

Discover Cosmic Rays



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI DI BARI  
ALDO MORO



Politecnico di Bari

# INTERNATIONAL COSMIC DAY

# I RAGGI COSMICI

**Davide Cerasole**

Dipartimento di Fisica 'Michelangelo Merlin' dell'Università e del Politecnico di Bari  
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Bari



26 Novembre | 2024

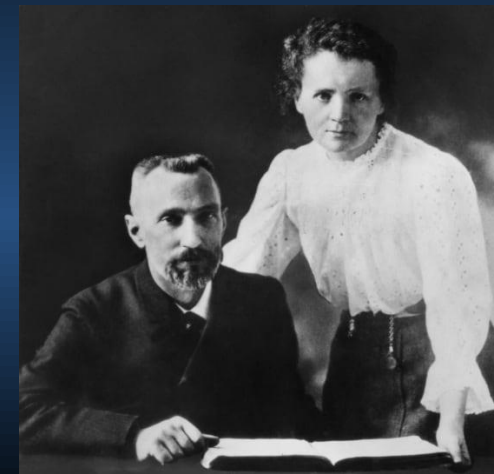
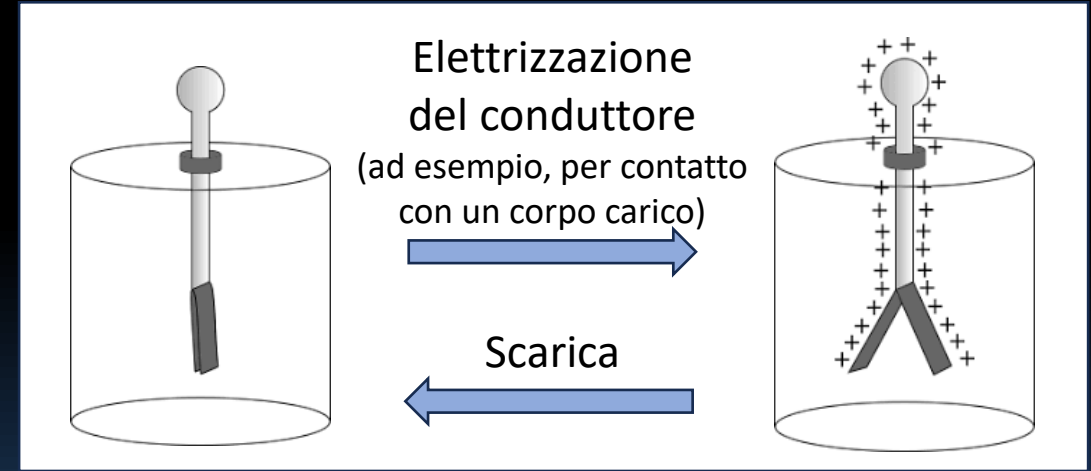
# I raggi cosmici - Sommario

- Introduzione: i primi indizi, la scoperta e l'origine dei raggi cosmici
- I raggi cosmici primari
  - Flusso, composizione e le misure dirette da satelliti e palloni aerostatici
- I raggi cosmici secondari
  - le cascate atmosferiche, le misure indirette ed il flusso al suolo

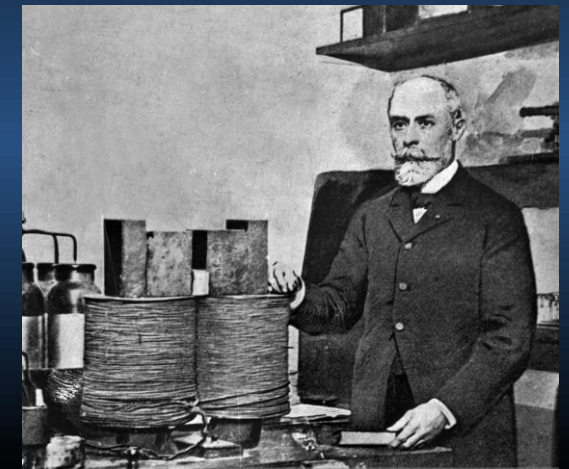
# Storia: i primi indizi

- Le prime misure che hanno portato alla scoperta dei raggi cosmici sono state effettuate con gli elettroscopi
- 1785: Charles Coulomb nota che un elettroscopio carico, anche se isolato, lentamente si scarica
- 1886-89: Bequerel, Marie e Pierre Curie scoprirono la radioattività naturale

Elettroscopio a foglie



Pierre e Marie Curie



Bequerel

# Storia: i primi indizi

- 1901-1903: si osserva che gli elettroscopi si scaricano
  1. più velocemente se posti vicino a sorgenti radioattive
    - La causa della perdita graduale di carica è una *radiazione* che **viene dall'esterno!**
  2. anche se schermati
    - Questa *radiazione* è in grado di oltrepassare gli schermi, dunque è **molto penetrante!**
  
- Più intensa è questa radiazione, più rapida è la scarica dell'elettroscopio
- Si può sfruttare questo effetto per cercare l'origine di questa radiazione!

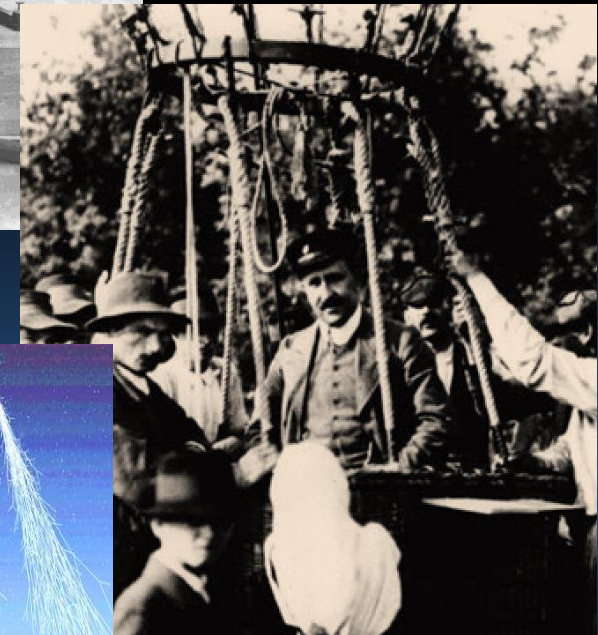


# Storia: la scoperta dei raggi cosmici

- 1911: Domenico Pacini effettua misure nel lago di Bracciano e nel mare di Livorno e osserva che essa **diminuisce all'aumentare della profondità**.
- 1912: Victor Hess effettua misure su un pallone aerostatico e osserva che essa **aumenta con l'aumentare della quota**.
- La radiazione sconosciuta è quindi formata da «raggi» provenienti dallo spazio: **i raggi cosmici**.



Domenico Pacini



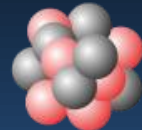


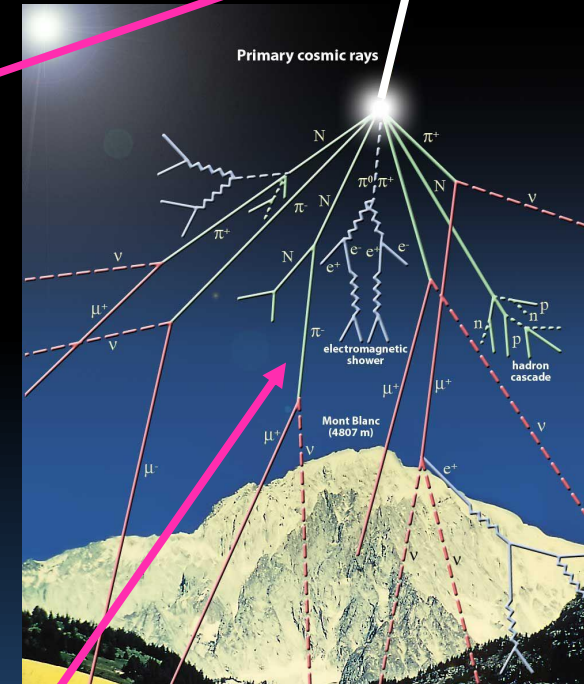
Victor Hess



Cascata atmosferica

# Cosa sono i raggi cosmici

- I **raggi cosmici primari** sono particelle subatomiche prodotte da sorgenti astrofisiche. Essi possono raggiungere la Terra ed interagire con gli strati più esterni dell'atmosfera
  - Per il 99%, essi sono nuclei atomici di cui:
    - 90% protoni 
    - 9% nuclei di elio 
    - 1% nuclei di altri elementi 
  - per l'1%, elettroni e positroni
  - rare antiparticelle (antiprotoni, anti-deuterio, anti-elio).
- I **raggi cosmici secondari** sono le particelle prodotte negli urti ad altissima energia tra i raggi cosmici primari e i nuclei atomici dell'atmosfera terrestre:
  - sono una «cascata» di decine di tipi diversi di particelle e antiparticelle.





# Come 'vedere' i raggi cosmici?

- I raggi cosmici sono schermati fortemente dal campo magnetico terrestre all'equatore. Ai poli, l'effetto schermante è minore.
- L'aurora è creata dall'interazione dei raggi cosmici con atomi e molecole neutre dell'alta atmosfera terrestre
- I raggi cosmici possono eccitare gli elettroni di valenza dell'atomo neutro
- Dopo un certo tempo caratteristico, tali elettroni ritornano al loro stato iniziale, emettendo fotoni
  - $O \rightarrow$  rosso,  $O_2 \rightarrow$  verde,  $N_2 \rightarrow$  blu, ...



# Come misurare i raggi cosmici

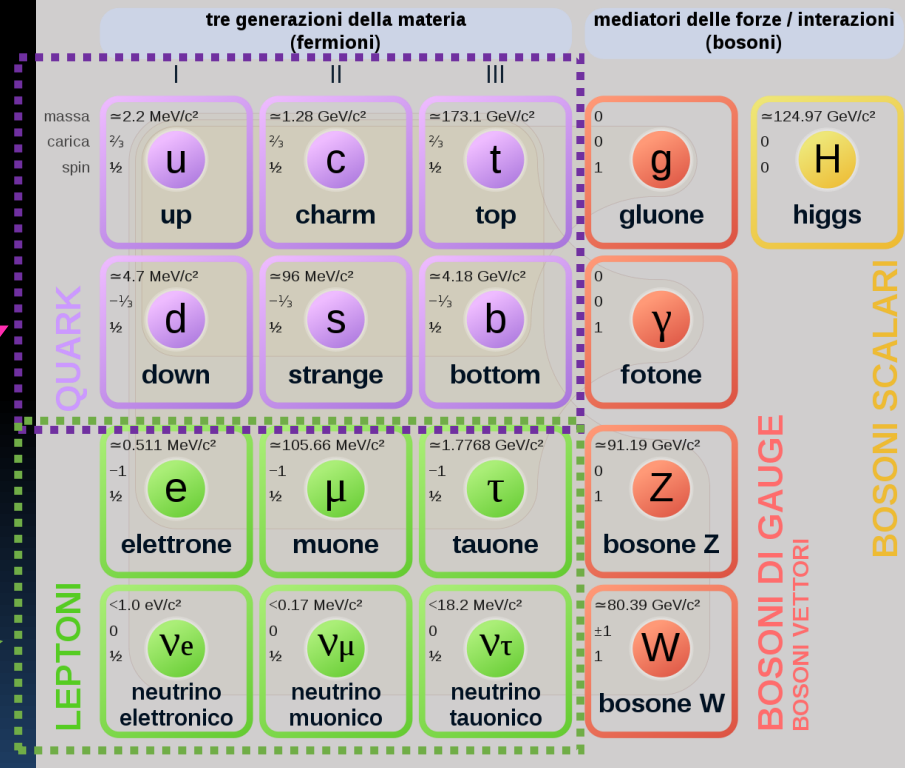
- **Misure dirette**: si osservano direttamente i raggi cosmici primari.
  - Rivelatori nell'alta atmosfera su palloni aerostatici.
  - Rivelatori nello spazio su satelliti.
  - Sono strumenti relativamente piccoli: circa  $1 \text{ m}^2$ .
- **Misure indirette**: si osservano i prodotti delle interazioni dei raggi cosmici.
  - Rivelatori sulla superficie terrestre (di solito su montagne o altipiani).
  - Rivelatori sottoterra.
  - Rivelatori sott'acqua.
  - Sono strumenti di grande superficie, fino a  $3000 \text{ km}^2$ !



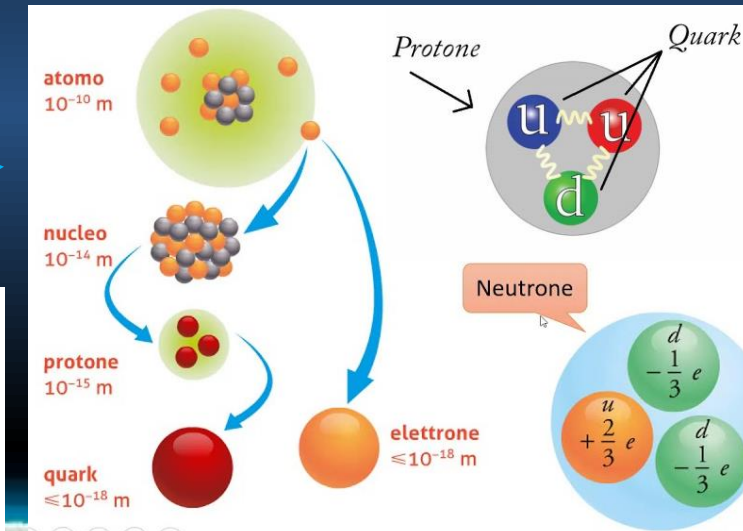
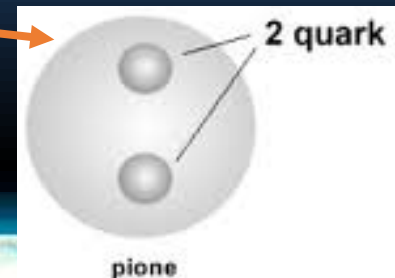
# Modello standard (cenni)

- Lo studio dei raggi cosmici è stato fondamentale per lo sviluppo della fisica delle particelle
  - Scoperte di positroni, muoni (slide 10!) e pioni
- Con l'avvento delle tecnologie degli acceleratori, si è giunti al modello standard delle particelle elementari

## Modello Standard delle Particelle Elementari

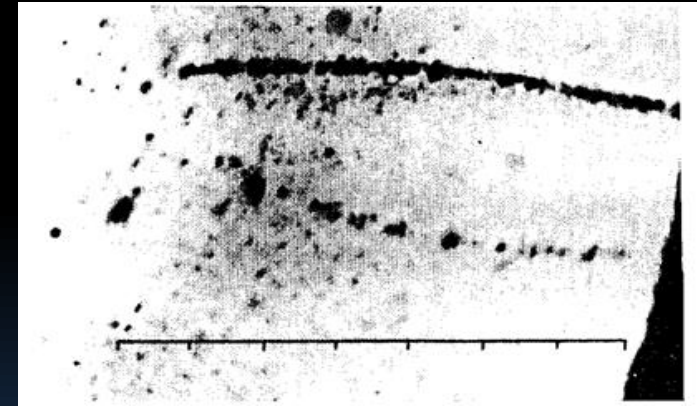
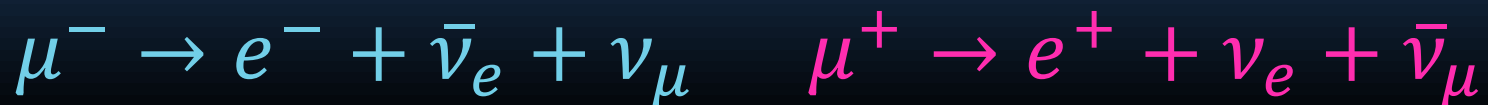


- Nel Modello Standard, le particelle elementari che compongono la materia sono suddivise in **quark** e **leptoni**.
- Per ognuno di questi, esiste la corrispettiva antiparticella: ad esempio, l'anti particella dell'elettrone è il positrone.
- Protoni e neutroni sono composti da 3 quark.
- Altre particelle, come il pione, sono composte da 2 quark.
- Oltre le particelle di materia, ci sono le particelle che mediano le interazioni fondamentali (i fotoni mediano quella elettromagnetica)



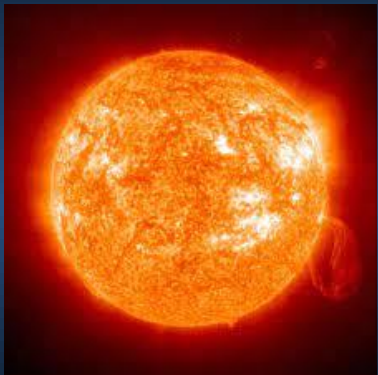
# La scoperta del muone

- 1937: Anderson nota nei raggi cosmici secondari delle particelle che, quando passano in un campo magnetico, deviano in modo inaspettato:
  - hanno la stessa carica degli elettroni
  - ma sono deflesse a un angolo minore degli elettroni
  - hanno massa intermedia tra elettrone e protone.
- Esse vengono chiamate **muoni**.
- Il muone **decade** in 2.2 microsecondi in un elettrone (o un positrone), un **neutrino** e un **antineutrino**:

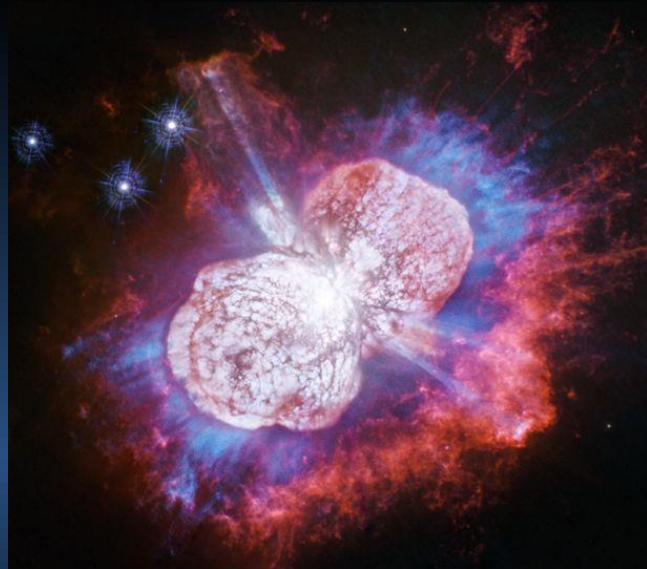


Domanda: anche se il muone viaggiasse alla velocità della luce, decadrebbe dopo  $3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 660 \text{ m}$ .  
Ma allora come fa a percorrere molti km di atmosfera e ad arrivare al suolo?

# Origine dei raggi cosmici



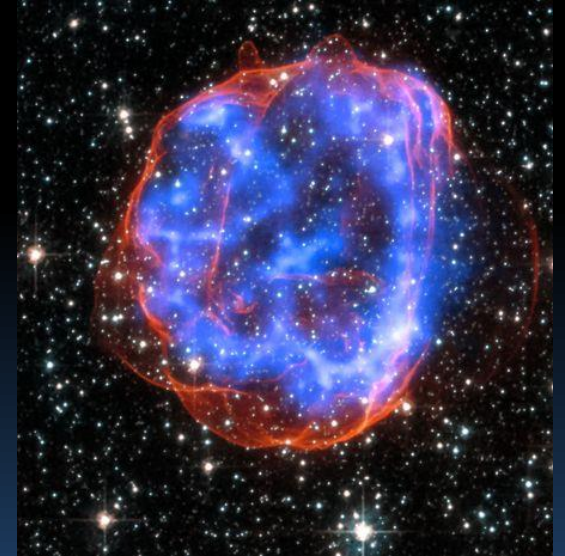
Il Sole



Esplosioni stellari



Supernove

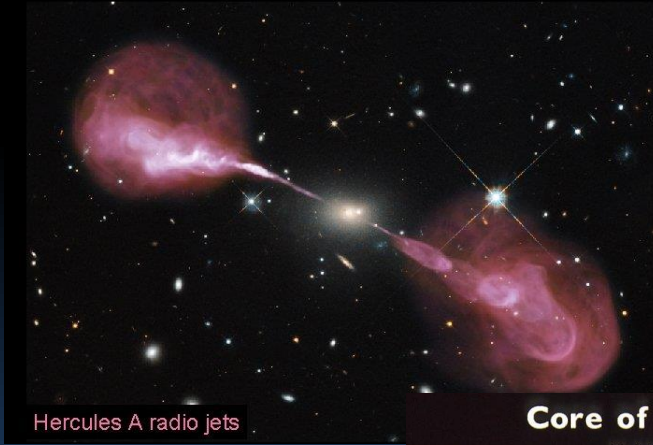


Resti di  
supernove



# Origine dei raggi cosmici

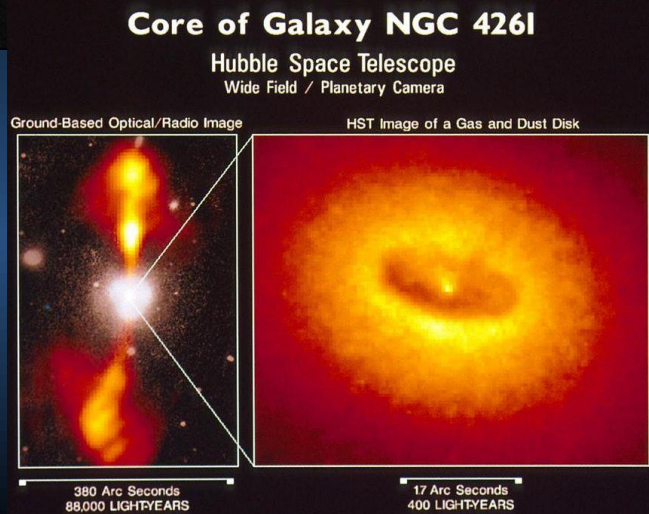
Active Galactic Nuclei (AGNs) and Supermassive Black Holes



Gamma-ray burst

Quasar

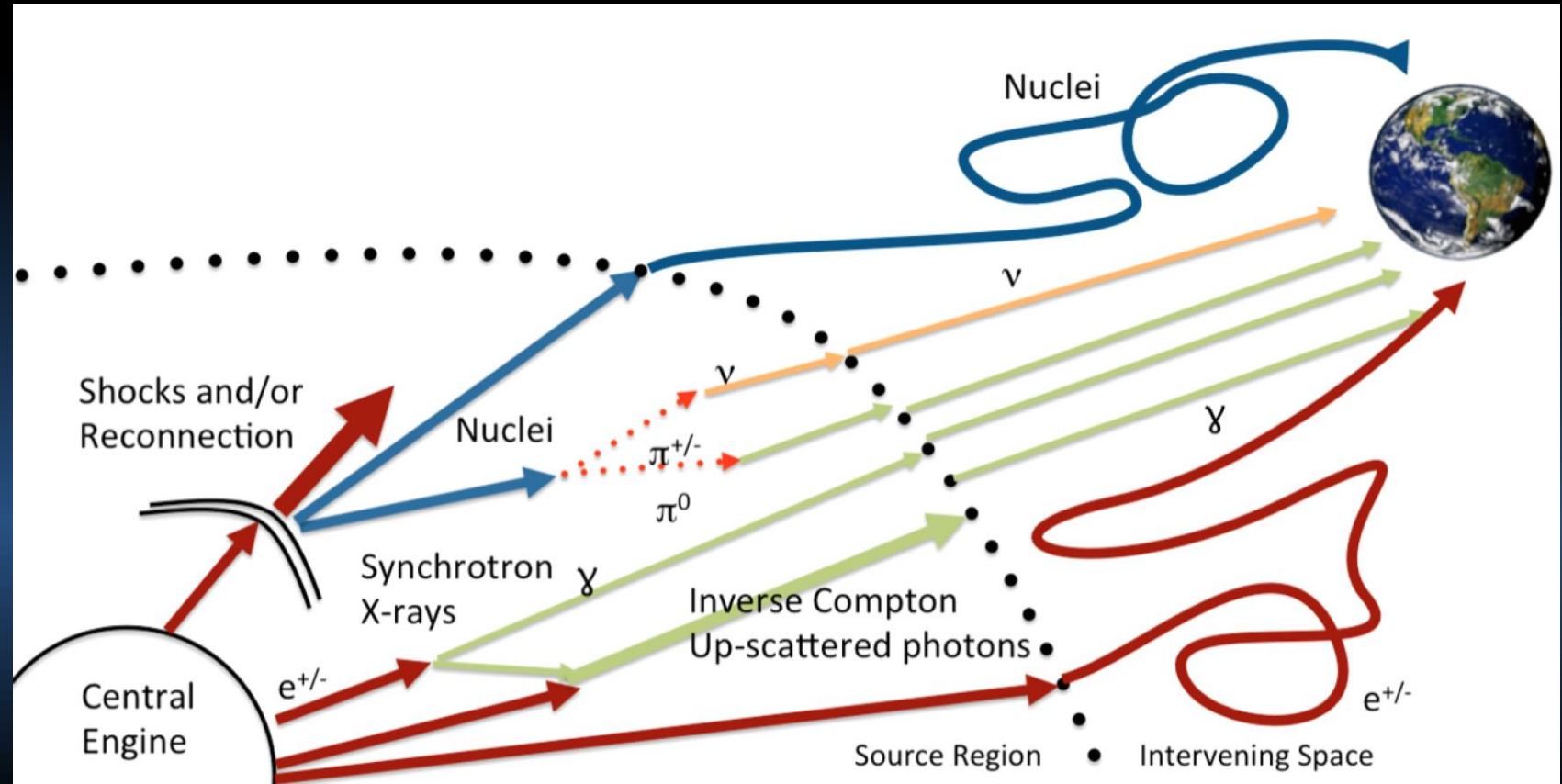
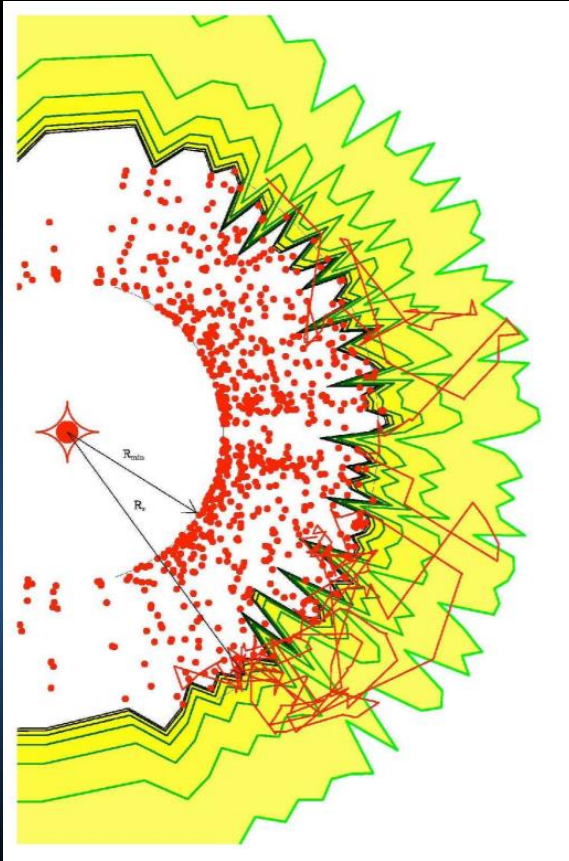
Nuclei galattici attivi





# Meccanismi di accelerazione dei raggi cosmici

- Interazione con le onde d'urto delle supernove:

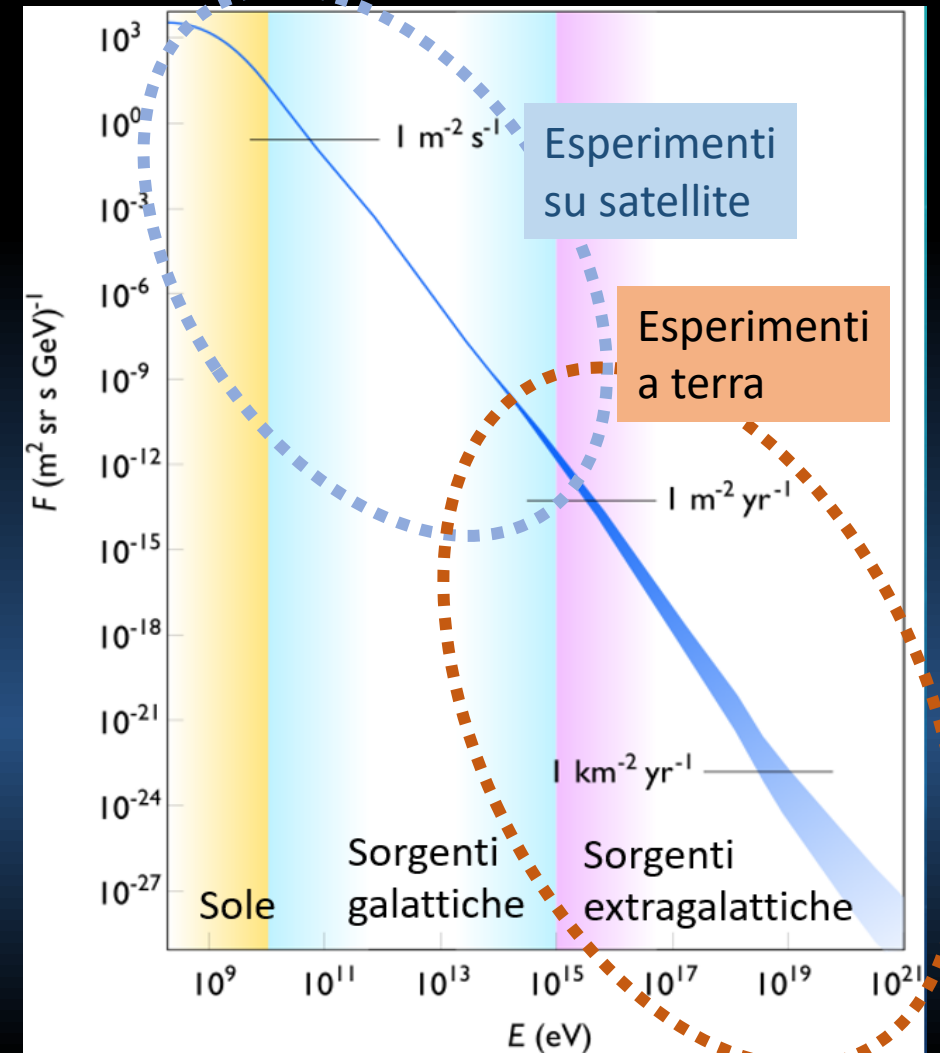


# Il flusso dei raggi cosmici primari

- I raggi cosmici primari possono raggiungere energie fino ai  $10^{20} - 10^{21}$  eV
  - pari a circa 20 J: come una pallina da tennis di 60 g che viaggia a 100 km/h
- Nessun acceleratore artificiale può raggiungere energie simili
  - Il Large Hadron Collider del CERN accelera protoni fino a  $7 \times 10^{12}$  eV

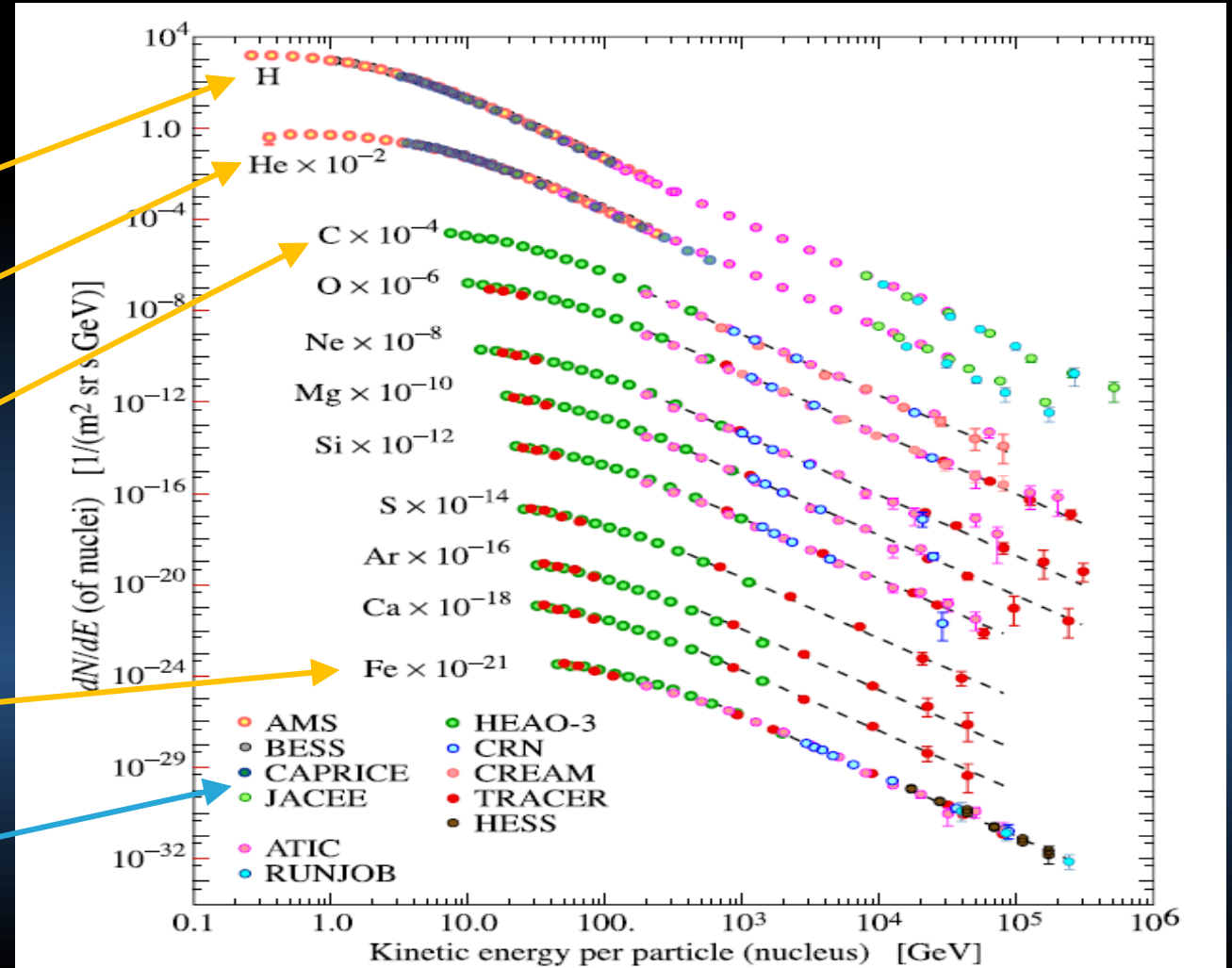
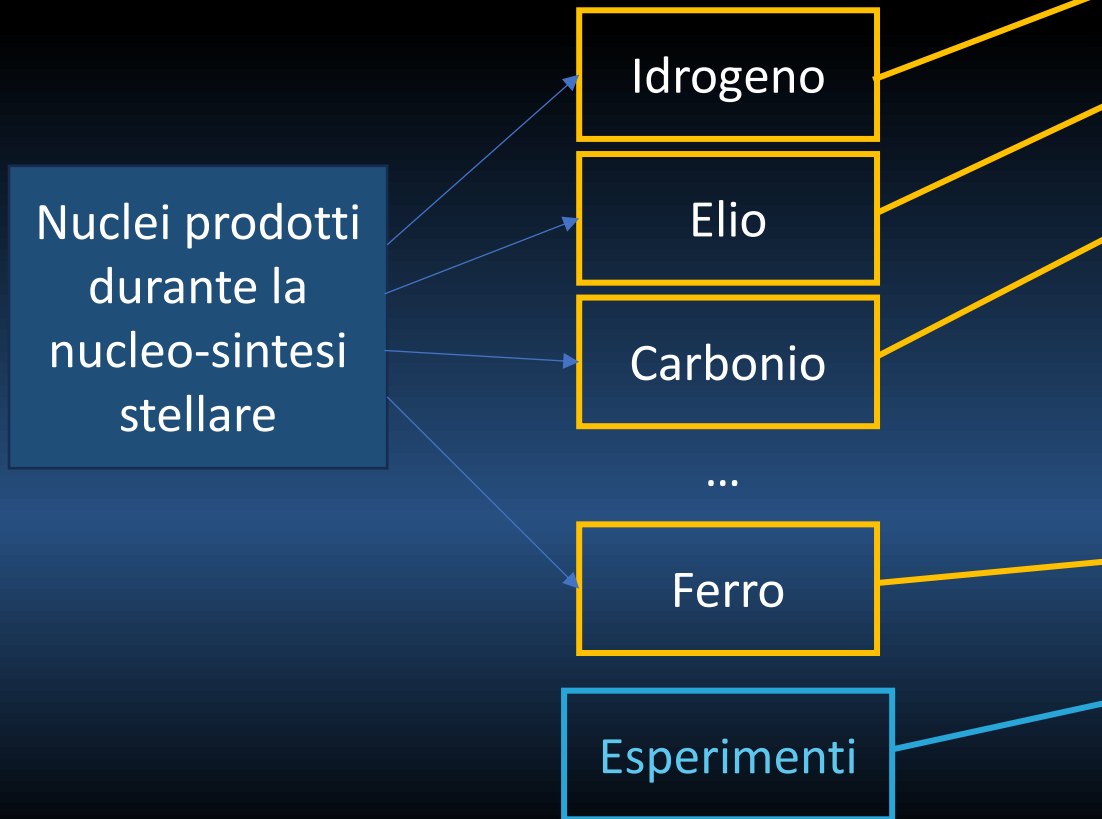
L'elettronvolt (eV) è un'unità di misura dell'energia adatta alle particelle elementari.

$$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$



# Composizione dei raggi cosmici primari

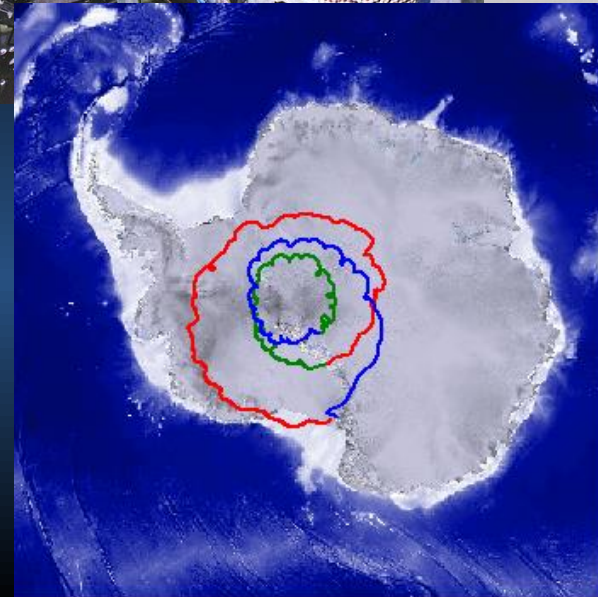
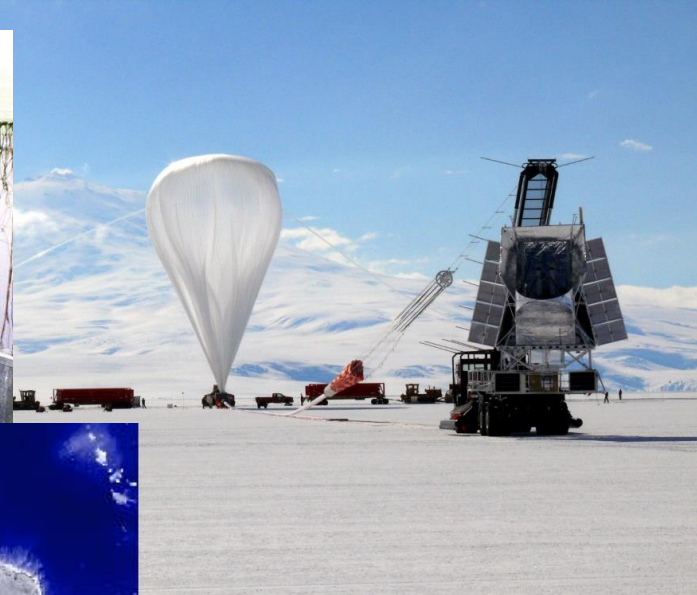
- Sull'asse orizzontale: energie
- Sull'asse verticale: intensità





# Esperimenti su pallone aerostatico

- Un rivelatore di particelle viene appeso a un grande pallone che lo porta nell'alta atmosfera (fino a 39 km).
- Si possono misurare i raggi cosmici a diverse quote.
- I voli vengono effettuati in Antartide, nel Circolo Polare Artico o su regioni desertiche e durano alcuni giorni.





# L'esperimento AMS-02 sulla ISS

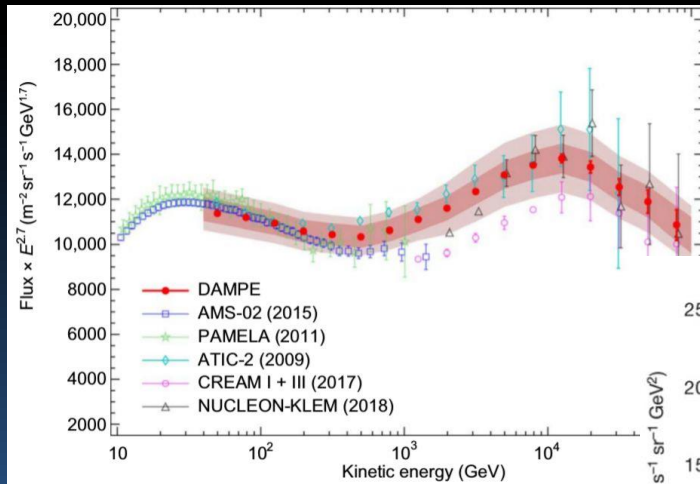
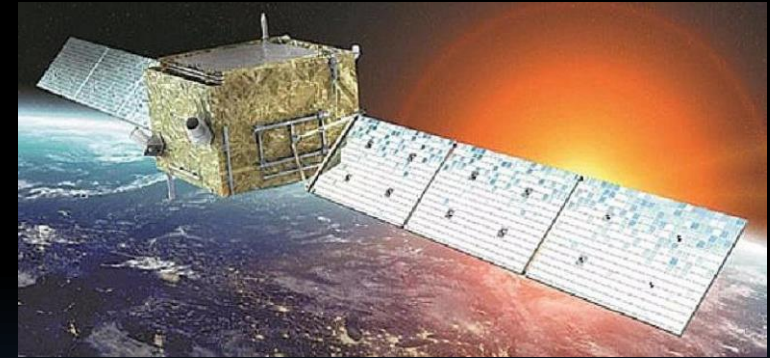
- AMS-02 è un apparato molto complesso che osserva i raggi cosmici e ricerca l'antimateria, la materia oscura e la materia «strana».
- È stato portato sulla International Space Station dallo Space Shuttle nel 2011.
- In 10 anni ha rivelato oltre 192 miliardi di raggi cosmici.
- Per ulteriori informazioni: <https://ams02.space>



# L'esperimento DAMPE

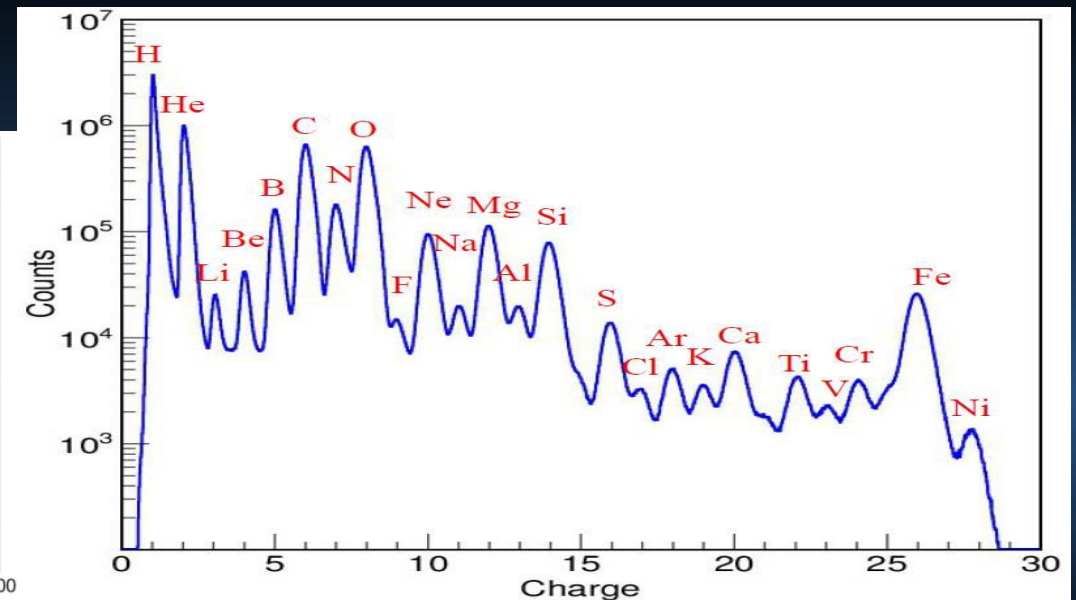
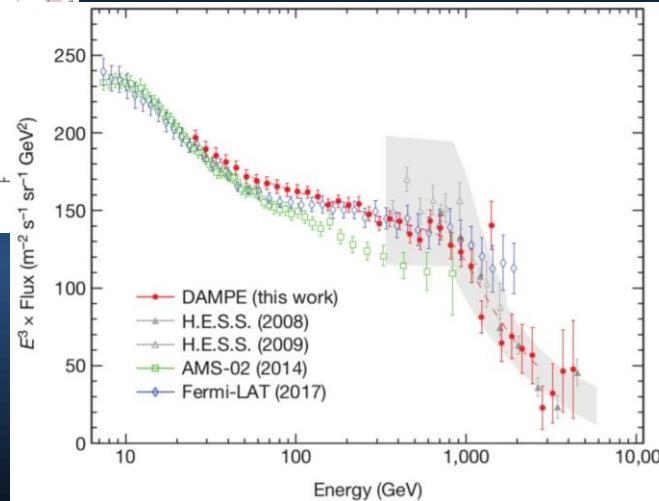


- Il satellite DAMPE misura protoni, elettroni, positroni e nuclei cosmici di alta energia.



«Break» degli elettroni

«Softening» dei protoni



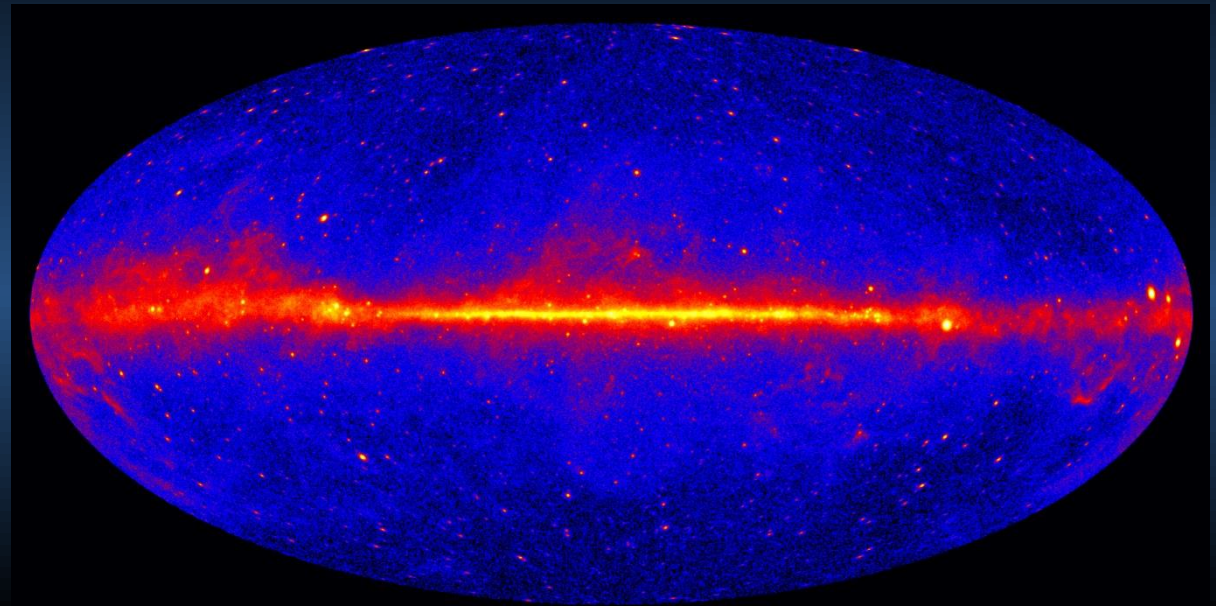
Composizione dei raggi cosmici

- Per ulteriori info:  
<http://dpnc.unige.ch/dampe/>



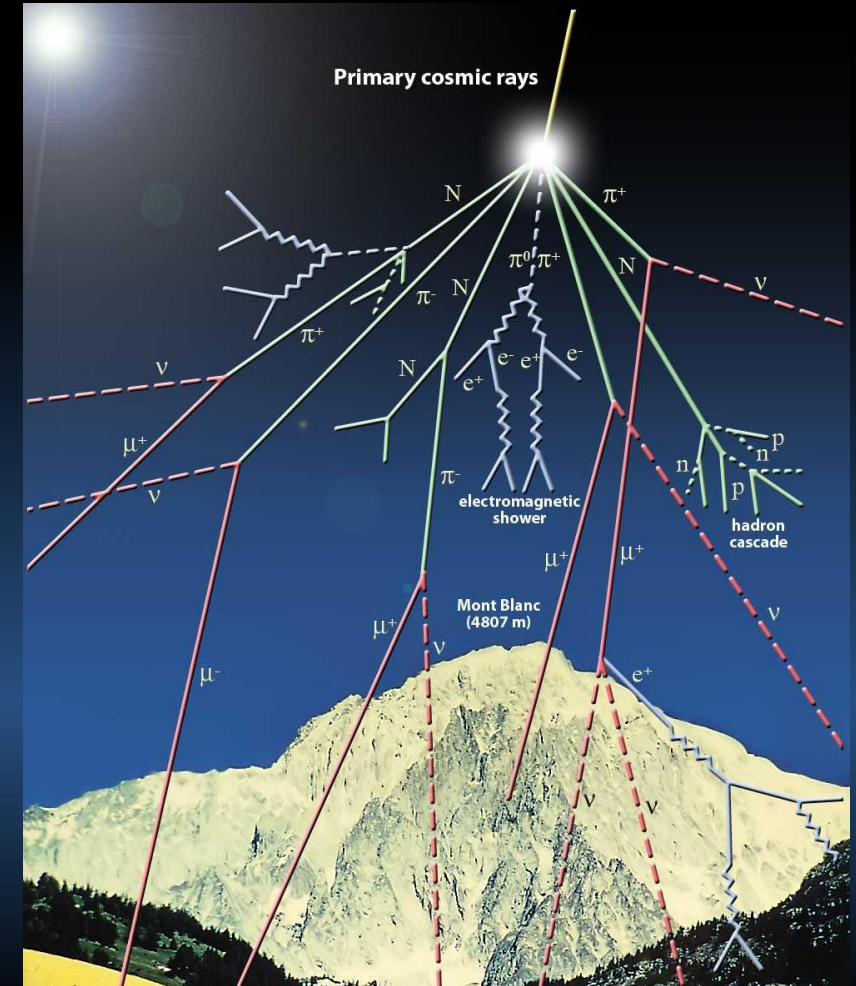
# Il Fermi Gamma-ray Space Telescope

- Il satellite Fermi osserva raggi gamma cosmici di energie fra 8 keV e oltre 300 GeV, prodotti nelle interazioni dei raggi cosmici carichi con la materia interstellare.
- I raggi gamma non sono deviati dai campi magnetici e permettono di risalire alle sorgenti dei raggi cosmici.
- Fermi può anche osservare direttamente protoni, elettroni e positroni cosmici.
- Per ulteriori informazioni:  
<https://fermi.gsfc.nasa.gov>



# I raggi cosmici secondari

- I raggi cosmici primari urtano violentemente i nuclei dell'atmosfera terrestre.
- In questi urti si generano «cascate atmosferiche» o «air showers» di particelle secondarie.
- Nelle cascate si producono altre particelle energetiche e anche radiazione luminosa.
- Le particelle e la radiazione luminosa si possono osservare al suolo con opportuni strumenti.
- Tra le particelle ve ne sono alcune così penetranti (muoni e neutrini) che possono essere osservate in rivelatori sotterranei.





# Le cascate atmosferiche

- Formate prevalentemente da:
  - neutroni e protoni secondari
  - mesoni  $\pi$  e  $K$
  - elettroni e positroni
  - fotoni (radiazione elettromagnetica)
  - muoni
  - neutrini
  
- Inoltre, le componenti cariche degli sciami che viaggiano a velocità maggiori della luce nell'aria producono lampi di luce blu/UV per effetto Cherenkov

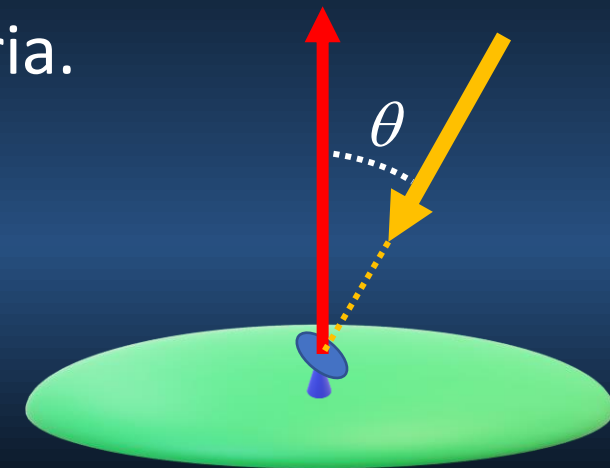


# I raggi cosmici al suolo

- Al livello del mare arrivano quasi solo muoni e neutrini.
- I neutrini sono difficilmente osservabili perché interagiscono pochissimo con la materia: per rivelarli occorrono apparati di grande volume.
- I muoni possono essere facilmente osservati perché interagiscono elettromagneticamente con la materia.
- Al livello del mare, per un rivelatore orizzontale:
  - il flusso è di circa **1 muone  $\text{cm}^{-2} \text{min}^{-1}$** .
  - la direzione d'arrivo segue una distribuzione angolare **proporzionale a  $\cos^2 \theta$**  dove  $\theta$  è l'angolo zenitale.

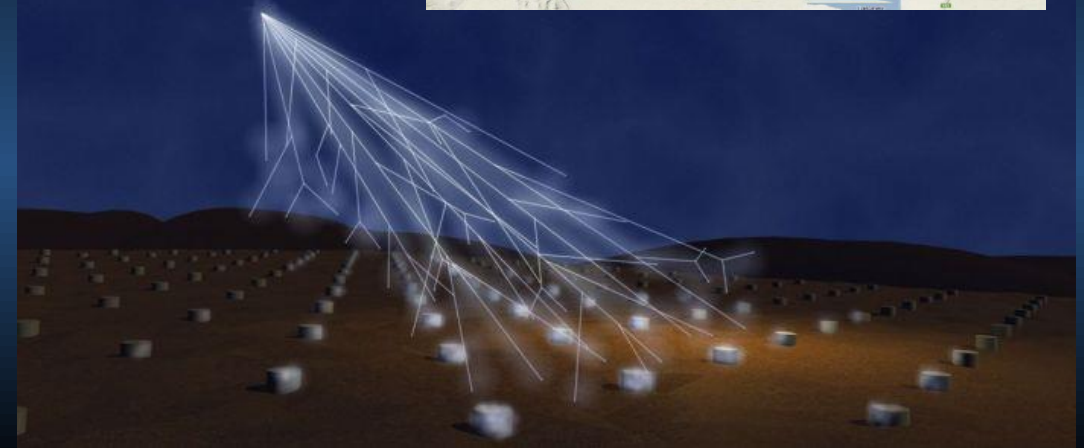
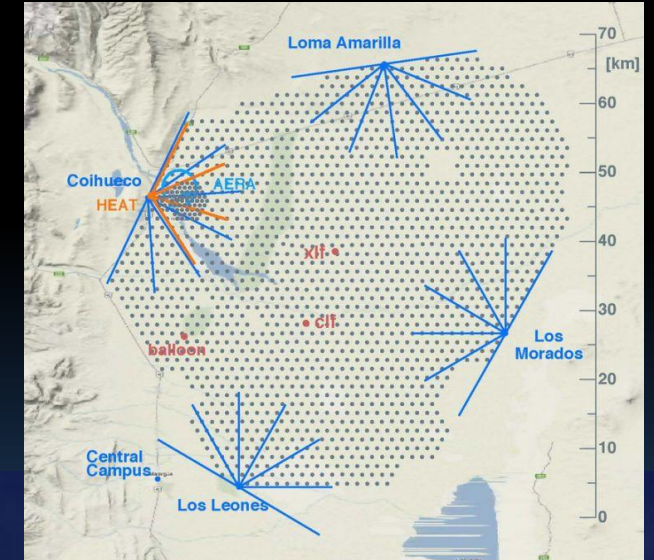


zenit



# L'osservatorio Pierre Auger

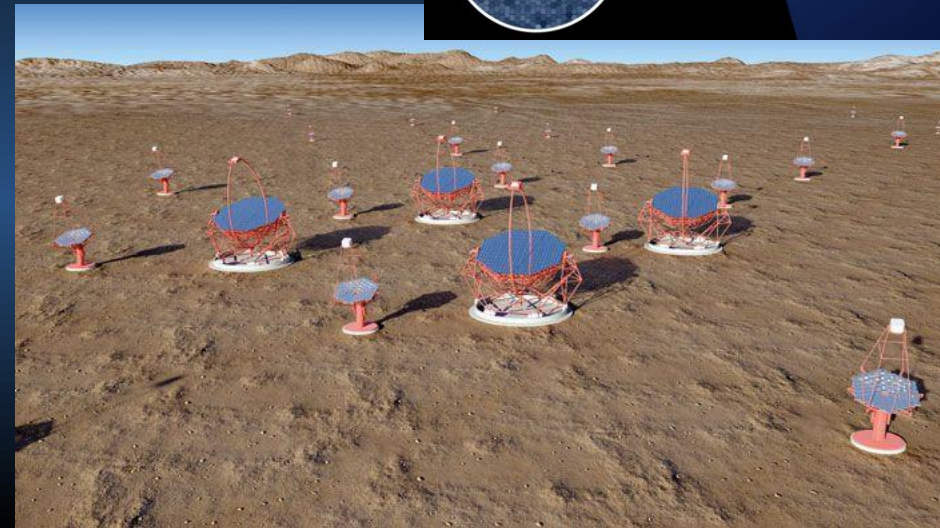
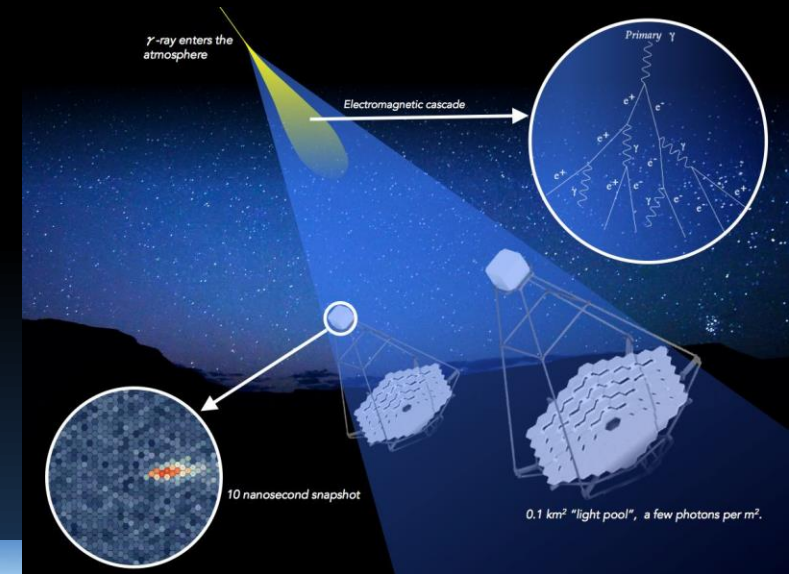
- È in Argentina e copre una superficie di circa 3000 km<sup>2</sup> (come la Valle d'Aosta).
- Osserva i raggi cosmici secondari.
- È formato da:
  - 1660 rivelatori Cherenkov (ciascuno con 12 t d'acqua) a circa 1.5 km l'uno dall'altro;
  - 27 telescopi che osservano la luce di fluorescenza emessa dalle particelle cariche nell'atmosfera.
- Per ulteriori informazioni:  
<https://www.auger.org/>





# I telescopi Cherenkov e CTAO

- Quando una particella carica attraversa un mezzo con velocità superiore a quella della luce nel mezzo, si genera un lampo di luce: è l'effetto Cherenkov.
- L'esperimento CTAO è costituito da un insieme di telescopi in grado di osservare la luce Cherenkov prodotta dallo sciame di particelle quando esso attraversa l'atmosfera.
- CTAO è progettato per osservare i raggi gamma cosmici di alta energia.
- Per ulteriori info:  
<https://www.ctao.org>



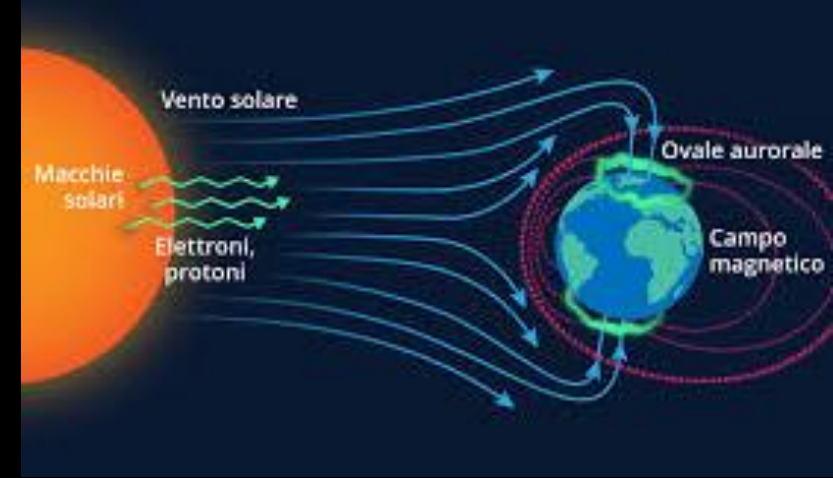


# Effetto geomagnetico



- L'effetto schermante del campo magnetico terrestre dipende fortemente dalla latitudine
  - è più efficace all'equatore
  - diventa meno efficace ai poli
- Un piccolo apparato INFN per la rivelazione dei raggi cosmici è stato installato sull'Amerigo Vespucci, nave scuola della Marina Militare, attualmente impegnata nel Tour Mondiale. Potrà esplorare regioni di campo geomagnetico molto diverse fra loro
- Maggiori informazioni su

[Un rivelatore di raggi cosmici sull'Amerigo Vespucci solcherà i mari di tre continenti](#)



Credits: Marina Militare





Fine

