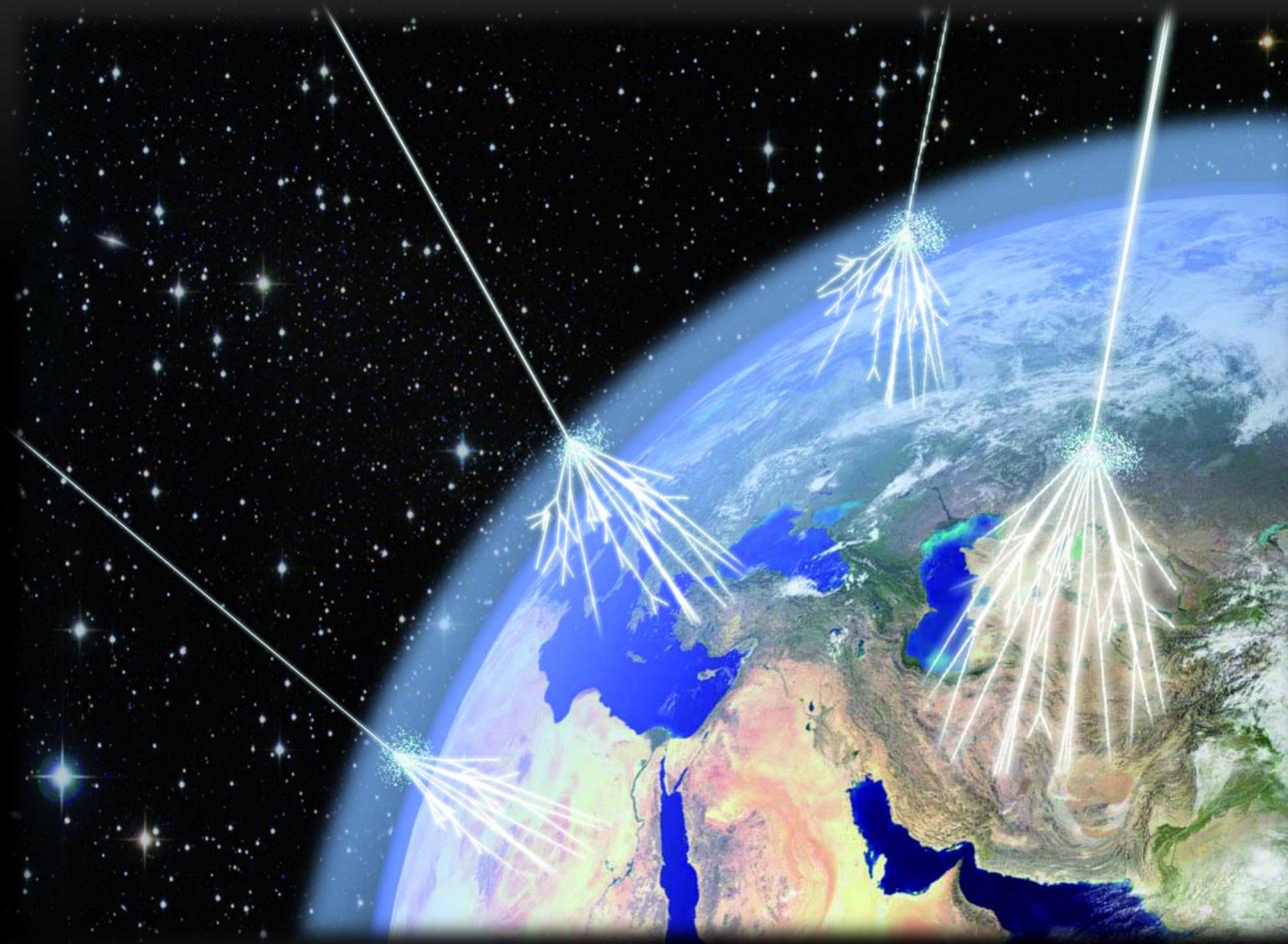


A visualization of a cosmic ray shower. A bright, multi-pointed starburst of light is at the top right, with a trail of smaller points leading to a larger, circular, multi-layered structure on the left. The background is dark with some nebula-like patterns and distant stars.

INTRODUZIONE ALLA FISICA DEI RAGGI COSMICI

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



LA SCOPERTA DEI RAGGI COSMICI

Alla fine del XIX secolo, si scoprì che elettroscopi a foglie d'oro con il passar del tempo si scaricavano anche se venivano isolati da tutte le possibili fonti di radiazione note.

Il fenomeno venne attribuito alla radioattività naturale, che si pensava avesse origine terrestre...

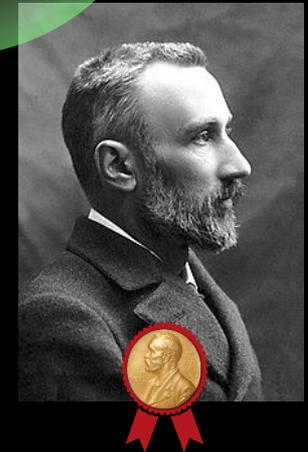
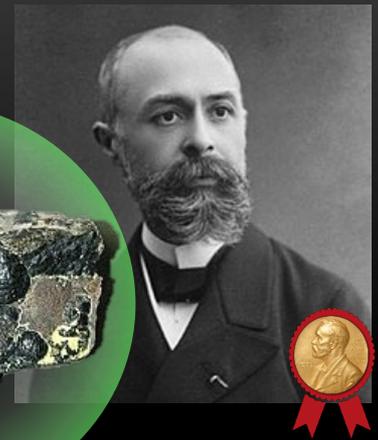
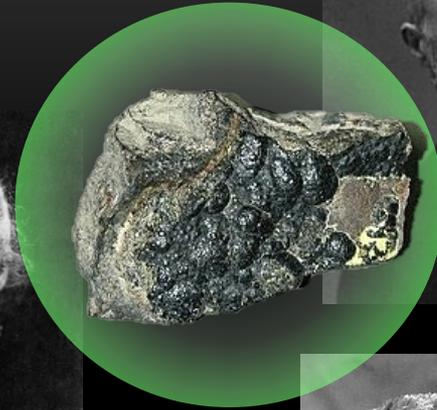
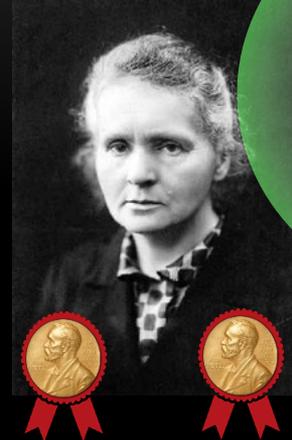


Nel 1896 A. H. Becquerel scopre il fenomeno della radioattività naturale, studiando l'uranio.

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...



1910: Padre Wulf e la torre Eiffel



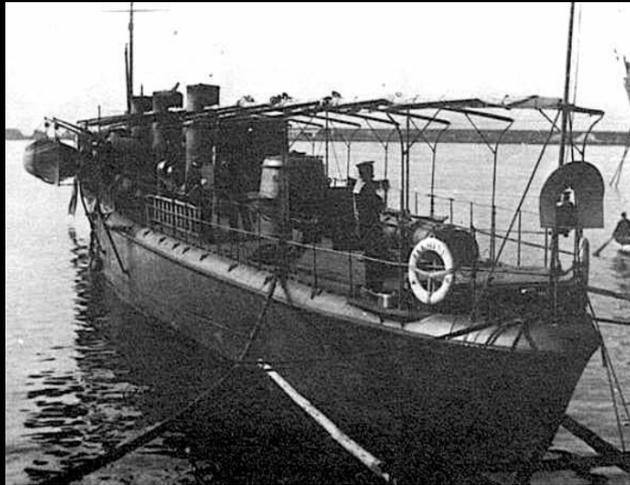
Padre Wulf scopre che a 300 metri di altezza la radioattività dell'aria **NON** è significativamente diversa da terra! Diminuisce con l'altezza ma non quanto ci si aspettava.

Padre Wulf conclude che: o l'aria assorbe molto meno del previsto la radioattività del terreno o questa radioattività non proviene dal suolo.



1910-14: Il fisico italiano Domenico Pacini conduce delle importanti, ma poco note, misure di ionizzazione con un elettroscopio sulla terra ferma, su navi e sotto alcuni metri d'acqua.

Per spiegare I risultati conclude che ci deve essere una **radiazione penetrante nell'atmosfera** indipendentemente dalla presenza di materiale radiativo nella crosta terrestre!



1912: Victor Hess

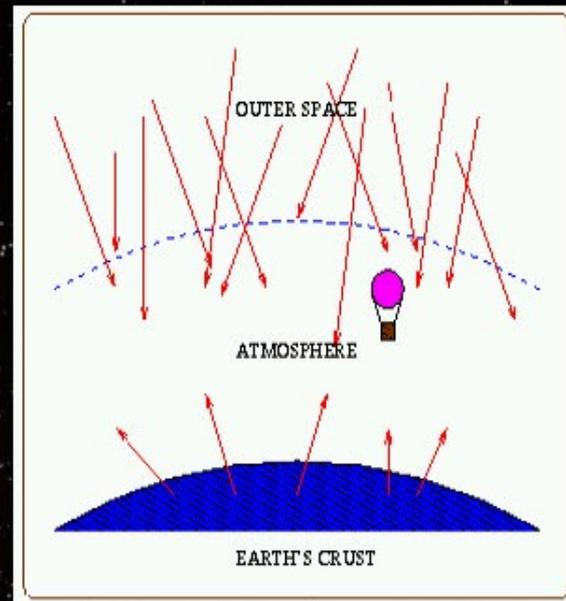
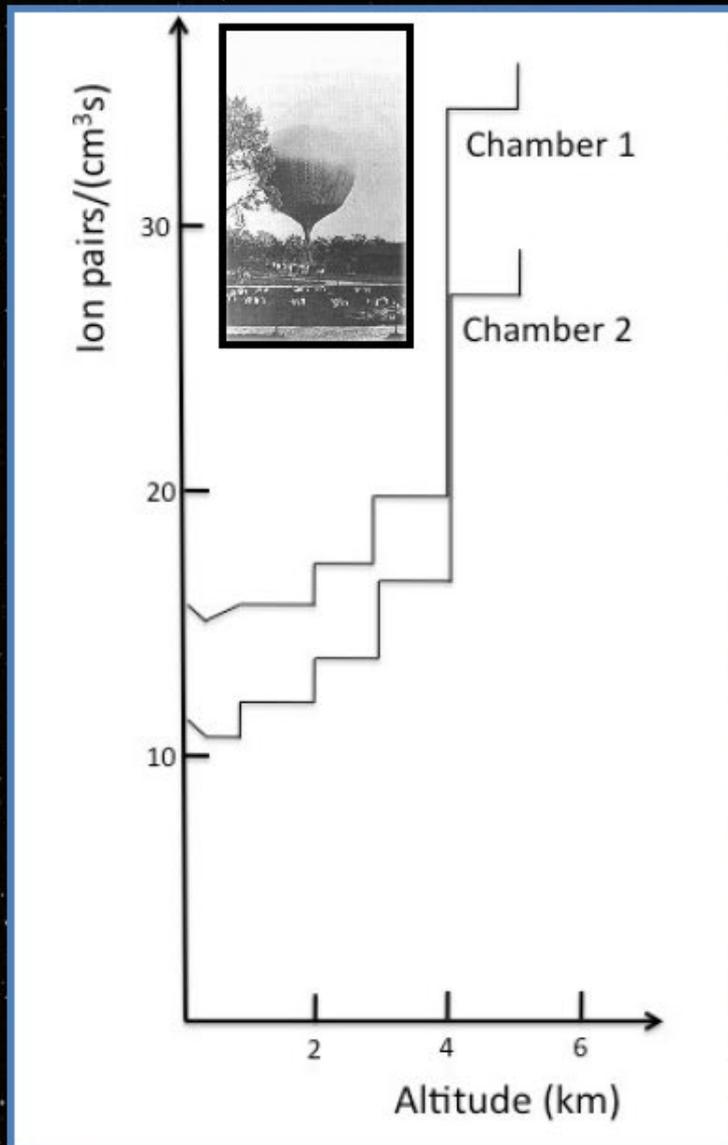


L'austriaco Victor Hess propone una misura complementare a quella di Pacini; la radiazione aumenta o diminuisce in quota?

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).



Il lavoro è pubblicato nel Novembre 1912;
non cita l'ultimo e decisivo lavoro di Pacini...

<https://arxiv.org/abs/1808.02927>

UNA MISTERIOSA RADIAZIONE DALLO SPAZIO

Werner Kolhörster compie 5 voli in pallone nel 1914. Raggiunge un'altitudine di 9300m e misura una radiazione sei volte maggiore che a livello del suolo, confermando il risultato di Hess:

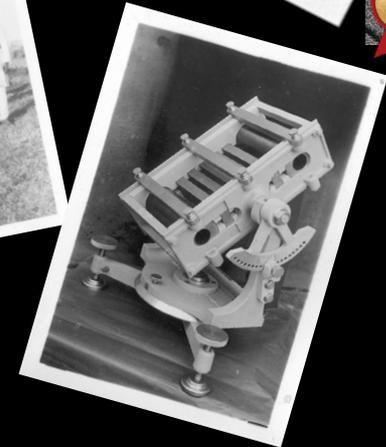
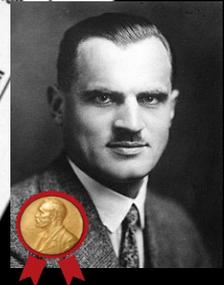
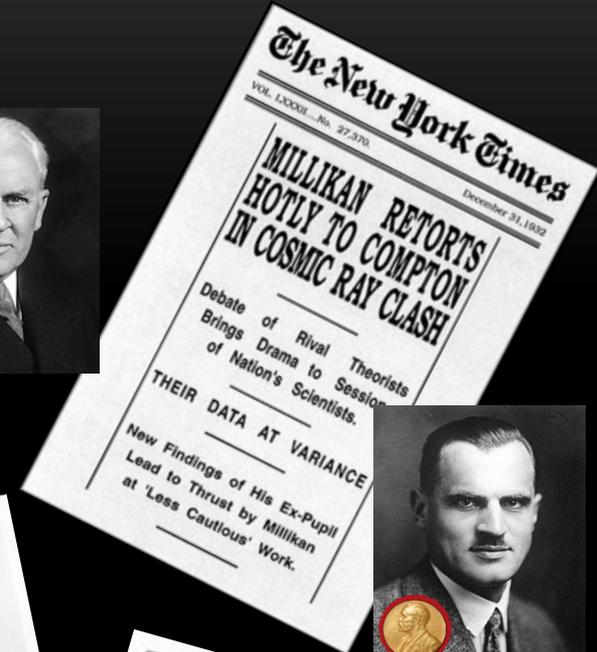
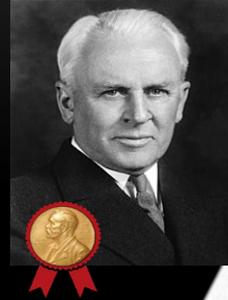
Una radiazione penetrante sconosciuta era la causa della radiazione

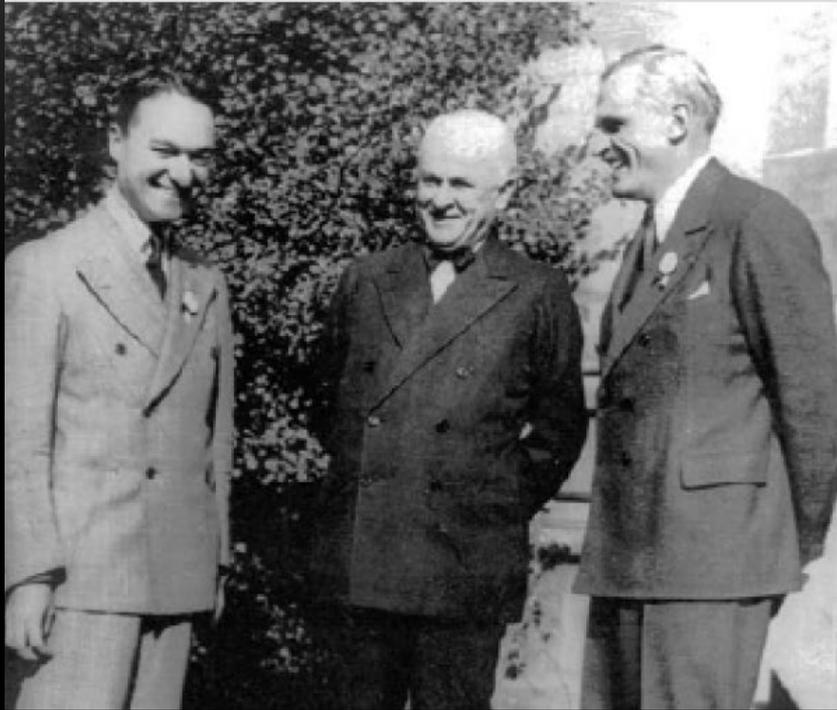
Non si parla ancora di raggi cosmici o particelle.

Alcuni scienziati sono scettici, specialmente Millikan negli USA: non riesce a confermare i risultati con un volo su pallone a 15 km di altitudine (senza equipaggio).

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 1932 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 Bruno Rossi) che i raggi cosmici primari hanno carica **positiva**
- Nel 1933 Bruno Rossi osserva gli sciami atmosferici



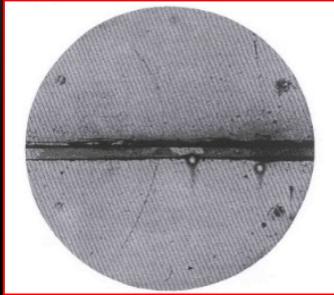


Bruno Rossi, Robert A. Millikan, and Arthur H. Compton at the Rome conference, October 11–18, 1931.

The Rome conference 1931 “marked the beginning of the historical debate about the nature of cosmic rays....”

...”At the invitation of Fermi, I gave an introductory speech on the problem of cosmic rays. The main thrust of this talk was to present what, to my mind, were irrefutable arguments against Millikan’s theory of the “birth cry” of atoms. Such a brash behavior on the part of a mere youngster (I was then 26 years old) clearly did not please Millikan, who for a number of years thereafter, chose to ignore my work altogether.”

...E QUELLA DELLE PARTICELLE ELEMENTARI



Positrone



Pioni carichi



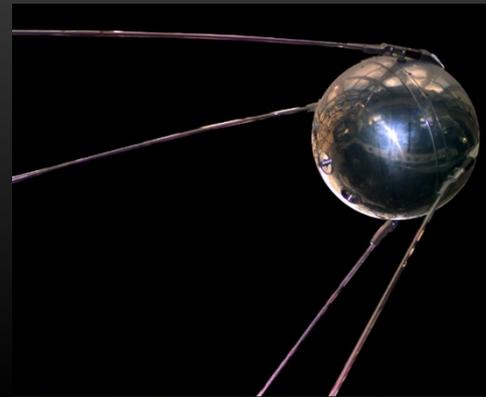
Mesoni (K) e iperoni (Λ, Σ, Ξ) pesanti

Studiando i raggi cosmici vengono scoperte nuove particelle:

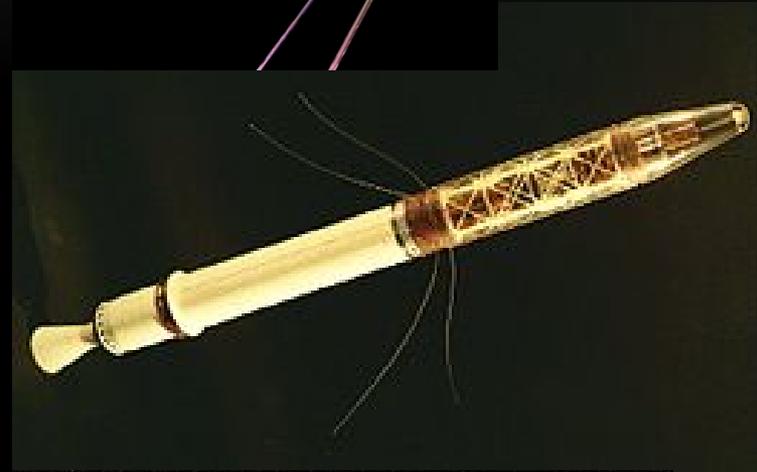
- 1934 positrone
- 1937 muone (o leptone μ)
- 1947 pioni (o mesone π)
- 1947 il kaone (o mesone K), la prima particella strana
- 1951 il primo barione strano Λ
- ...

Si sviluppano nuovi rivelatori di particelle (contatori Geiger, camera a bolle anebbia, emulsioni nucleari, circuiti per coincidenze...)

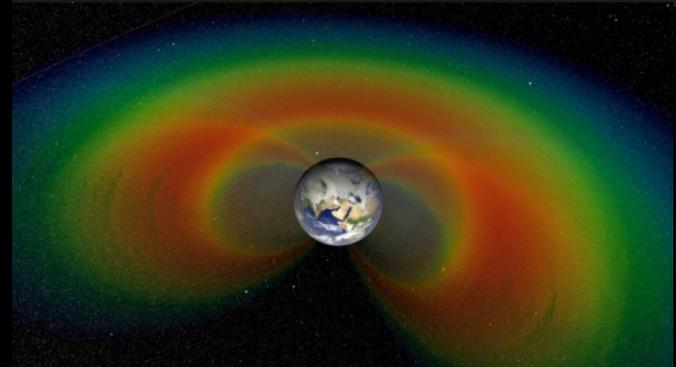
Alla fine degli anni '50 inizia l'era spaziale



Nel 1957 viene messo in orbita il primo satellite artificiale, lo Sputnik 1

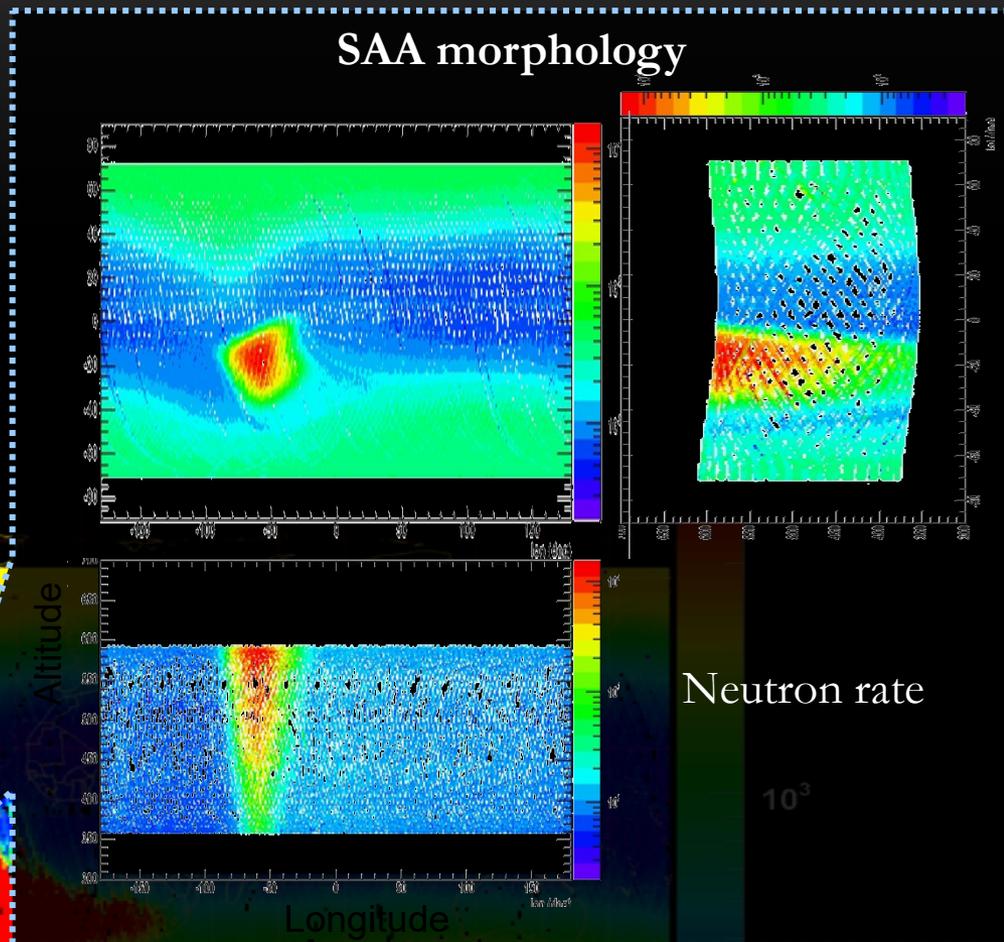
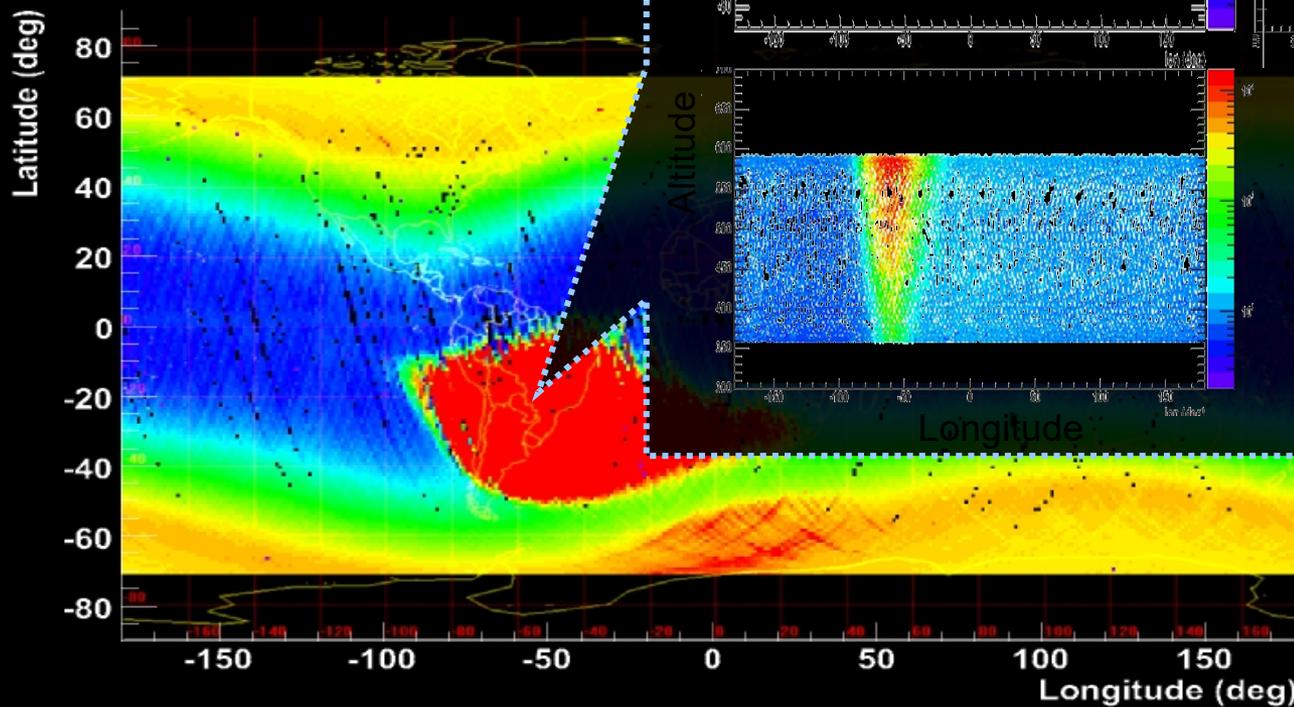
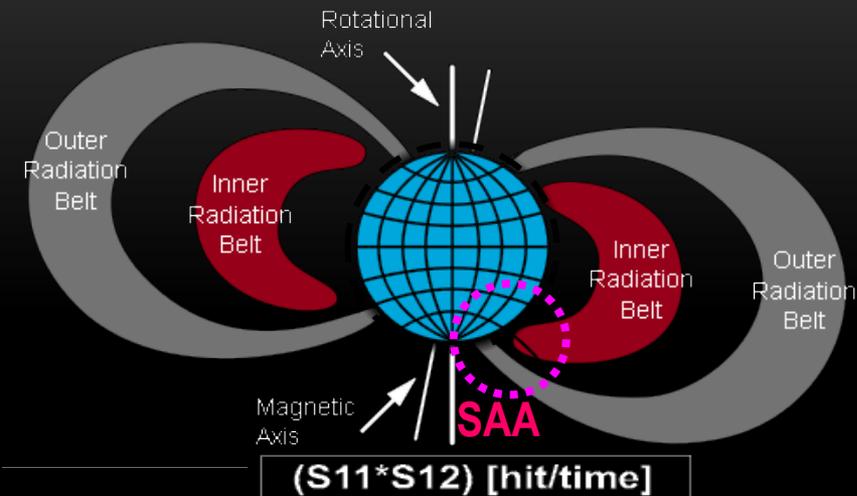


Nel 1958 il satellite americano Explorer 1 effettua le prime misure di radioattività nello spazio.



Vengono scoperte le fasce di Van Allen

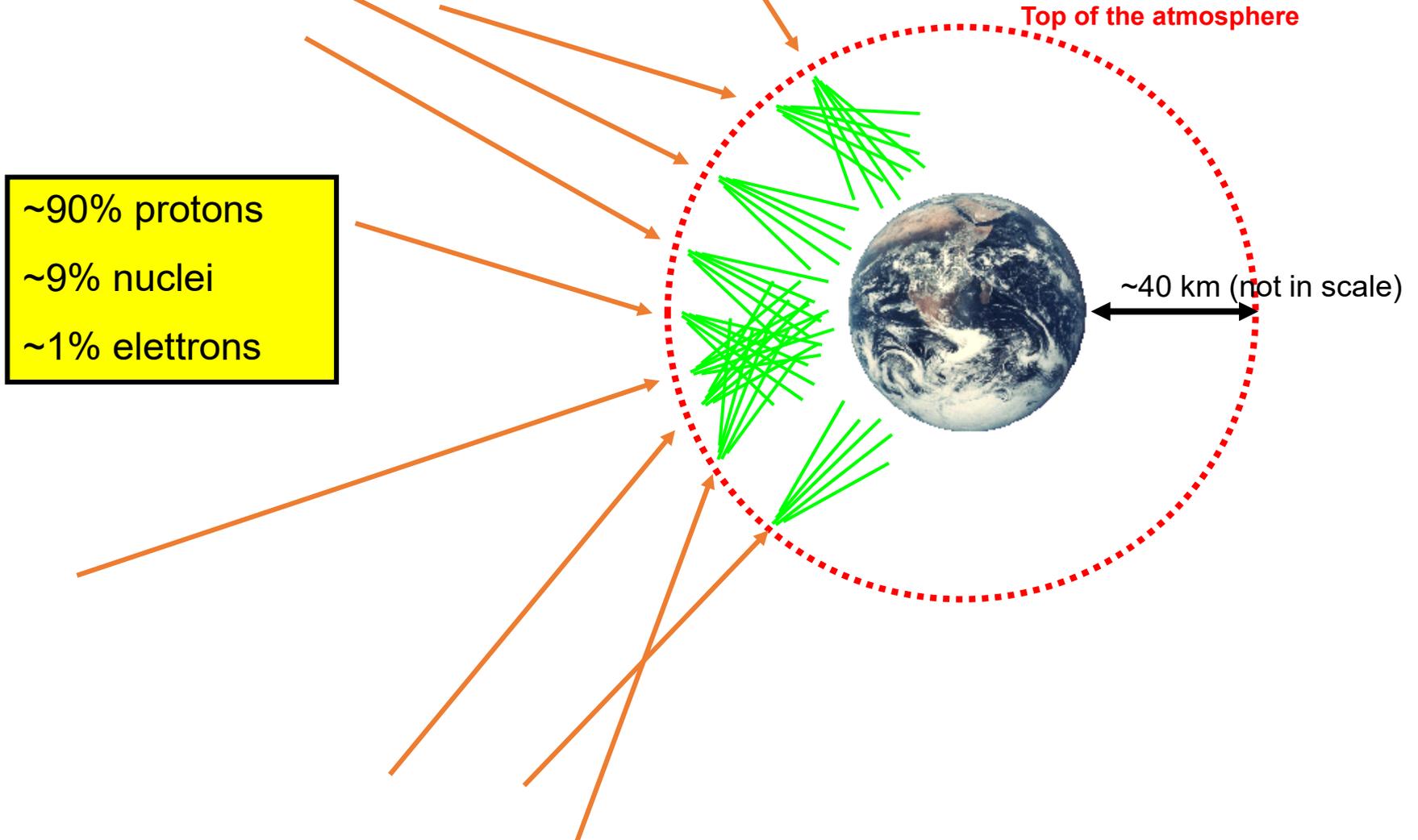
Fascie di Radiazione

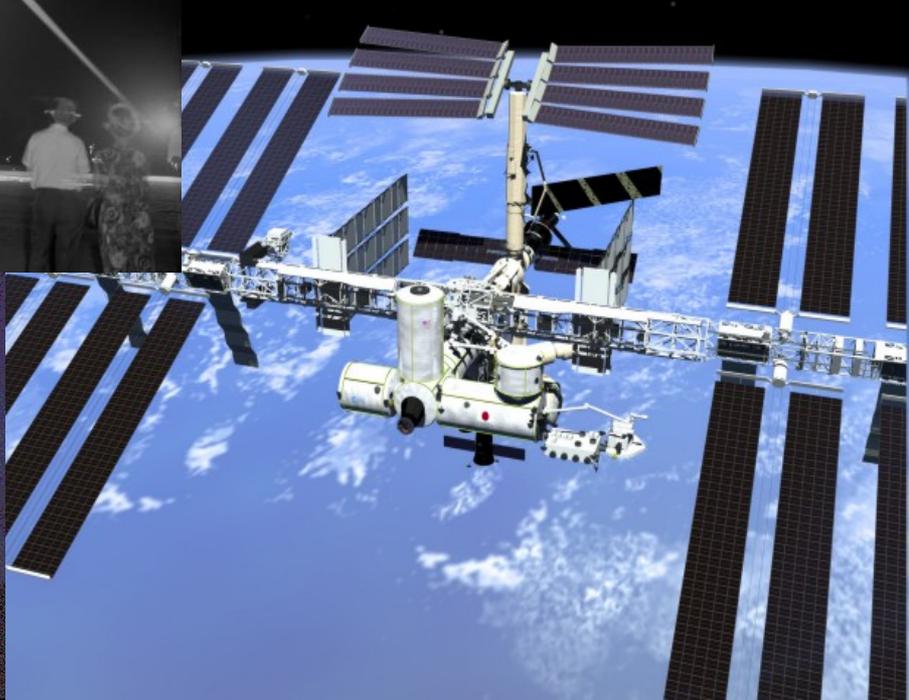
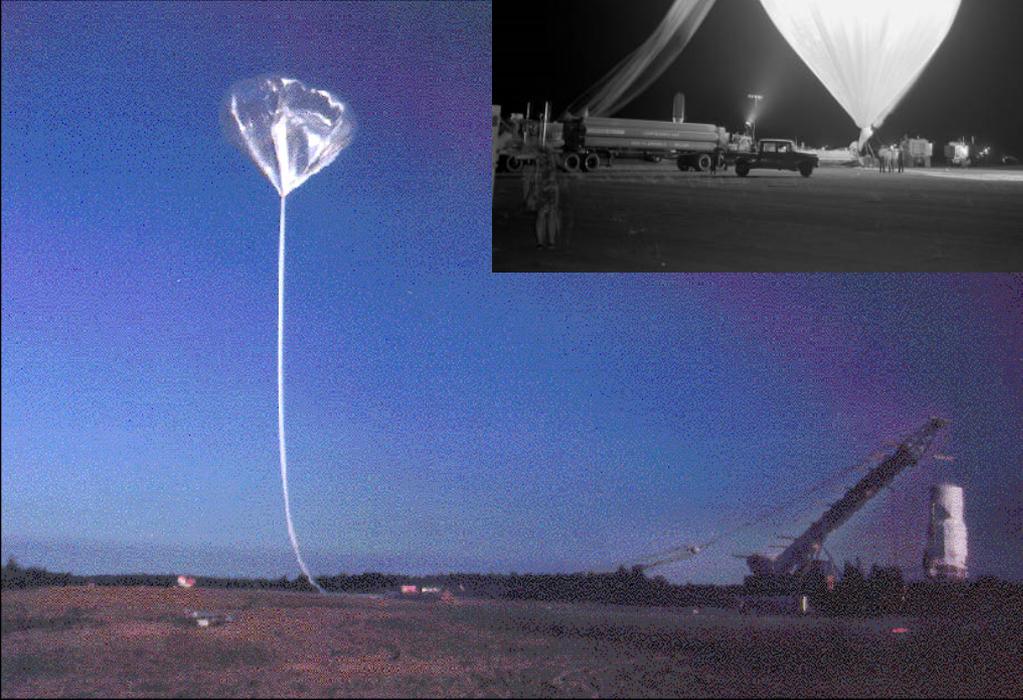


COSA SAPPIAMO OGGI?



A modern picture of the cosmic radiation





~500 km

Smaller detectors
but long duration.



Primary cosmic ray

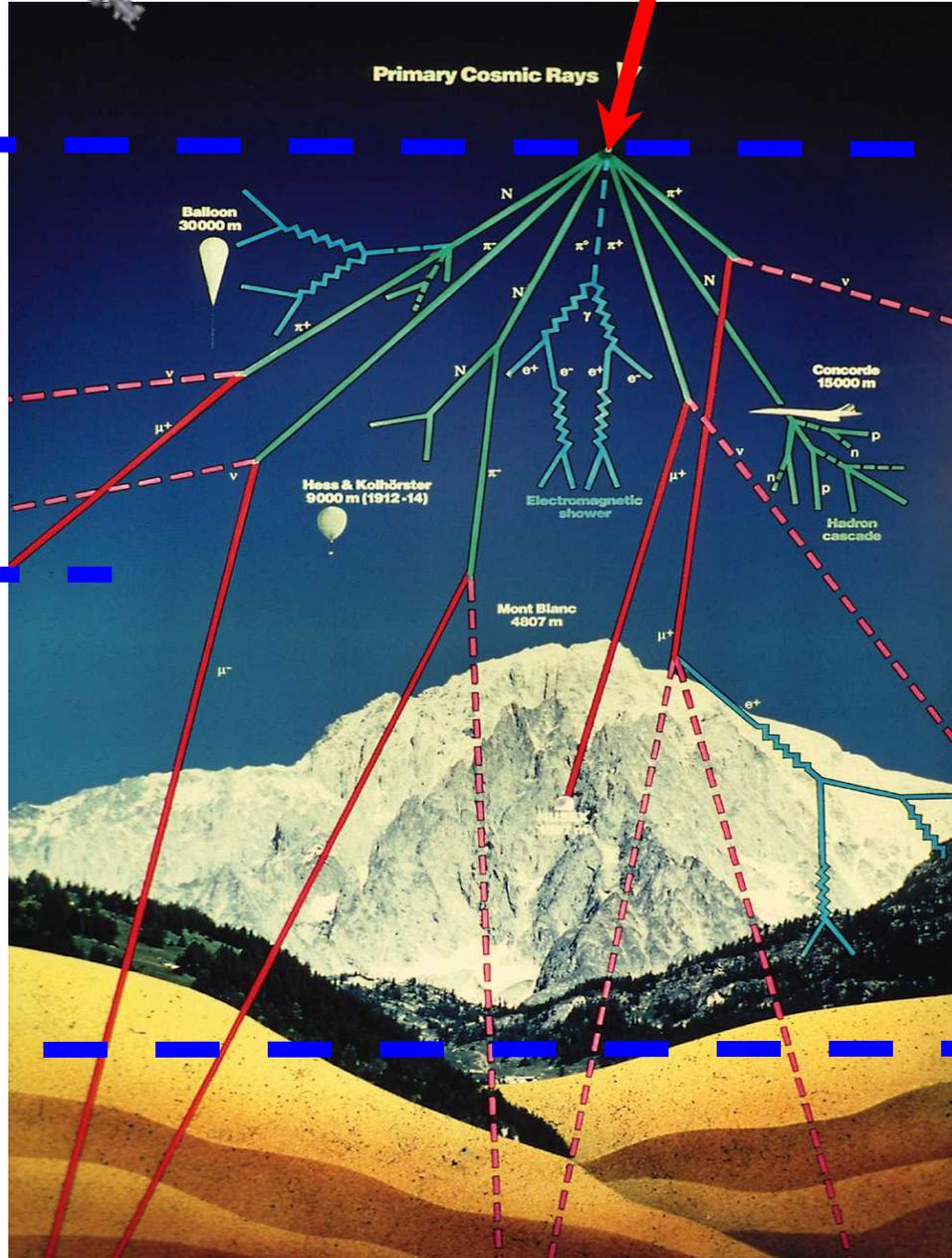
Top of atmosphere



~40 km

Large detectors but
short duration.
Atmospheric
overburden $\sim 5 \text{ g/cm}^2$.

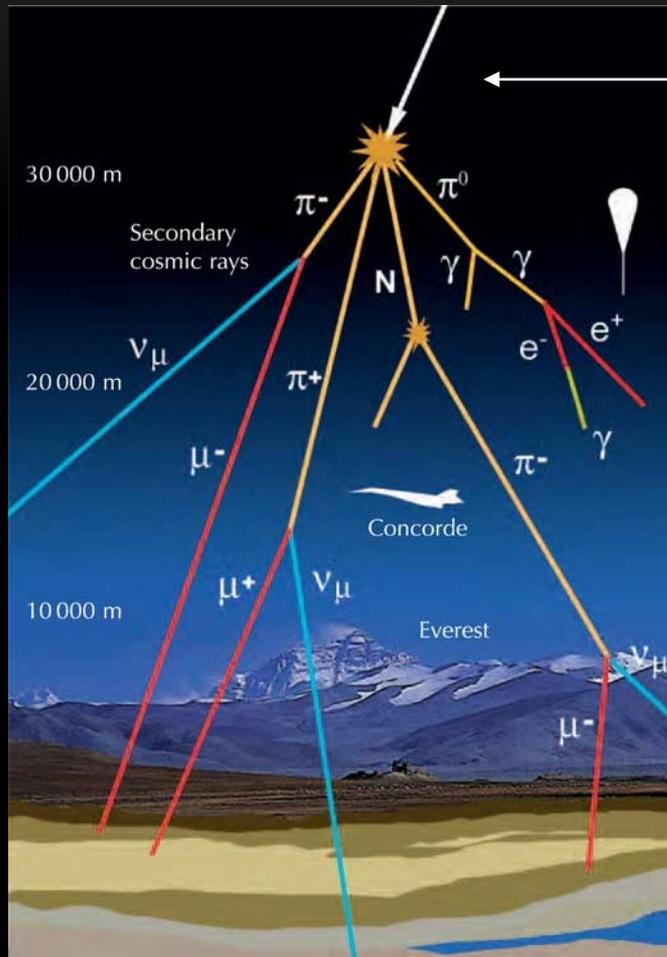
~5 km



Ground

0 m

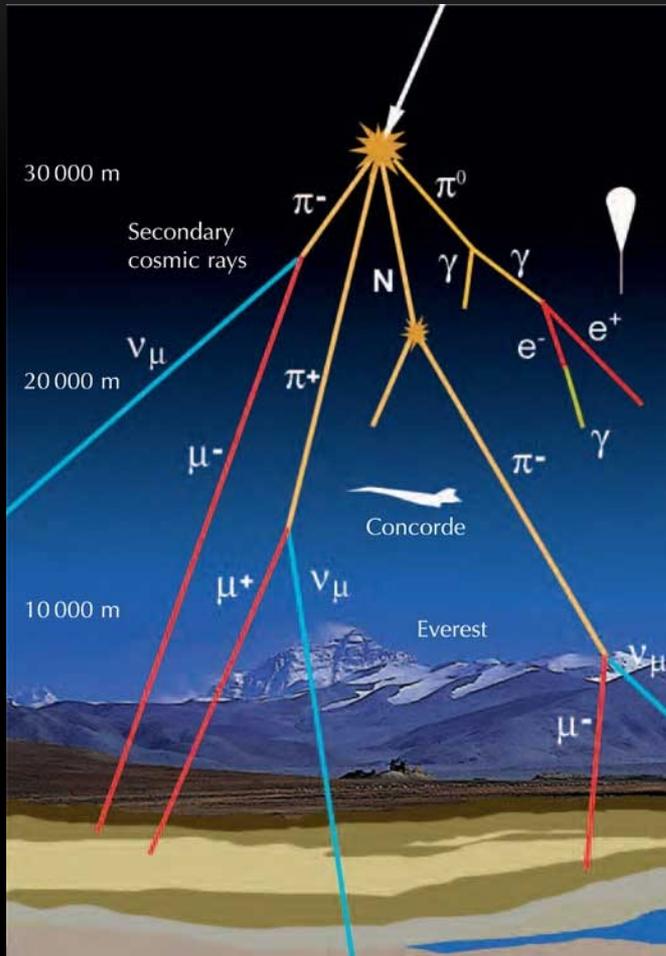
I raggi cosmici interagiscono con i nuclei che compongono l'atmosfera, generando particelle secondarie



Radiazione primaria

Secondari atmosferici

Particelle secondarie atmosferiche



Reazione a catena

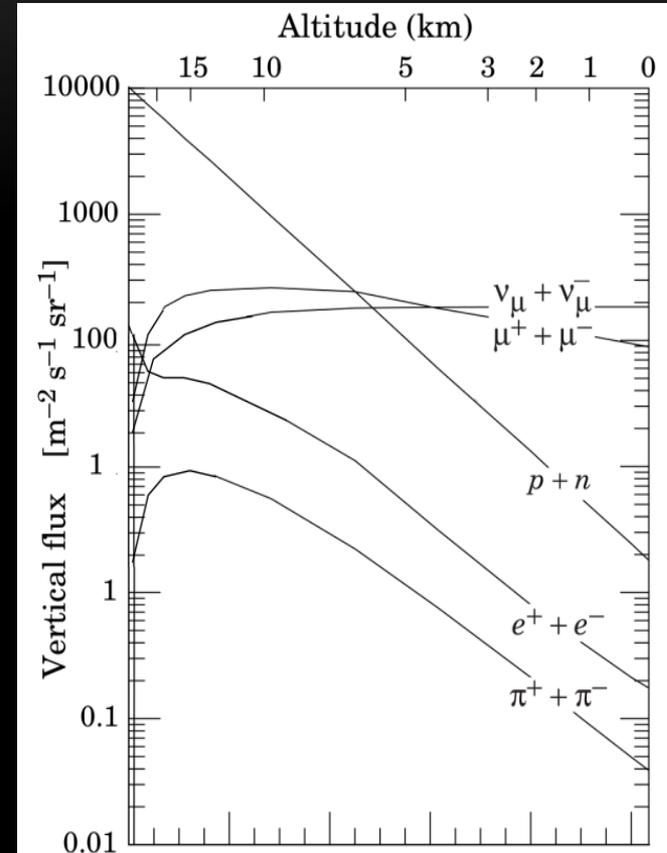
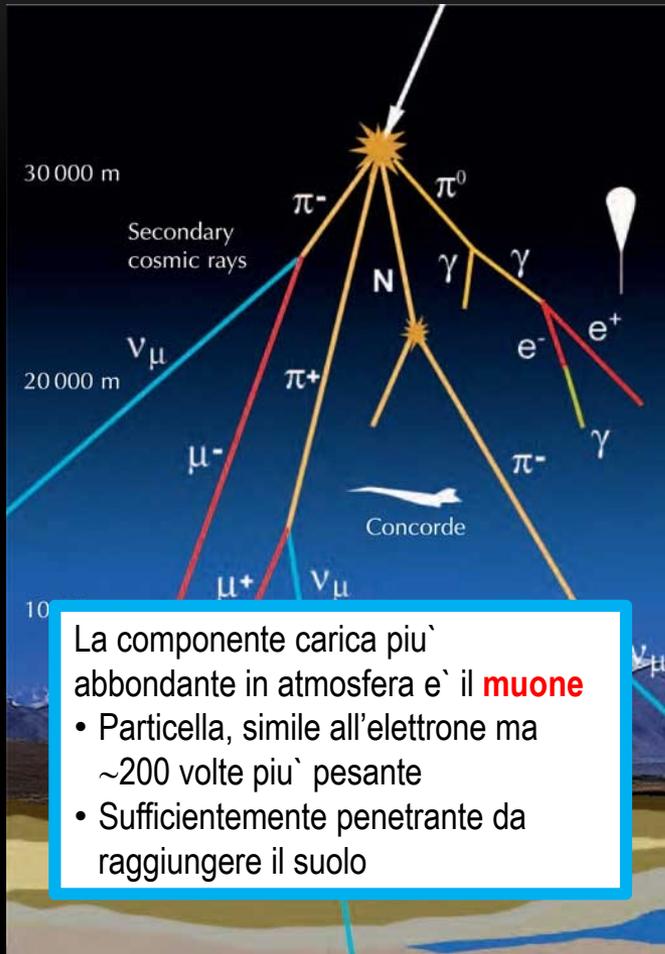
- I nuclei si frammentano
- Vengono create nuove particelle

$$E = Mc^2$$

	Fermions			Bosons	
Quarks	u up	c charm	t top	γ photon	Force carriers
	d down	s strange	b bottom	Z Z boson	
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
	e electron	μ muon	τ tau	g gluon	

- L'energia si degrada

COSA MISURIAMO AL SUOLO?



(Neutrini*)
Muoni

Nucleoni

Elettroni
Pioni

(*difficilmente rivelabili perche` debolmente interagenti)

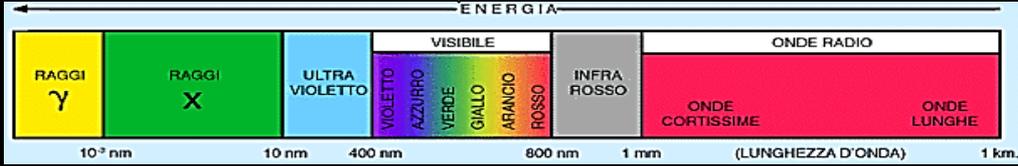
PERCHÉ SI STUDIANO I RAGGI COSMICI?



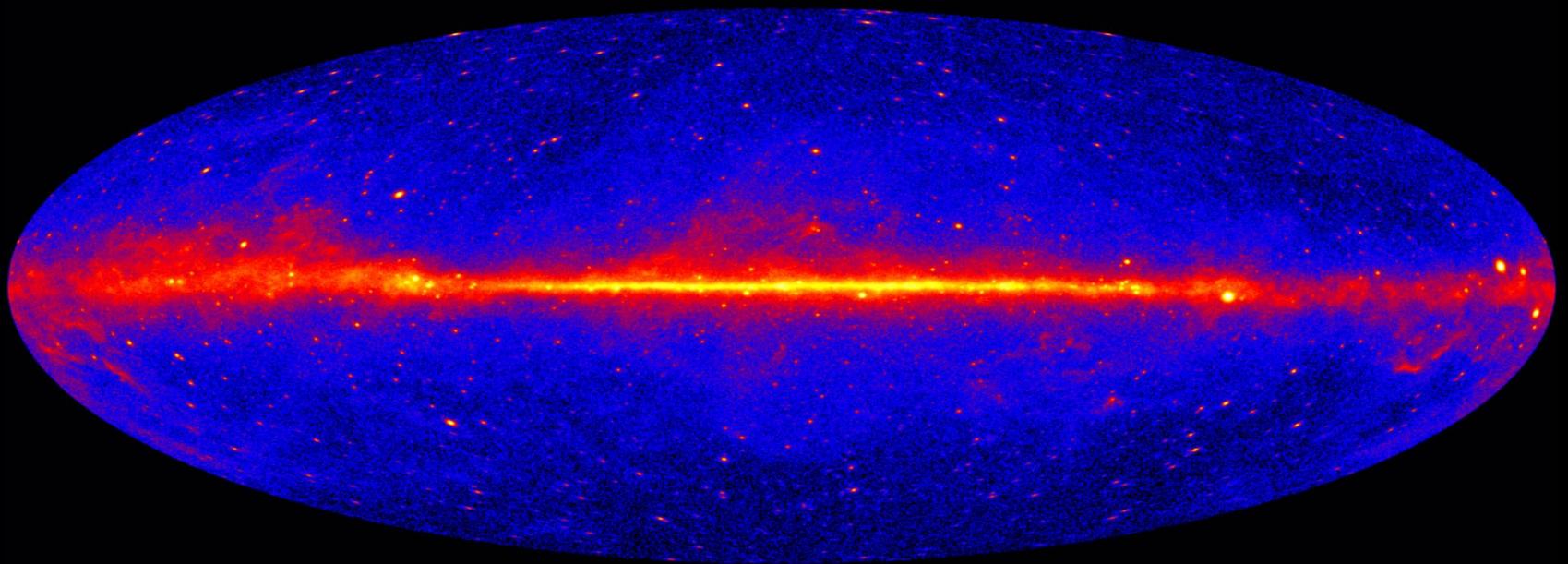
Mappa del cielo



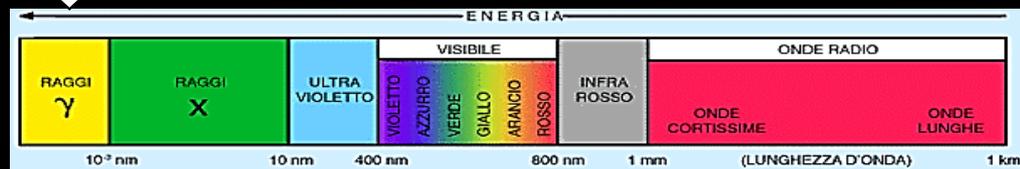
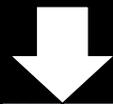
La Via Lattea vista attraverso un **telescopio ottico**



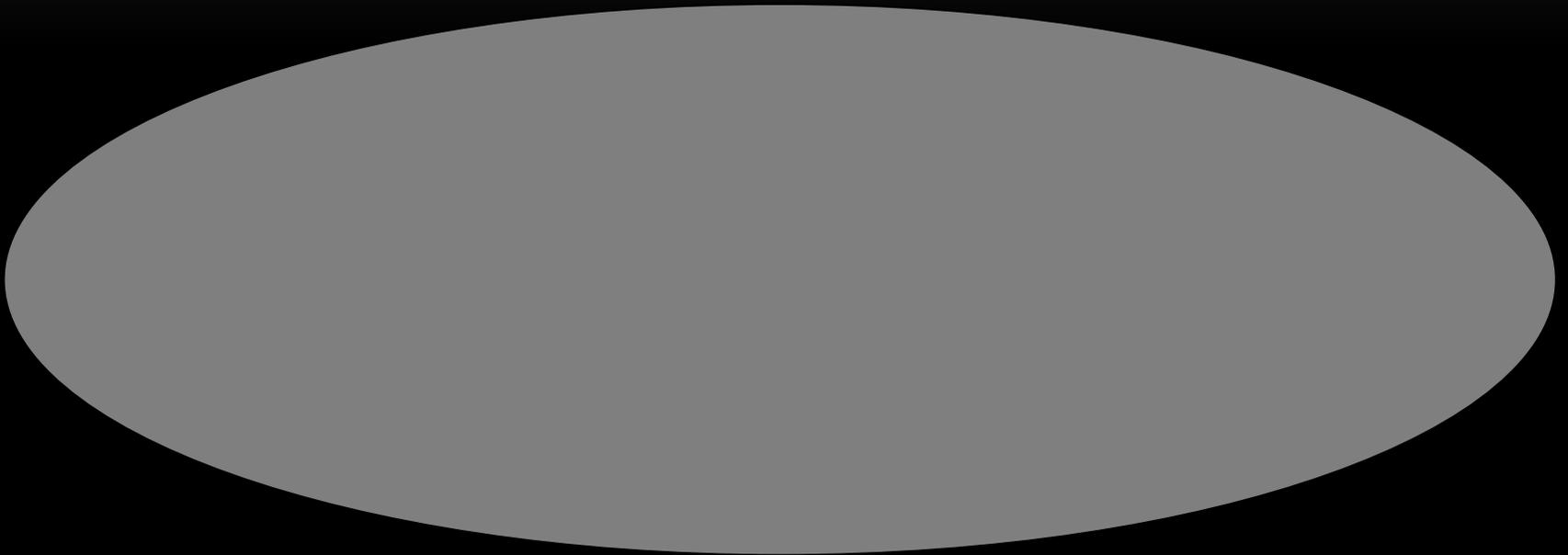
Mapa del cielo



La Via Lattea vista attraverso un rivelatore di raggi gamma

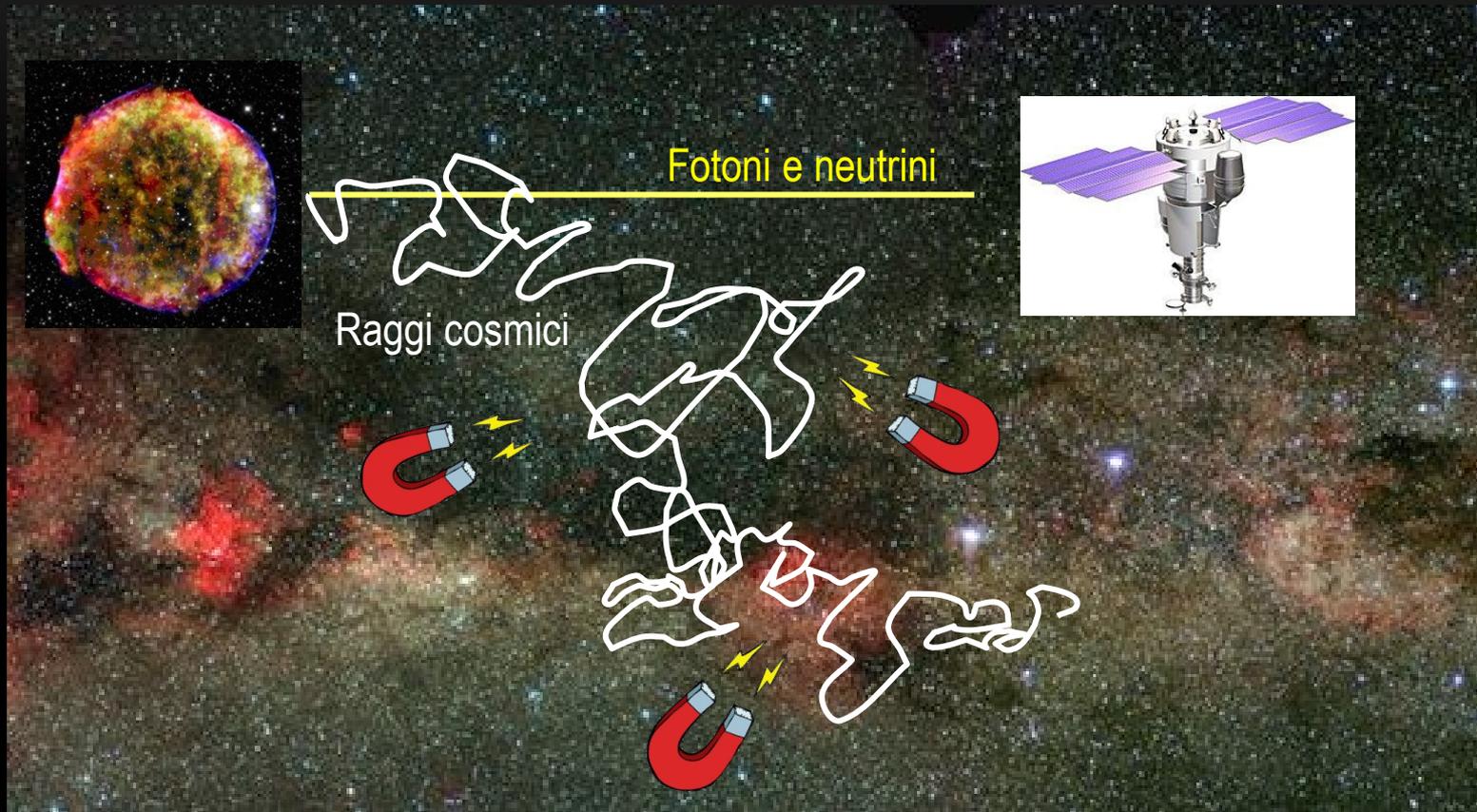


Mappa del cielo



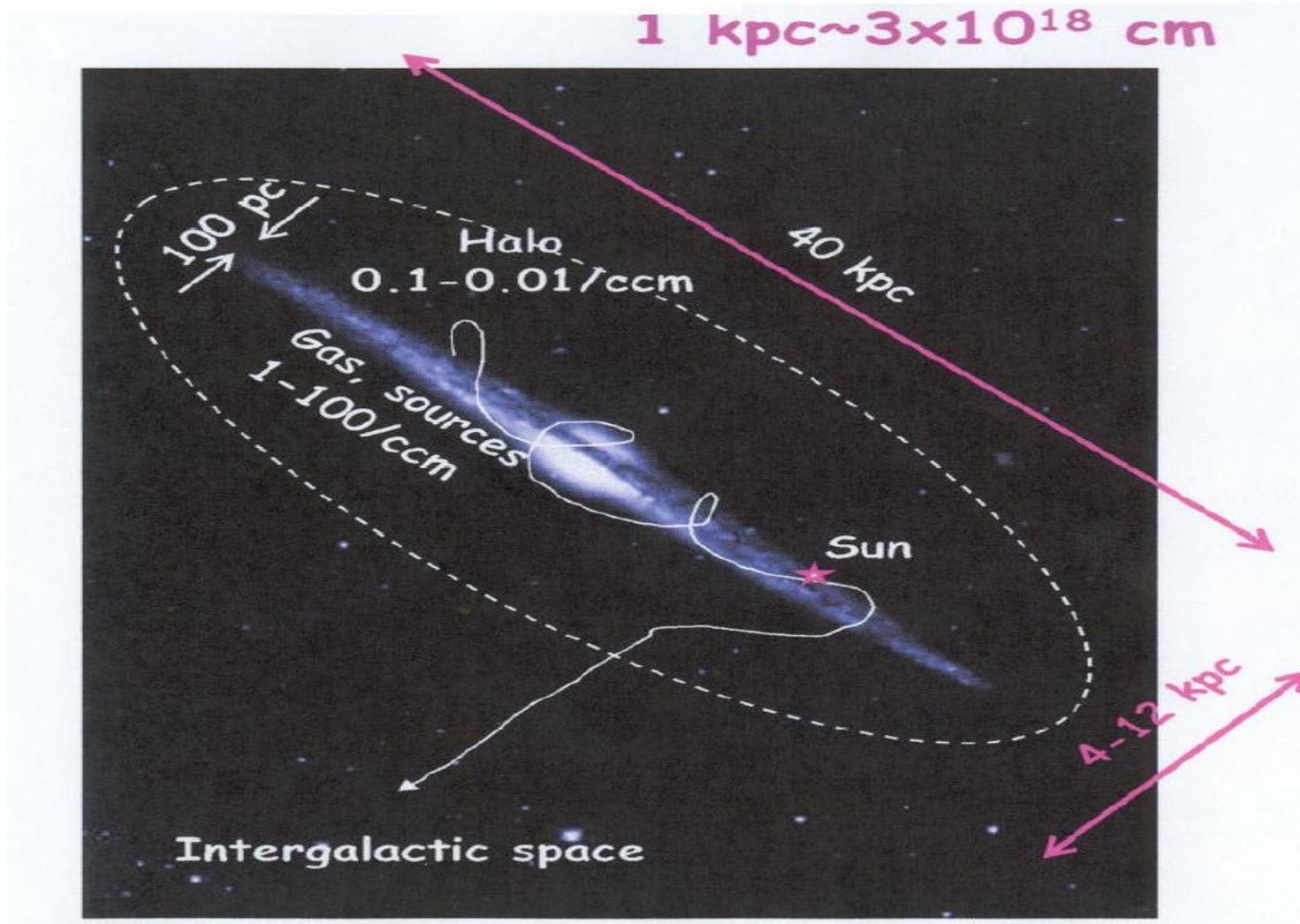
La Via Lattea vista attraverso un rivelatore di **RAGGI COSMICI**

I raggi cosmici sono particelle massive, elettricamente cariche

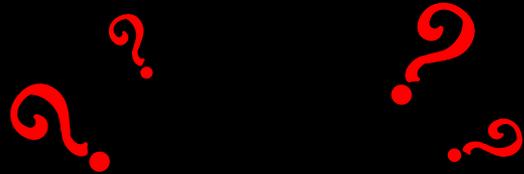


La traiettoria e` deviata dai campi magnetici

I Raggi Cosmici nella Via Lattea



MA ALLORA, ...PERCHÉ SI STUDIANO?



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

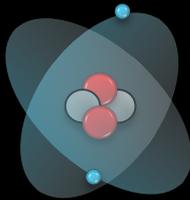


METEORITI
Distanza 200 UA
Ø Sistema Solare



1 UA (Unità Astronomica) = distanza Terra Sole

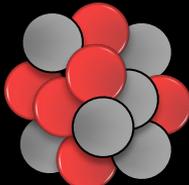
Sono presenti tutti gli elementi
che compongono la **materia
ordinaria** (atomi)



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

860 ×  H

110 ×  He

10 ×  C, O, ...

20 ×  e⁻

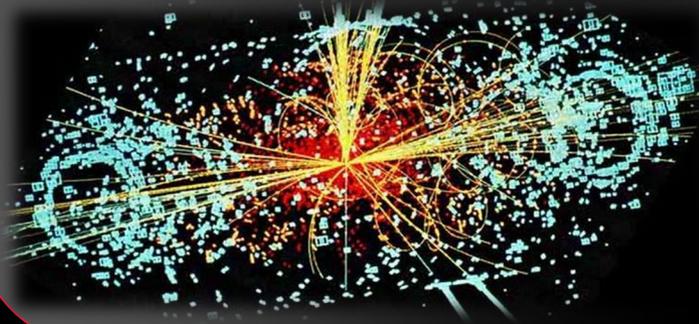
1000 × **particelle**

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 !!

Milioni 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

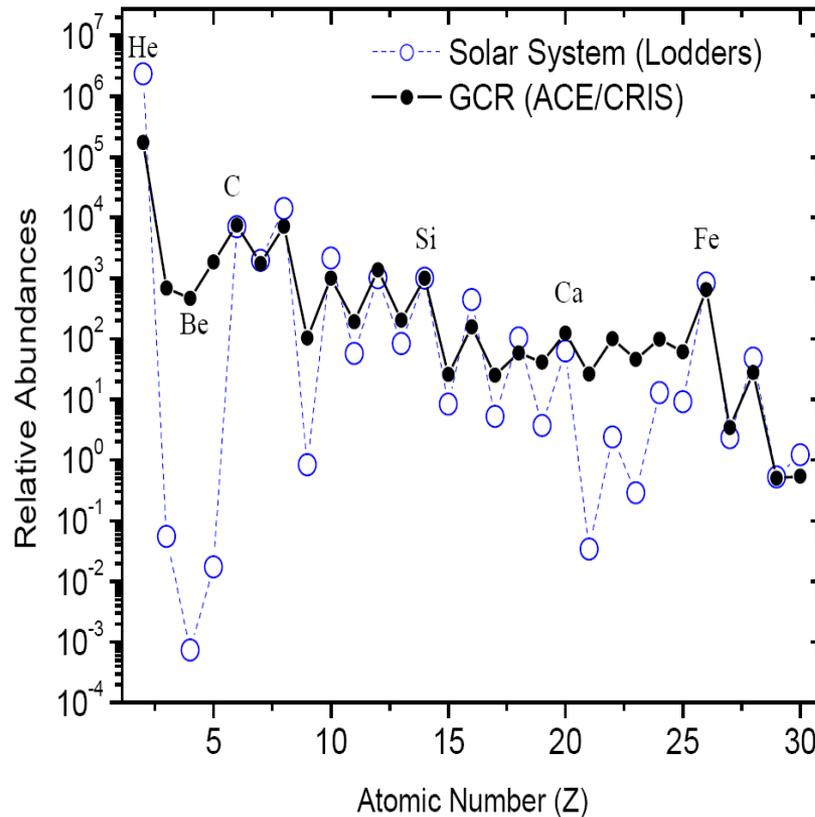
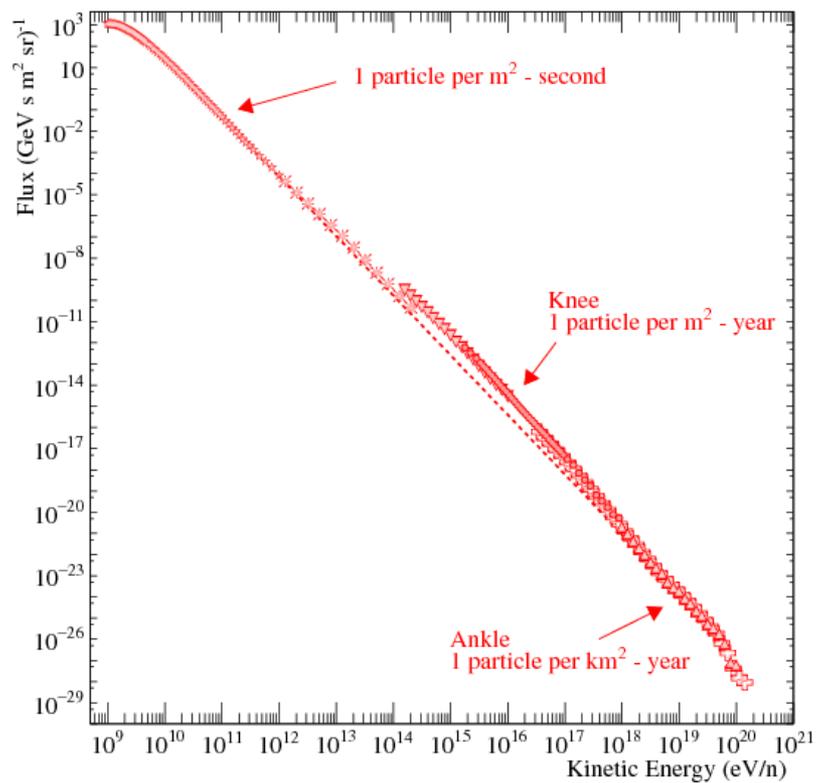
QUALE E' L'ORIGINE DEI RAGGI COSMICI?





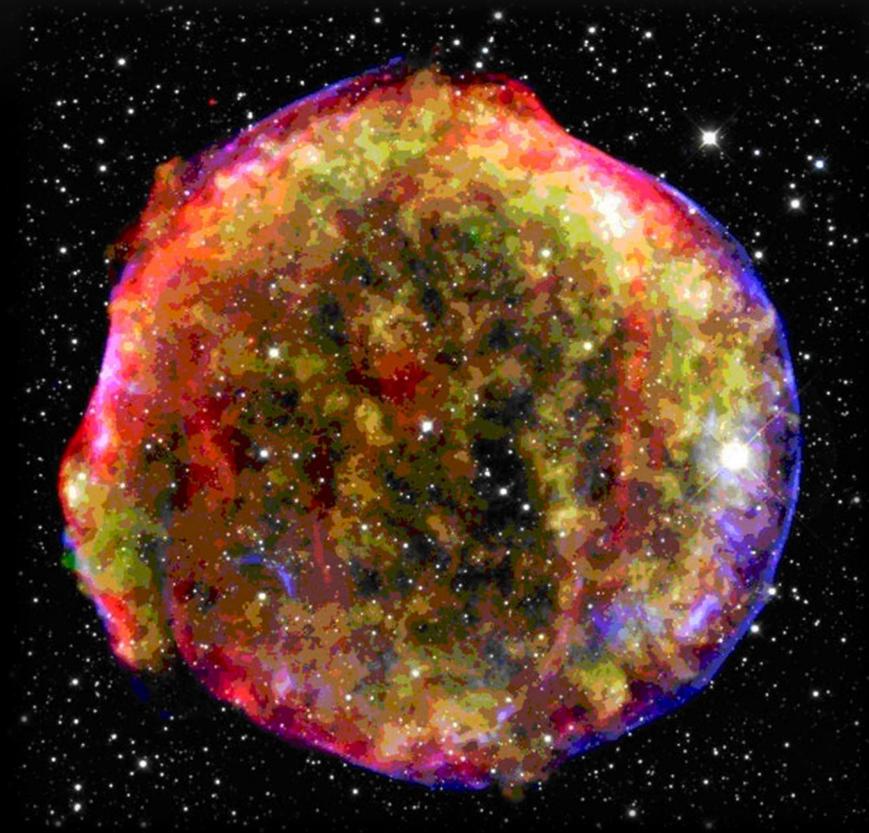
La composizione dei raggi cosmici e' quasi uguale a quella del Sistema Solare

Raggi Cosmici



Solar System: Lodders, ApJ 591 (2003) 1220
GCR: Israel, ECRS 2004

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



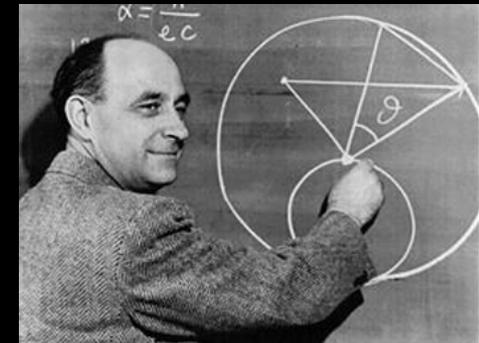
Resto della
supernova
Tycho SN 1572
(spettro X)

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

**RAGGI
COSMICI**

Onda d'urto in
espansione

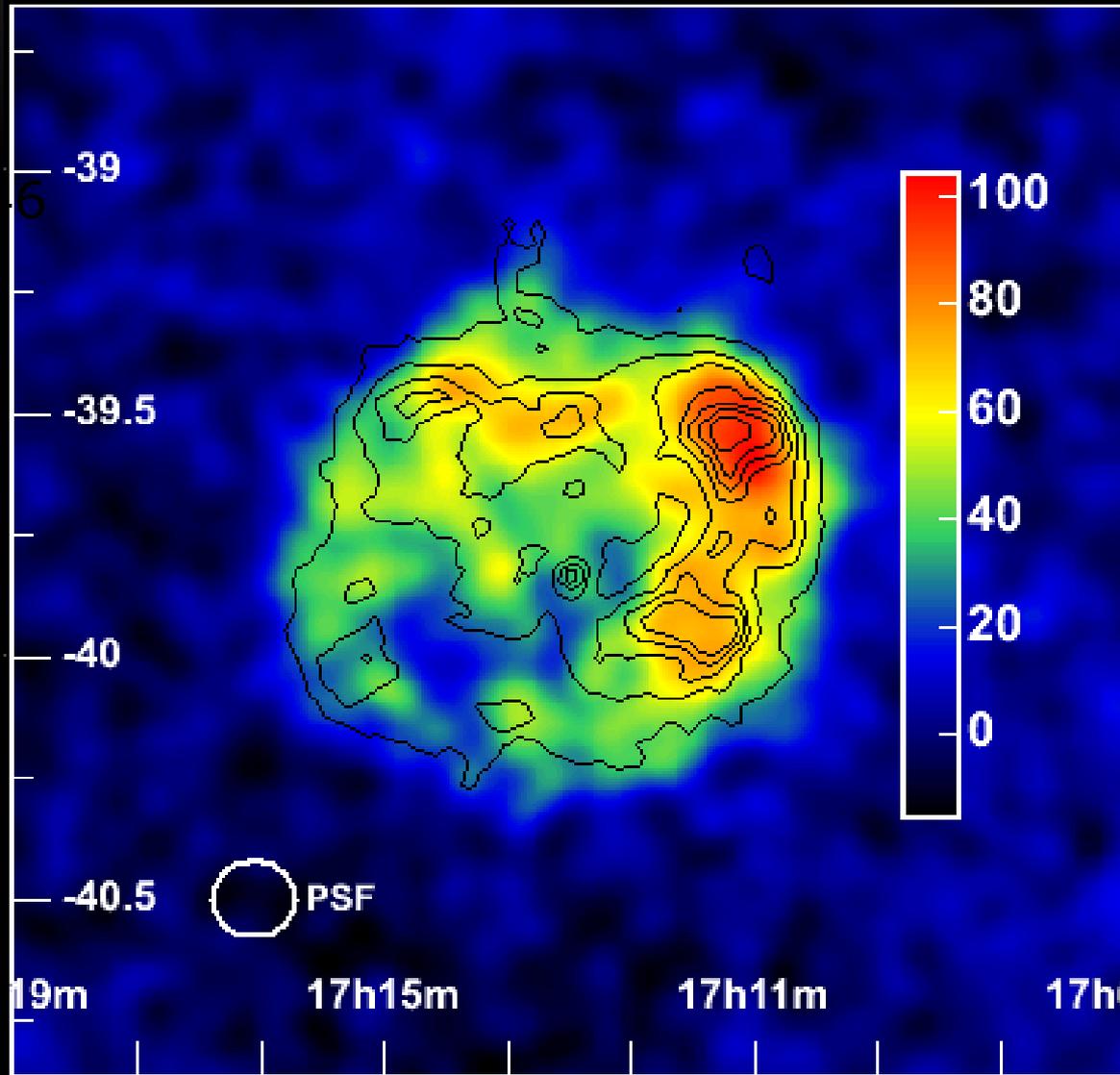
Nuclei atomici
del mezzo
interstellare



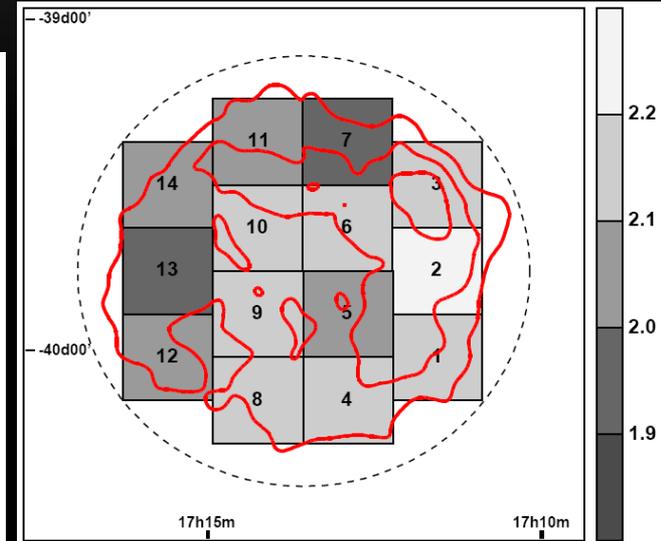
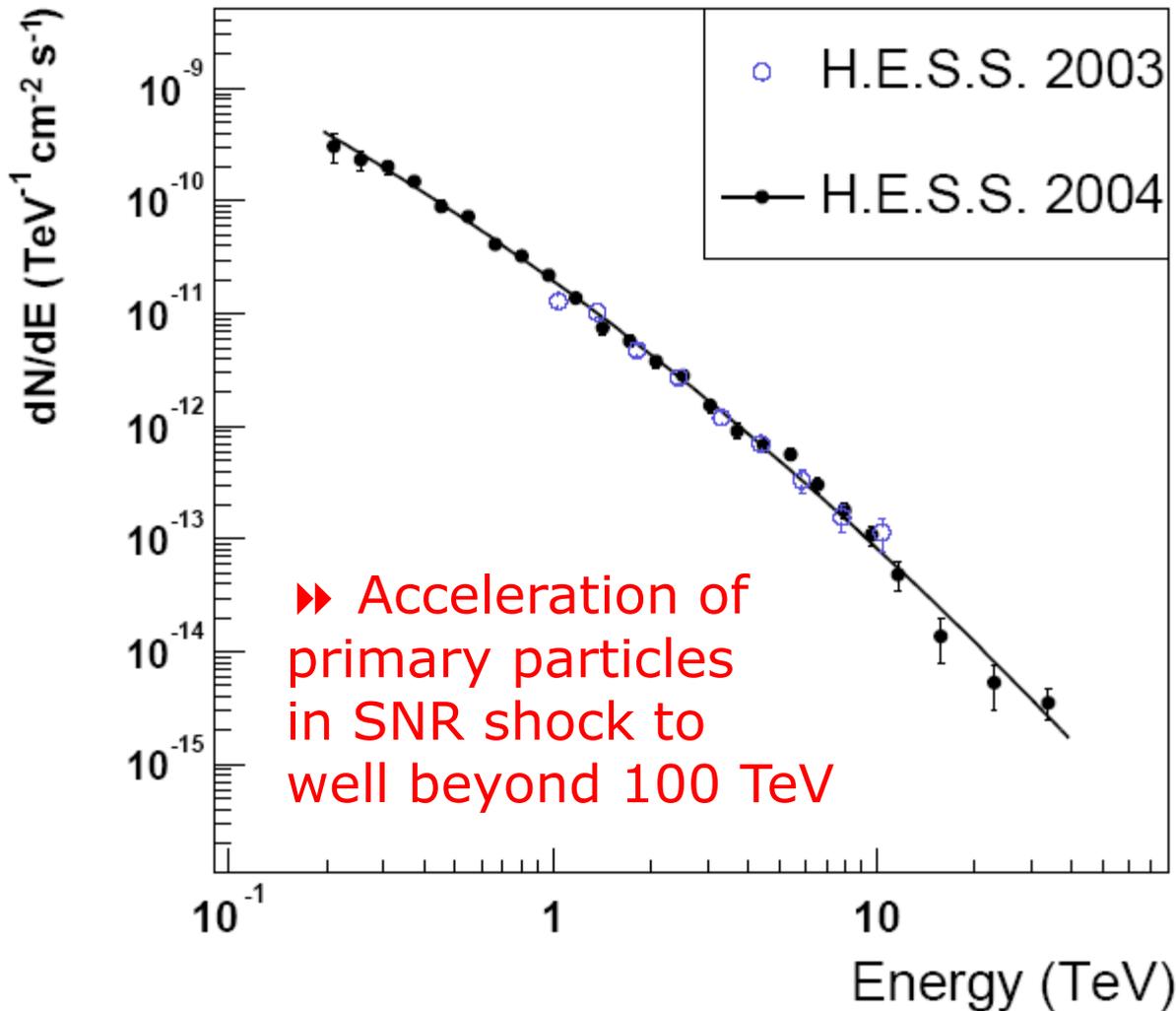
Accelerazione di Fermi



H.E.S.S. HIGHLIGHT: RESOLVED SUPERNOVA-REMNANTS



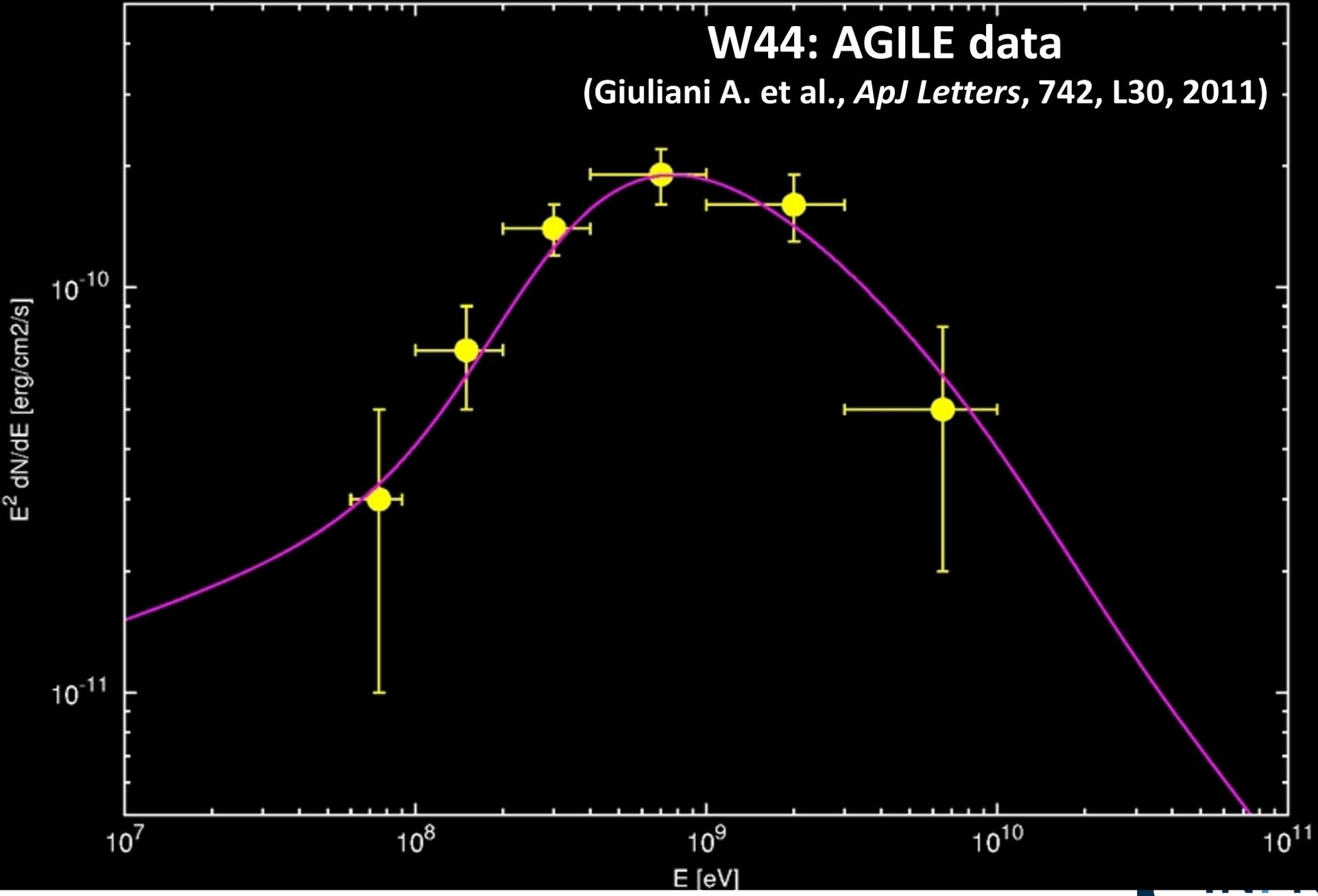
SPECTRA



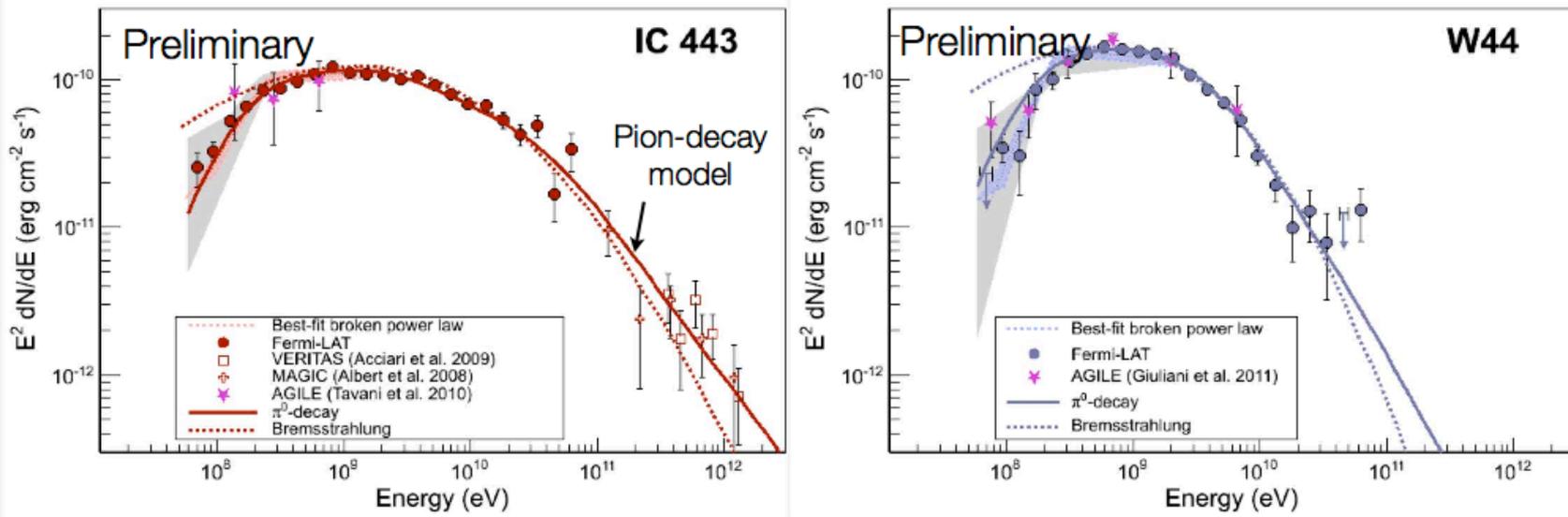
- Index $\sim 2.1 - 2.2$
- Little variation across SNR
- Cutoff or break at high energy

W44: AGILE data

(Giuliani A. et al., *ApJ Letters*, 742, L30, 2011)



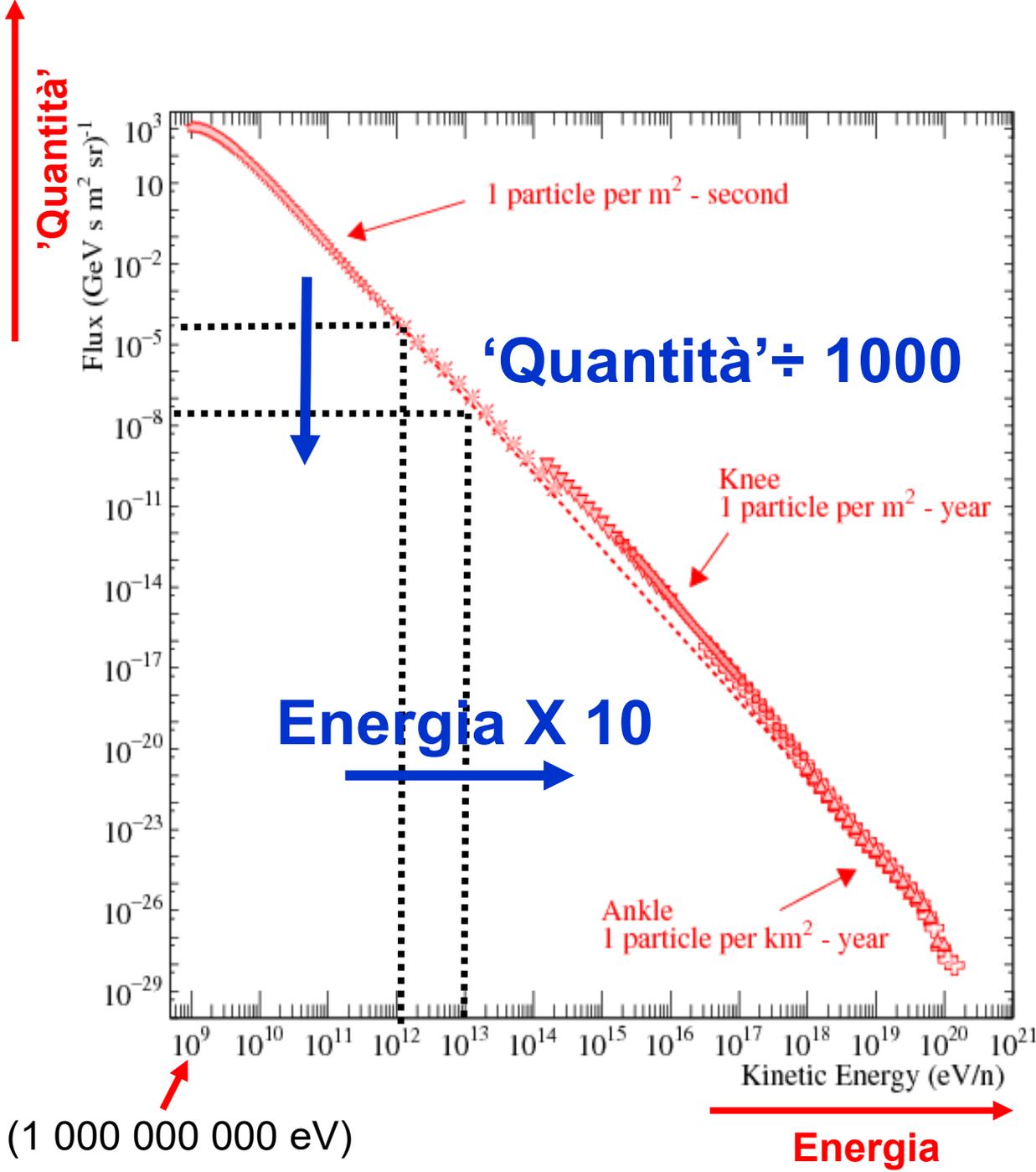
Fermi: CR protons in SNR



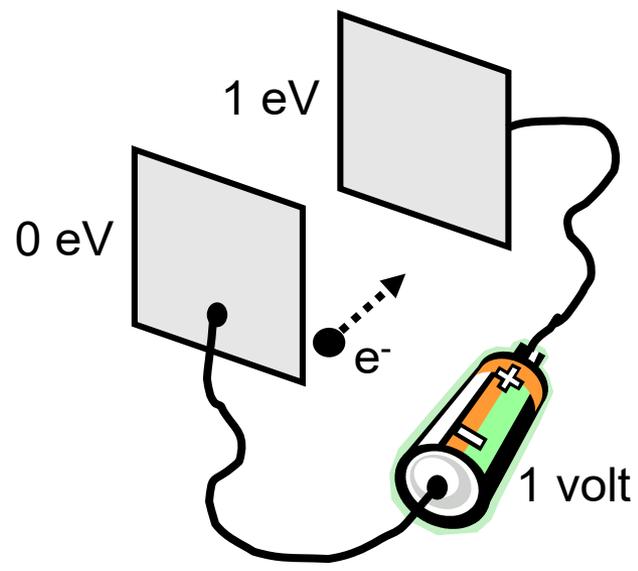
- Unambiguous and robust detection of the pion-decay bump in W44 and IC443
- Possible for the two brightest LAT SNRs due to significant increase in effective area at 100 MeV through Pass 7
- Proof that SNRs accelerate protons

Detection of the pion-decay cutoff in Supernova remnants

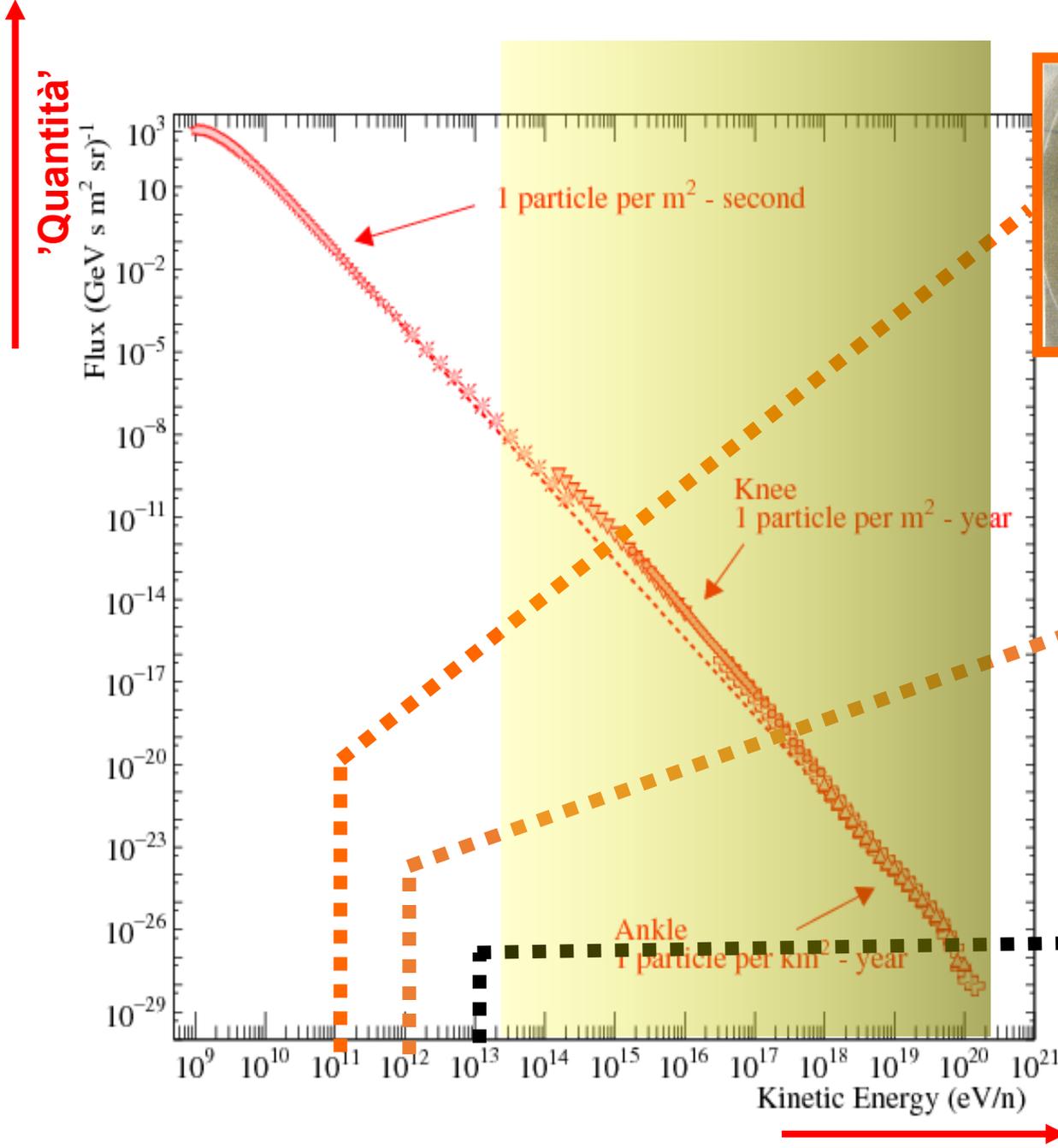
2013, Science, 339, 807



• 1 eV = 1.6×10^{-19} Joules



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



[LEP / CERN]



[Tevatron / Fermilab]



[LHC / CERN]

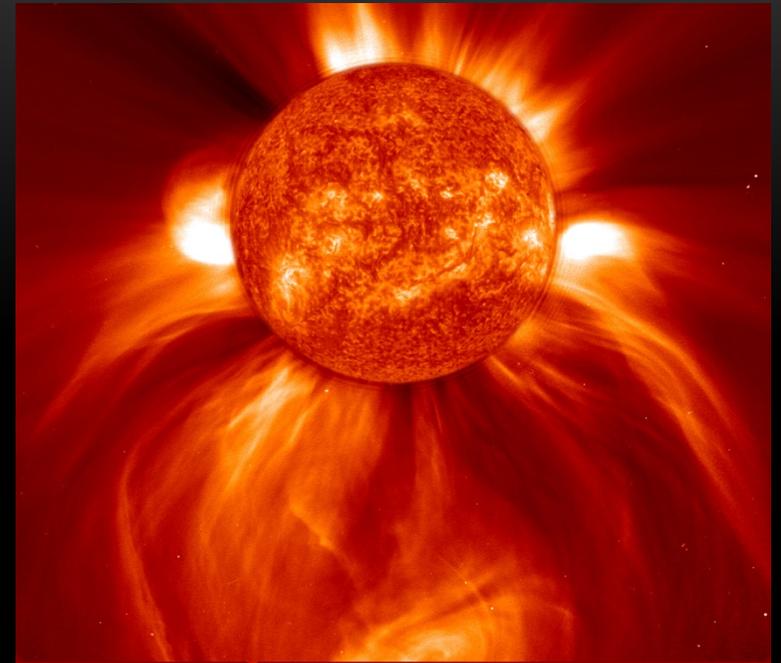


Energia

Anche il Sole è una sorgente di raggi cosmici.

Vengono accelerati durante le eruzioni solari e raggiungono la Terra in poche ore

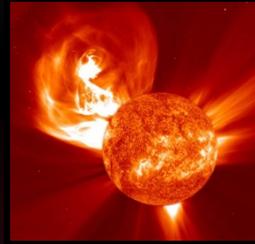
(nell'arco di poche ore il flusso di particelle aumenta fino a 10000 volte!)



Sole $\sim 100 \times$ Terra !!



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**)



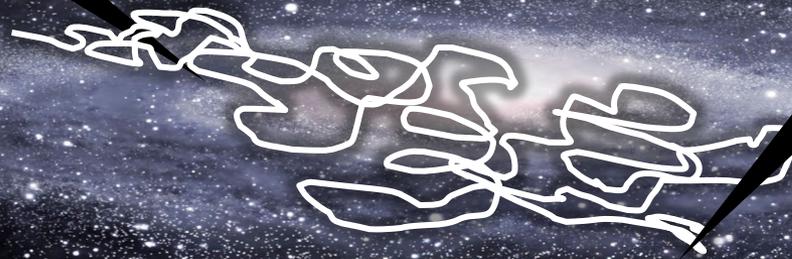
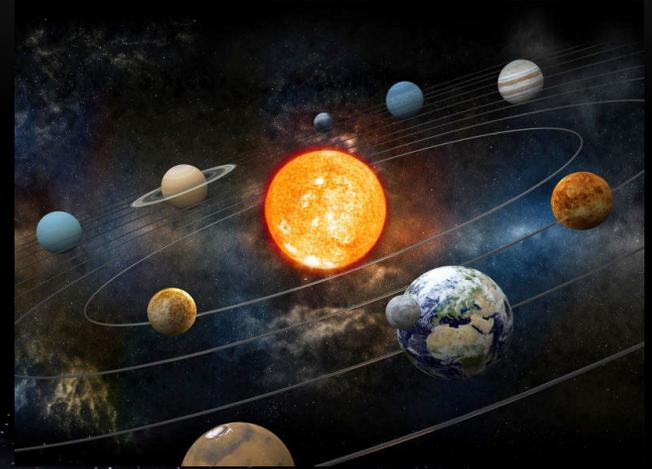
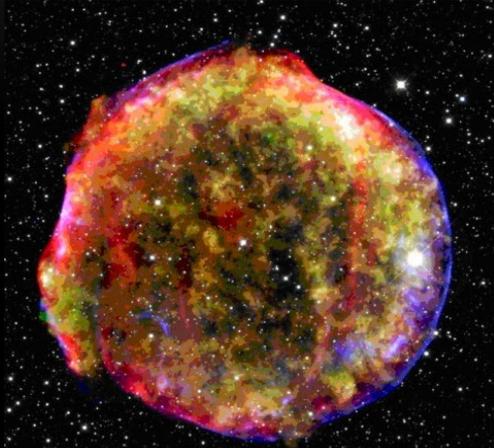
Aurora australe vista dalla Stazione Spaziale Internazionale



Aurora boreale vista dall'Alaska

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...**

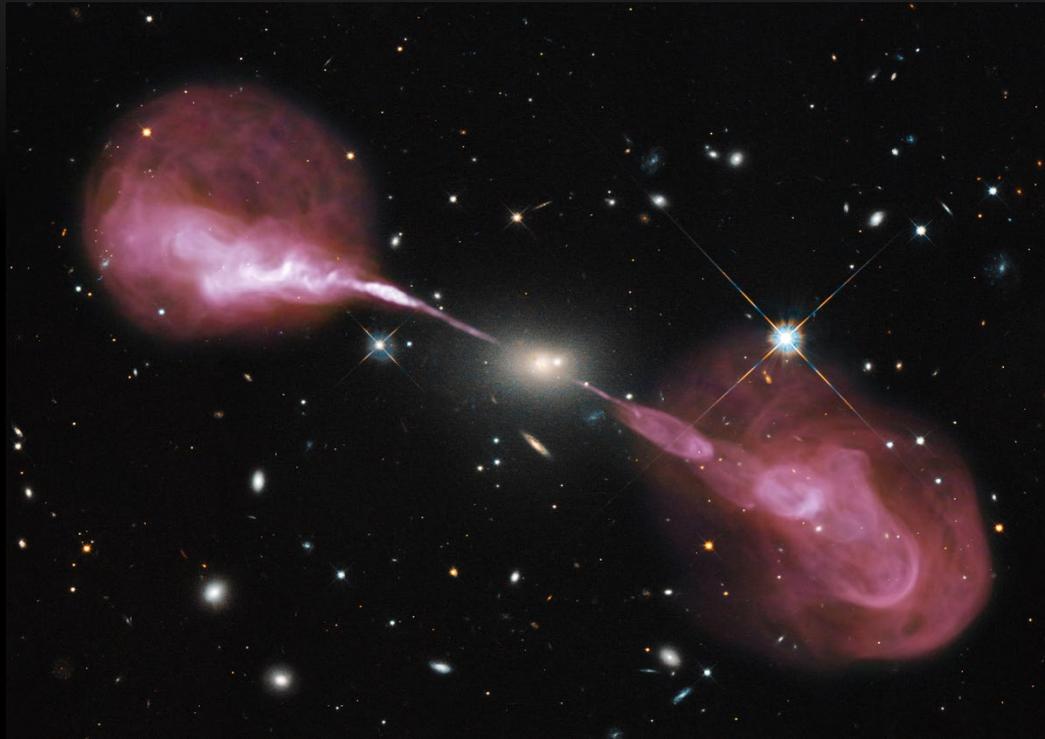
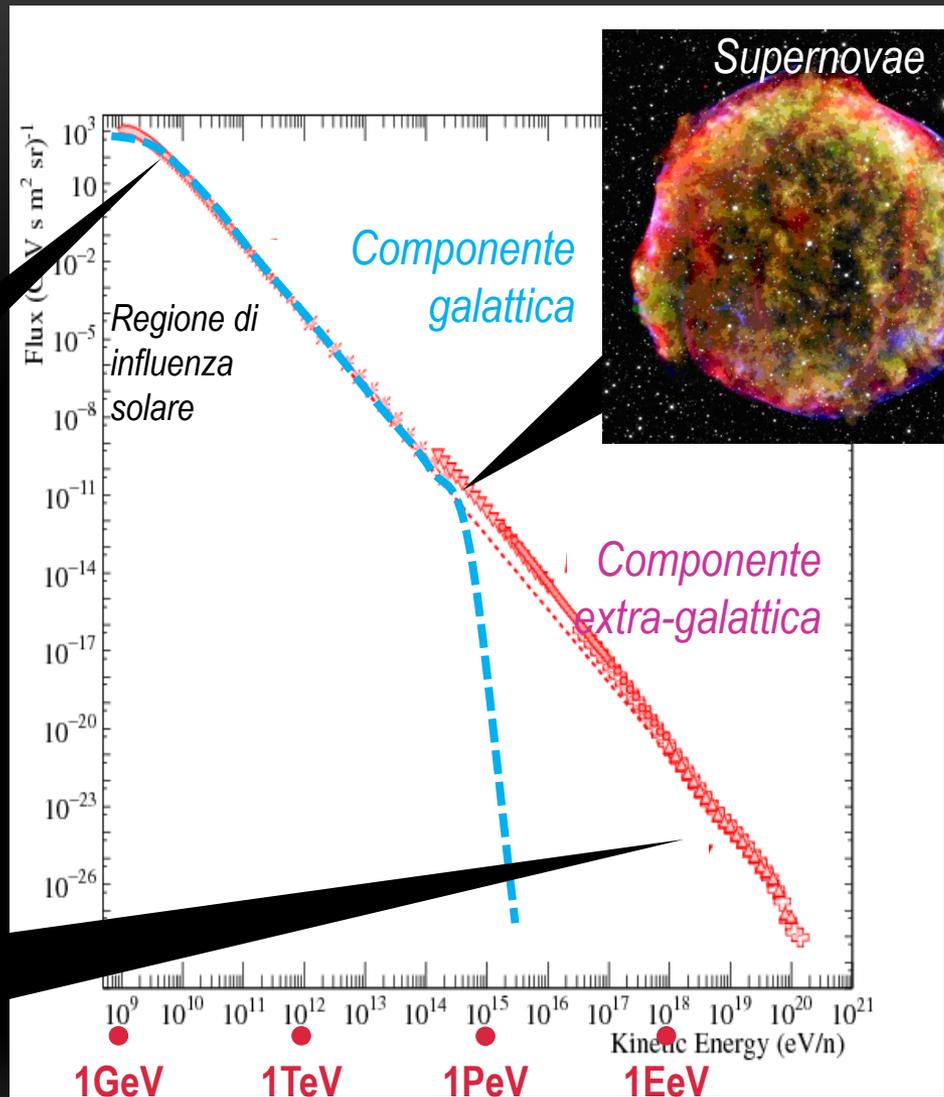


Immagine composta della
galassia con nucleo attivo
Hercules A
(radio e visibile)

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

Spettro dei raggi cosmici



COME SI STUDIANO I RAGGI COSMICI?

Oggi si studiano i raggi cosmici nello spazio ...

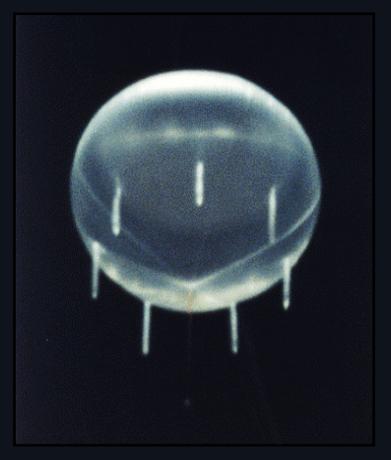
Satelliti



Stazioni spaziali



Paolloni stratosferici



Sonde interplanetarie



I Raggi Cosmici ad Udine-Trieste

PAMELA
2006-2016



AGILE
2007-



Fermi
2008-



MAGIC
2004-



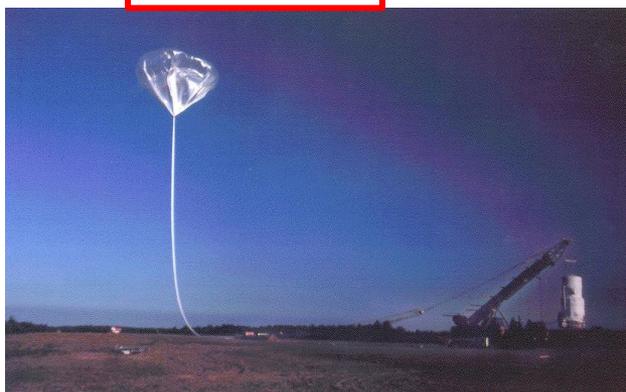
CTA
2022-



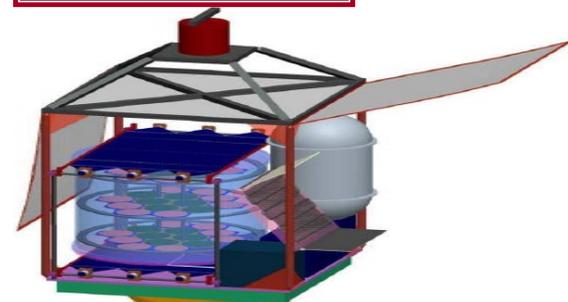
NINA-1
1998-1999



TS93 1993
CAPRICE98 1998

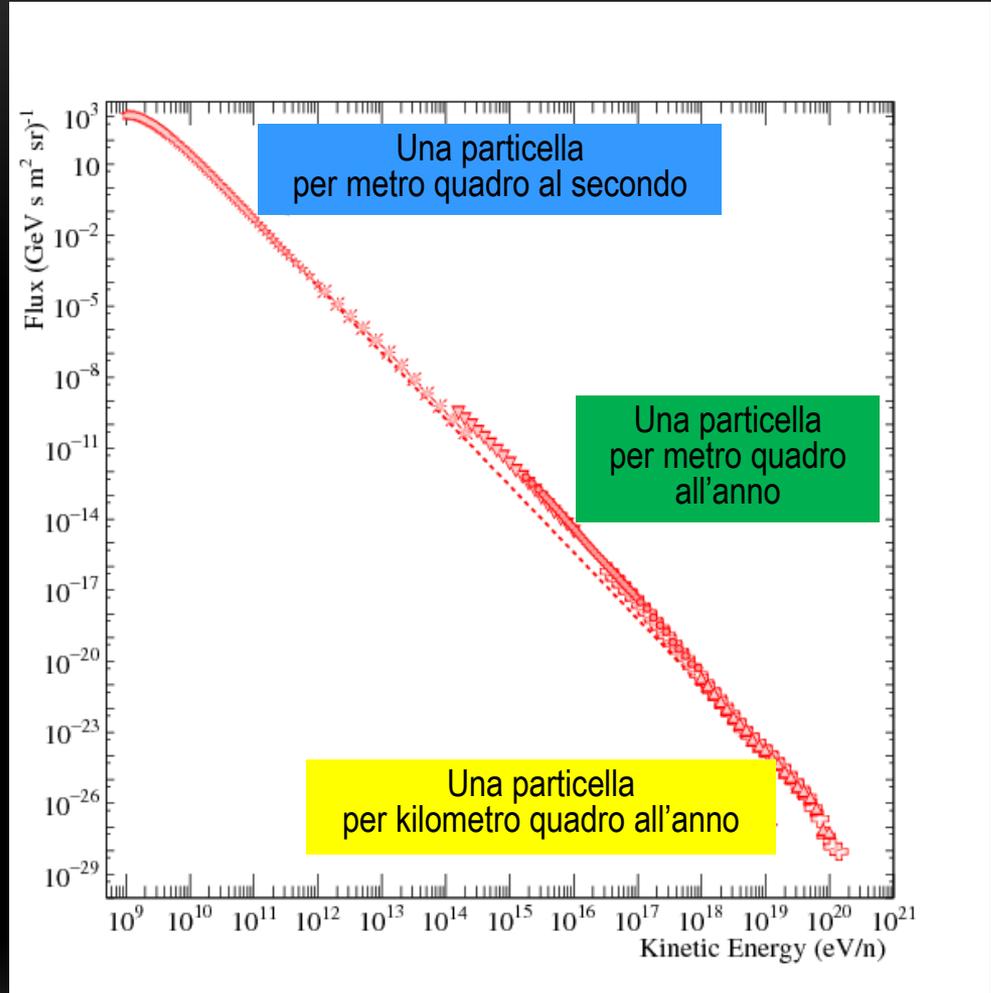


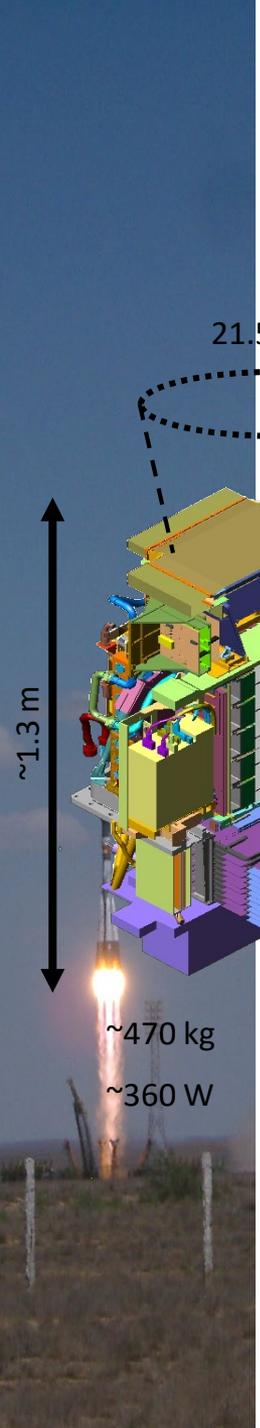
GAPS
2022



Spettro dei raggi cosmici

- L'intensità dei raggi cosmici diminuisce rapidamente al crescere dell'energia





21.5 cm²sr

e^- \bar{p} e^+ p (He,...)

TOF (S1) Trigger, ToF, dE/dx

ANTICOINCIDENCE (CARD)

Anticoincidence reduces out of acceptance background

TOF (S2)

ANTICOINCIDENCE (CAT)

ANTICOINCIDENCE (CAS)

SPECTROMETER
Sign of charge, rigidity, dE/dx

TOF (S3)

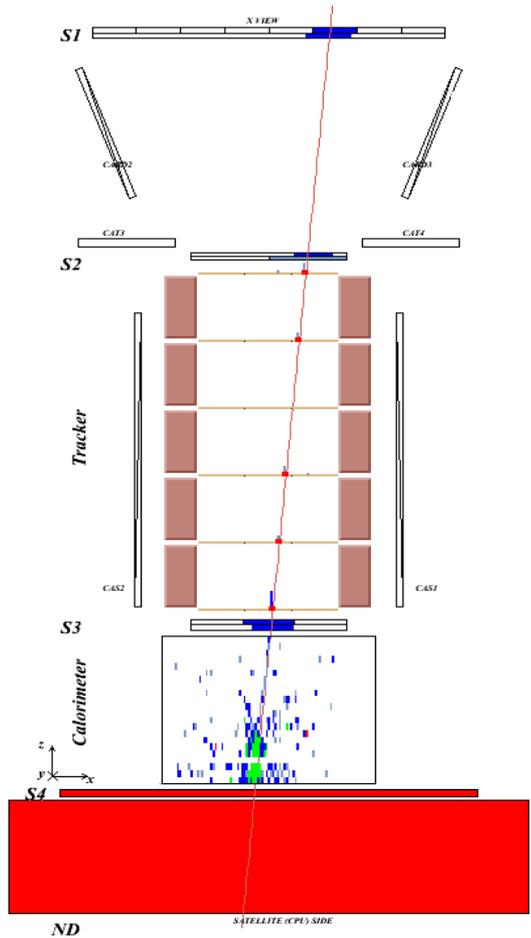
CALORIMETER

Electron energy, dE/dx, lepton-hadron separation

S4

NEUTRON DETECTOR

Antiproton / positron identification



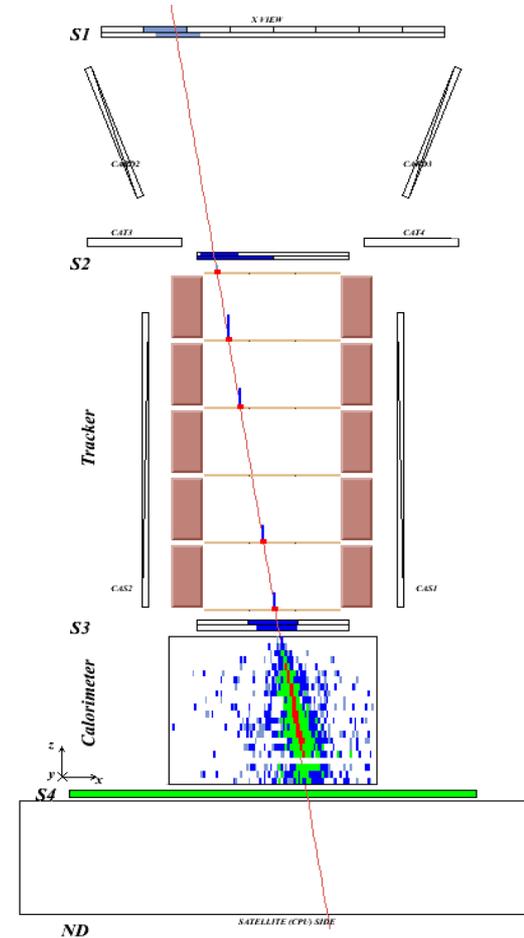
Antiproton
(NB: $e^-/p \sim 10^2$)

Time-of-flight:
trigger, albedo
rejection, mass
determination (up
to 1 GeV)

Bending in
spectrometer:
sign of charge

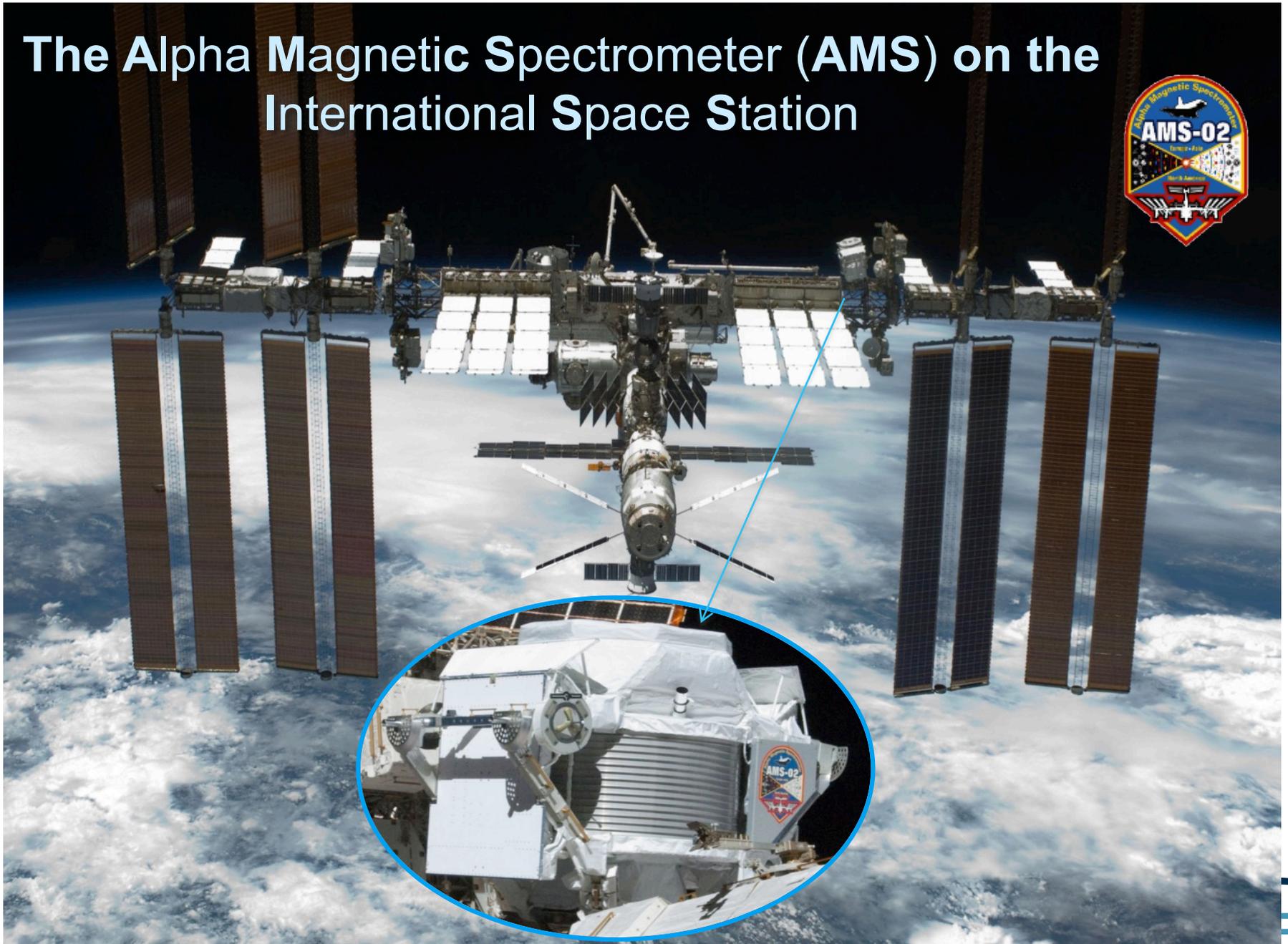
Ionisation energy loss
(dE/dx):
magnitude of charge

Interaction pattern in
calorimeter: electron-
like or proton-like,
electron energy



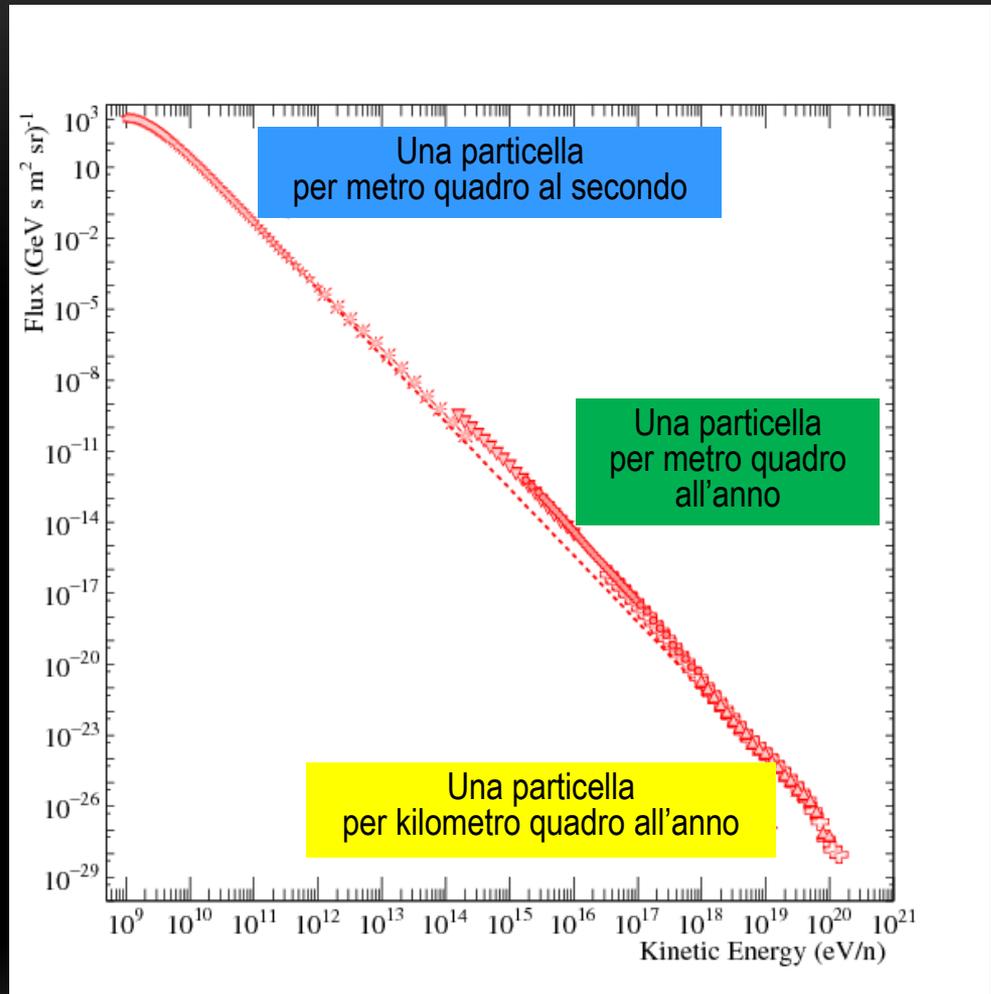
Positron
(NB: $p/e^+ \sim 10^{3-4}$)

The Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) on the International Space Station



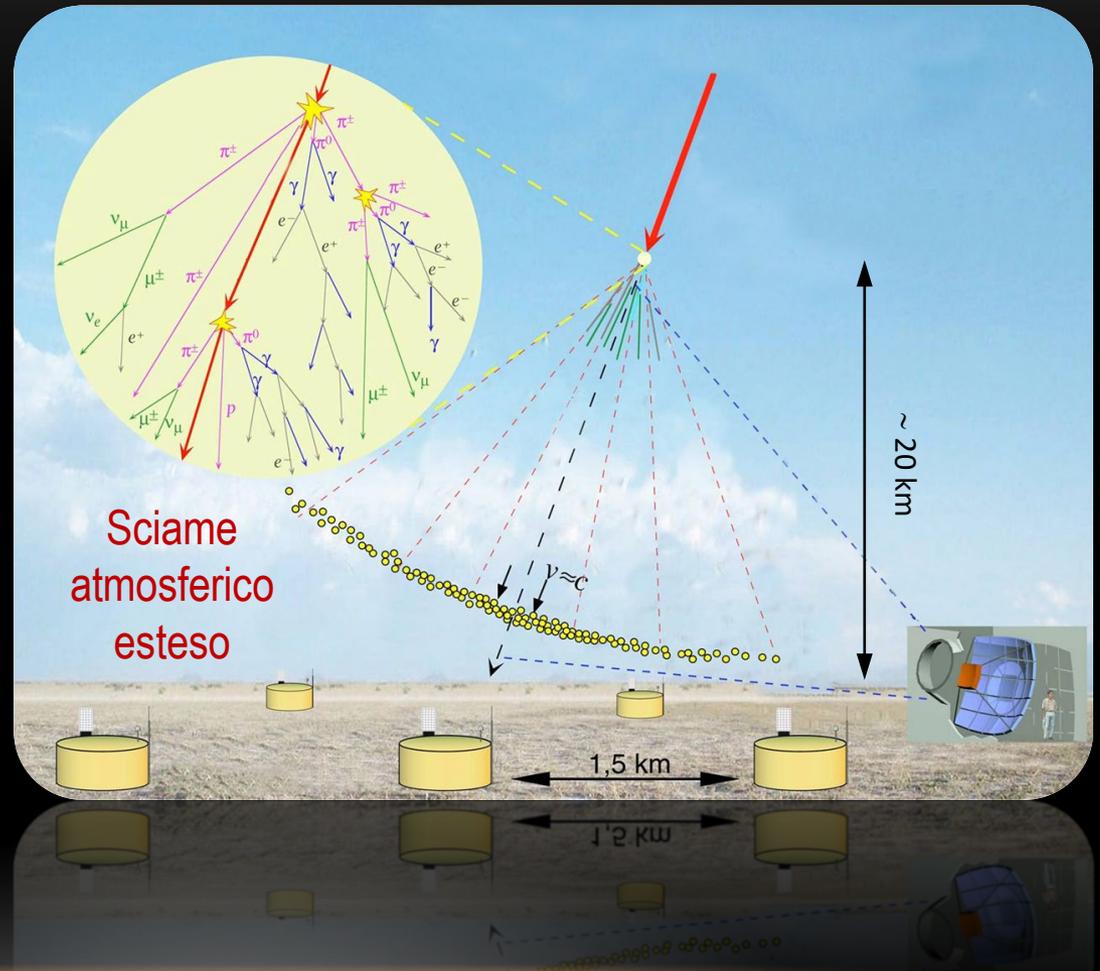
Spettro dei raggi cosmici

- L'intensità dei raggi cosmici diminuisce rapidamente al crescere dell'energia



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.



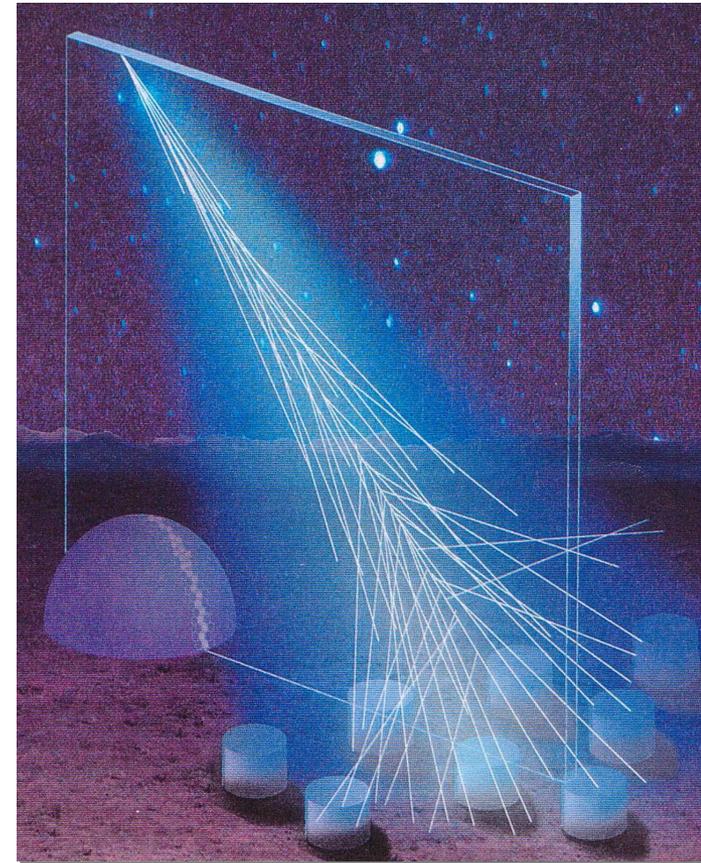
Osservatorio Pierre Auger: un rivelatore ibrido

Lo stesso sciame è misurato simultaneamente con due tecniche indipendenti:

- **un apparato di superficie** per l'osservazione delle particelle dello sciame a terra
- **un rivelatore di luce di fluorescenza** che osserva lo sviluppo longitudinale dello sciame misurando la radiazione UV prodotta in aria al passaggio delle particelle cariche dello sciame

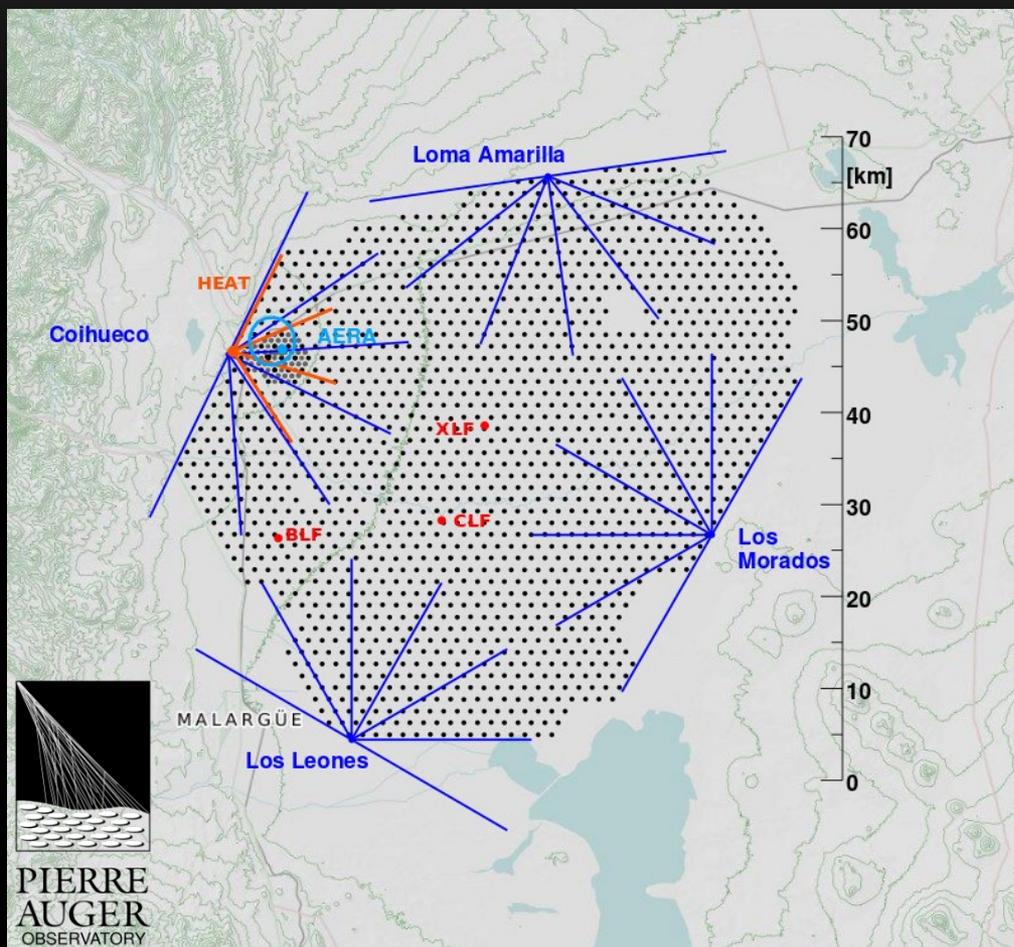
- **Determinazione accurata della direzione di arrivo degli eventi in un ampio range di energia**

- **Misura dell'energia del primario senza dipendenza dai modelli di interazione adronica**



Tecnica di rivelazione ibrida

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 3000km²



TA detector in Utah

39.3°N, 112.9°W
~1400 m a.s.l.

14 telescopes

Refurbished HiRes



3 com. towers

Surface Detector (SD)

507 plastic scintillator SDs
1.2 km spacing
700 km²



Fluorescence Detector (FD)

3 stations
38 telescopes

12 telescopes

Black Rock Mesa (BR)

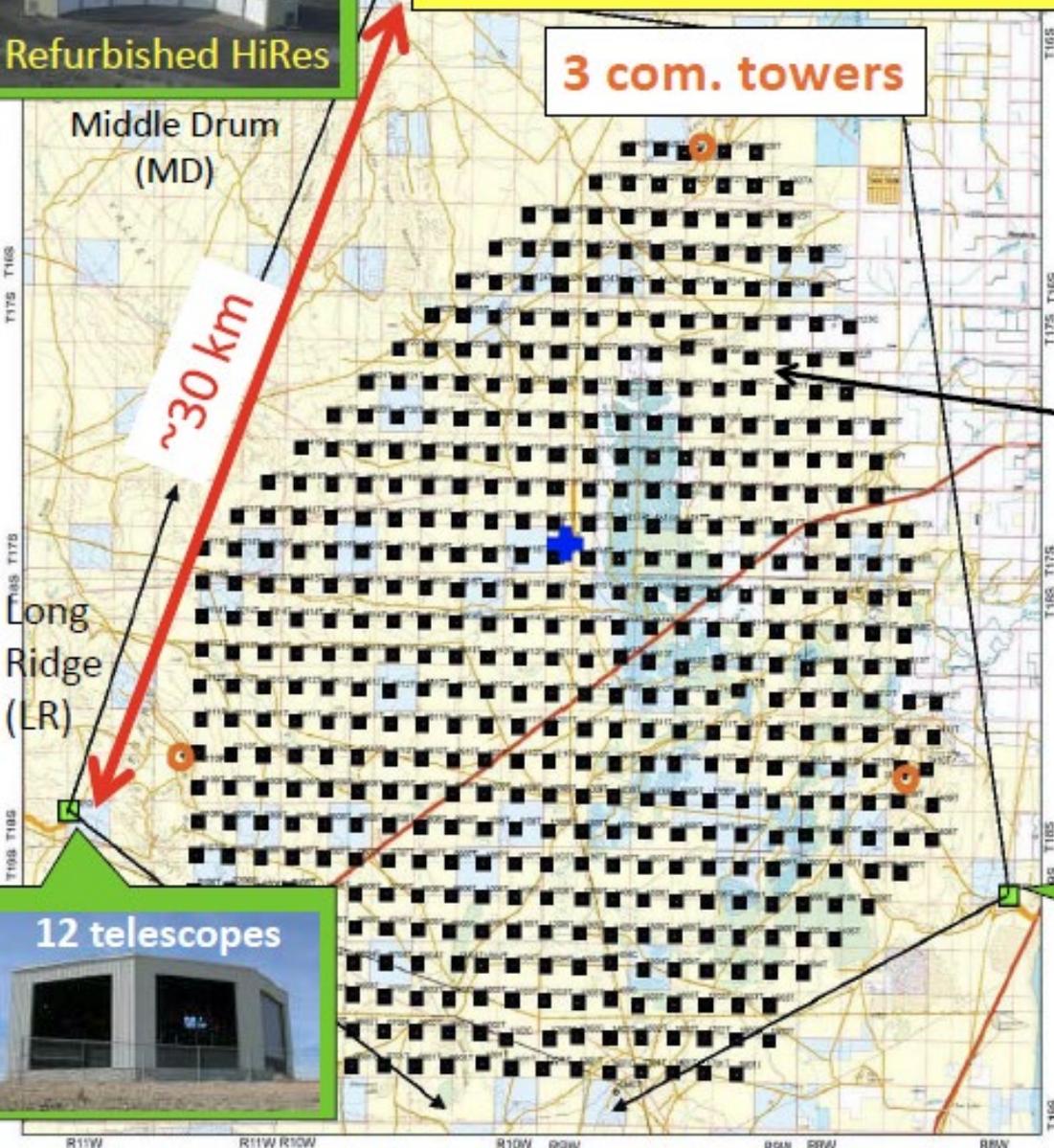


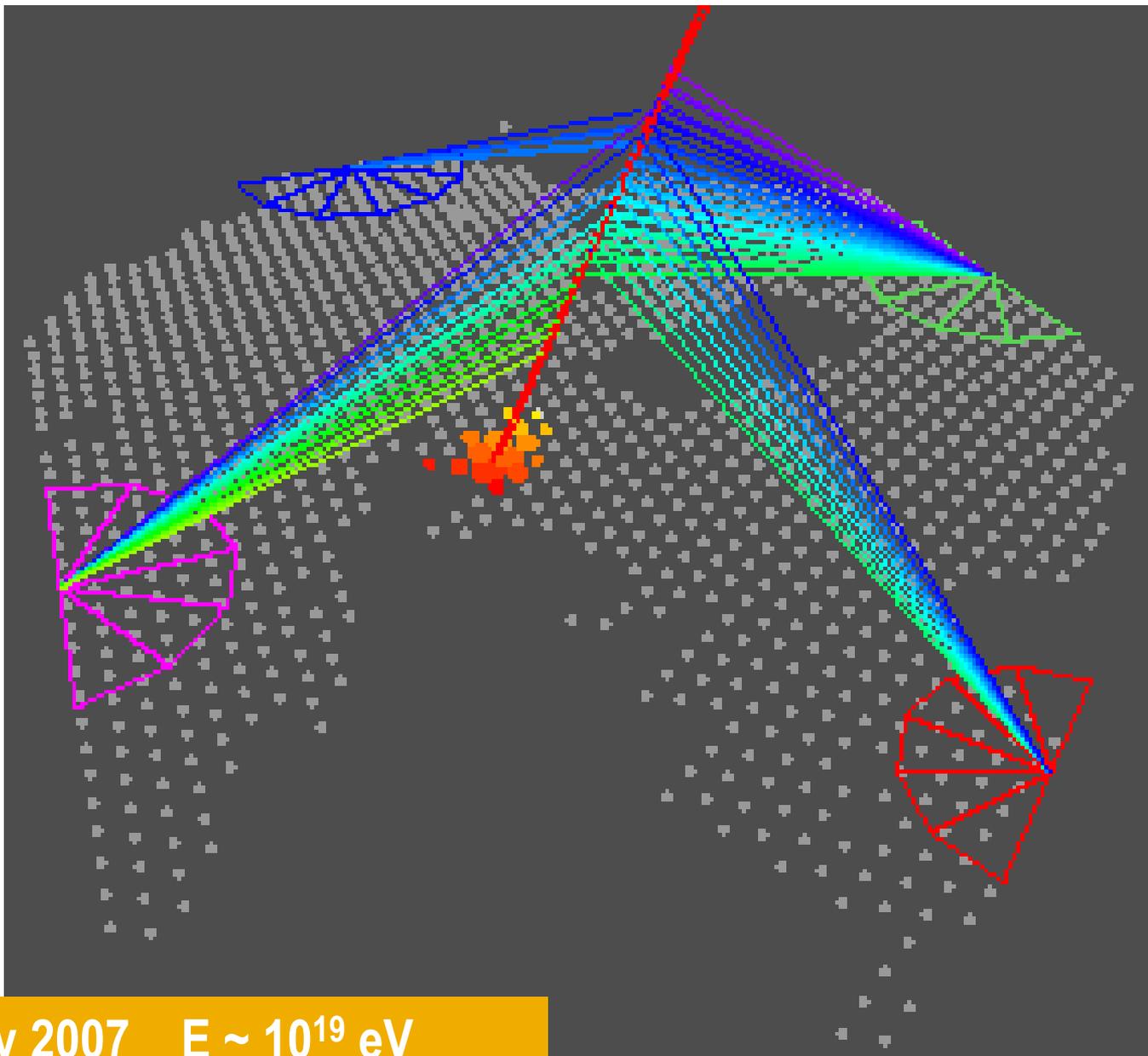
Middle Drum
(MD)

~30 km

Long
Ridge
(LR)

12 telescopes





20 May 2007 $E \sim 10^{19}$ eV

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!