

Introduzione alla fisica dei raggi cosmici

Mirko Boezio
INFN & IFPU, Trieste, Italy

Trieste, 13 Novembre 2025

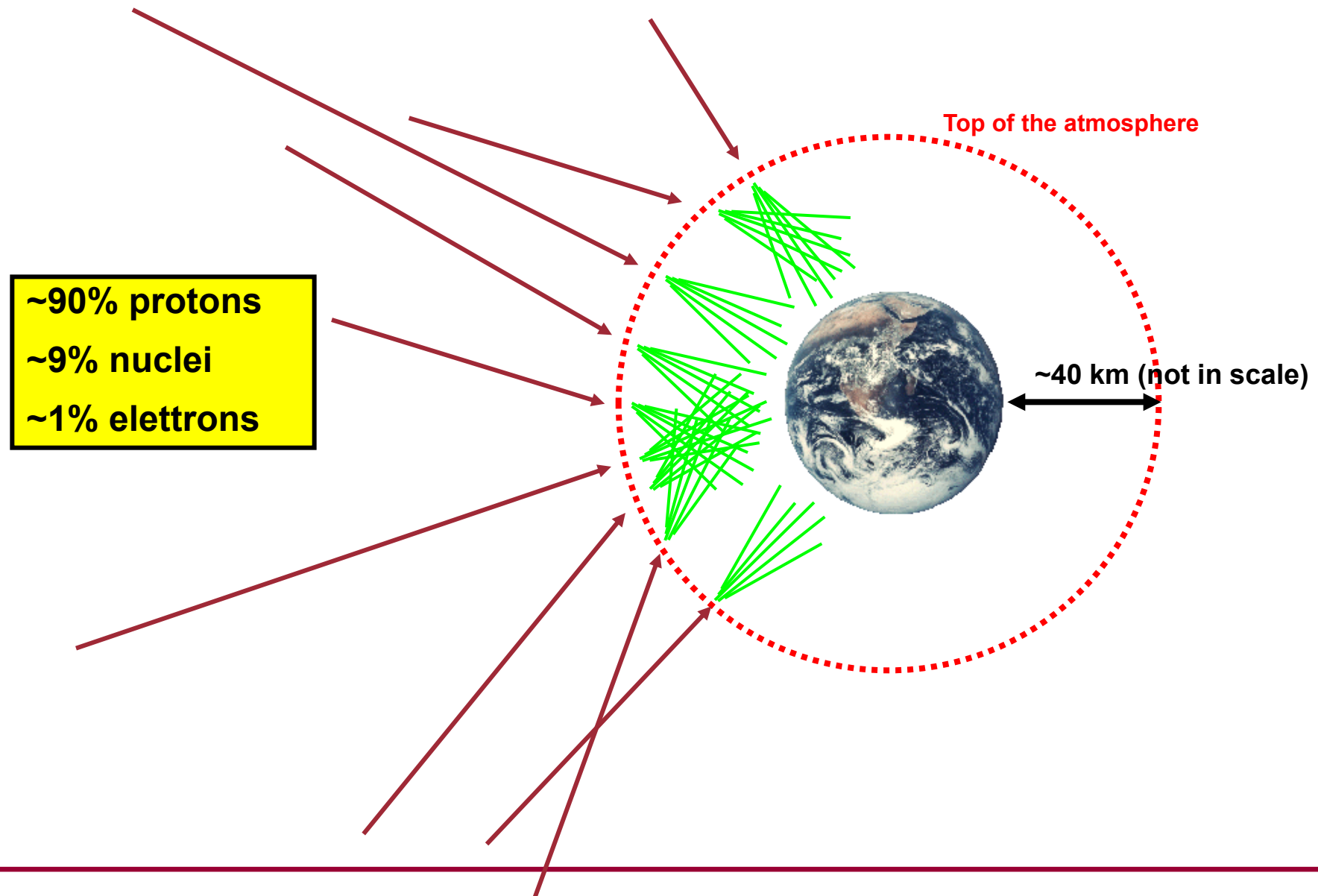
La scoperta dei raggi cosmici



Il fisico italiano Domenico Pacini effettuò importanti, ma poco noti, esperimenti di ionizzazione con un elettroscopio sulla terraferma, in mare e sott'acqua. Concluse che nell'atmosfera era presente una radiazione penetrante, indipendente dal materiale radioattivo presente nella crosta terrestre...!

1911-13: Hess progettò elettroscopi di tipo Wulf. Successivamente effettuò 10 voli in mongolfiera. Il 7 agosto 1912 il pallone, riempito di idrogeno, lo portò a un'altitudine di circa 5000 m. Questo volo rivelò un aumento molto significativo della ionizzazione ad alta quota. Un mese dopo il volo decisivo, Hess presentò i suoi risultati – che divennero noti come la scoperta dei raggi cosmici galattici – in un congresso a Münster.

A modern picture of the cosmic radiation

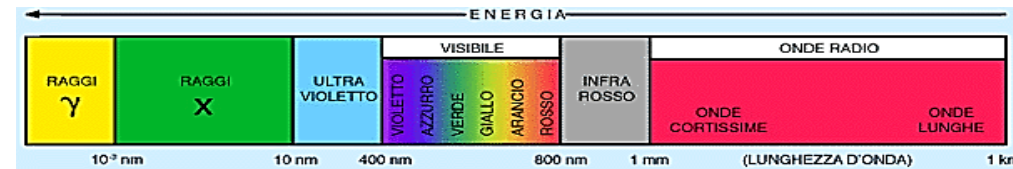
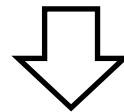


Quale è l'origine dei raggi cosmici?

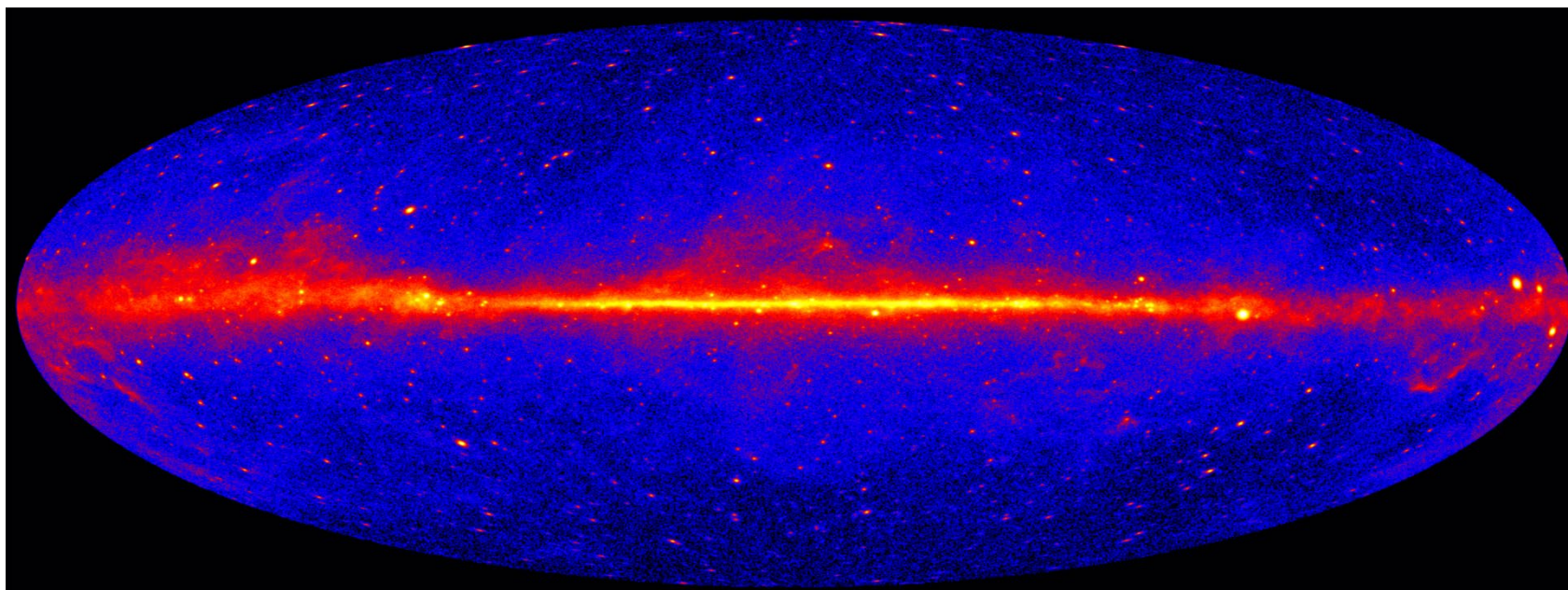
Mappa del cielo



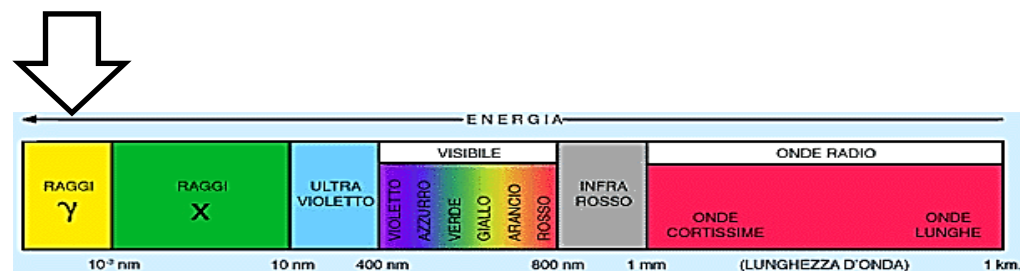
La Via Lattea vista attraverso un telescopio ottico



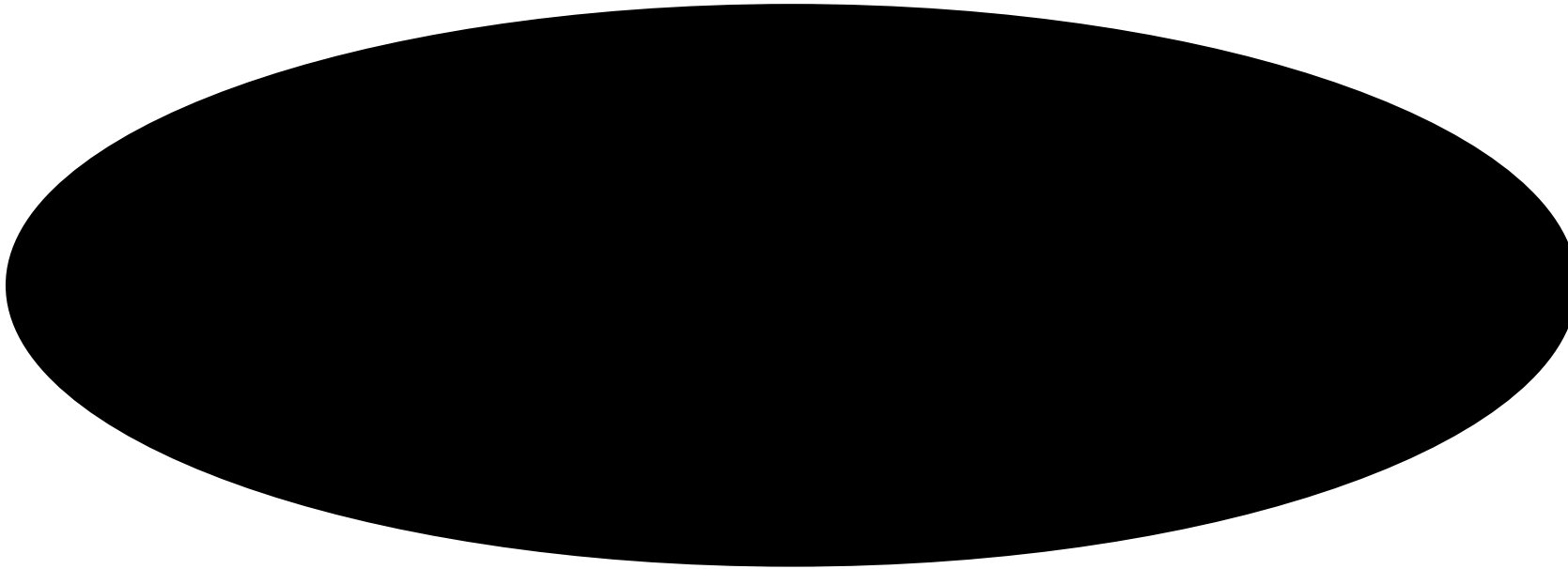
Mappa del cielo



La Via Lattea vista attraverso un rivelatore di raggi gamma

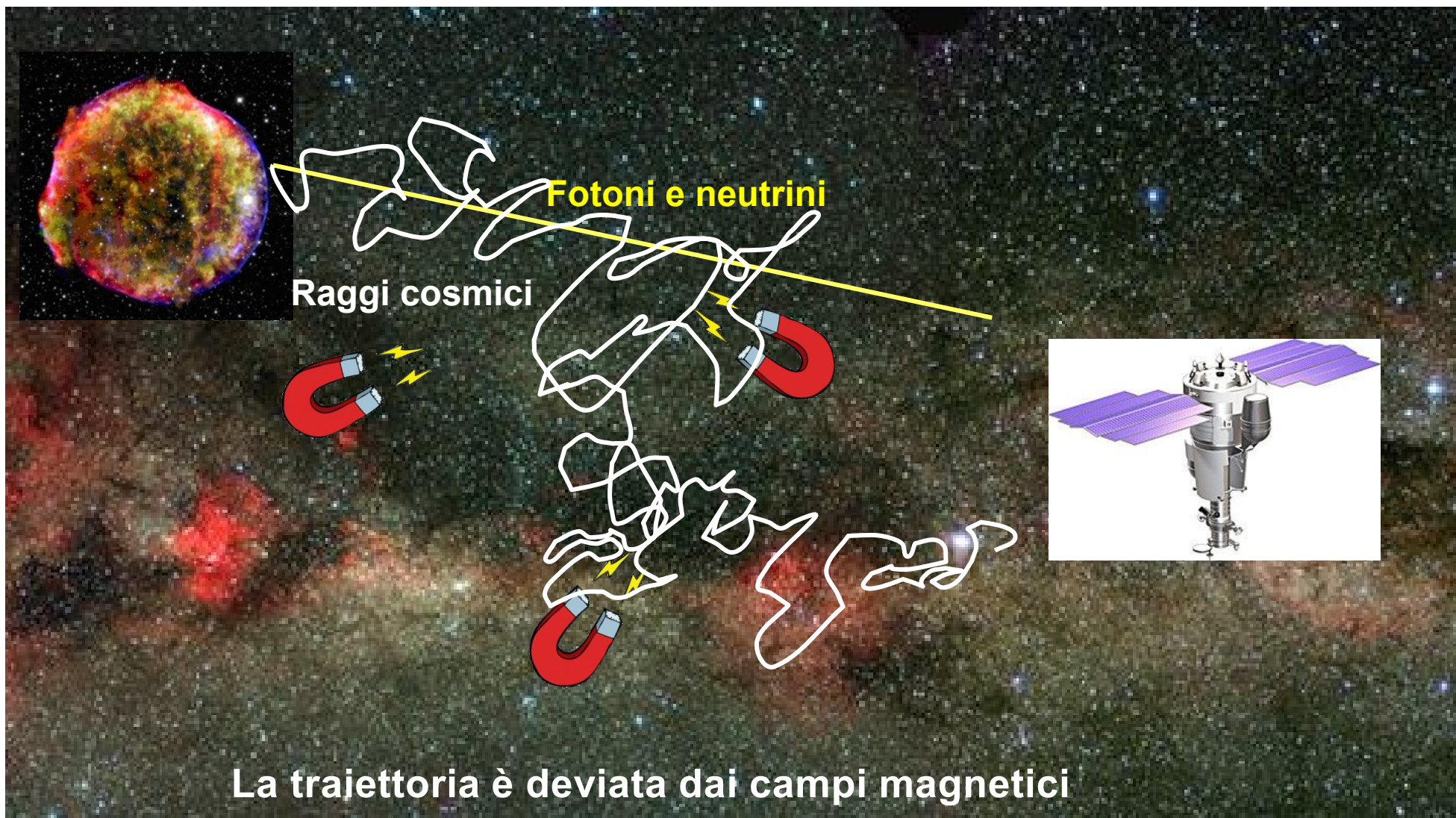


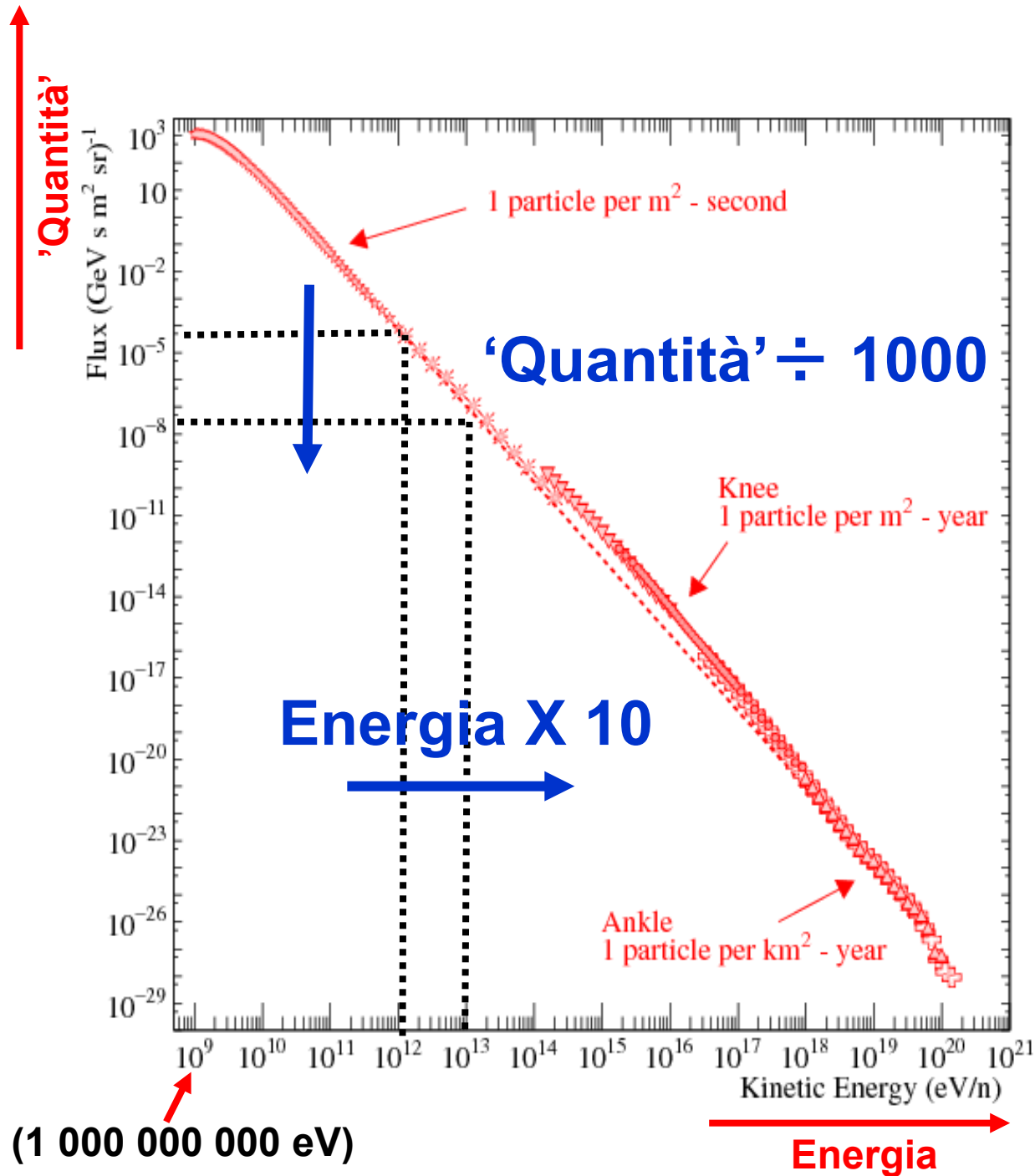
Mappa del cielo



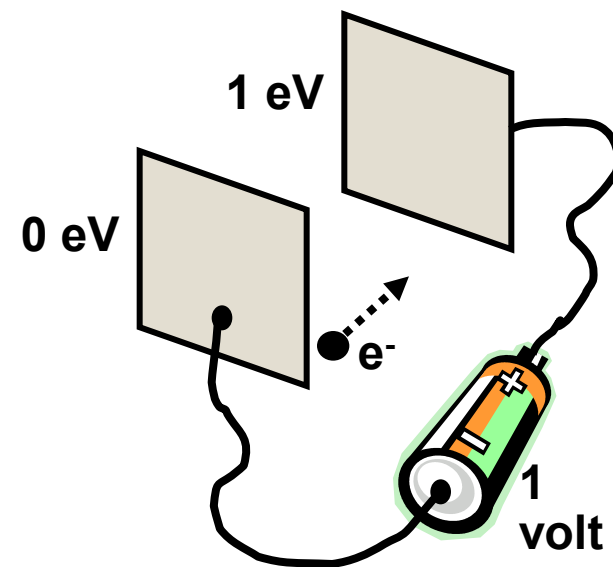
La Via Lattea vista attraverso un rivelatore di RAGGI COSMICI

I raggi cosmici sono particelle massive, elettricamente cariche

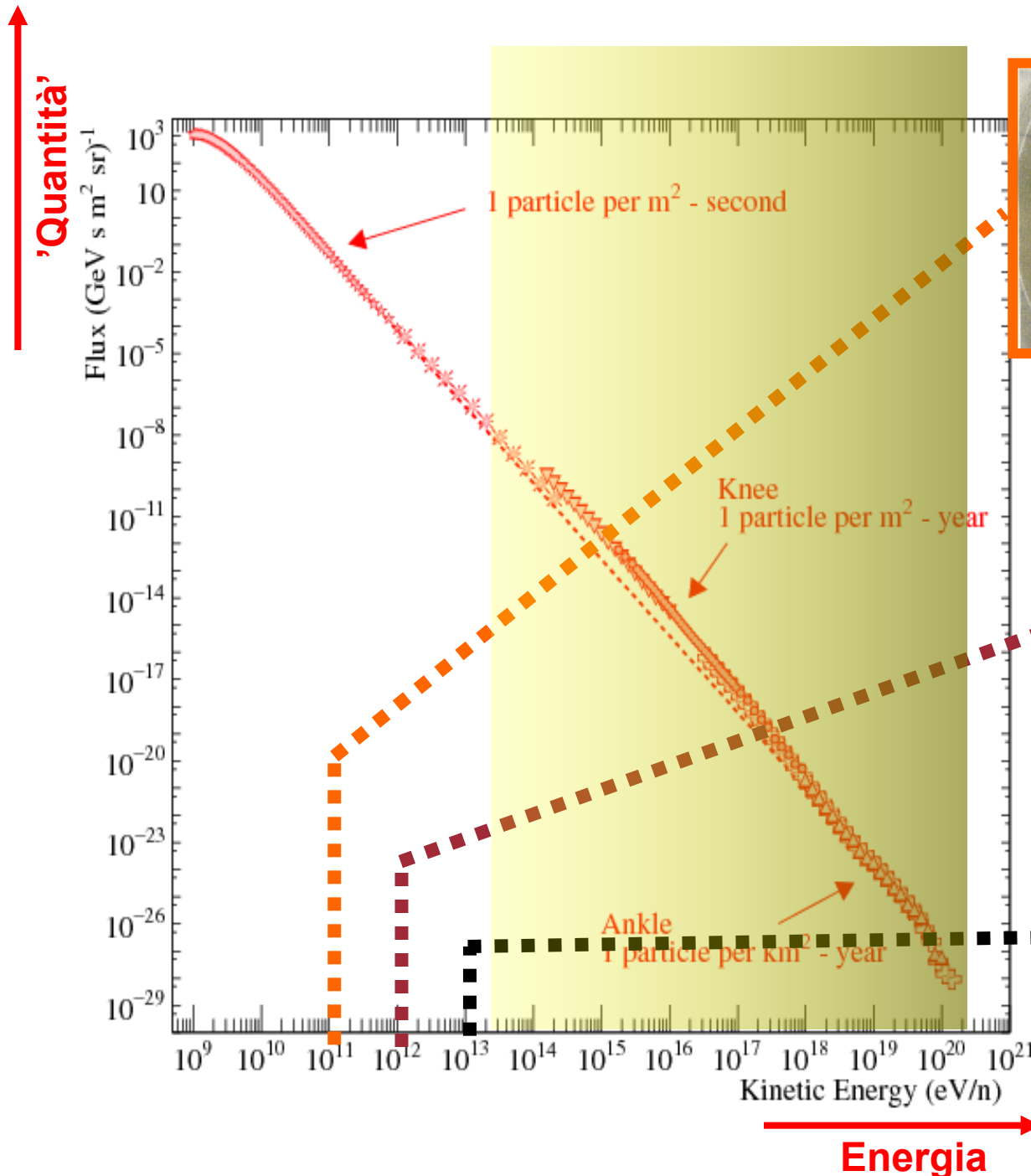




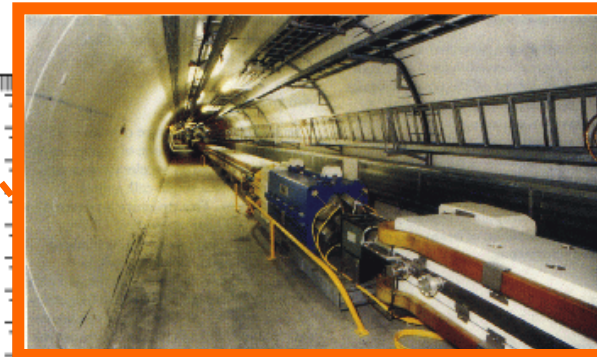
• $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joules}$



• Energia di una molecola d'aria in questa stanza = 0.03 eV



[LEP / CERN]



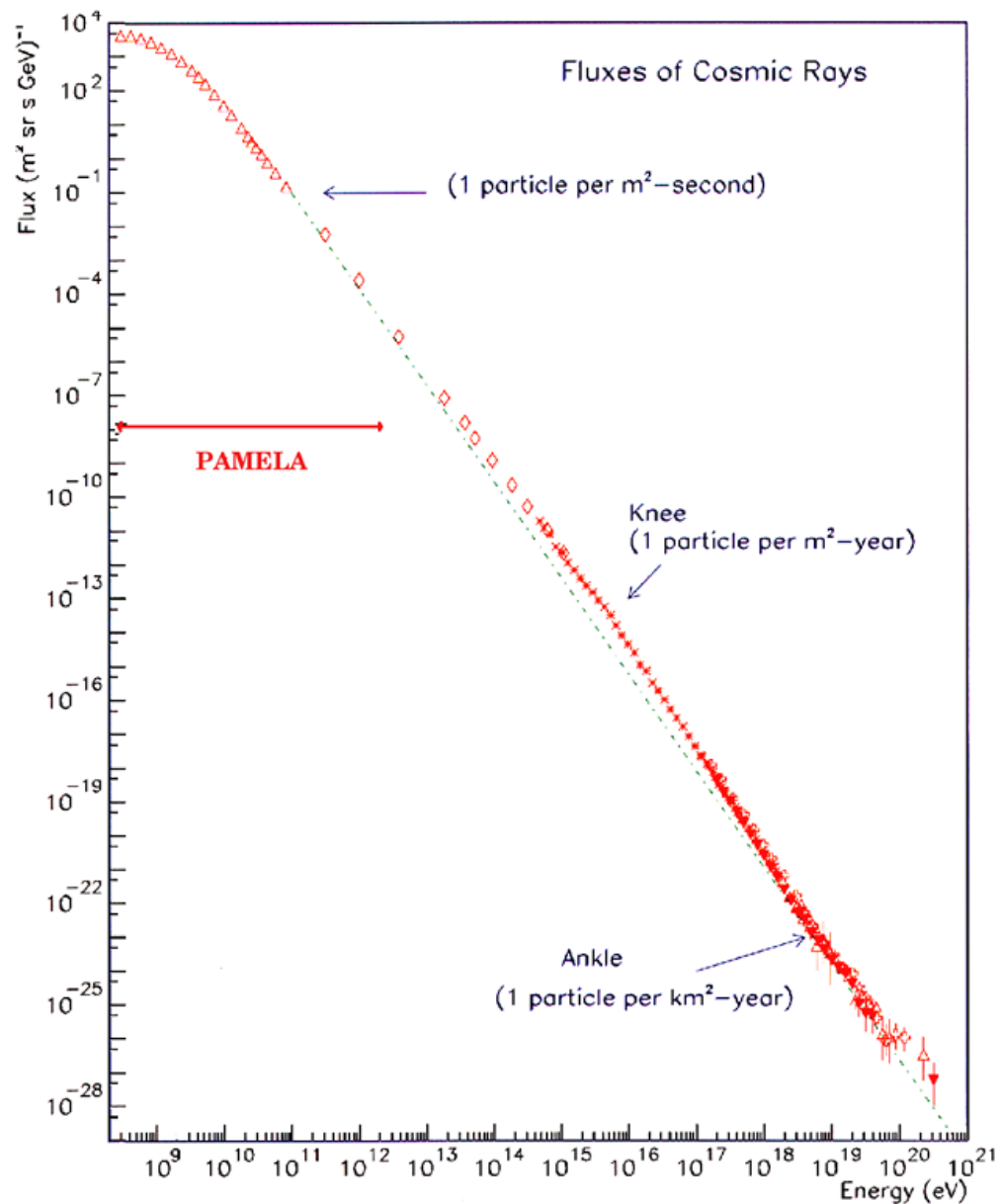
[Tevatron / Fermilab]



[LHC / CERN]



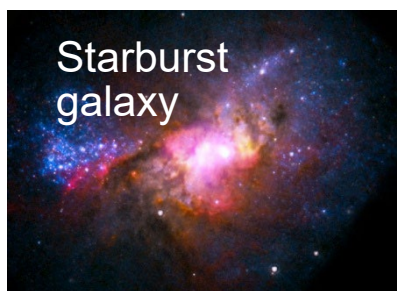
Lo spettro energetico dei Raggi Cosmici



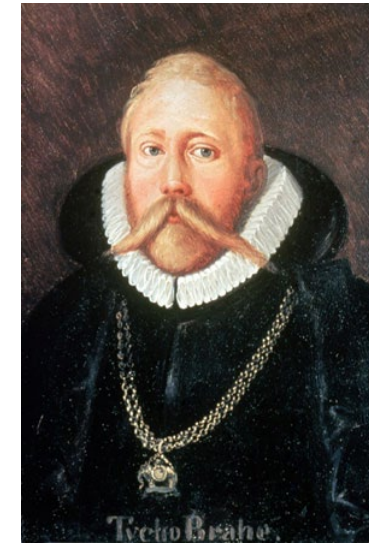
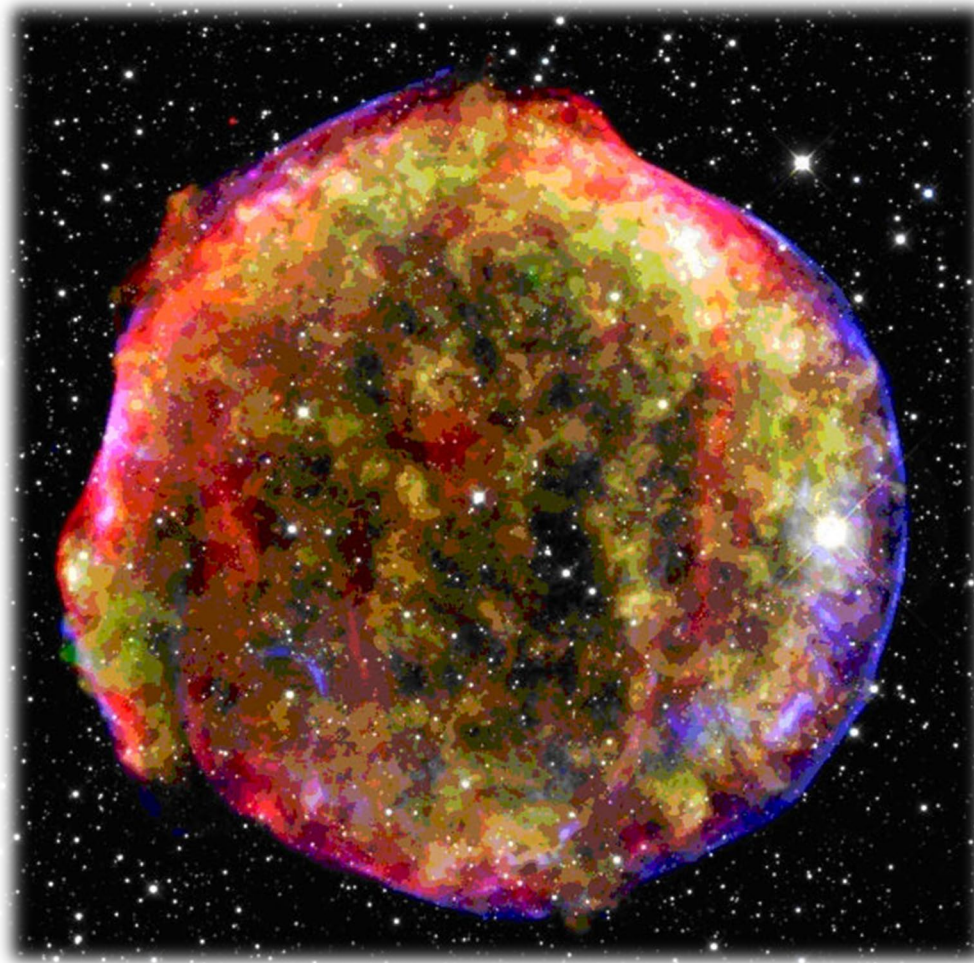
Lo spettro in energia dei Raggi Cosmici può essere descritto in buona approssimazione da una legge di potenza:

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\gamma}$$

Possibili sorgenti di raggi cosmici:



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



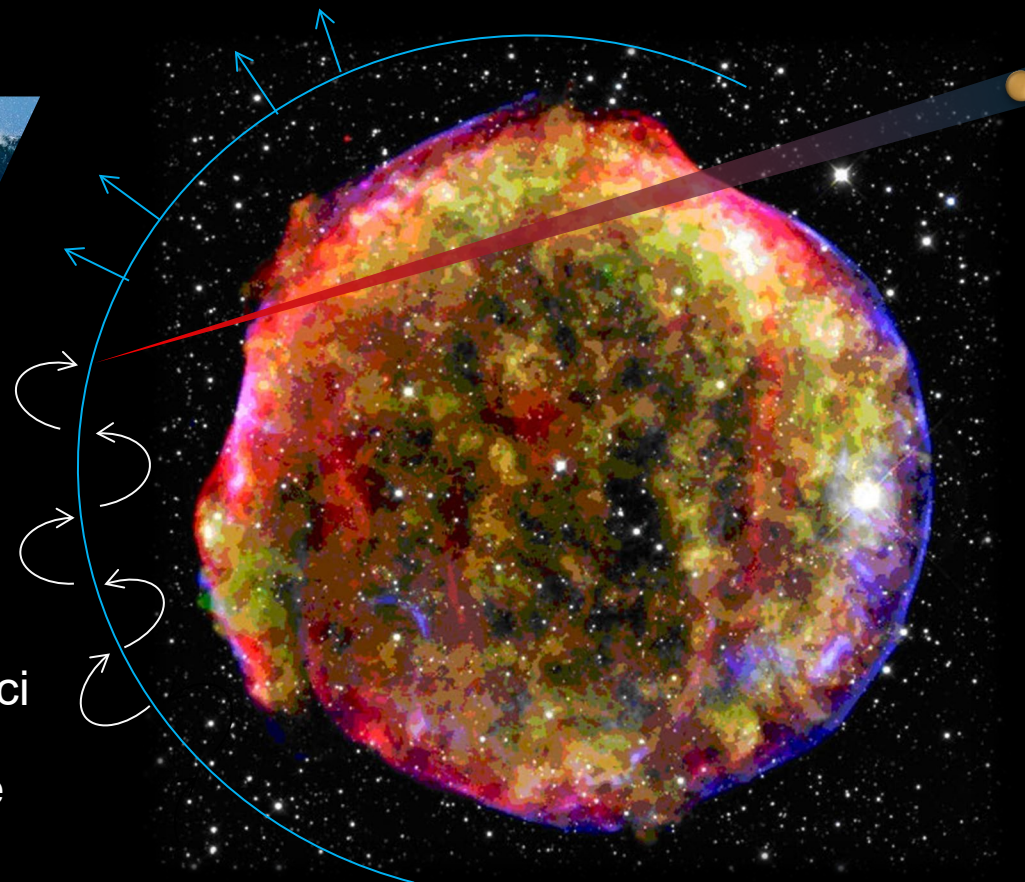
Resto della supernova
Tycho SN 1572
(spettro X)

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

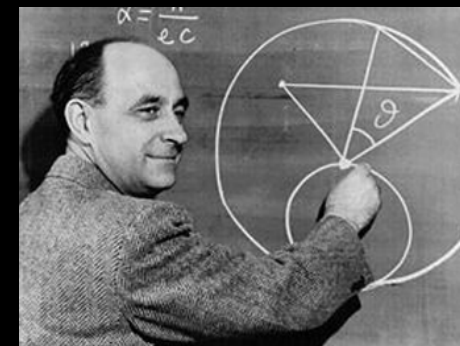
Onda d'urto in espansione



Nuclei atomici del mezzo interstellare

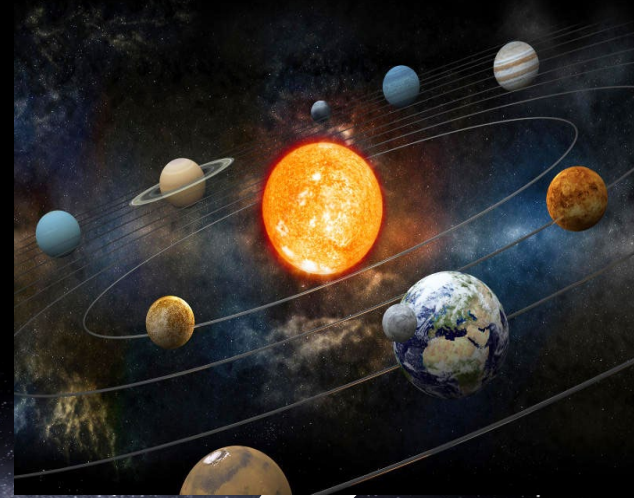
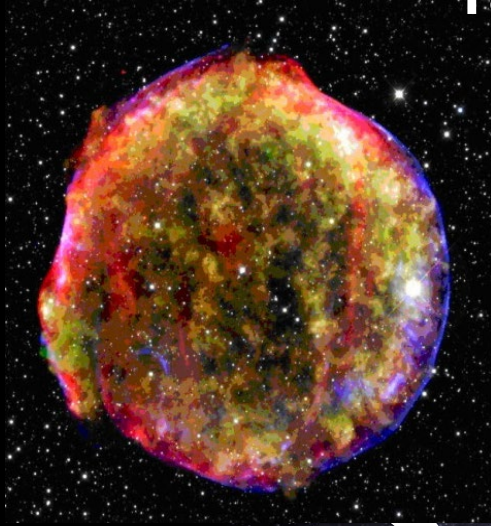


**RAGGI
COSMICI**



Accelerazione di Fermi

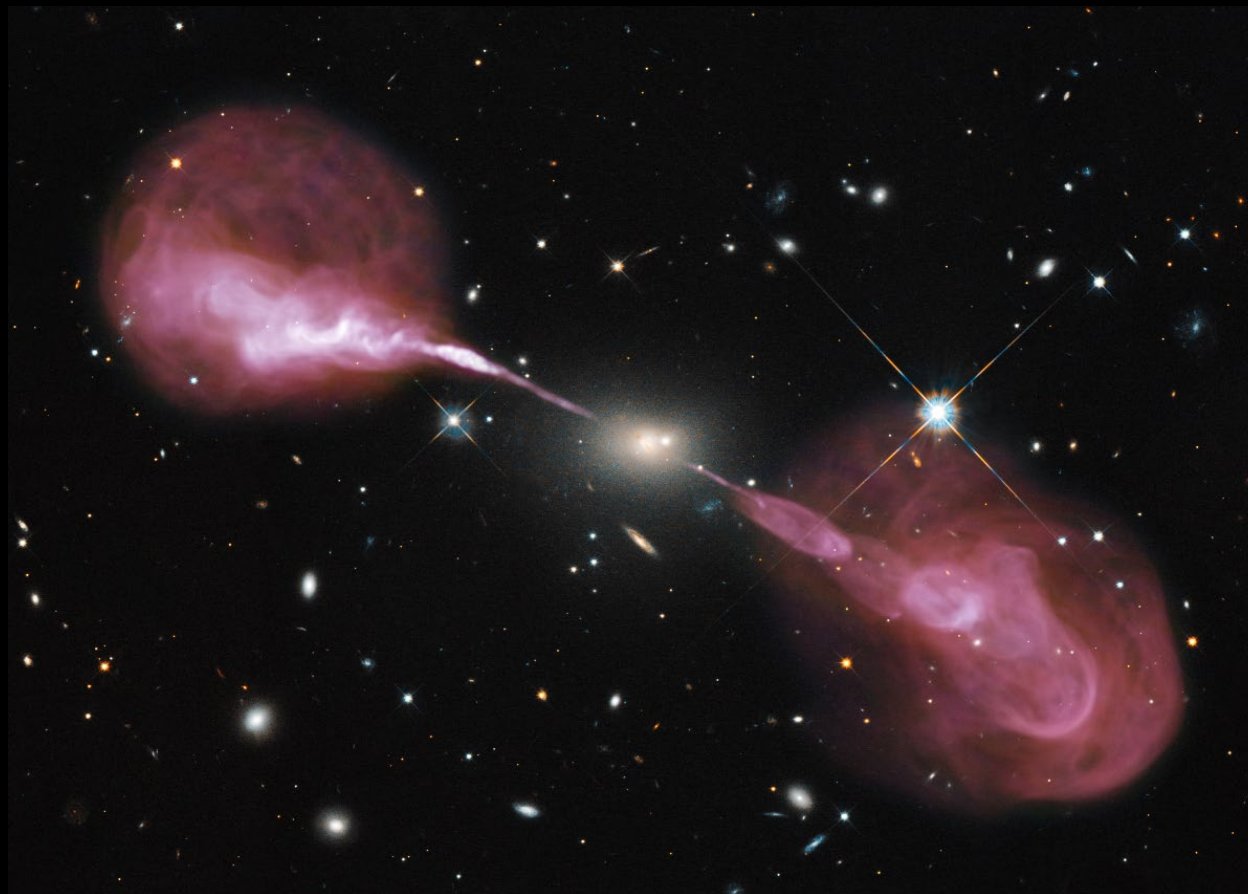
Le supernovae sono localizzate all'interno della **Galassia**
Una volta emessi dalle sorgenti, rimangono confinati per
circa 10 milioni di anni, tempo durante il quale possono
raggiungere il **Sistema Solare**



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

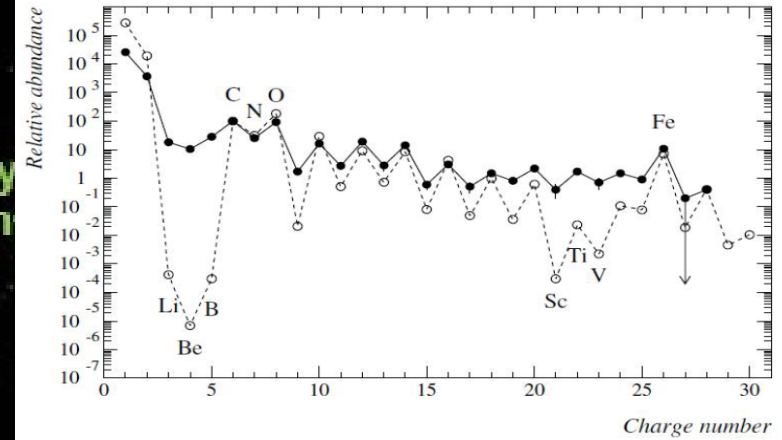
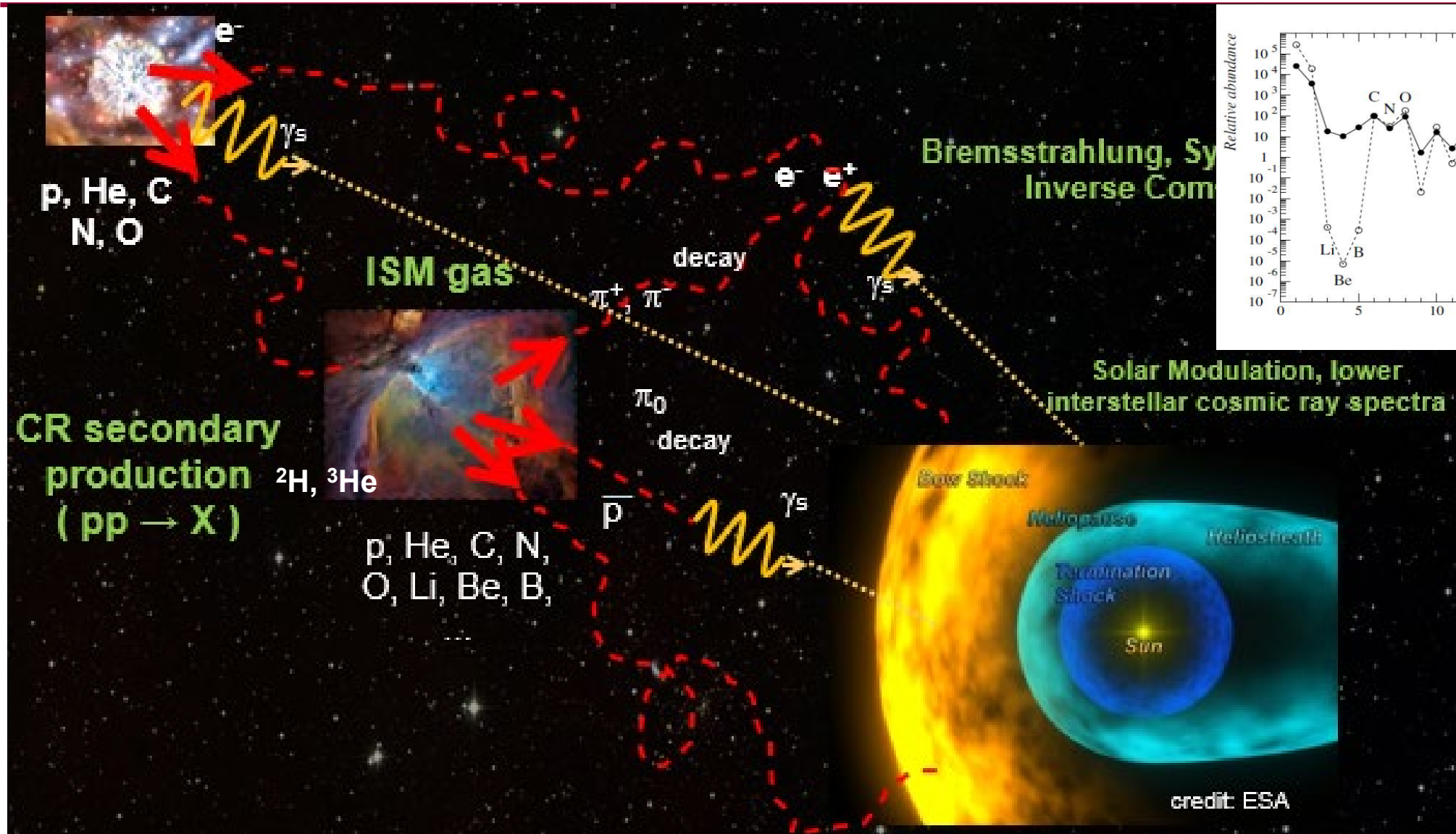
Immagine composita
della galassia con nucleo
attivo Hercules A
(radio e visibile)

Credit: NASA, ESA, S. Baum and C. O'Dea (RIT),
R. Perley and W. Cotton (NRAO/AUI/NSF), and
the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)



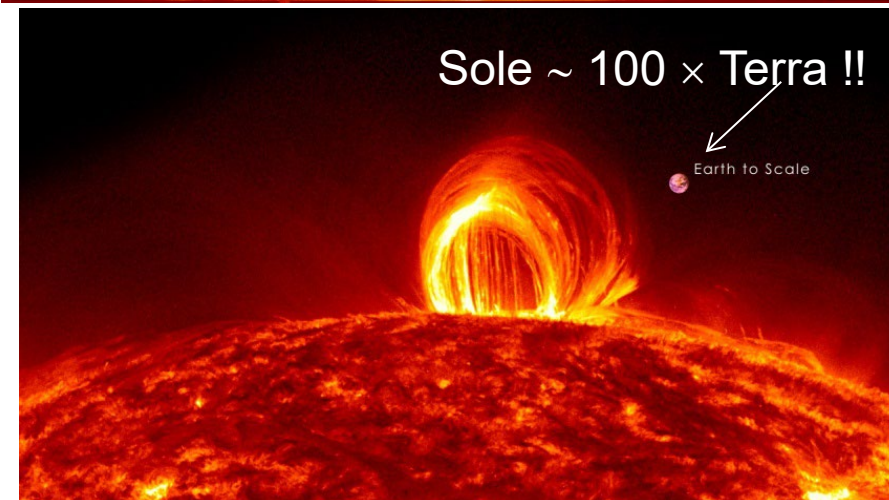
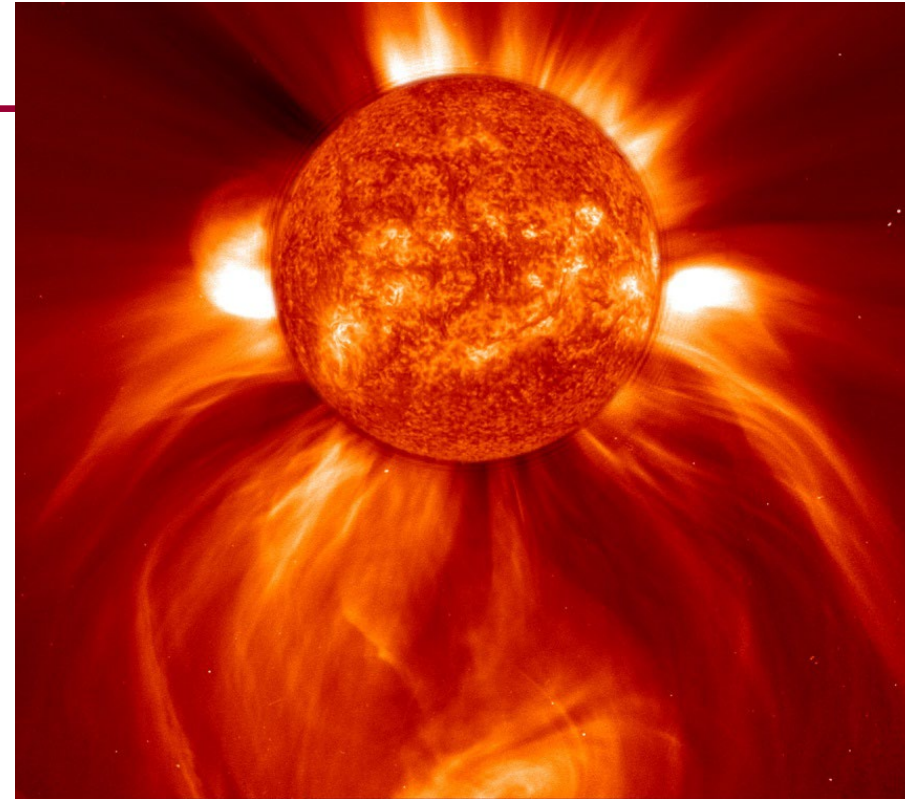
Si pensa provengano da galassie lontane dal cui centro buchi neri di grande massa emettono potenti getti di plasma in grado di accelerare particelle

La “vita” dei raggi cosmici

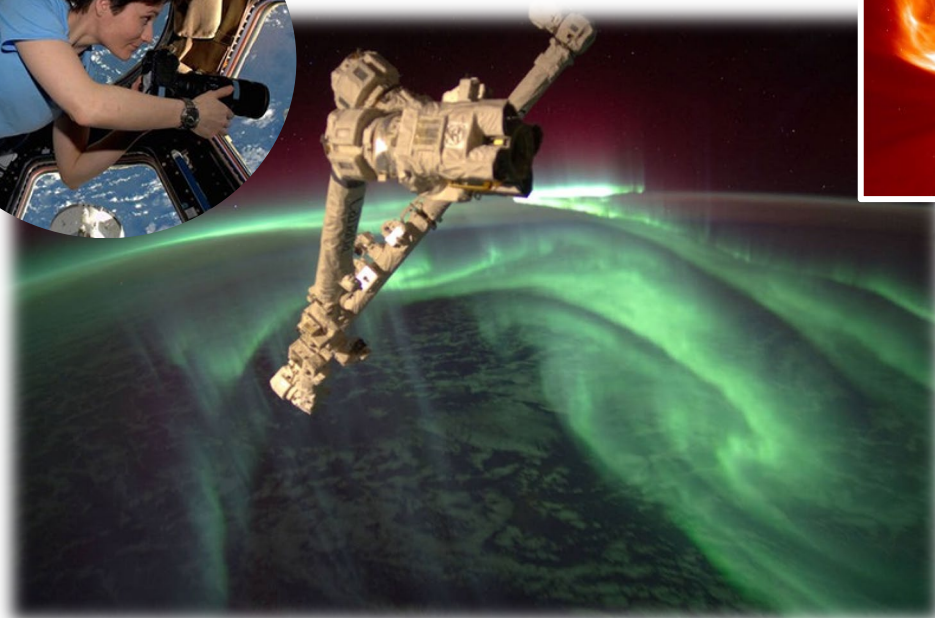


Anche il **Sole** è una sorgente di raggi cosmici.

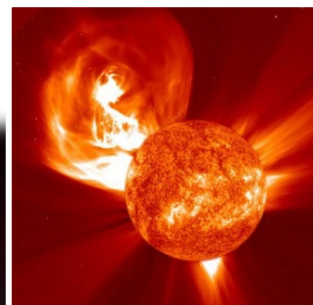
Vengono accelerati durante le **eruzioni solari** e raggiungono la Terra in poche ore
(nell'arco di poche ore il flusso di particelle aumenta fino a 10000 volte!)



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)

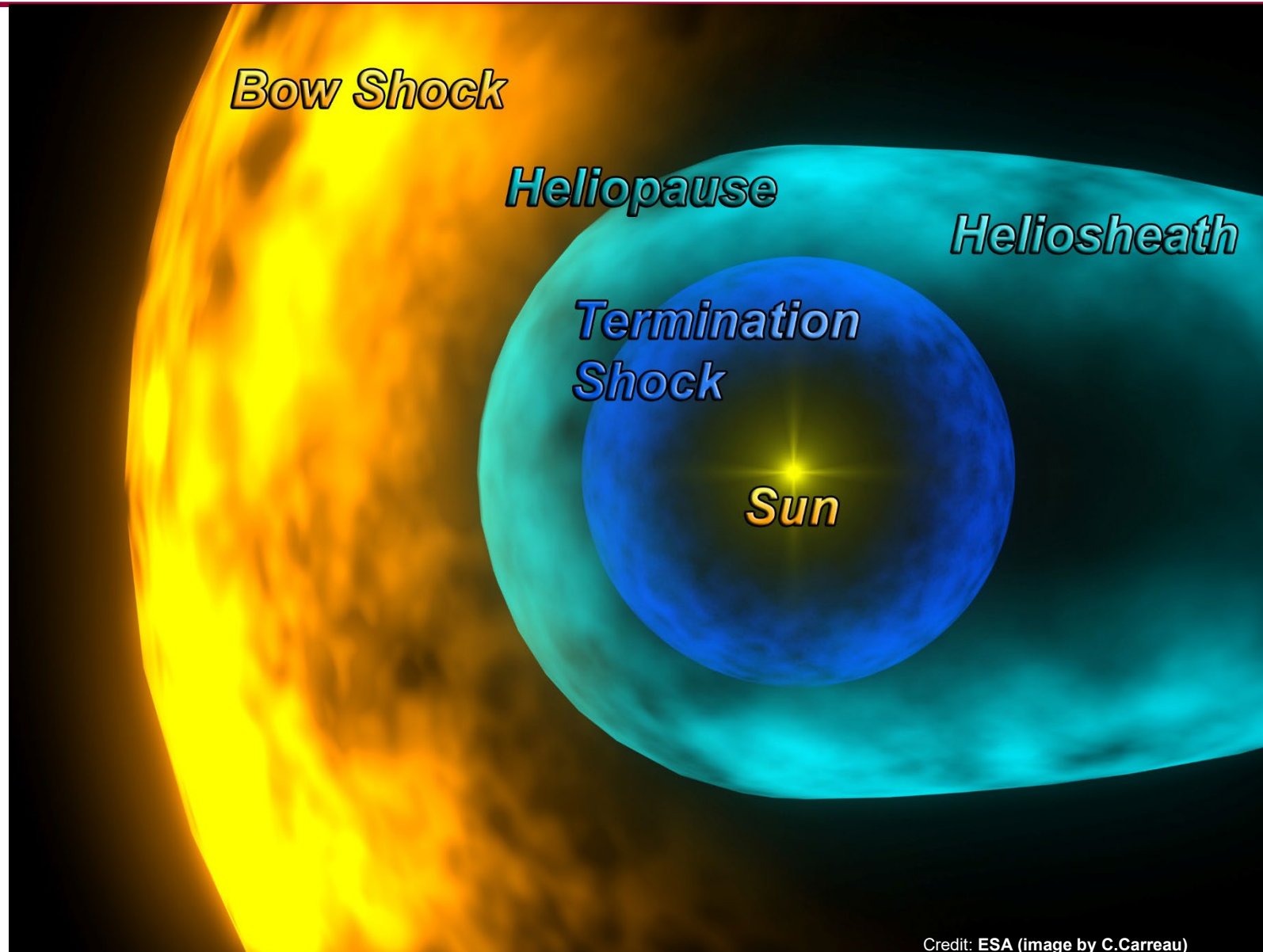


Aurora australe vista dalla Stazione Spaziale Internazionale



Aurora boreale vista dall'Alaska

L'Eliosfera



Regione dello spazio permeata dal vento solare, un plasma ipersonico di particelle cariche e di alta energia emesso dal Sole.

Il vento solare è generato dall'espansione continua della corona solare nello spazio interplanetario.

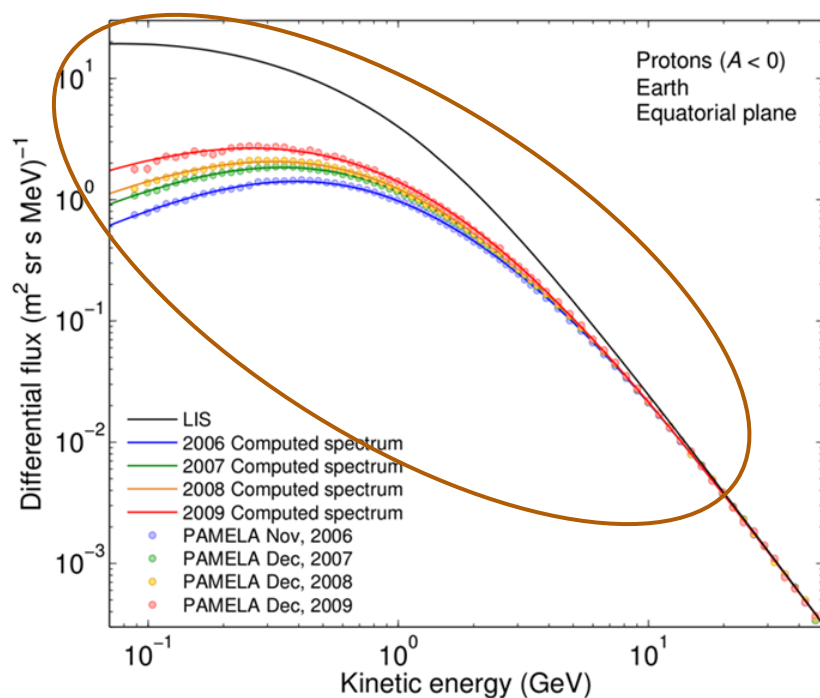
Nel vento solare è congelato il campo magnetico solare che viene trasportato fino ai confini più remoti del Sistema Solare creando il campo magnetico eliosferico.

Gli effetti di modulazione solare dei Raggi Cosmici dovuti alla propagazione in Eliosfera

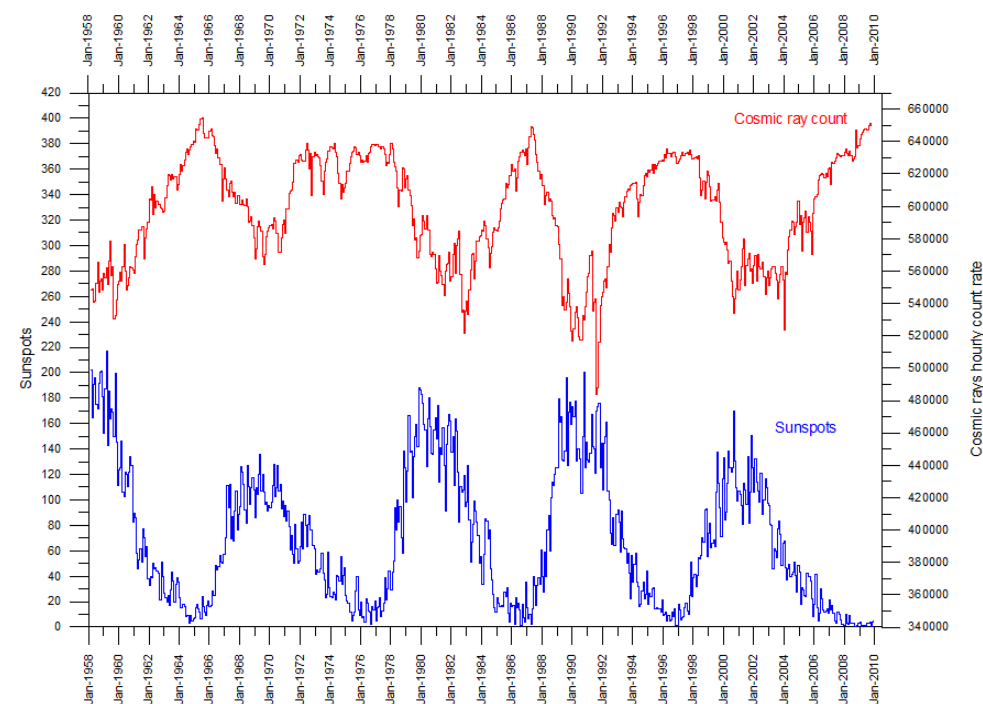
Interazione con il vento solare e il campo magnetico eliosferico

effetti di modulazione solare sotto alcune decine di GeVs

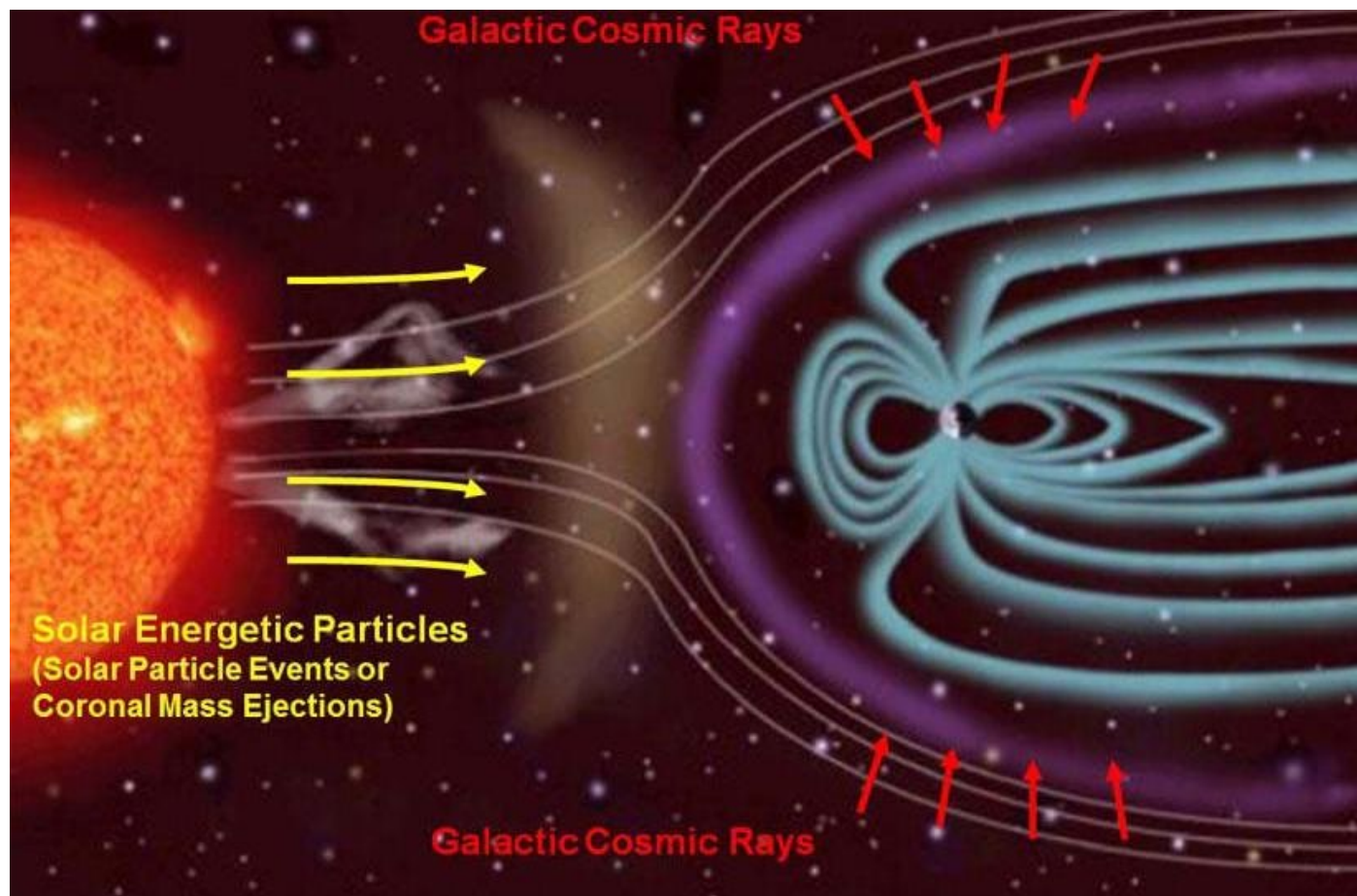
Chiara **diminuzione dell'intensità** misurata dei raggi cosmici al di sotto di circa 30 GeV/n



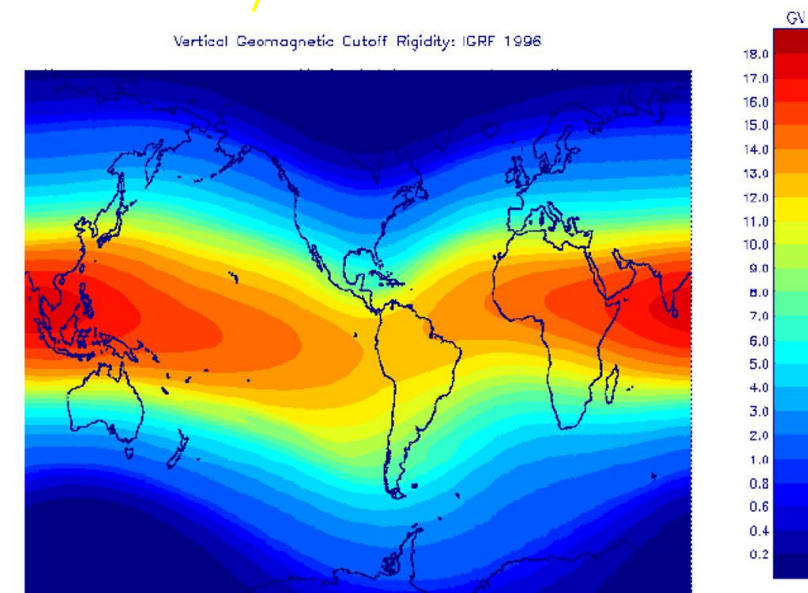
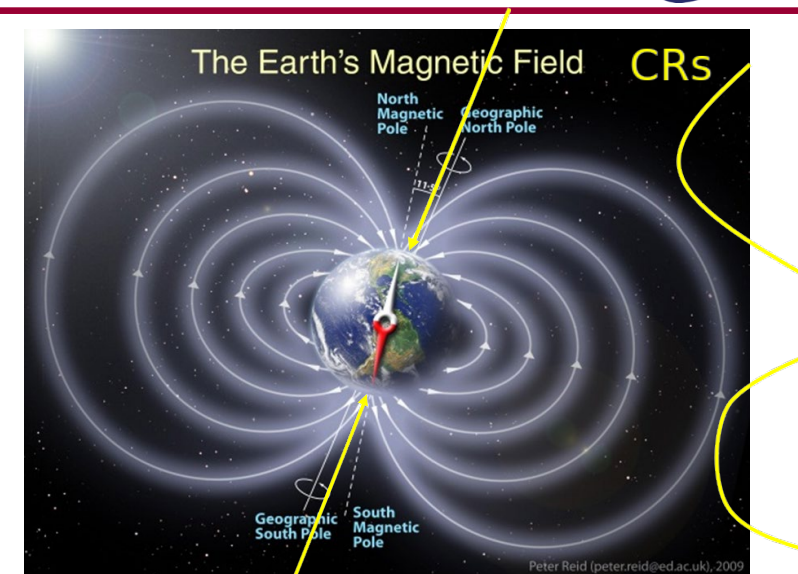
Dipendenza temporale dell'intensità dei raggi cosmici in funzione dell'attività solare



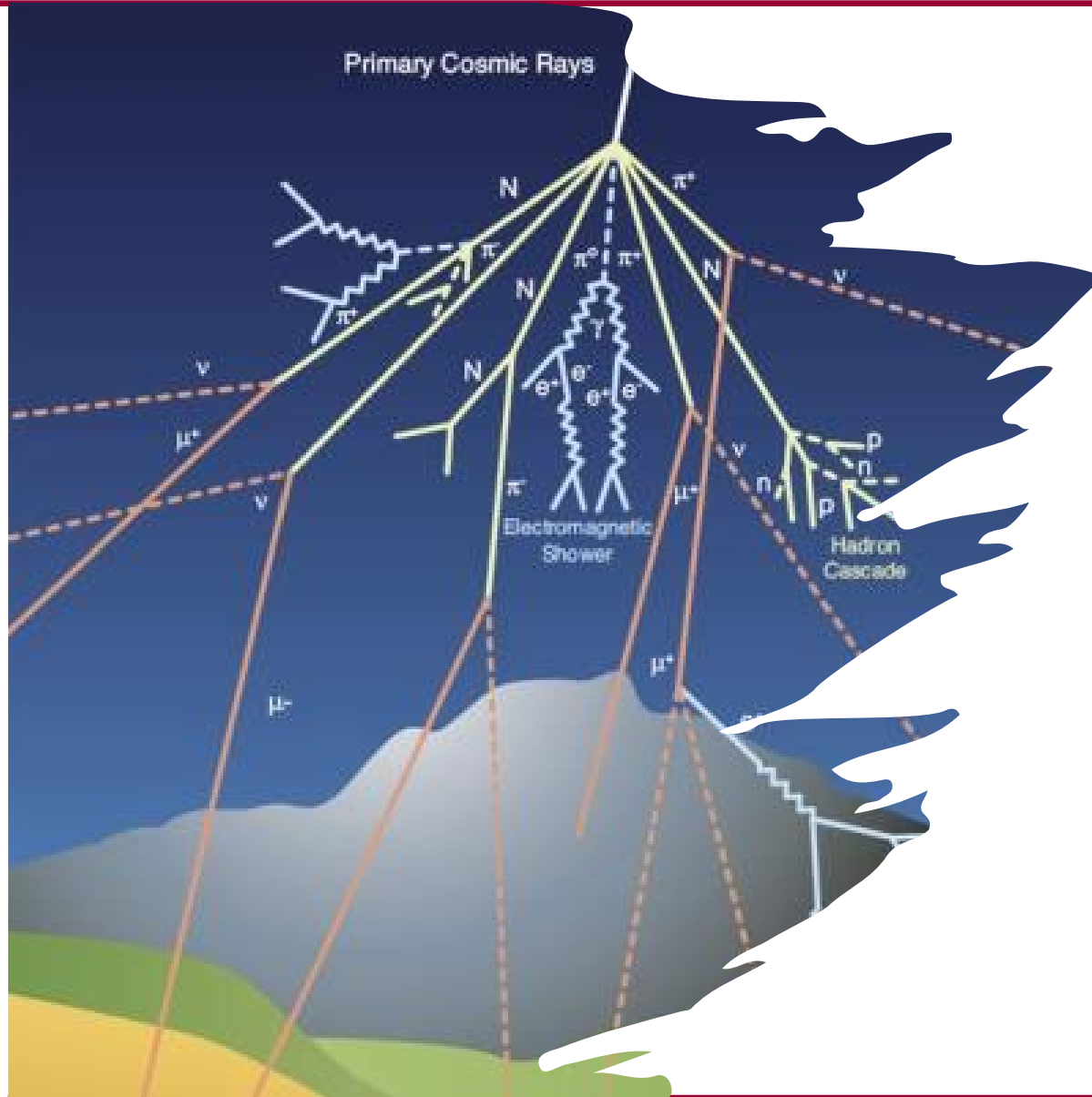
I Raggi Cosmici impattano sulla magnetosfera terrestre



I Raggi Cosmici subiscono una forza di Lorentz generata dal campo geomagnetico. Questa forza devia la traiettoria dei Raggi Cosmici in arrivo, che se non abbastanza energetici vengono allontanati via dalla magnetosfera terrestre

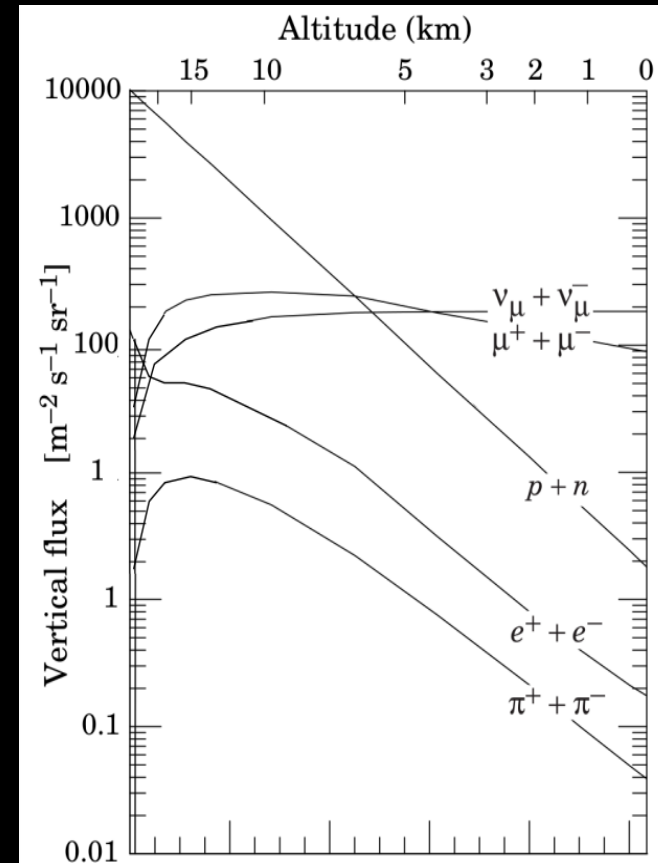
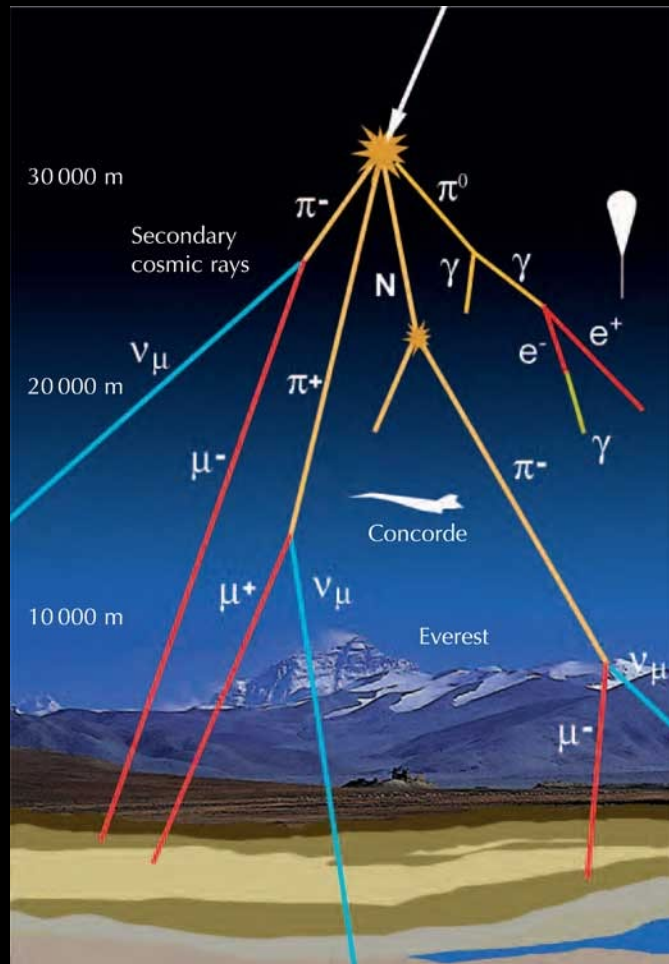


L'interazione dei Raggi Cosmici con l'atmosfera terrestre



- I Raggi Cosmici Primari, prevalentemente protoni e una piccola percentuale di nuclei più pesanti ed elettroni, se abbastanza energetici, riescono ad attraversare la magnetosfera e ad accedere all'atmosfera terrestre dove interagiscono producendo **sciami di particelle secondarie**, tra queste troviamo i **muoni**.
- **I muoni sono particelle altamente penetranti** che arrivano fino al livello del mare, dove rappresentano quasi il 99% dei raggi cosmici.
- Tipicamente un muone al secondo attraversa una superficie delle dimensioni della nostra mano; 600 muoni attraversano il nostro corpo ogni minuto.

L'interazione dei Raggi Cosmici con l'atmosfera terrestre



**(Neutrini*)
Muoni**

Nucleoni

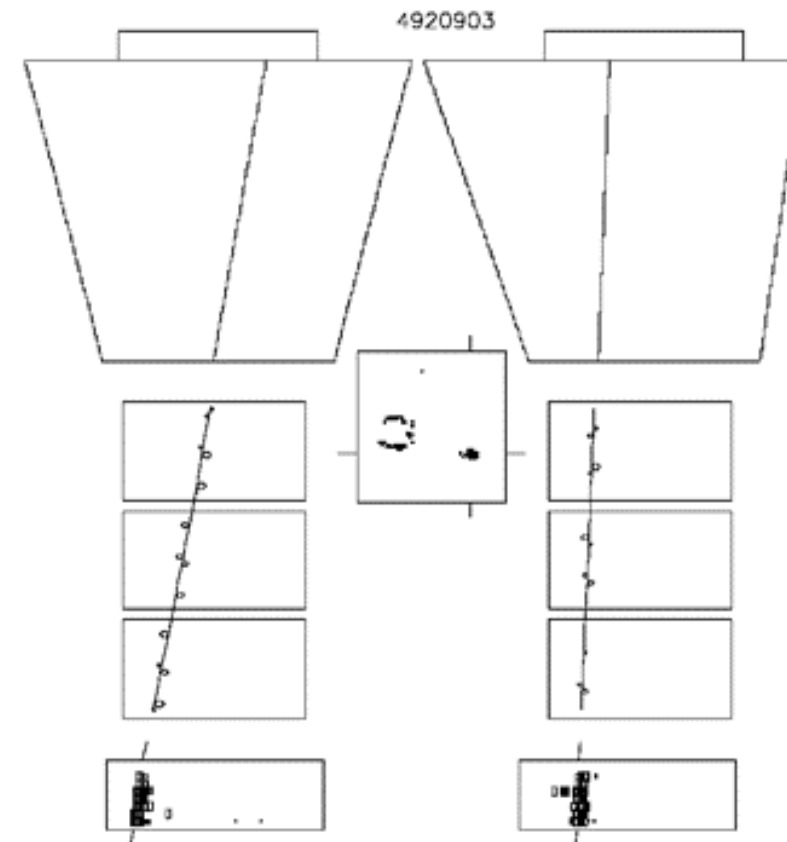
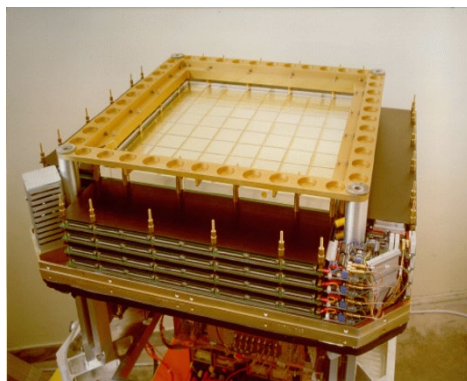
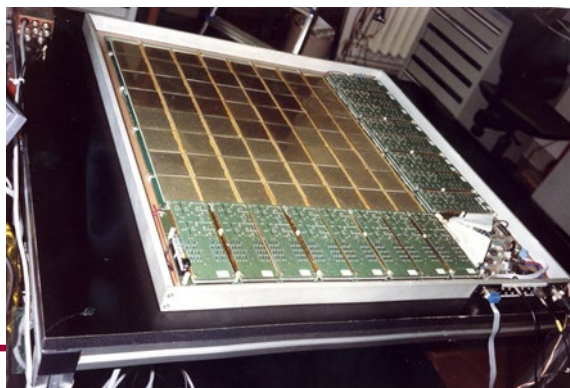
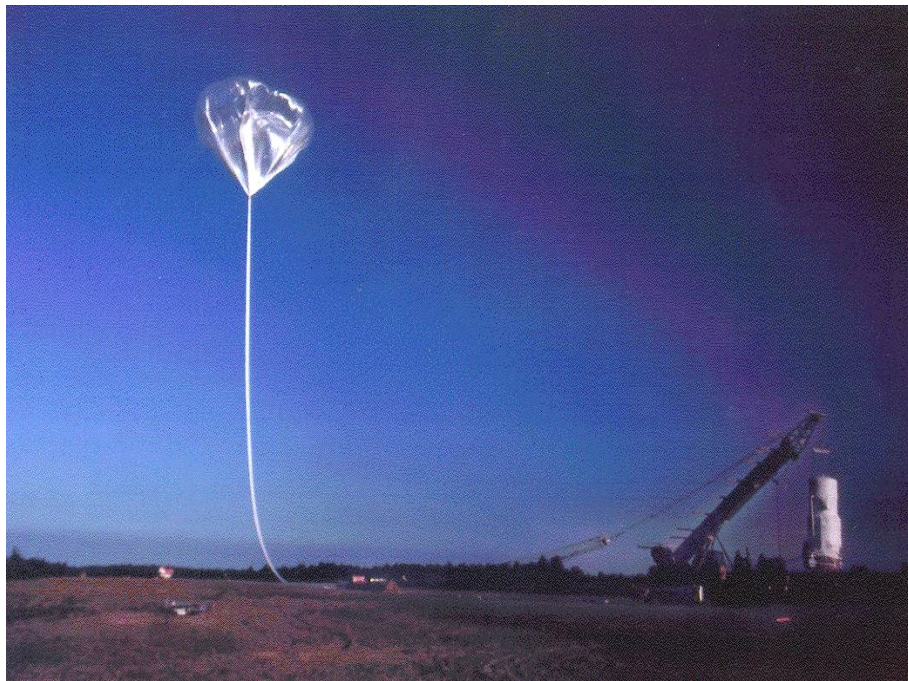
**Elettroni
Pioni**

(*difficilmente rivelabili perche` debolmente interagenti)

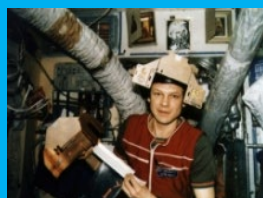
Approfondimento sugli esperimenti di Raggi Cosmici passati e presenti della Sezione INFN di Trieste

Balloon Experiments

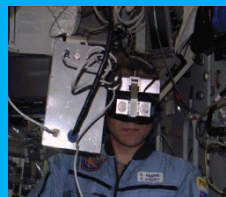
MASS-89, 91, TS-93, CAPRICE 94-97-98



Def 0.14 Sigdef 0.002 Rig 6.90
Nx 18 Ny 11 Chix 0.7 ChiY 2.4



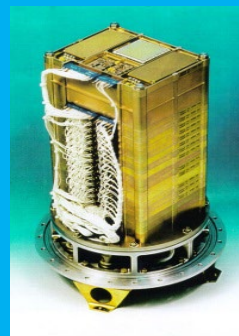
SILEYE-1
1995



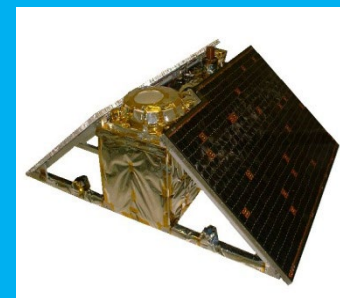
SILEYE-2
1998



SILEYE-3
2002



NINA 1
1998



NINA 2
2000

Russia:



Moscow
St. Petersburg

Germany:



Siegen

Sweden:



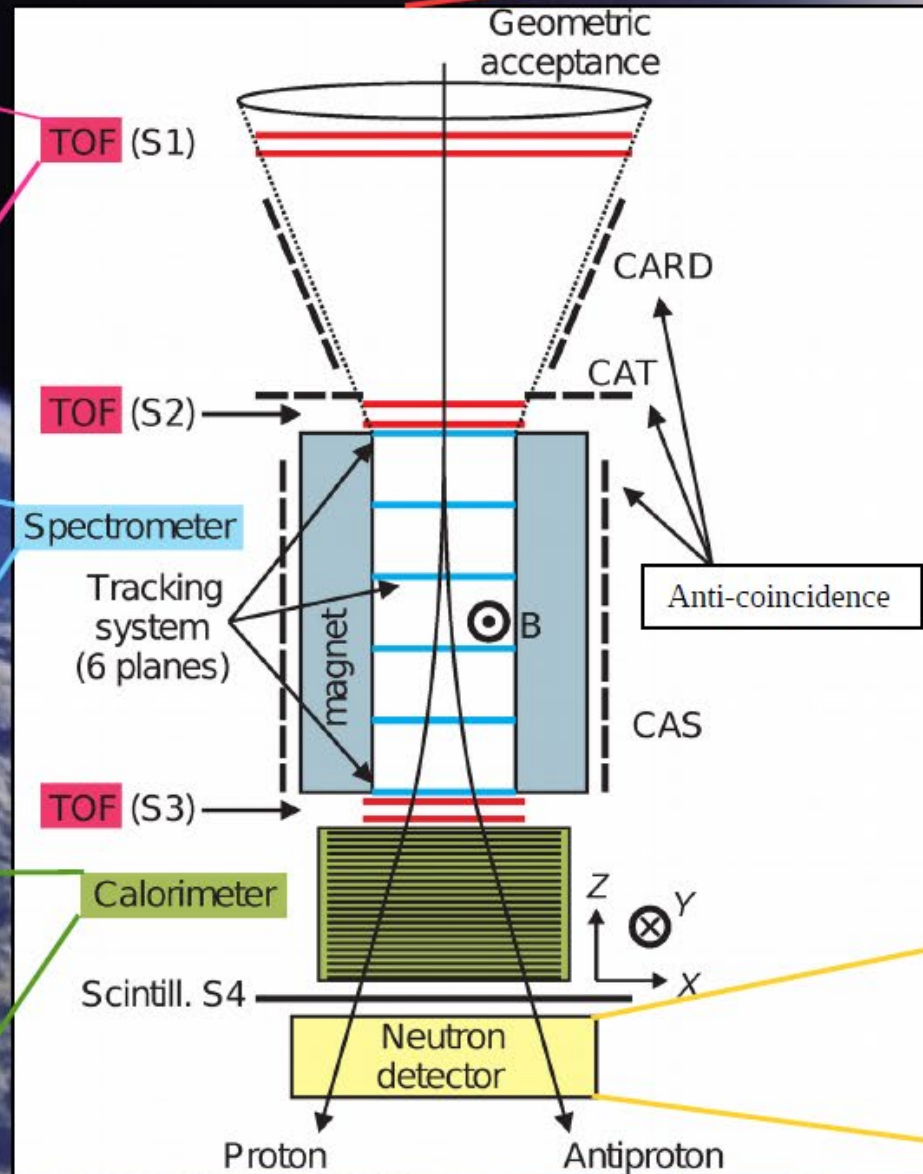
KTH, Stockholm

The PAMELA instrument

24 bars of plastic scintillator arranged in six plane, S11, S12, S21, S22, S31, S32: velocity, absolute charge $Z < 8$.

Six planes of double side microstrip silicon detectors inside a magnetic cavity: rigidity, absolute charge $Z < 6$, charge sign.

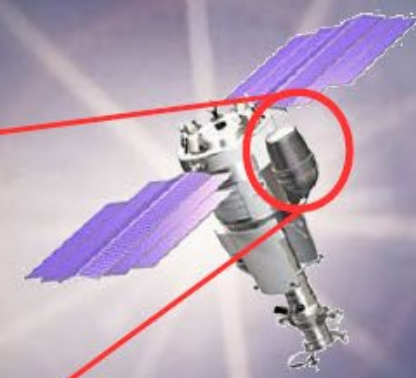
44 planes of Si detector interleaved with 22 tungsten planes, 16.3 radiation length: hadron lepton separation.



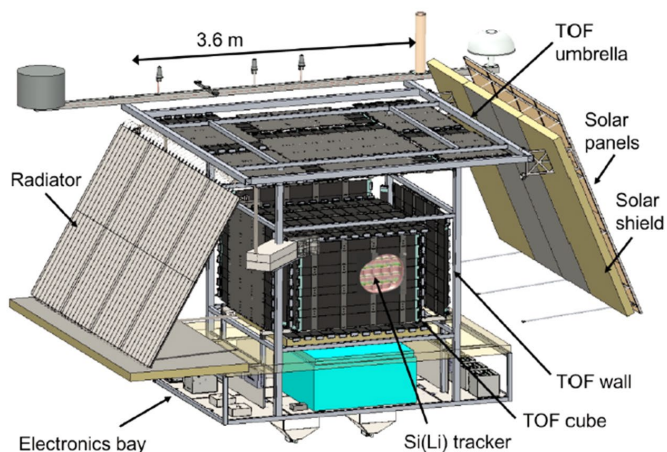
GF: 21.5 cm² sr
Mass: 470 kg
Size: 130x70x70 cm
Power budget: 360 W

(CAS, CARD e CAT) nine planes of plastic scintillator around the apparatus: reject false triggers or multi-particle events.

36 proportional counters filled with ³He: improve hadron rejection.



L'esperimento GAPS



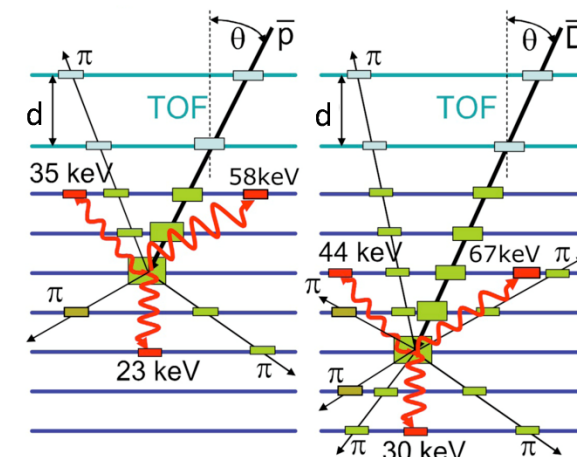
General AntiParticle Specrometer

- ❑ Ideato per la rivelazione di **antiprotoni** ed **antideutoni** nei raggi cosmici di bassa energia ($E < 0.25 \text{ GeV/n}$).
- ❑ Misura in **tre voli** su pallone aerostatico in **Antartide**.
Primo Volo previsto: estate australe 2023-2024.
- ❑ Sistema di Tempo di Volo attorno al **tracciatore al Silicio diffuso al Litio**.

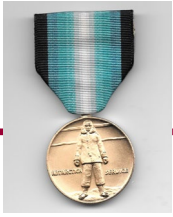


Nuova tecnica di rivelazione:

1. *Rallentamento e cattura di un antinucleo da parte di un nucleo di Si.*
2. *Formazione e decadimento con emissione di raggi X di un atomo esotico formatosi.*
3. *Annichilazione nucleo-antinucleo con conseguente stella di protoni-pioni.*
4. *Tracciamento dei prodotti della stella di annichilazione.*



Campagna di lancio di GAPS



- ❑ Integrazione dell'apparato alla base di Mc Murdo in Antartide, meta novembre inizio dicembre 2025
- ❑ Test e calibrazione apparato e run di muoni, meta dicembre 2025
- ❑ **Tentativi di lancio, da fine dicembre a inizio gennaio 2025. Lancio rinviato a dicembre 2025.**

6 gennaio



1 gennaio



24 dicembre



30 dicembre



25 dicembre



31 dicembre



7 gennaio

