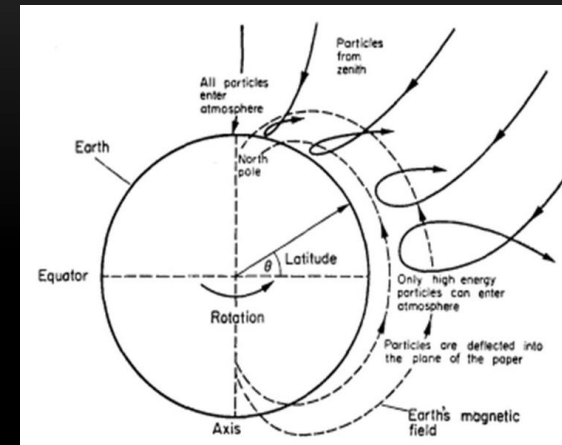


# Effetto del campo magnetico terrestre sui raggi cosmici

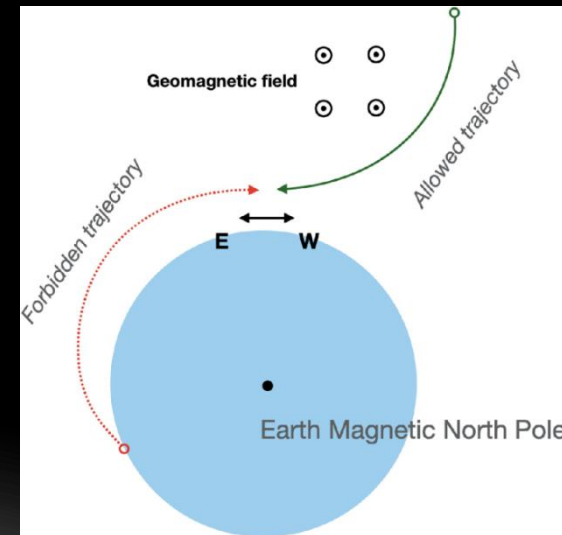
## La forza di Lorentz


$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

“Taglio”  
geomagnetico



Effetto  
EST-OVEST



# Fonti naturali di antimateria vicine a noi

~1 mg di antiprotoni stabilmente intrappolati nelle fasce di Van Allen.  
Quantita` 1000 volte piu` abbondante, rispetto ai protoni, nello spazio interstellare



1 **positrone** ogni 75 min, dal decadimento del potassio 40



Coppie elettrone + **positrone** generate dai lampi di raggi gamma emessi durante i temporali