

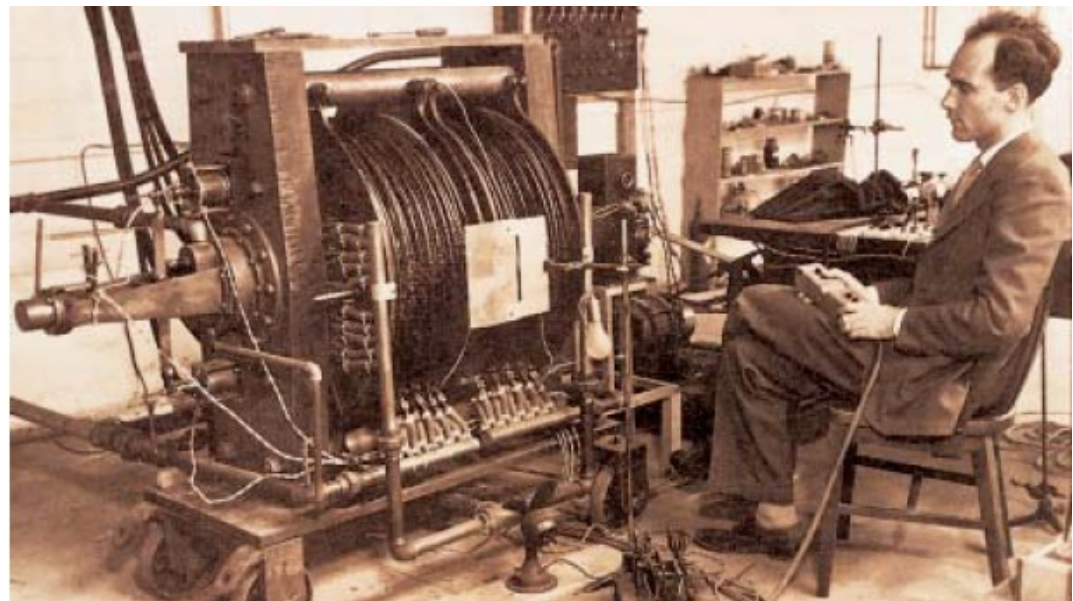
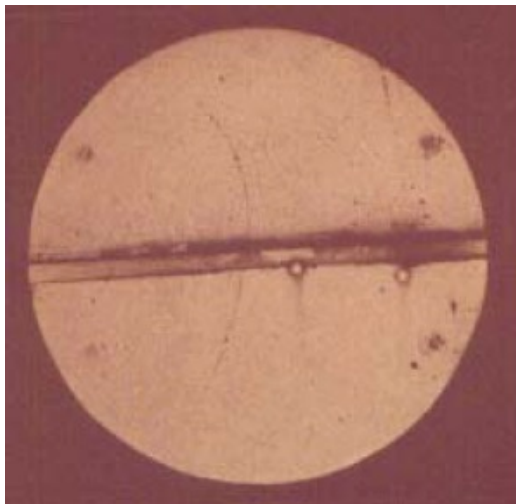
# Astrofisica Nucleare e Subnucleare

## Cosmic Rays Astrophysics – II

slides from M.Spurio and M.C.Maccarone

# Particelle scoperte nei RC

- **Il positrone (1932).**
- Carl Anderson osservò delle particelle cariche positivamente, che lasciavano nella camera a nebbia la stessa traccia degli elettroni. I suoi risultati furono convalidati nel 1933 da P. Blackett e G. Occhialini che riconobbero in esse l'antielettrone o positrone proposto teoricamente da Dirac, osservando la conversione di fotoni di alta energia in coppie  $e^+e^-$



- Il muone (1937).
- Ancora Anderson, notò delle particelle che deviavano in maniera diversa dagli elettroni e da altre particelle note quando queste passavano attraverso un campo magnetico. In particolare, queste nuove particelle venivano deflesse ad un angolo minore rispetto agli elettroni, ma più acuto di quello dei protoni. Si assunse che la loro carica fosse identica a quella dell'elettrone e, per rispondere alla differenza di deflessione, si ritenne che avesse una massa intermedia (un valore compreso tra la massa del protone e dell'elettrone).

Si pensava che fosse la particella ipotizzata da Yukawa per spiegare le interazioni tra nucleoni per formare i nuclei

Si scoprì che questa particella aveva delle caratteristiche peculiari da renderla il cugino pesante dell'elettrone (esperimento Pancini-Piccioni-Conversi).

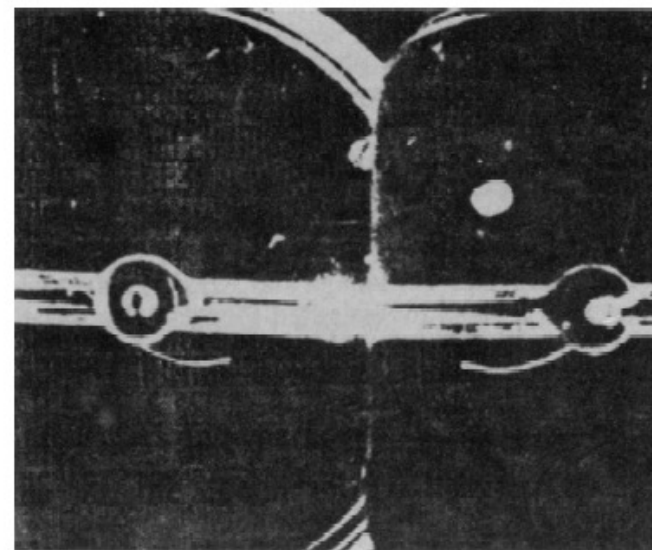


Fig. 1. - Evidenza in camera di Wilson di un muone positivo che traversa un contatore di Geiger entro la camera [1]. La sensibilità della camera non poteva arrivare a rivelare l'elettrone di decadimento.



Carl D. Anderson e Seth H. Neddermeyer continuano gli esperimenti sui raggi cosmici in montagna, con la **camera a nebbia** (con campo magnetico e lastra di piombo) montata sopra un vecchio autocarro. I dati raccolti durante le misure a Pike's Peak, Colorado, rivelano l'esistenza di una nuova particella a vita breve e di massa intermedia tra elettrone e protone.

E' la scoperta del **mesotrone**, chiamato poi **mesone  $\mu$  o muone**.



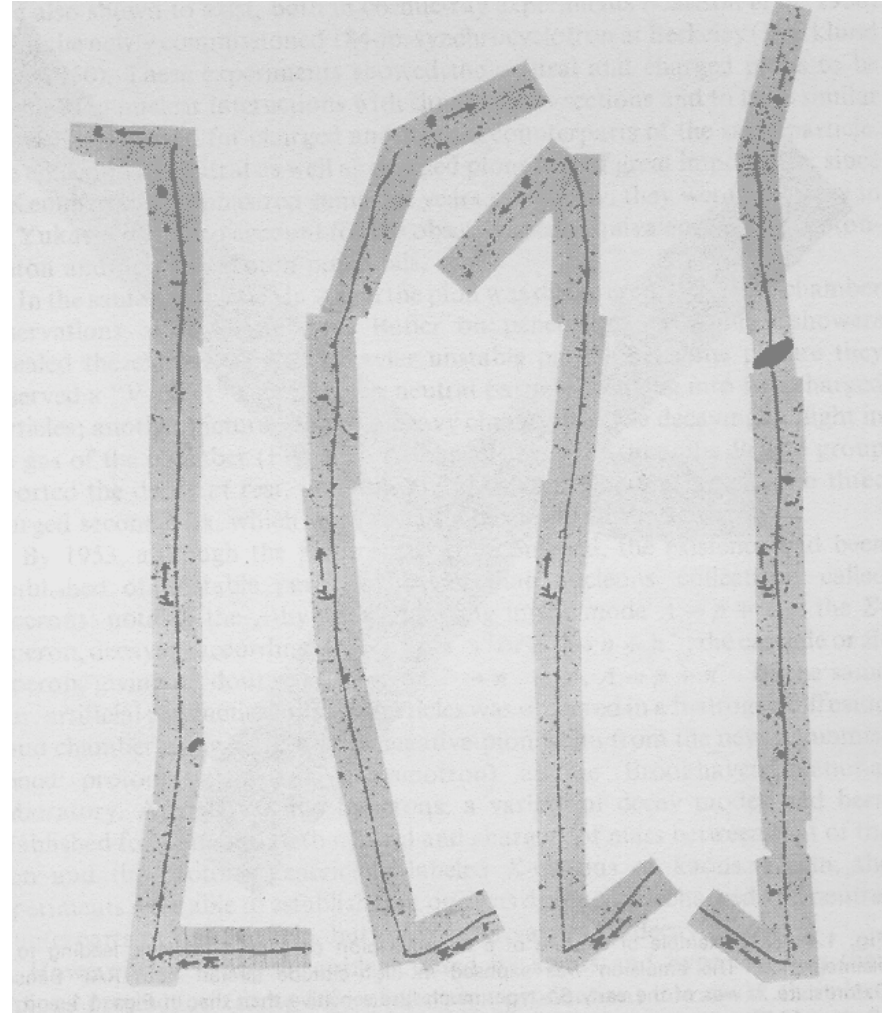
*Anderson e Neddermeyer con il loro autocarro.*



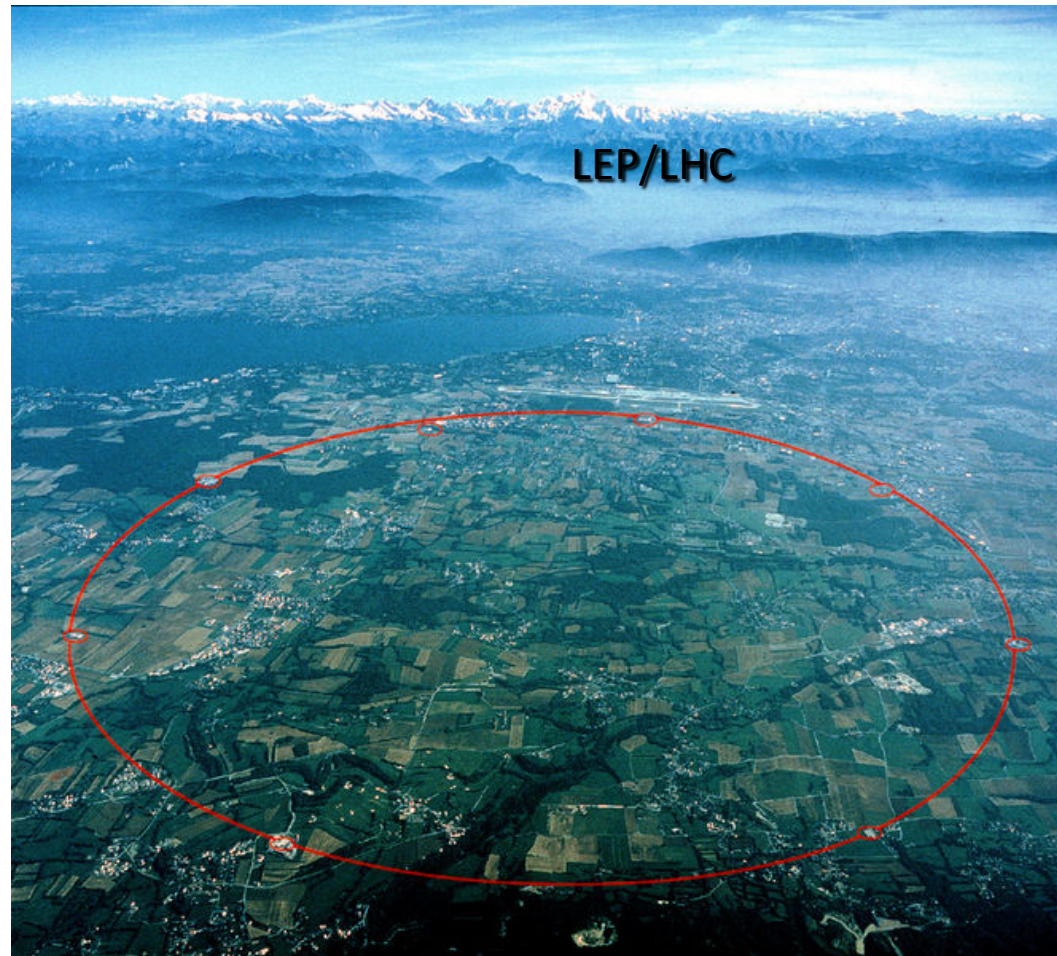
In modo indipendente, e quasi contemporaneamente, anche **J.C. Street** e **E.C. Stevenson** rilevano l'esistenza del **muone** in raggi cosmici, utilizzando una **camera a nebbia controllata da contatori**.



- **Il pione (1947).**
- Particella predetta nel 1936 da Hideki Yukawa, il pione si osservò sperimentalmente solo nel 1947 da parte di C.F. Pawel, G. Occhialini e C. Lattes, utilizzando speciali emulsioni fotografiche per registrare la produzione di pioni da parte dei raggi cosmici e il loro successivo decadimento in muoni, che a loro volta decadono in elettroni (o positroni) e in neutrini (invisibili).

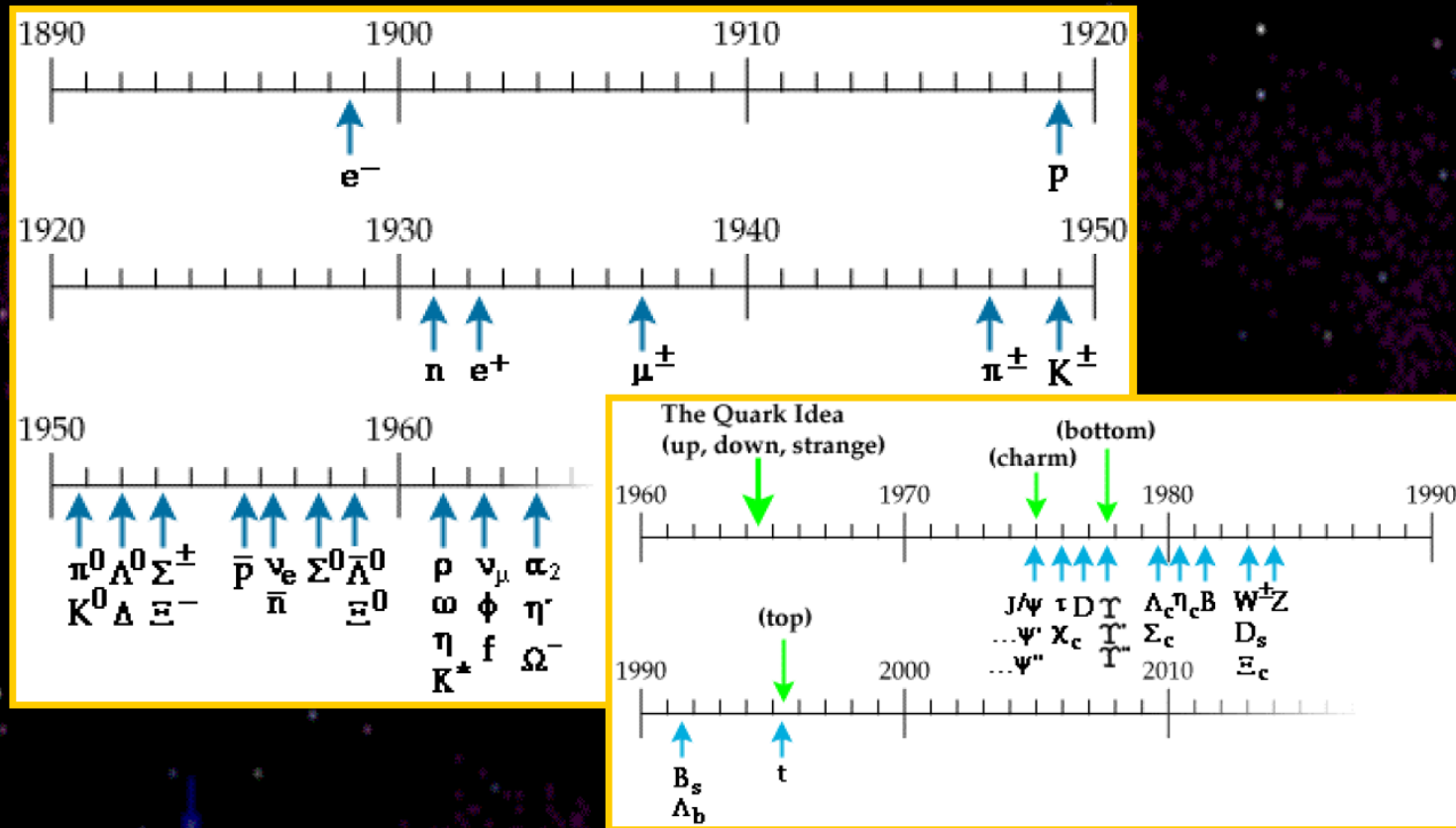


... poi gli acceleratori



## Alla fine degli Anni Trenta ...

... prende vita la scienza della fisica delle particelle elementari ...



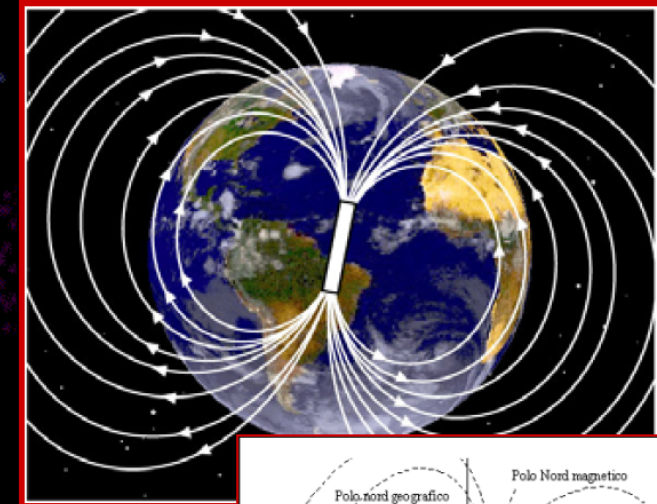
... e i fisici particellari continueranno ad usare i raggi cosmici per le loro ricerche almeno fino all'avvento, negli anni '50, degli acceleratori di particelle.



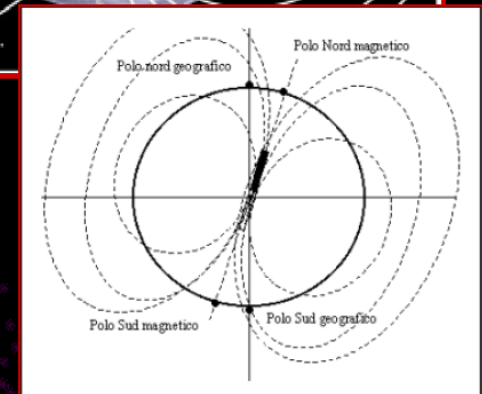
## Natura dei raggi cosmici: l'influenza del campo magnetico terrestre



**Jacob Clay** - l'intensità dei raggi cosmici dipende dalla latitudine geografica: essa è più debole all'equatore che ai poli. E' la prima osservazione dell'effetto di latitudine geomagnetica, e la prima evidenza che la radiazione cosmica è costituita, almeno in parte, da particelle cariche che subiscono l'influenza del campo magnetico terrestre.



**Walter Bothe e Werner Kolhörster** - la radiazione cosmica primaria è composta da particelle cariche, presumibilmente elettroni di altissima energia.



**Bruno Rossi** - se i raggi cosmici sono di natura particellare, la loro distribuzione angolare dovrebbe presentare una asimmetria rispetto al piano del meridiano geomagnetico ("effetto est-ovest"), con una prevalenza dei corpuscoli provenienti da Est (se di carica negativa) o da Ovest (se di carica positiva).

## “Dai mari del sud all’artico alla ricerca dei raggi cosmici”



Arthur H. Compton organizza un'estesa campagna di misure di ionizzazione a diverse latitudini e altitudini, una vera e propria esplorazione geografica. I risultati di Compton e collaboratori evidenziano la **natura corpuscolare** dei raggi cosmici tramite l' **effetto di latitudine** dovuto al campo magnetico terrestre e la **variazione dell'intensità** dei raggi cosmici **con l'altezza**.



*Le postazioni (81 località diverse) per lo studio geografico dei raggi cosmici (Compton, 1933)*



## Natura dei raggi cosmici ...



Vicino Città del Messico, due gruppi di ricercatori (uno guidato da **Thomas H. Johnson**, l'altro guidato da **Luis Alvarez** e **Arthur Compton**) misurano indipendentemente l'effetto est-ovest previsto da Bruno Rossi e mostrano che:

**la radiazione cosmica primaria è composta principalmente da particelle positivamente cariche**

Altri esperimenti condotti in pallone da vari gruppi di ricercatori, utilizzando contatori Geiger in formazione di telescopi separati da piombo, determinano che la maggior parte delle particelle primarie della radiazione cosmica è costituita da **protoni**.

Oggi sappiamo che i raggi cosmici sono in predominanza protoni, con abbondanza dal 50% a oltre il 90% in funzione della loro energia. Sono inoltre presenti nuclei, elettroni, positroni, fotoni, neutrini, particelle esotiche, .

# Lo spettro energetico dei RC primari

- 1) Si chiamano **RC primari** quelli che giungono sulla sommità della atmosfera, senza interagirvi
- 2) Lo spettro energetico dei RC mostra un grado di organizzazione estremamente elevato
- 3) Le energie più elevate misurate sono  $E \cong 10^{20}$  eV = Energia cinetica palla da tennis @100 km/h
- 4) Le energie più elevate in gioco nei RC sono irraggiungibili agli acceleratori (ed anche alcune *regioni cinematiche*)

# All Particle spectrum

$$\Phi_{\text{TOT}} \sim 10000 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$$

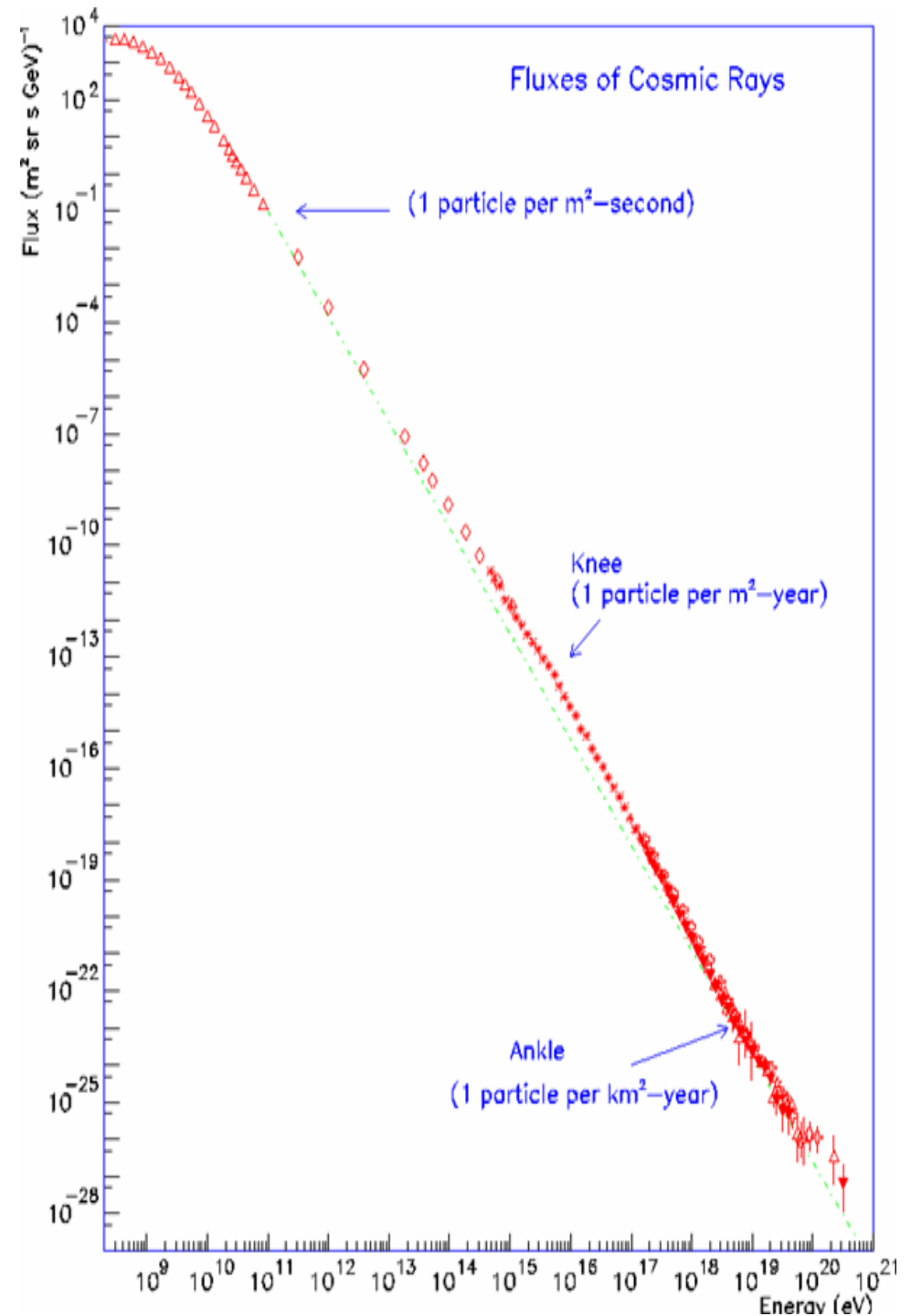
Misure dirette: 90% p, 9%

He, 1% nuclei pesanti

Si estende per 13 ordini di grandezza in energia

Per 32 ordini di grandezza in flusso

Legge di potenza su tutto lo spettro, con almeno due cambi di pendenza



- Lo spettro energetico può essere descritto dalla legge  
(**flusso o spettro differenziale dei RC:**)

Legge che descrive i dati sperimentali.

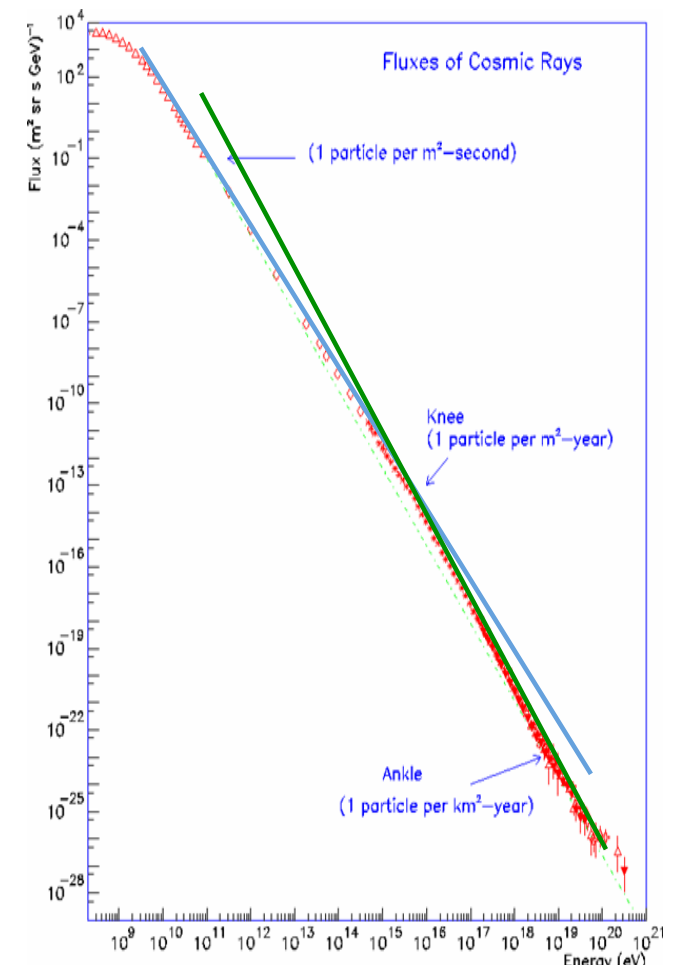
I parametri  $K$  e  $\Gamma$  vengono determinati dall'adattamento della curva coi dati

Regolarità di un fenomeno fisico

Legge di natura!

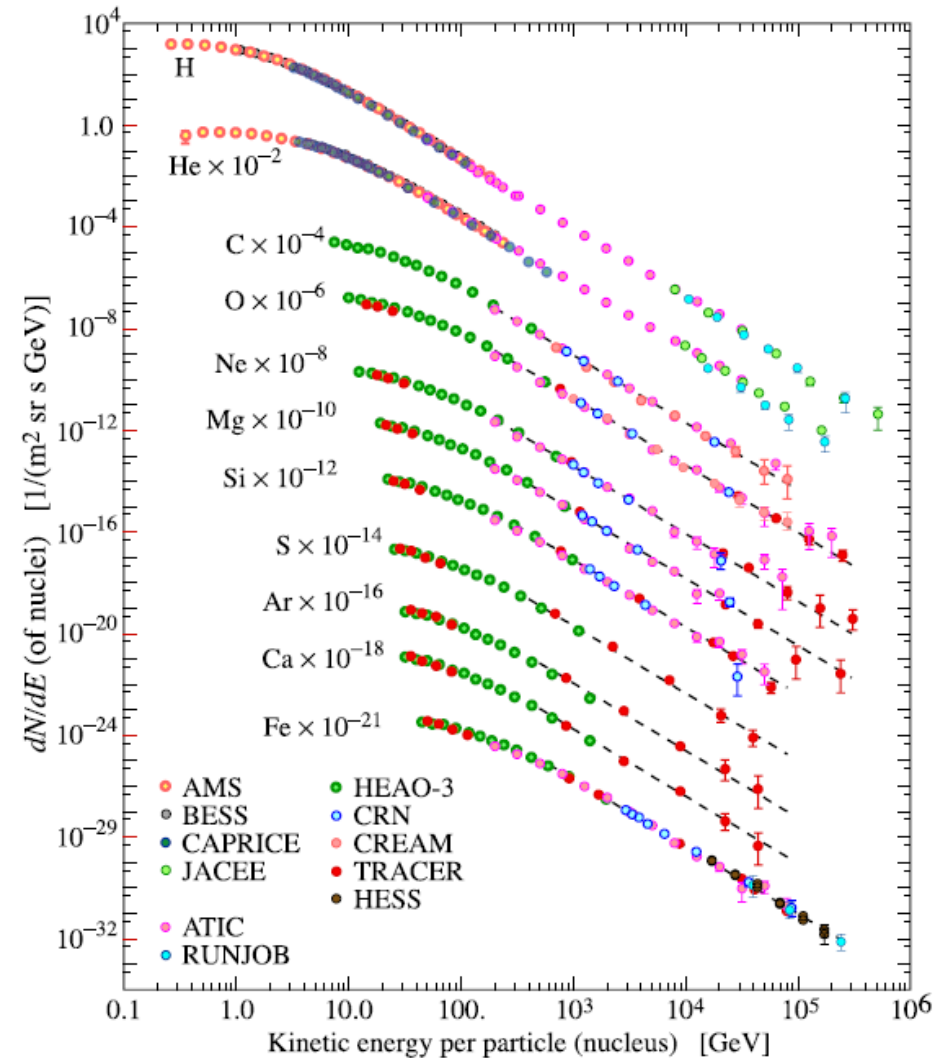
Occorre scoprire quali sono i fenomeni naturali che producono tale legge di natura.

Implica conoscenze di fisica, astrofisica ed anche cosmologia!



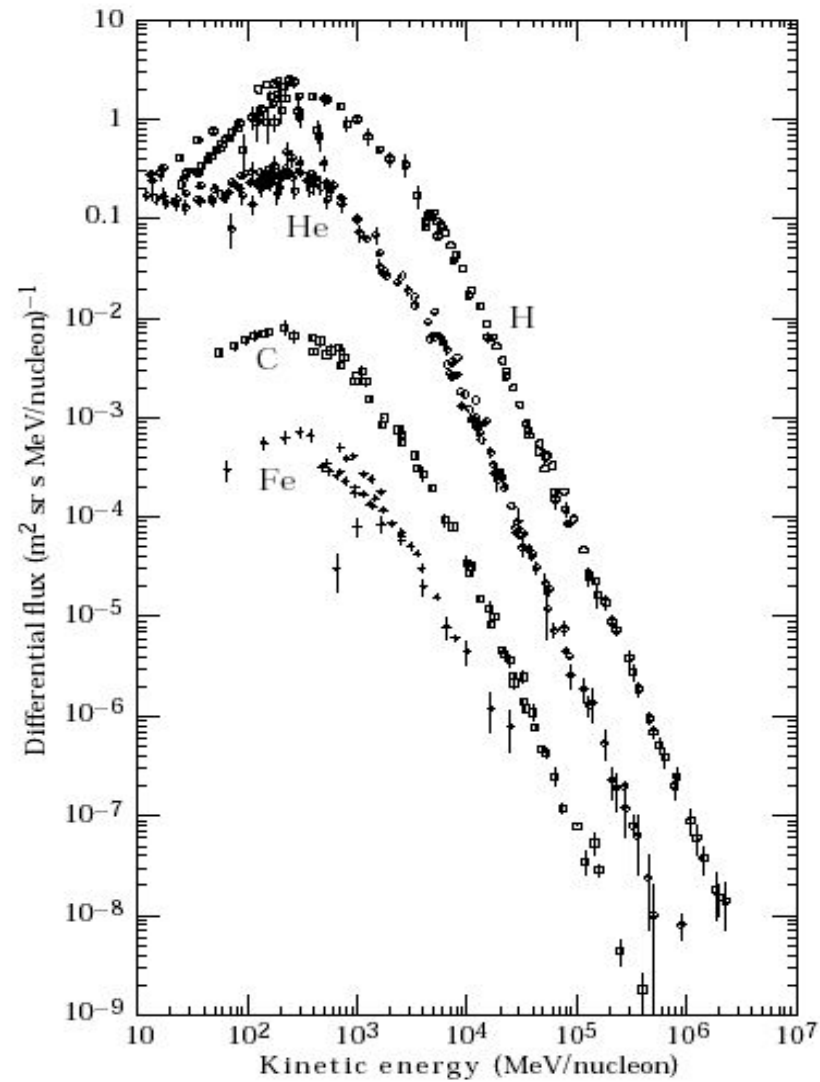
# Diverse Specie nucleari

Se misurato, si può parlare dello spettro di diverse specie atomiche nei RC  
Le variazioni del ciclo solare hanno effetti per energie  $< 1$  GeV  
RC con  $E > 2$  GeV non affetti dal ciclo solare  
Flusso di RC di bassa energia ( $>1$  GeV):  $\sim 1000$  p/(m<sup>2</sup>s sr).

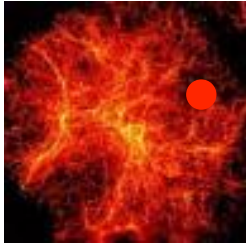




# CR observations

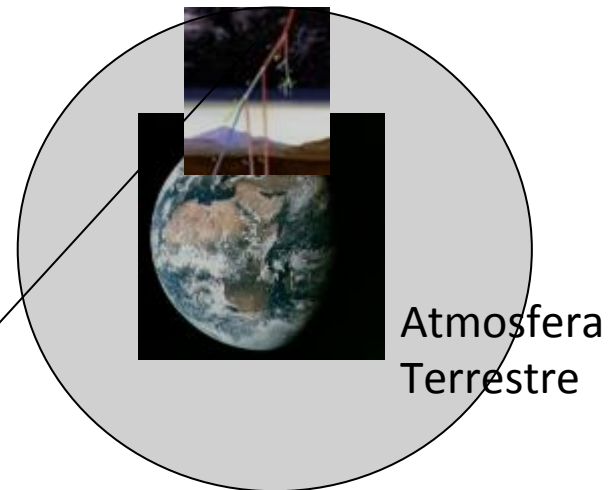


# RC Primari e Secondari



Sorgente Astrofisica  
(Resto di Supernova)

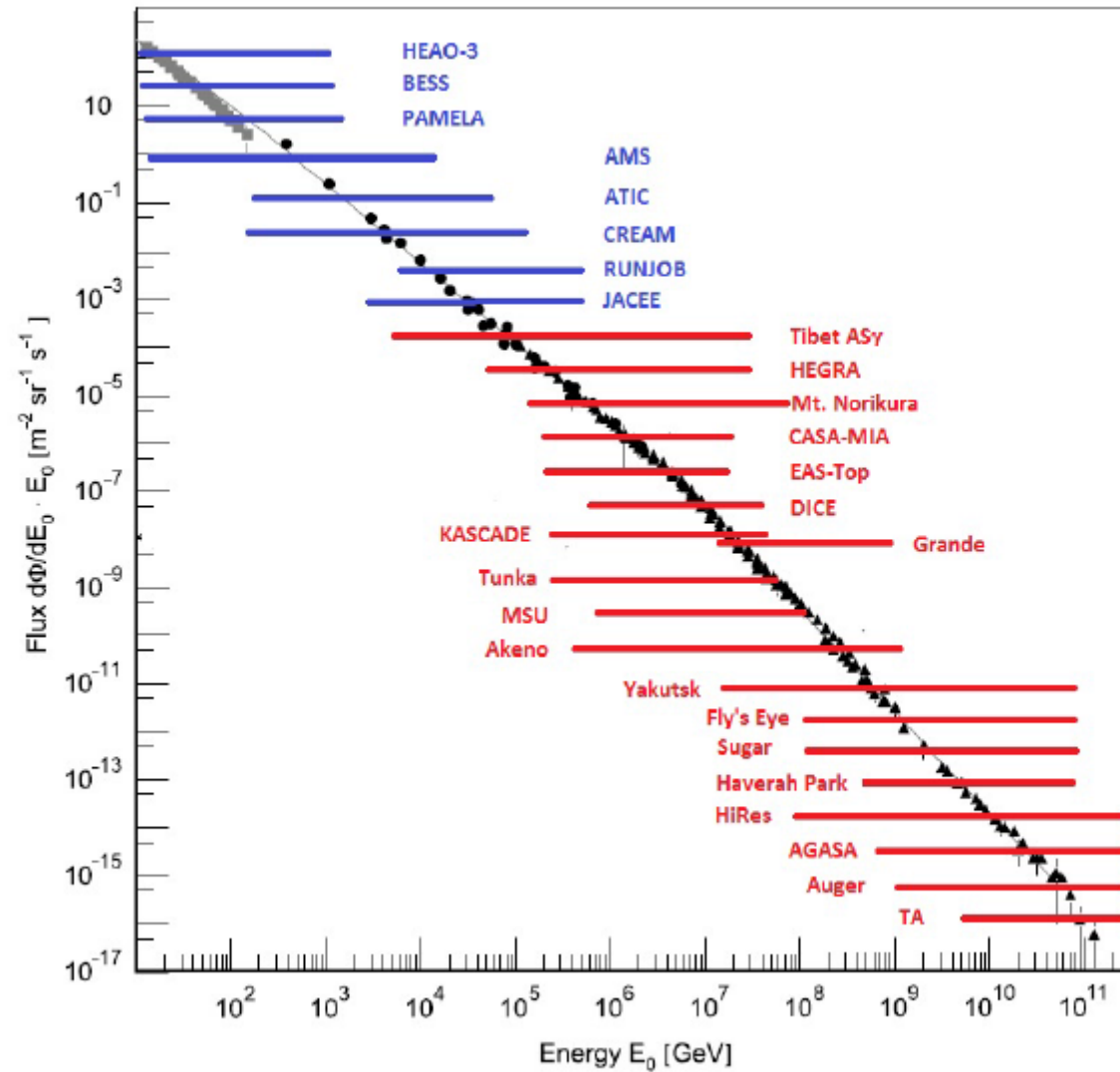
**Raggio Cosmico Primario**  
(protone, nucleo)



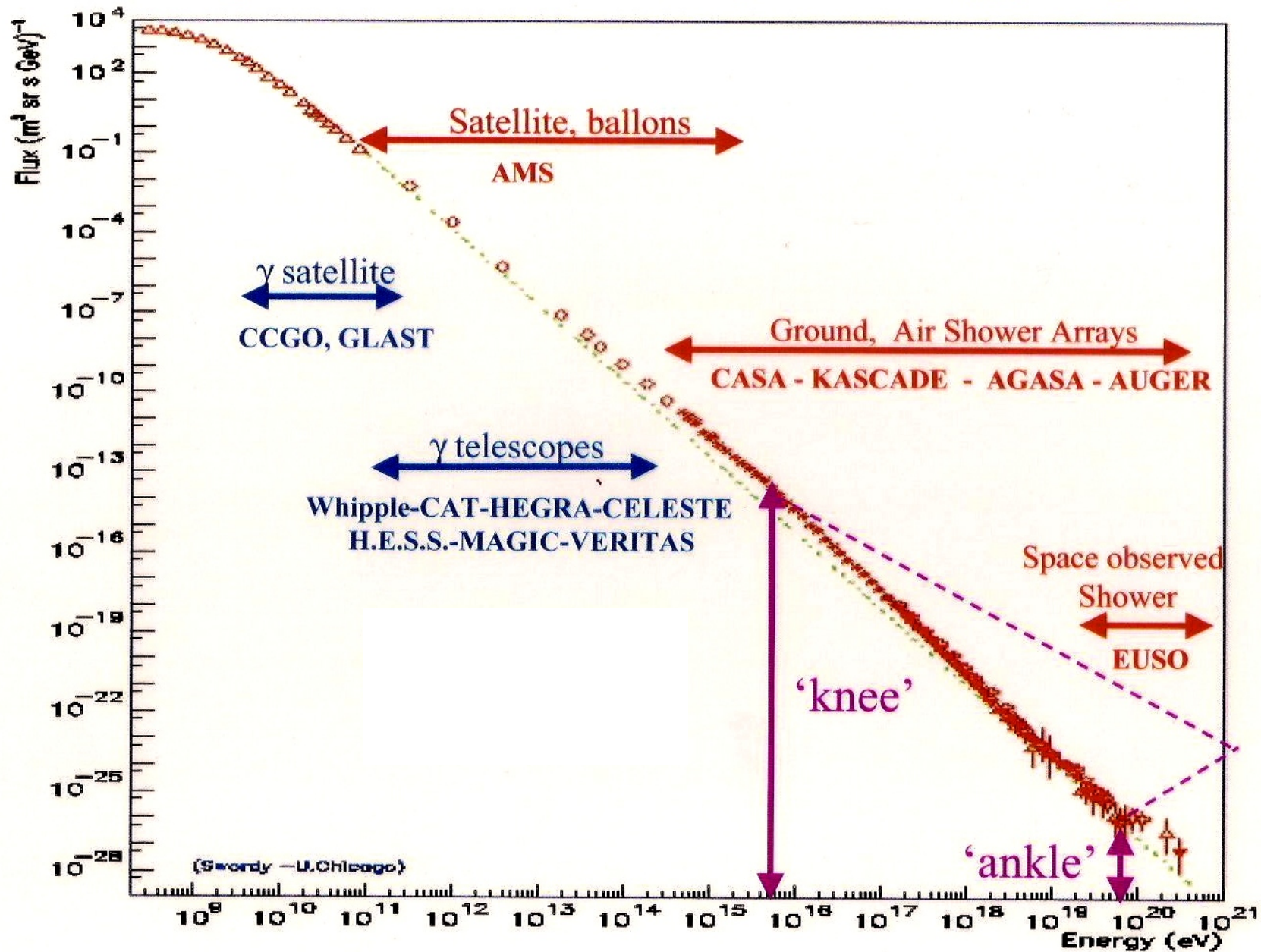
Sciame di particelle  
secondarie =  
***RC secondari***

# Metodi di misura dei raggi cosmici

$\Phi(>E)$   
 Misure dirette  
 $E < 10^{14}$  eV  
 Misure indirette,  
 $E > 10^{14}$  eV

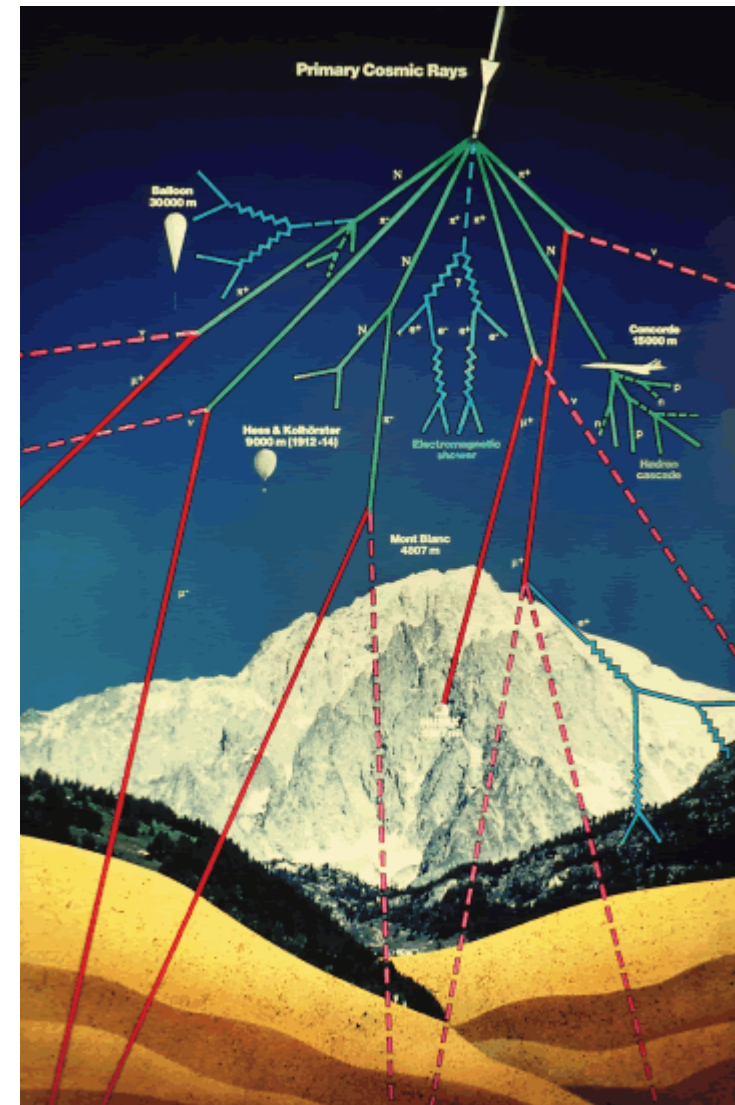


# Charged Cosmic Ray Energy Spectrum



# I RC secondari

- Interazione dei RC coi nuclei dell'atmosfera → sciami di particelle secondarie → **RC secondari** .
- L'atmosfera funge da *convertitore*
- La radiazione primaria può essere direttamente studiata solo fuori dall'atmosfera terrestre (sonde)
- La radiazione al suolo può essere studiata con rivelatore di sciami
- Esperimenti *underground* per la componente penetrante (muoni e neutrini)



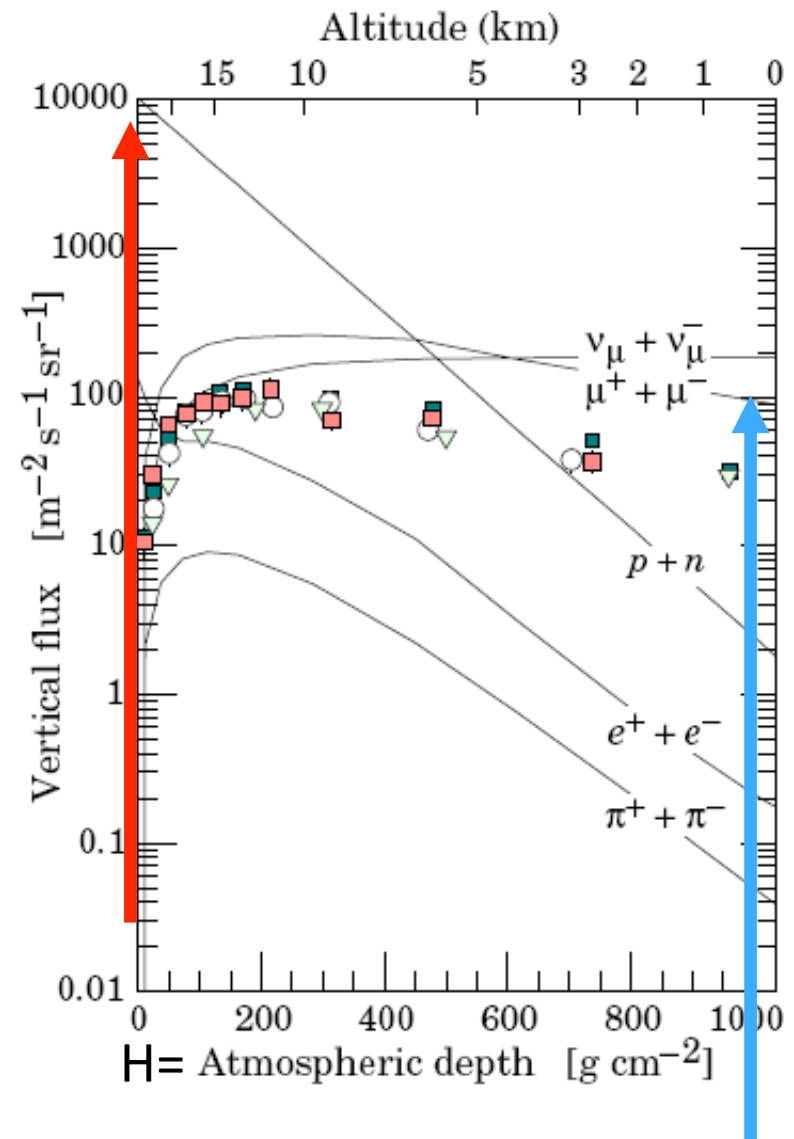


# RC secondari

Lo spessore di atmosfera equivale a 10 m di acqua

1. Flusso sulla sommità ( $H=0 \text{ gcm}^{-2}$ ):  
 $10000 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$   
p (90%), He (9%), A (1%)

2. Flusso a livello del mare ( $H=1000 \text{ gcm}^{-2}$ ):  
 $200 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$   
Muoni, neutrini,  $e^+e^-$ ,  $\gamma$



### 3. Underground: muoni e neutrini

Il flusso decresce in modo esponenziale con la profondità.

Per  $h > 13$  km.w.e.

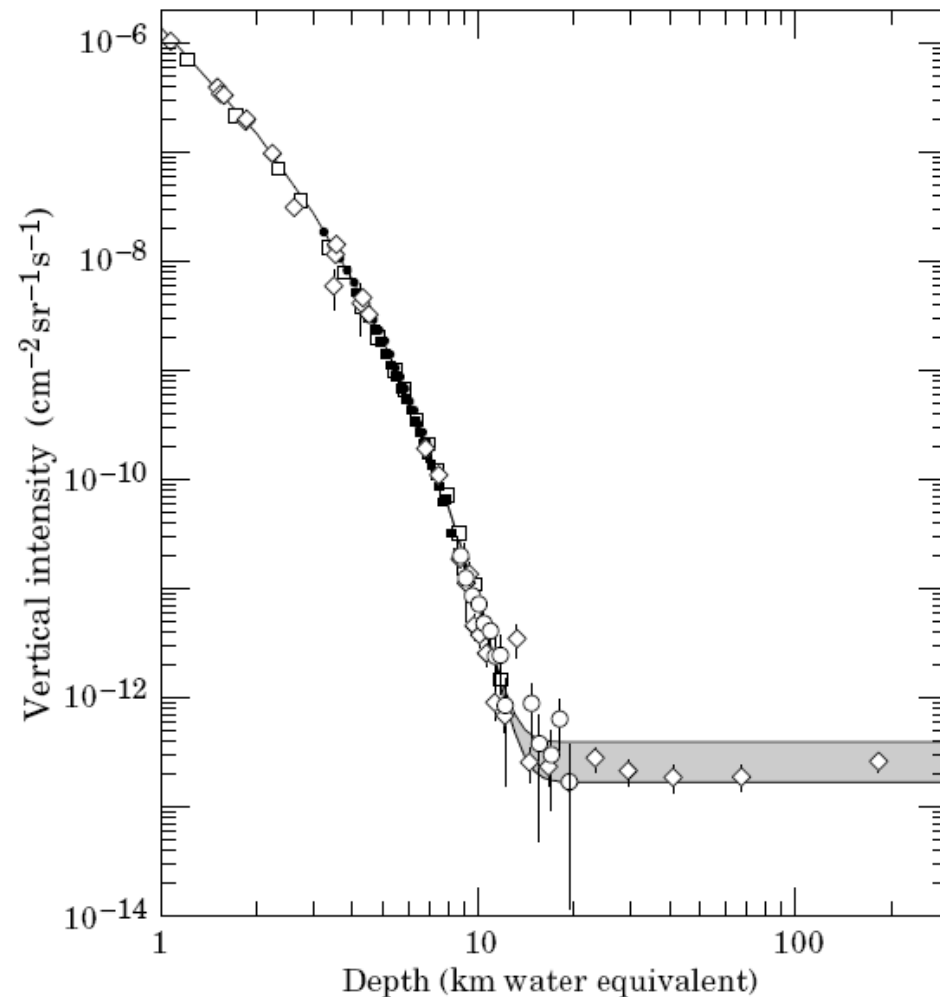
sopravvivono solo le particelle indotte da neutrini.

Nascita di esperimenti

underground a basso fondo

Ai LNGS il flusso è ridotto di un fattore  $10^6$  rispetto a quello al livello del mare.

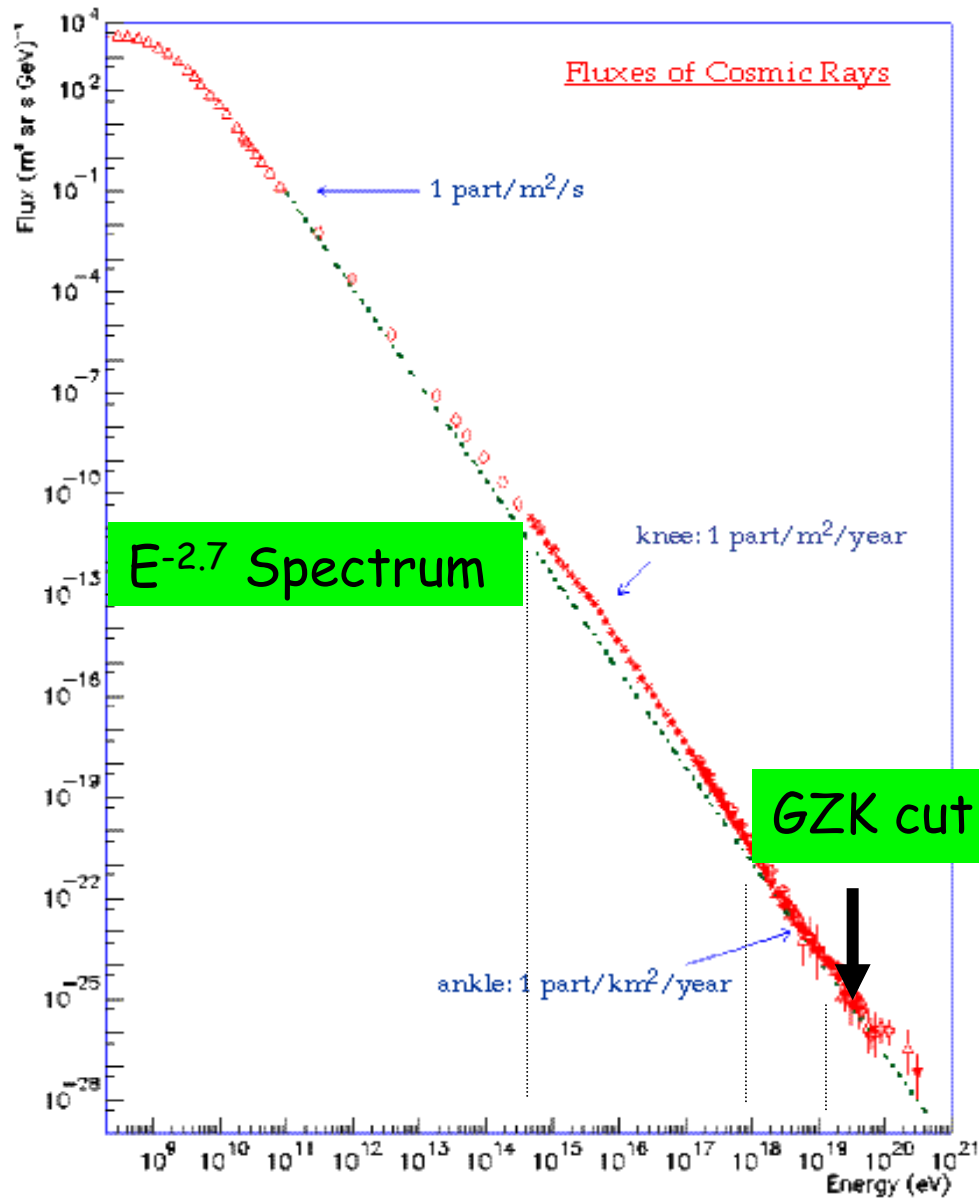
### 24. Cosmic rays



**Figure 24.5:** Vertical muon intensity vs depth (1 km.w.e. =  $10^5$  g  $\text{cm}^{-2}$  of standard rock). The experimental data are from:  $\diamond$ : the compilations of Crouch [45],  $\square$ : Baksan [46],  $\circ$ : LVD [47],  $\bullet$ : MACRO [48],  $\blacksquare$ : Frejus [49]. The shaded area at large depths represents neutrino-induced muons of energy above 2 GeV. The upper line is for horizontal neutrino-induced muons, the lower one for vertically upward muons.

# The primary spectrum

## Possible Origins



$E < 10^{15}$  eV  
Galactic

$10^{15} < E < 10^{18}$  eV  
Extra-galactic ?

UHECR

$10^{18} < E < 5 \cdot 10^{19}$  eV  
Unknown

EECR

$5 \cdot 10^{19} < E < 3 \cdot 10^{20}$  eV  
Unexpected

## Cosa possiamo imparare dai RC?

<b>Misure/Effetti sperimentali</b>	<b>Informazioni Fisiche</b>
<p>Composizione:      <math>p \cong 85\%</math>                          <math>He \cong 12\%</math>                          <math>C,N,O \cong 10^{-2}</math>                          <math>Fe \cong 10^{-4}</math>                          <math>e^- \cong 2\%</math>                          <math>e^+ \cong 10^{-4}</math>                          <math>\bar{p} \cong 10^{-4}</math></p> <p>Spettri energetici Composizione isotopica Ricerche di antinuclei Ricerche di nuove particelle</p> <p>Modulazione solare Taglio geomagnetico Fasce di radiazione Atmosfera (<math>23 X_0, 11 \lambda_1</math>)</p>	<p>Sorgenti Meccanismi di accelerazione Meccanismi di propagazione Mezzo interstellare Tempo di confinamento Nucleosintesi Campi magnetici Fisica del sole Geofisica Simmetria materia/antimateria??? Nuove particelle??? Materia oscura??? Nuove interazioni??? Cosmologia???</p>

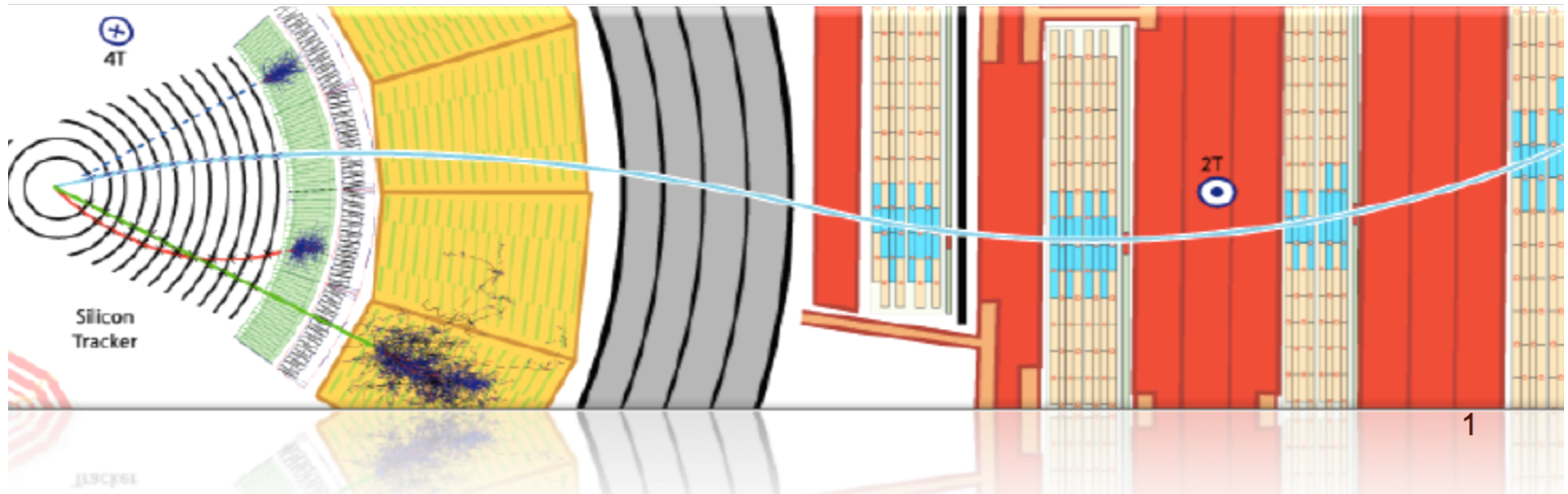
# Astrofisica Nucleare e Subnucleare

## Trigger and DAQ



# Detector Systems

4<sup>th</sup> July 2012



# Trigger

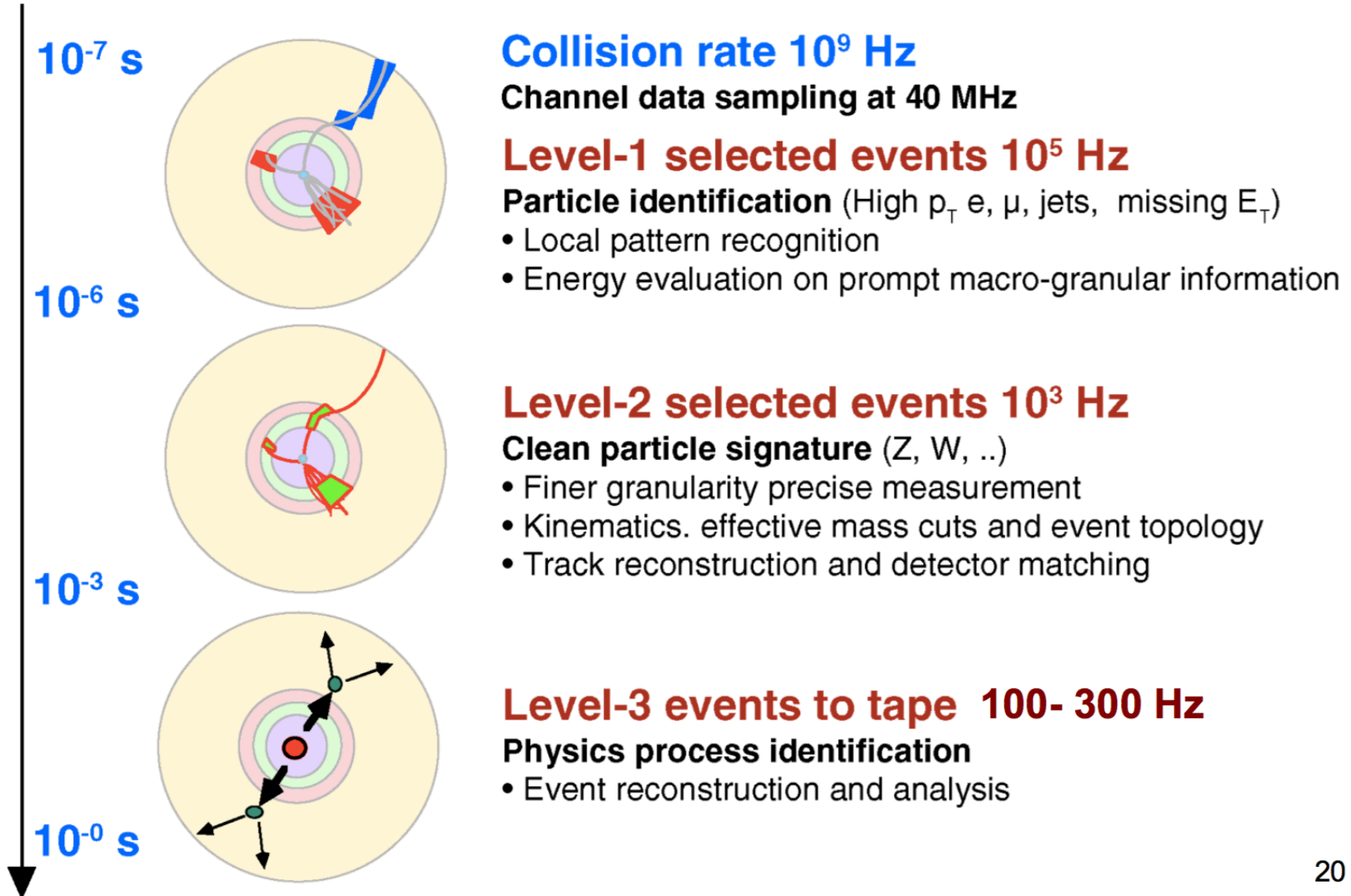
**Definition:** on-line identification of the most interesting physics events and selection for storage.

**At the LHC:** Interesting physics:  $0.1 \div 10$  Hz, while event rate:  $\approx 1$  GHz,  
→ one “interesting event” every 100 millions!  
Impossible to select them all on real time.

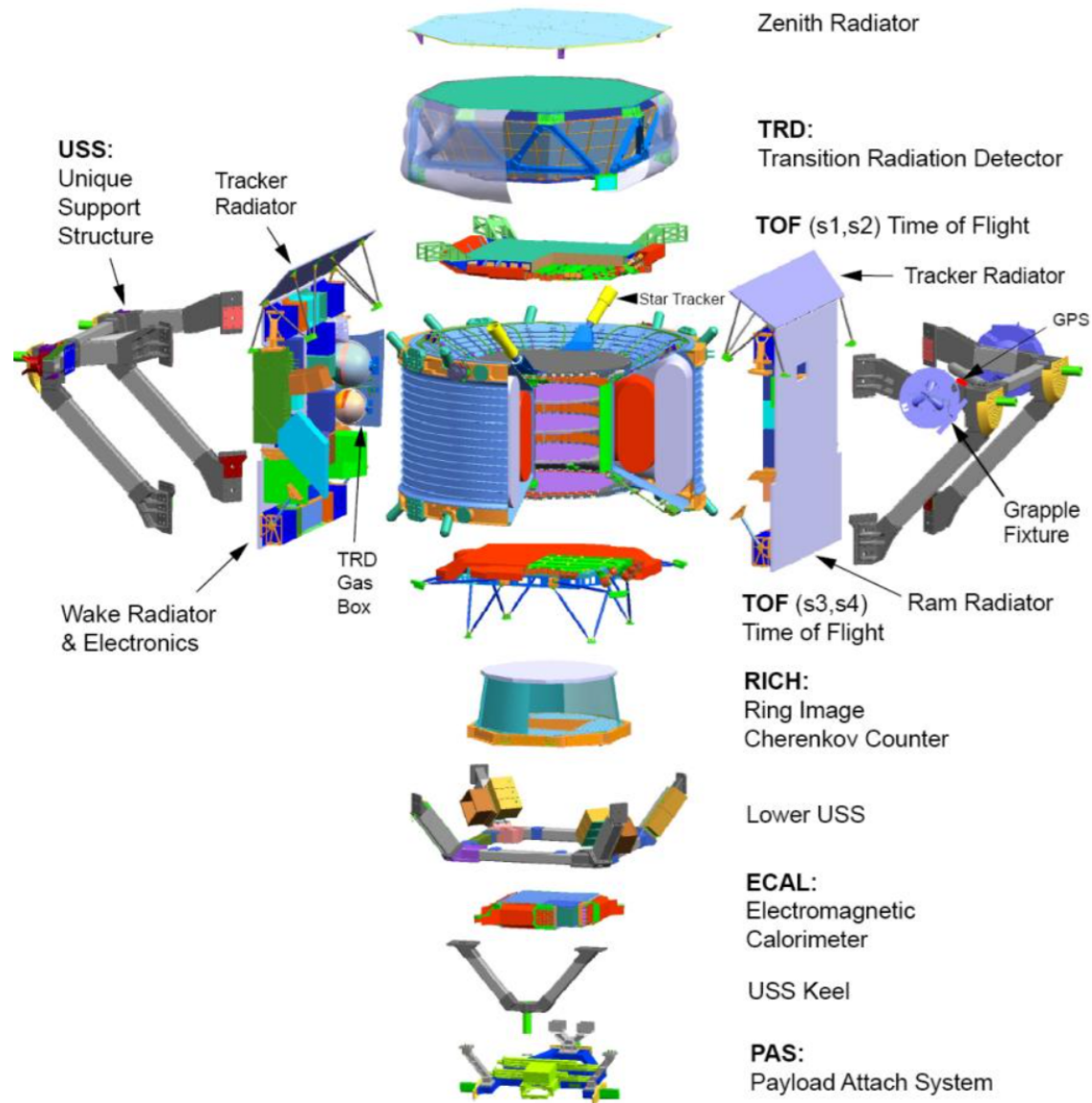
Therefore, reduce events to a number that can be stored for offline processing and analysis.

**Numbers:** keep  $\approx 200$  Hz → one every 10 millions  
Event size  $\approx 1$ -2MB → need to write up to 25GB/min.  
Up to 4 millions GB/yr ( $\approx 1$  million dvd's/yr !!!).  
Moreover: need  $\approx 30$ s to reconstruct each event offline

# LHC Trigger Levels



# AMS



# CR detectors

300 GeV	$e^-$	$e^+$	P	$\bar{\text{He}}$	$\gamma$	$\gamma$
TRD						
TOF						
Tracker						
RICH						
Calorimeter						

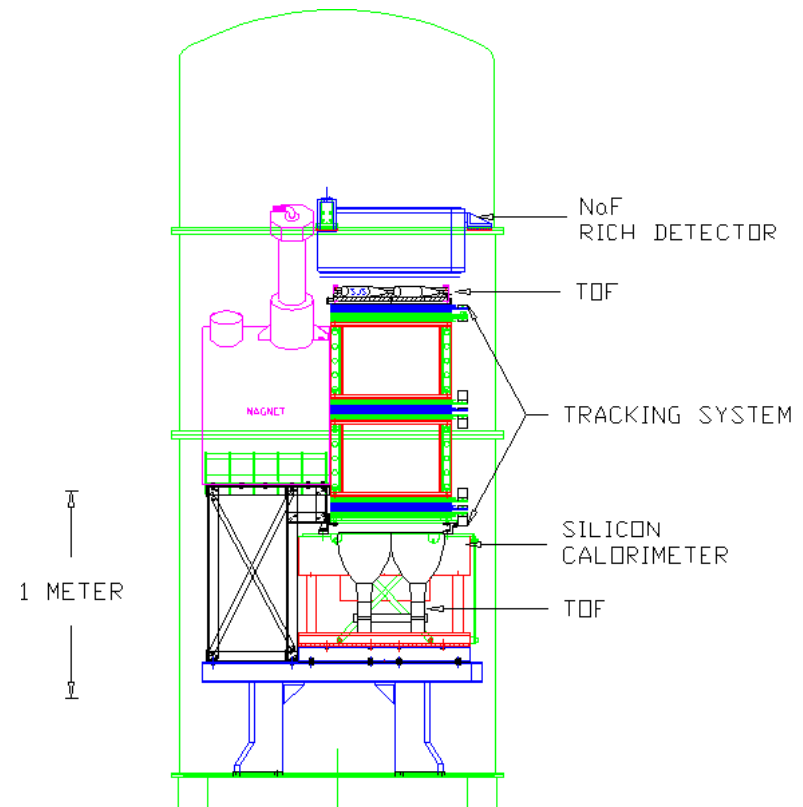
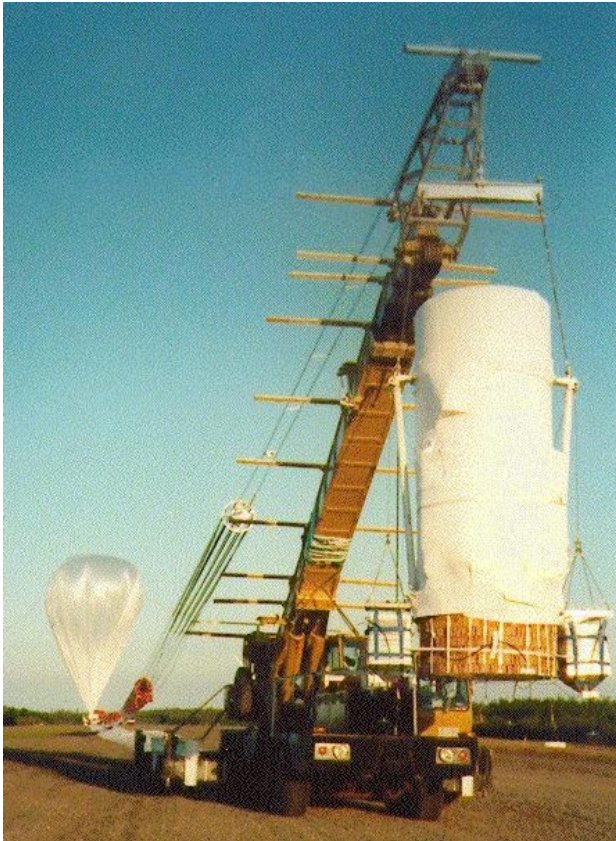
# Esperimenti per misure dirette di RC



# Exercise #5

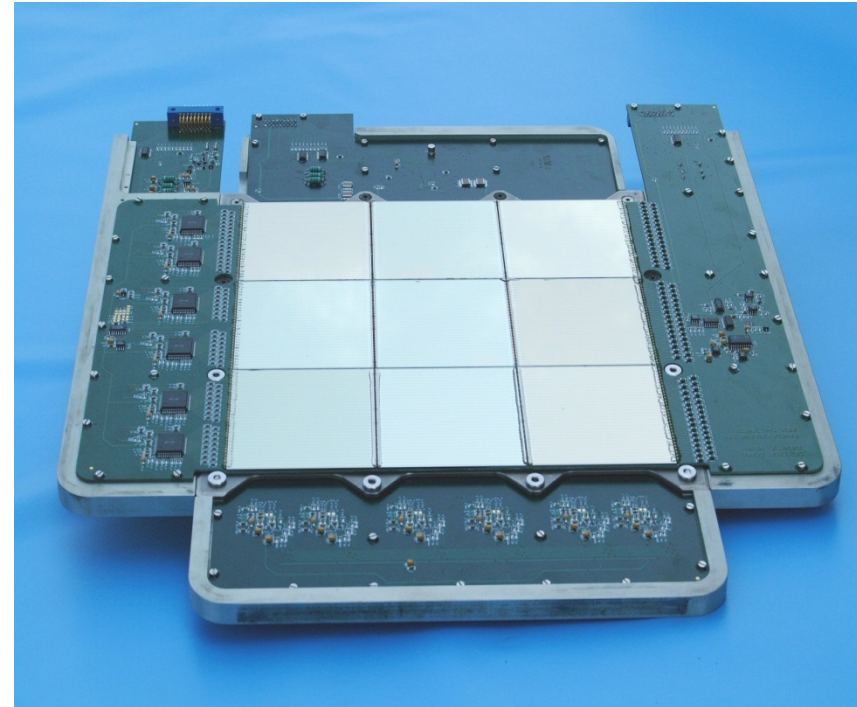
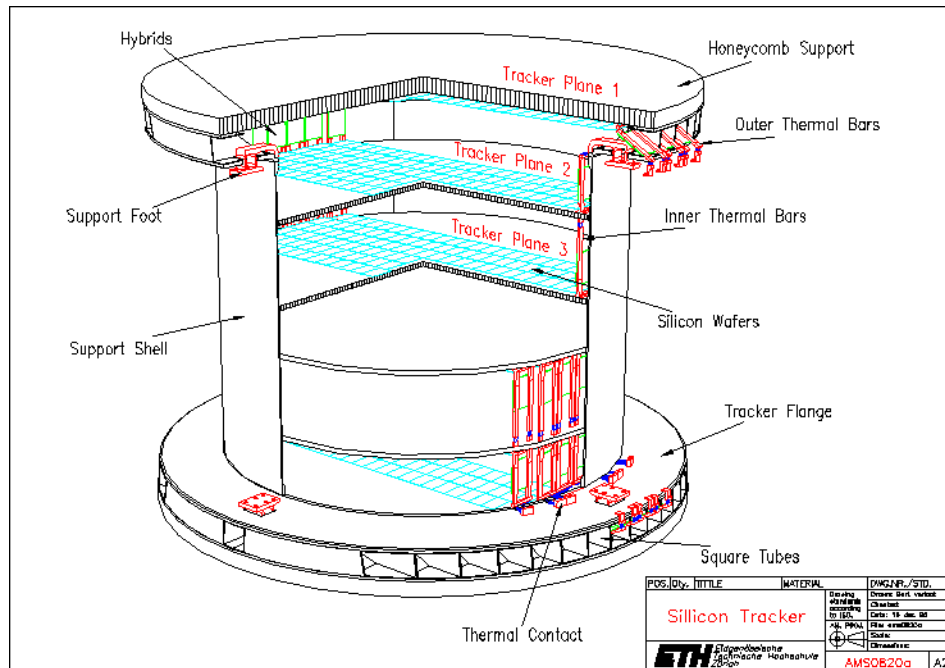
- Check the actual status of AMS-02 CR detector in space
- Find the information about the latest results by PAMELA

# CR detectors



Space like environment for balloon experiments. Balloons are a valuable tool for scientific CR and atmospheric research

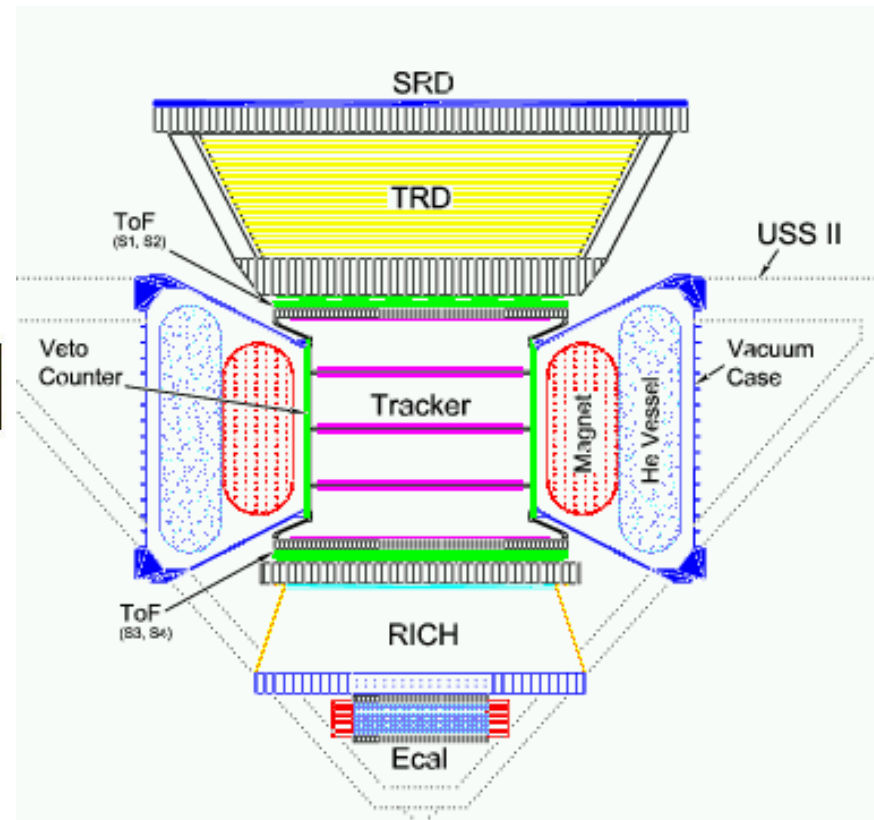
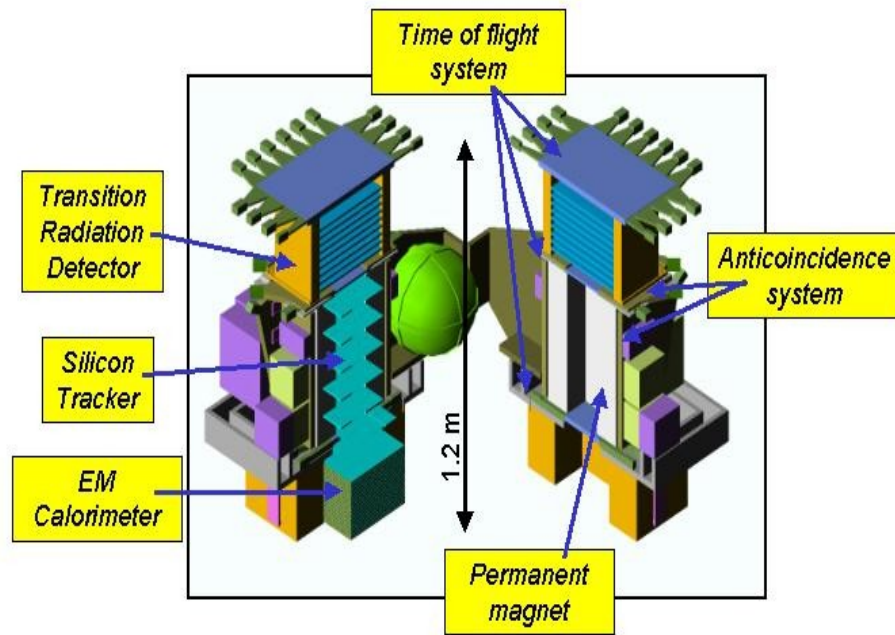
# CR detectors



The **Tracking Detectors** are used to image the paths taken by charged particles. To measure the momentum of the particles the detectors sit in a magnetic field, which causes the trajectories of the particles to bend. The amount of bending depends on the momentum of the particle: very high momentum particles travel in almost straight paths, low momentum particles make tight spirals.

The **Calorimeter** is a composite detector using total absorption of particles to measure the energy and position of incident particles or jets. In the process of absorption *showers* are generated by cascades of interactions,

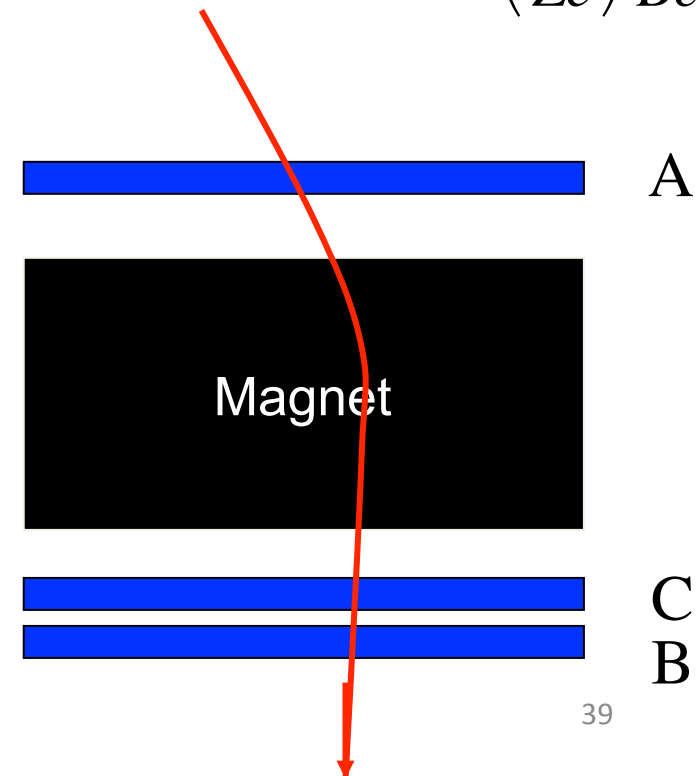
# CR detectors



# Identificazione di particelle

- Identificazione di particelle = massa, carica, energia/impulso
- Spettrometro: strumento per la misura della rigidità  $R = \frac{pc}{Ze}$  in campo magnetico.  $B$  è noto,  $Z$  e  $p$  possono essere misurati
- La risoluzione nella misura dell'impulso è dipende dalla precisione nella misura della traccia e dallo scattering multiplo della traccia all'interno del magnete.
- Un sistema di tempo di volo (ToF) (ad esempio A,C sono 2 contatori a scintillazione o contatori proporzionali) fornisce la misura di  $dE/dx$  (ossia  $Z^2$ ), tempo, posizione e **trigger**. La misura del ToF tra due posizioni note fornisce la velocità della particella. Da  $r_L$  si ottiene la massa della particella.
- Talvolta, un rivelatore distruttivo (calorimetro) può essere usato per avere una misura indipendente dell'energia totale della particella.

$$r_L = \left( \frac{pc}{Ze} \right) \frac{1}{Bc}$$



# Esperimenti nello spazio

- **Sviluppi recenti:** esperimenti nello spazio (PAMELA, AMS, altri) finalizzati alla misura diretta di RC e della **ricerca di antimateria**.
- Spettrometri: misurano la carica dei RC → RC, antinuclei.
- Occorre però un campo magnetico → magneti nello spazio, superconduttori, criogenia → pesanti, costosi!
- Identificazione di particelle: occorre una ottima discriminazione di particelle per separare elettroni da antiprotoni. Occorrono diversi strumenti a seconda dell'energia della particella:
  - **Low energy:** TOF, Cherenkov
  - **High energy:** RICH, TRD, calorimetri elettromagnetici
- Tipicamente: 1 antiprotone su  $10^{5-6}$ .



# PAMELA

- The 680 km polar orbit will allow studying the low energy cosmic rays, close to the poles. The main scientific objectives of the experiment are the precise measurement of the positron and antiproton fluxes at energies from 100 MeV to above 100 GeV, as well as the search for antihelium with a sensitivity of  $10^{-7}$  in the antiHe/He ratio.
  - A Transition Radiation Detector (TRD) to identify electrons and positrons;
  - A spectrometer based on a permanent magnet equipped with a silicon microstrip tracker to measure particle tracks and momenta;
  - An imaging calorimeter
  - A Time of Flight (TOF) and first level trigger system based on plastic scintillators;
  - An anticoincidence system, also based on plastic scintillators.

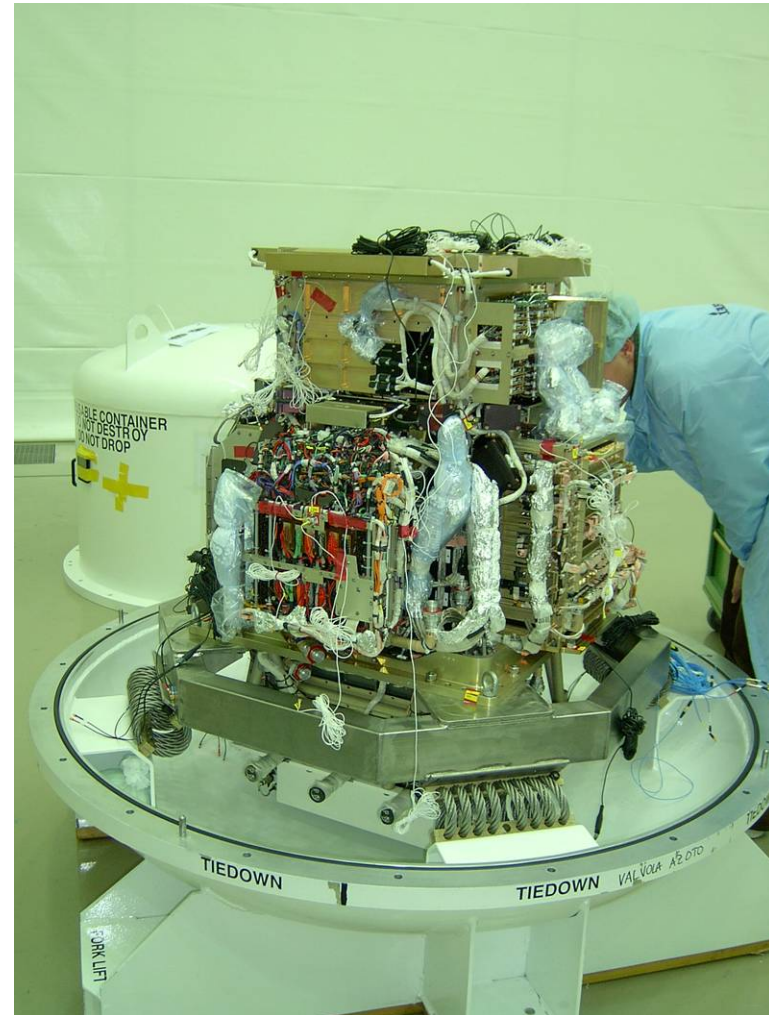
# PAMELA

- Lanciato 15/6/2006 da Baikonur Cosmodrome-Kazakhstan



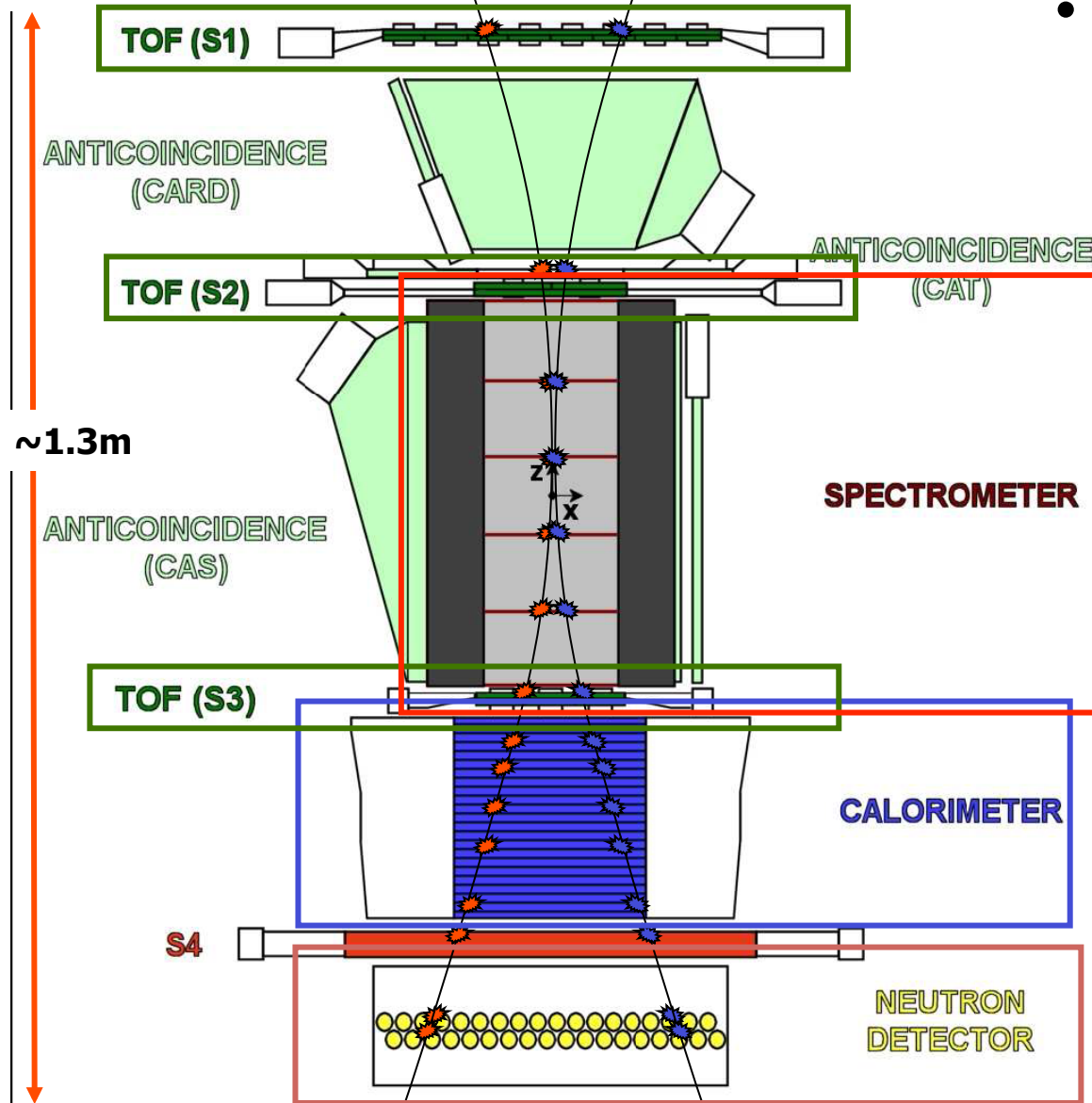
# PAMELA

- Obiettivi dell'esperimento:
  - Misurare lo spettro di antiprotoni, positroni e (anti)nuclei in un ampio intervallo di energie;
  - Ricerca di antimateria “primordiale”
  - Studio del flusso dei RC primari
- PAMELA è capace di misurare rigidità magnetiche (=impulso/carica) sino a **700 GV/c**.



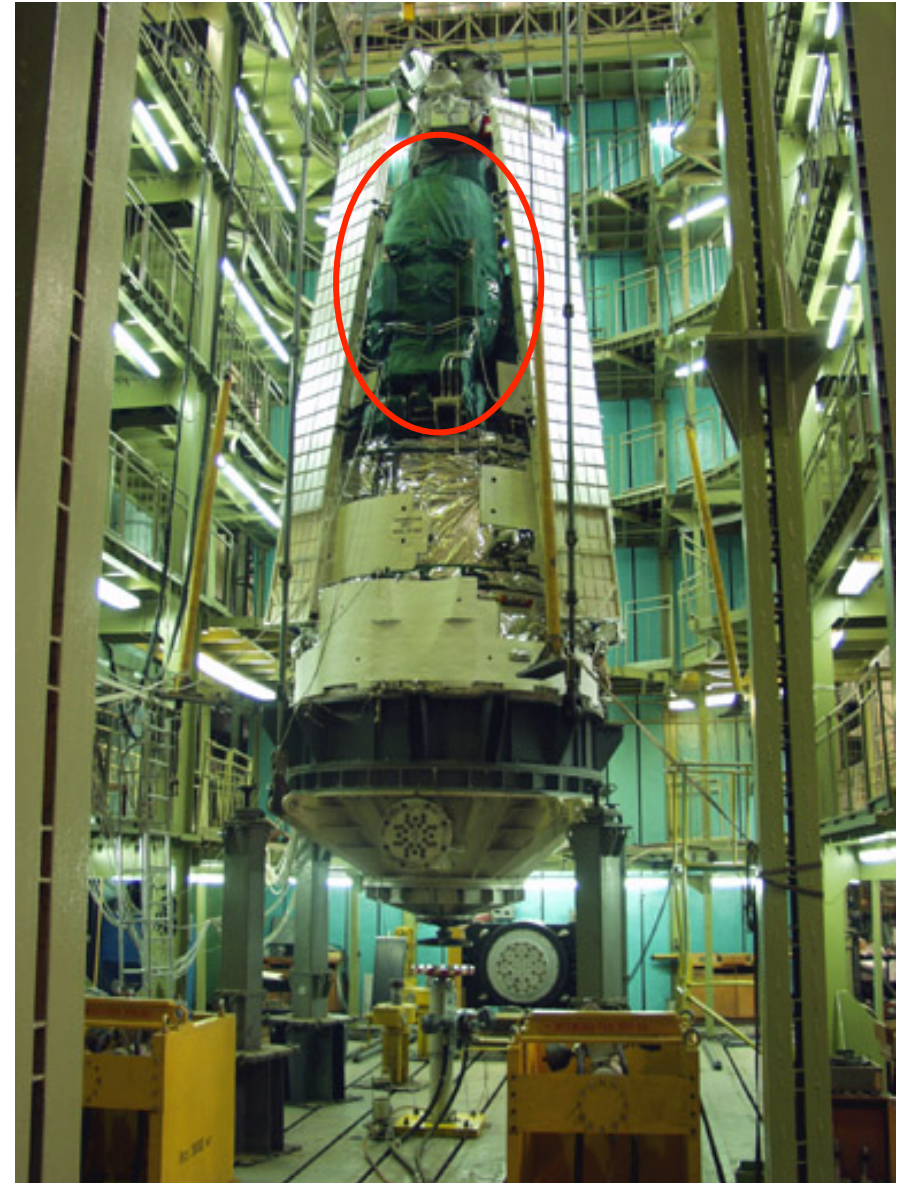
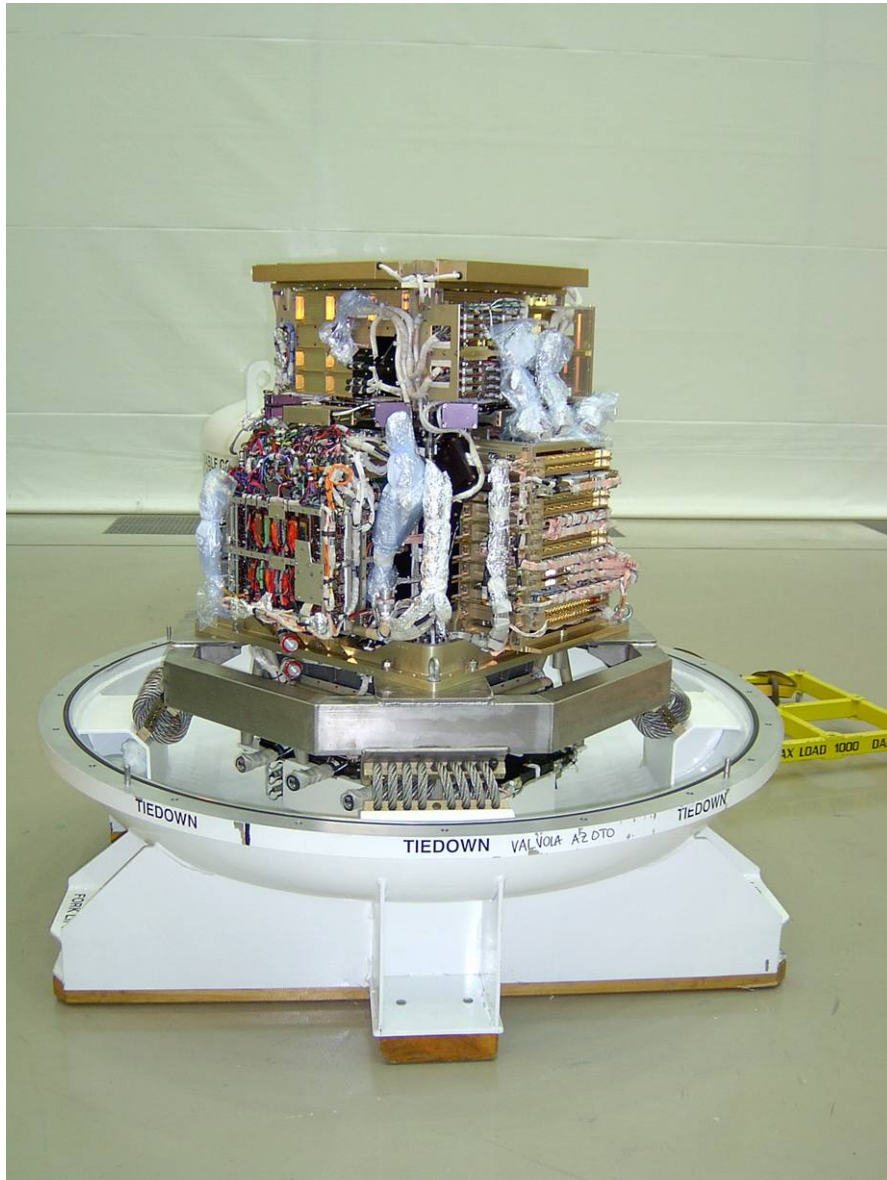


# PAMELA



- Identificazione di particelle usando:
  - TOF
  - Calorimetro
  - Rivelatore di neutroni (basato sulla cattura da parte di  $^3\text{He}$  n)  $\rightarrow$  aiuta a discriminare cascate elettromagnetiche da quelle adroniche
  - Misura della rigidità tramite spettrometro, costituito da un magnete permanente ed un sistema tracciante al silicio

# Integrazione e posizionamento nel satellite

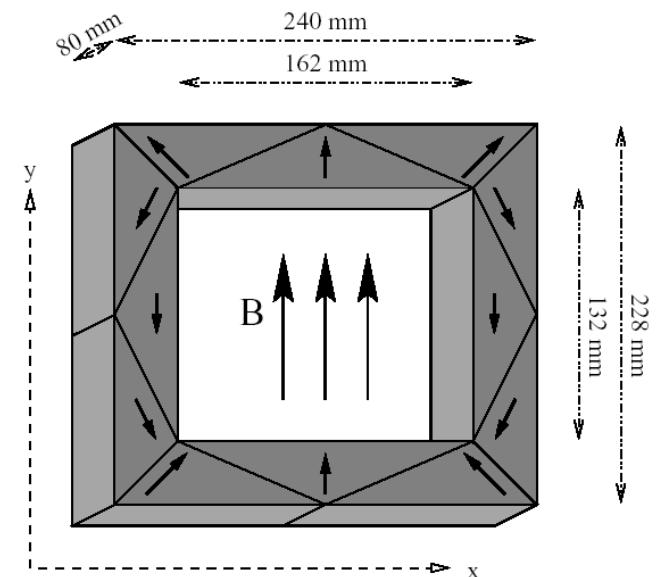
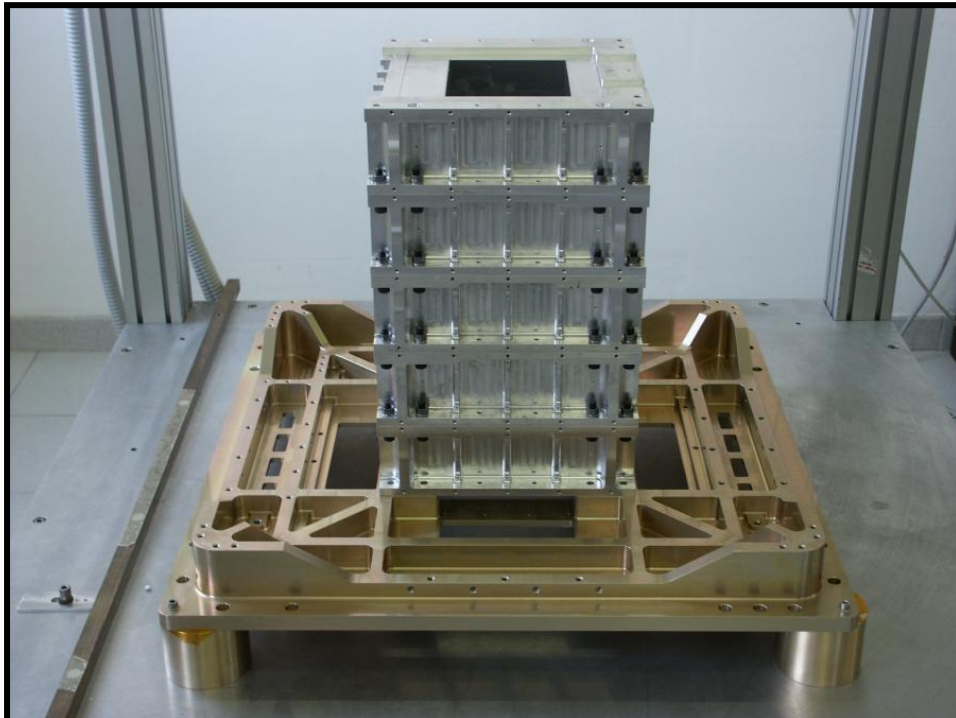


# Lo Spettrometro Magnetico

- Per avere un'idea del grado di complessità di tali esperimenti, guardiamo con qualche dettaglio lo spettrometro magnetico:

- Magnete Permanente

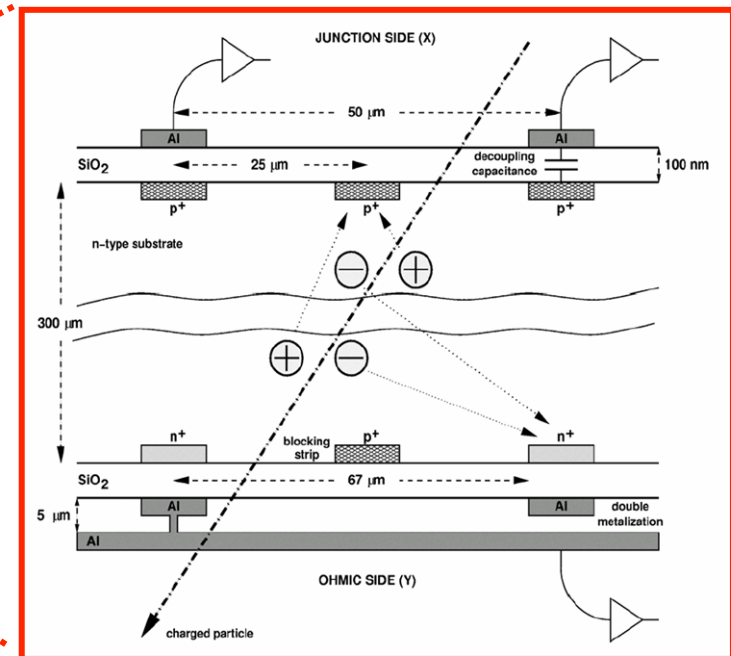
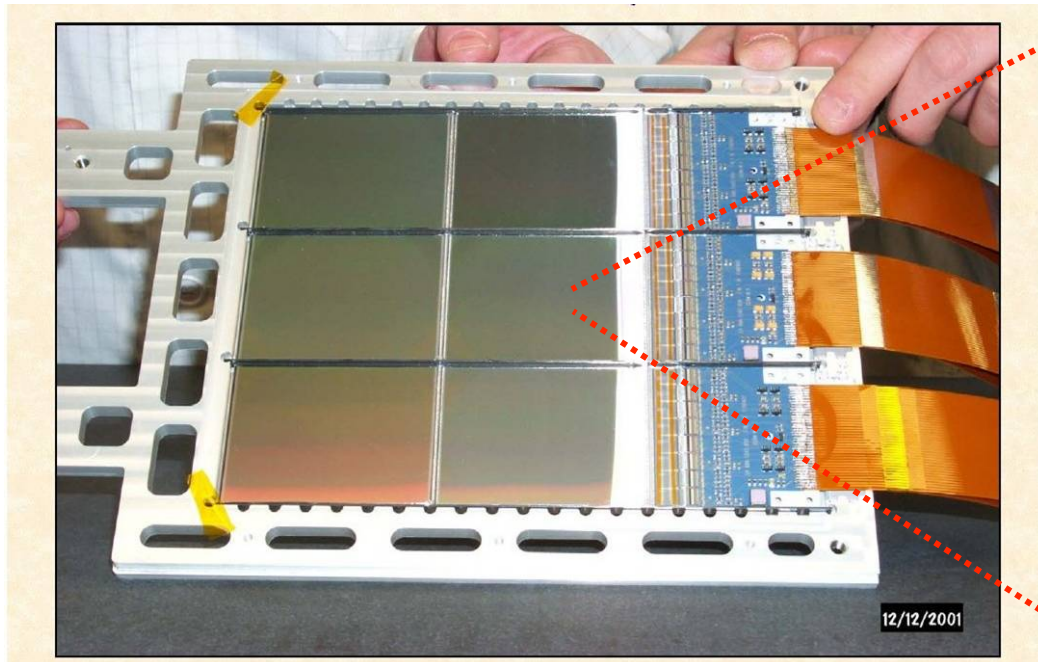
- 5 blocchi di Nb-B-Fe
- 0.48 T al centro della cavità
- “Torre” Magnetica =  $(13.2 \times 16.2 \text{ cm}^2) \times 44.5 \text{ cm high} \Rightarrow$  accettazione:  $20.5 \text{ cm}^2 \text{ sr}$





# Tracciamento: Piani di silicio

- **Double-sided silicon microstrips** (300  $\mu\text{m}$  thick):
  - 25  $\mu\text{m}$  implantation pitch (junction side) / 67  $\mu\text{m}$  (ohmic side)
  - Strips mutually orthogonal on opposite sides
  - Readout pitch 50  $\mu\text{m}$

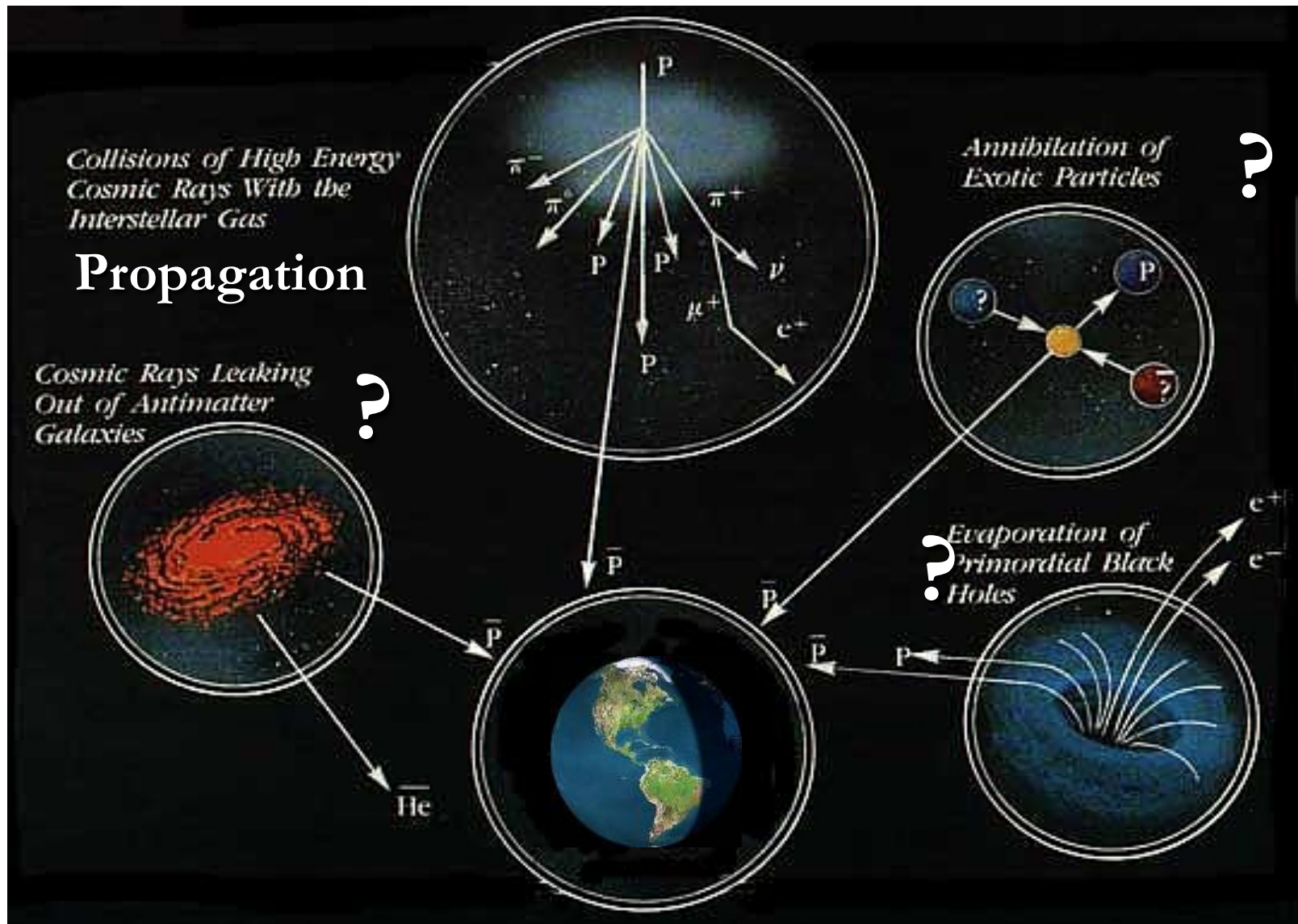


# Calorimetro Elettromagnetico

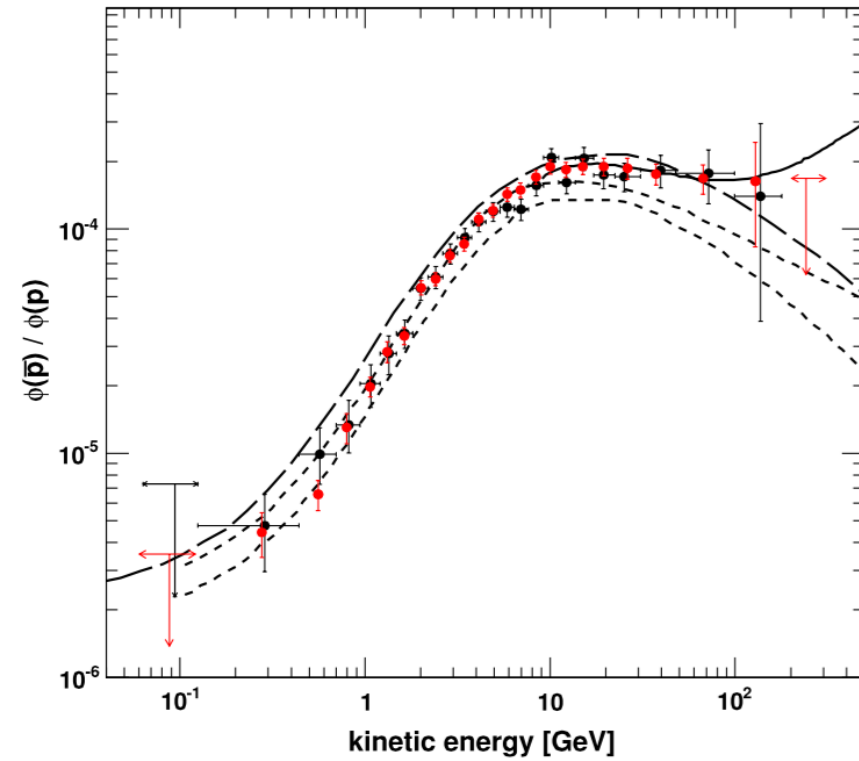
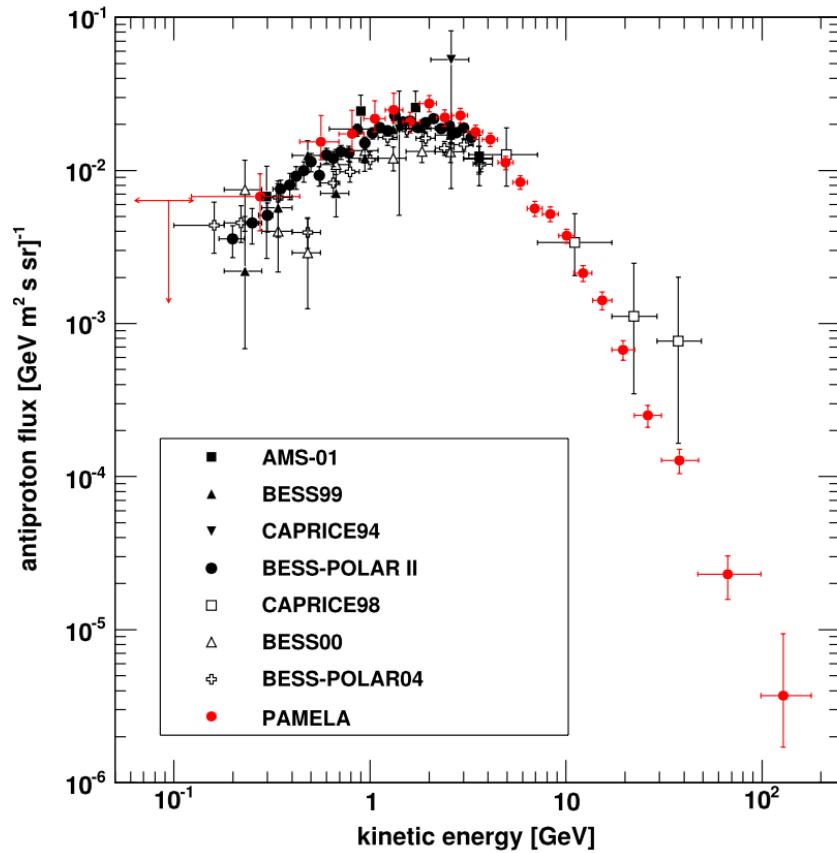
- 44 single-sided silicon sensor planes (380  $\mu\text{m}$  thick) interleaved with 22 plates of tungsten absorber for a total depth of 16.3 X0 ( 0.6 nuclear interaction lengths).
- A self-trigger system was implemented in the calorimeter read-out electronics to measure high-energy electrons



# Ricerca di antinuclei nei RC: il mistero della mancanza di antimateria nell'Universo

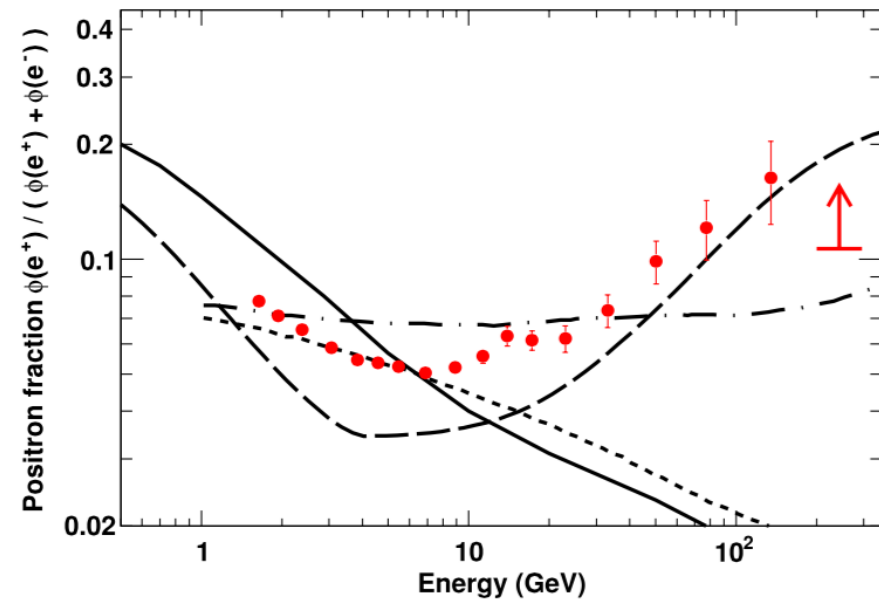
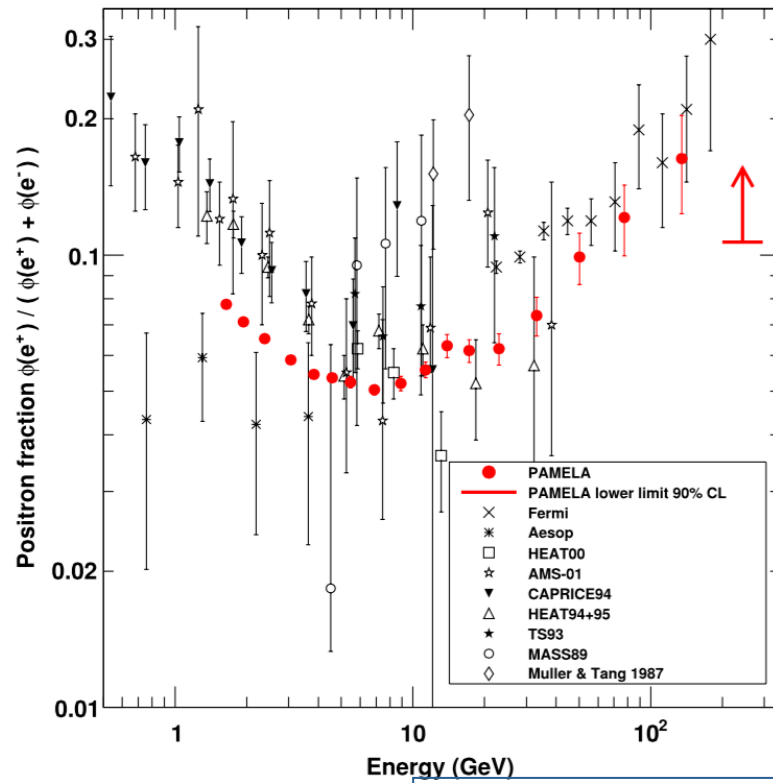


# Antiprotons



O. Adriani et al. Physics reports 544 (2014)

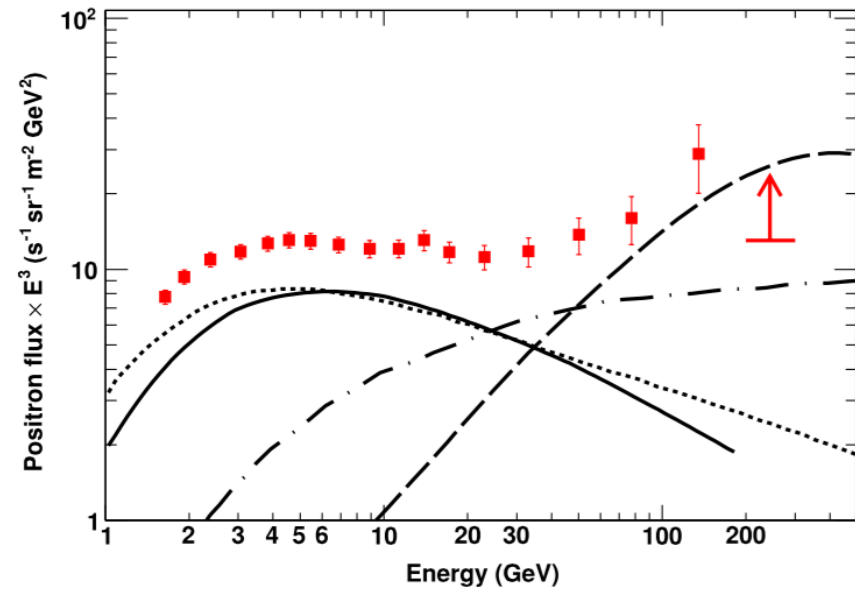
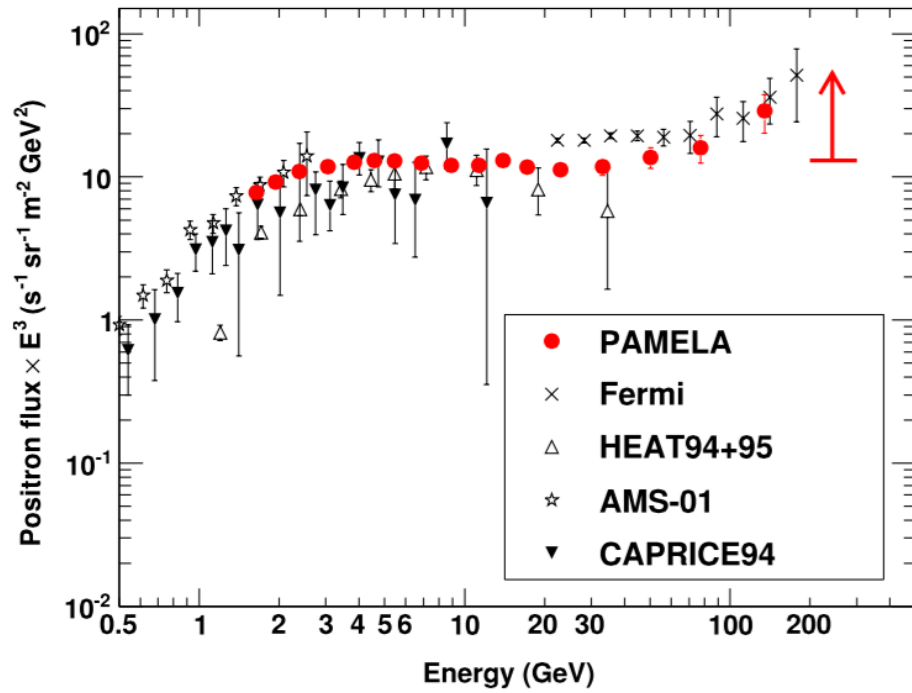
# Positrons



O. Adriani et al. Physics reports 544 (2014)

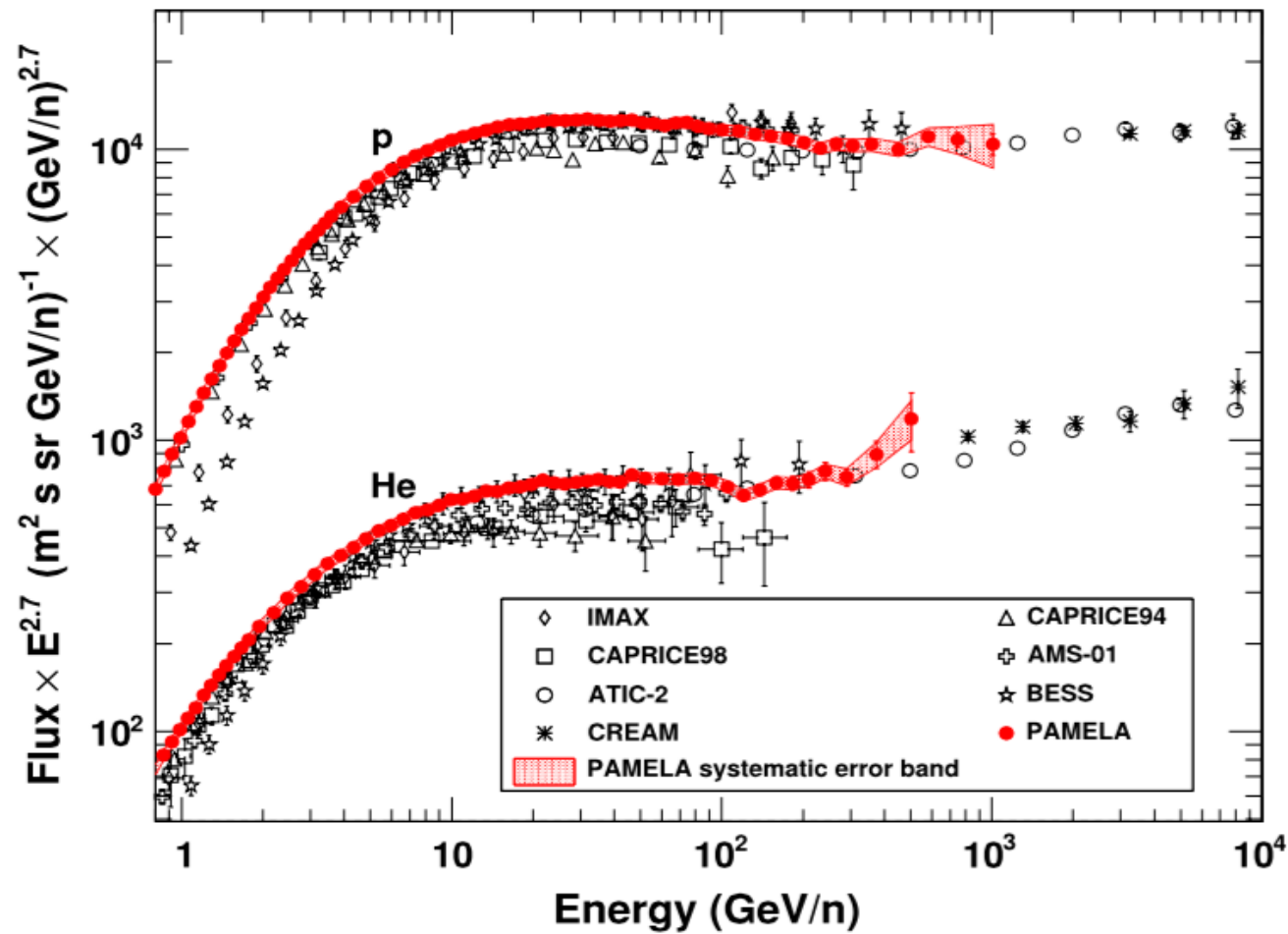


# Positrons



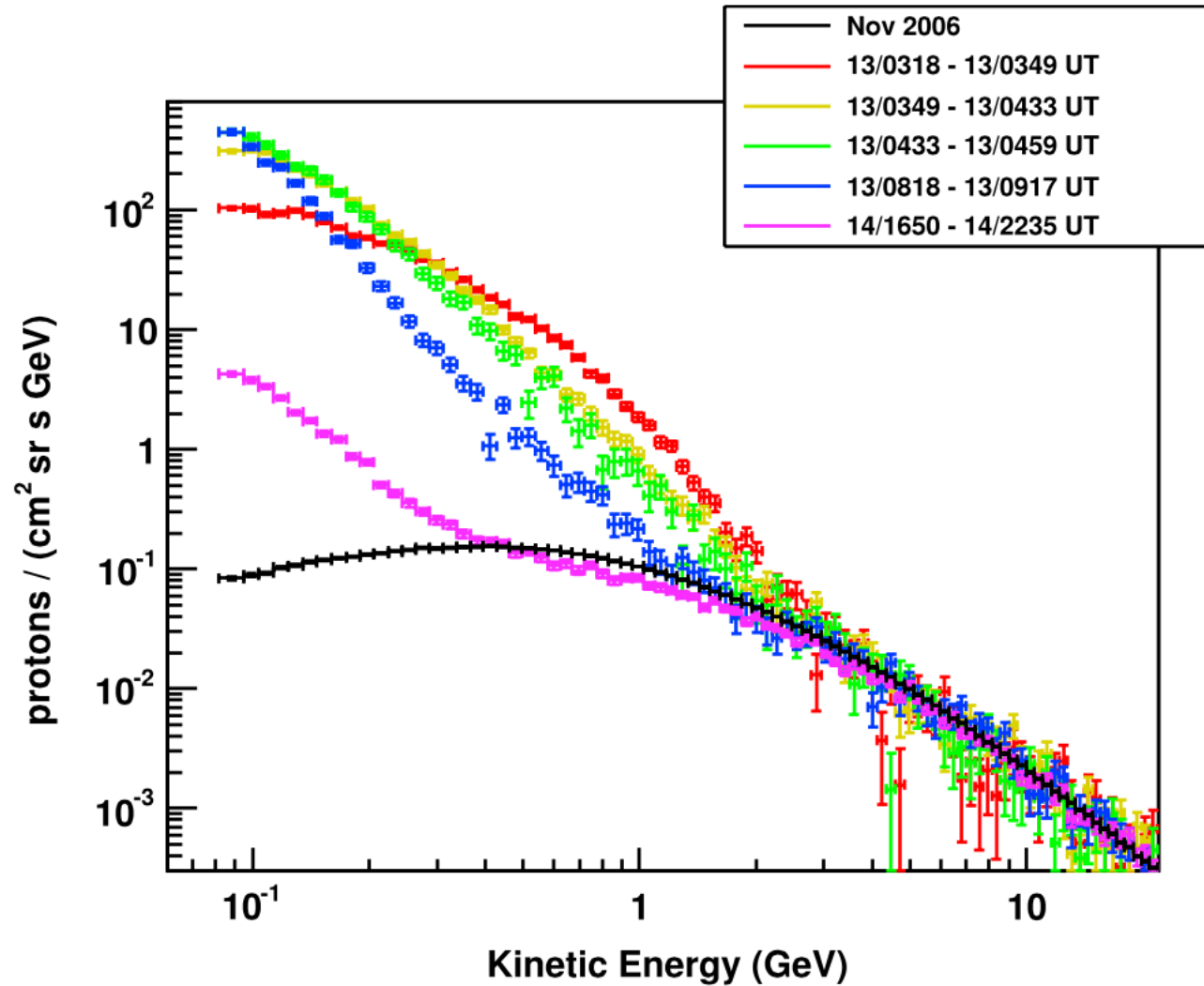
O. Adriani et al. Physics reports 544 (2014)

# Galactic Cosmic Rays



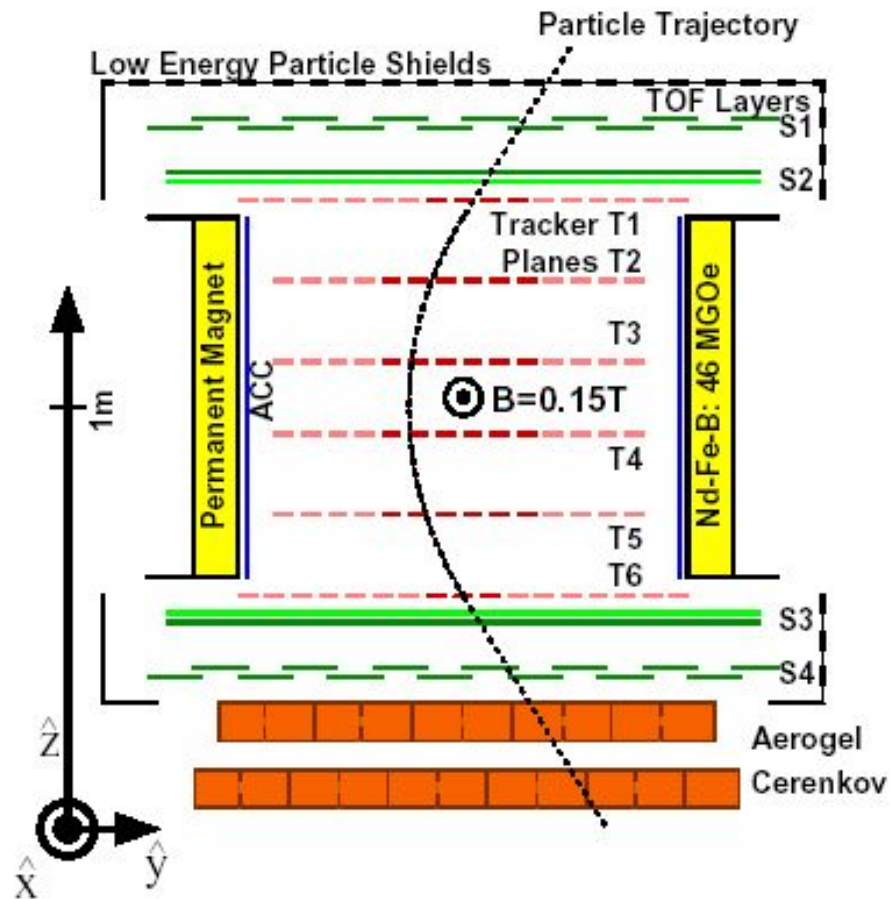
O. Adriani et al. Physics reports 544 (2014)

# Solar events



O. Adriani et al. Physics reports 544 (2014)

# AMS01



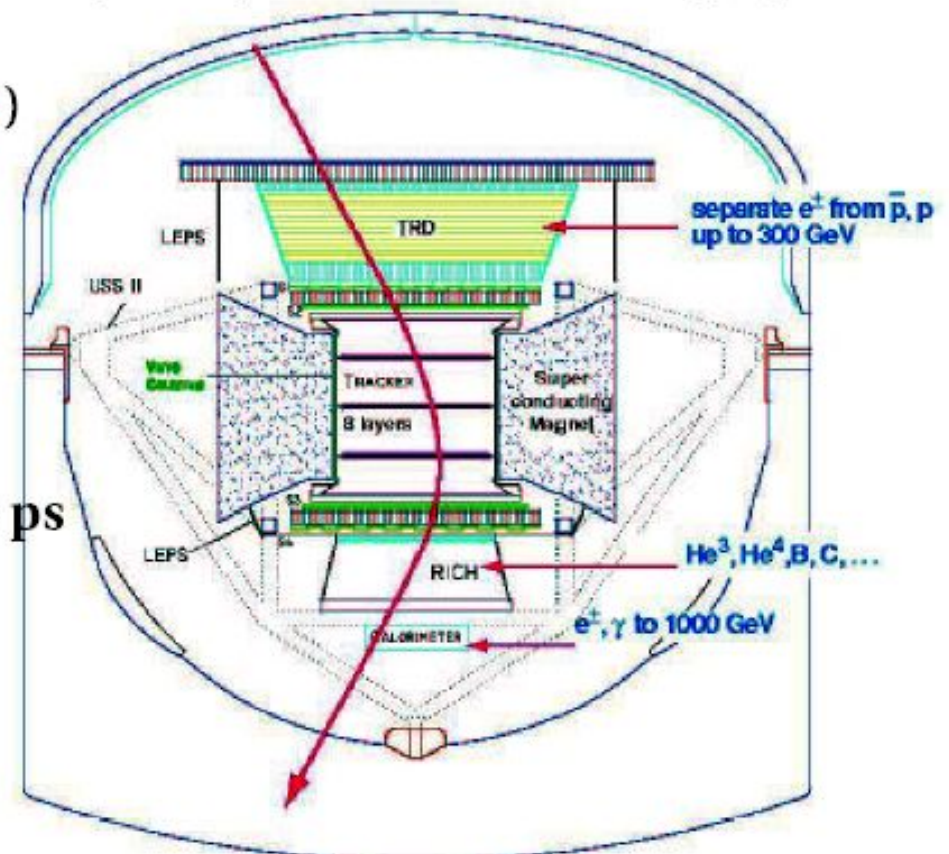
- ◆ **Magnet** : 1024 blocks of  $Nd_2Fe_{14}B$
- ◆ **TOF**: four planes of scintillators
  - velocity and Z measurement
- ◆ **Tracker**: six planes of DS Silicon Microstrip Detectors
  - Charge sign and Rigidity measurements
  - Z measurement up to Oxygen
- ◆ **Aerogel Threshold Cerenkov**
  - velocity measurement
- ◆ **Anticounters**
  - reject multi particle events

## AMS is a Large Acceptance Magnetic Spectrometer for:

- Antimatter Search ( $\overline{\text{He}}, \overline{\text{C}}$ )
- Accurate measurements of Cosmic-ray composition and energy spectra
- Dark Matter Signatures ( $e^+, \bar{p}, \overline{\text{D}}, \gamma$ )

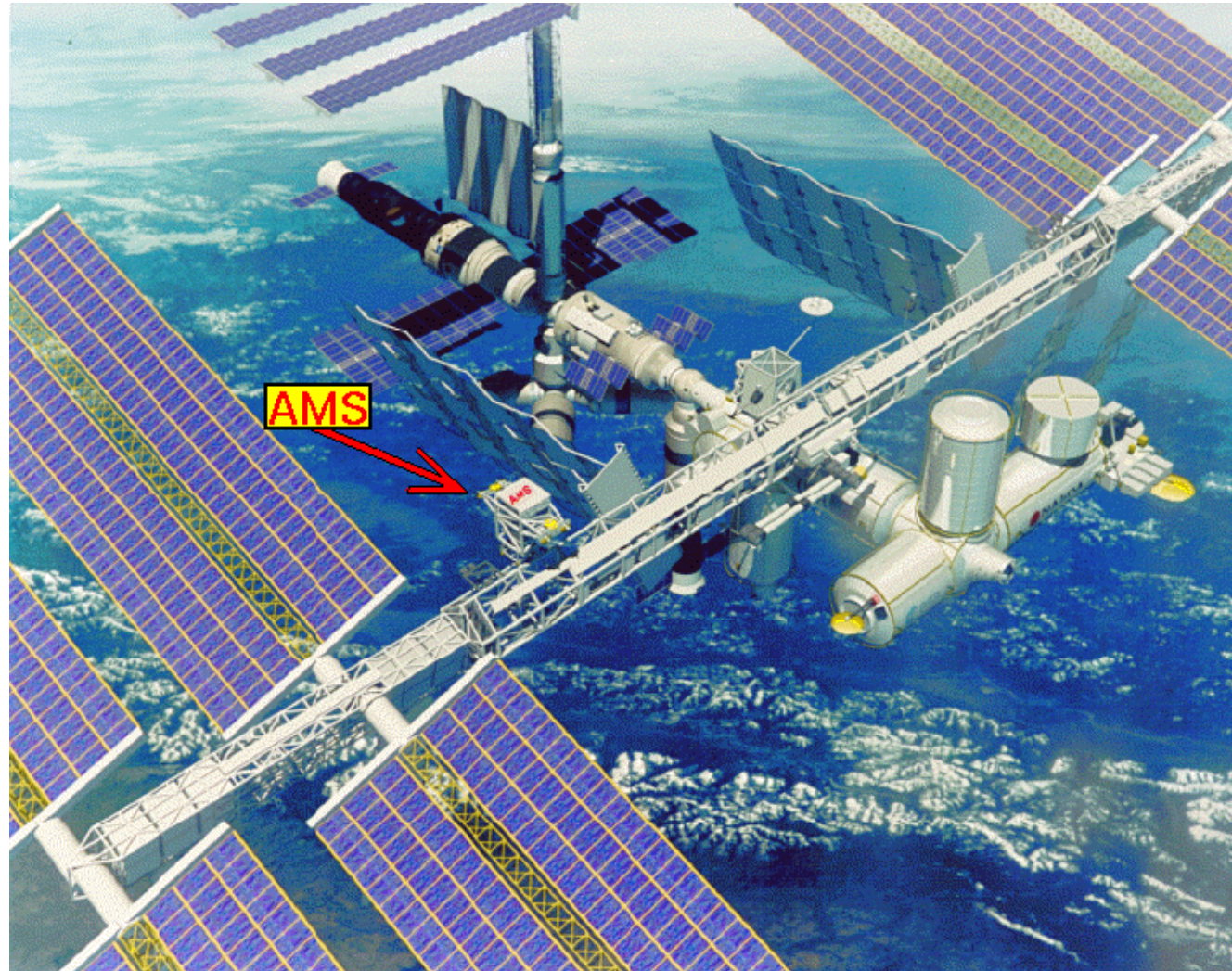
→ *High-energy  $\gamma$ -ray sky exploration*

- Superconducting Magnet: **0.8 T**
- 4 layers of Scint. Counters (ToF): **120 ps**
- 8 layers Si-Tracker: **MDR 2 – 3 TeV**
- Gaseous TRD:  **$h/e$   $10^2 - 10^3$**
- Pb-Sci. ECAL:  **$h/e$   $O(10^3)$**
- Aerogel (1.05) RICH:  **$\frac{d\beta}{\beta} = 0.07 - 1\%$**



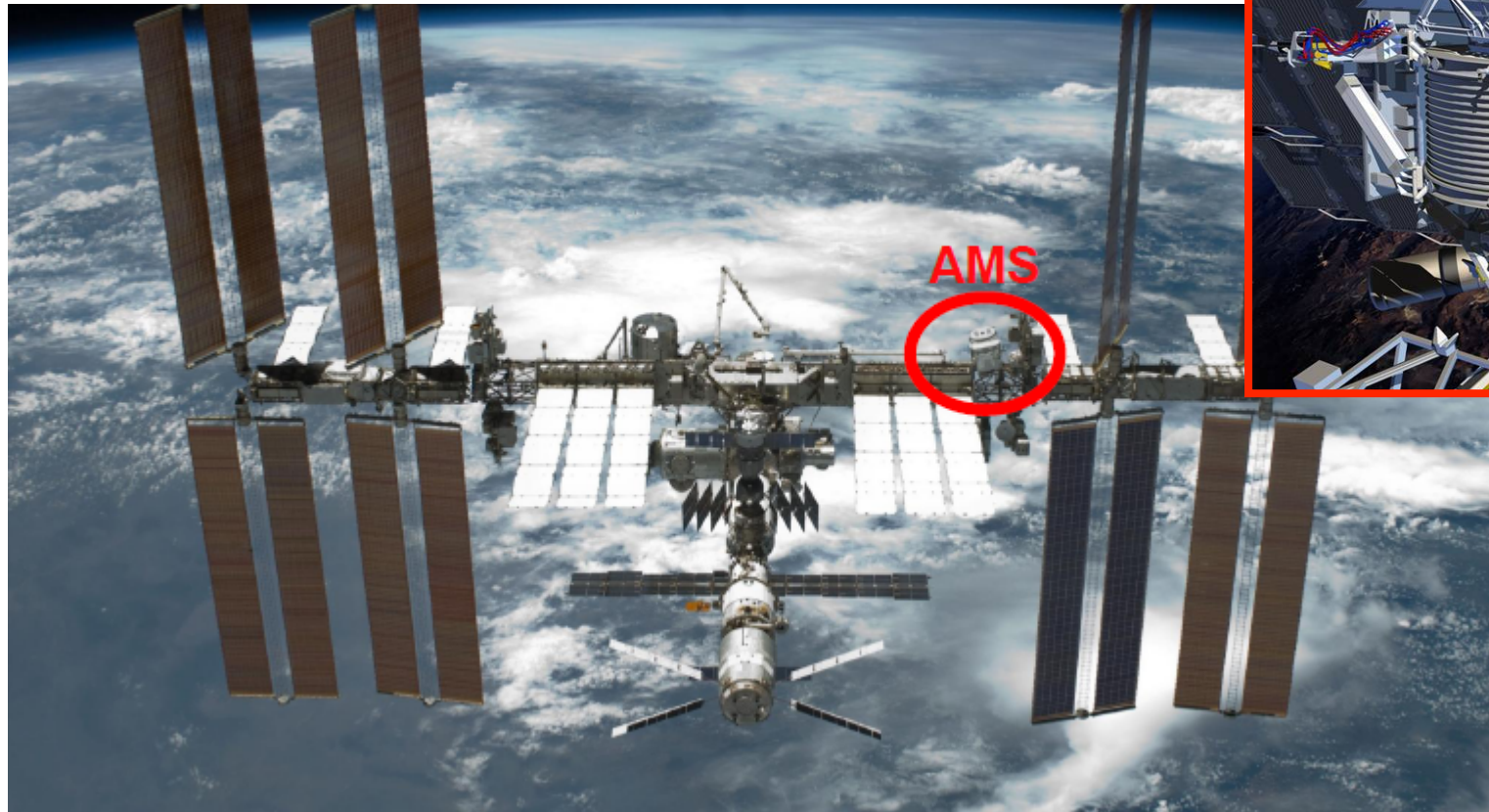


# AMS





# Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) Experiment

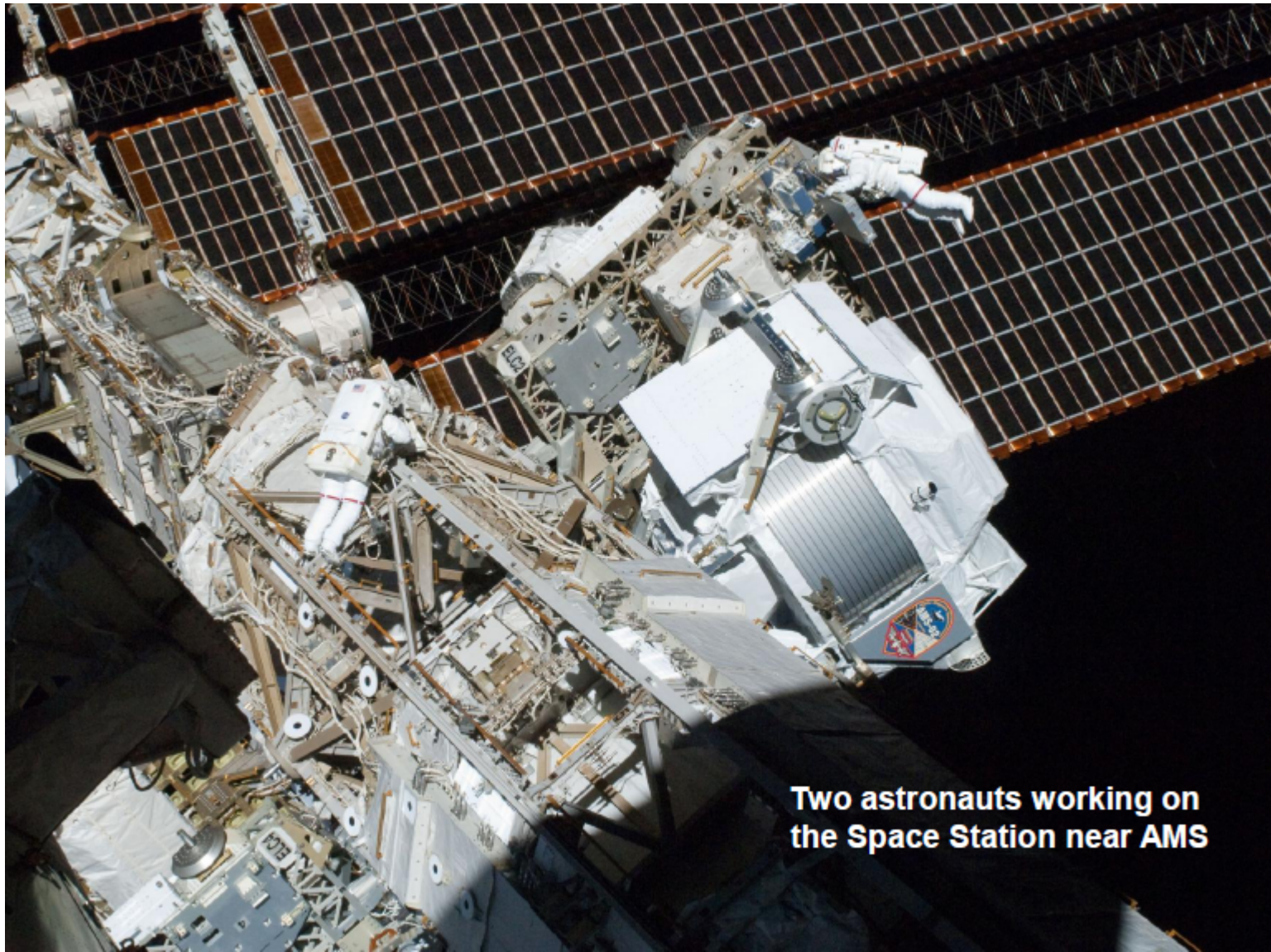


- **ISS : 108 m x 80m, 420 t**
- **orbit height 400km**

- *Inclination = 51.57°*
- *15.62 revolutions/day*





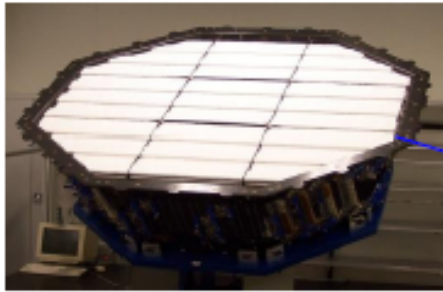


**Two astronauts working on the Space Station near AMS**

# AMS features



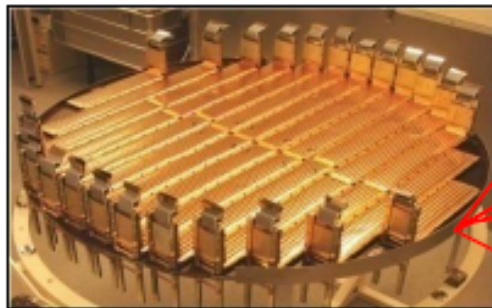
TRD



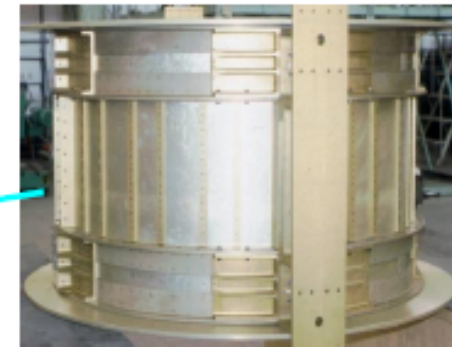
TOF



Silicon Tracker



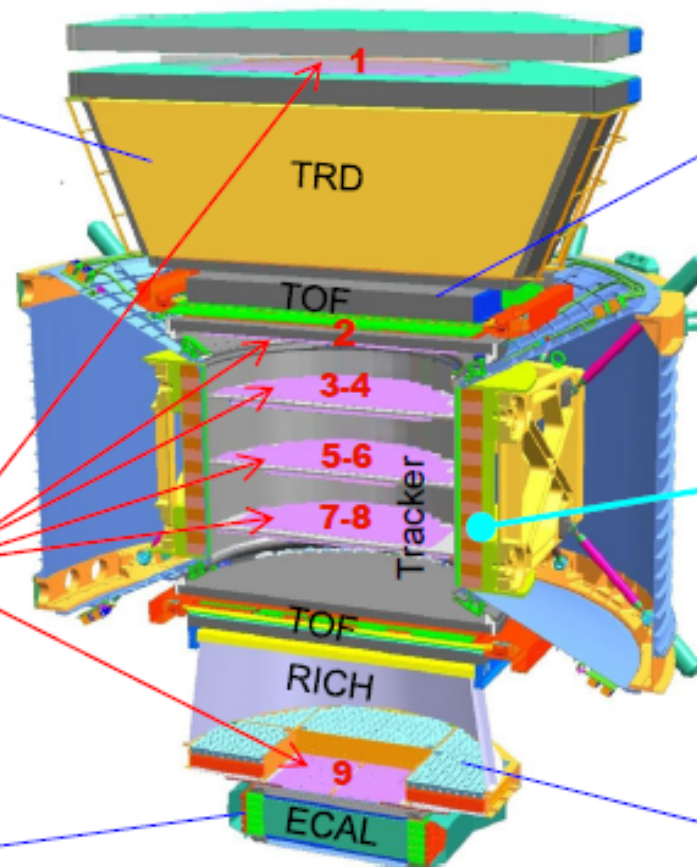
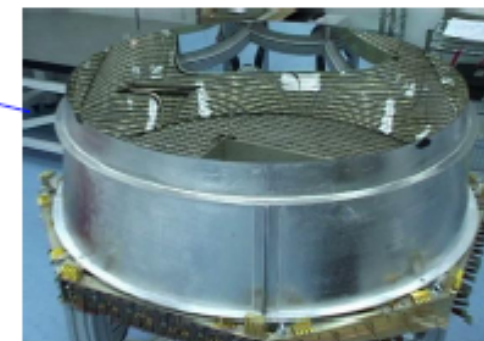
Magnet



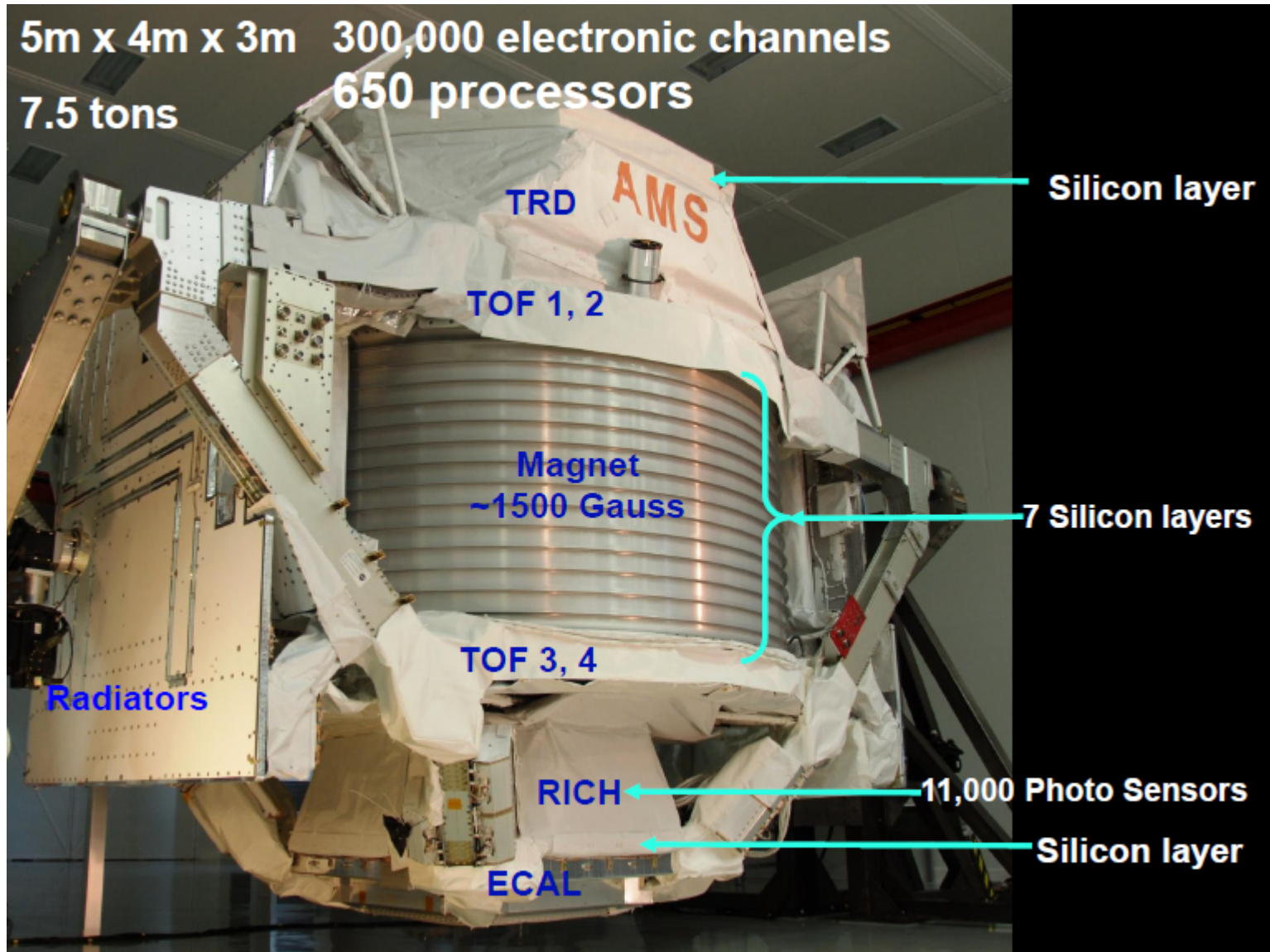
ECAL



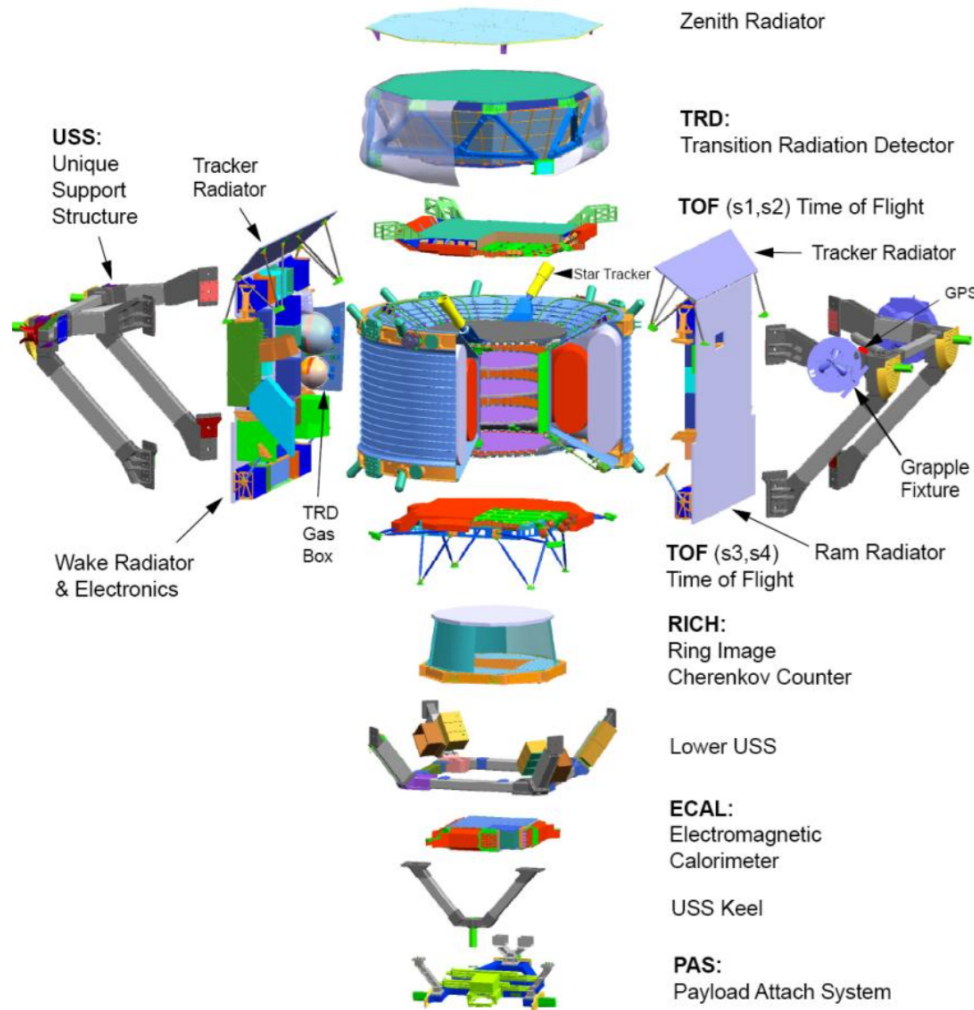
RICH







# AMS



## A TeV Detector in Space: AMS-02 on the Space Station.

- The value of  $|Q|$  is measured independently in Tracker, RICH and TOF.
- The signed charge,  $\pm Q$ , and the momentum of the particle,  $P$ , are measured by the 8 layers of doubled-sided silicon tracker in the magnet.
- The velocity,  $\beta = v/c$ , is measured by the TOF, TRD and RICH.
- The energy of electromagnetic particles is measured by the calorimeter<sup>69</sup>.



# Cosmic ray studies with AMS

## Goals:

- **Searches for primordial antimatter:**
  - Light anti-nuclei:  $\bar{D}$ ,  $\bar{He}$ , ...
  - $\bar{p} / p$  ratio
- **Dark Matter searches:**
  - $e^+$ ,  $e^\pm$ ,  $\bar{p}$ , ...
  - simultaneous observation of several signal channels.
- **Searches for new forms of matter:**
  - strangelets, ...
- **Measuring CR spectra – refining propagation models;**
- **Identification of local sources of high energy CR (~TeV):**
  - SNR, Pulsars, PBH, ...
- **Study effects of solar modulation on CR spectra over 11 year solar cycle**
- ...

# The BESS experiment

## Balloon-borne Experiment with Superconducting Spectrometer

- Joint project of Japanese and USA Institutions to search for antimatter in the cosmic radiation
- <http://bess.kek.jp/>
- Last flight: 8 days from McMurdo (Antarctica) in Dec 2004



- Top and bottom ToF scintillators that also measure the particle energy loss
- Aerogel Cherenkov counter mounted under the top ToF
- 2 inner drift chambers (IDC) inside the magnetic field space
- Central tracking device in magnetic field region made of JET type drift chambers

# BESS

*Balloon-borne  
Experiment with a  
Superconducting  
Spectrometer*



**Search for  
Primordial Antiparticle**

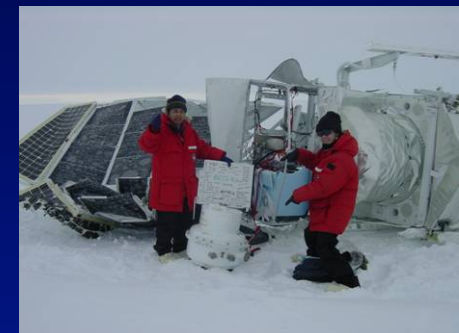
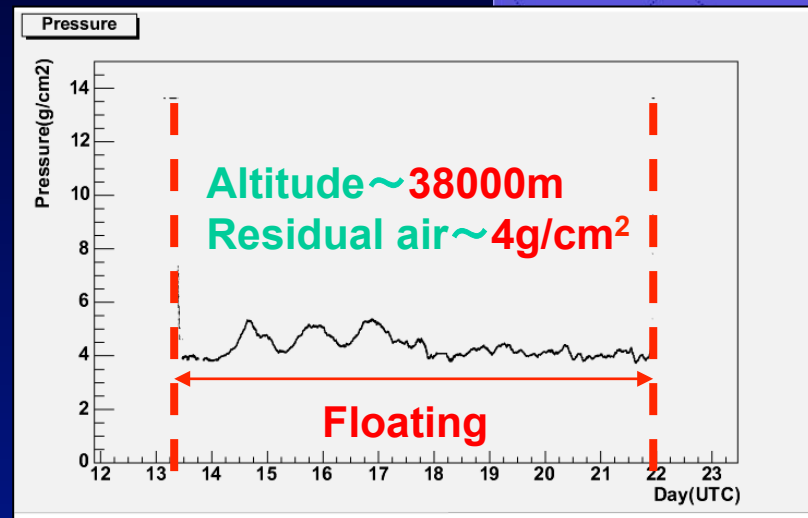
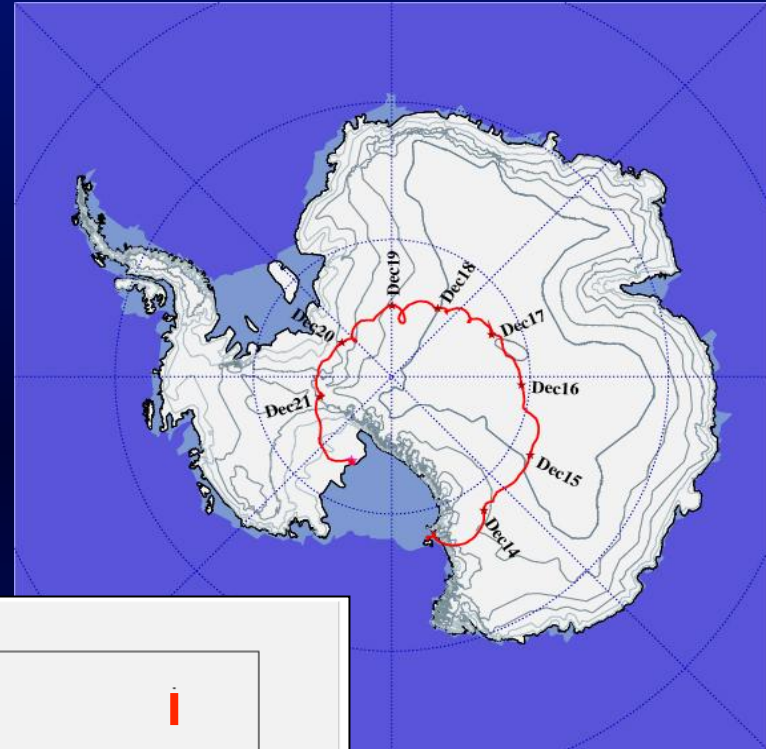
**antiproton:** Novel primary origins (PBH,DM)

**antihelium:** Asymmetry of matter/antimatter

**Precise Measurement of Cosmic-ray flux:**  
highly precise measurement at  $< 1$  TeV

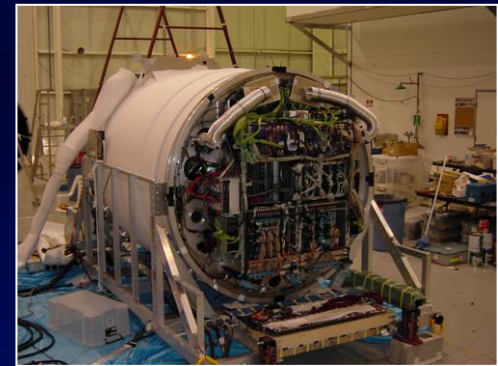
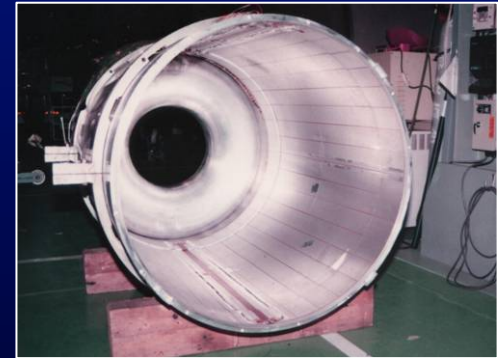
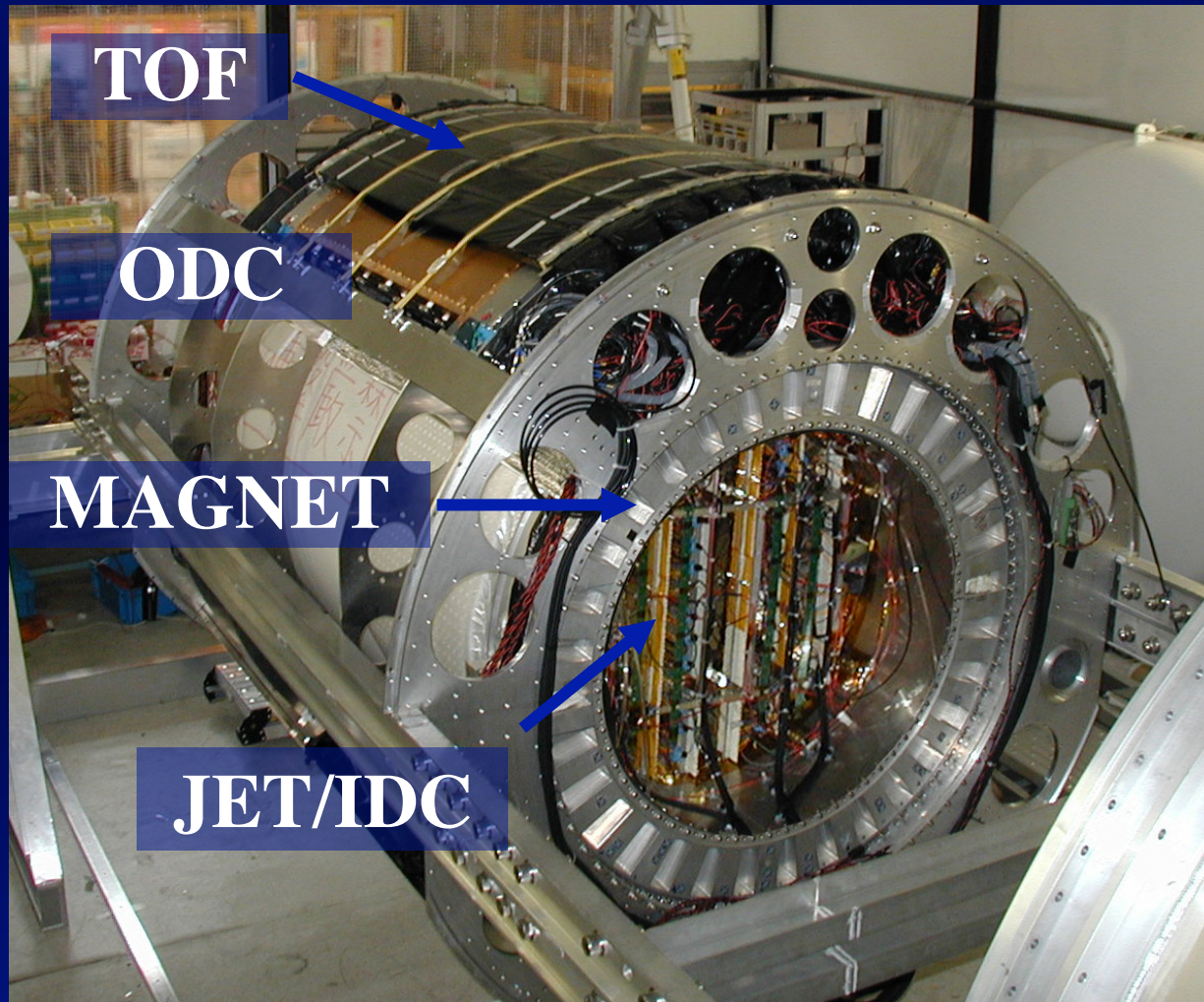
# BESS-Polar 2004

- 8.5 day flight successful
- 35-37 km in altitude
- 900 million events recorded





# BESS-TeV Spectrometer





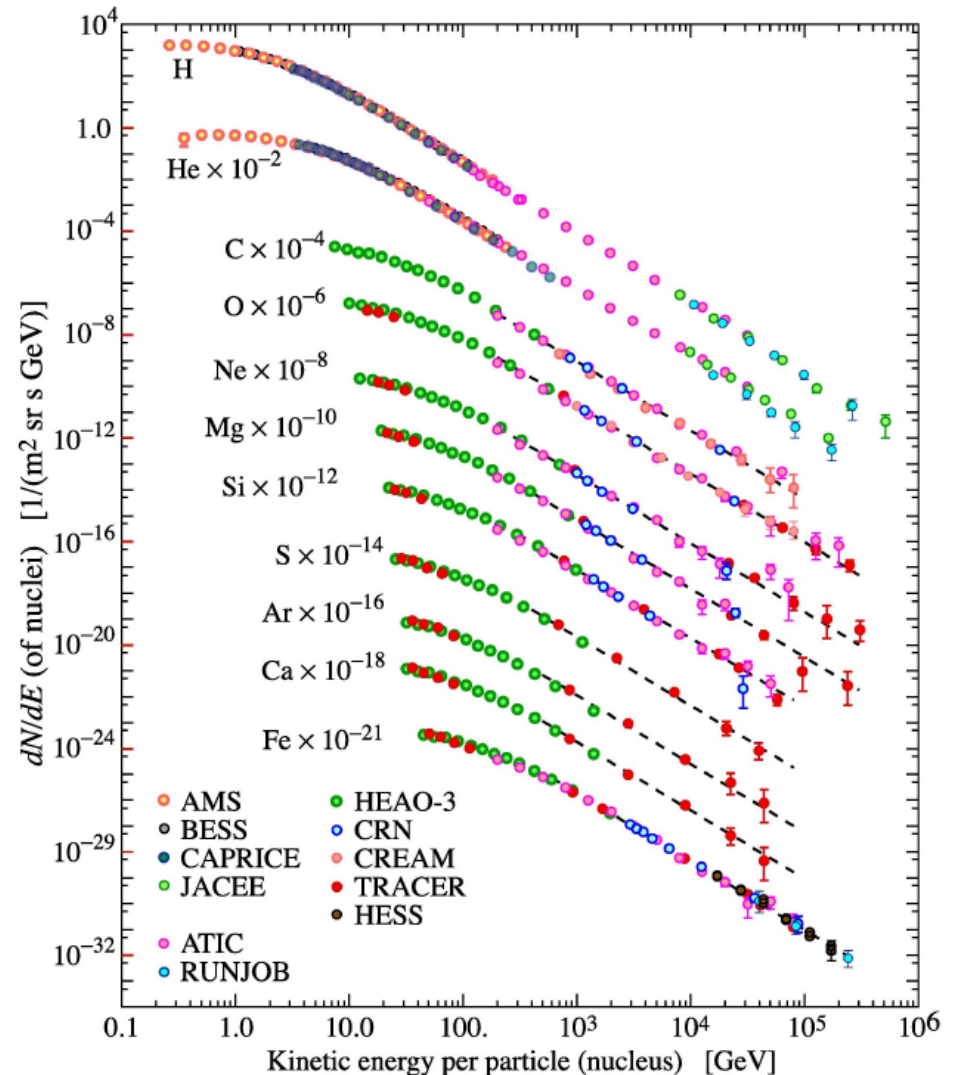
# Risultati sulle misure dirette: protoni e nuclei

- Balloon and satellites
- Charge: usually measured through the excitation/ionization losses (which depends on  $Z^2$ ) in scintillators or silicon detectors.

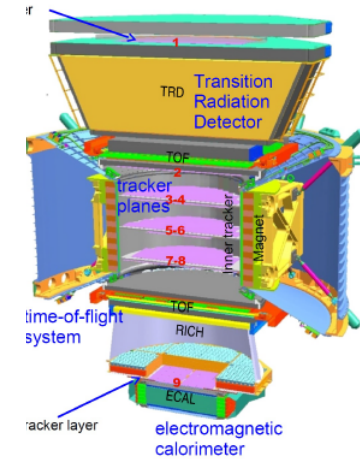
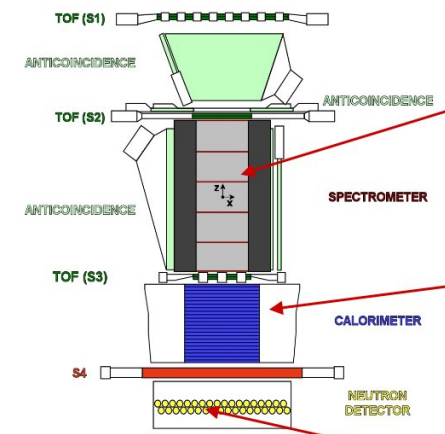
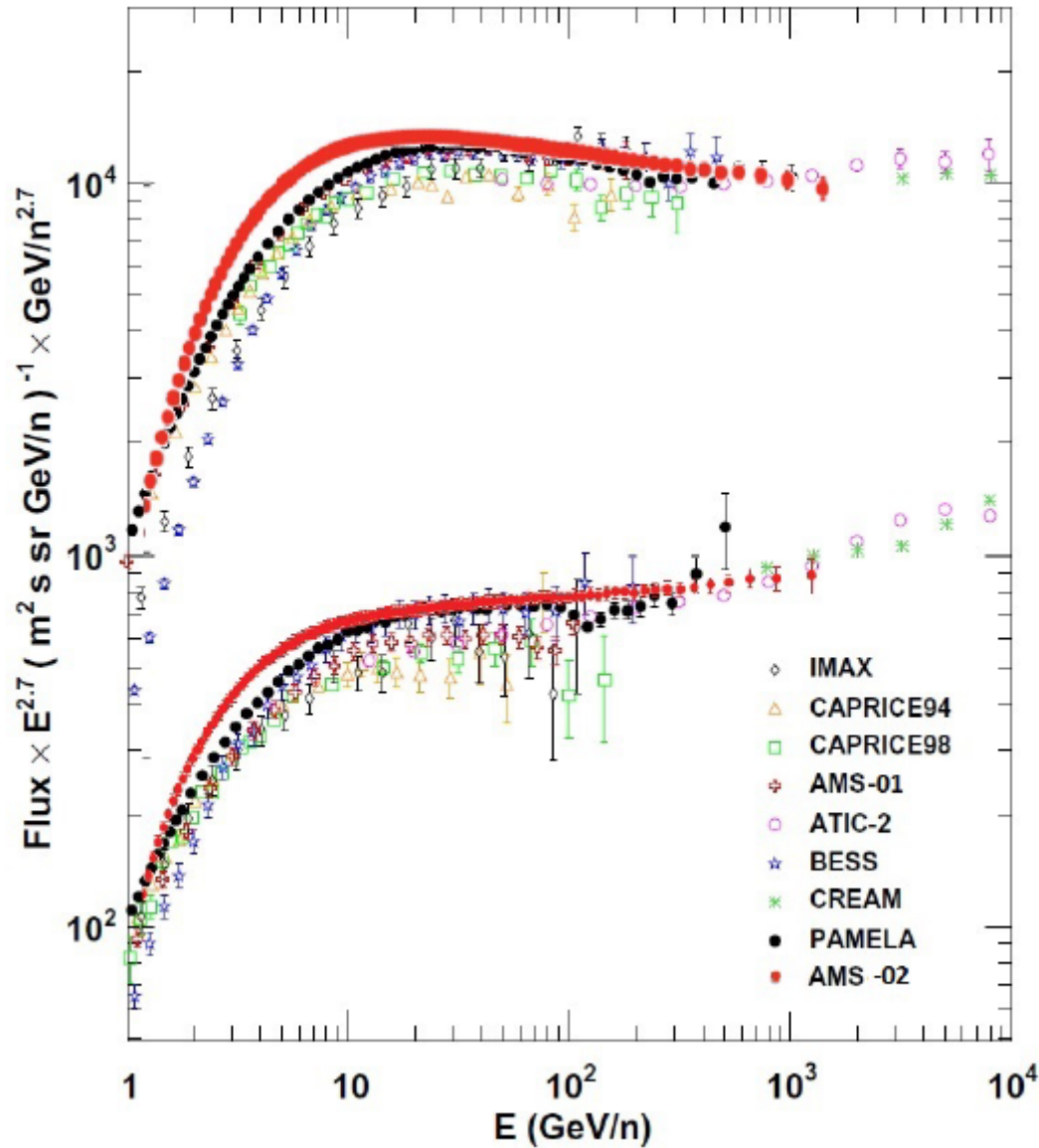
- The spectral index is almost the same for all nuclear species.

$$\Phi_i = K_i (E/\text{GeV})^{\alpha_i} \quad \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{GeV}^{-1}$$

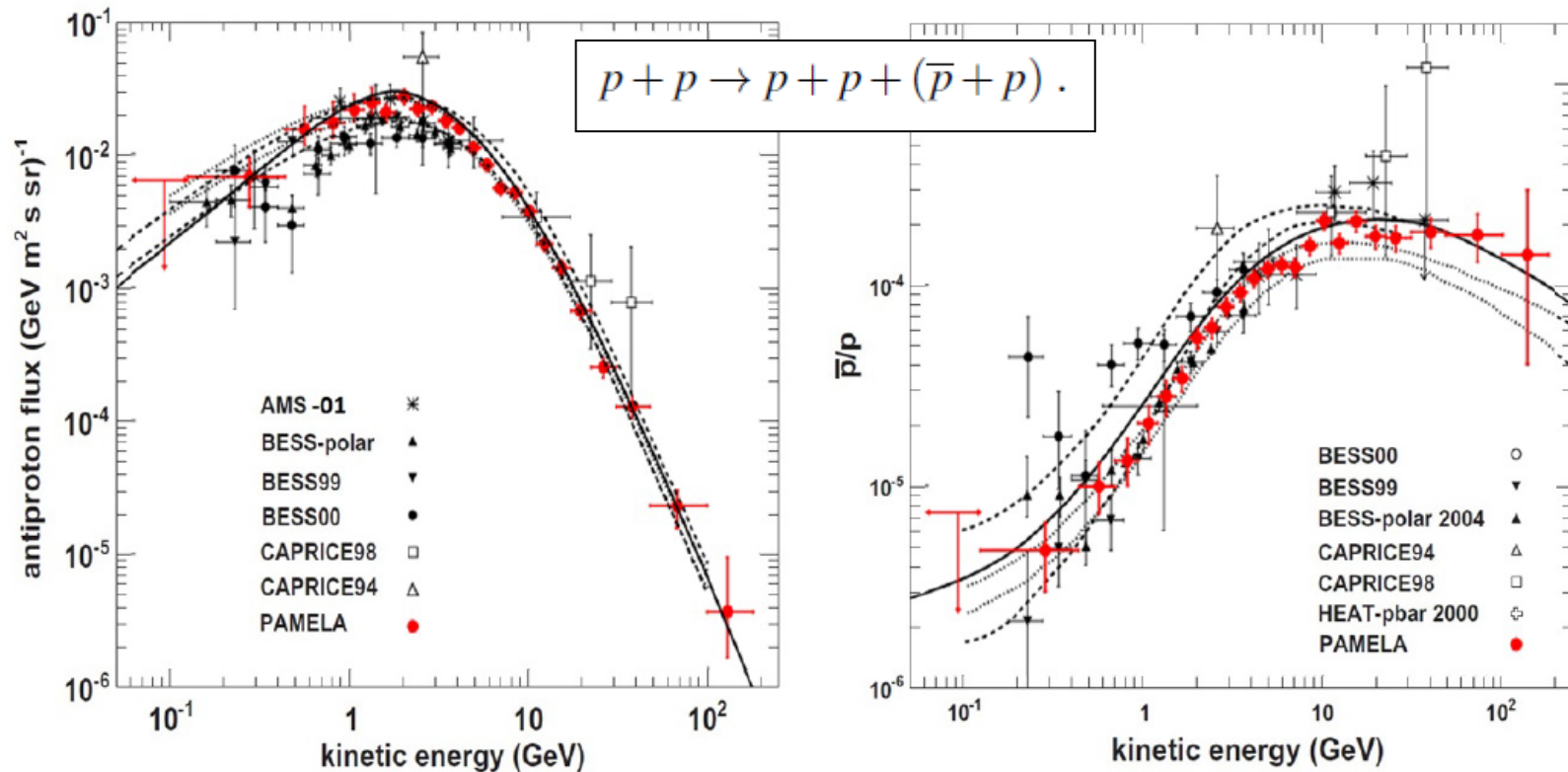
- This is one of the fundamental input for the theories studying the acceleration mechanisms of CRs



# Confronto tra p – He $10^9 < E < 10^{12}$ eV



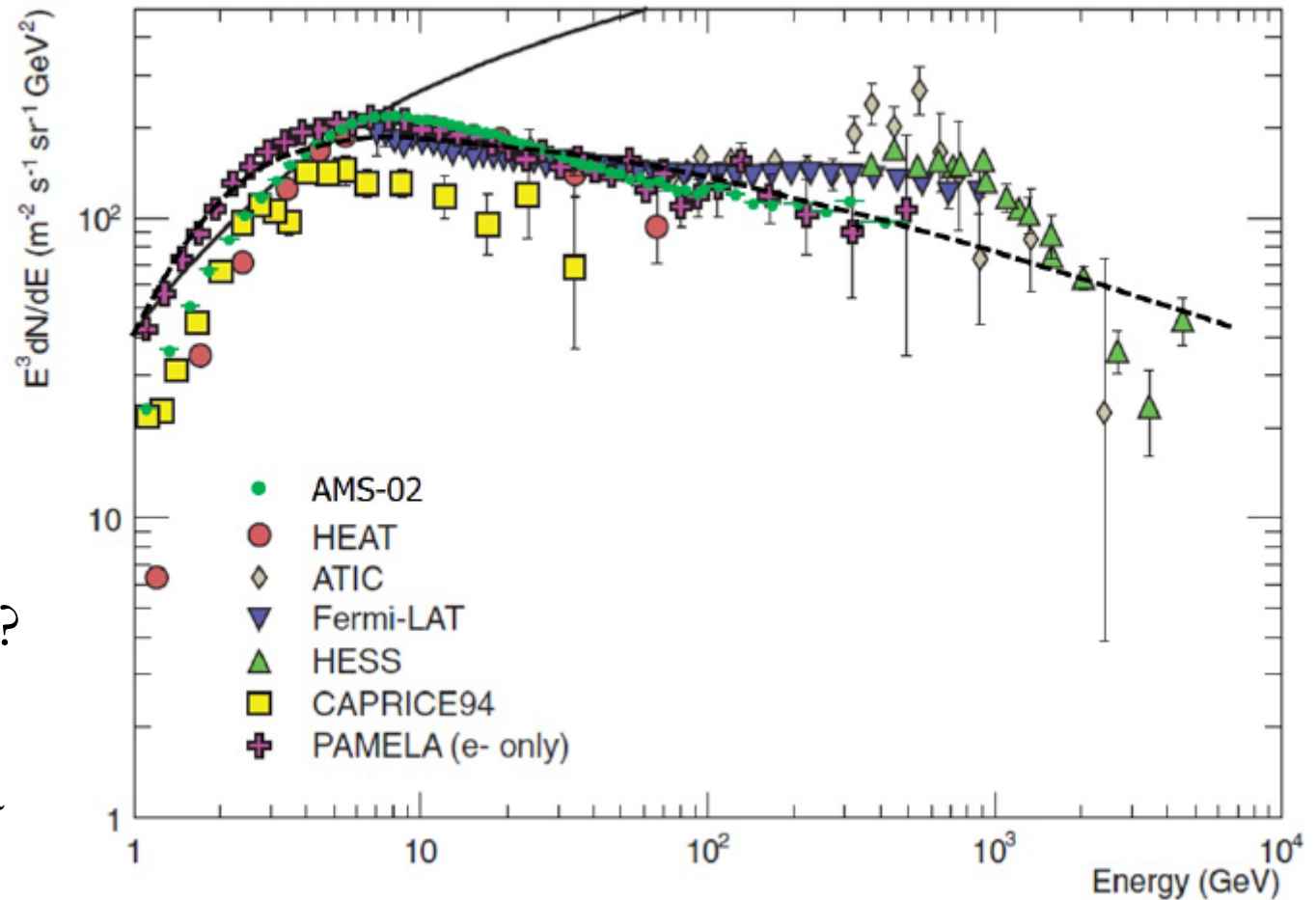
# Antimateria nella Galassia: antip/p



- Gli antiprotoni nei RC sono circa  $10^{-4}$  rispetto ai protoni.
- Questo rapporto (e la sua dipendenza dall'energia) è completamente spiegato da un modello in cui anti-p sono prodotti dalla propagazione dei RC nella Galassia e loro interazione con il mezzo interstellare

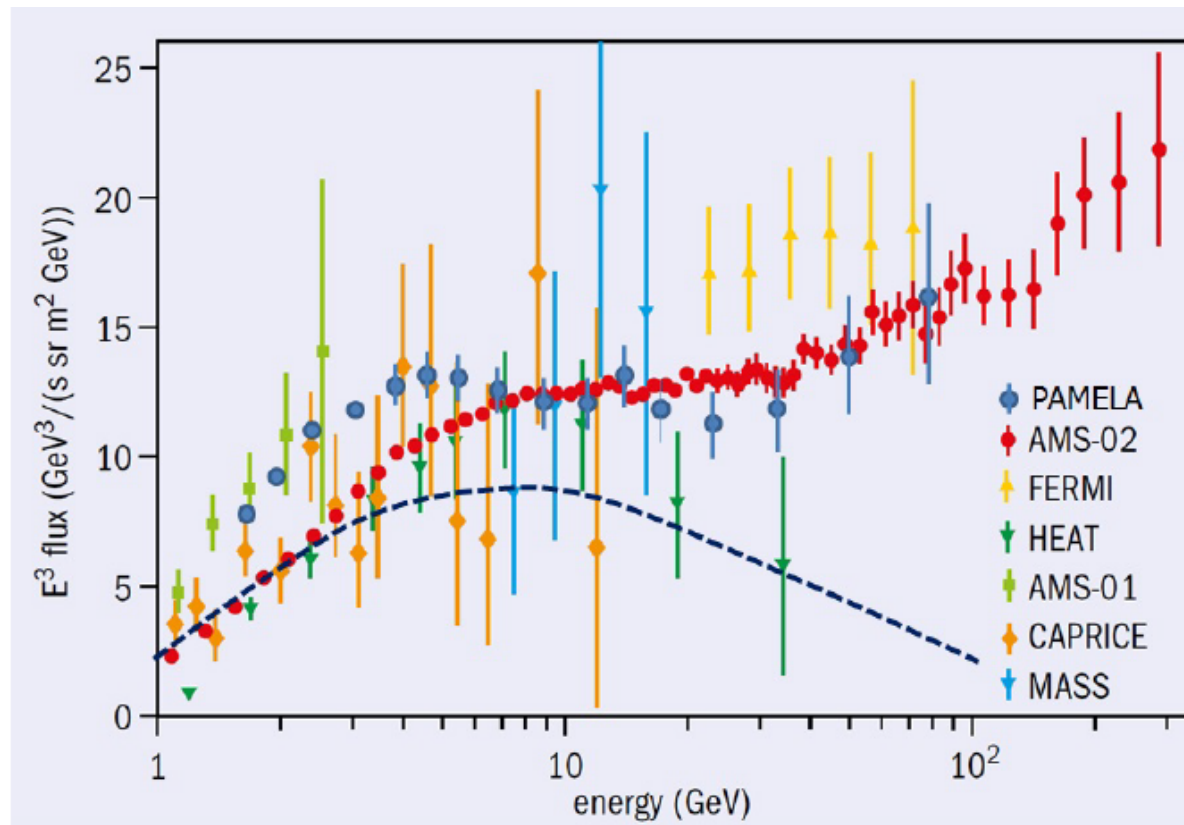
# Gli elettroni nei RC

- 1% rispetto ai p
- Spettro più ripido ( $\propto E^{-3}$ )
- “Cut-off” nello spettro a  $\sim 1$  TeV
- Quale è la ragione plausibile delle differenze tra protoni ed elettroni?
- Non dovuto ad asimmetria di carica dell’Universo!



- **Effetti delle perdite di energia degli elettroni.** Queste producono la radiazione EM osservata in varie bande dagli astrofisici, dal radio ai raggi X

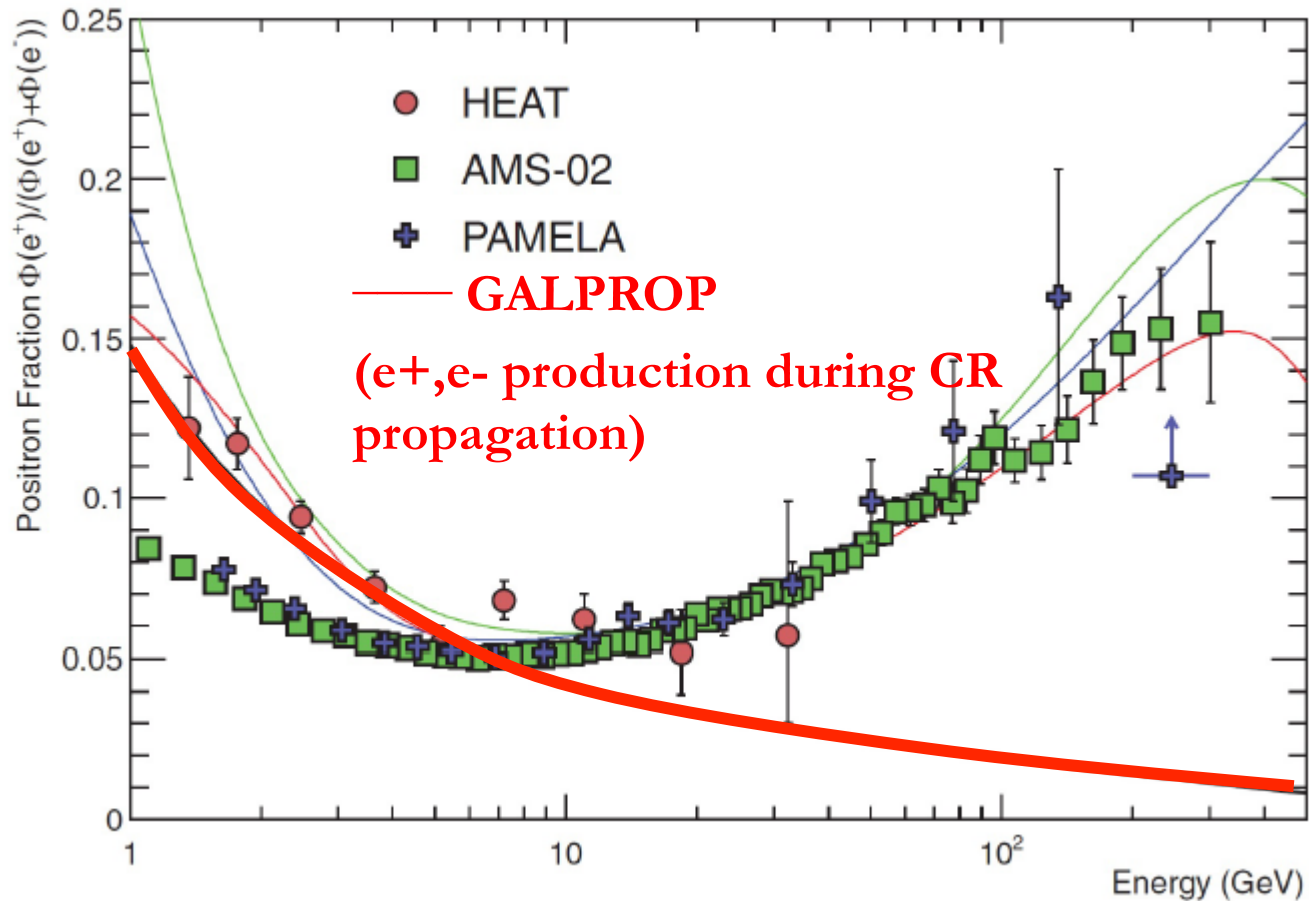
# Antimateria nella Galassia: $e^+/e^-$



- Gli  $e^-$  sono 1% dei protoni (sopra una certa energia)
- I positroni nei RC sono circa  $10^{-1}$  rispetto agli elettroni.
- Gli antiprotoni sono  $10^{-4}$  rispetto ai protoni
- Le sorgenti di  $e^-$  sono più vicine alla Terra!



# AMS-02 ( $e^+/e^-$ )

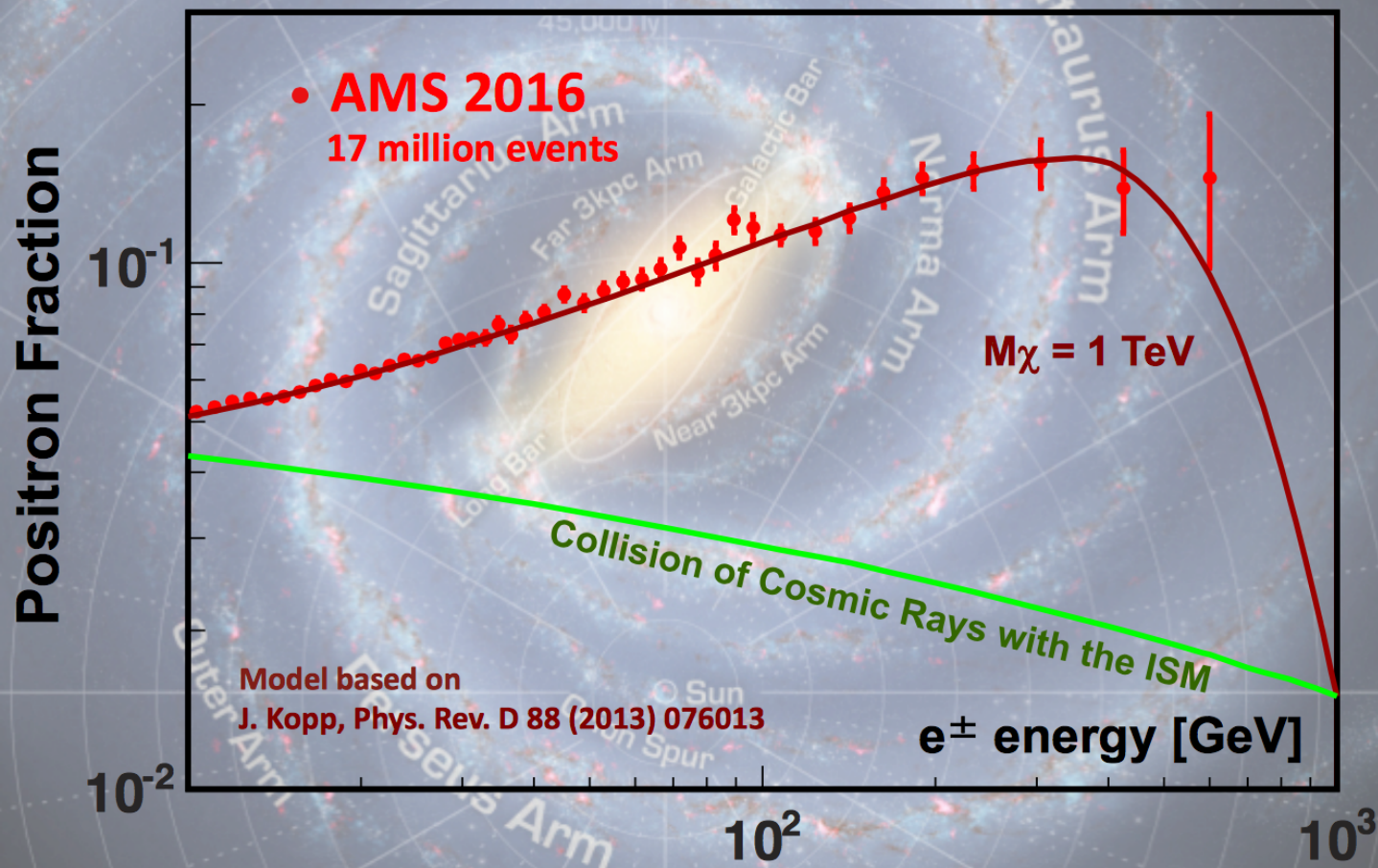


- The  $e^+$  absolute flux as function of  $E$
- Unexplained excess w.r.t. the propagation model

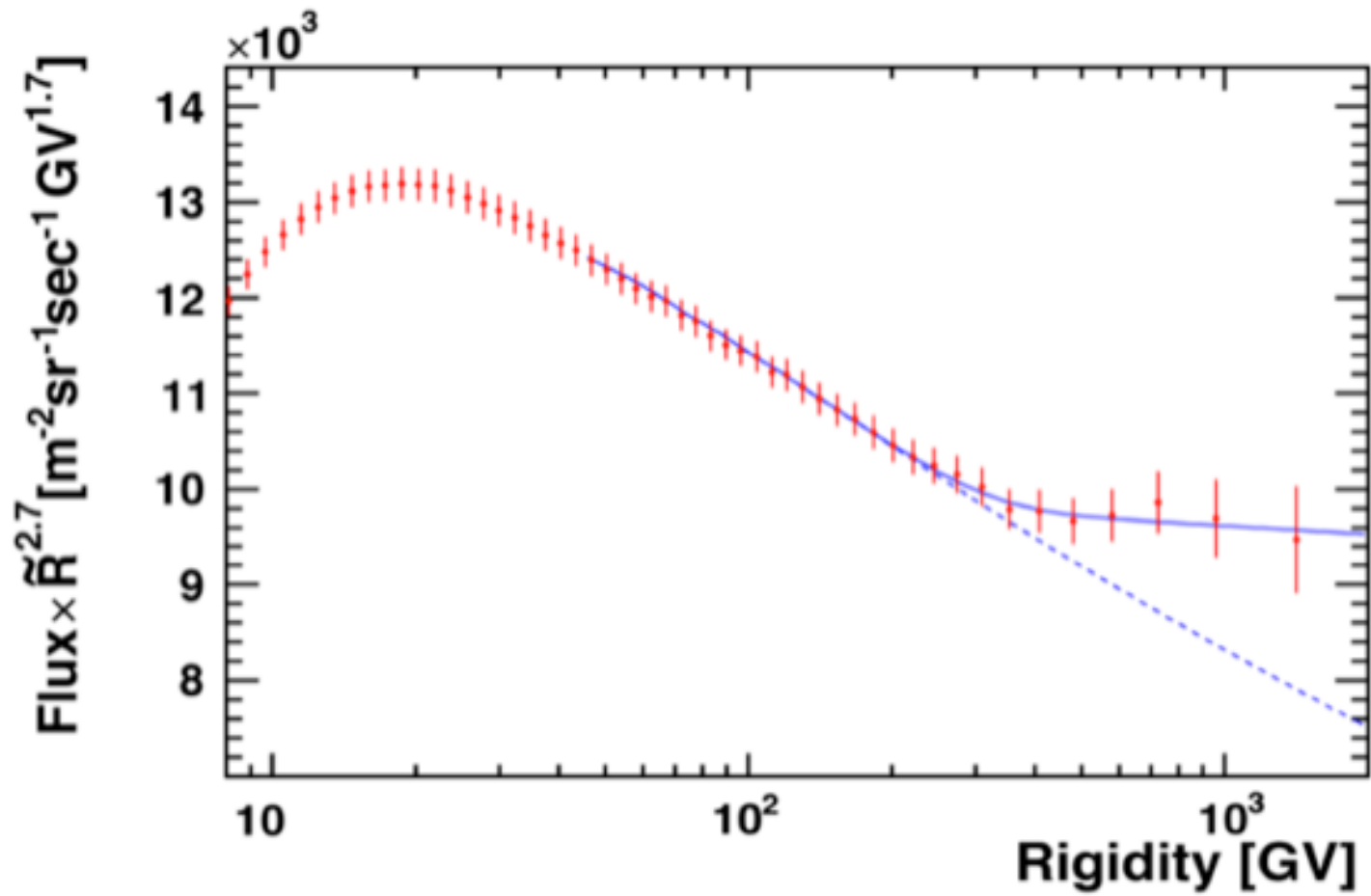
- Two possible explanations:
  - signal of the presence of Dark Matter (problematic)
  - presence of a near Galactic accelerator, as a pulsar

# AMS02 – e<sup>+</sup>/e<sup>-</sup>

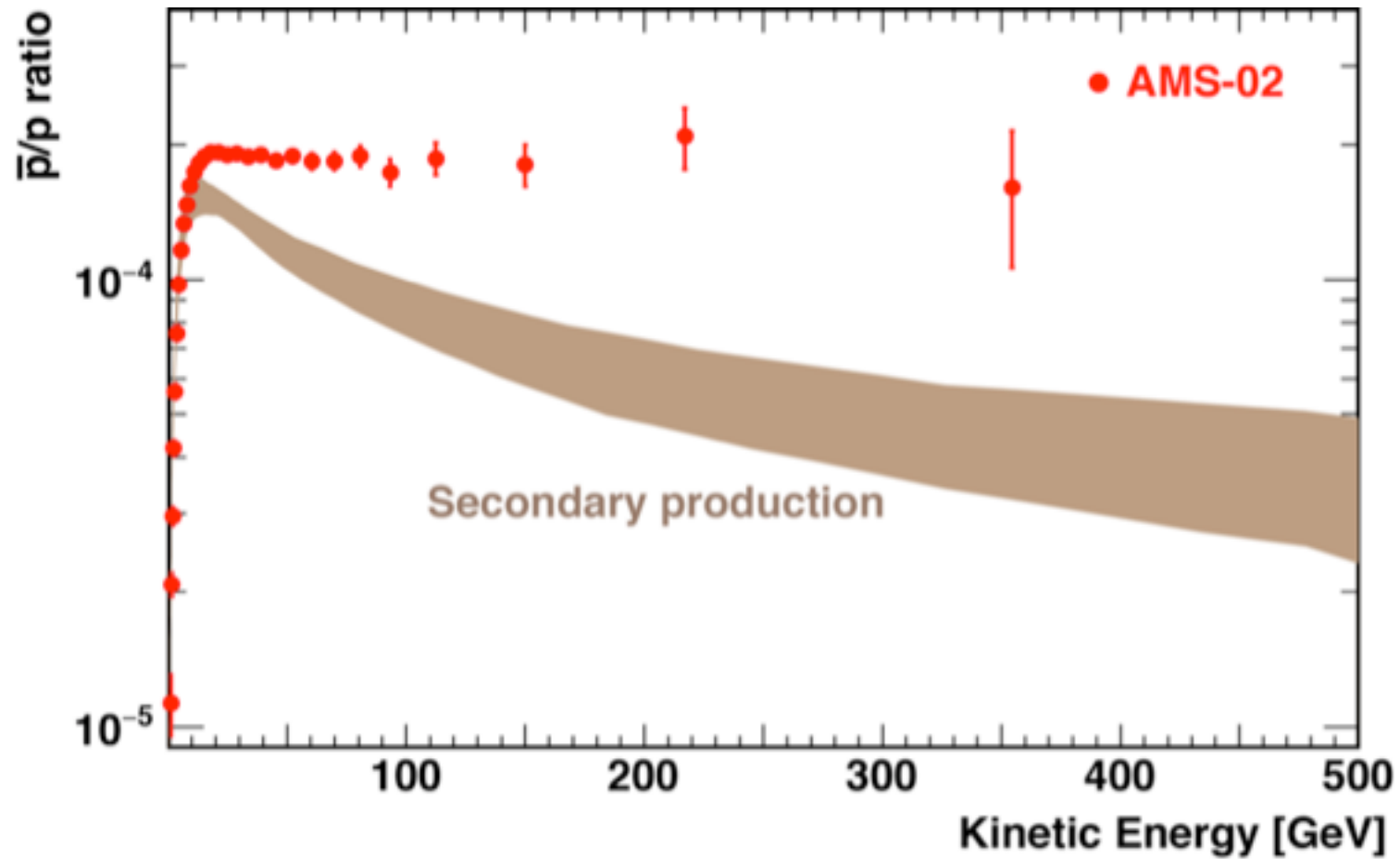
Comparison of the positron fraction measurement with a **Dark Matter** model



# AMS02 - protons



# AMS02 - antiprotons



# Astrofisica Nucleare e Subnucleare

## L'origine dei Raggi Cosmici



# The Origin of Cosmic Rays

- **Galactic**

- Ordinary stars (produce  $\sim 10^{28}$  J/s)
- Magnetic stars (produce up to  $10^{32}$  J/s)
- Supernovae (produce  $\sim 3 \times 10^{34}$  J/s)
- Novae (produce  $\sim 3 \times 10^{32}$  J/s)

# Origin of Galactic Cosmic Rays

- **Energy output required:**  
assume Galaxy is sphere radius 30kpc =  $10^{21}$  m  
 $\Rightarrow$  volume =  $10^{63}$  m<sup>3</sup>
- **Energy density CR**  $\sim 10^{-13}$  J m<sup>-3</sup> ( $10^{-6}$  eV m<sup>-3</sup>)  
Thus total energy of CR in Galaxy  $\sim 10^{50}$  J.
- **Age of Galaxy**  $\sim 10^{10}$  years,  $\sim 3 \times 10^{17}$  sec  
hence av. CR production rate  $\sim 3 \times 10^{32}$  J s<sup>-1</sup>  
Particles shortlived,  $\Rightarrow$  continuous acceltn.

# Cosmic Rays from stars

- **Ordinary stars** *Too low!!!* Our Sun emits CR during flares but these have low-E  
 $\sim 10^{17}$  J/s, total  $10^{28}$  J/s ( $10^{11}$  stars in Galaxy)
- **Magnetic stars**  
*Optimistic!!!* Mag field about a million times higher than the Sun so output a million times higher, but only 1% magnetic (and low-E);  
 $\sim 10^{32}$  J/s

# Supernovae

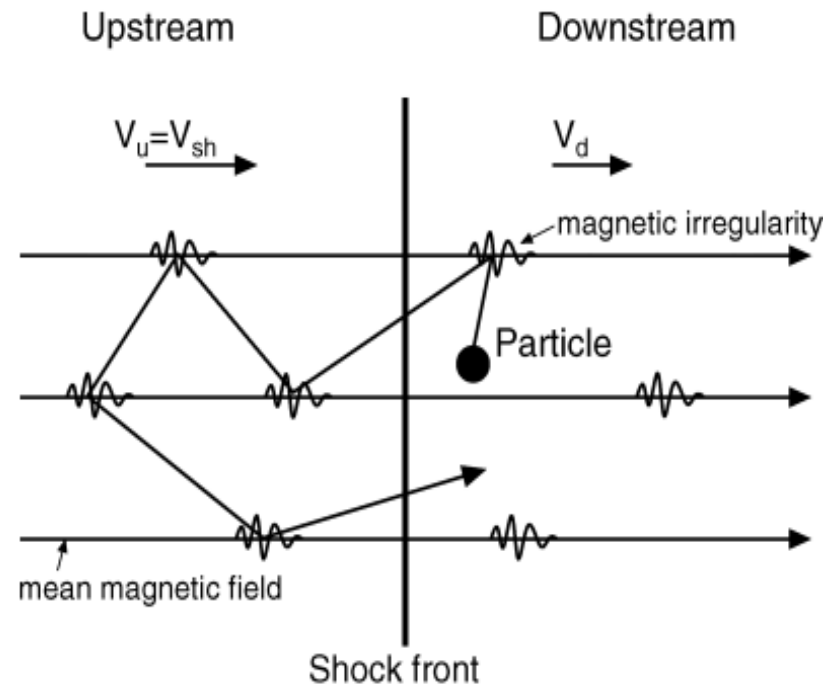
- **Supernovae - a likely source!**
- Synchrotron radiation observed from SN so we know high energy particles are involved. Total particle energy estimated at  $\sim 10^{44}$  J per SN
- Taking 1 SN every 100 years,  
=>  $3 \times 10^{34}$  J/s. **(also, SN produce heavies)**

# Galactic Sources

- Why SNR?
  - Energy argument
  - Fermi Acceleration Mechanism (1<sup>st</sup> order)
    - “elastic” collisions  $\Delta E = \xi E$  e  $P_{\text{esc}} = \text{const}$
    - Power Law Spectrum  $\Gamma \sim 2$

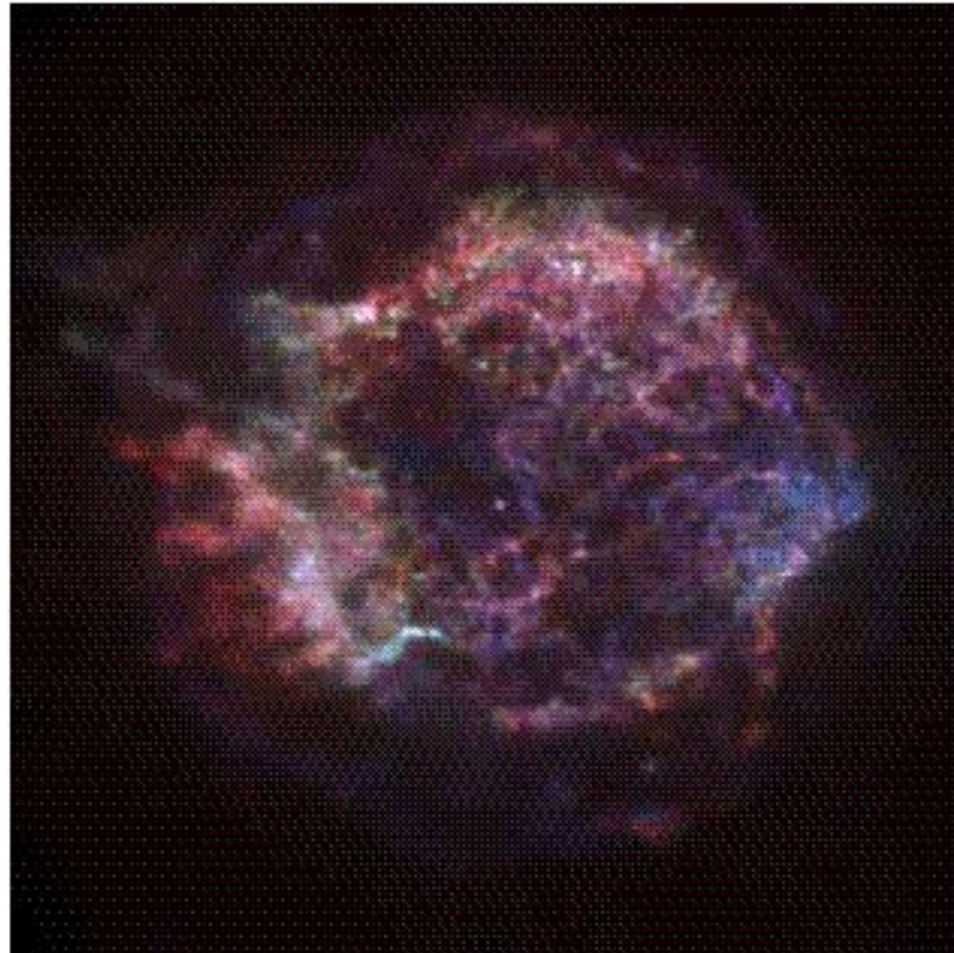
$$P_{CR} = \frac{\langle \varepsilon \rangle V_{\text{confinamento}}}{\tau_{\text{confinamento}}} = 10^{40} \frac{\text{erg}}{\text{s}}$$

$$P_{SNR} = \frac{10^{51} \text{erg}}{30 \text{anni}} = 10^{42} \frac{\text{erg}}{\text{s}}$$

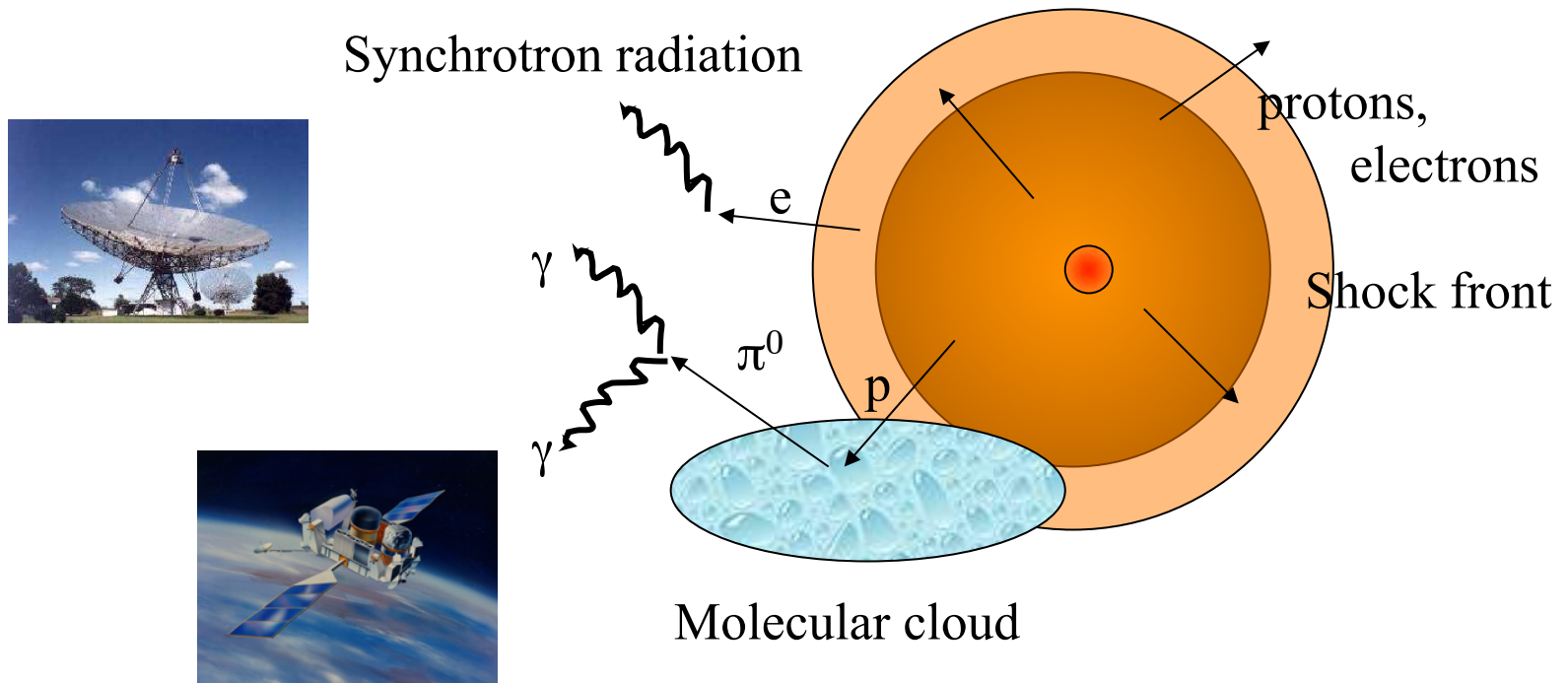




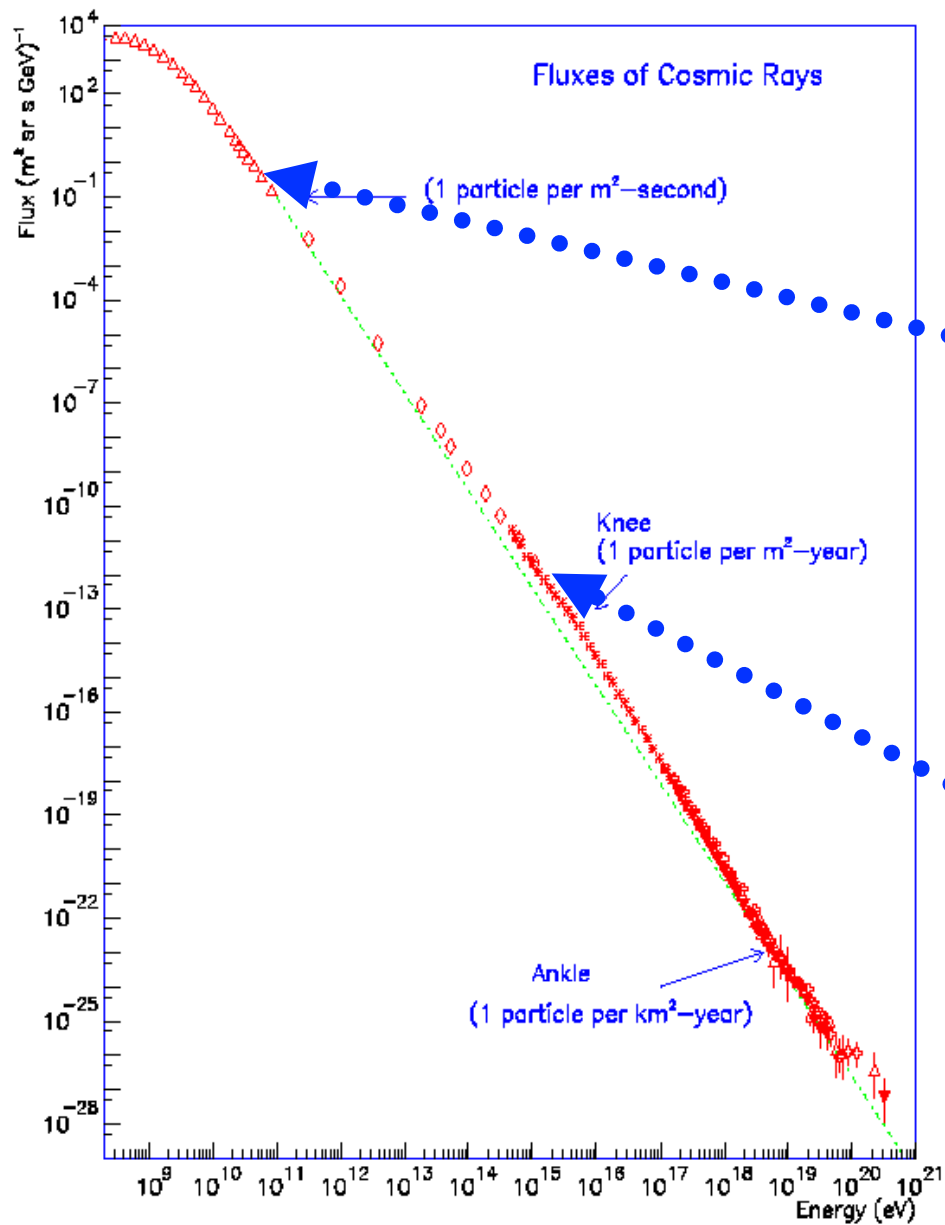
# Supernovae and Remnants



# Supernova Remnants

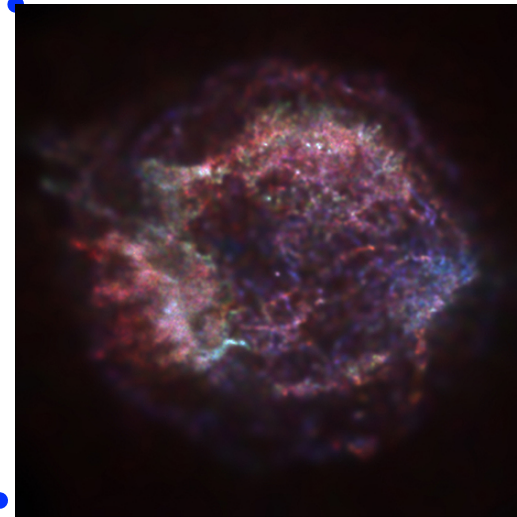


Nearby molecular clouds can provide targets for ions accelerated at the SNR shock. Gamma-rays are then produced by neutral pion decay pointing out the production of hadronic cosmic rays



## Spectrum

The bulk of CRs occurs with energies below the knee and are thought to come from our own galaxy.



There was still no completely definite observational proof !

# Supernovae and Cosmic Rays

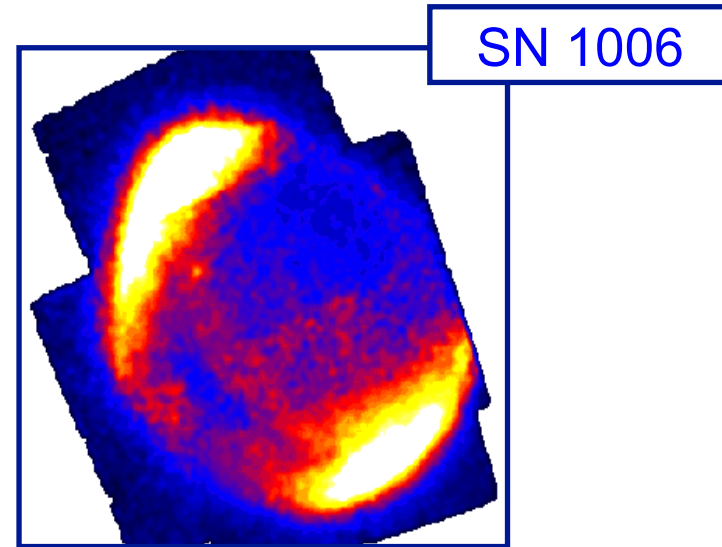
- Most scientists believe that Galactic CR are accelerated in SNR shocks
- EGRET detected  $\pi^0$  bump at 68 MeV  $\rightarrow$  direct evidence of nucleon-nucleon interactions
- EGRET detected  $\gamma$ -rays from LMC but not SMC  $\rightarrow$  CR production varies
- Some EGRET sources could be SNRs, but poor resolution prevented confirmation
- X-ray and TeV observations of SNR show shocked electrons accelerated to CR-energies



# X-ray SNR

Because of the huge amount of mechanical energy released by SN explosions ( $\sim 10^{51}$  ergs), it has long been thought that shock waves induced by supernova explosions are responsible for the acceleration of cosmic rays up to energies  $\sim 100$  TeV. Observational clues?

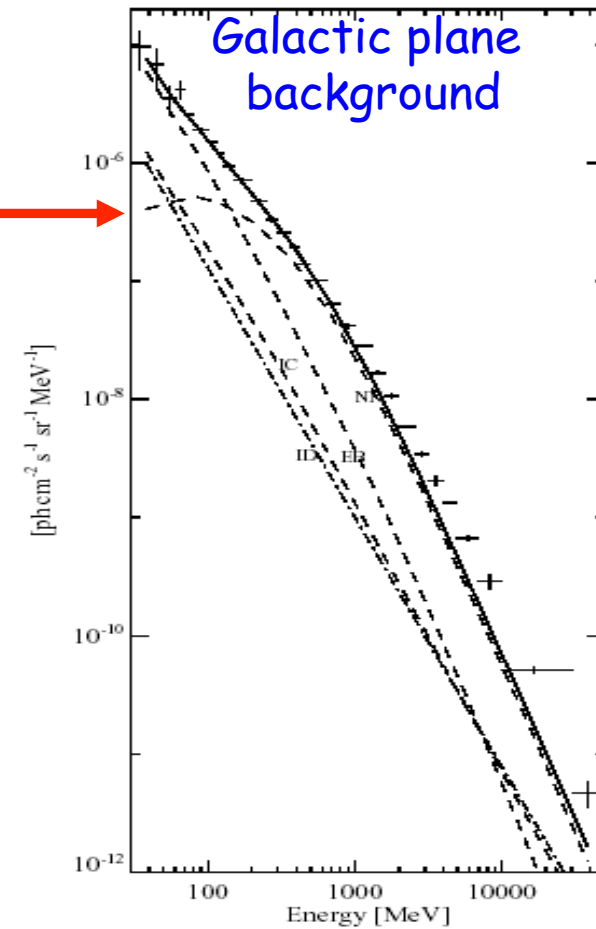
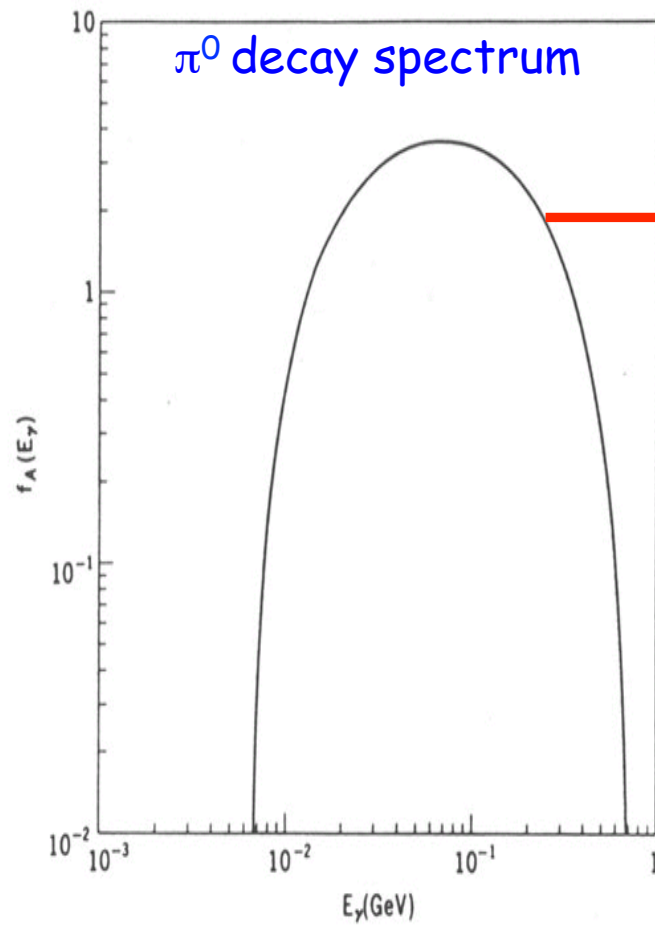
Brightest X-ray zones of SN 1006 feature **non-thermal** spectra. Likely origin: synchrotron emission of relativistic  $e^-$  up to  $\sim 100$  TeV in a  $\sim 10^{-5}$  G magnetic field. In agreement with TeV gamma-ray observations.



0.4-8 keV composite ASCA image

Primordial role of SNR observations in the hard X rays / soft gamma rays to characterize **non-thermal emission**.

# $\pi^0$ decay spectrum



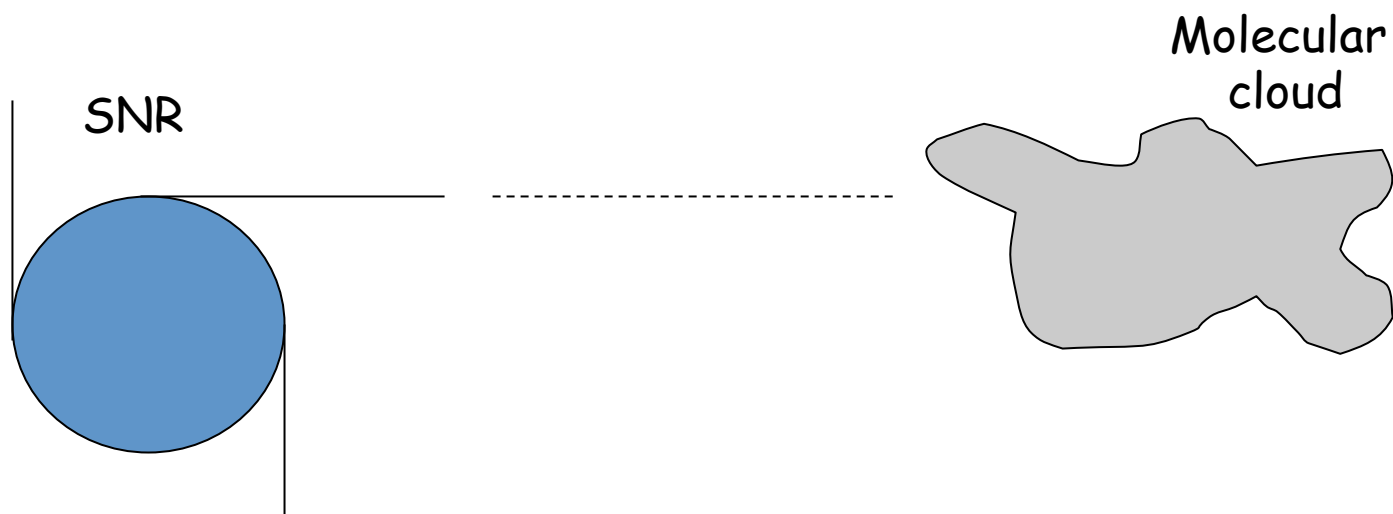
# A case by case analysis

- A case by case analysis is needed for each SNR-EGRET source coincident pair.
- There should be, nearby, enhancements of molecular material that could act as target for accelerated protons.
- This material, then, must be excited by the shock.
- Leptonic processes and other candidate sources must be discarded as the origin of the gamma-ray radiation.

Torres et al. [astro-ph/0209565](#),  
Supernova Remnants and gamma-ray sources,  
Review for the Physics Reports (2002)

# GeV SNR Detection strategy

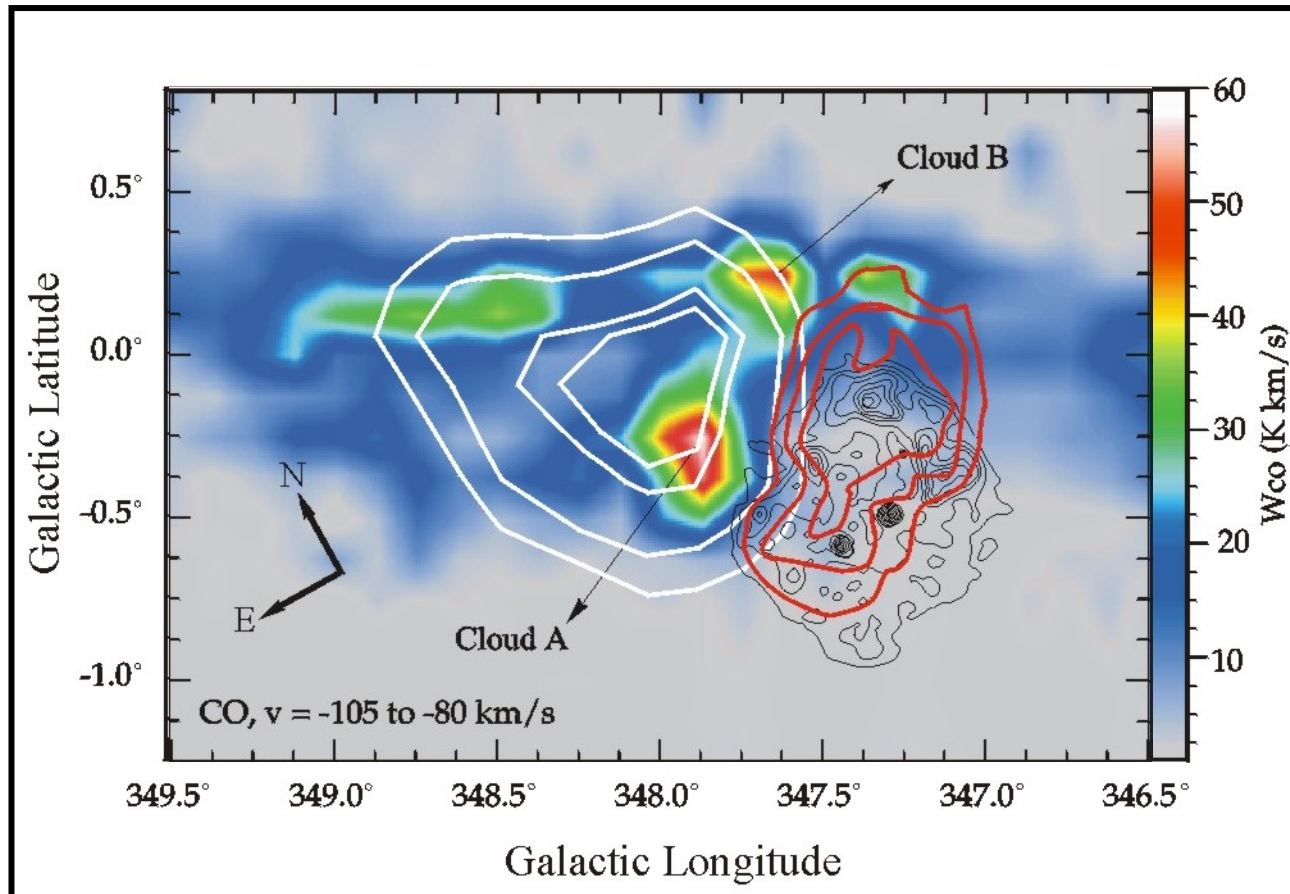
- Hadronic channel increased
- $F_{\text{SNR}} \sim \rho_{\text{ISM}}$        $F_{\text{nubi}} \sim \epsilon_{\text{CR}} = 1\text{eV/cm}^3$



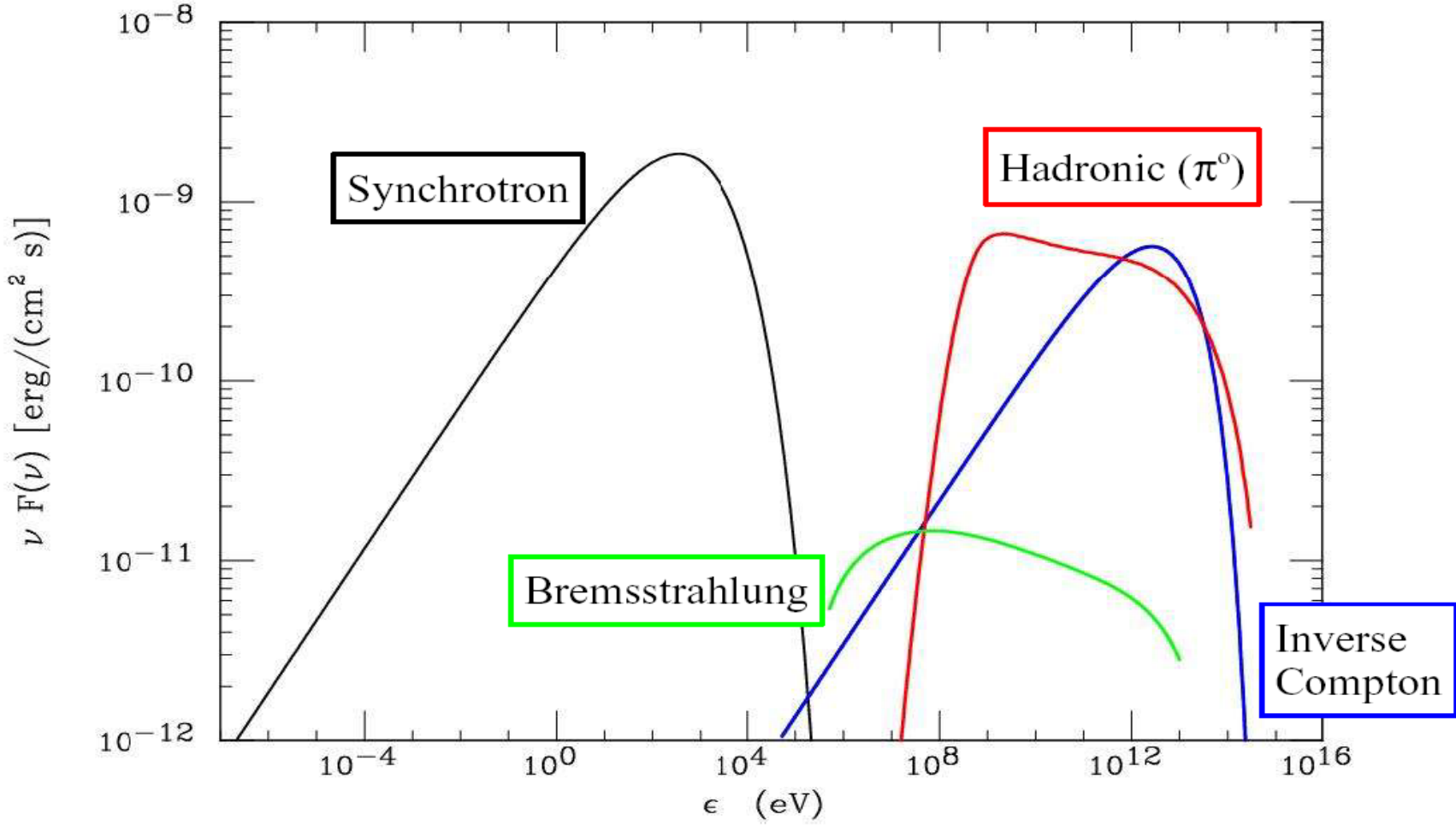
- Molecular cloud near SNR  $\rightarrow \epsilon_{\text{CR}} \gg 1\text{eV/cm}^3$
- $R = \text{CO}(J=2 \rightarrow 1) / \text{CO}(J=1 \rightarrow 0)$
- $R \sim 0.7$ , but  $R \rightarrow 2.5$  for excited clouds



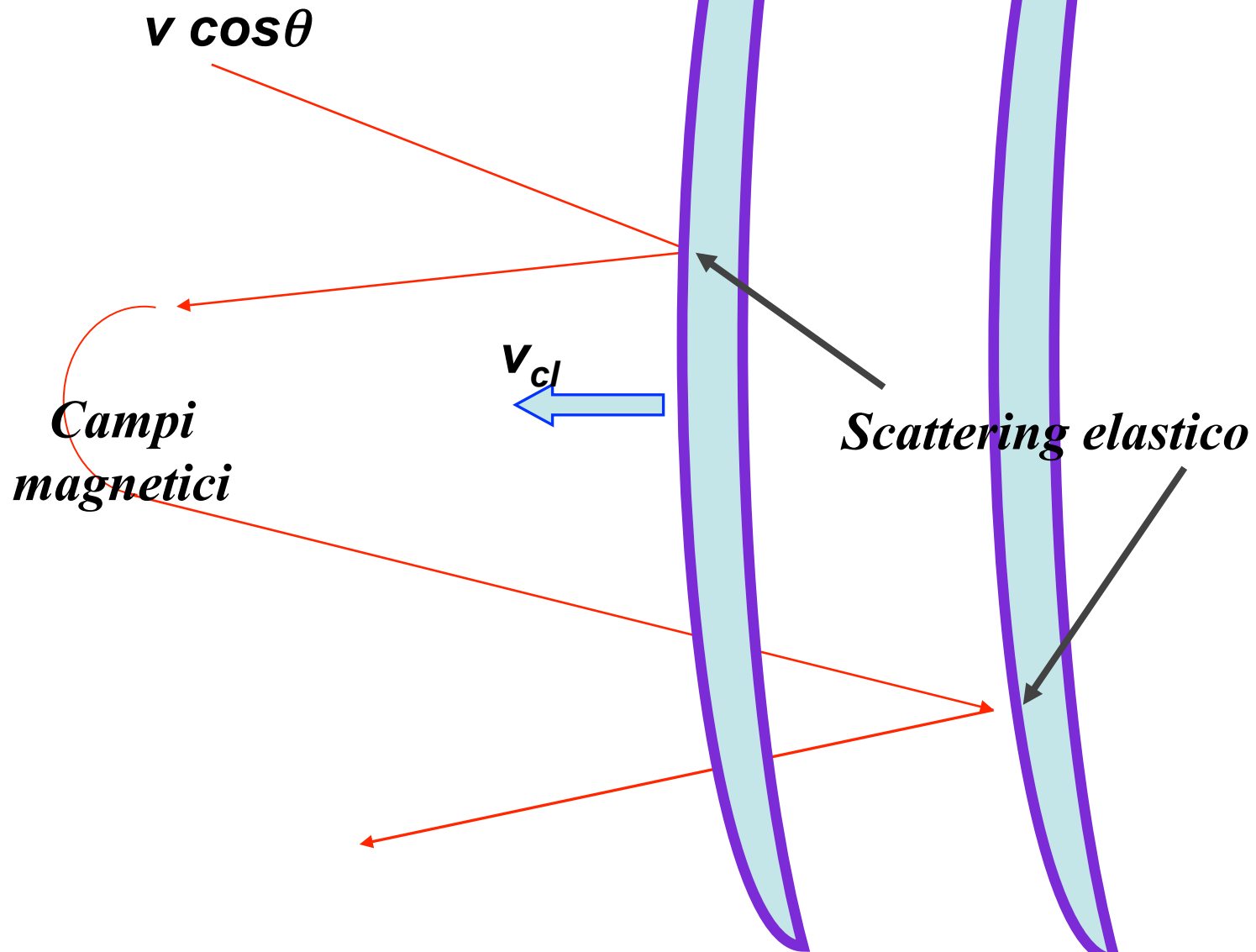
# Supernovae



# Supernova Remnants



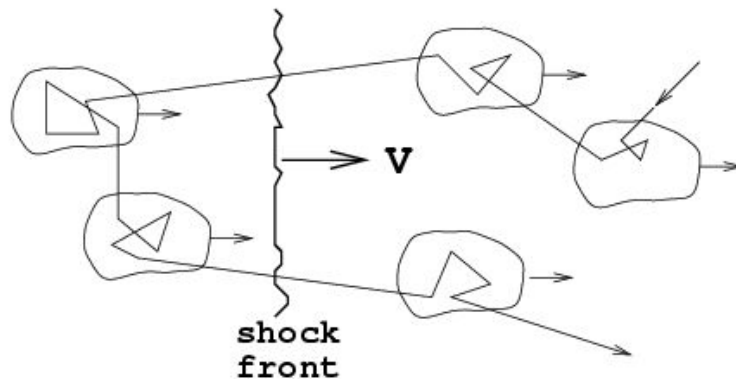
# Onda di shock



# 1st order Fermi mechanism

- Basic principles:
  - Strong shock
  - Scattering by irregularities

1st order :  
acceleration in strong shock waves  
(supernova ejecta, RG hot spots...)

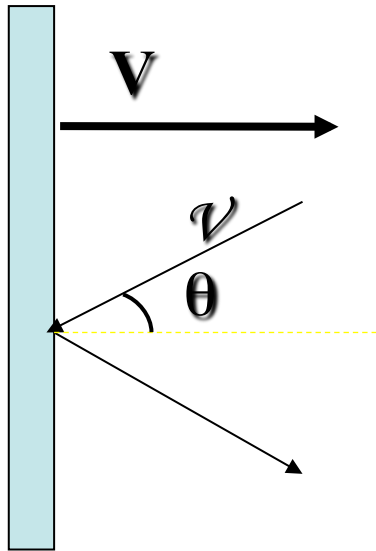


shock frame

$$\left\langle \frac{\Delta E}{E} \right\rangle = \frac{4}{3} \left( \frac{v}{c} \right)$$

$$\frac{\Delta E}{E} \sim \beta \quad \beta = \frac{v}{c} \lesssim 10^{-1}$$

# Incremento di energia in urto con onda di shock



- *Onda di shock* = perturbazione che si propaga con velocità  $V >$  velocità del suono nel mezzo.
  - Assumeremo l'approssimazione di onda piana e con massa  $M \gg$  massa particella
  - L'urto è elastico nel SR di quiete di un osservatore sull'onda di shock ( $S'$ ).
- 
- **Considereremo il processo nei due SR:**
    - $S$  = Sistema di riferimento dell'osservatore
    - $S'$  = Sistema di riferimento dell'onda di shock