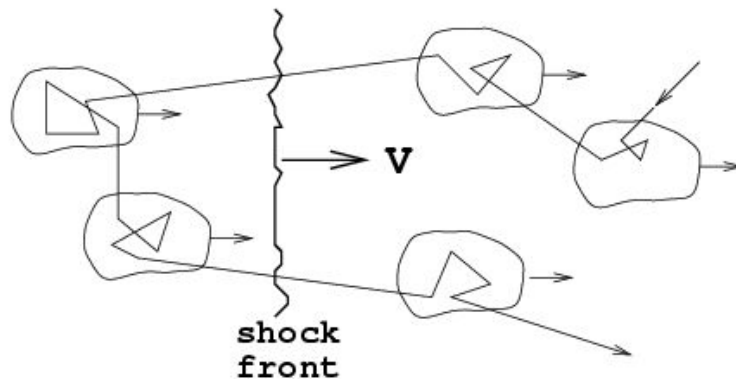


Astrofisica Nucleare e Subnucleare
Cosmic Ray Astrophysics

1st order Fermi mechanism

- Basic principles:
 - Strong shock
 - Scattering by irregularities

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

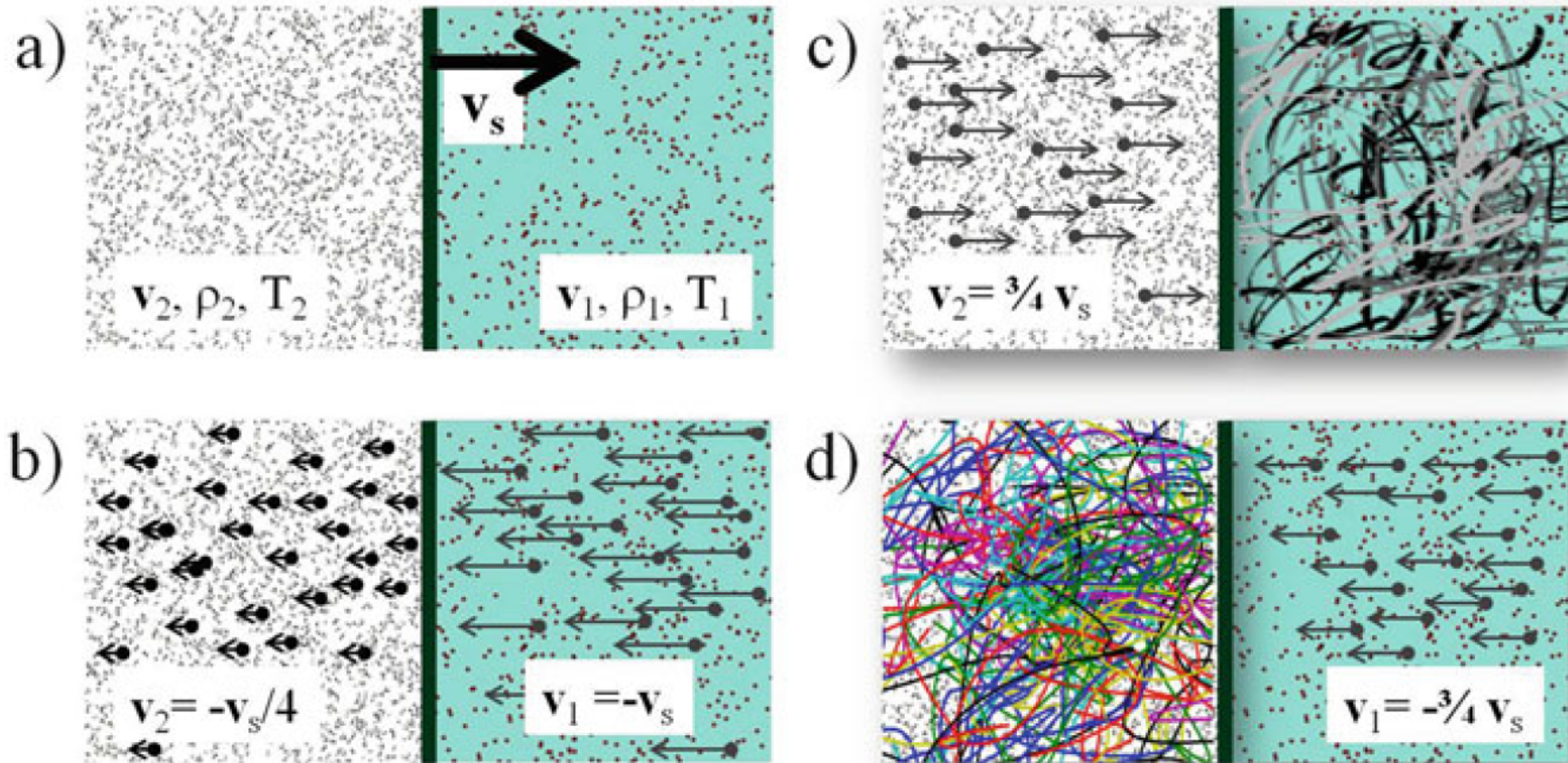


shock frame

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

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

1st order Fermi mechanism



3.8 Variazione del tempo di confinamento con l'energia

- Il modello illustrato (confinamento dei RC nella Galassia come scatola parzialmente trasparente) è chiamato “*leaky box*”;
- Il rapporto $r = (\#L/\#M)$ dipende dal tempo di confinamento τ dei RC nella Galassia; all'aumentare di τ , cresce r .
- Se il confinamento è dovuto al campo B Galattico, ci si aspetta che i RC più energetici abbiano un tempo di confinamento inferiore (ossia, aumenta la probabilità di fuggire dal piano Galattico);
- In tal caso, all'aumentare dell'energia ci si aspetta un valore di r che *decrece* con l'energia;
- L'equazione differenziale deve essere modificata per tener conto di $\tau(E)$.

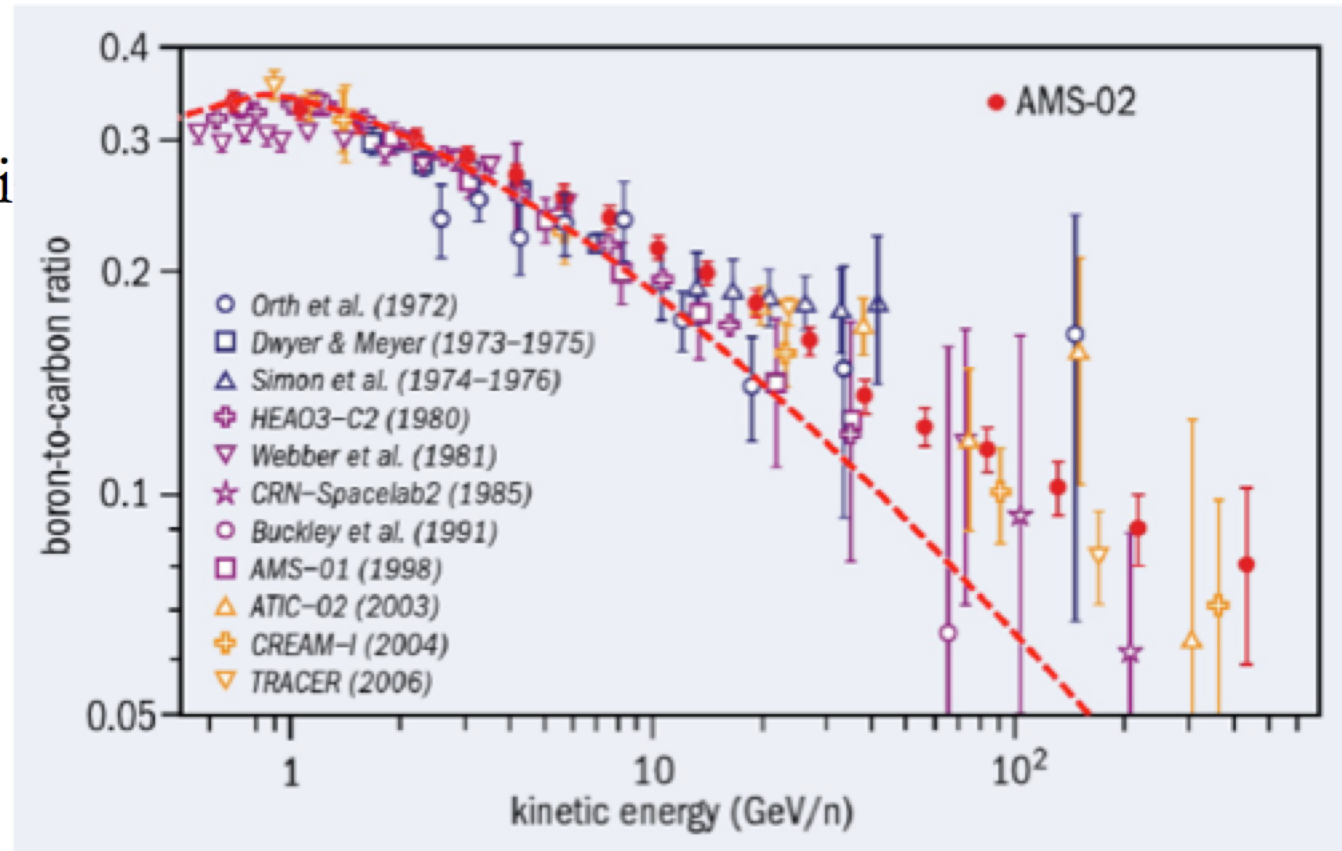
Dipendenza del rapporto B/C vs. E

- La probabilità di fuga dalla Galassia dipende dall'energia dei RC come:

$$\tau = \tau_0 / E^{0.6}$$

- Poiché $\tau \sim \xi$

$$\xi = \xi_0 E^{-0.6}$$



- Nota: non è possibile ricavare questo in modo semplice per via analitica.

3.10 L'orologio dei Raggi Cosmici

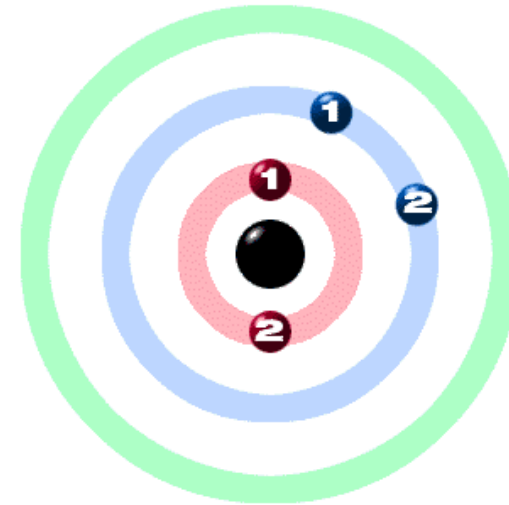
- Nel 1958, Hayakawa et al., stabilirono che le abbondanze dei secondari radioattivi potevano essere impiegati come “orologi” dei RC misurando il flusso (relativo) degli isotopi radioattivi e confrontandolo con quello aspettato se nessun decadimento fosse avvenuto.
- Per poter misurare il tempo di permanenza dei RC, un isotopo deve avere i seguenti requisiti:

1. La vita media dell'isotopo radioattivo deve essere paragonabile all'età stimata dei RC.
2. L'isotopo deve essere un “puro secondario”, cioè non deve essere presente alle sorgenti.
3. Deve essere possibile calcolarne il “rate” di produzione durante la propagazione nel mezzo intergalattico.



Quali isotopi si usano: il Berillio

Nuclide	$t_{1/2}$	Tipo di Decadimento
${}^7\text{Be}^*$	-----	Stabile.
${}^9\text{Be}$	_____	Stabile
${}^{10}\text{Be}$	$1.6 \cdot 10^6 \text{ y}$	β^-



Il Be è stato il primo elemento ad essere usato per calcolare l'età dei RC. Risulta quindi il più studiato. Ma anche altri isotopi possono essere usati :

${}^{26}\text{Al}$	$7.1 \cdot 10^5 \text{ y}$	β^-
${}^{36}\text{Cl}$	$3.0 \cdot 10^5 \text{ y}$	β^-
${}^{54}\text{Mn}$	$\sim 6.3 \cdot 10^5 \text{ y}$	β^-, β^+

* Il ${}^7\text{Be}$ viene considerato stabile. In effetti può catturare elettroni, ma perché il libero cammino medio per il pick-up di elettroni è molto più grande dello spessore attraversato, questa trasmutazione è trascurata

Derivazione numerica di τ_F

- In questo caso, due processi sono in competizione: la fuga dei nuclidi di Be dalla Galassia, con un tempo τ_f ; la produzione di Be da parte della spallazione di nuclidi C,N,O con un tempo caratteristico τ_{spall}
- Supponendo (in prima approssimazione) che $\tau_{spall} \gg \tau_f$, e che τ_{spall} sia lo stesso per i due Be (ciò è lecito perché λ_{spall} è debolmente dipendente dal numero atomico) e considerando che:

■ σ^{10} e σ^7 (= probabilità di produzione di Be¹⁰ e Be⁷ rispettivamente) si ricavano dalle tabelle di frammentazione

$$\sigma_7 = \sum_{J>7} P_{j7} \sigma_j = 9.7 mb$$

$$\sigma_{10} = \sum_{J>7} P_{j10} \sigma_j = 2.3 mb$$

- Il numero di Be 10 in funzione di t :

$$N_{10}(t) = N_{10}^0 e^{-t/\tau_{10}} \quad \text{con} \quad \tau_{10} = 3.9 \times 10^6 \text{ y}$$

- Il berillio 7 è invece stabile:

$$N_7(t) = N_7^0$$

- Sperimentalmente, il valore misurato del rapporto tra i due isotopi (al tempo $t=t^*$) ha il valore

$$R(t^*) = \frac{N_{10}}{N_7} = 0.028$$

da cui possiamo ottenere:

$$R(t^*) = \frac{N_{10}^0}{N_7^0} e^{-t^*/\tau_{10}} \Rightarrow \frac{t^*}{\tau_{10}} = -\ln\left(\frac{N_7^0}{N_{10}^0} \cdot R(t^*)\right) = -\ln(0.118) = 2.2$$

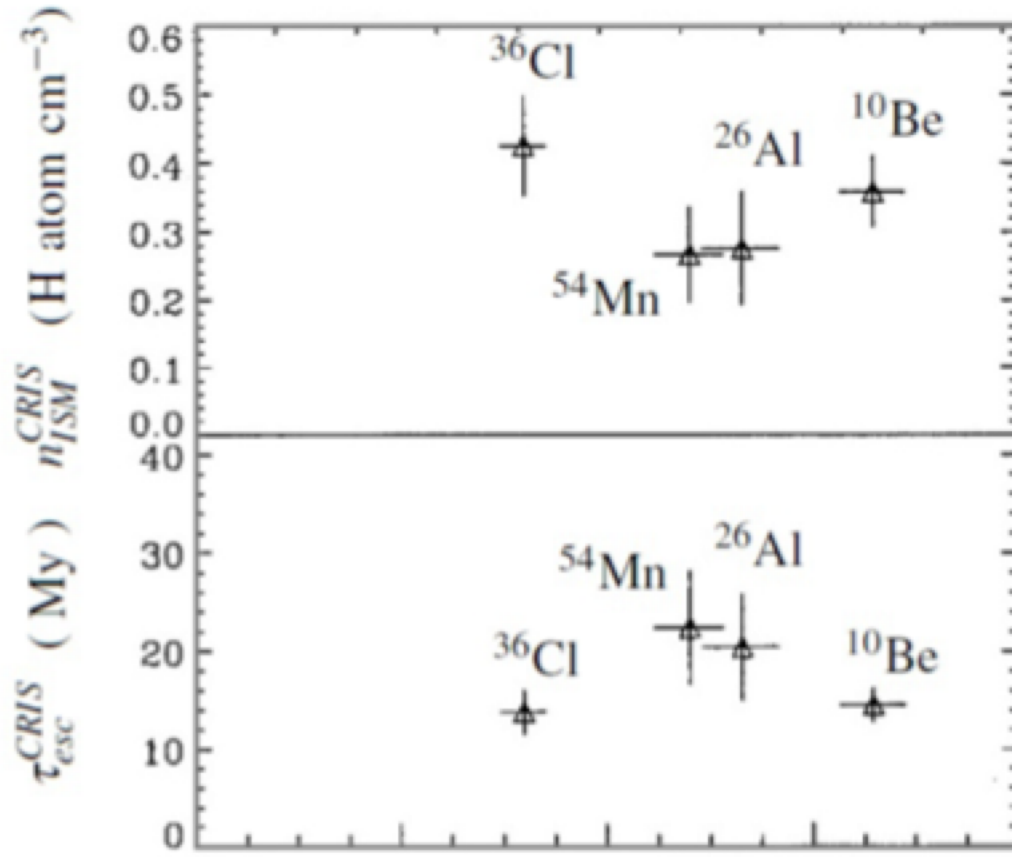
$$\tau_F \equiv t^* = 2.2 \times \tau_{10} = 8 \times 10^6 \text{ y}$$

Interpretazione delle misure del tempo di fuga in termini di modello

$$\lambda_f \equiv 1/\tau_F = \rho_{ISM} \cdot c \cdot \tau_f$$

↓

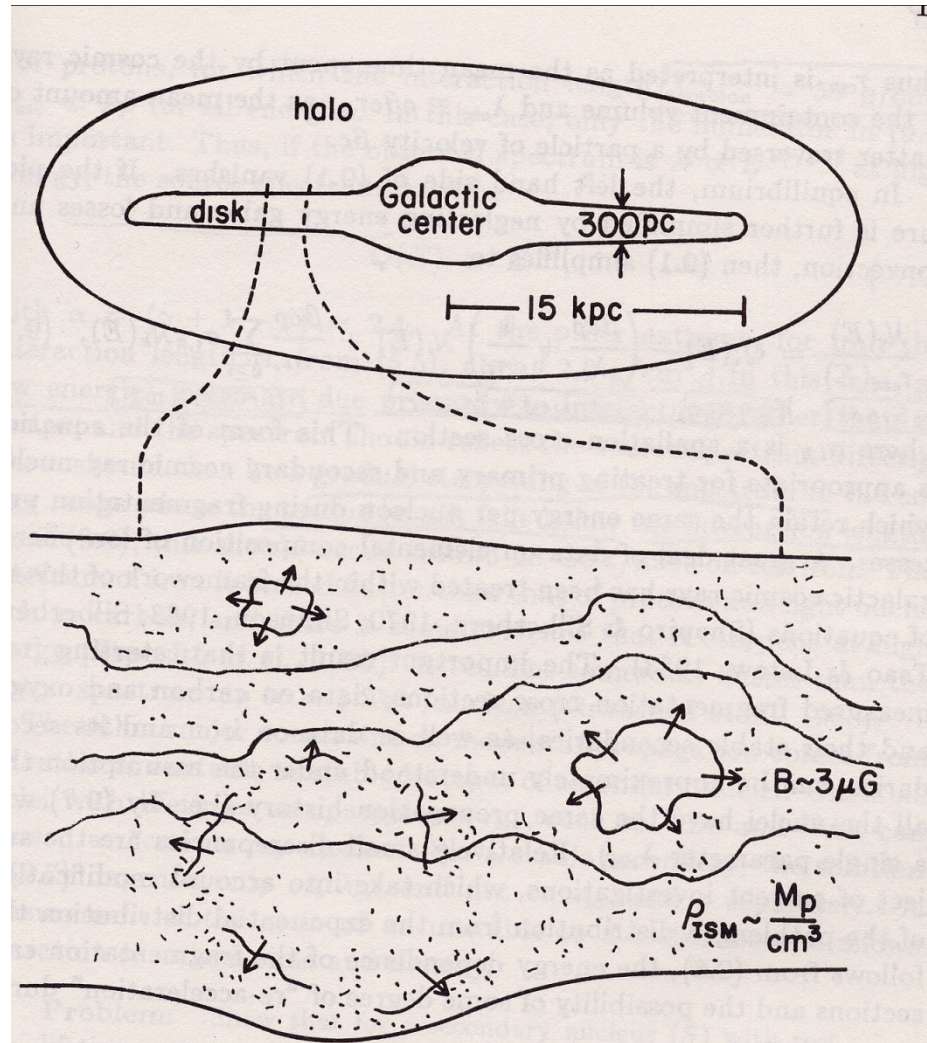
$$\rho_{ISM} = \frac{\lambda_f}{c \cdot \tau_f}$$



Le misure dei tempi di permanenza dei RC favoriscono scenari di propagazione nel volume con densità tipiche minori della densità media del disco galattico ($1\text{p}/\text{cm}^3$): altra evidenza *dell'alone galattico*

- Gli isotopi radioattivi si sono rivelati ottimi strumenti per conoscere i tempi medi di permanenza dei RC nella Galassia e quindi utili anche per testare la densità media del ISM e i modelli di propagazione attraverso di esso.
- La possibilità di sfruttare diversi isotopi con differenti tempi di decadimento, ci permette di testare la densità del ISM intorno al sistema solare entro volumi di raggio variabile. Non sono state trovate differenze consistenti tra i tempi misurati con il Be ed i tempi misurati con isotopi diversi.
- Le ultime misure eseguite stimano una permanenza di 15 Myr e confermano modelli diffusivi attraverso un ISM di densità $< 1 \text{ p/cm}^3$ (ossia, Galassia Disco+Alone)

The Galaxy



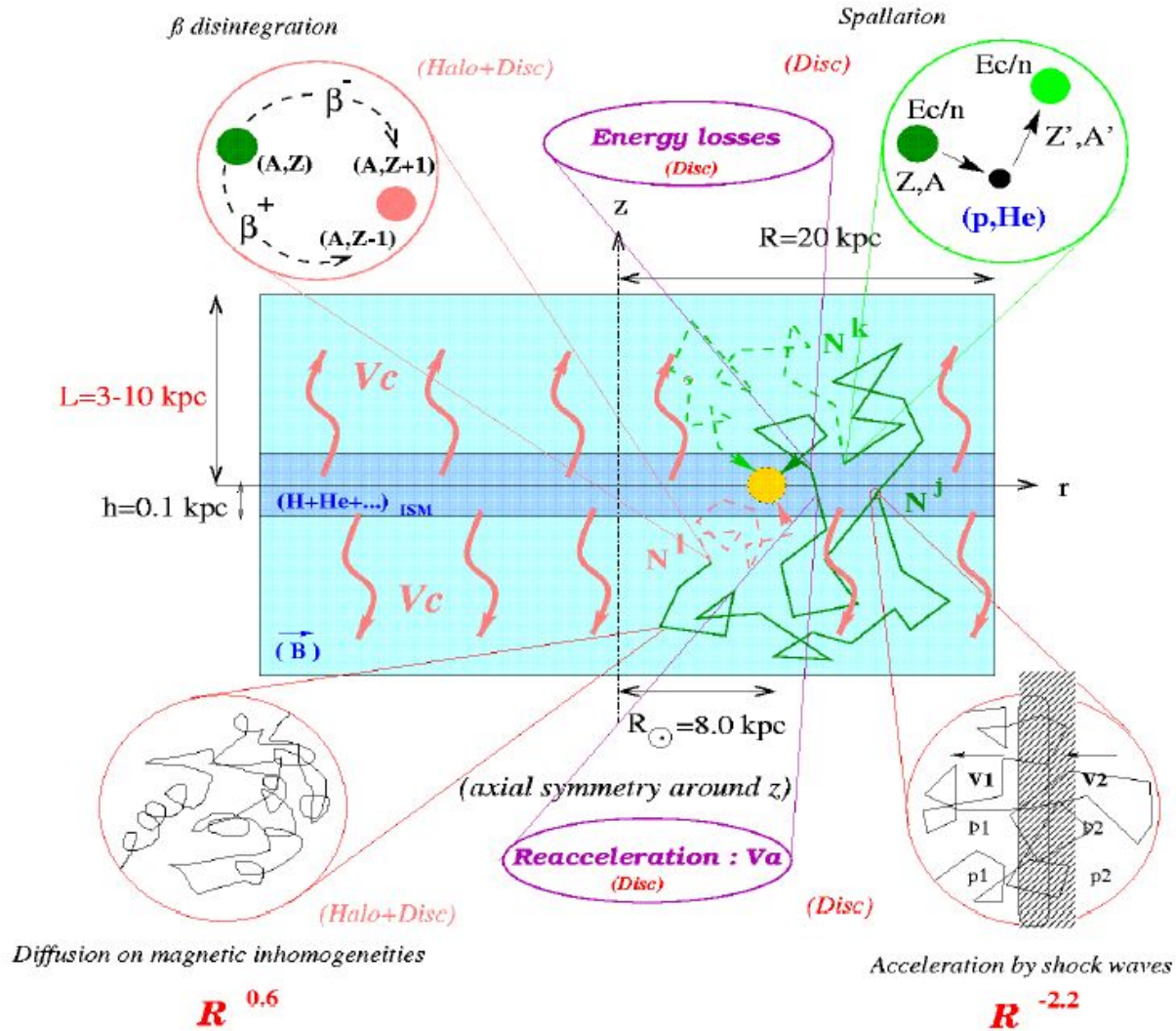
Cosmic Rays Propagation

The diagram illustrates the cosmic ray propagation equation, with various terms labeled as follows:

- Diffusion**: Points to the diffusion term $\nabla \cdot (D_i \nabla N_i)$.
- E loss or gain**: Points to the energy loss/gain term $-\frac{\partial}{\partial E} [b_i(E) N_i(E)]$.
- Convection**: Points to the convection term $-\nabla \cdot \mathbf{u} N_i(E)$.
- Cascade**: Points to the cascade term $+\frac{v\rho}{m} \sum_{k \geq i} \int \frac{d\sigma_{i,k}(E, E')}{dE} N_k(E') dE'$.
- Losses**: Points to the loss term $-p_i N_i$.
- Source**: Points to the source term $+Q_i(E, t)$.

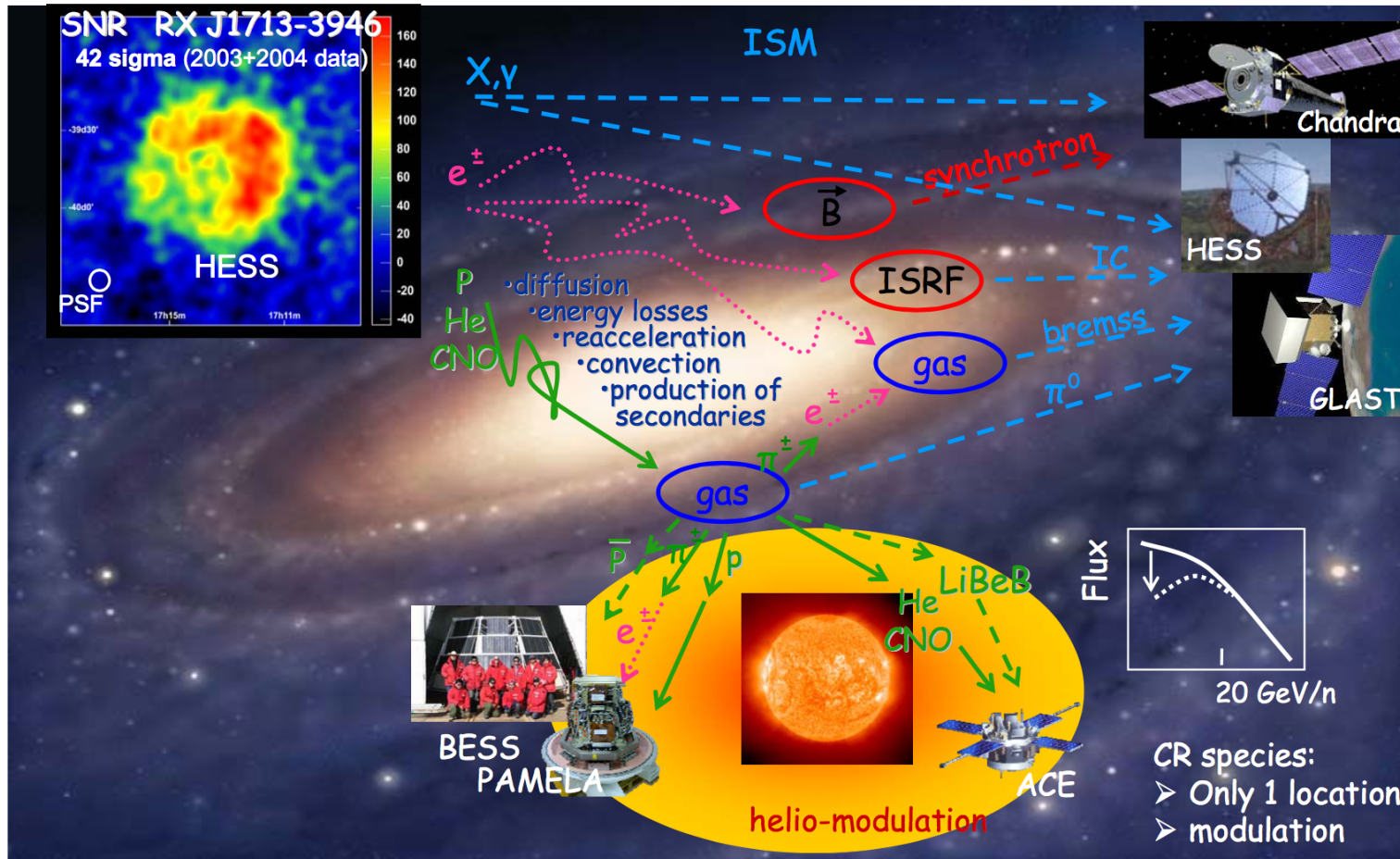
$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = \nabla \cdot (D_i \nabla N_i) - \frac{\partial}{\partial E} [b_i(E) N_i(E)] - \nabla \cdot \mathbf{u} N_i(E) + Q_i(E, t) - p_i N_i + \frac{v\rho}{m} \sum_{k \geq i} \int \frac{d\sigma_{i,k}(E, E')}{dE} N_k(E') dE'$$

Cosmic Rays Propagation



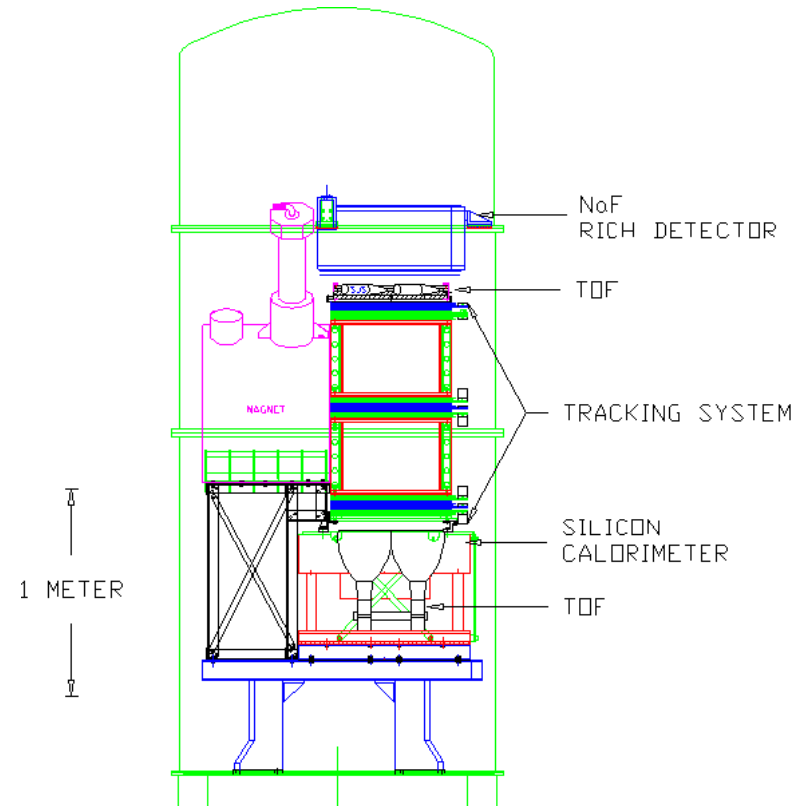
Cosmic Rays Propagation

CR Interactions in the Interstellar Medium



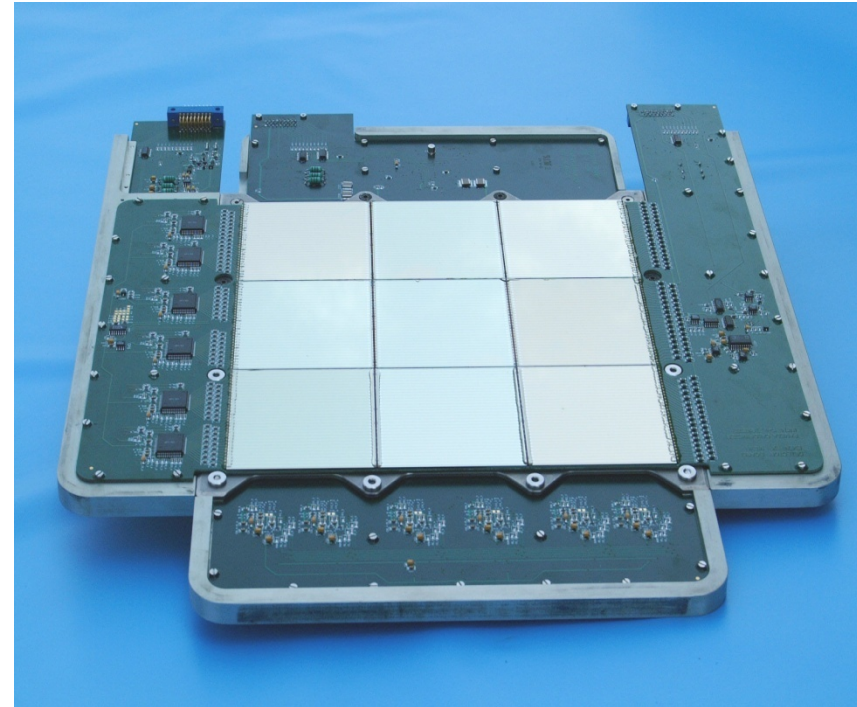
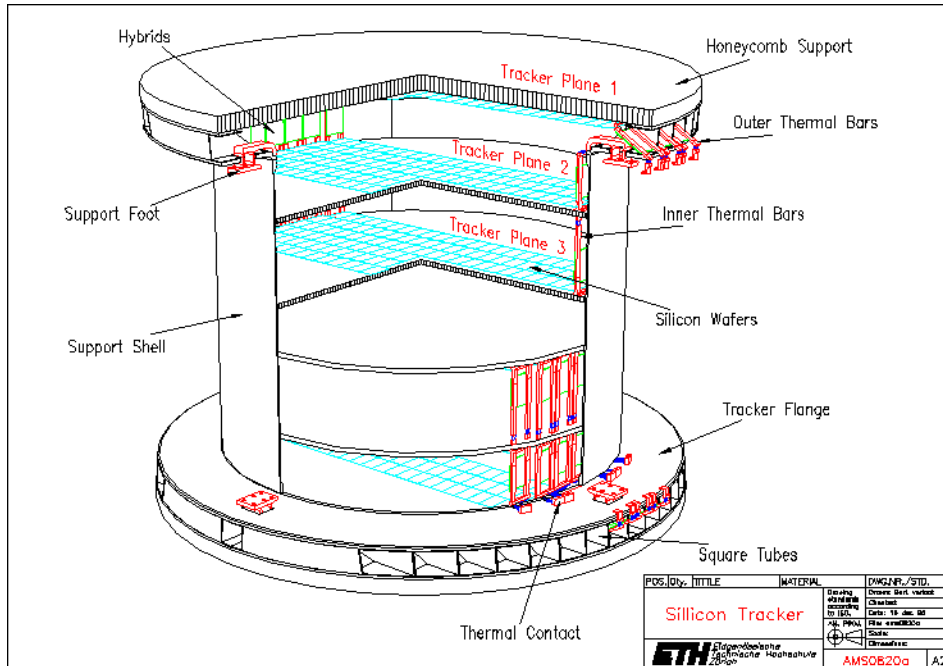
Esperimenti per misure dirette di RC

CR detectors



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

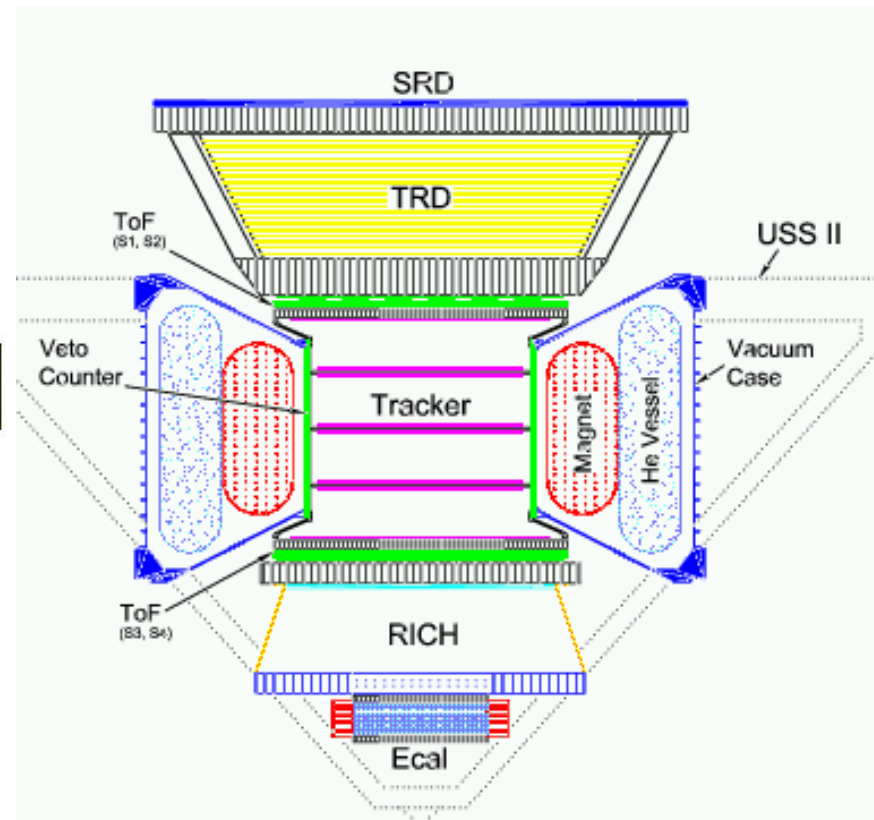
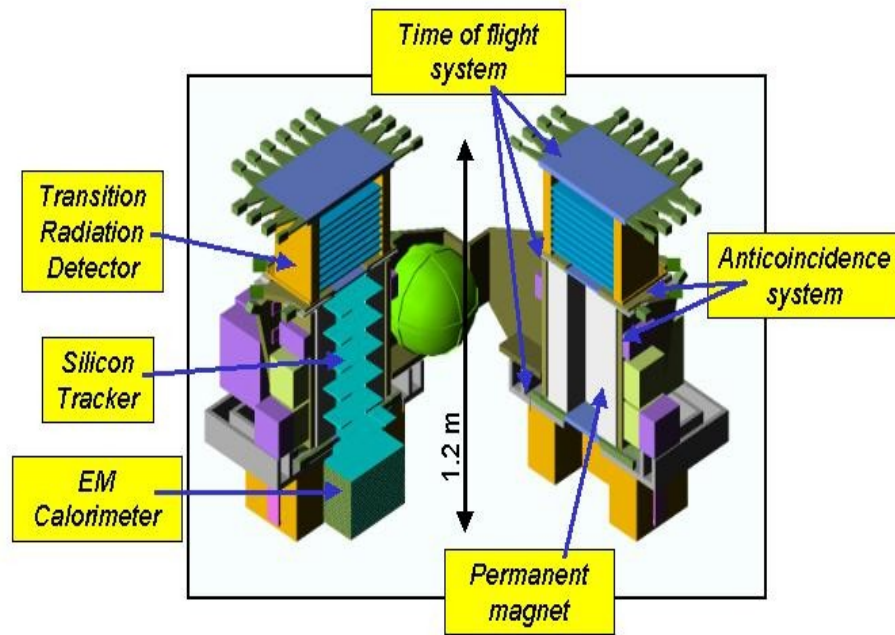
CR detectors



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,

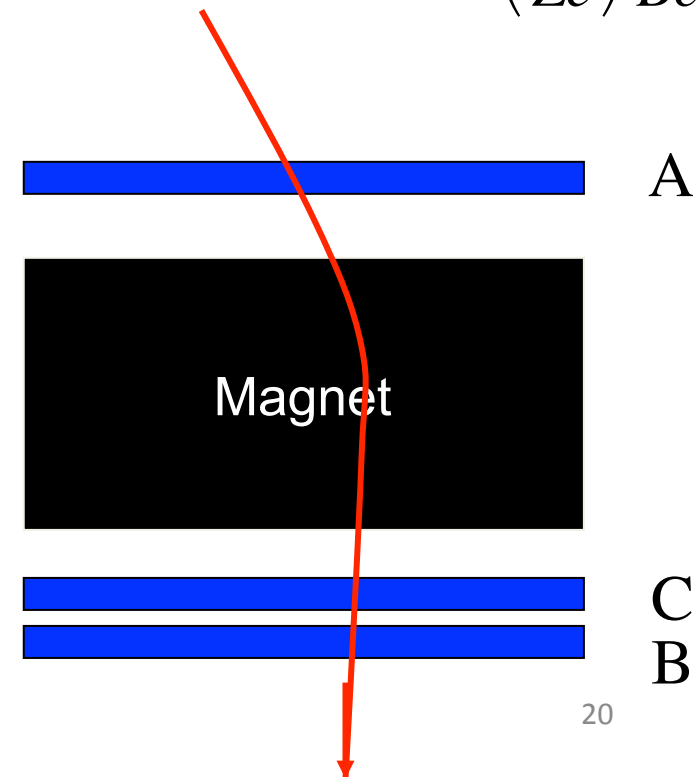
CR detectors



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.

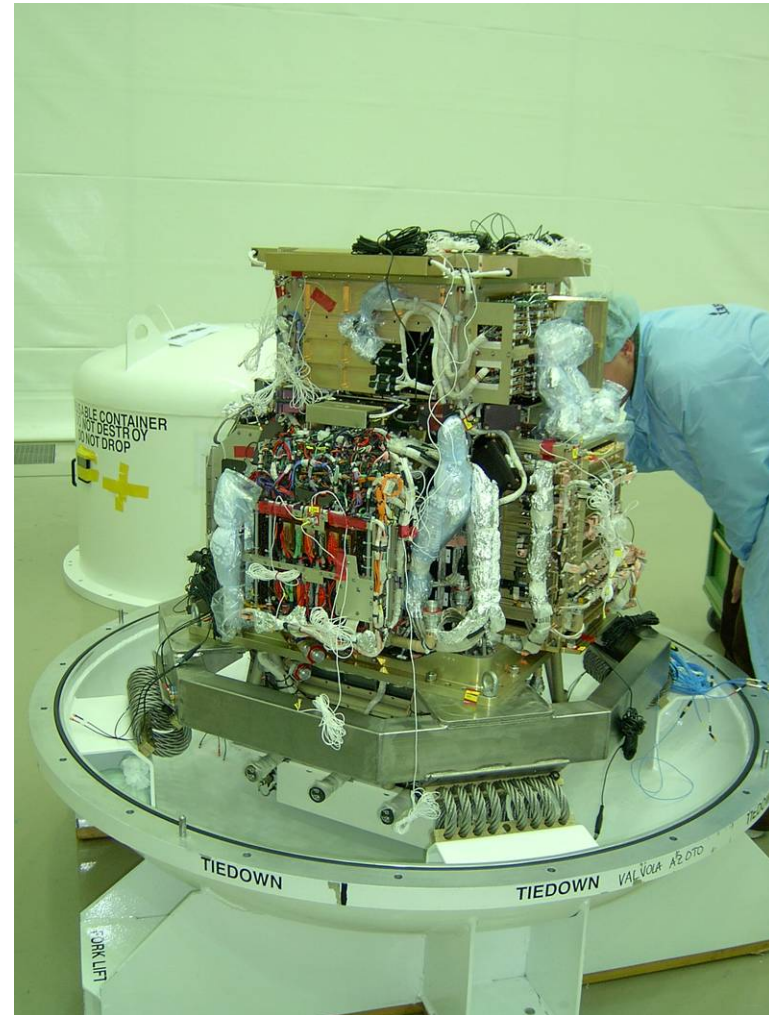
PAMELA

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

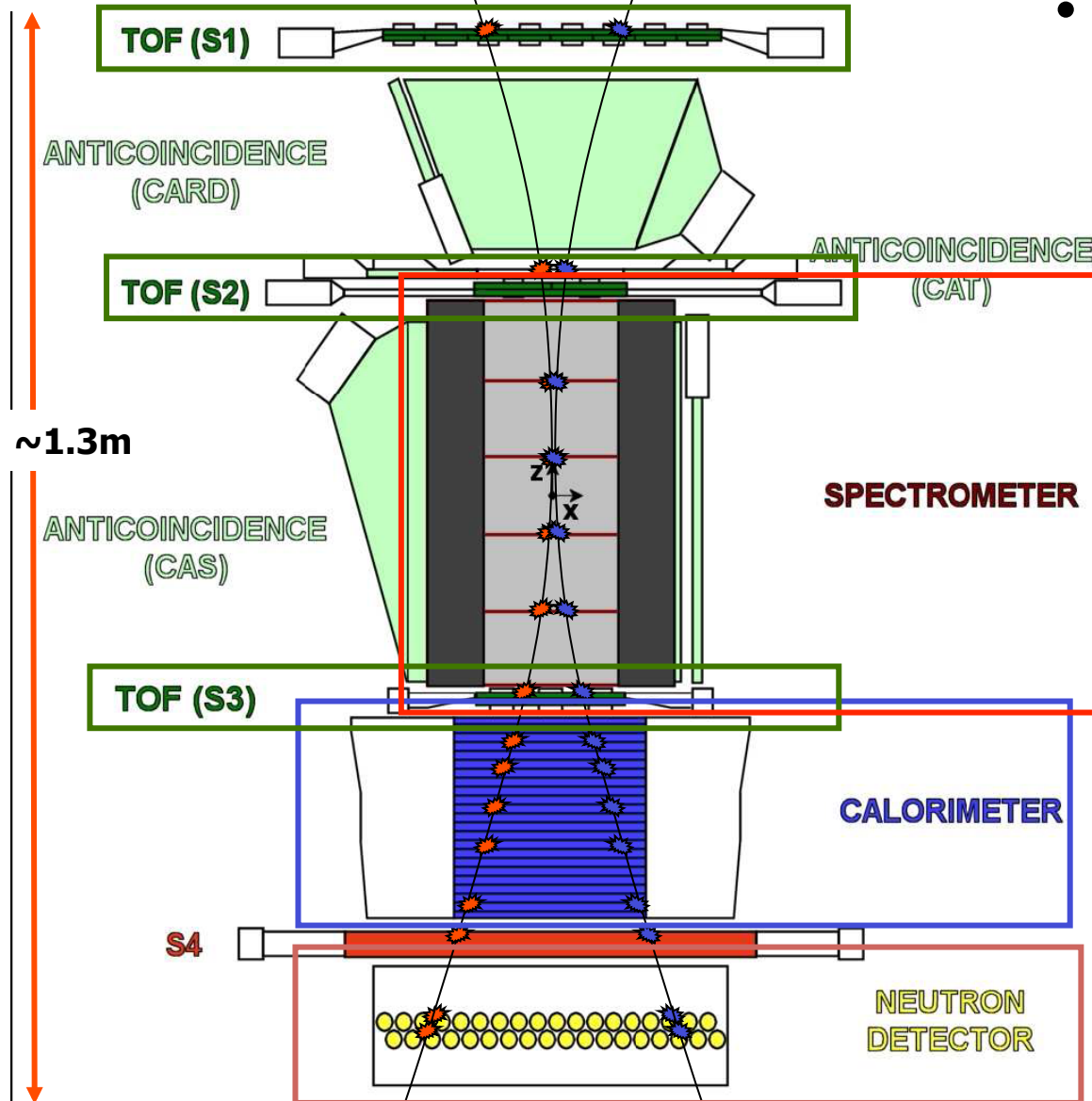


PAMELA

- 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**.

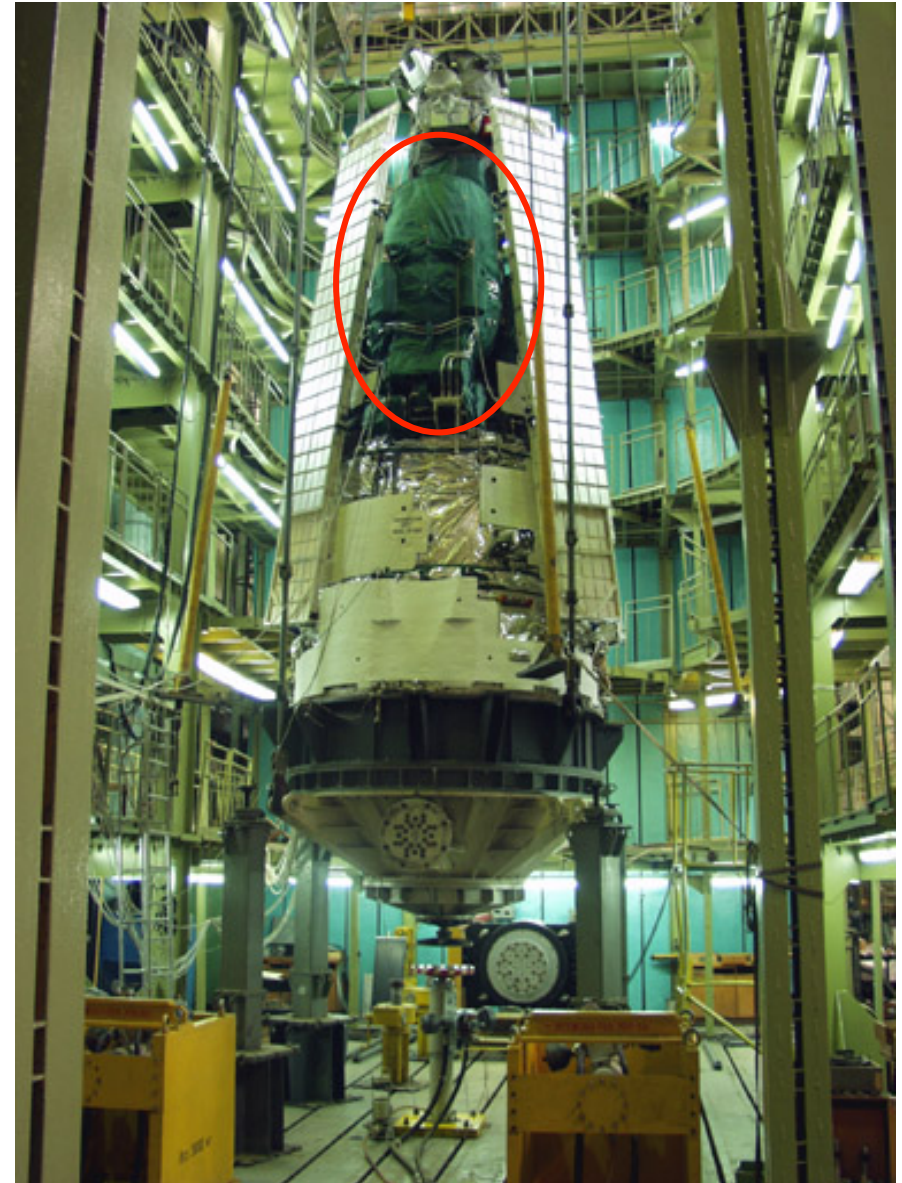
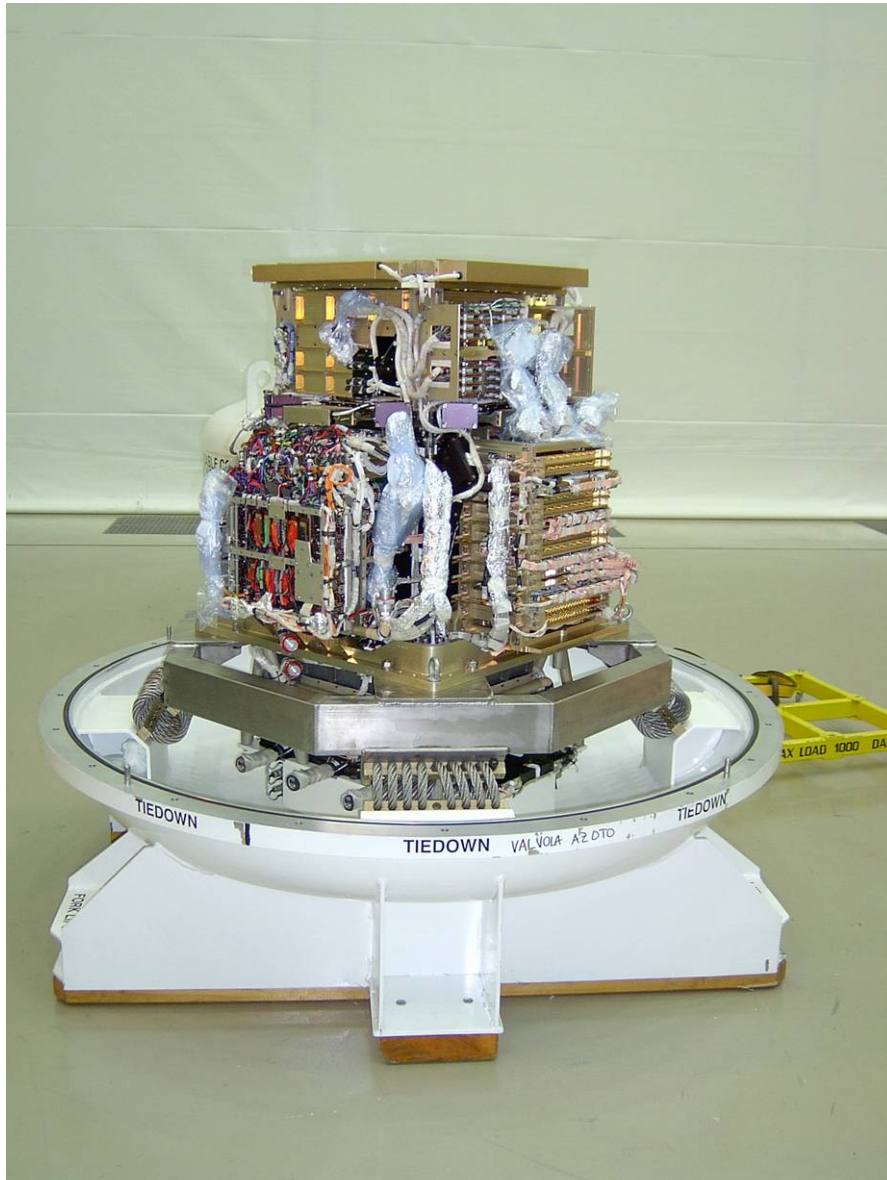


PAMELA



- Identificazione di particelle usando:
 - TOF
 - Calorimetro
 - Rivelatore di neutroni (basato sulla cattura da parte di ^3He 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

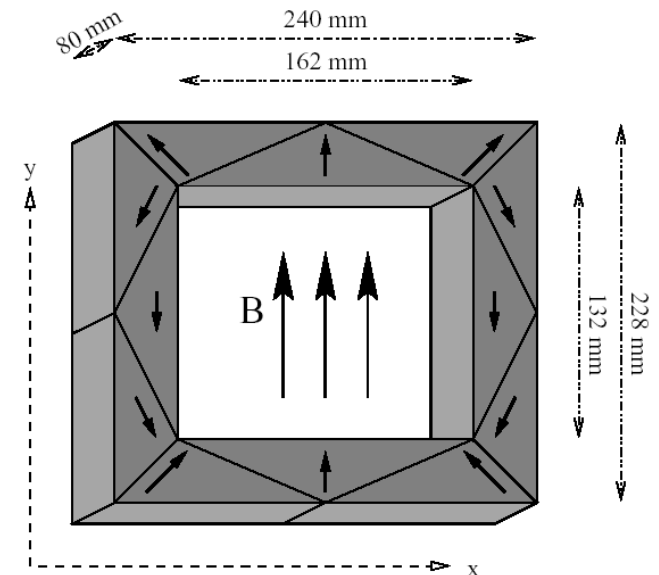
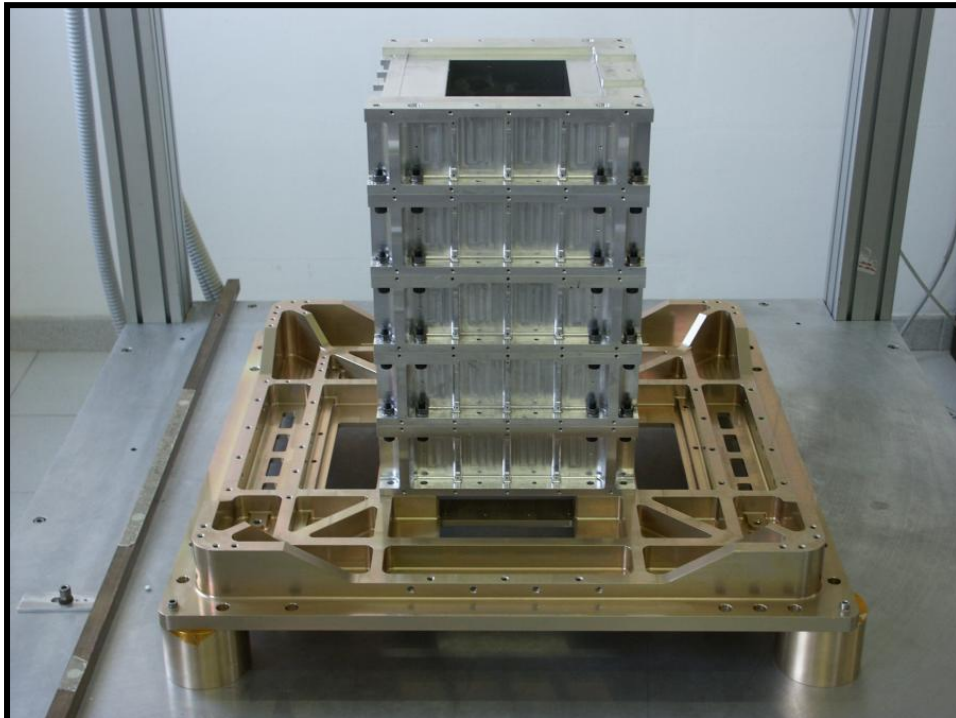


Lo Spettrometro Magnetico

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

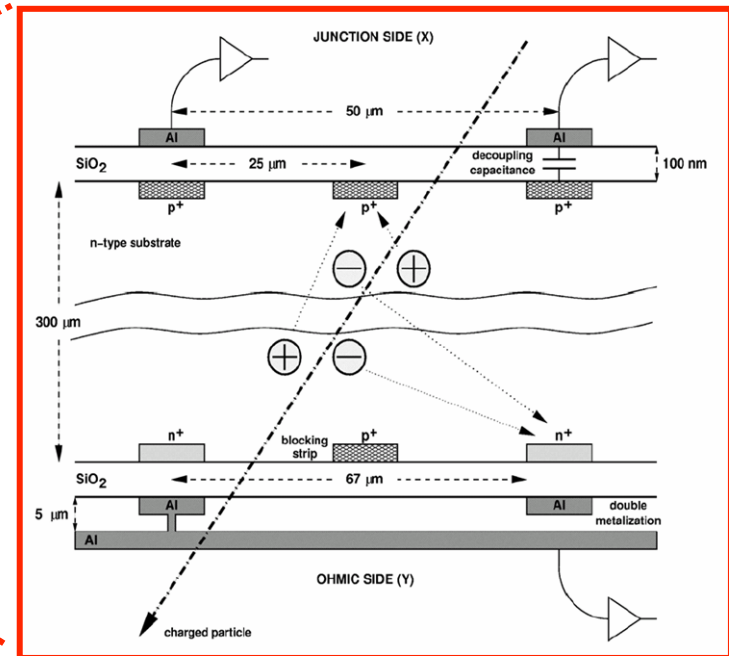
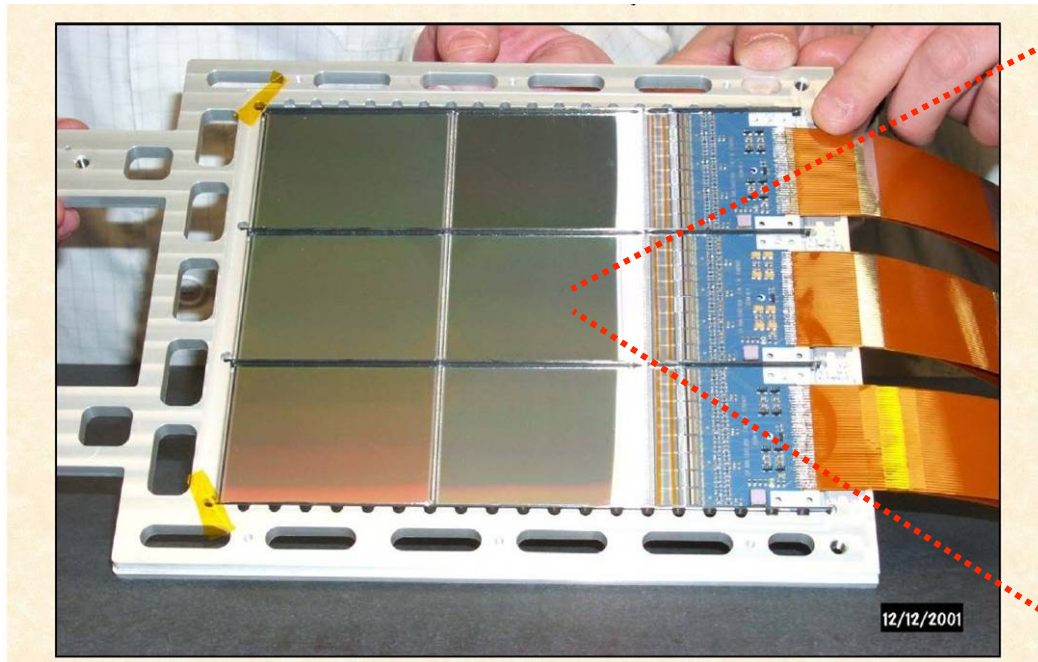
- Magnete Permanente

- 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 μm thick):
 - 25 μm implantation pitch (junction side) / 67 μm (ohmic side)
 - Strips mutually orthogonal on opposite sides
 - Readout pitch 50 μm

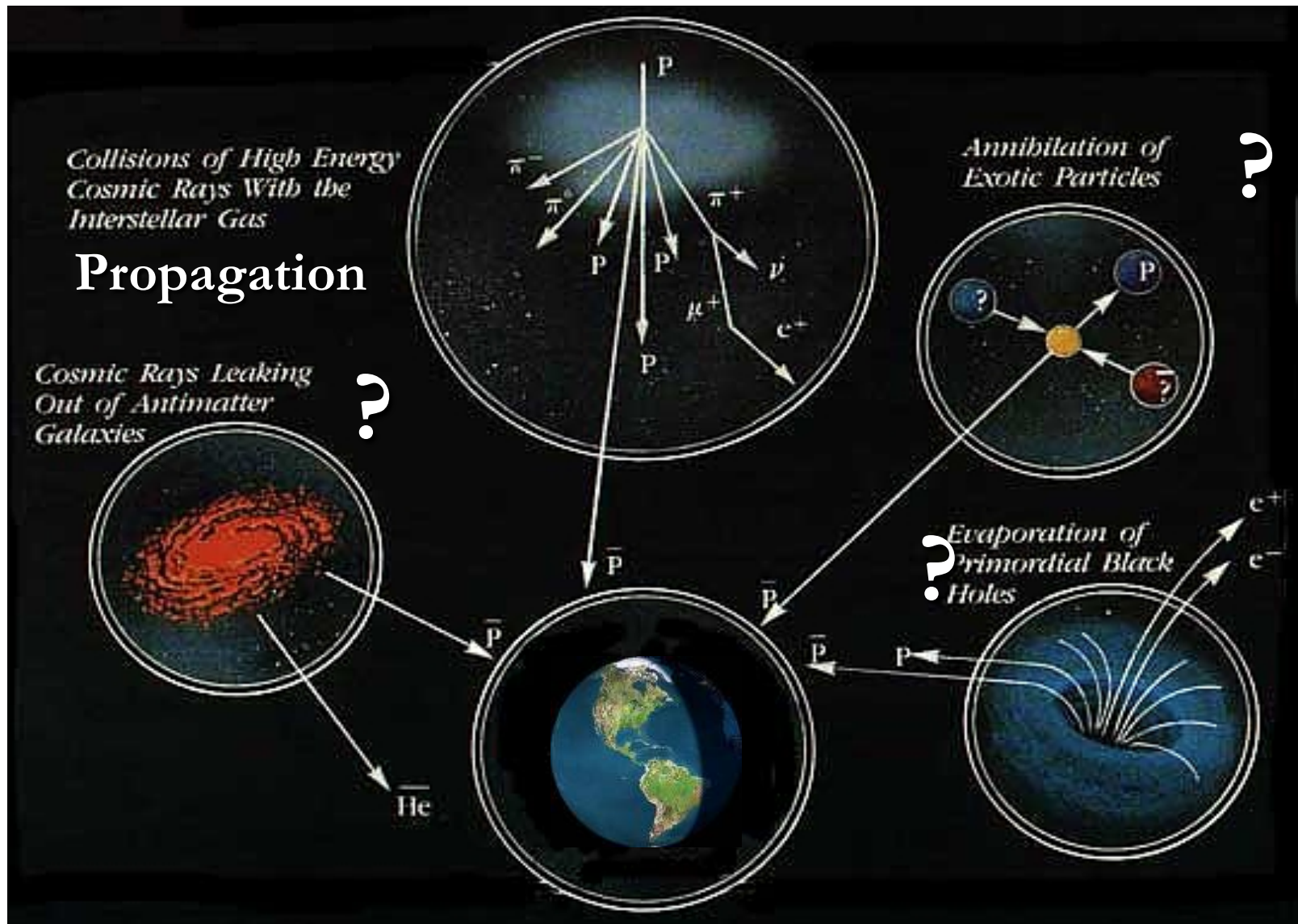


Calorimetro Elettromagnetico

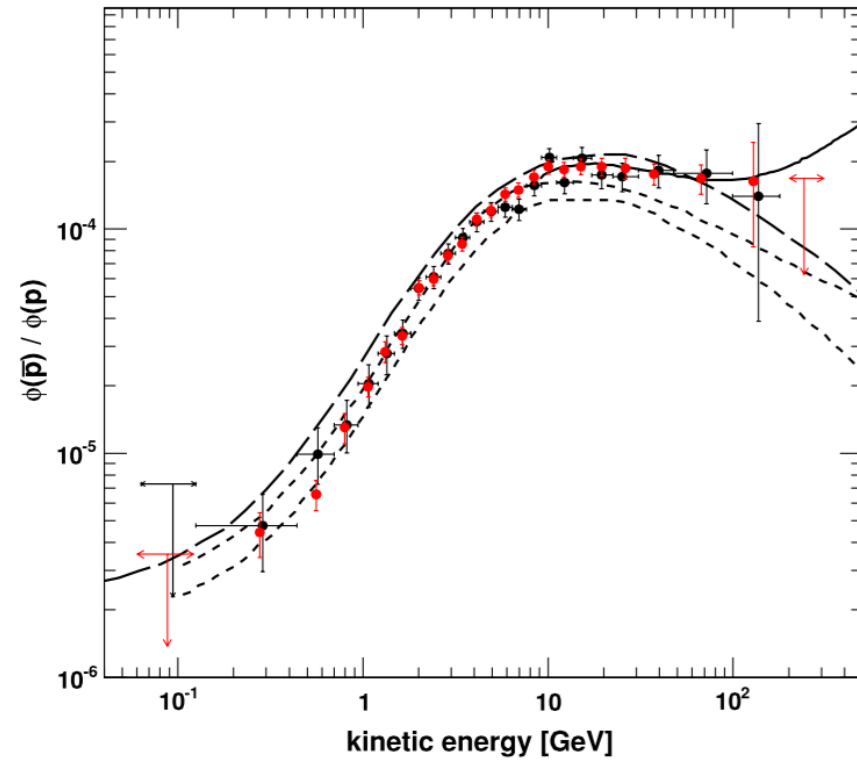
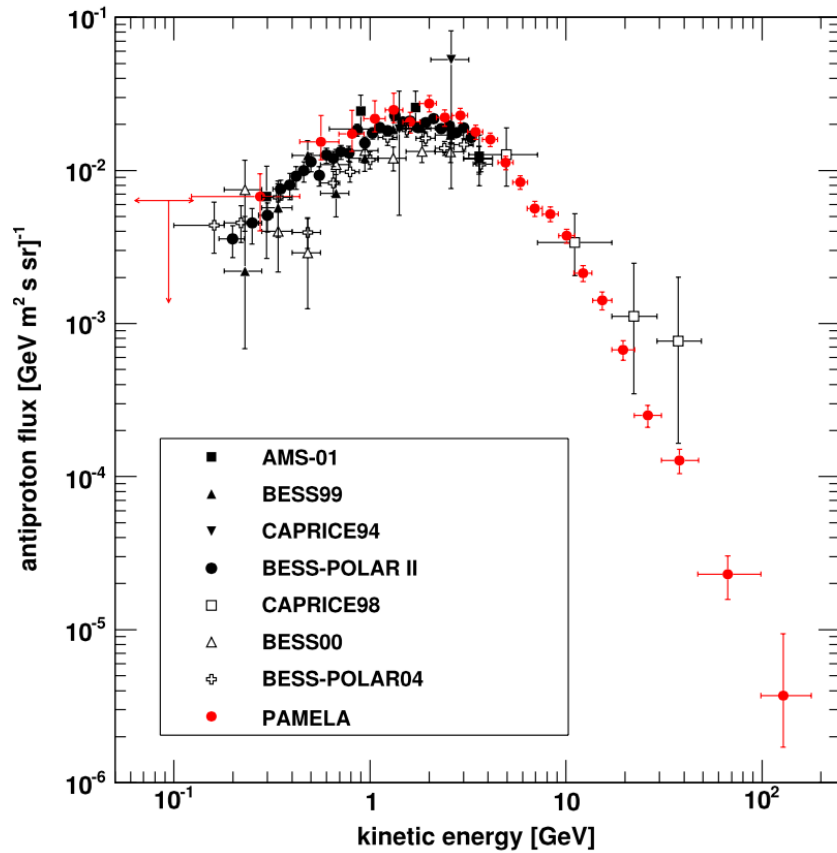
- 44 single-sided silicon sensor planes (380 μm thick) interleaved with 22 plates of tungsten absorber for a total depth of 16.3 X0 (0.6 nuclear interaction lengths).
- A self-trigger system was implemented in the calorimeter read-out electronics to measure high-energy electrons



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

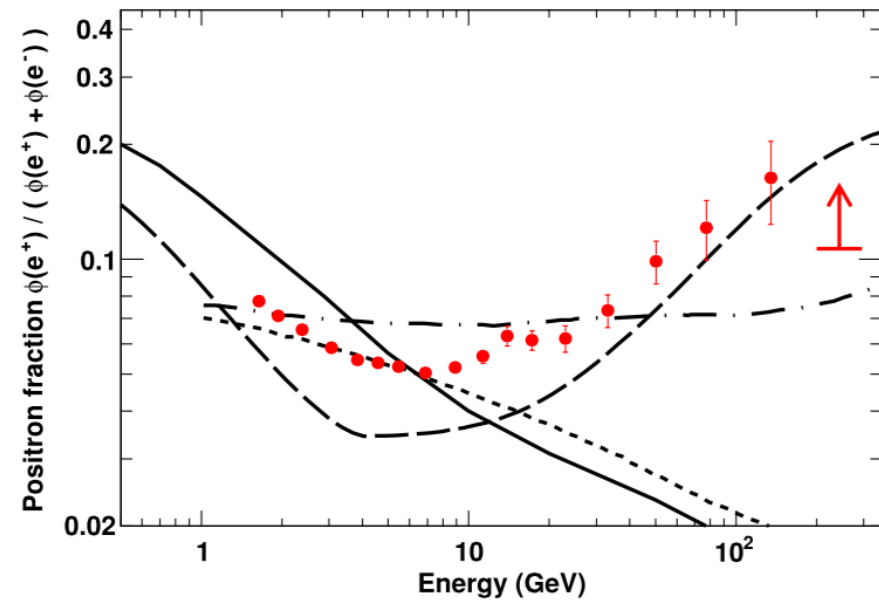
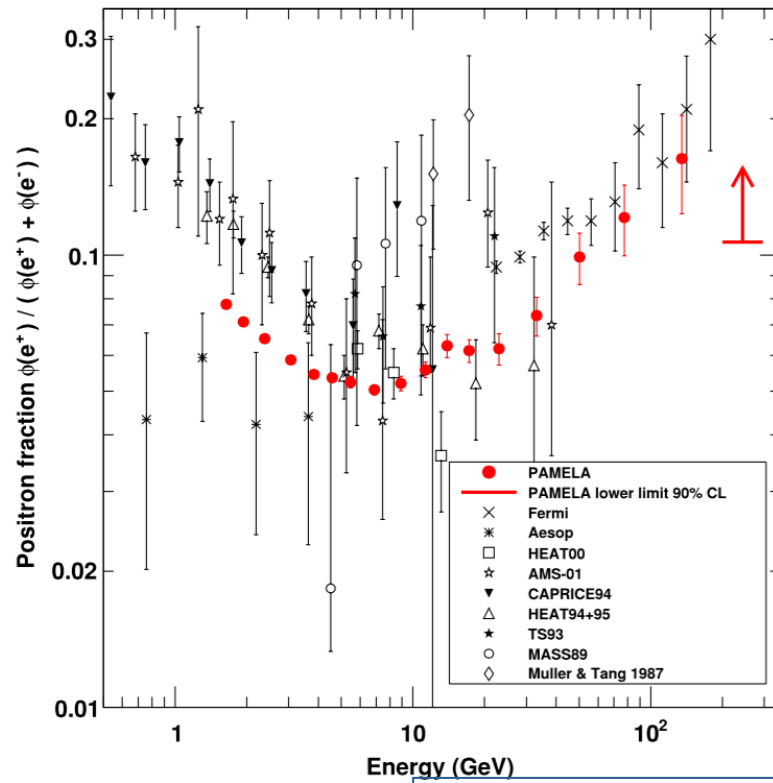


Antiprotons



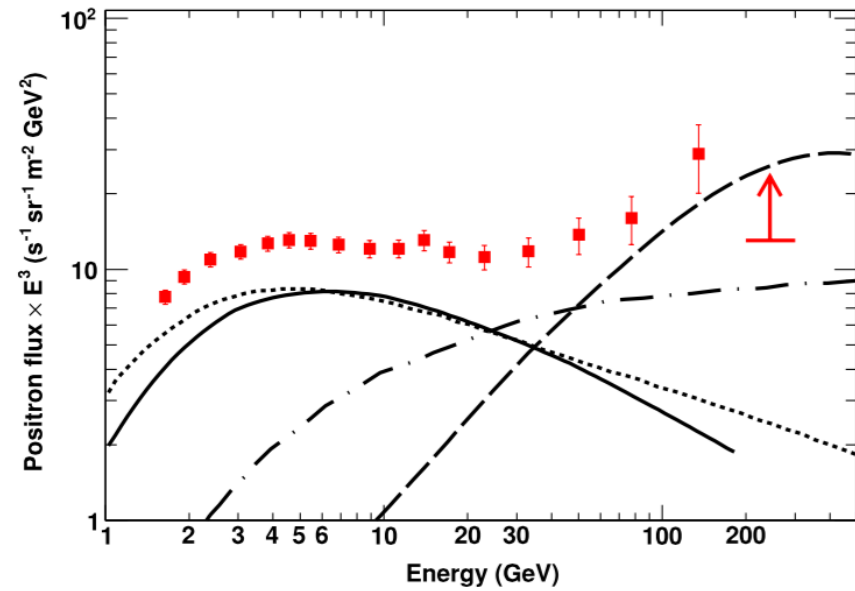
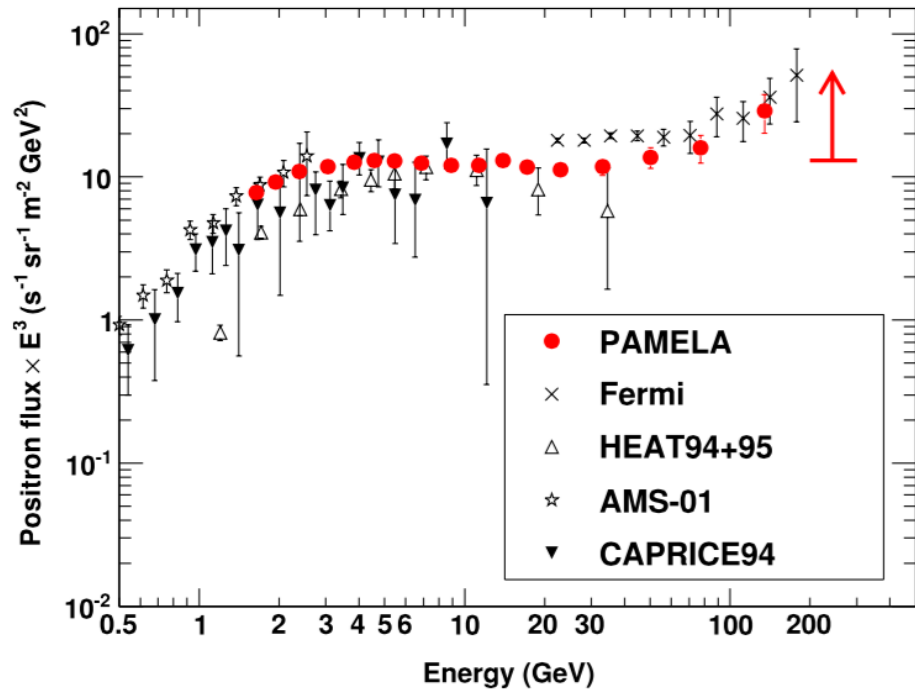
O. Adriani et al. Physics reports 544 (2014)

Positrons



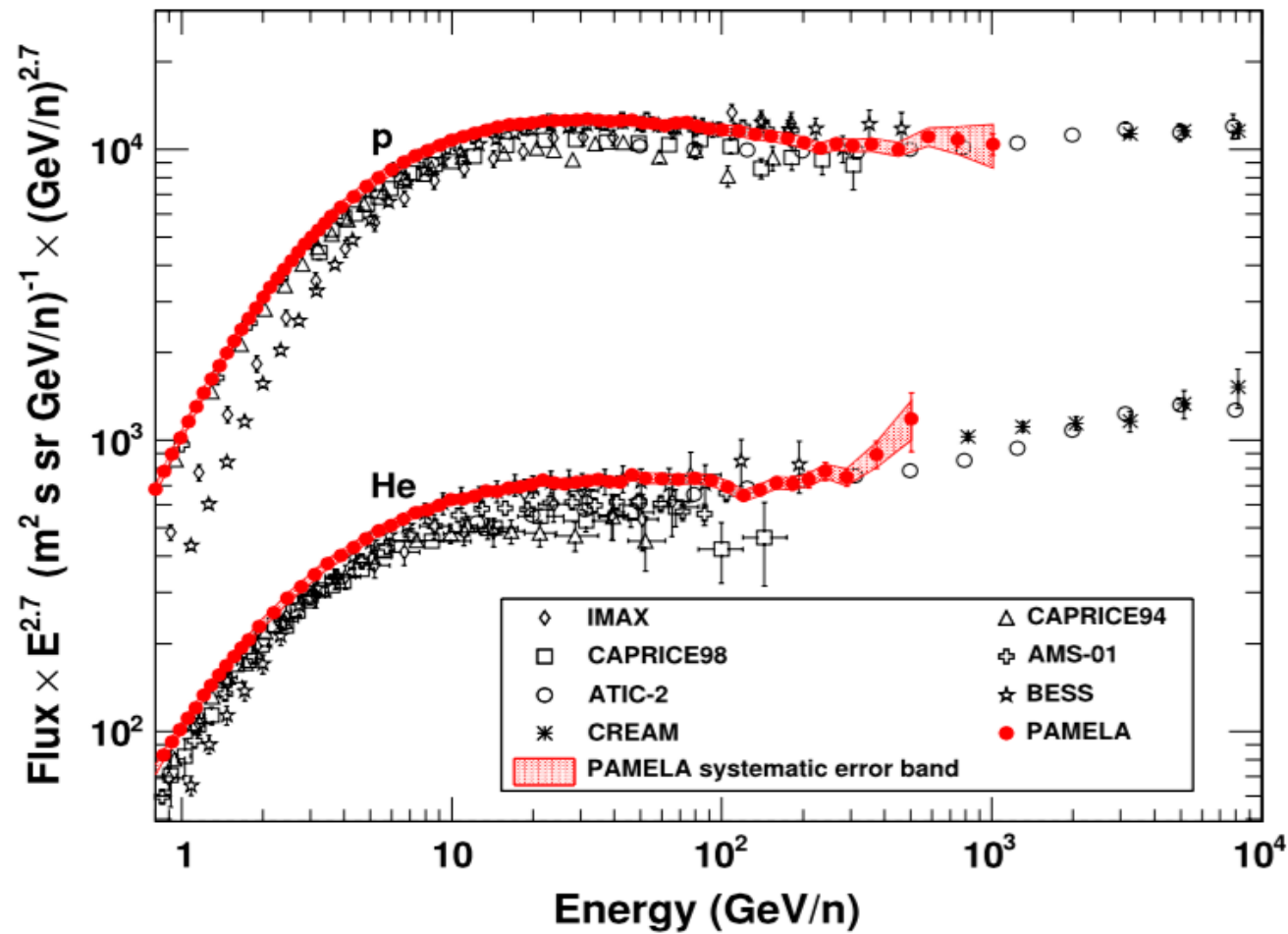
O. Adriani et al. Physics reports 544 (2014)

Positrons



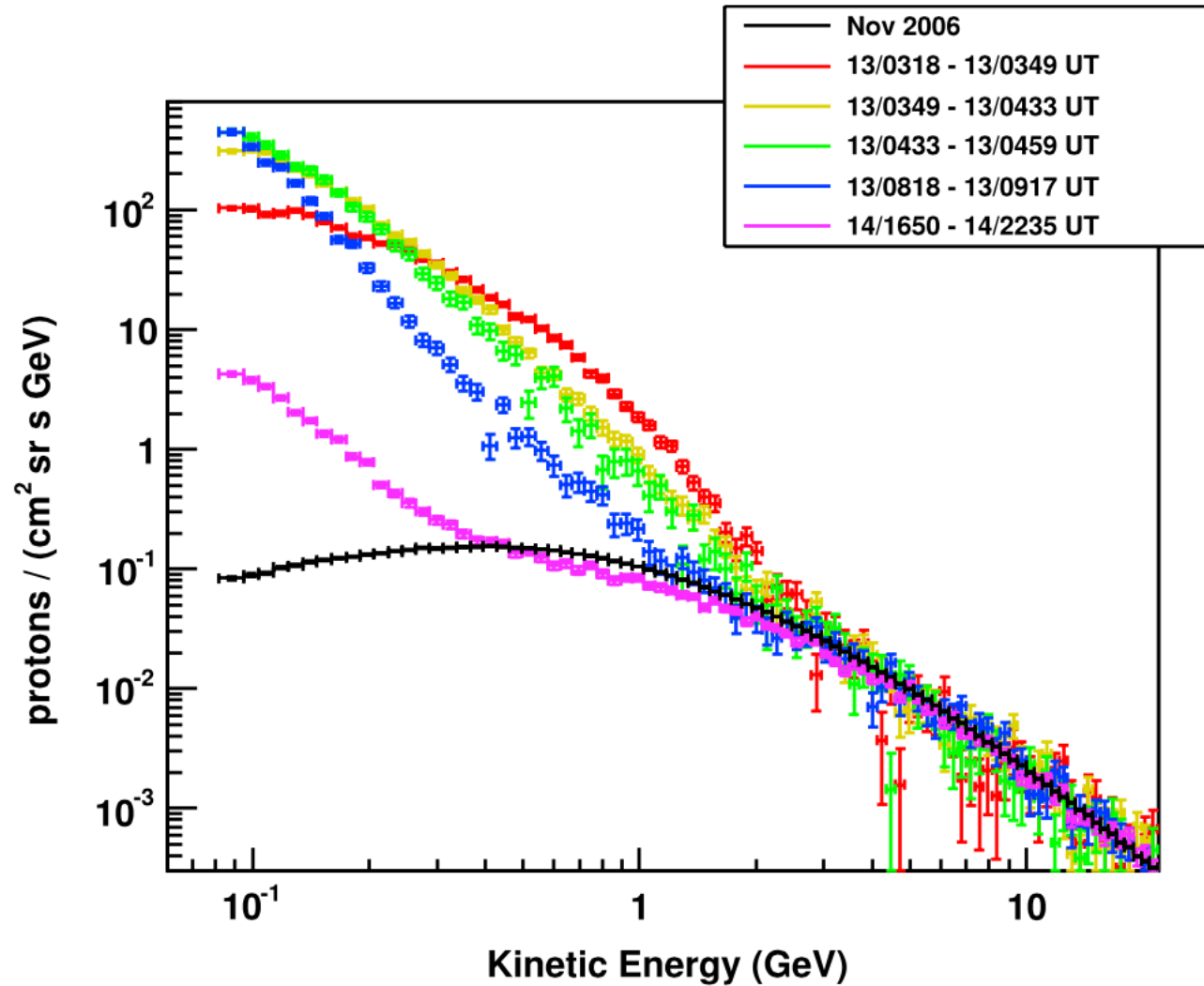
O. Adriani et al. Physics reports 544 (2014)

Galactic Cosmic Rays



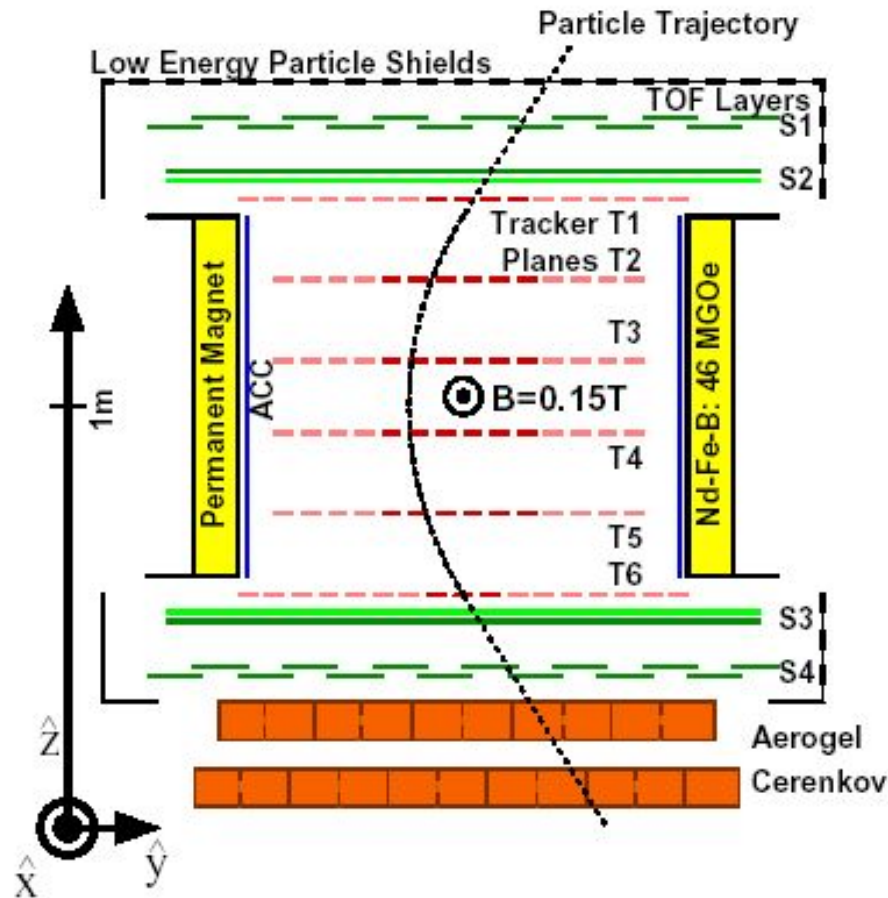
O. Adriani et al. Physics reports 544 (2014)

Solar events



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

AMS01



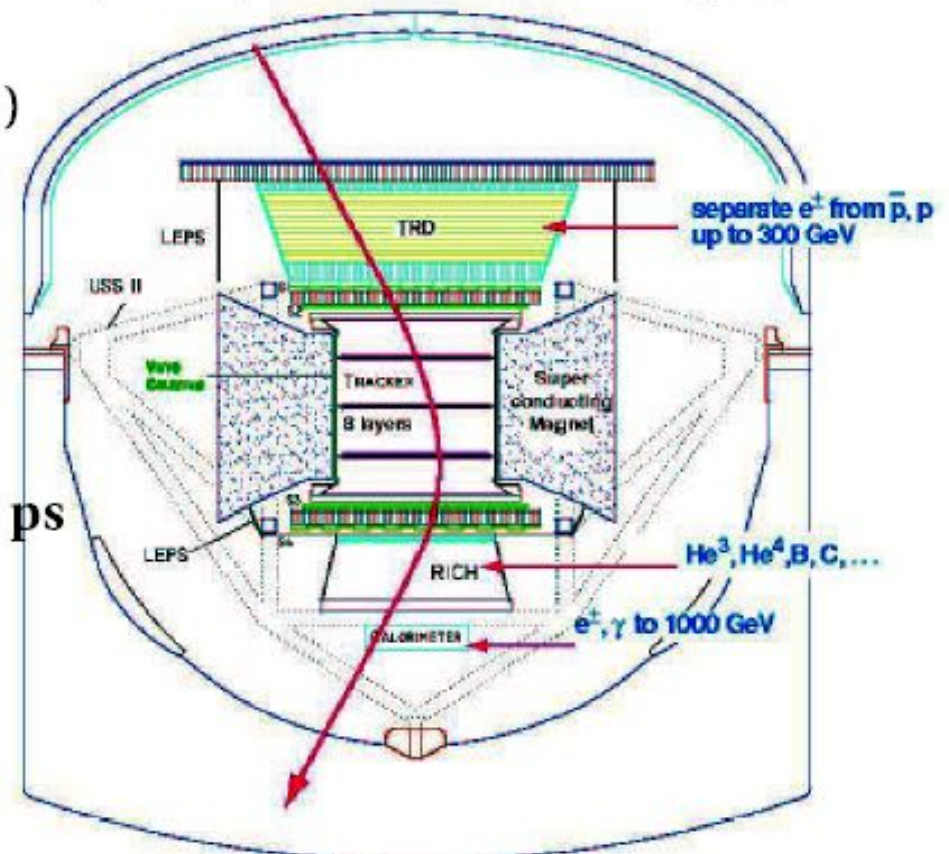
- ◆ **Magnet** : 1024 blocks of $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$
- ◆ **TOF**: four planes of scintillators
 - velocity and Z measurement
- ◆ **Tracker**: six planes of DS Silicon Microstrip Detectors
 - Charge sign and Rigidity measurements
 - Z measurement up to Oxygen
- ◆ **Aerogel Threshold Cerenkov**
 - velocity measurement
- ◆ **Anticounters**
 - reject multi particle events

AMS is a Large Acceptance Magnetic Spectrometer for:

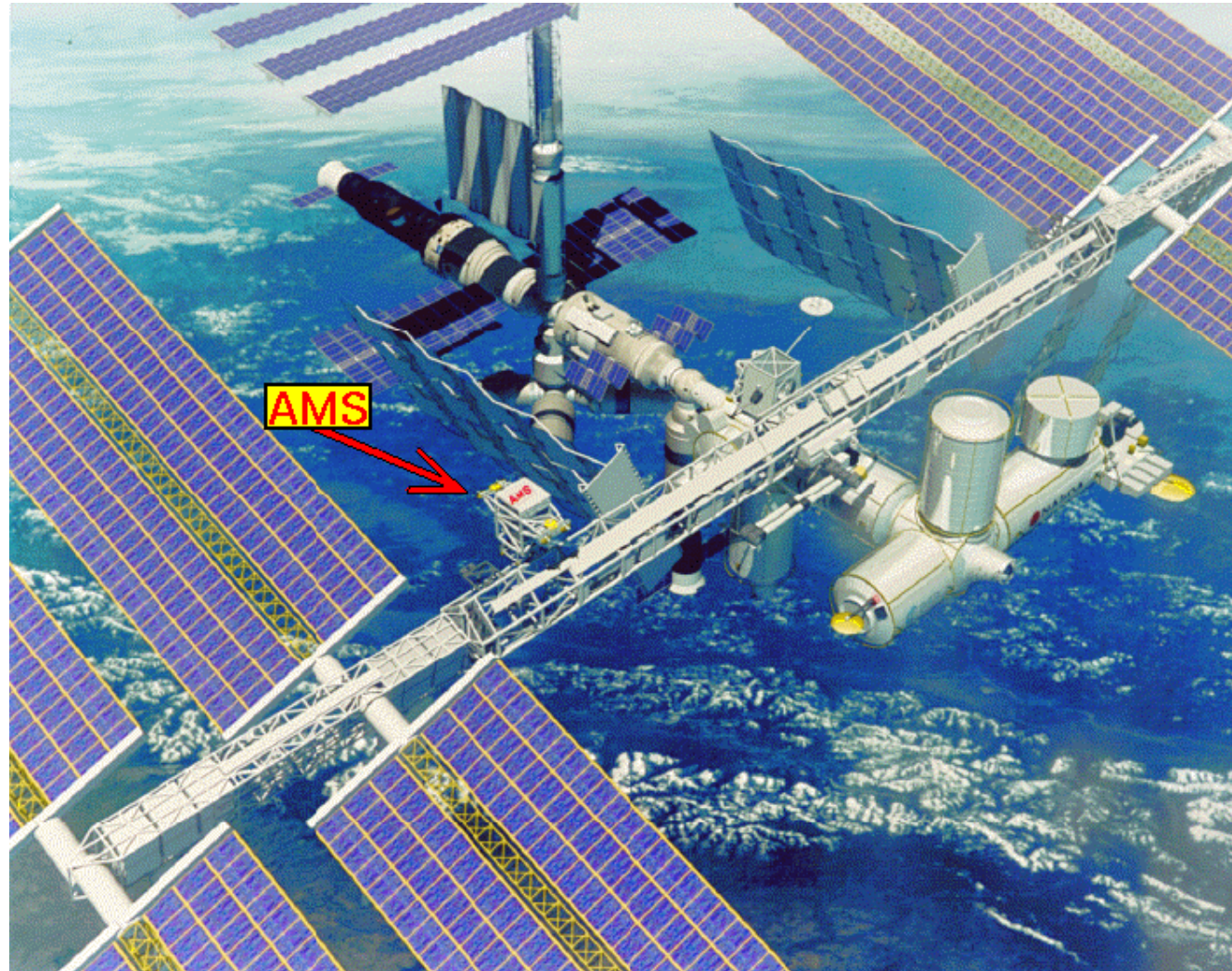
- Antimatter Search ($\overline{\text{He}}, \overline{\text{C}}$)
- Accurate measurements of Cosmic-ray composition and energy spectra
- Dark Matter Signatures ($e^+, \overline{p}, \overline{D}, \gamma$)

→ *High-energy γ -ray sky exploration*

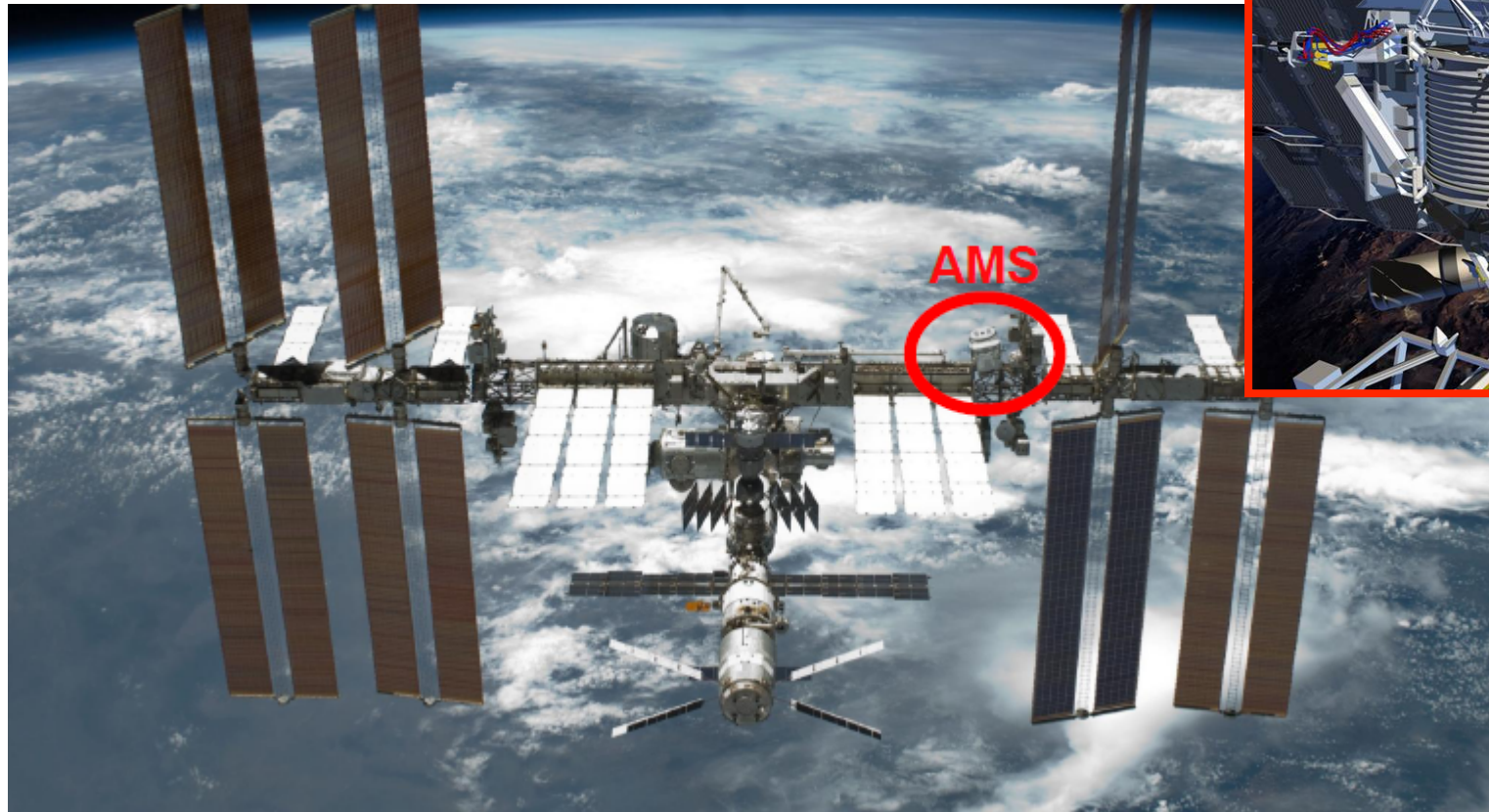
- Superconducting Magnet: **0.8 T**
- 4 layers of Scint. Counters (ToF): **120 ps**
- 8 layers Si-Tracker: **MDR 2 – 3 TeV**
- Gaseous TRD: **h/e $10^2 - 10^3$**
- Pb-Sci. ECAL: **h/e $O(10^3)$**
- Aerogel (1.05) RICH: **$\frac{d\beta}{\beta} = 0.07 - 1\%$**



AMS



Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) Experiment



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

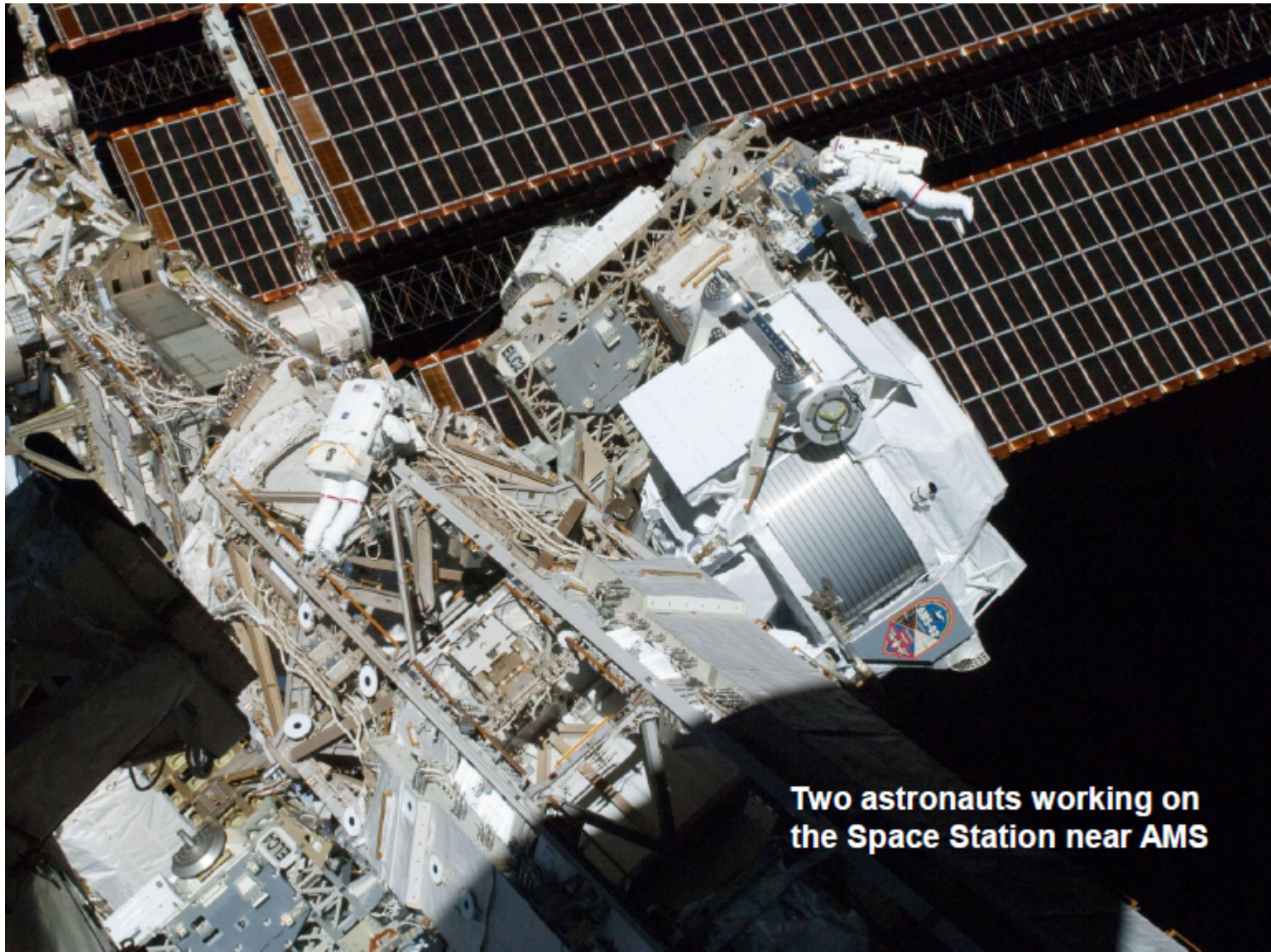
- *Inclination = 51.57°*
- *15.62 revolutions/day*

CR detectors

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

AMS Transfer to the Shuttle, 26 March 2011



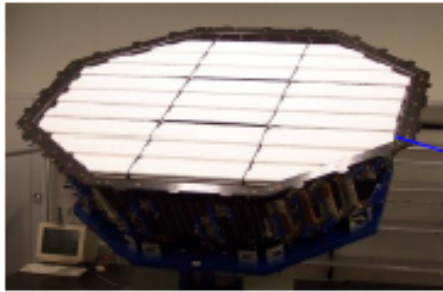


Two astronauts working on the Space Station near AMS

AMS features



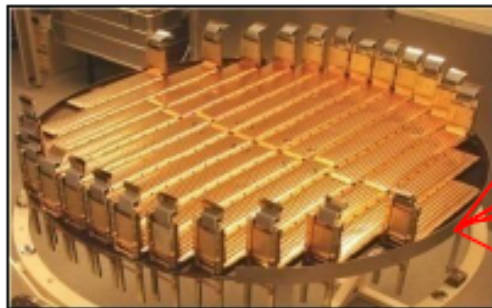
TRD



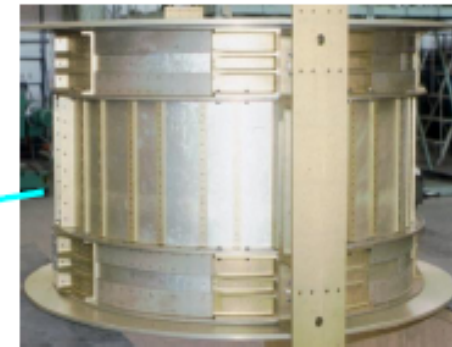
TOF



Silicon Tracker



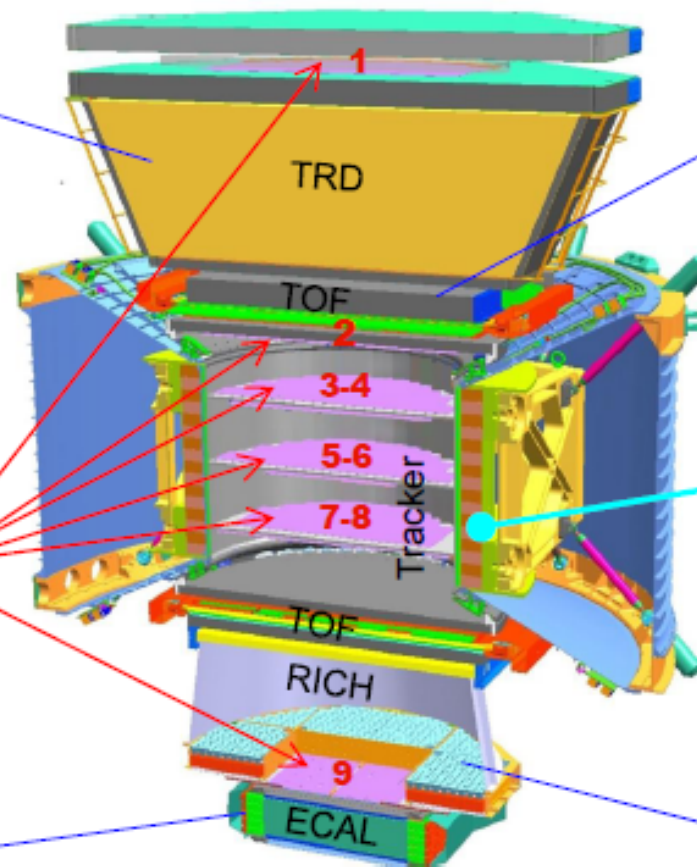
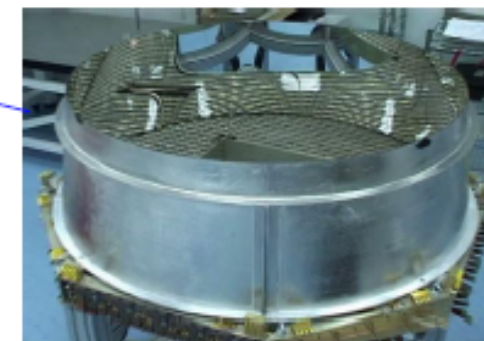
Magnet

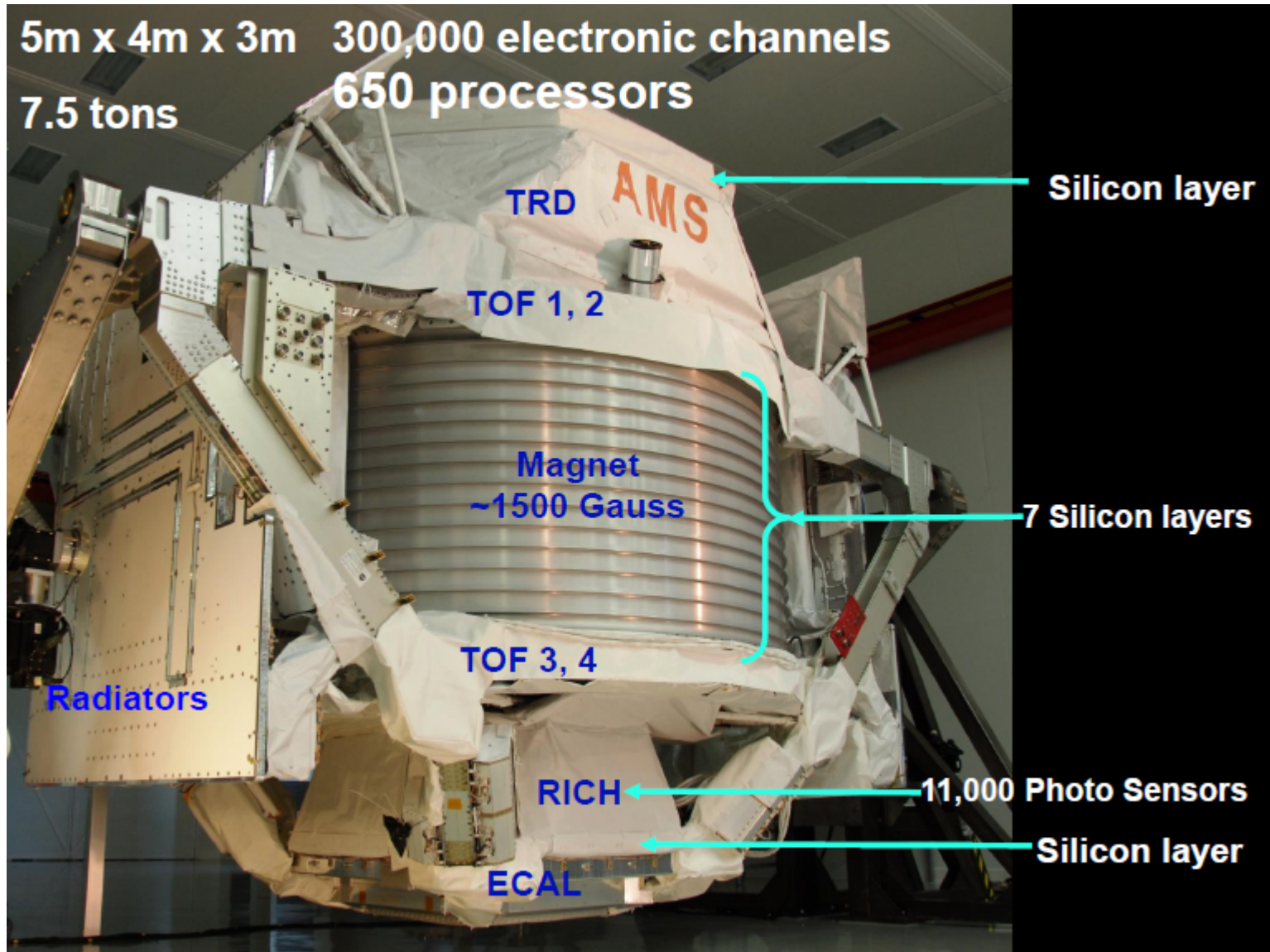


ECAL

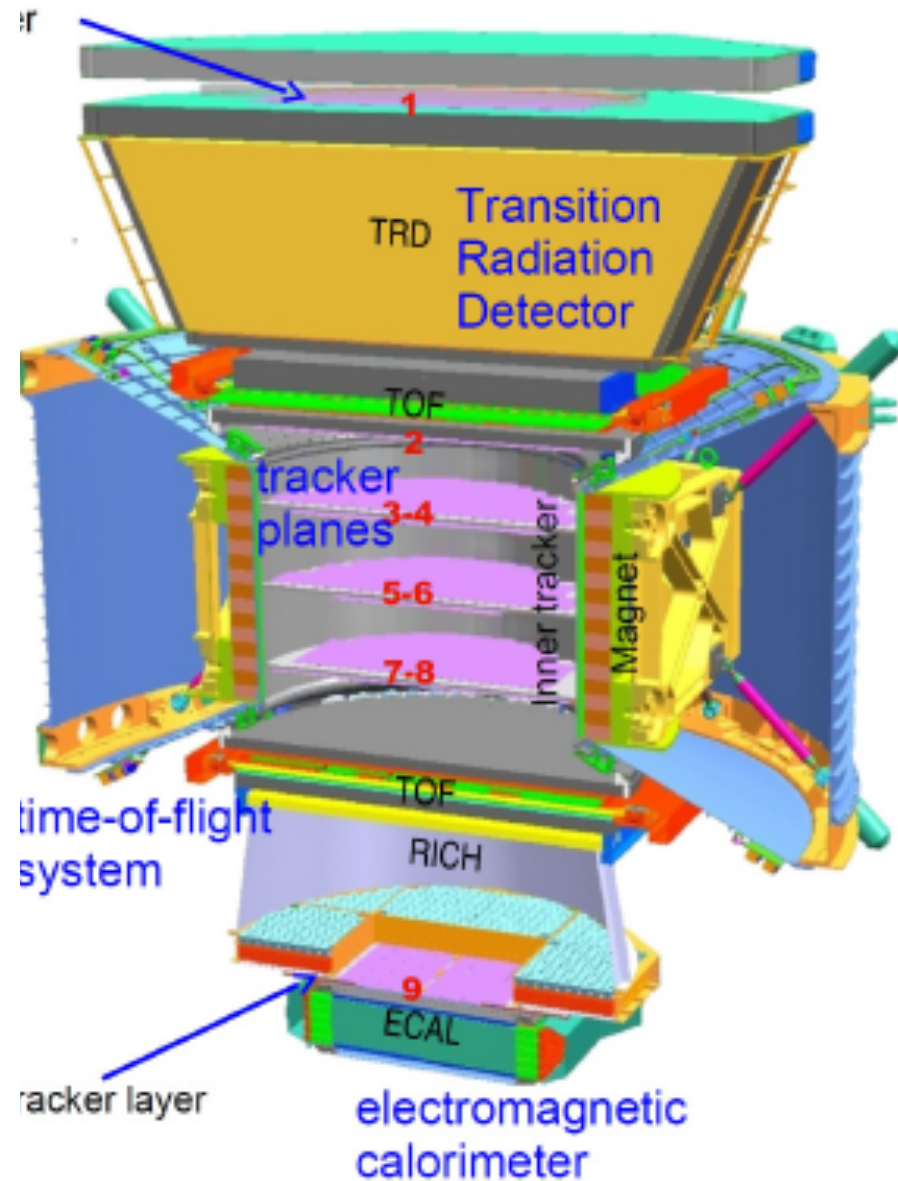


RICH





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.

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**

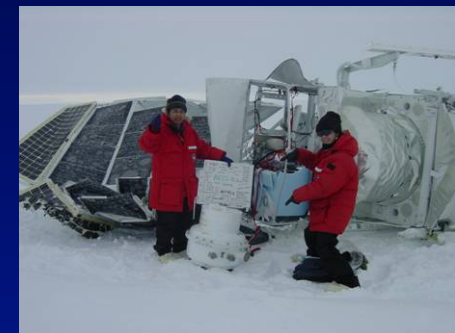
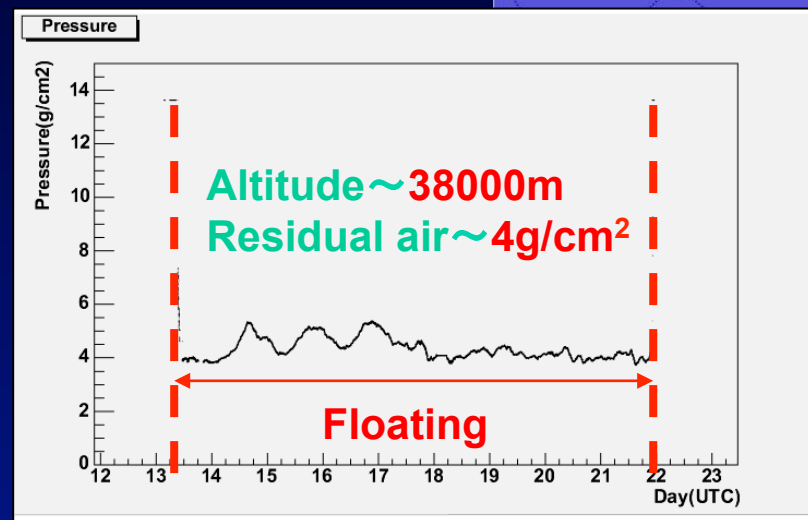
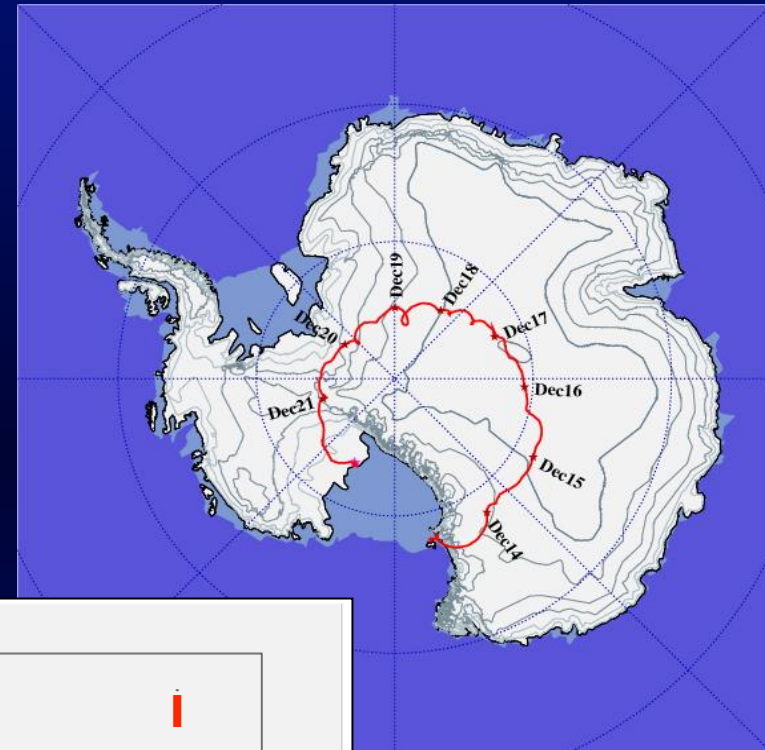
antiproton: Novel primary origins (PBH,DM)

antihelium: Asymmetry of matter/antimatter

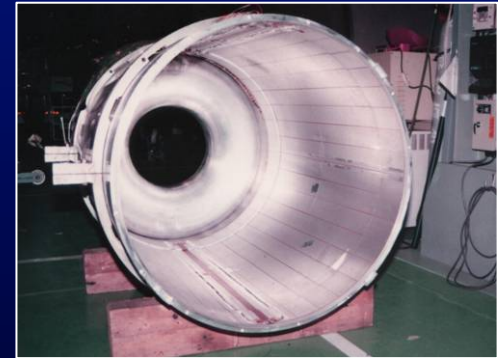
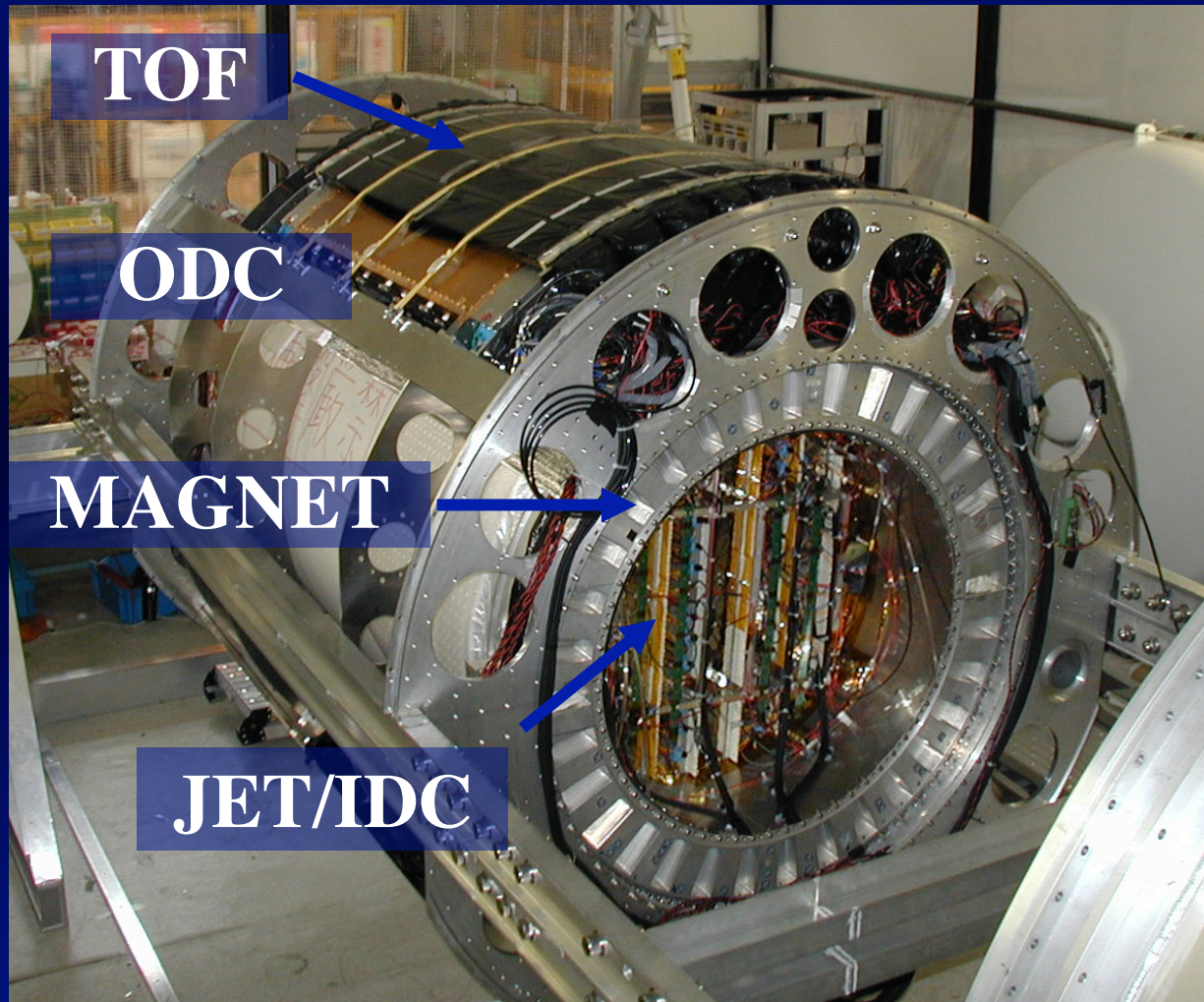
Precise Measurement of Cosmic-ray flux:
highly precise measurement at < 1 TeV

BESS-Polar 2004

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



BESS-TeV Spectrometer



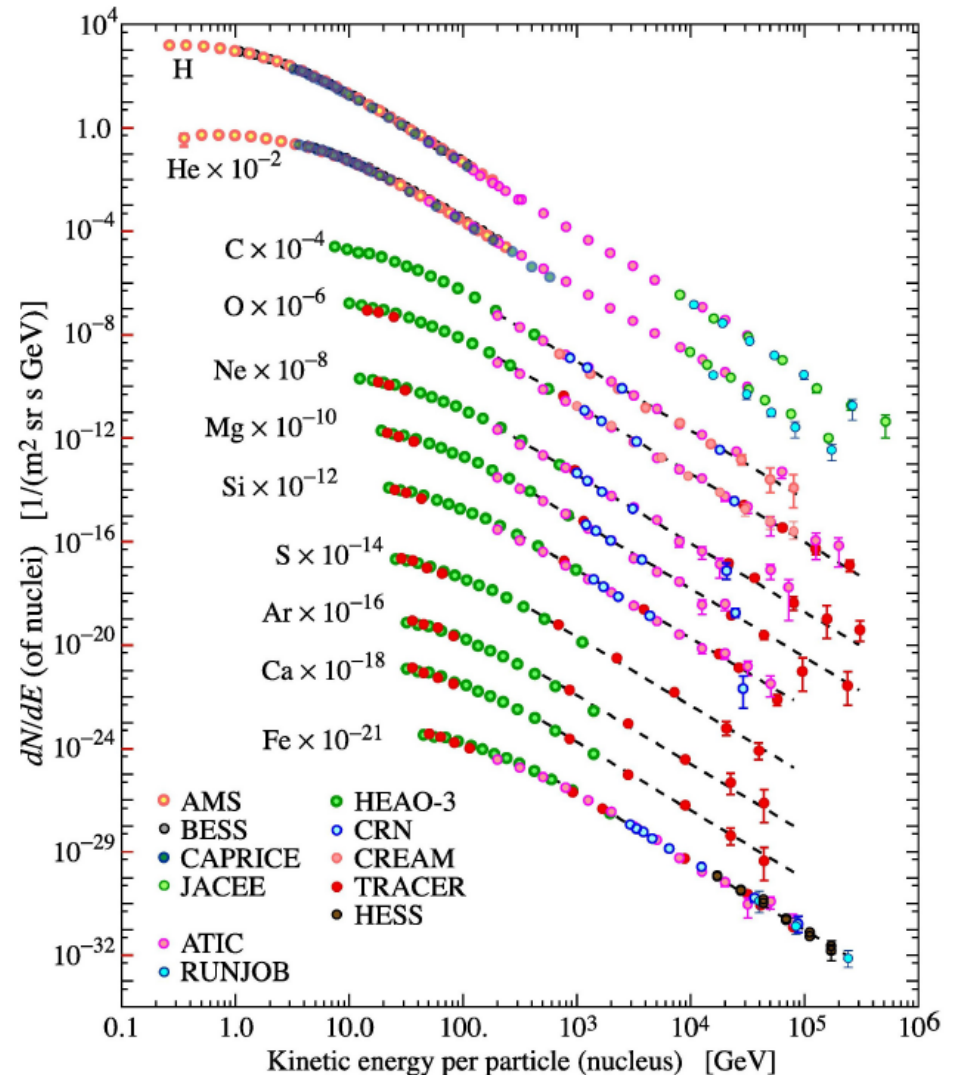
Risultati sulle misure dirette: protoni e nuclei

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

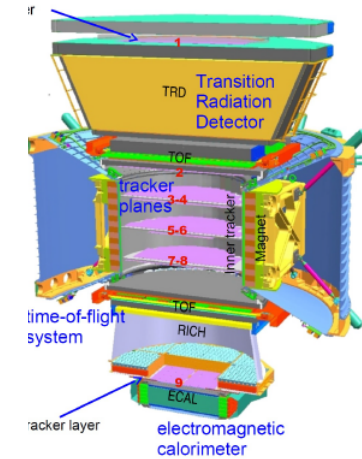
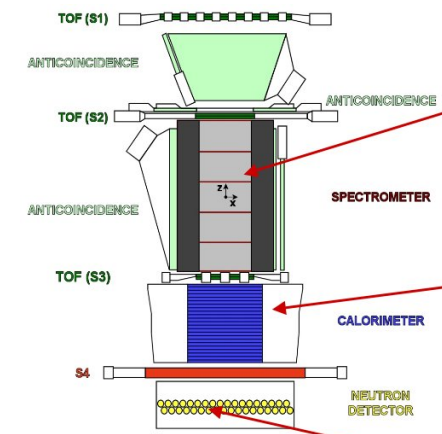
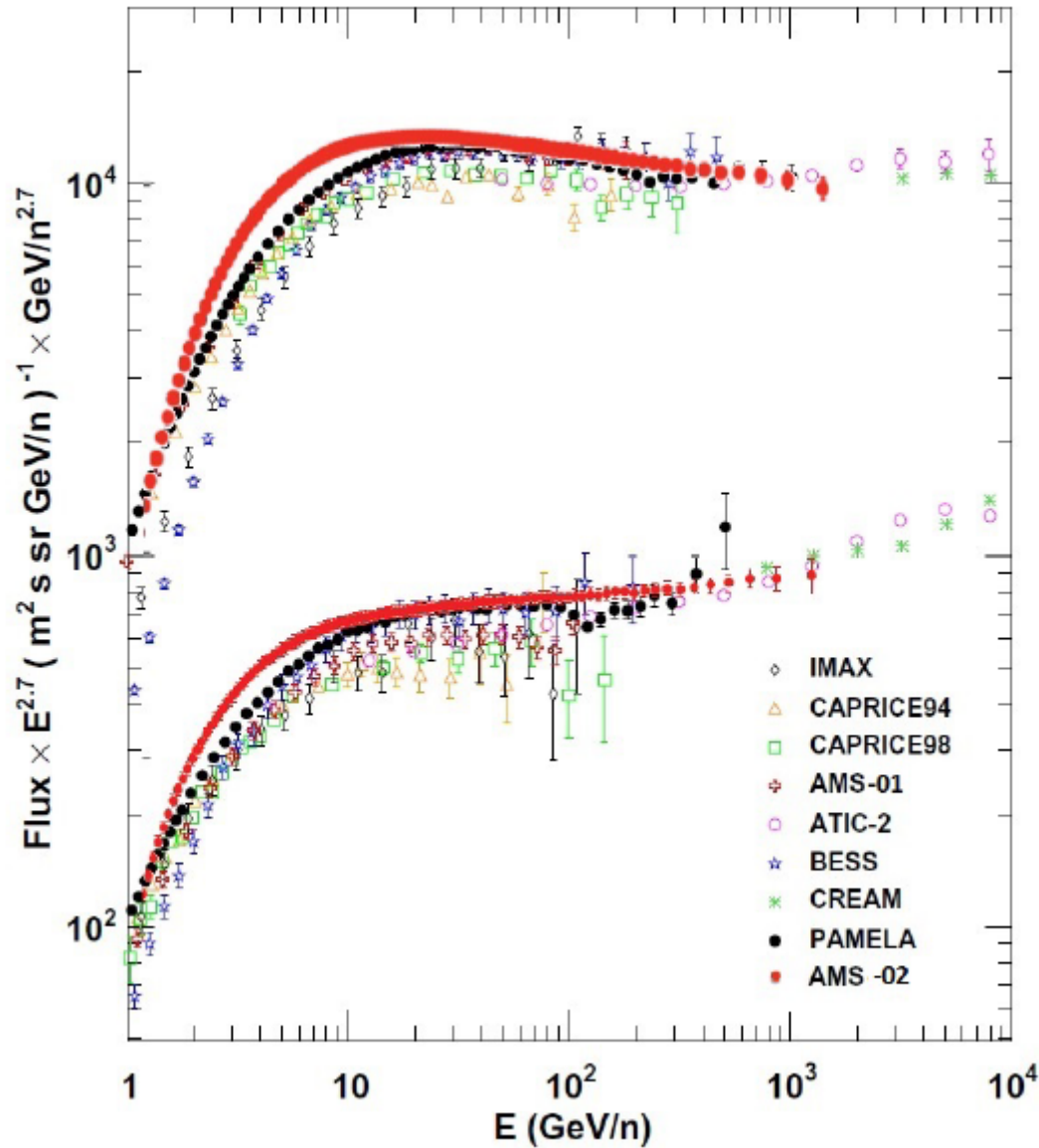
- The spectral index is almost the same for all nuclear species.

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

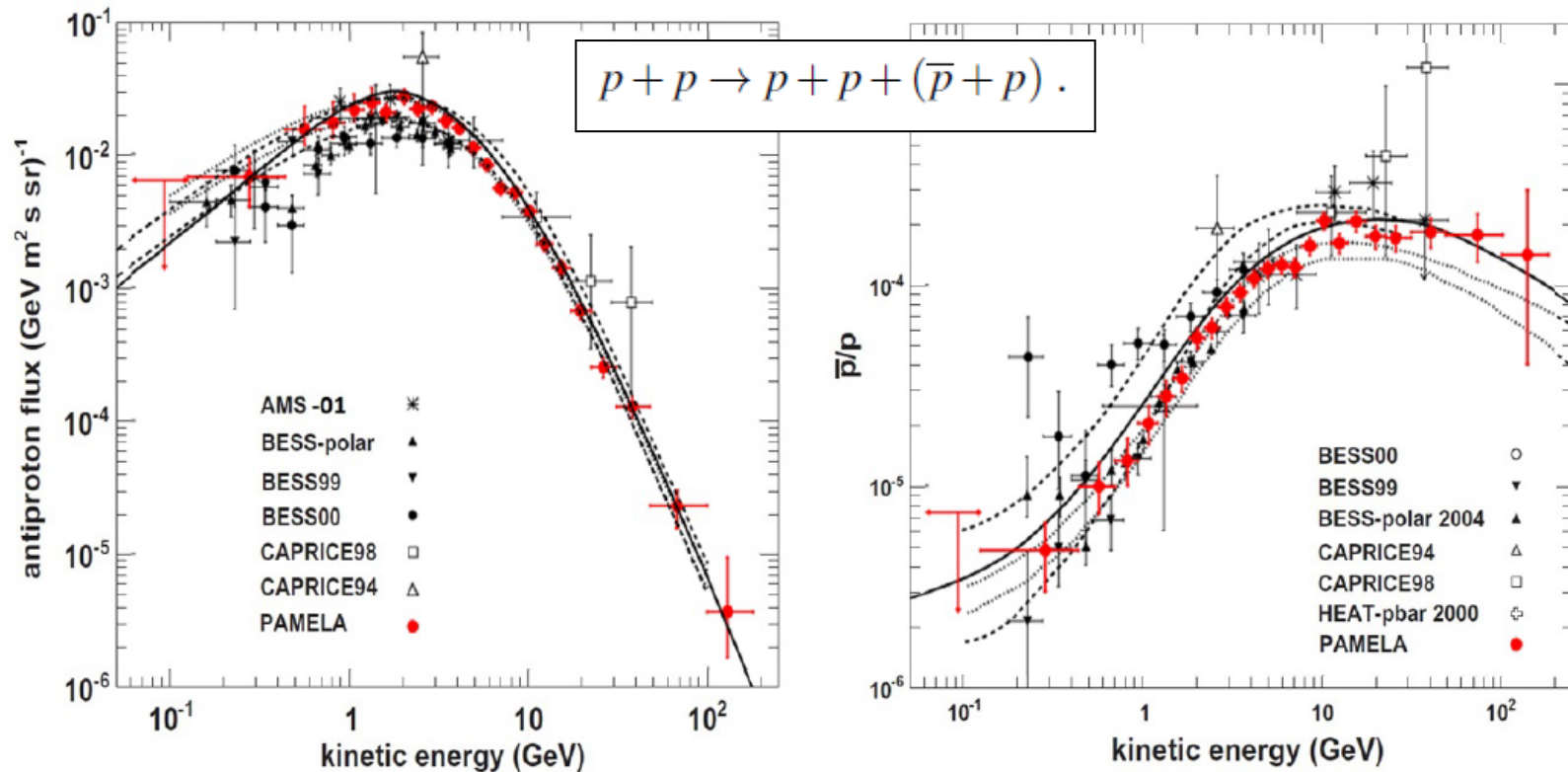
- This is one of the fundamental input for the theories studying the acceleration mechanisms of CRs



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



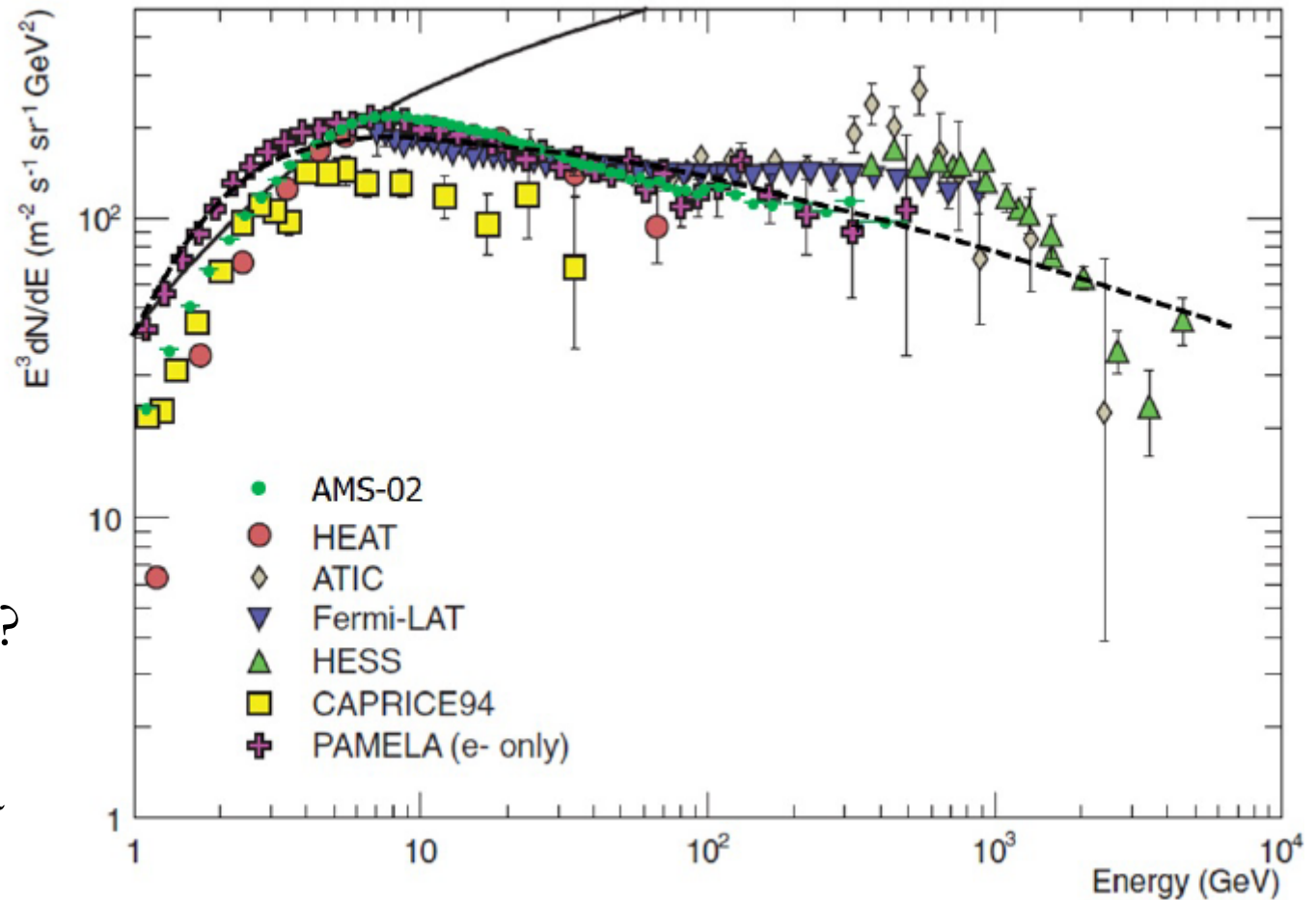
Antimateria nella Galassia: antip/p



- 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

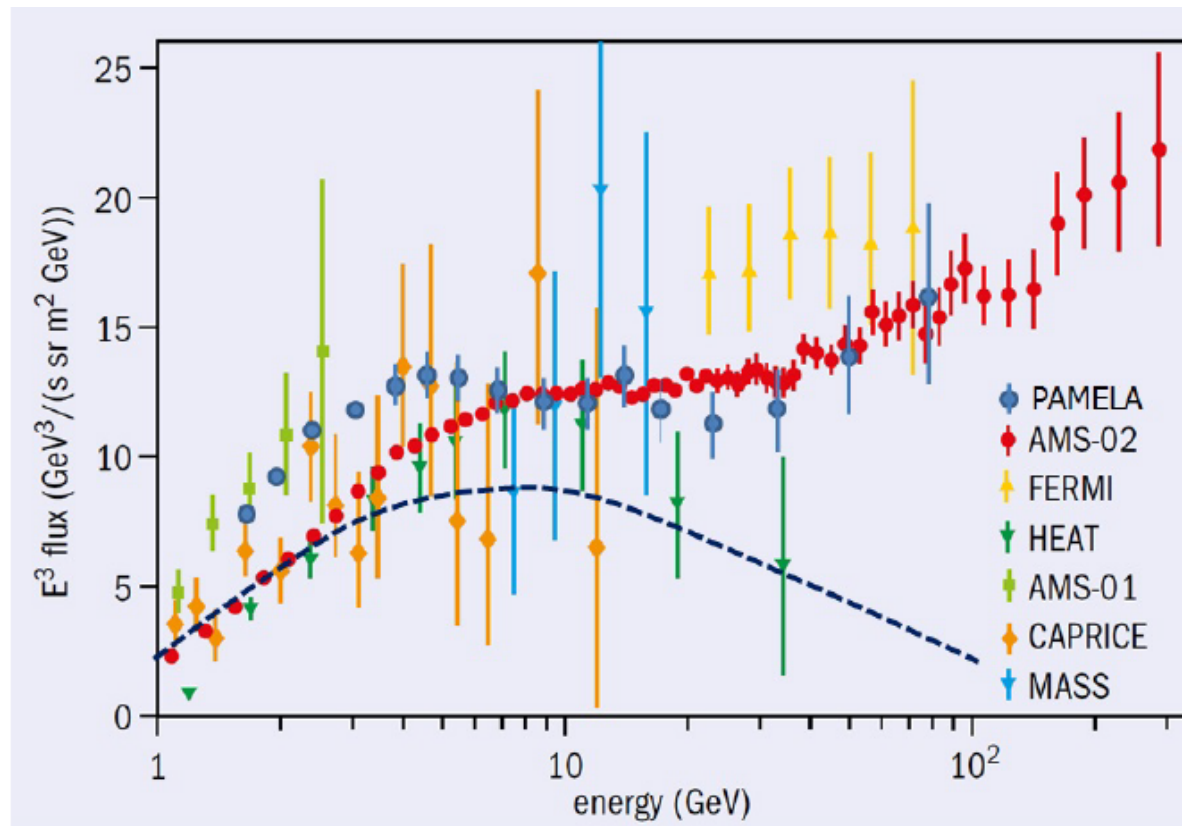
Gli elettroni nei RC

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



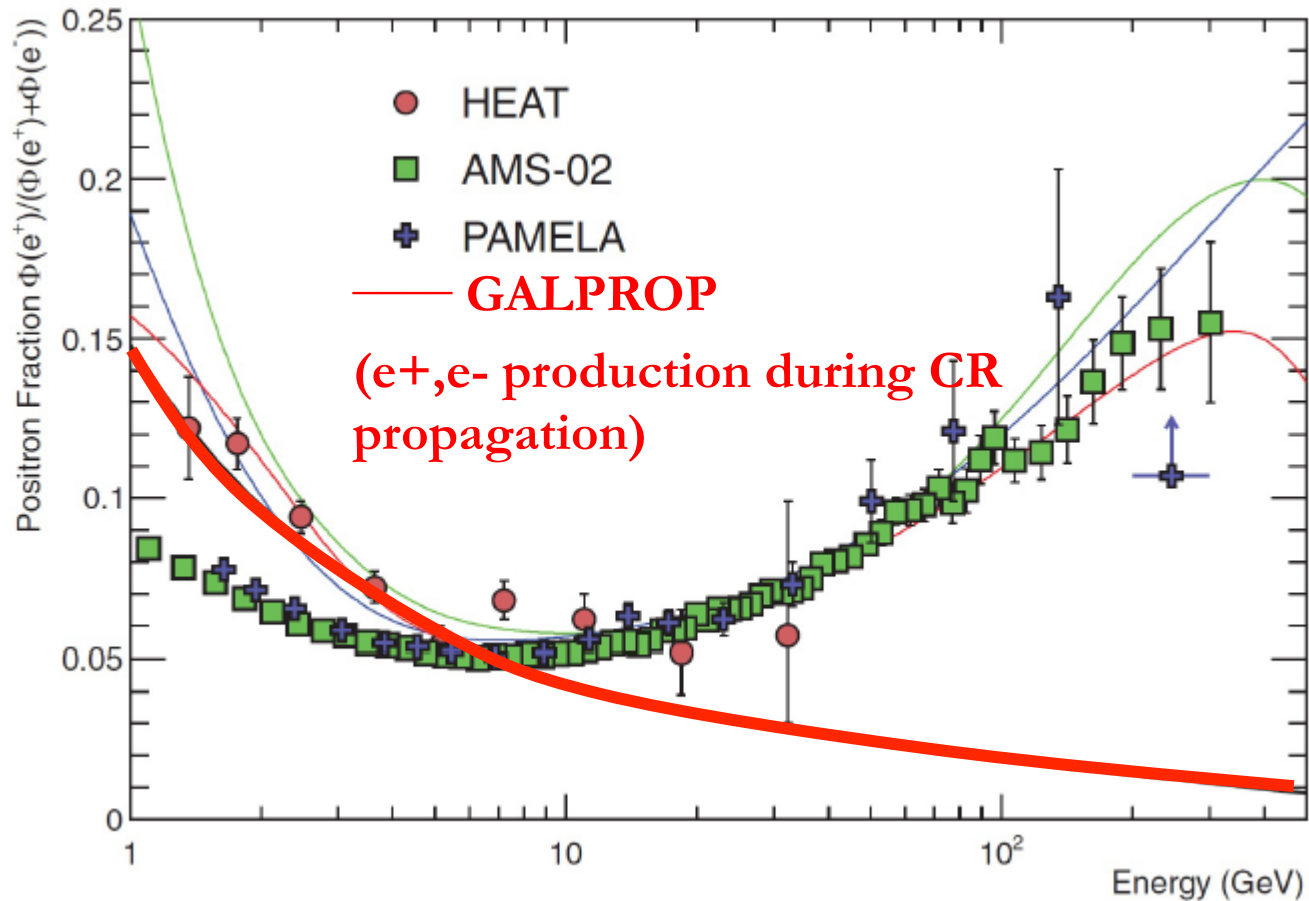
- **Effetti delle perdite di energia degli elettroni.** Queste producono la radiazione EM osservata in varie bande dagli astrofisici, dal radio ai raggi X

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!

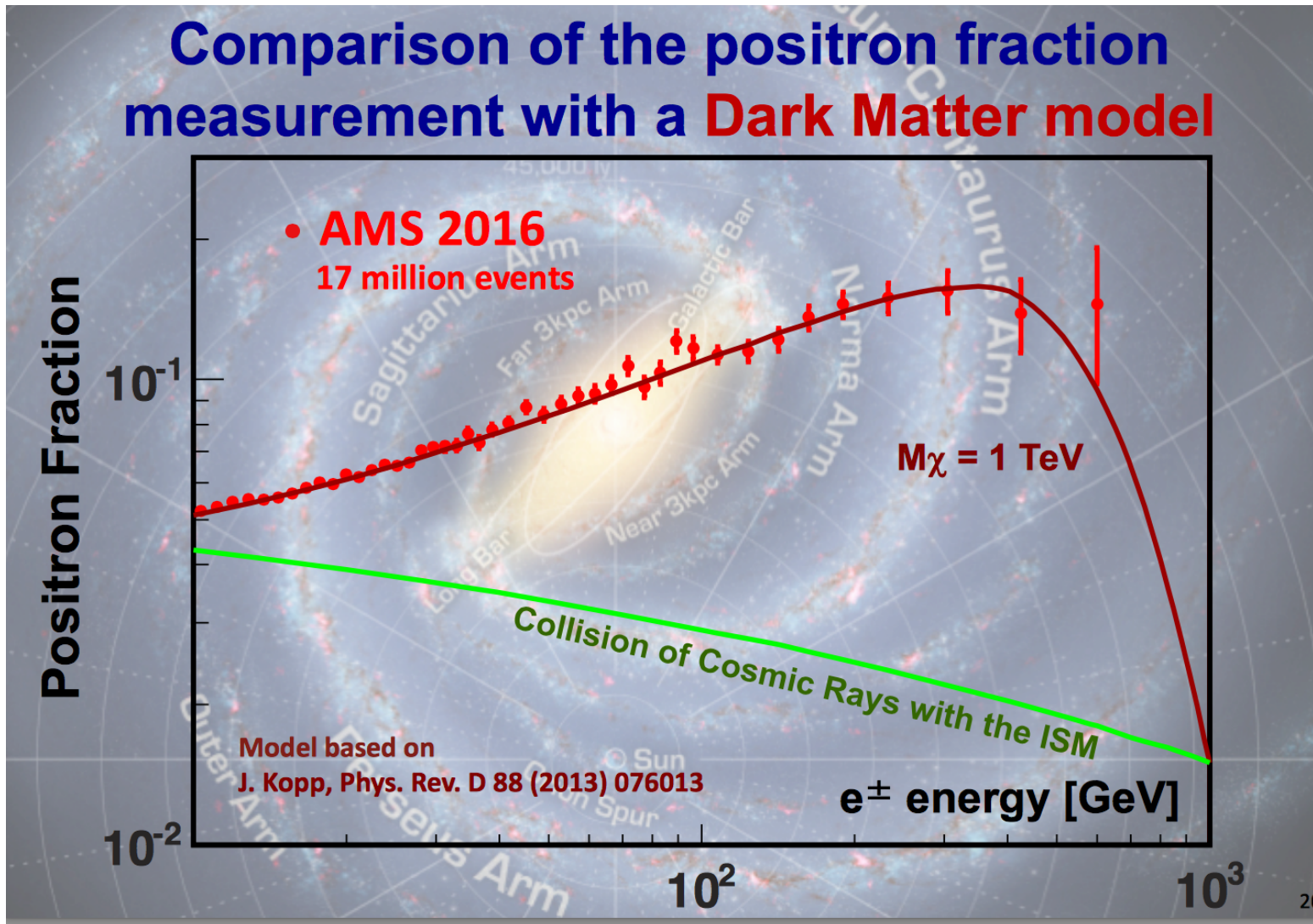
AMS-02 (e^+/e^-)



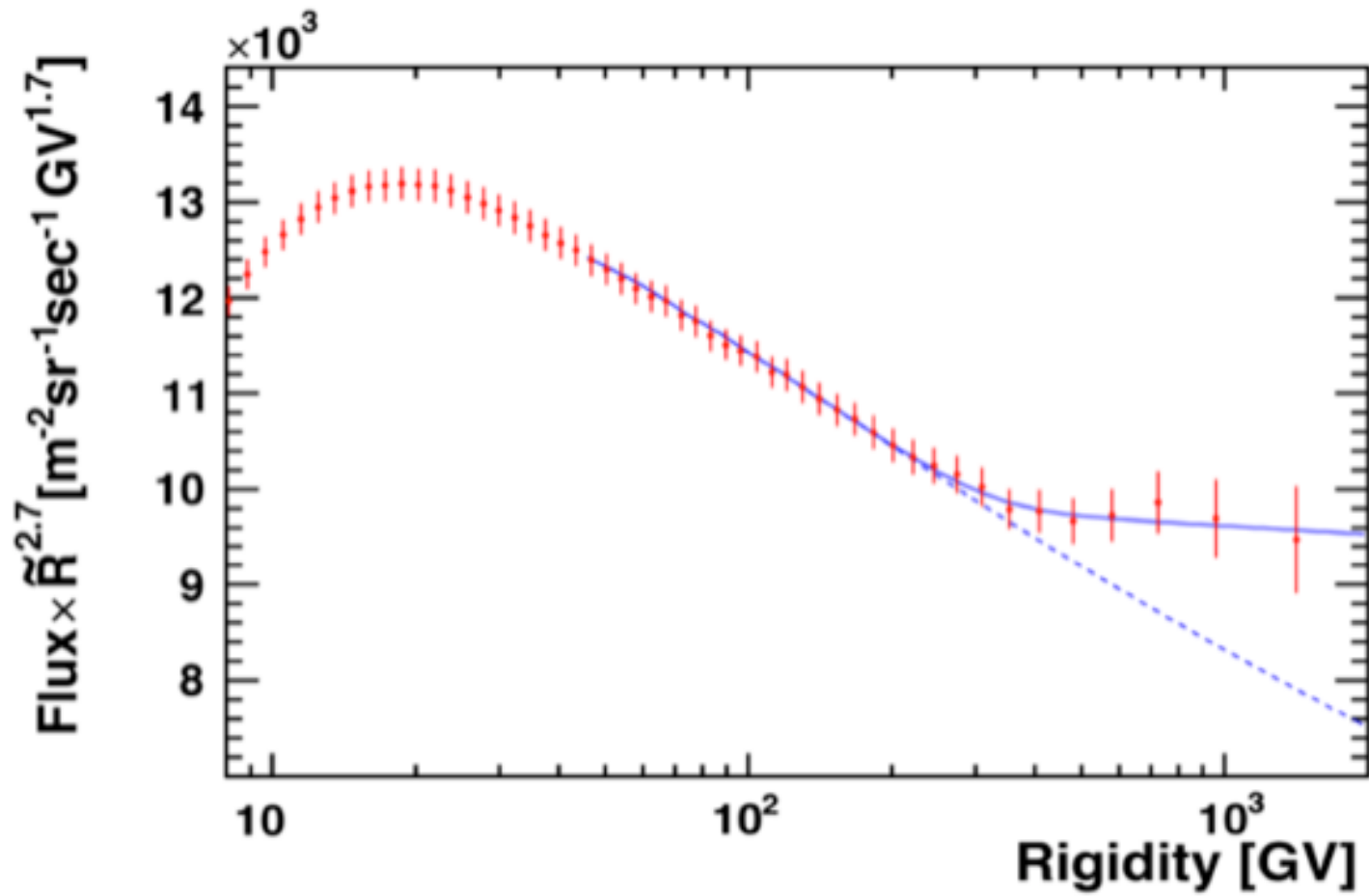
- The e^+ absolute flux as function of E
- Unexplained excess w.r.t. the propagation model

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

AMS02 – e⁺/e⁻



AMS02 - protons



AMS02 - antiprotons

