

Discover Cosmic Rays

INTERNATIONAL COSMIC DAY

November 10 | 2021



I RAGGI COSMICI

Piergiorgio Fusco

Università degli studi di Bari «Aldo Moro»
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare – Sezione di Bari



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI BARI
ALDO MORO

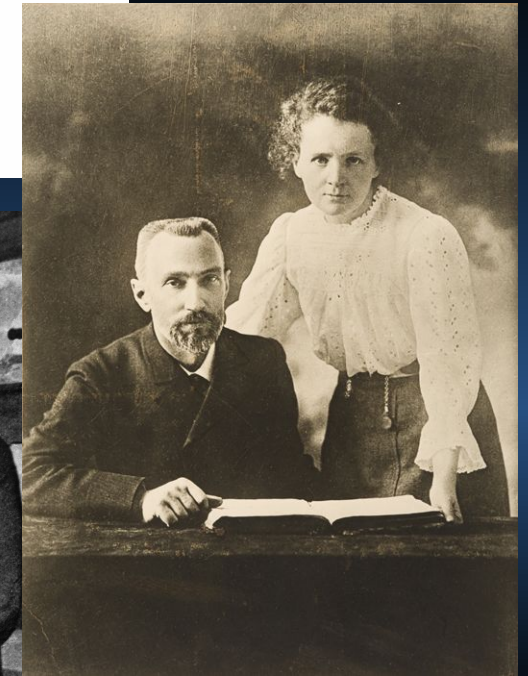
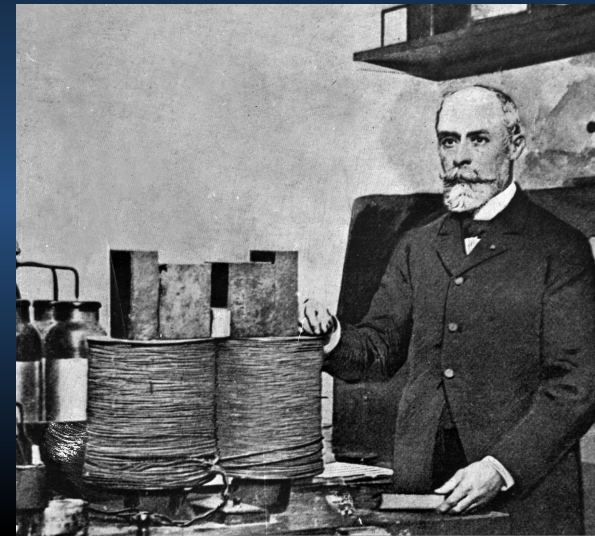
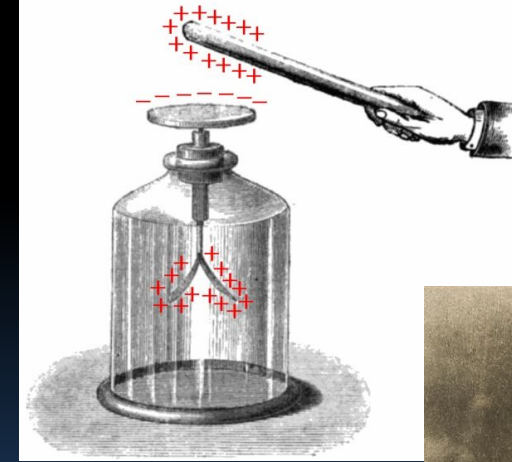


Politecnico di Bari



Primi indizi sui raggi cosmici

- 1785: Charles Coulomb nota che un elettroscopio, anche se isolato, perde lentamente la carica elettrica immagazzinata.
- 1896: Henri Becquerel, Marie Curie e Pierre Curie scoprono la radioattività.
- 1903: si osserva che gli elettroscopi perdono la loro carica elettrica anche se sono schermati: si deduce che la causa è una **radiazione penetrante di origine sconosciuta**.

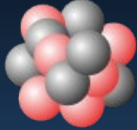


La scoperta dei raggi cosmici

- 1911: Domenico Pacini effettua misure di ionizzazione nel lago di Bracciano e nel mare di Livorno e osserva che essa **diminuisce all'aumentare della profondità**.
- 1912: Victor Hess effettua misure di ionizzazione 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**.

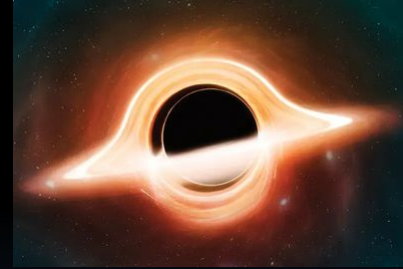


Che cosa sono i raggi cosmici

- I **raggi cosmici primari** sono particelle subatomiche prodotte da sorgenti astrofisiche, viaggiano nel cosmo in tutte le direzioni e sono:
 - per il 99% 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.

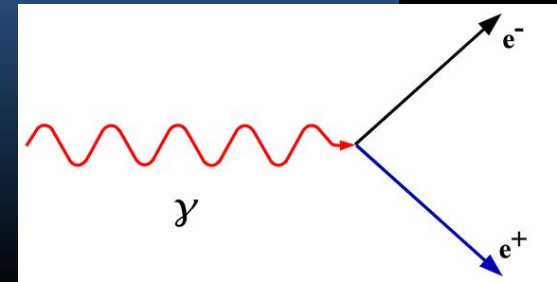
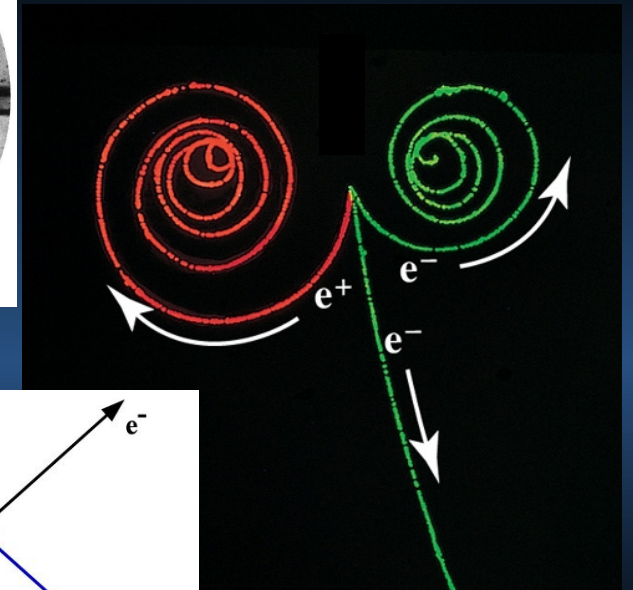
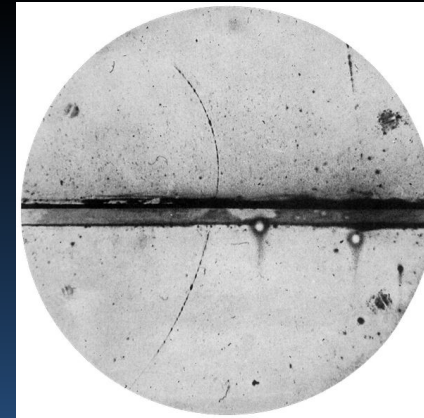
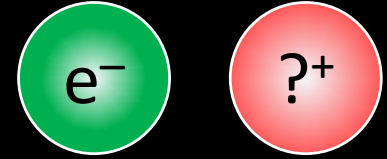
Perché si studiano i raggi cosmici?

- **Da quali oggetti astrofisici provengono?**
 - e come sono fatti tali oggetti?
- **Quali meccanismi li accelerano?**
 - e come fanno a raggiungere energie così elevate?
- **Compiono urti tra particelle di altissima energia**
 - nessun acceleratore costruito dall'uomo può raggiungere tali energie
- **Quali sono i loro effetti sull'ambiente terrestre?**
 - influiscono sul clima, sulla meteorologia, sulla radioattività ambientale



La scoperta del positrone nei raggi cosmici

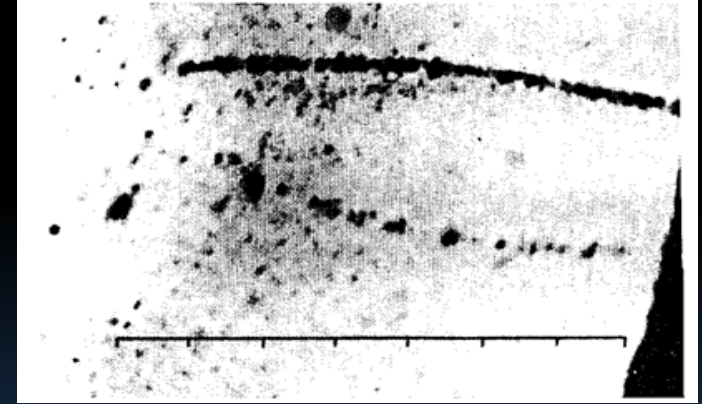
- 1928: Paul Dirac teorizza che esista una particella identica all'elettrone (che ha carica negativa) con carica **positiva**.
- 1932: Carl Anderson studia i raggi cosmici secondari e osserva particelle che lasciano tracce identiche a quelle degli elettroni, ma con la curvatura delle cariche positive: sono **antielettroni**.
- 1933: P. Blackett e Giuseppe Occhialini osservano la conversione di fotoni cosmici di alta energia in «coppie» formate da un elettrone e un antielettrone, che viene oggi chiamato **positrone**.



La scoperta del muone nei raggi cosmici

- 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
 - e 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**:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$



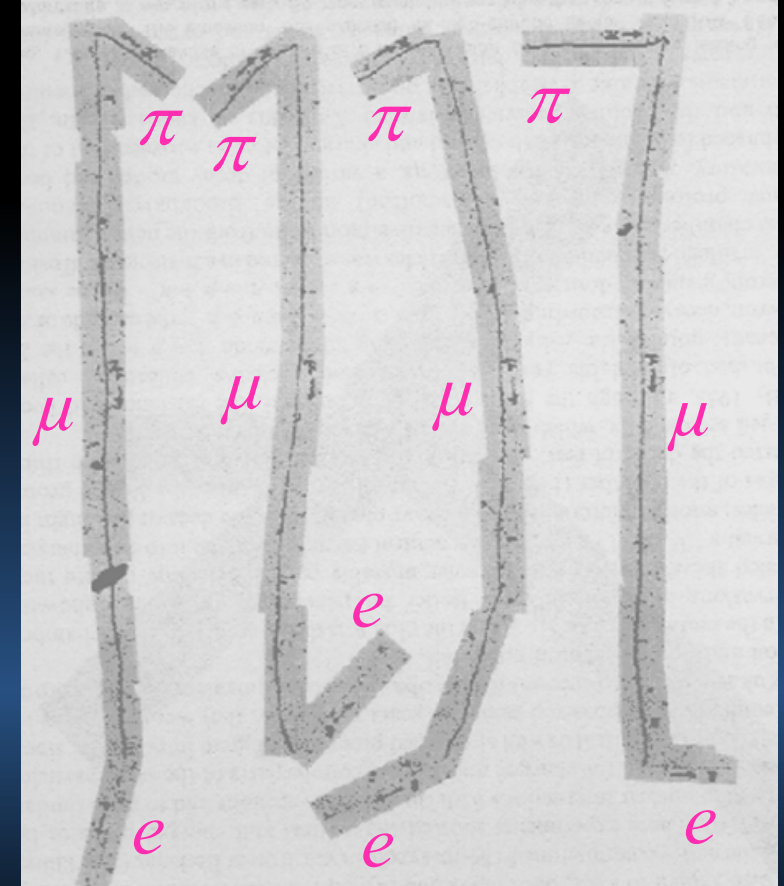
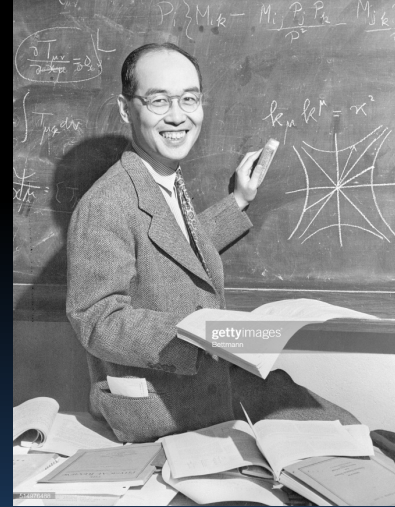
Domanda: anche se il muone viaggiasse alla velocità della luce, decadrebbe dopo $3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 660 \text{ m}$. Ma allora come fa a percorrere molti km di atmosfera e ad arrivare al suolo?

Il pione nei raggi cosmici

- 1936: Hideki Yukawa predice l'esistenza del pione π come particella mediatrice della interazione forte.
- 1947: Lattes, Occhialini, Muirhead e Powell osservano il pione in lastre fotografiche esposte ai raggi cosmici.
- I pioni sono prodotti dai raggi cosmici primari e **decadono** in muoni e neutrini:

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

- I muoni poi decadono in elettroni e neutrini.
- Nelle lastre i neutrini non sono visibili.

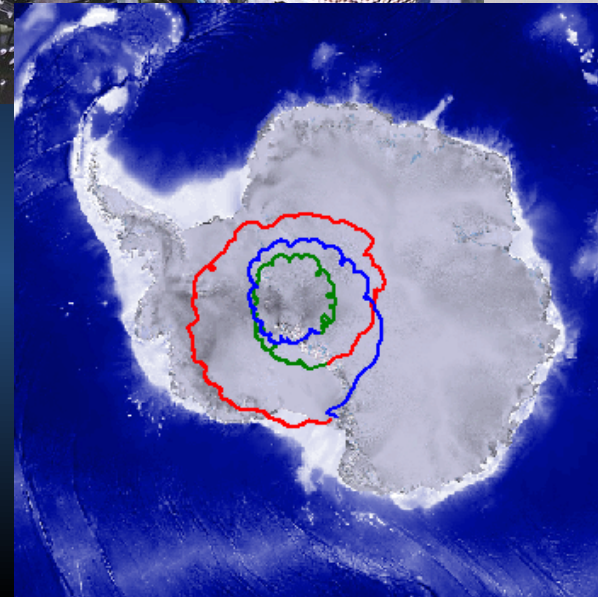


Osservazione e misura dei raggi cosmici

- **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 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 km^2 !

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

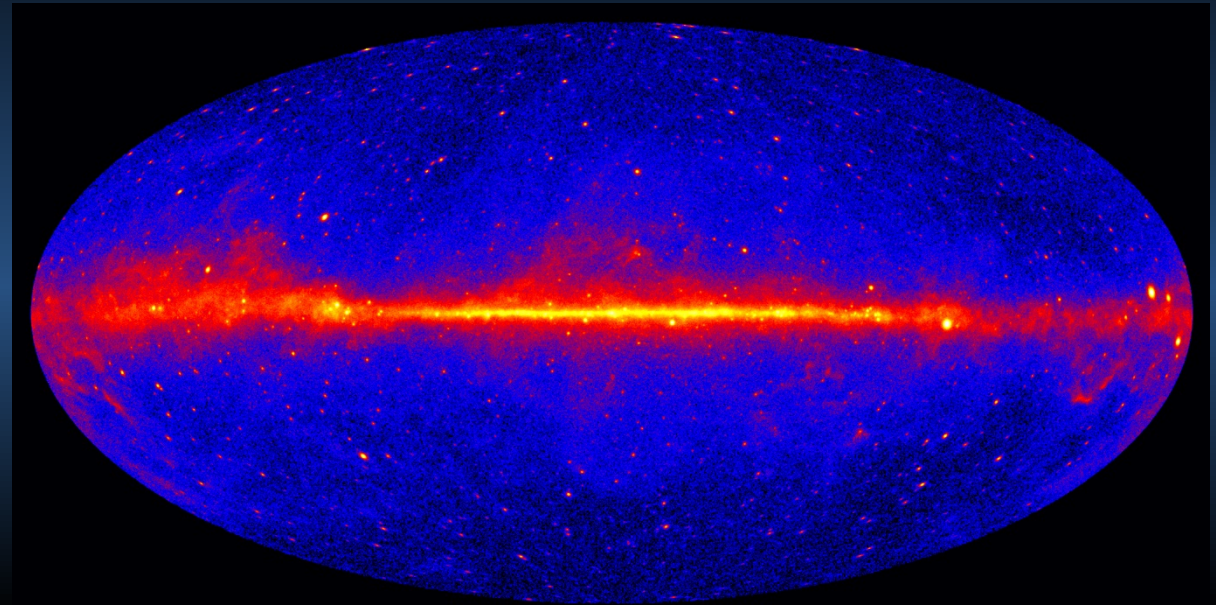
- AMS-02 è un apparato molto complesso che osserva i raggi cosmici e ricerca l'antimateria, la materia oscura e la materia «strana».
- È stato portato sulla International Space Station dallo Space Shuttle nel 2011.
- In 10 anni ha rivelato oltre 192 miliardi di raggi cosmici.
- Per ulteriori informazioni: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



Il Fermi Gamma-ray Space Telescope



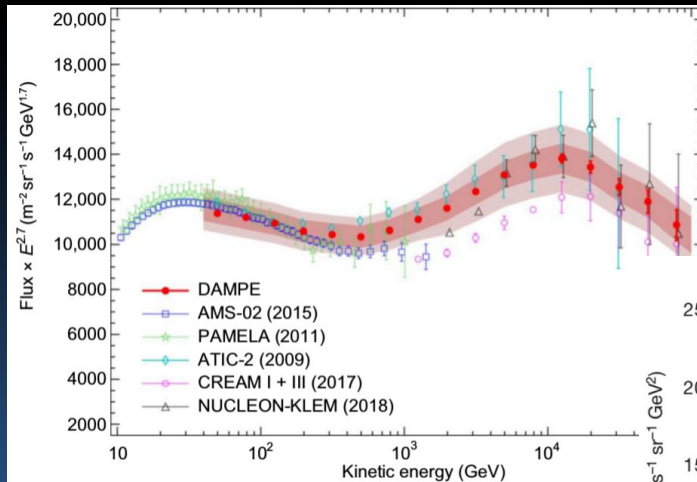
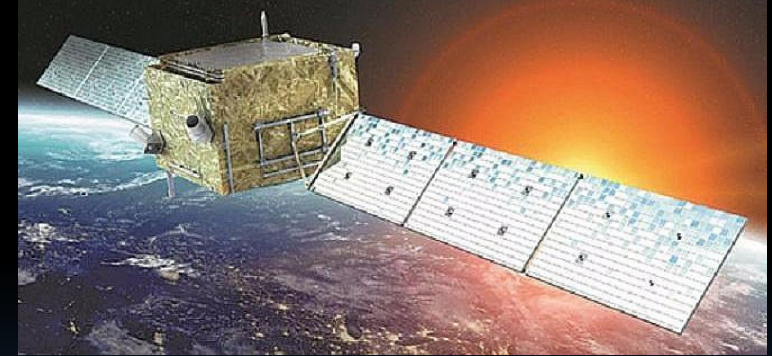
- Il satellite Fermi osserva raggi gamma cosmici di energie fra 8 keV e oltre 300 GeV, prodotti nelle interazioni dei raggi cosmici carichi con la materia interstellare.
- I raggi gamma non sono deviati dai campi magnetici e permettono di risalire alle sorgenti dei raggi cosmici.
- Fermi può anche osservare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



L'esperimento DAMPE

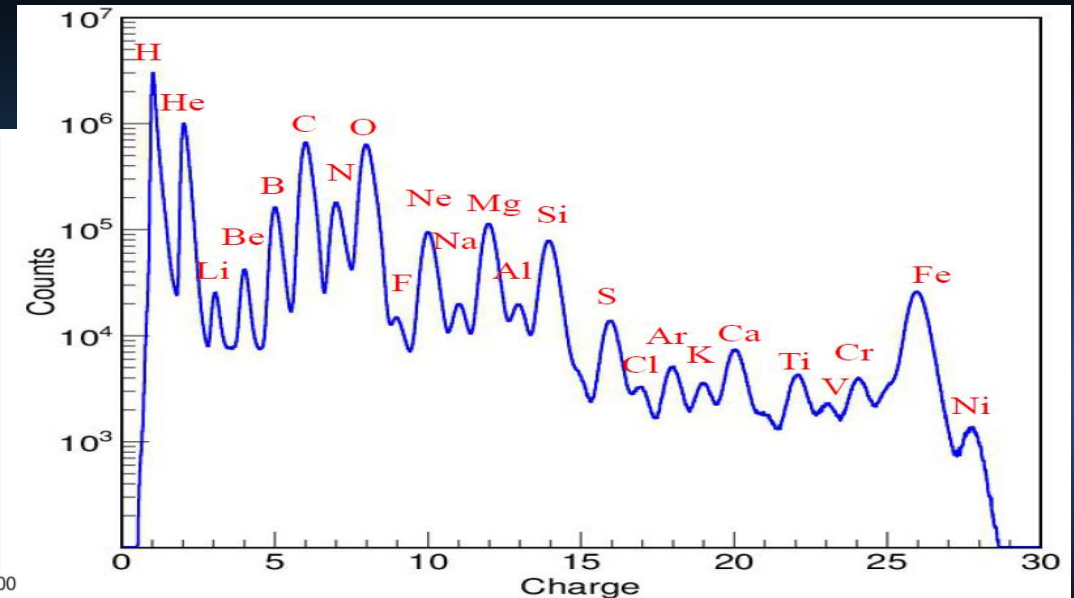
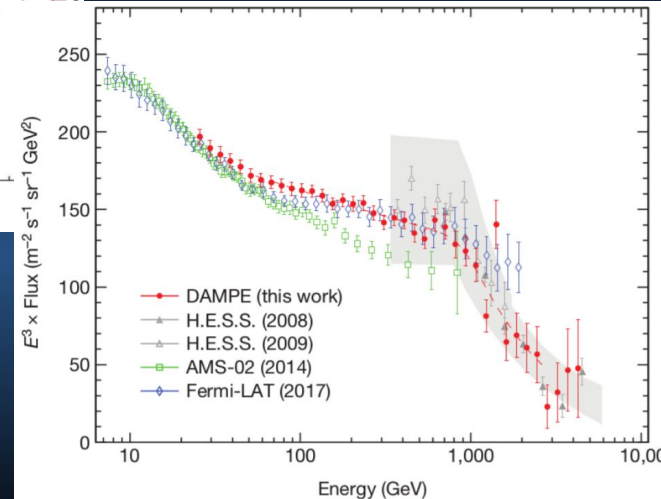


- Il satellite DAMPE misura protoni, elettroni, positroni e nuclei cosmici di alta energia.



«Softening»
dei protoni

«Break» degli
elettroni



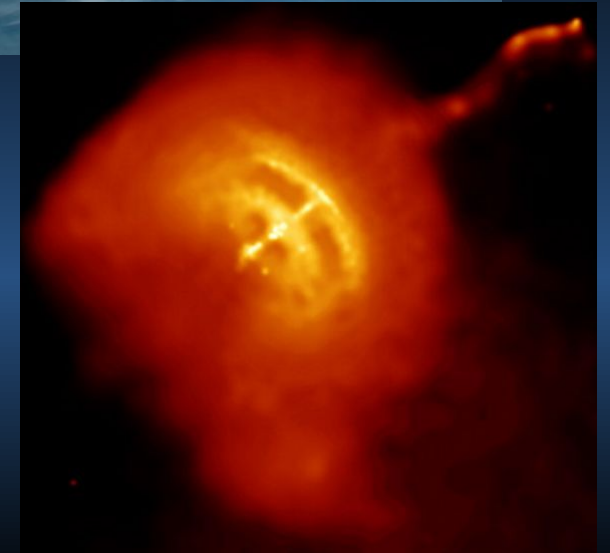
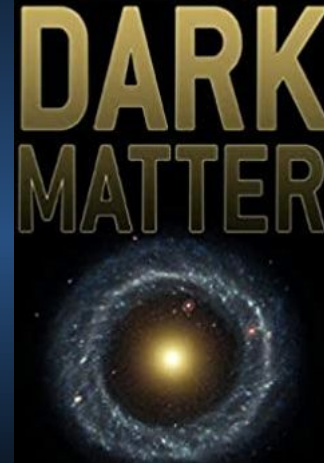
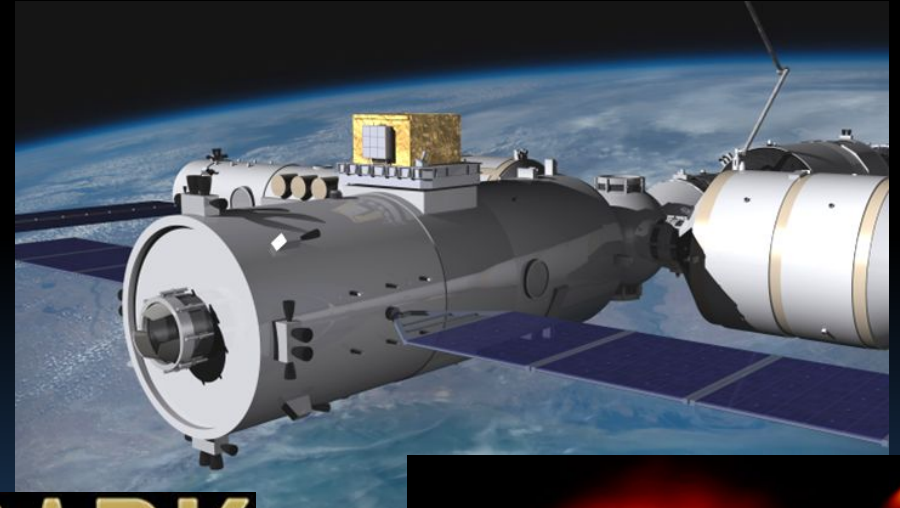
Composizione dei raggi cosmici

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

L'esperimento HERD

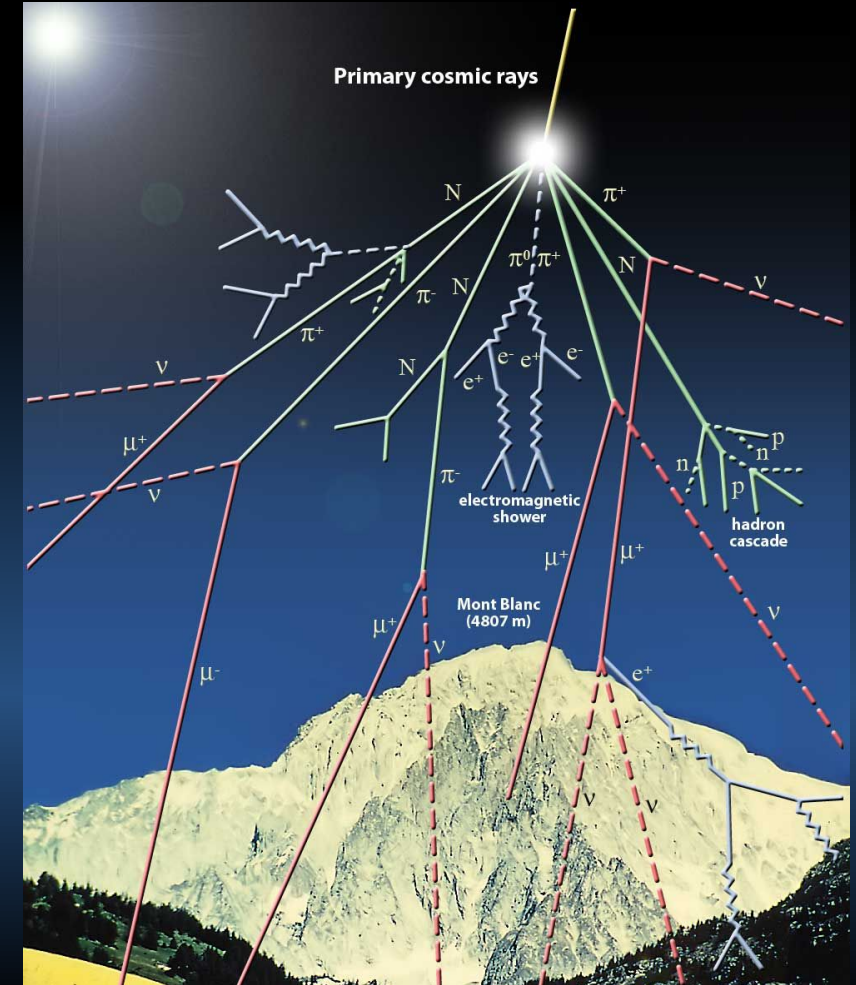


- L'esperimento HERD è un rivelatore di particelle che sarà installato sulla Stazione Spaziale Cinese nel 2026 per:
 - misurare direttamente i raggi cosmici primari
 - stabilire la loro composizione ad energie molto alte (10^{16} eV)
 - osservare raggi gamma cosmici e le loro sorgenti
 - eseguire una ricerca indiretta della Dark Matter.
- Per ulteriori info: <http://herd.ihep.ac.cn/>



L'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera

- 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.



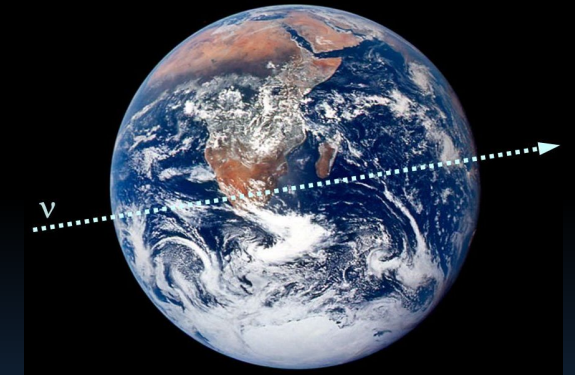
La cascata atmosferica

- È formata prevalentemente da:
 - neutroni e protoni secondari
 - mesoni π e K
 - elettroni e positroni
 - fotoni (radiazione elettromagnetica)
 - muoni
 - neutrini

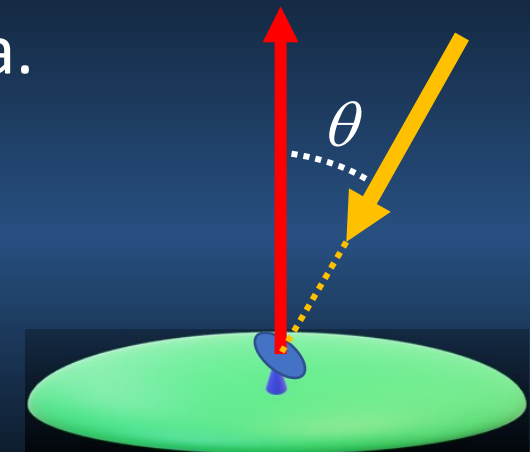


I raggi cosmici al suolo

- 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 θ è l'angolo zenitale.



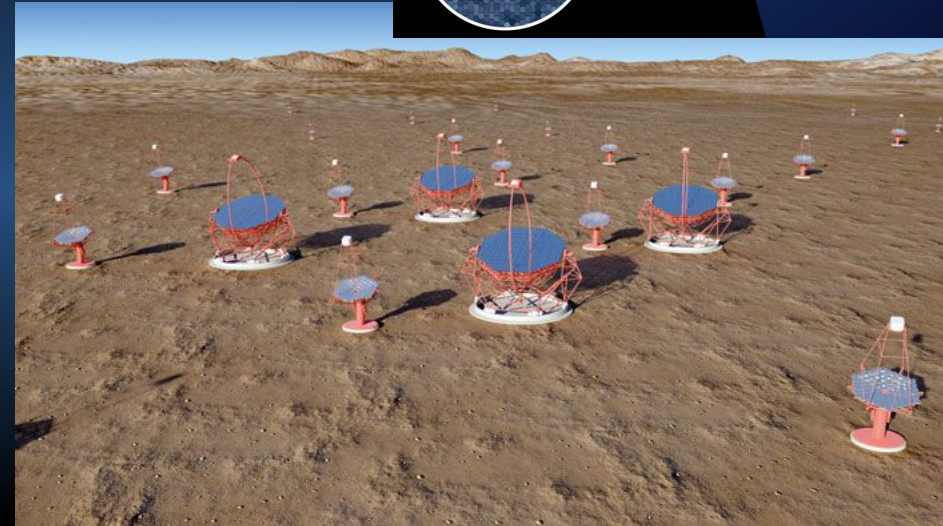
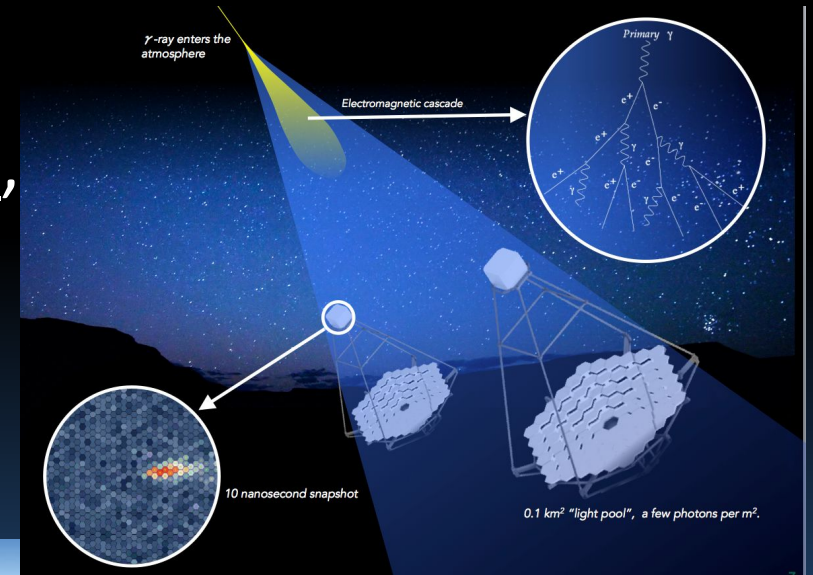
zenit



L'esperimento CTA

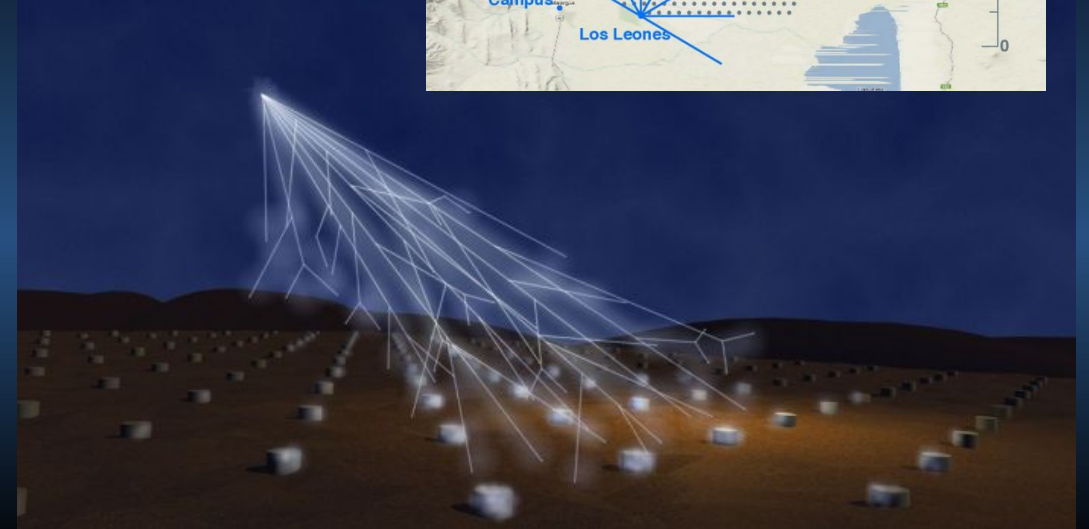
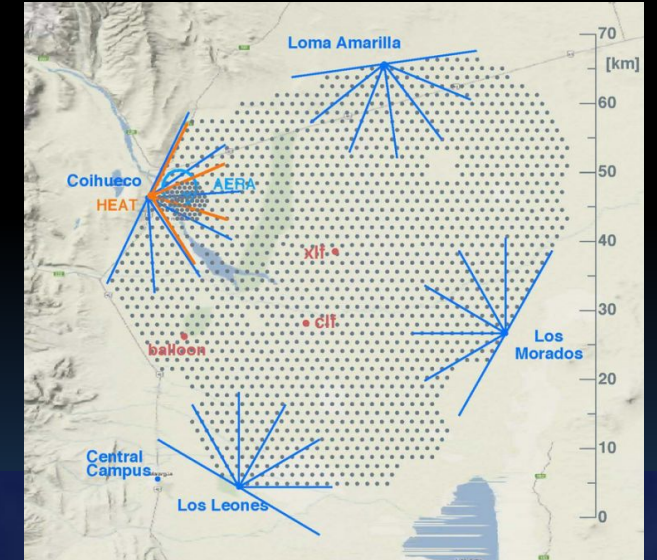


- Quando una particella carica attraversa un mezzo con velocità superiore a quella della luce nel mezzo, si genera un lampo di luce: è l'effetto Cherenkov.
- L'esperimento CTA è costituito da un insieme di telescopi in grado di osservare la luce Cherenkov prodotta dallo sciame di particelle quando esso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



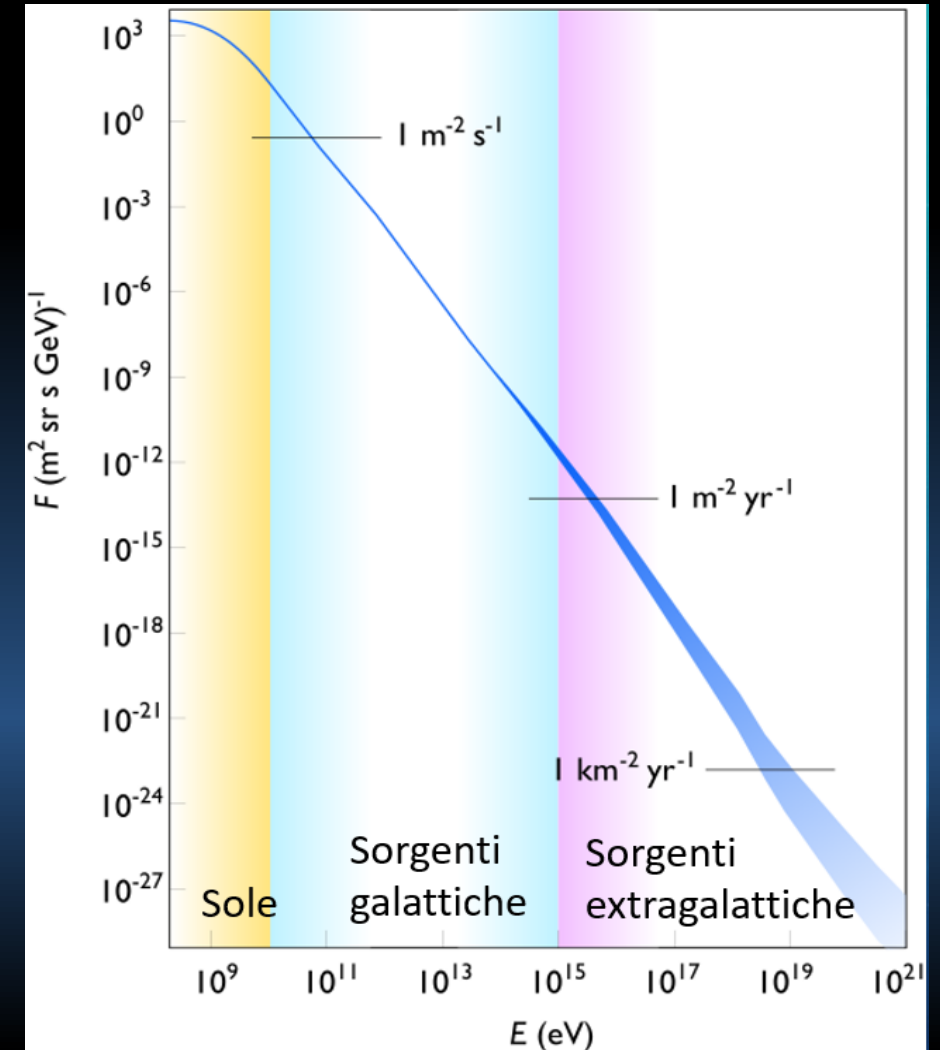
L'osservatorio Pierre Auger

- È in Argentina e copre una superficie di circa 3000 km² (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/>



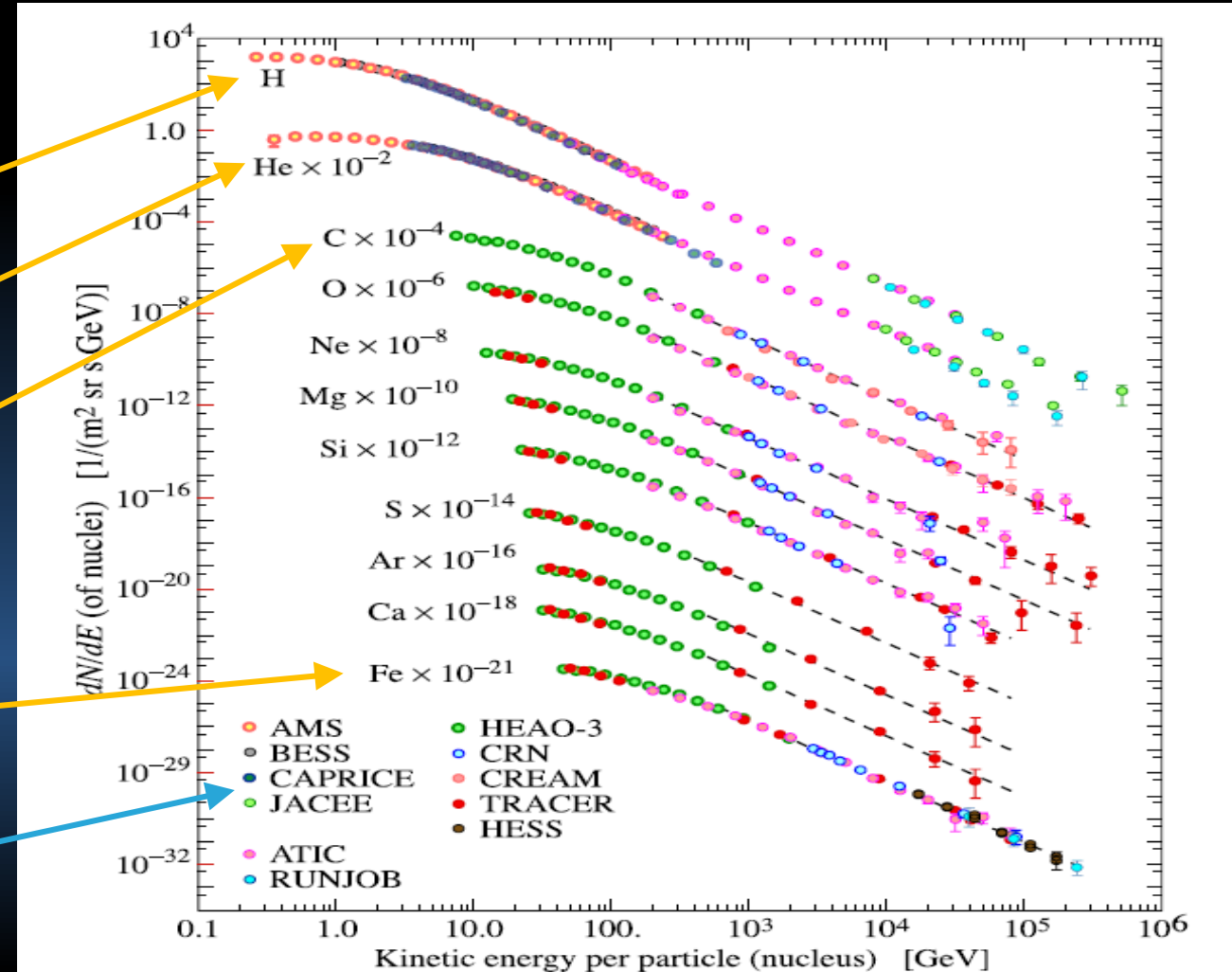
Il flusso dei raggi cosmici primari

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



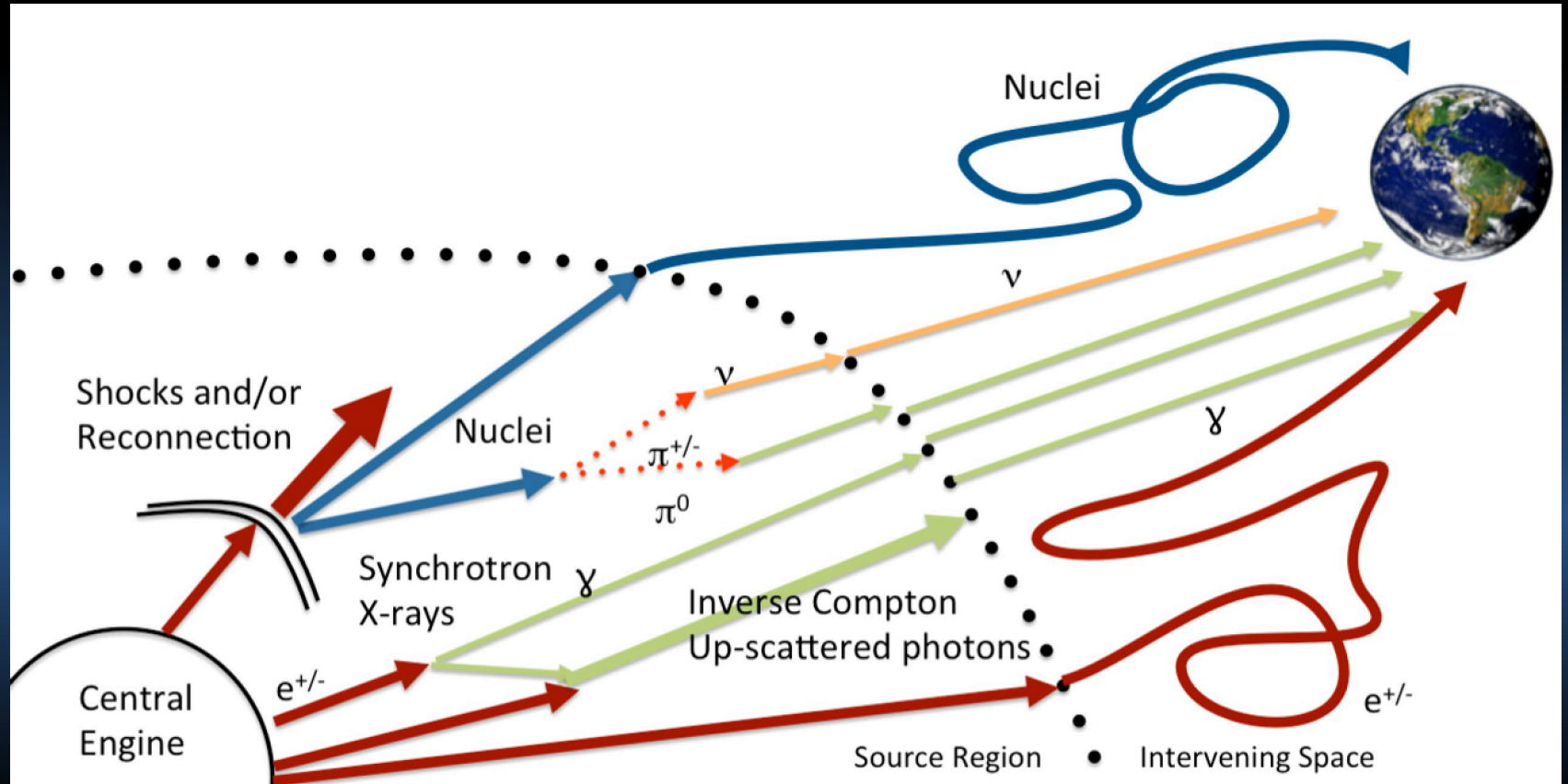
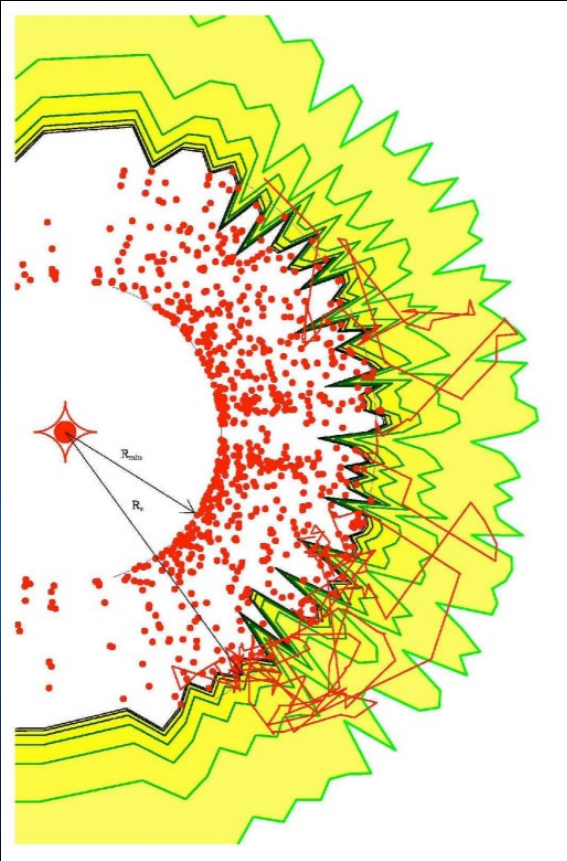
Composizione dei raggi cosmici primari

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

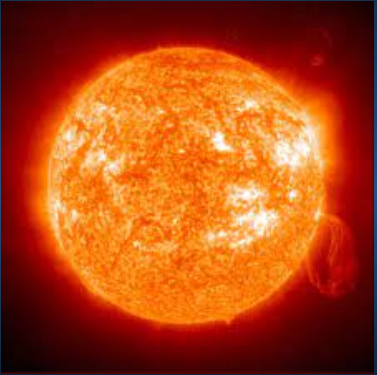


Meccanismi di accelerazione dei raggi cosmici

- Interazione con le onde d'urto delle supernove:



Origine dei raggi cosmici



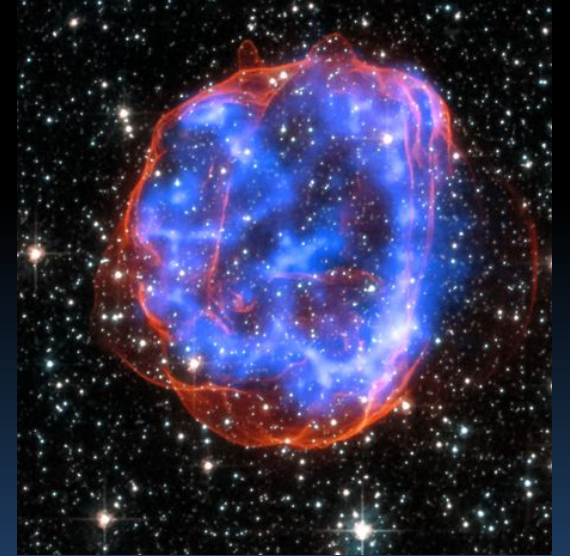
Il Sole



Esplosioni stellari



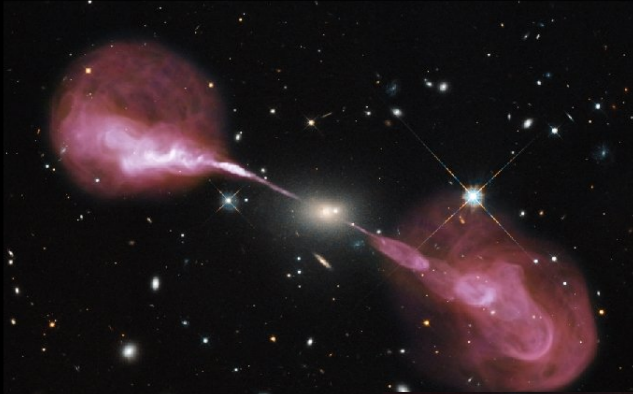
Supernove



Resti di
supernove

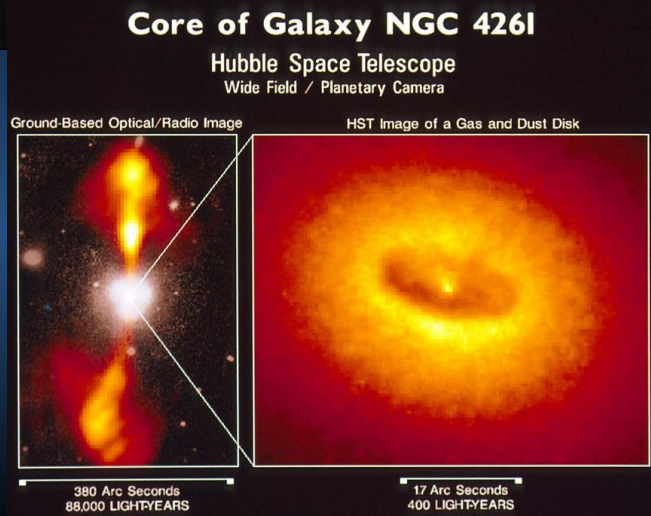
Origine dei raggi cosmici

Active Galactic Nuclei (AGNs) and Supermassive Black Holes



Hercules A radio jets

Nuclei
galattici
attivi



Quasar



Gamma-ray burst



... e altro ancora

Fine