

Astrofisica Nucleare e Subnucleare

Cosmic Rays Astrophysics – I

slides from M.Spurio and M.C.Maccarone

I "raggi cosmici" sono un fenomeno naturale che ha origine al di fuori dell'atmosfera terrestre ma, fino agli albori del Novecento, non se ne prevedeva l'esistenza, ...

... gli esperimenti che ne hanno permesso la scoperta avevano piuttosto l'intento di studiare il fenomeno di ionizzazione dell'aria che, a quel tempo, si riteneva dovuto solo alla propagazione della radiazione naturale terrestre.

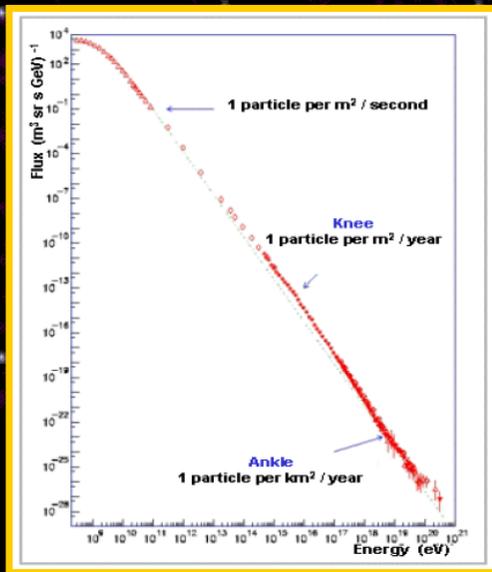
La ricerca nel campo dei Raggi Cosmici si è sviluppata come uno dei più spettacolari e vitali contributi alla scienza del XX secolo dando origine a nuove discipline scientifiche (fisica delle particelle elementari), nuove tecnologie (rivelatori, acceleratori), nuovi concetti in astrofisica (meccanismi di produzione e di accelerazione).

Nel corso di un secolo, la conoscenza del fenomeno "raggi cosmici" si è notevolmente arricchita ma ancora molte domande non hanno avuto risposta, particolarmente quelle relative ai cosiddetti EECR, i raggi cosmici di energia superiore a 5×10^{19} eV.

Oggi lo studio dei raggi cosmici di più alta energia è parte integrante delle "astroparticelle", campo multidisciplinare in cui convergono temi, conoscenze e problematiche di astronomia, astrofisica, fisica particellare e nucleare, fisica dell'atmosfera.

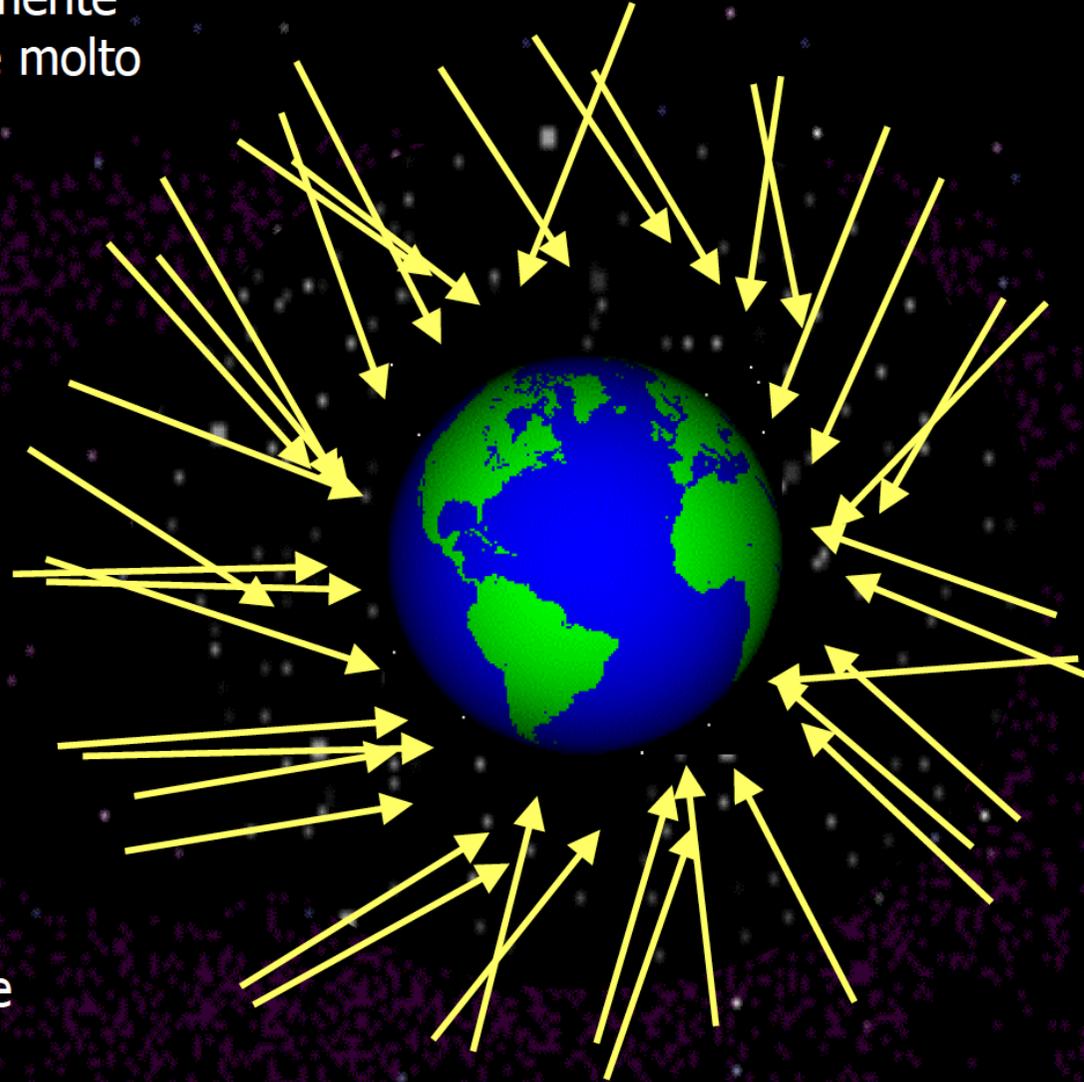
... ma cosa è un raggio cosmico (CR, Cosmic Ray) ?

I **raggi cosmici** sono principalmente particelle subatomiche cariche molto energetiche che bombardano continuamente la Terra.



Lo **spettro energetico** (la curva che dà la variazione dell'intensità dei raggi cosmici in funzione della loro energia) inizia da circa 10⁹ eV e sembra non avere un limite superiore.

L'**atmosfera terrestre** assorbe la maggior parte dei raggi cosmici.



La conducibilità elettrica e la ionizzazione dell'atmosfera

Alla fine del 18^{mo} secolo, Charles de Coulomb dimostrò per la prima volta che l'aria dell'atmosfera presenta una debole conducibilità elettrica. L'origine del fenomeno rimase a lungo oscura.

(oggi diremmo che gli atomi dell'atmosfera terrestre vengono continuamente "ionizzati" e che le cariche formate sono responsabili della conducibilità elettrica dell'aria dell'atmosfera stessa).

Dopo le fondamentali scoperte di fine Ottocento ...



1879 – i raggi catodici (William Crookes)

1895 – i raggi X (Wilhelm Conrad Röntgen)

1896 – la radioattività naturale (Henri Becquerel)

1897 – l'elettrone (John Joseph Thomson)

1899-(1900) – i raggi α , β , (γ) (Ernest Rutherford)

... venne ipotizzato che l'aria fosse ionizzata da misteriosi "raggi" originati dalla radiazione naturale emessa dal nostro pianeta.

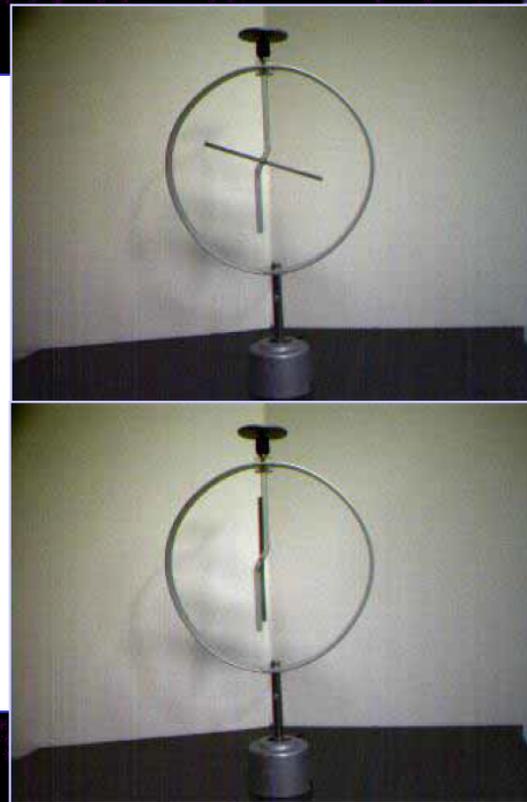
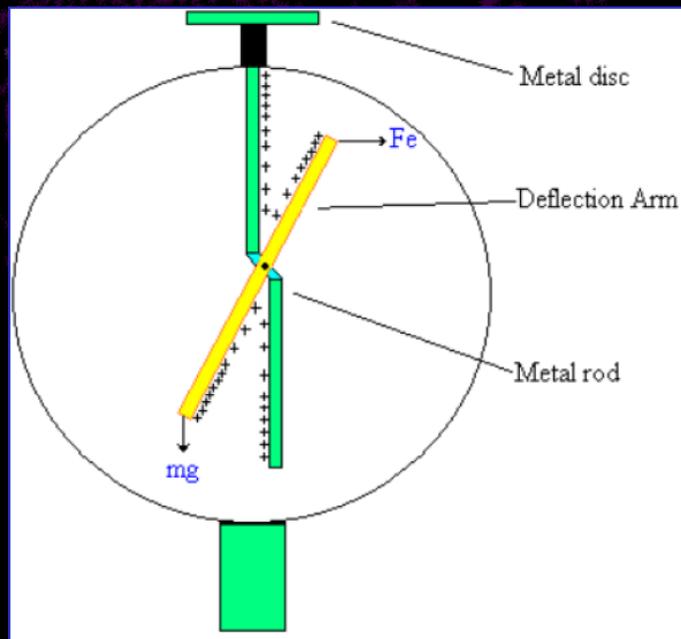
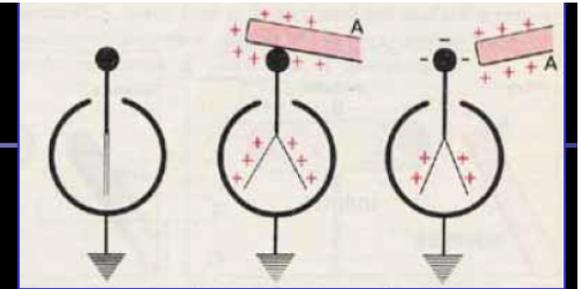


Gli esperimenti per lo studio dei misteriosi "raggi" utilizzavano principalmente gli elettroscopi



L'elettroscopio

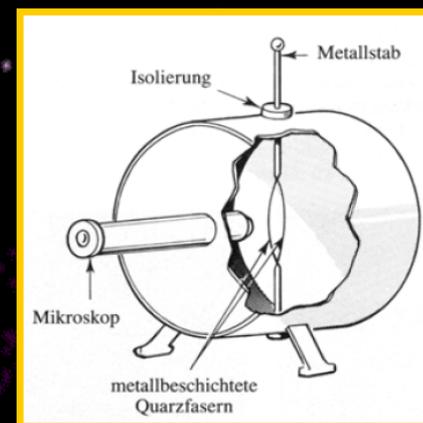
- I "bracci" dell'elettroscopio si respingono tanto più quanto maggiore è la carica presente;
- sottoposta a radiazione energetica, l'aria si ionizza parzialmente
- e l'elettroscopio si scarica tanto più velocemente quanto più intensa è la radiazione.



L'esperimento di Wulf

Nel 1907 Padre Theodore Wulf perfeziona l'**elettrometro**, un apparato strumentale stabile, resistente agli urti e alle vibrazioni, (composto da un elettroscopio a fibre di quarzo e da un microscopio con scala graduata), per misurare la radiazione naturale terrestre.

Era già noto che il segnale dovuto alla radioattività decresce in modo esponenziale quando ci si allontana dalla sorgente di radiazione.



L'elettrometro di Wulf

Nel 1910 Padre Wulf prova la strumentazione a Parigi sulla Tour Eiffel, a 300 metri di distanza al suolo: a dispetto di quanto atteso, trova che il segnale diminuisce molto meno del previsto !



Perché ?

- ☀ forse l'assorbimento in aria della radiazione naturale terrestre è più piccolo di quanto assunto ?
- ☀ oppure esiste un'ulteriore sorgente di radiazione nell'alta atmosfera ?

Domenico Pacini



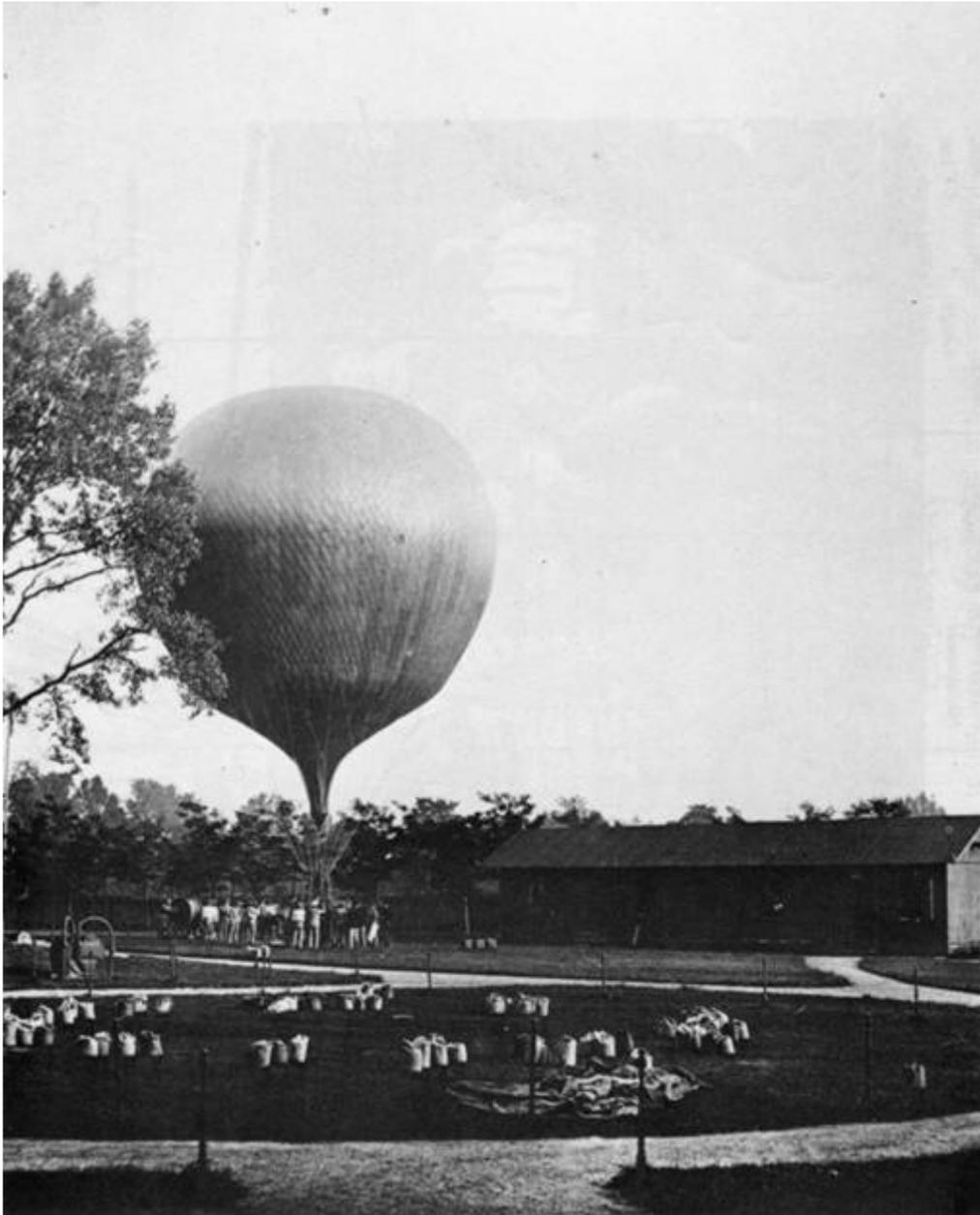
LA RADIAZIONE PENETRANTE ALLA SUPERFICIE ED IN SENO ALLE ACQUE.

NOTA DI D. PACINI.

Le osservazioni eseguite sul mare nel 1910 *) mi conducevano a concludere che una parte non trascurabile della radiazione penetrante che si riscontra nell'aria, avesse origine indipendente dall'azione diretta delle sostanze attive contenute negli strati superiori della crosta terrestre.



L' esperimento di Hess



- Nel 1912, Hess caricò su un pallone aerostatico un dispositivo per misurare le particelle cariche.
- Nel volo, si dimostrò come la radiazione aumentava con l'altitudine.
- Questo significava che la radiazione sconosciuta non aveva origine terrestre (come la radioattività naturale) ma proveniva dallo spazio esterno, da cui il nome di **Raggi Cosmici**

L'esperimento in pallone di Victor Hess

Utilizzando una versione migliorata della strumentazione di Wulf (compensazione per le variazioni di temperatura e pressione, sistema ottico modificato per letture più accurate), **Victor Franz Hess** iniziò nel 1911 una serie di esperimenti salendo in quota con palloni aerostatici.



Il volo del **7 agosto 1912** (6 ore da Aussig a Pieskow) raggiunse la quota di 5350 metri.

Man mano che il pallone si innalzava dal suolo, il livello di ionizzazione, come osservato da Wulf, diminuiva molto più lentamente di quanto atteso, fino a stabilizzarsi verso i 700 metri.

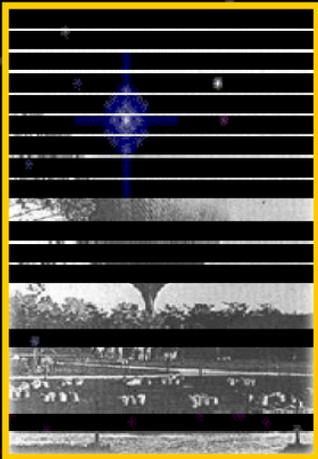
A partire dai 1500 metri di quota, il segnale iniziò a crescere finché a 5000 metri raggiunse un livello addirittura doppio del segnale di fondo che la strumentazione misurava al suolo.

Hess ne concluse che:

“I risultati delle presenti osservazioni potrebbero essere spiegati assumendo che una radiazione di potere altamente penetrante entra nella nostra atmosfera dall'esterno, ed ancora produce, nei livelli più bassi, parte della ionizzazione osservata in laboratorio.”



V. Hess a bordo della gondola



Pallone del 1912

Durante la campagna di voli del 1912, Victor Hess trovò inoltre che:
il segnale di ionizzazione (e quindi l'intensità della radiazione)

- aveva valori molto simili sia durante il giorno che durante la notte,
- non diminuiva sensibilmente nel caso di eclissi solare (volo del 12 aprile).

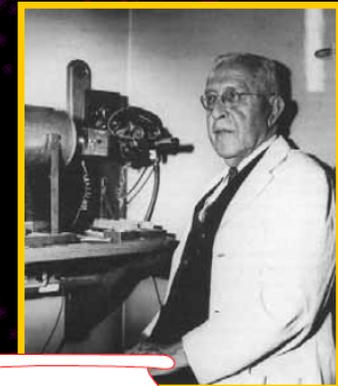
Da ciò egli concluse che :

- il Sole non poteva essere la sorgente primaria della "misteriosa radiazione",
- la radiazione dovesse giungere dallo spazio esterno più lontano del Sole.



E' la scoperta della
"Höhenstrahlung",
la "radiazione proveniente dall'alto"

Victor Hess venne in seguito riconosciuto quale
"padre ufficiale della fisica dei raggi cosmici"



Nobel Prize

1936

Victor Hess

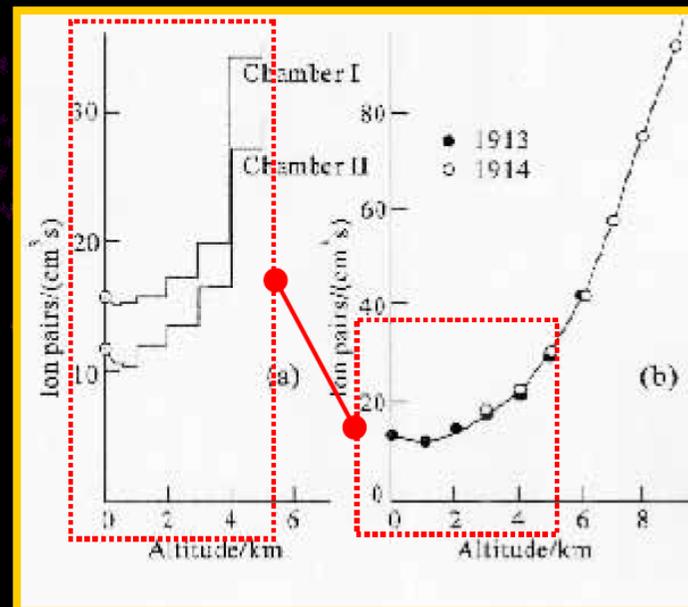
Nota: i "raggi cosmici" (o "radiazione cosmica") furono così denominati nel 1925 da Robert Millikan che credeva fossero raggi gamma di alta energia. Oggi sappiamo che la maggior parte della radiazione cosmica è formata da particelle (sub)nucleari, compresi elettroni e neutrini, piuttosto che da radiazione elettromagnetica, ma il termine "raggi cosmici", nella sua più moderna definizione introdotta da Dmitry Skobelzyn nel 1928, è rimasto nell'uso comune.



Dopo la scoperta della Höhenstrahlung furono portati a termine vari esperimenti (in palloni aerostatici, con palloni sonda, in aereo, nei laghi, in montagna, nei ghiacciai) da diversi ricercatori (in Europa e negli Stati Uniti) per capire l'origine e la natura della radiazione e per valutarne il coefficiente di assorbimento.

Durante una campagna di voli in pallone negli anni **1913-1914**, **Werner Kolhörster** conferma i risultati di Hess; inoltre, raggiungendo la quota di 9300 metri, egli conferma l'aumento della ionizzazione anche a quella altezza, e trova che il coefficiente di assorbimento è molto più basso di quello relativo ai raggi gamma.

Ma gli studi, rallentati dagli eventi della Prima Guerra Mondiale, non riescono ancora a dare risposta alle domande sull'origine e natura della "radiazione molto più penetrante dei più energetici raggi gamma":



Variatione della ionizzazione con l'altezza (a) Hess (1912); (b) Kolhörster (1913,1914).

?

Origine:

- negli strati più alti dell'atmosfera ?
- nel Sole ?
- altrove nel cosmo ?

?

Natura:

- radiazione elettromagnetica di altissima energia (ultra-gamma) ?
- elettroni super-veloci ?

- Millikan, nel 1925, diede il nome di **raggi cosmici** a questa radiazione: egli riteneva che fossero composti principalmente da raggi gamma.
- Compton ipotizzò, al contrario, che i RC fossero particelle cariche: successive misurazioni dimostrarono la validità di questa ipotesi. La distribuzione dei RC, infatti, variava con la latitudine magnetica, come ci si attende per le particelle cariche sotto l'influenza del campo geomagnetico terrestre.
- Nel 1930 il fisico italiano Bruno Rossi notò che, se la carica delle particelle era positiva, esse dovevano provenire in maniera preferenziale da est. Thomson verificò sperimentalmente l'intuizione dell'italiano.
- A partire dagli anni '30 sino alla nascita dei primi acceleratori di particelle, la storia della fisica delle particelle coincide con quella dei Raggi Cosmici
- Si pose la questione sull'origine e la provenienza dei raggi primari. Nascita dell'astrofisica dei RC (scuola russa, anni '60) "The Origin of Cosmic Rays", Ginzburg and Syrovatskii. (1964)

I "raggi di Millikan" e i "raggi cosmici"



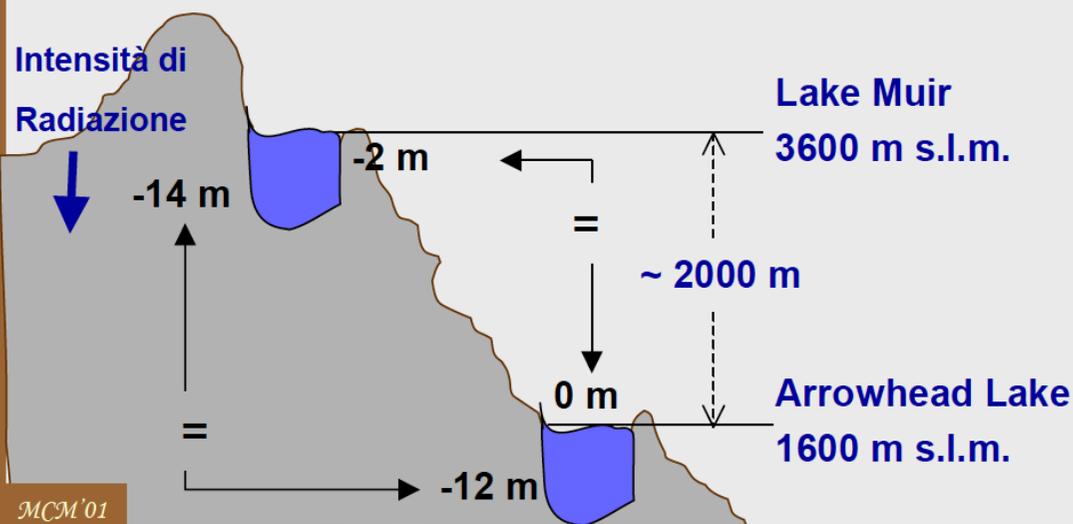
In California Robert Millikan e George Cameron misurano la ionizzazione nelle acque di due laghi di montagna alimentati dallo scioglimento delle nevi "per definire una volta per tutte la questione dell'esistenza o meno di una piccola radiazione molto penetrante di origine cosmica".



© Copyright California Institute of Technology. All rights reserved. Commercial use or modification of this material is prohibited.

Camera a ionizzazione usata da Millikan

$$\text{Assorbimento [3600m} \div \text{1600m]}_{\text{Atmosfera}} \equiv \text{Assorbimento [2m]}_{\text{Acqua}}$$



Dai risultati ottenuti, Millikan e Cameron conclusero che:

- la radiazione penetrante esiste,
- è di origine cosmica.

Millikan, erroneamente convinto che la radiazione fosse solo di natura elettromagnetica (raggi gamma di alta energia), conìò per essa il termine

" Raggi Cosmici"

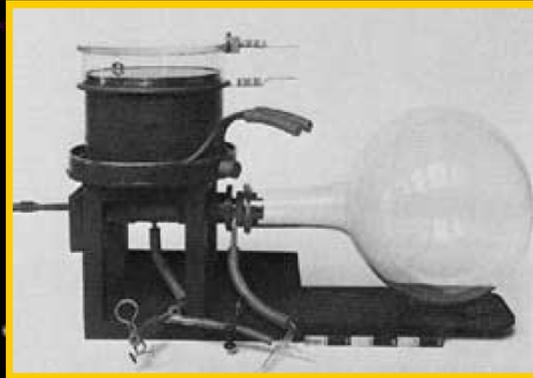
“La storia degli strumenti di fisica coincide con la storia della fisica stessa”

(Rita Brunetti, 1890-1942)

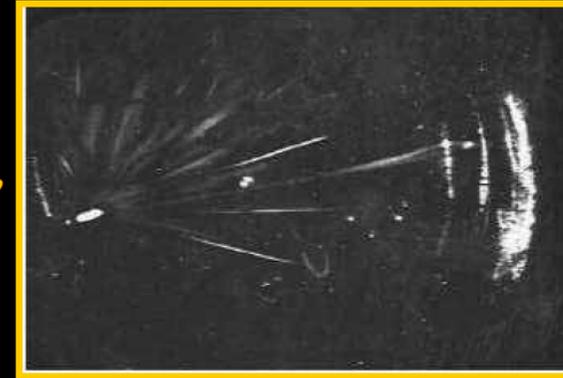
La “camera di Wilson” o “camera a nebbia”

La “camera a nebbia”, inventata da **Charles T.R. Wilson** nel **1911**, fu il primo strumento a permettere l’analisi visiva delle particelle ionizzanti. Il passaggio di una tale particella nella camera, riempita di vapore soprassaturo, provoca una condensazione di ioni lungo la sua scia. In questo modo è possibile osservarne a occhio nudo la traccia ed anche fotografarla.

Ernest Rutherford la definì come *“the most original and wonderful instrument in scientific history.”*



Camera di Wilson, 1912



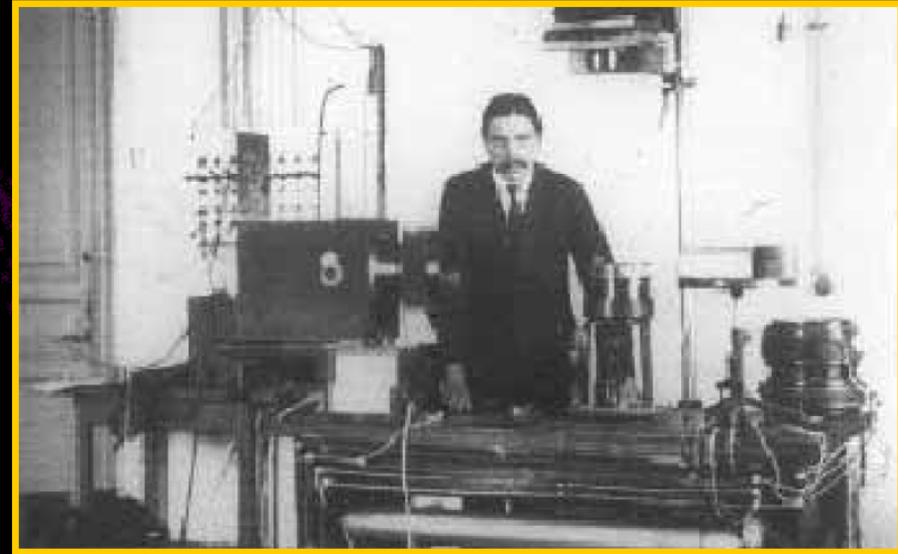
La “camera a nebbia”, utilizzata in laboratorio nelle sue versioni sempre più aggiornate,

- rese possibile la maggior parte delle scoperte delle nuove particelle nei decenni '20 e '30, e
- contribuì alla determinazione della natura particellare dei raggi cosmici.



Usando una **camera a nebbia** accoppiata ad un forte campo magnetico per lo studio dei raggi beta,

Dmitry Skobeltzyn fotografa le tracce (a volte presenti in numero di tre o quattro) lasciate da **particelle relativistiche cariche (elettroni veloci)** provenienti dall'atmosfera.

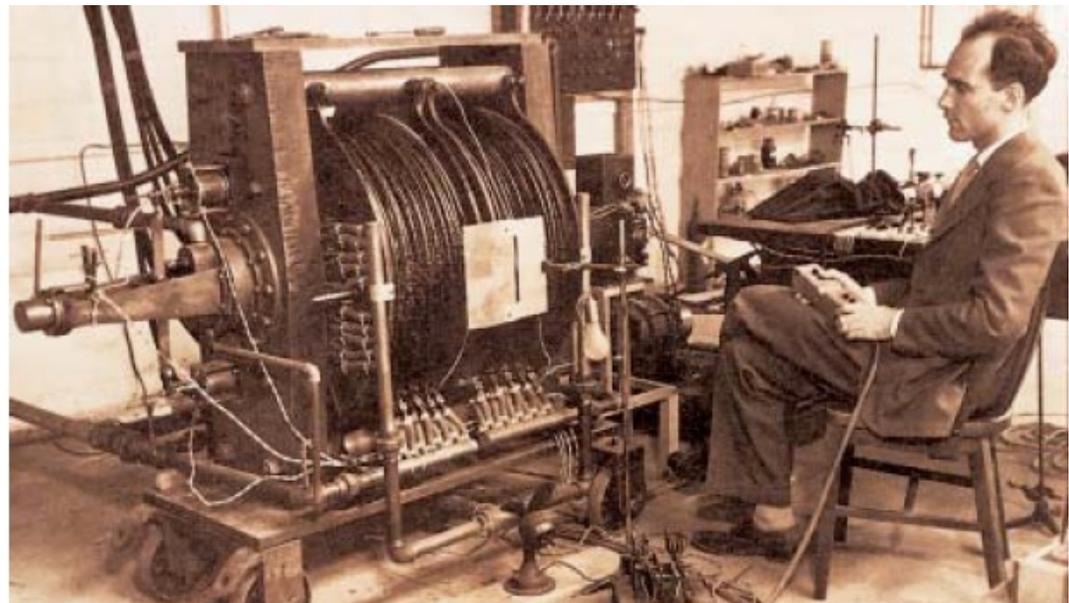
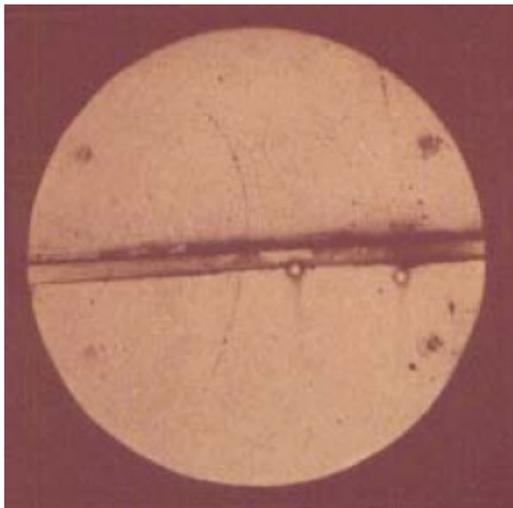


Skobeltzyn nel laboratorio dell'Istituto di Fisica Tecnica di Leningrado

Data la loro elevata energia, gli **elettroni veloci** rilevati non potevano essere stati prodotti da decadimento da elementi radioattivi: essi furono piuttosto considerati come **prodotti secondari dell'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera**.

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^-

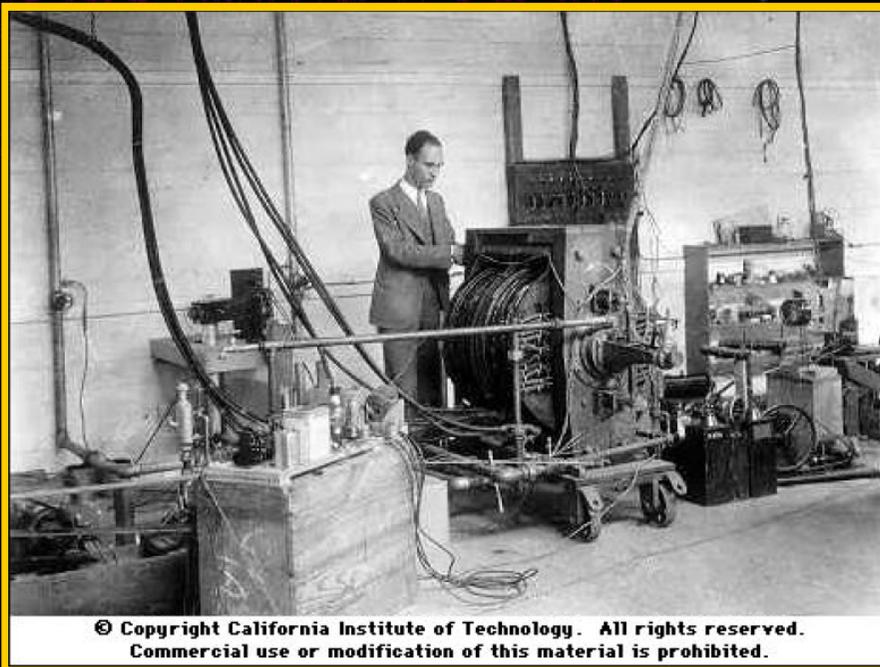




Durante studi sui raggi cosmici, usando una **camera a nebbia** (accoppiata ad un forte campo magnetico) e ponendo una lastra di piombo al suo interno,

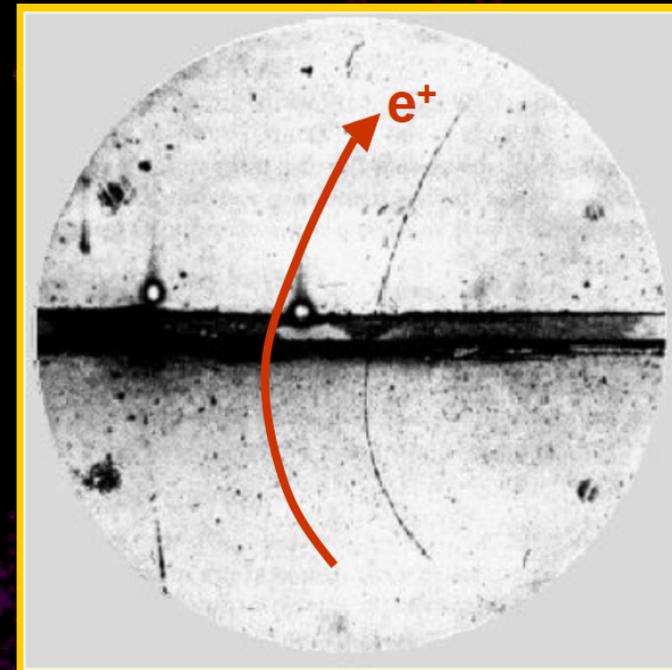
Carl Anderson osserva tracce di particelle con curvatura opposta a quella lasciata dagli elettroni (la direzione della traccia è determinata dall'energia persa dalla particella nell'attraversare la lastra di piombo).

E' la scoperta del **positrone**, particella che ha la massa dell'elettrone, ma carica opposta.



© Copyright California Institute of Technology. All rights reserved.
Commercial use or modification of this material is prohibited.

Anderson e la camera a nebbia (1932).



Fotografia di traccia da positrone nella camera a nebbia di Anderson (1932).



Patrick Blackett e Giuseppe (Beppo) Occhialini sviluppano una nuova tecnica sperimentale collocando due **contatori Geiger-Muller** (inventati nel 1908) collegati da un **circuito in coincidenza** (ideato da Bruno Rossi nel 1930) ←
rispettivamente sopra e sotto una **camera a nebbia**.

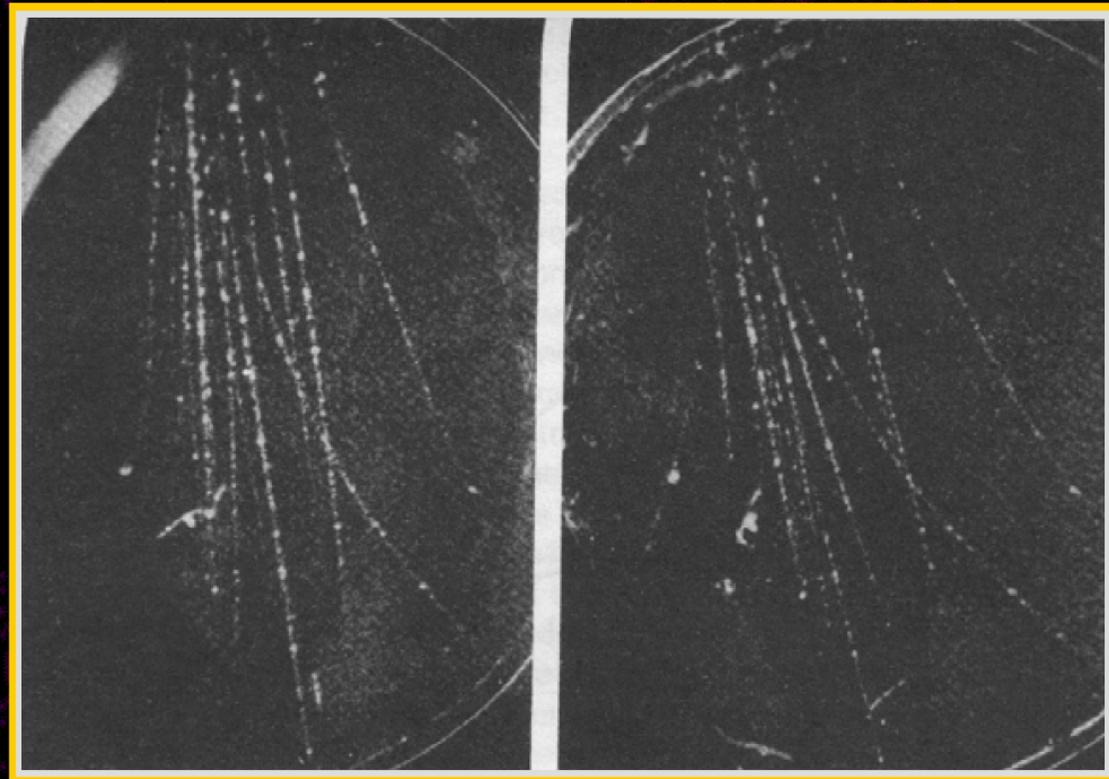
Nota: Il circuito in coincidenza ideato da Bruno Rossi fu il primo circuito elettronico "AND", elemento logico di base dei computer.

Il sistema della "camera a nebbia controllata dai contatori" permette così di prendere una foto ogni due minuti, trovando tracce di particelle altamente energetiche nell'80% di esse.

Blackett e Occhialini fotografano gruppi di particelle associate, dalle forme più disparate e dal diverso contenuto, e danno al fenomeno il nome di "showers" (sciami).



Patrick Blackett e Beppo Occhialini



Fotografia stereoscopica di uno sciame (P. Blackett & G. Occhialini, 1933)

- 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).

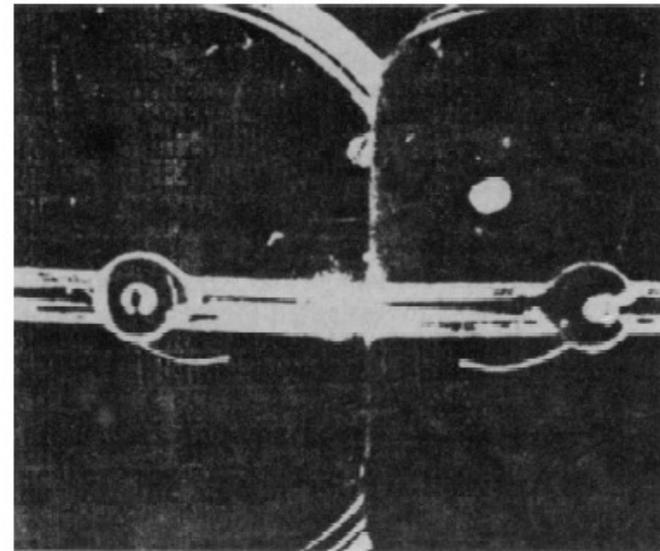


Fig. 1. - Evidenza in camera di Wilson di un muone positivo che traversa un contatore di Geiger entro la camera [1]. La sensibilità della camera non poteva arrivare a rivelare l'elettrone di decadimento.



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 μ o muone**.

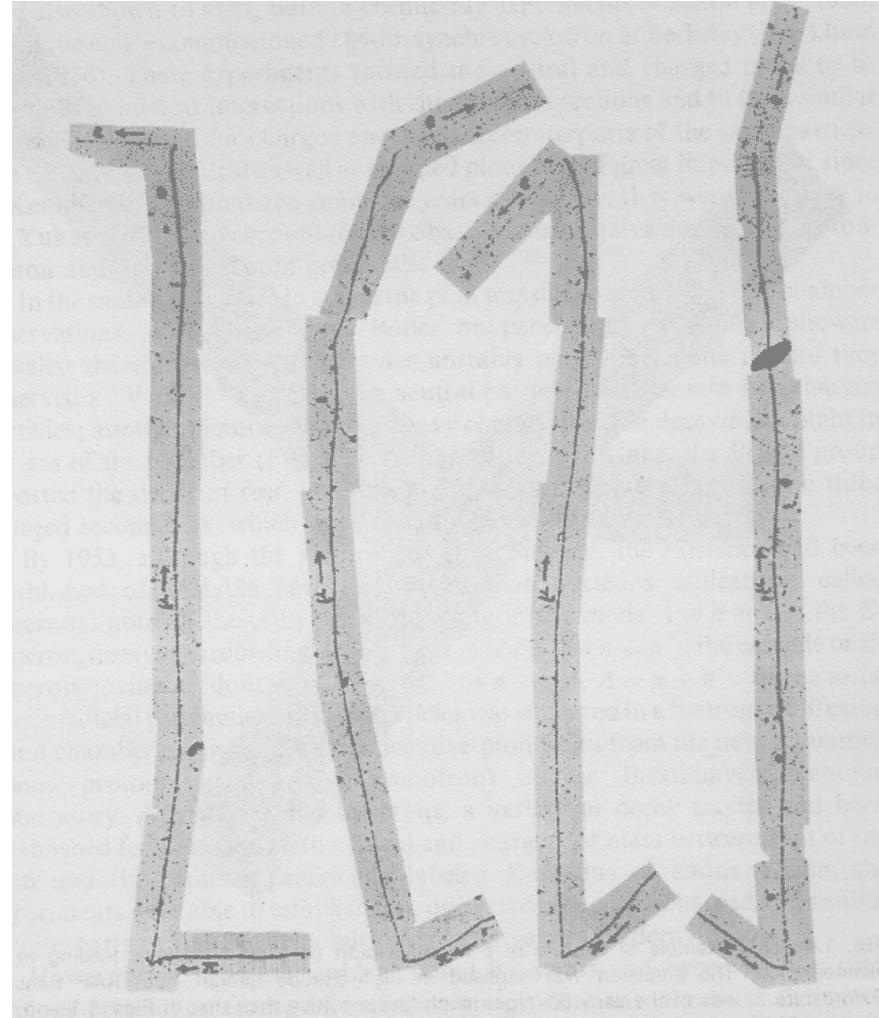


Anderson e Neddermeyer con il loro autocarro.

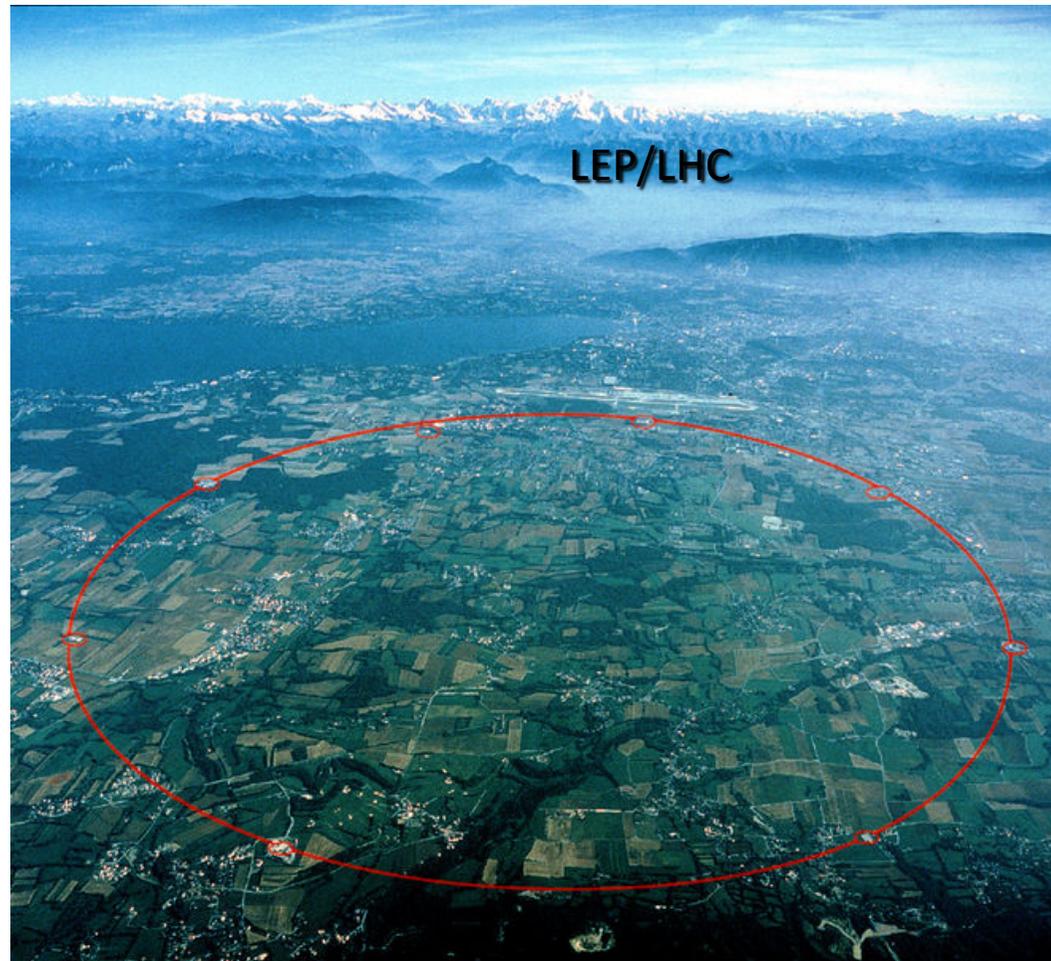


In modo indipendente, e quasi contemporaneamente, anche **J.C. Street** e **E.C. Stevenson** rilevano l'esistenza del **muone** in raggi cosmici, utilizzando una **camera a nebbia controllata da contatori**.

- **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).

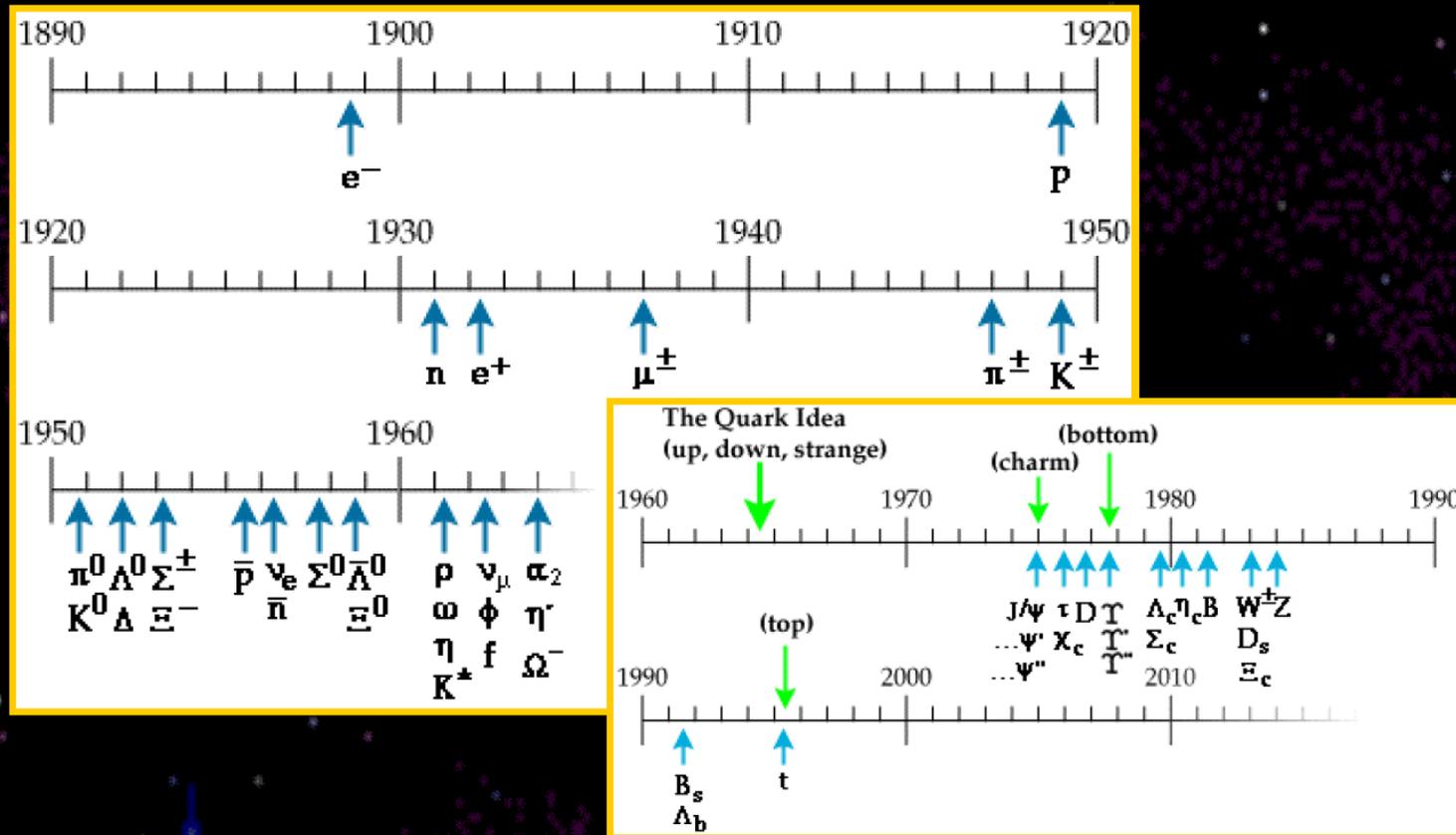


... poi gli acceleratori



Alla fine degli Anni Trenta ...

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

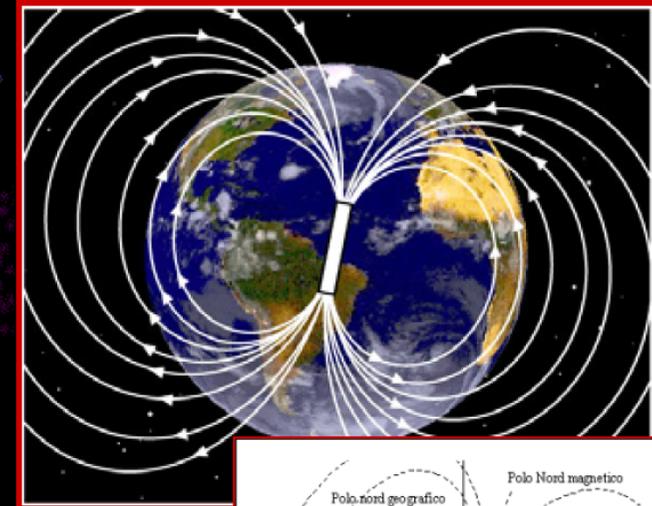


... e i fisici particellari continueranno ad usare i raggi cosmici per le loro ricerche almeno fino all'avvento, negli anni '50, degli acceleratori di particelle.

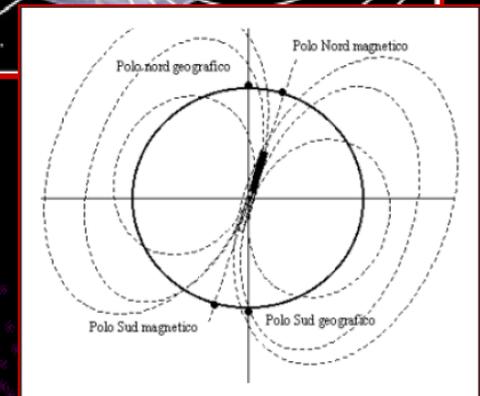
Natura dei raggi cosmici: l'influenza del campo magnetico terrestre



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

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

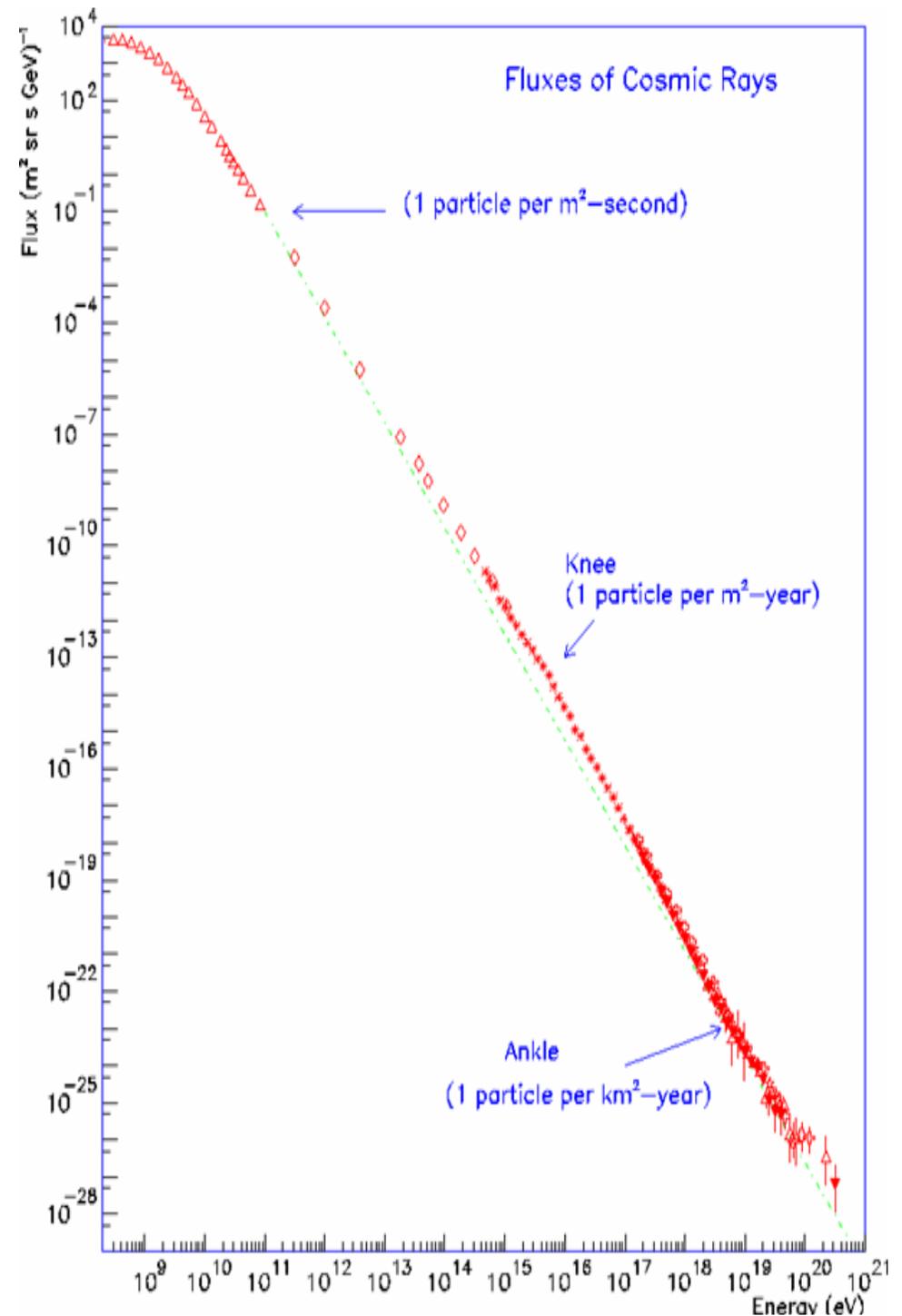
Misure dirette: 90% p, 9%

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.

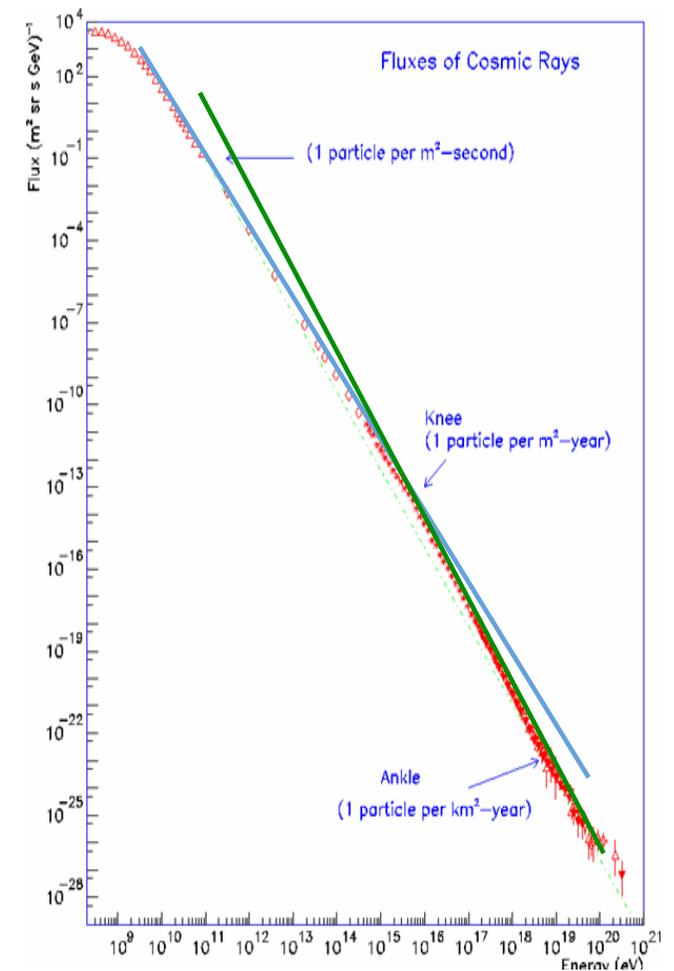
I parametri K e Γ vengono determinati dall'adattamento della curva coi dati

Regolarità di un fenomeno fisico

Legge di natura!

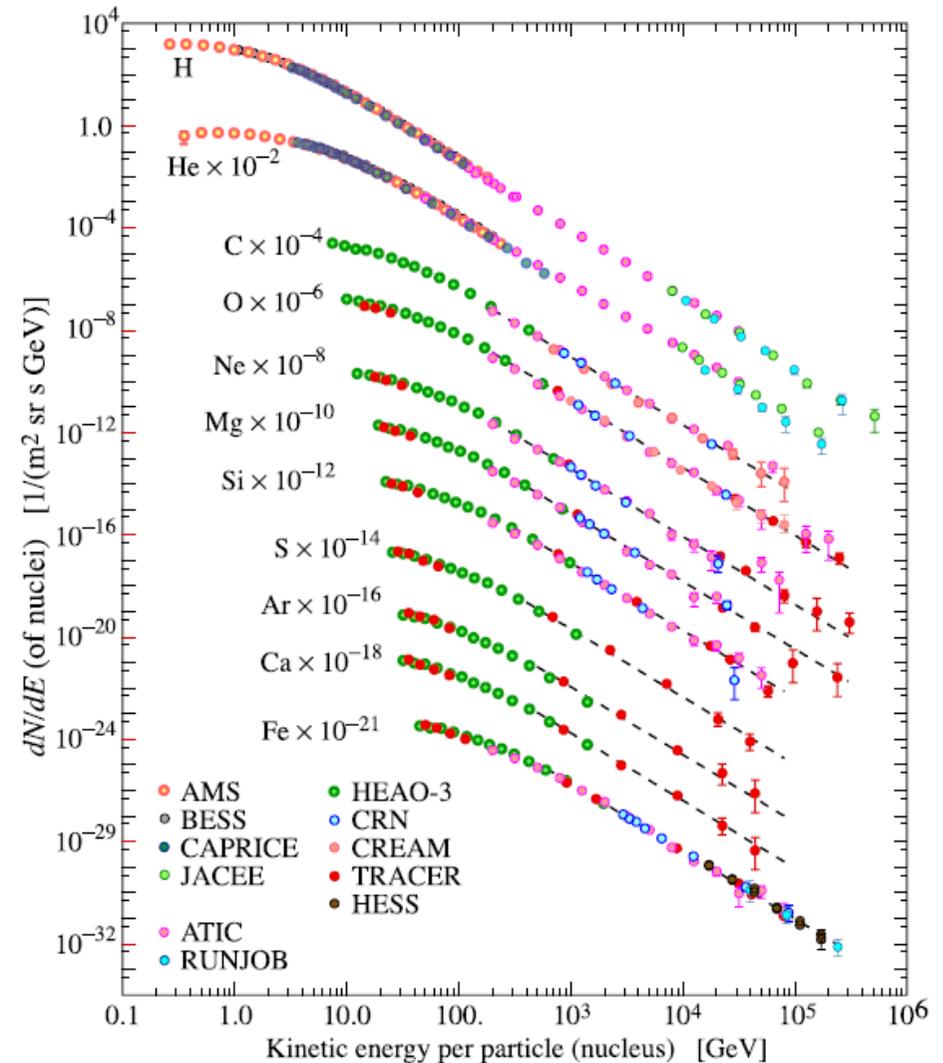
Occorre scoprire quali sono i fenomeni naturali che producono tale legge di natura.

Implica conoscenze di fisica, astrofisica ed anche cosmologia!

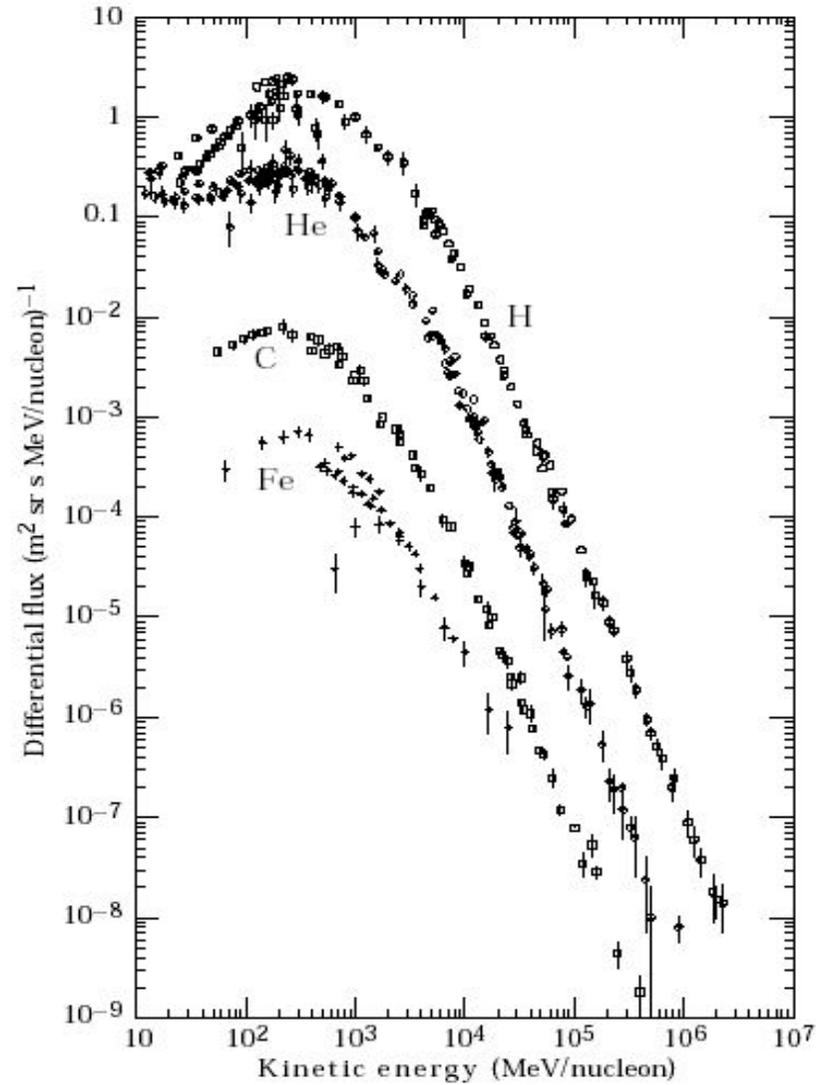


Diverse Specie nucleari

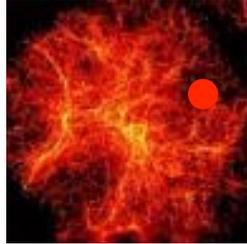
Se misurato, si può parlare dello spettro di diverse specie atomiche nei RC
Le variazioni del ciclo solare hanno effetti per energie < 1 GeV
RC con $E > 2$ GeV non affetti dal ciclo solare
Flusso di RC di bassa energia (>1 GeV): ~ 1000 p/(m²s sr).



CR observations

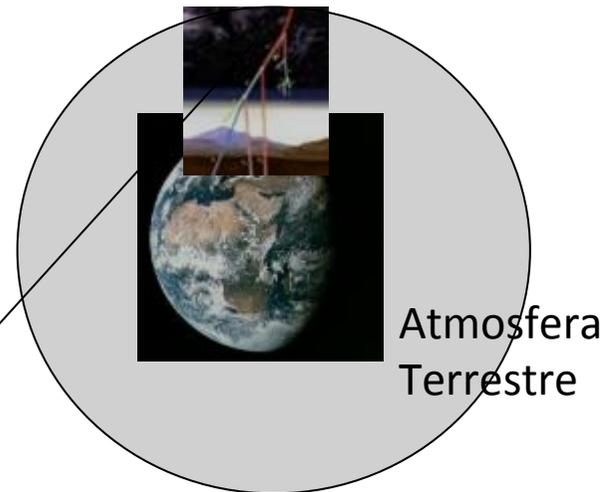


RC Primari e Secondari



Sorgente Astrofisica
(Resto di Supernova)

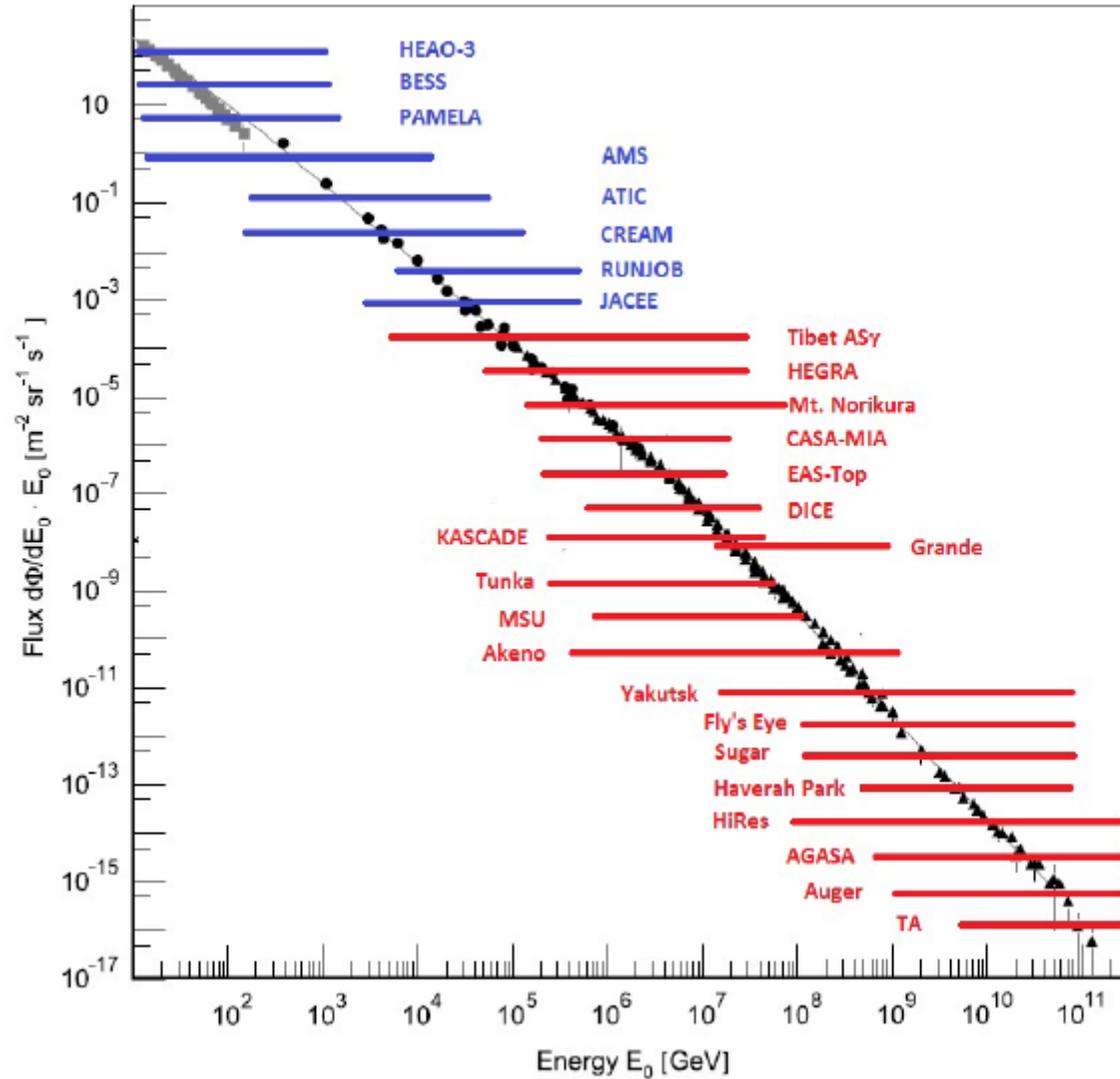
Raggio Cosmico Primario
(protone, nucleo)



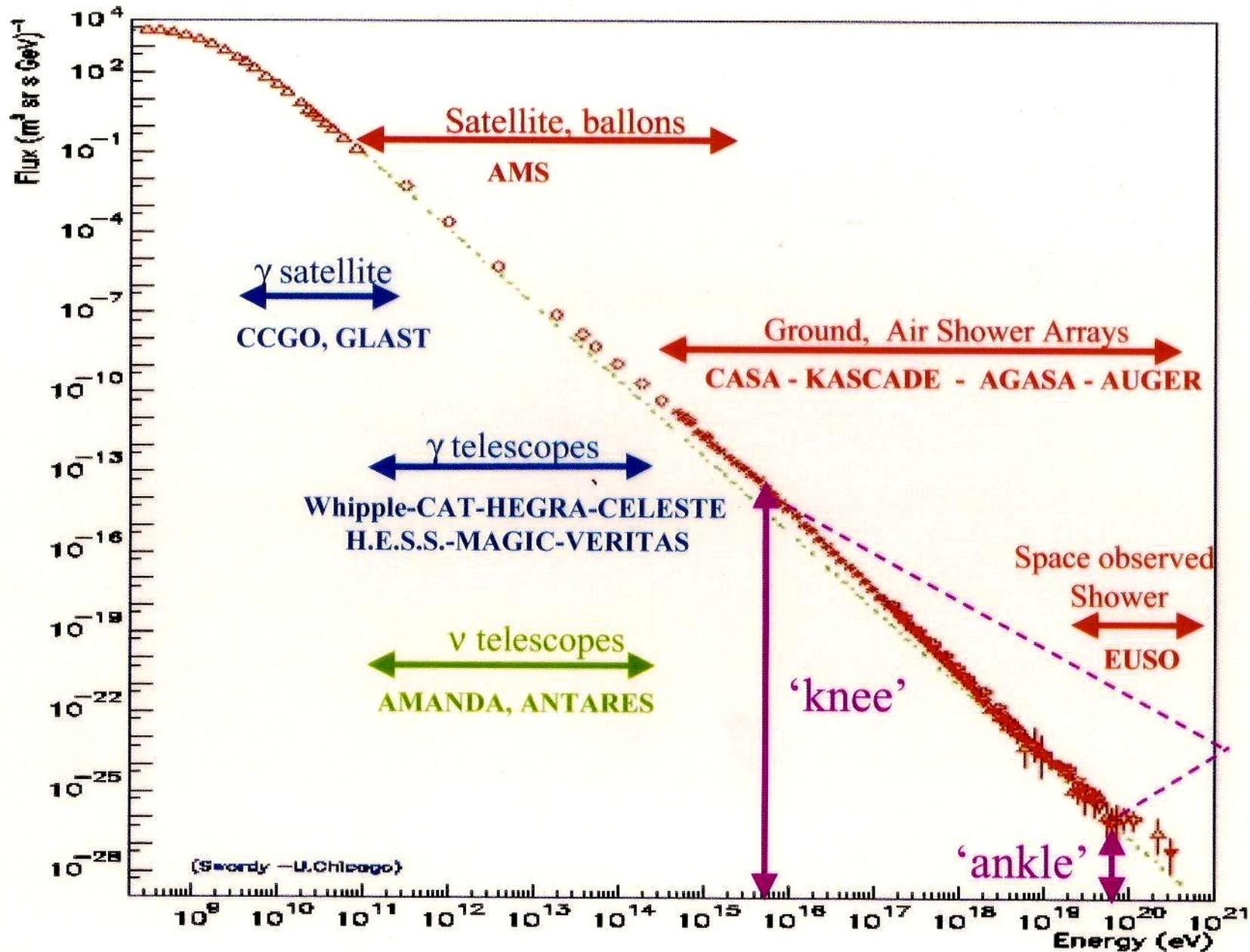
Sciame di particelle
secondarie =
RC secondari

Metodi di misura dei raggi cosmici

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

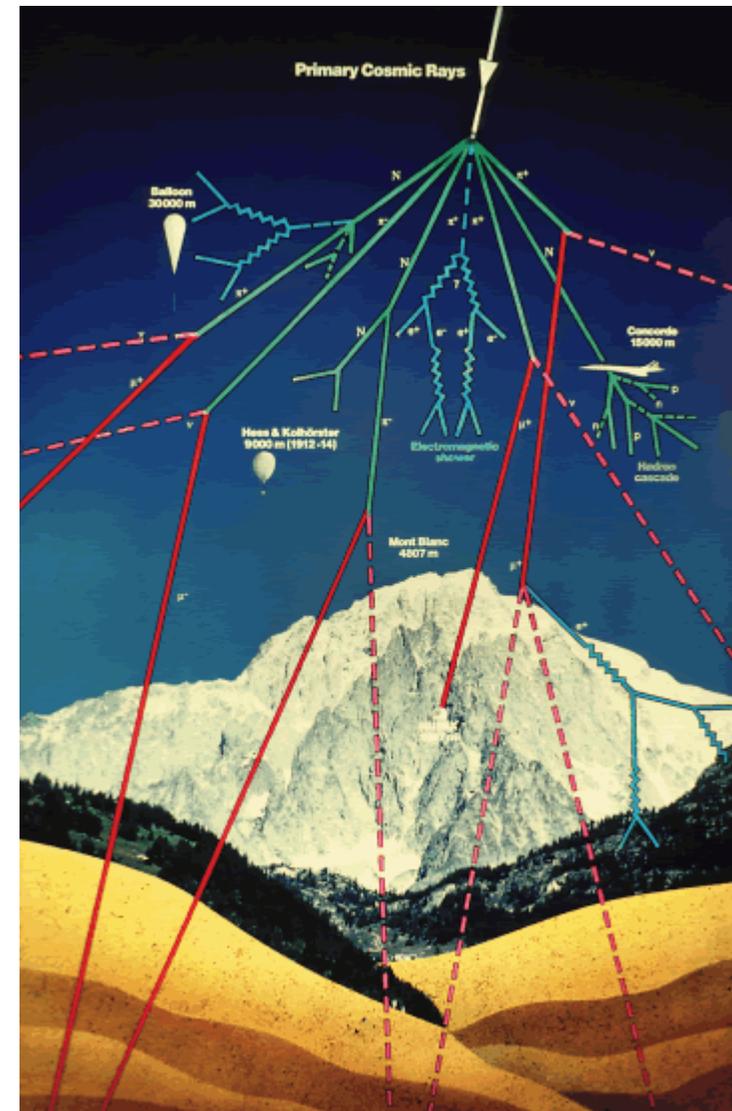


Charged Cosmic Ray Energy Spectrum



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)

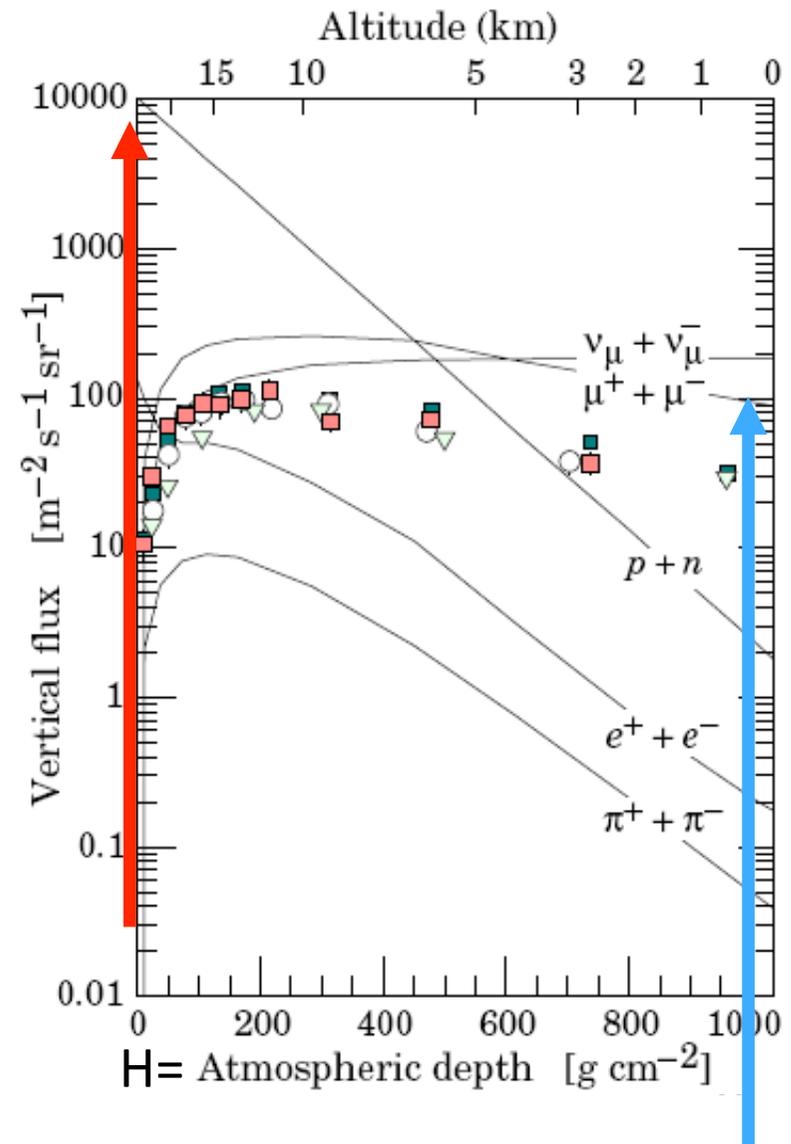


RC secondari

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^- , γ



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

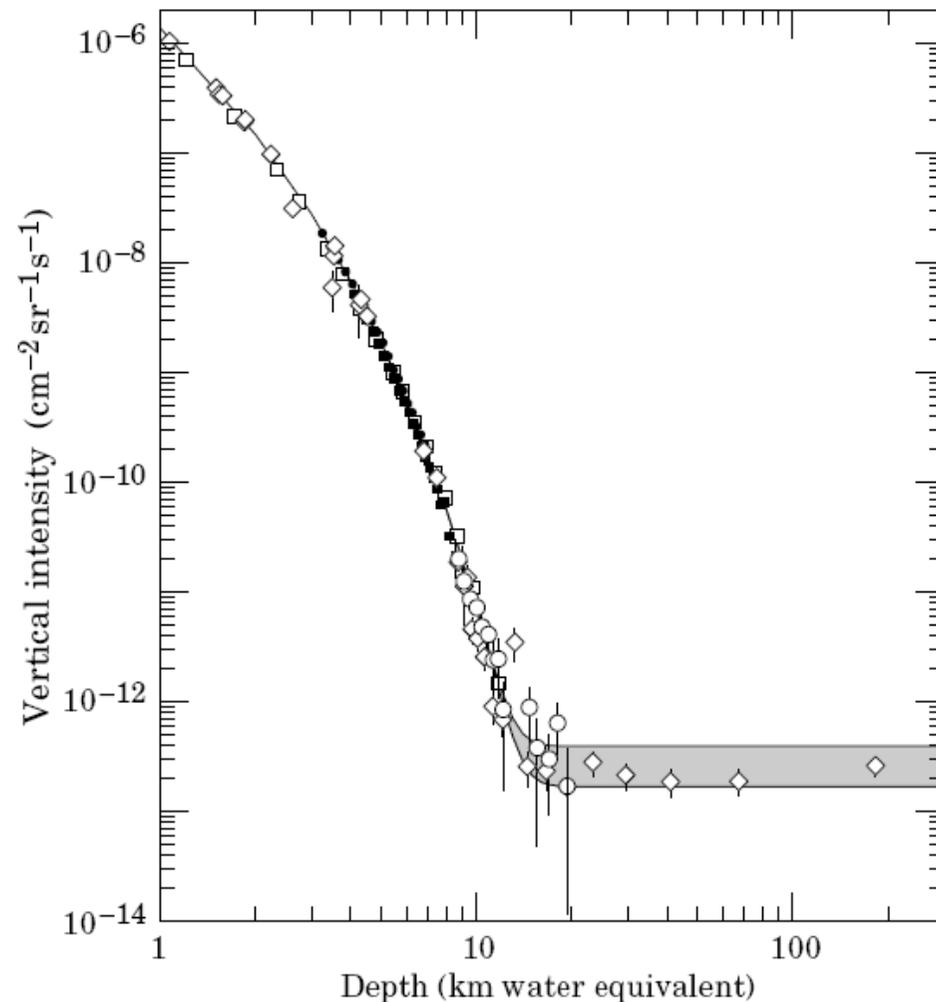
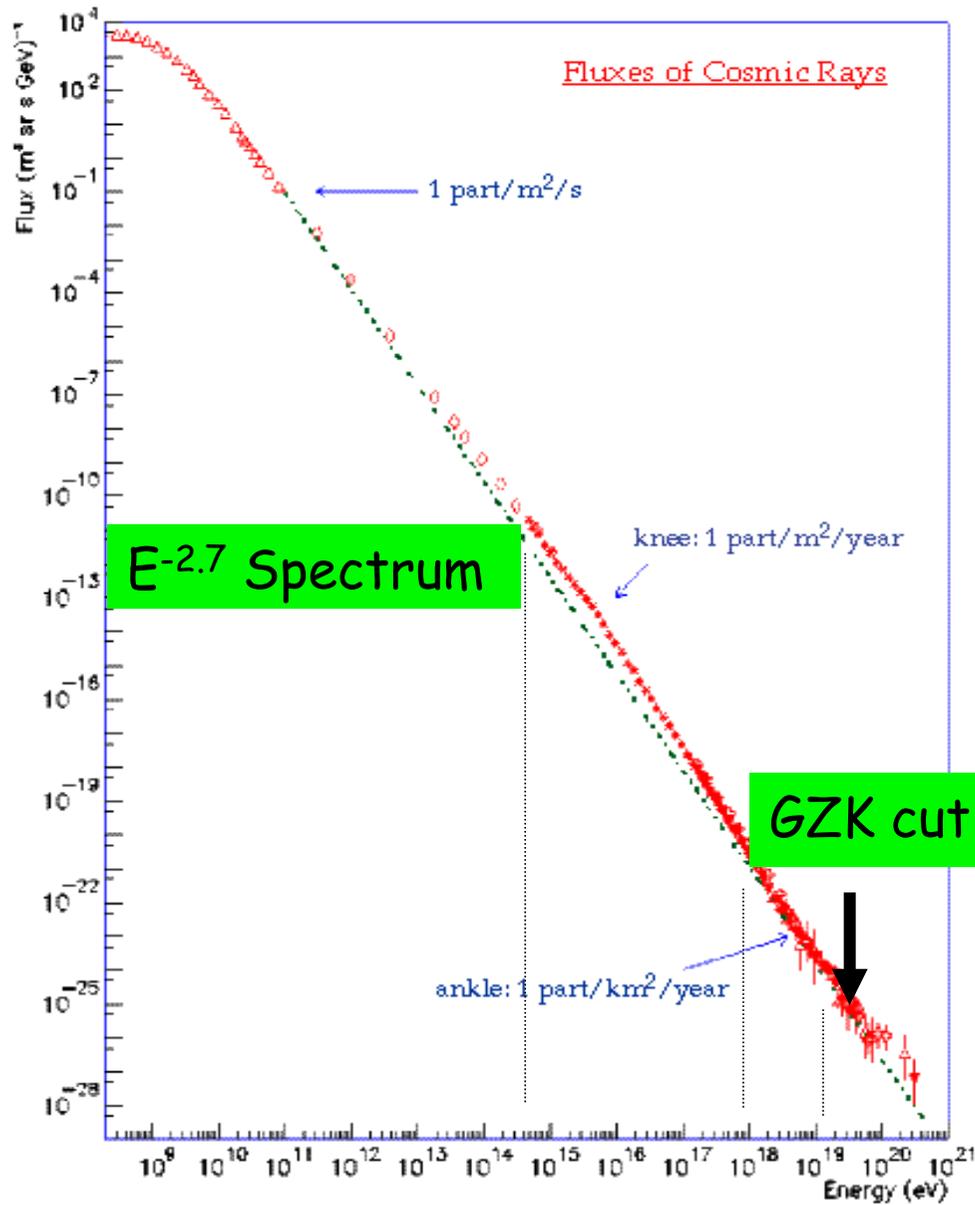


Figure 24.5: Vertical muon intensity vs depth (1 km.w.e. = 10^5 g cm $^{-2}$ of standard rock). The experimental data are from: \diamond : the compilations of Crouch [45], \square : Baksan [46], \circ : LVD [47], \bullet : MACRO [48], \blacksquare : Frejus [49]. The shaded area at large depths represents 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?

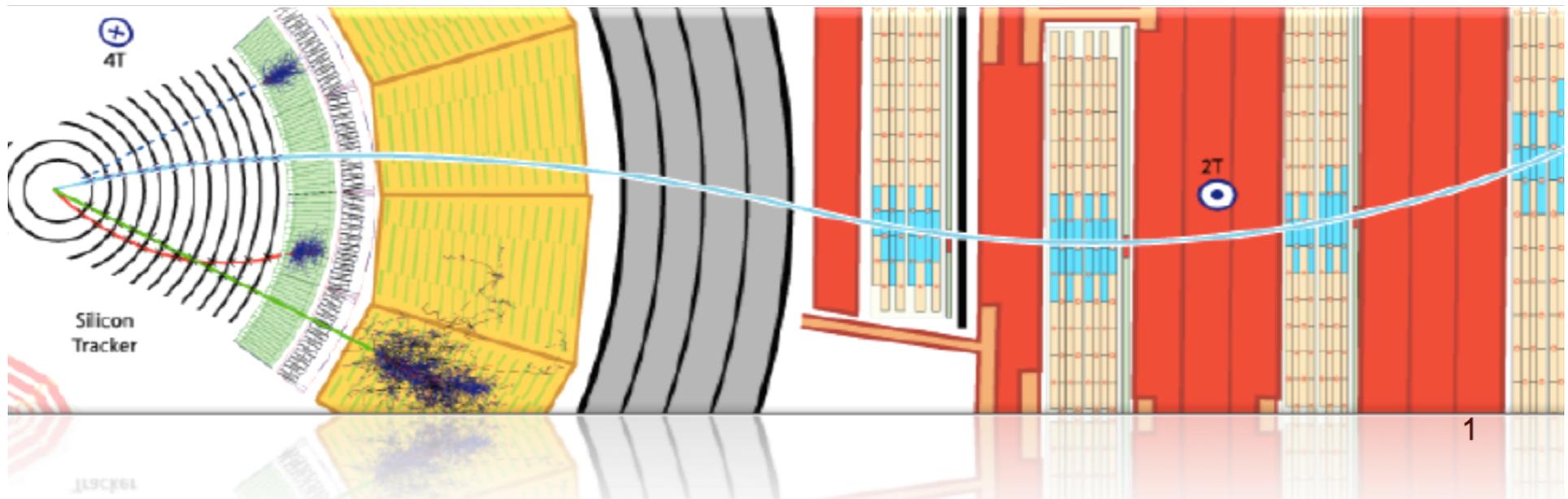
Misure/Effetti sperimentali	Informazioni Fisiche
<p>Composizione: $p \cong 85\%$ $He \cong 12\%$ $C,N,O \cong 10^{-2}$ $Fe \cong 10^{-4}$ $e^- \cong 2\%$ $e^+ \cong 10^{-4}$ $\bar{p} \cong 10^{-4}$</p> <p>Spettri energetici Composizione isotopica Ricerche di antinuclei Ricerche di nuove particelle</p> <p>Modulazione solare Taglio geomagnetico Fasce di radiazione Atmosfera ($23 X_0, 11 \lambda_1$)</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

4th July 2012



Trigger

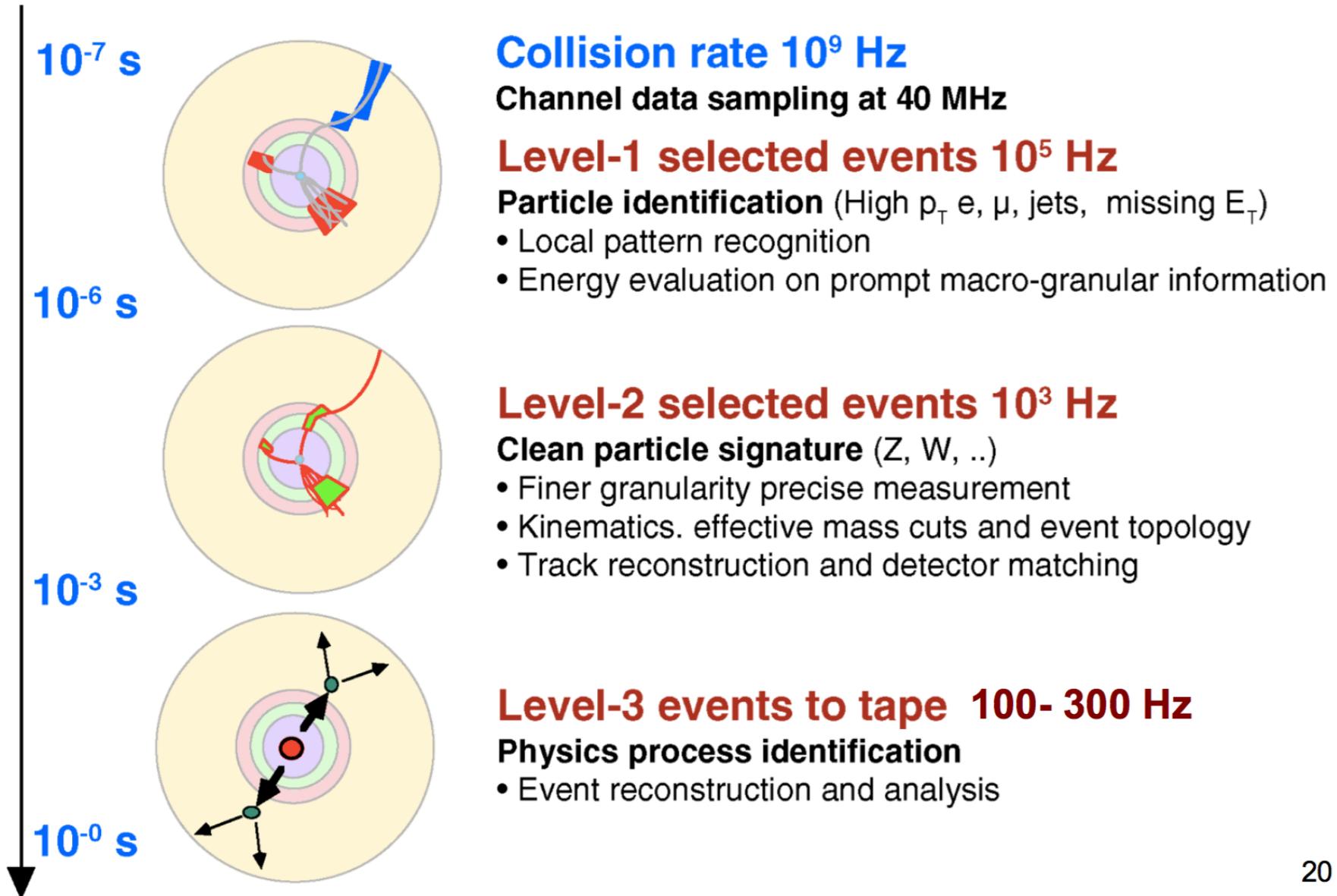
Definition: on-line identification of the most interesting physics events and selection for storage.

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

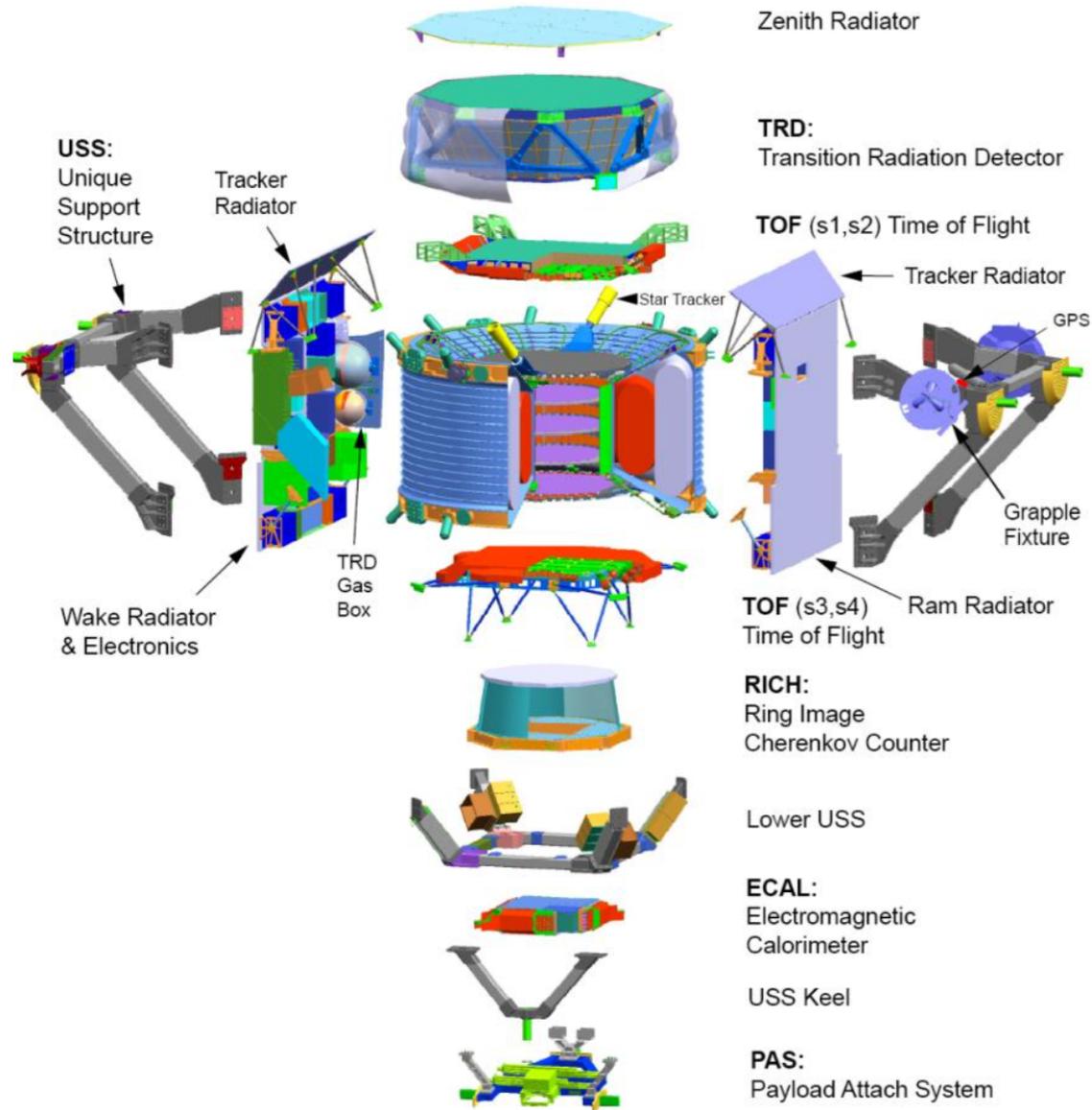
Therefore, reduce events to a number that can be stored for offline processing and analysis.

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

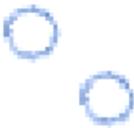
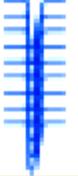
LHC Trigger Levels



AMS

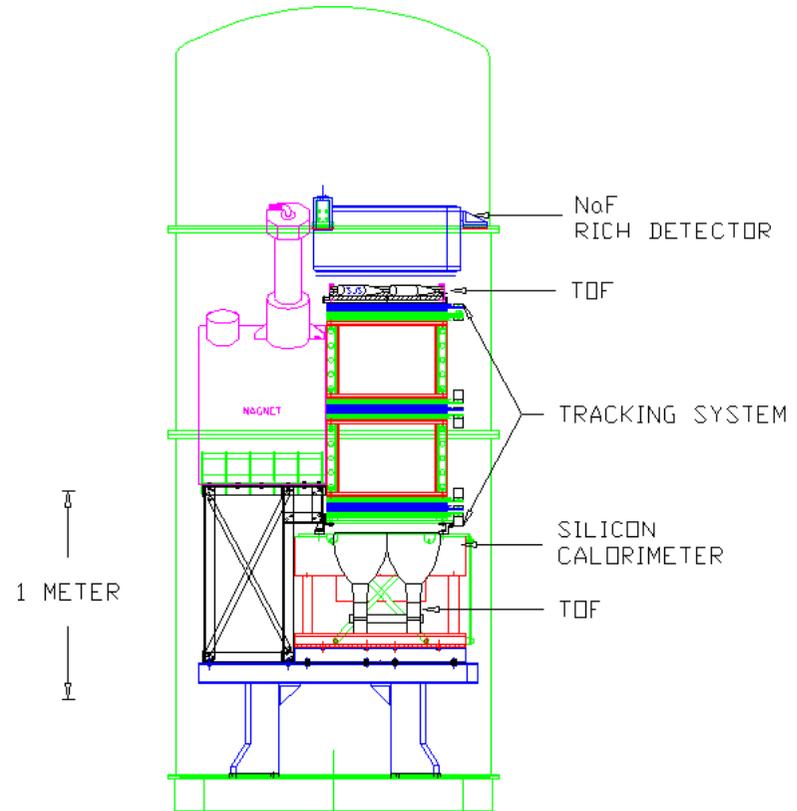
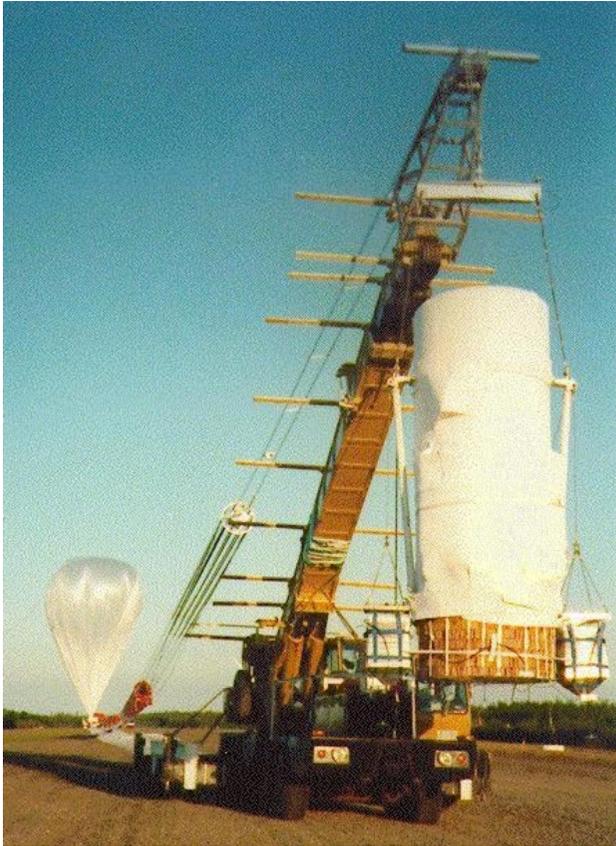


CR detectors

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

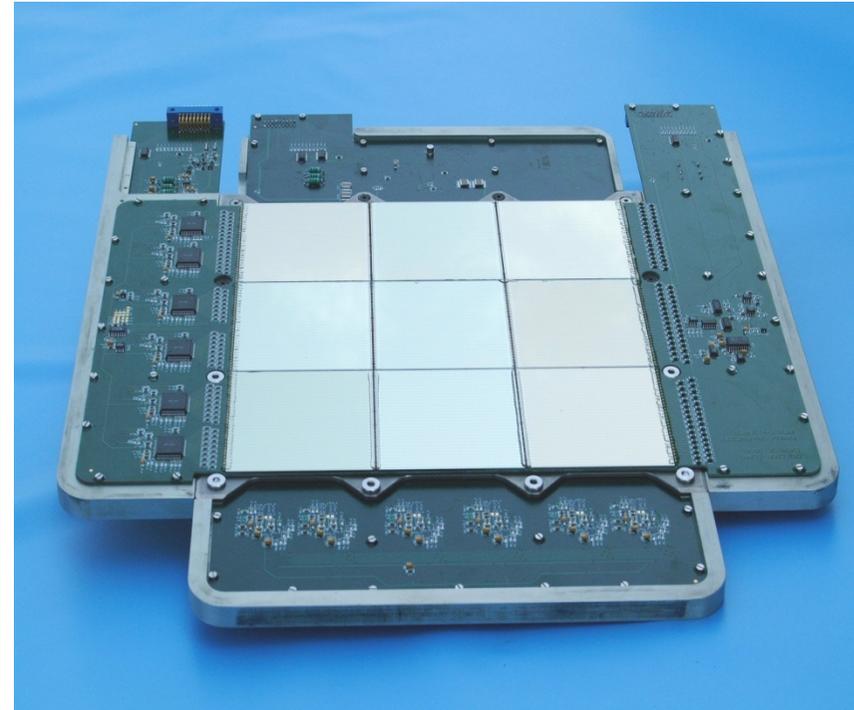
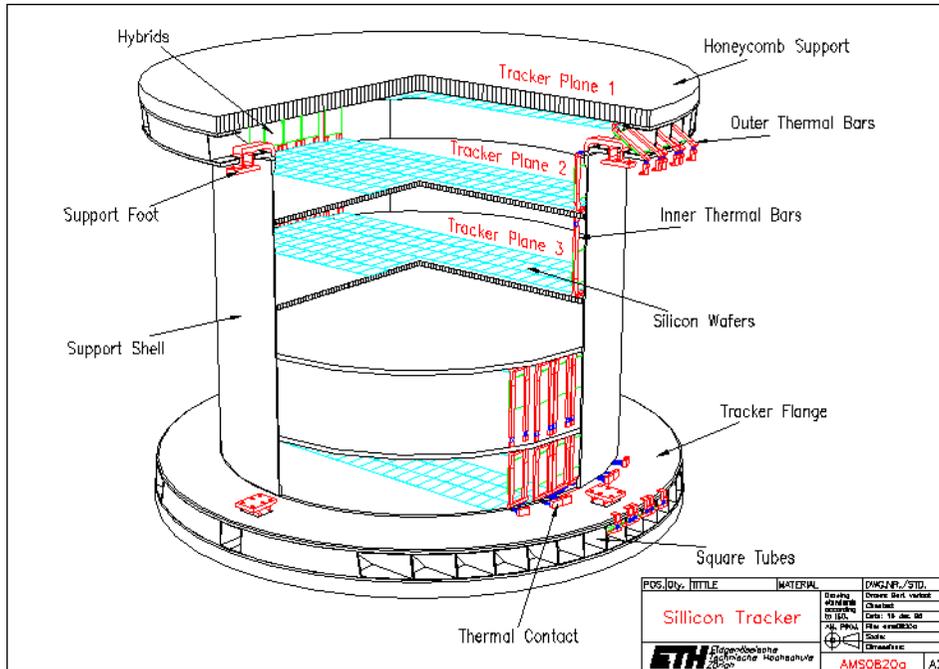
Esperimenti per misure dirette di RC

CR detectors



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

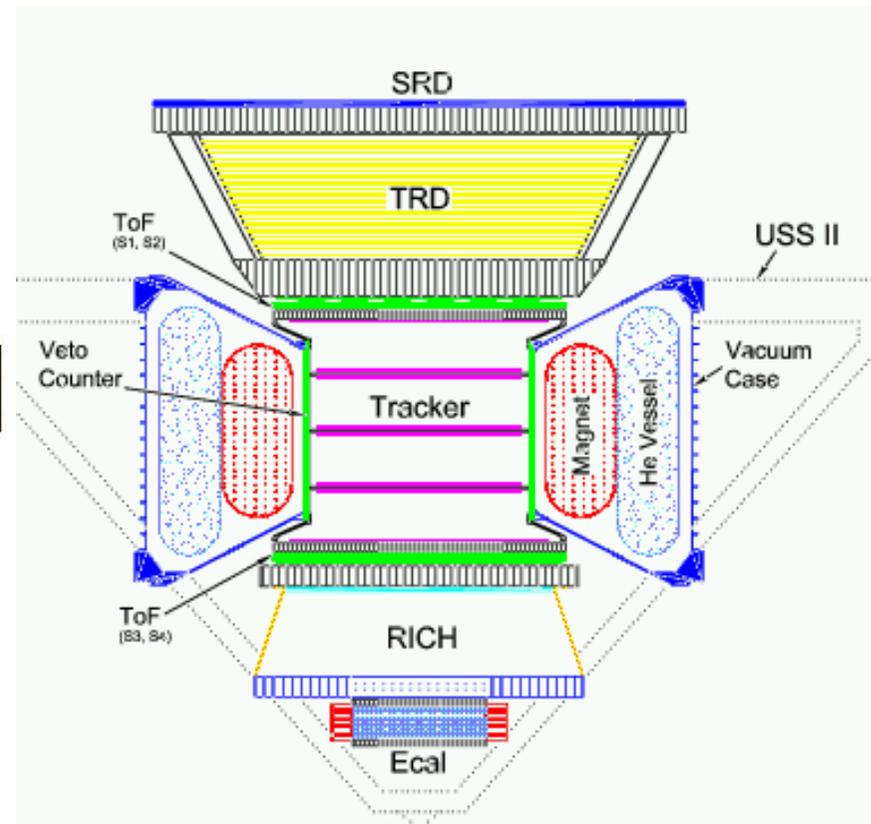
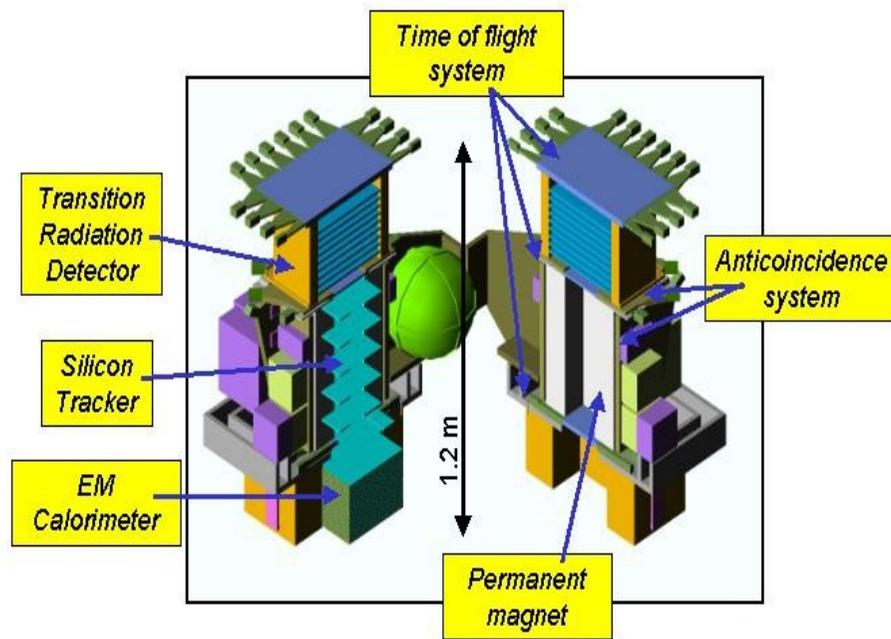
CR detectors



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,

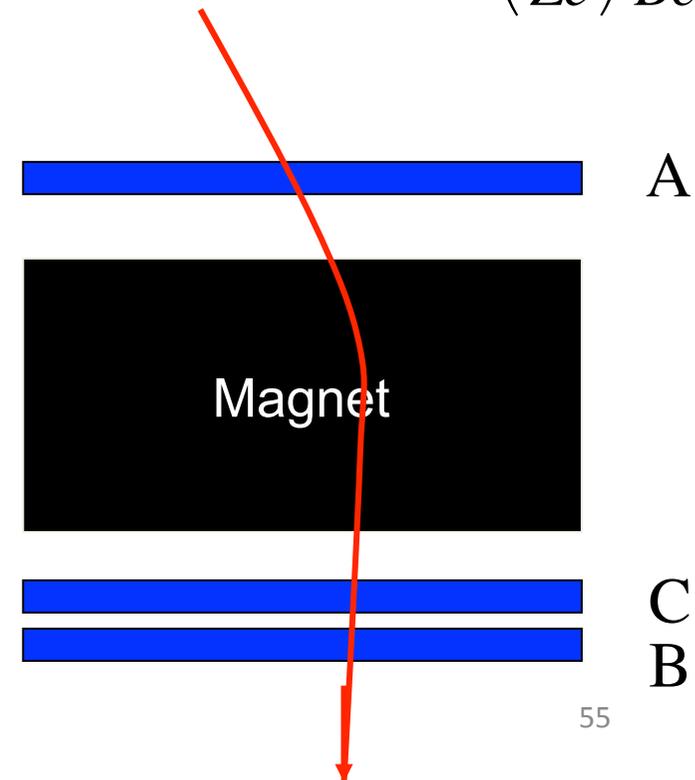
CR detectors



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.

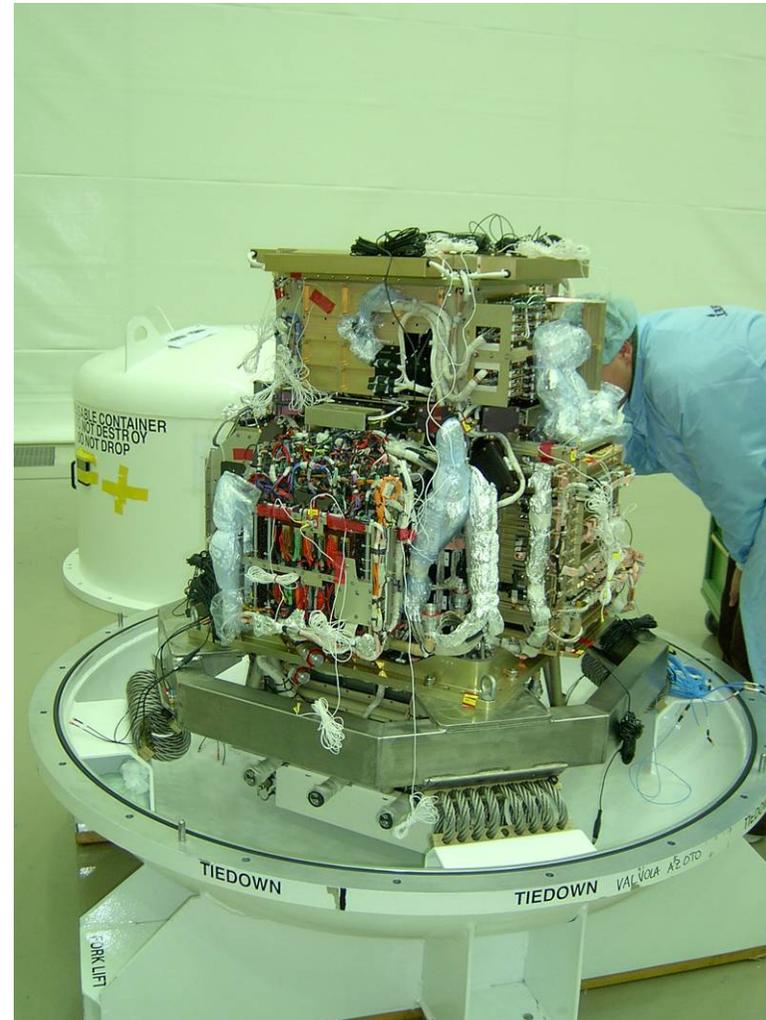
PAMELA

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

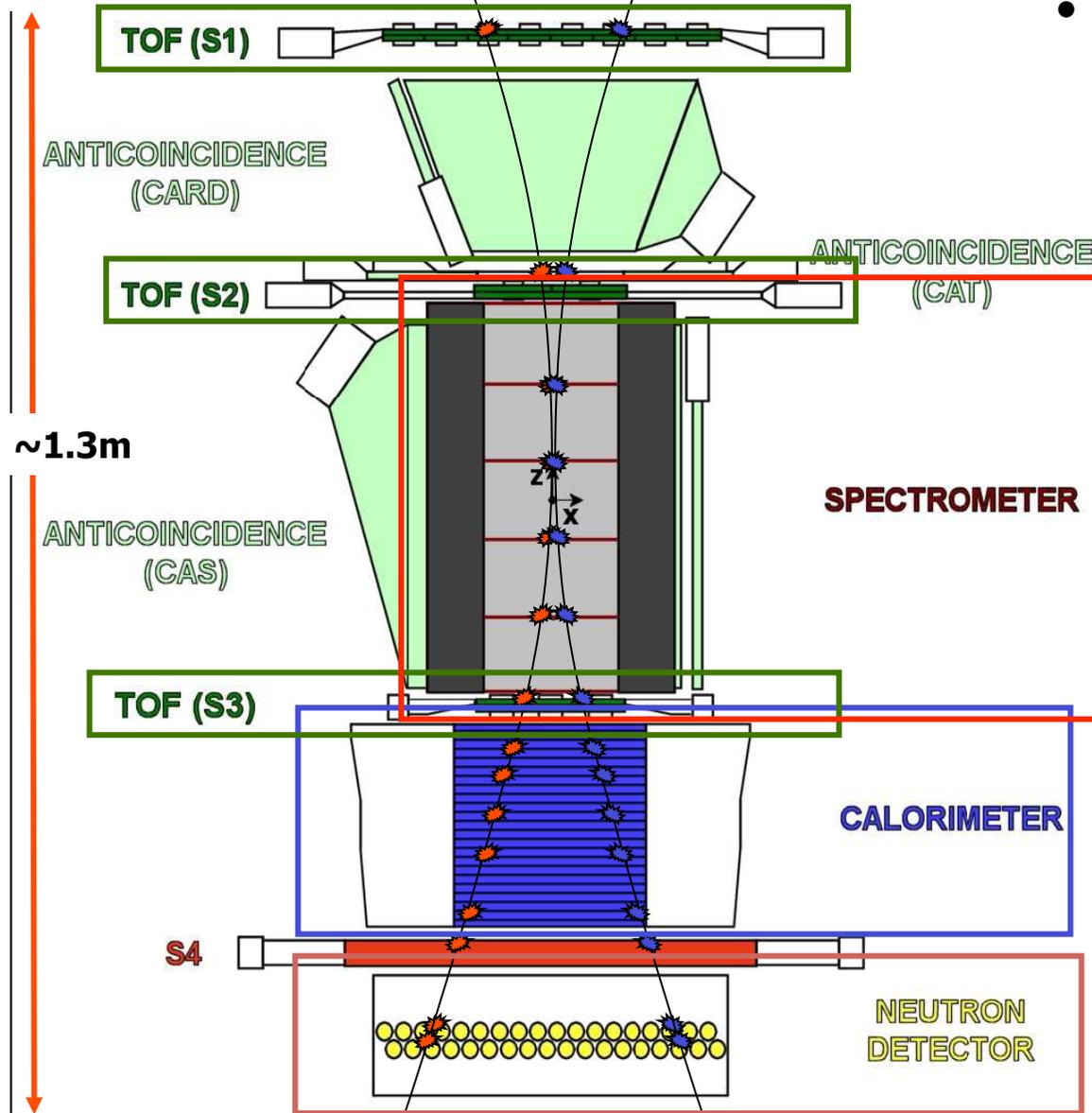


PAMELA

- 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**.

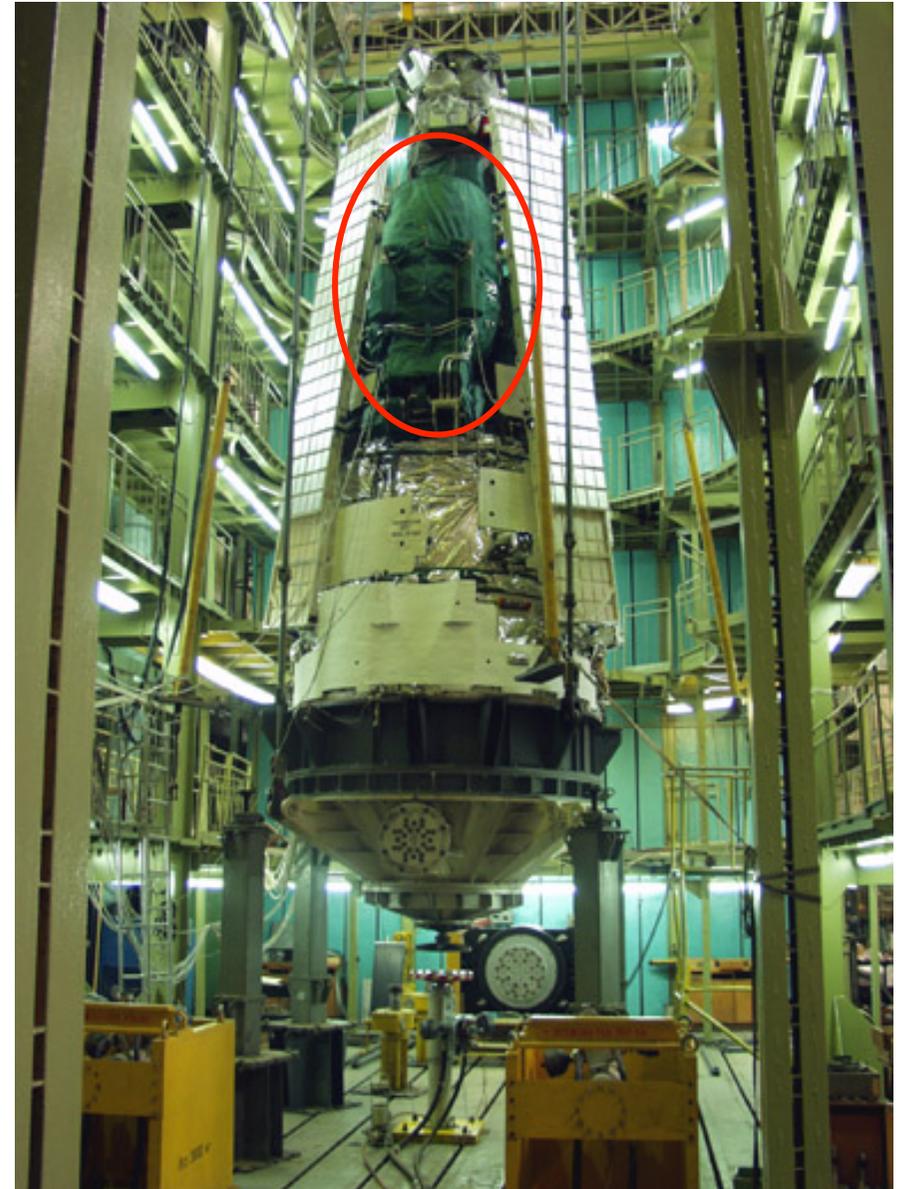
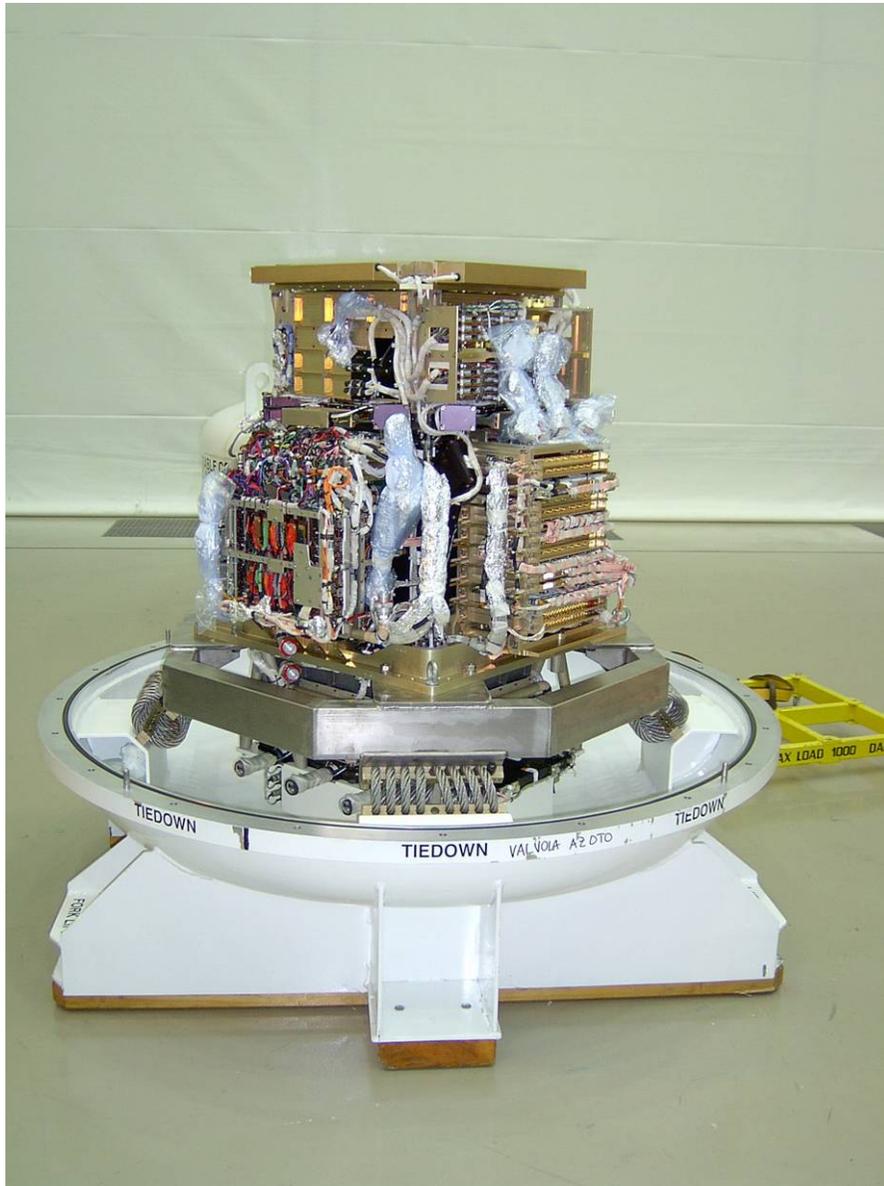


PAMELA



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

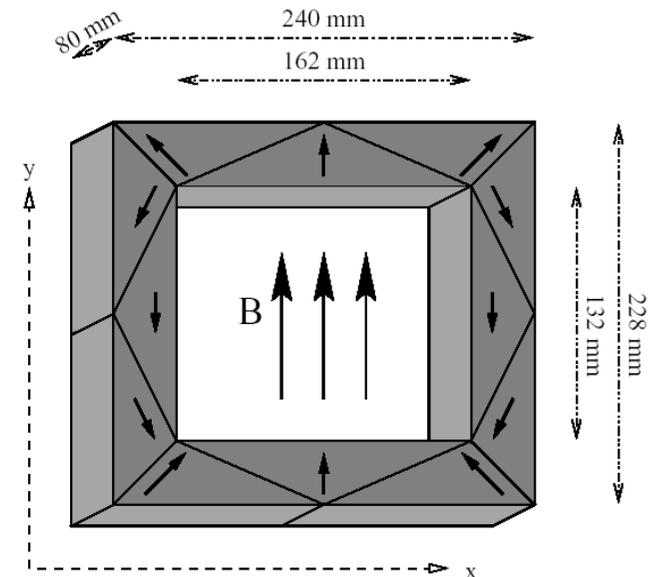
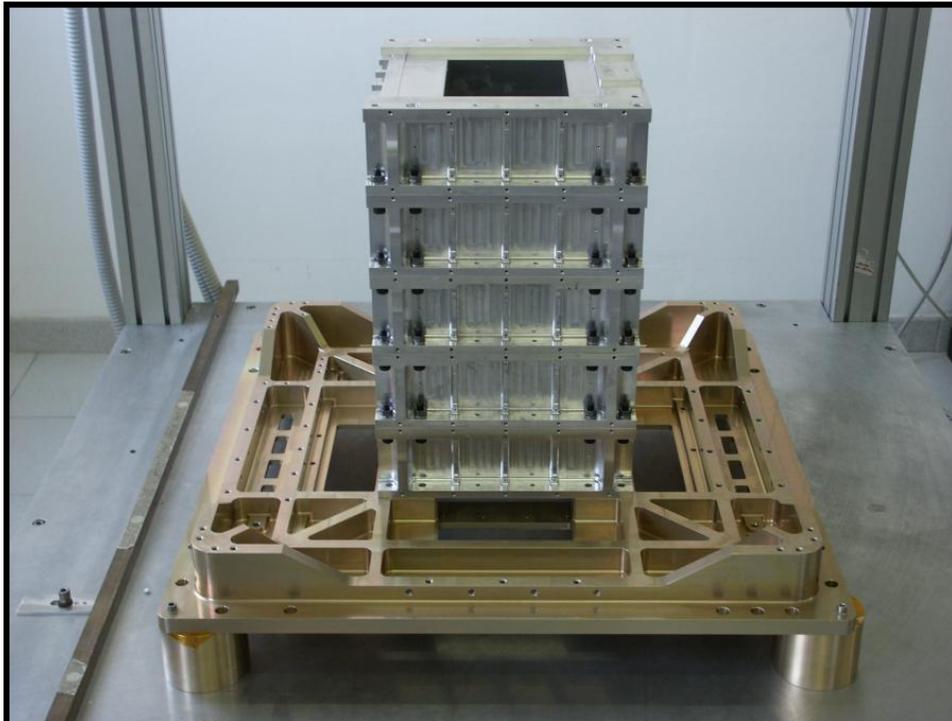


Lo Spettrometro Magnetico

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

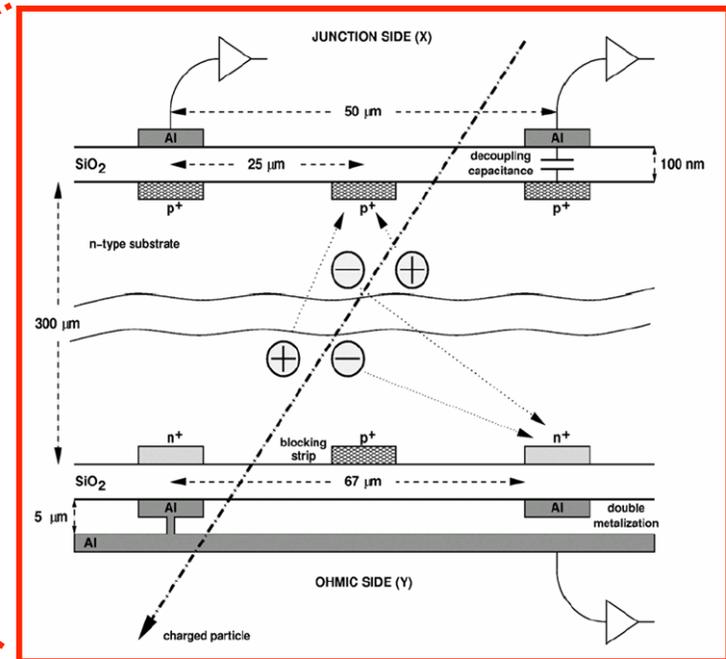
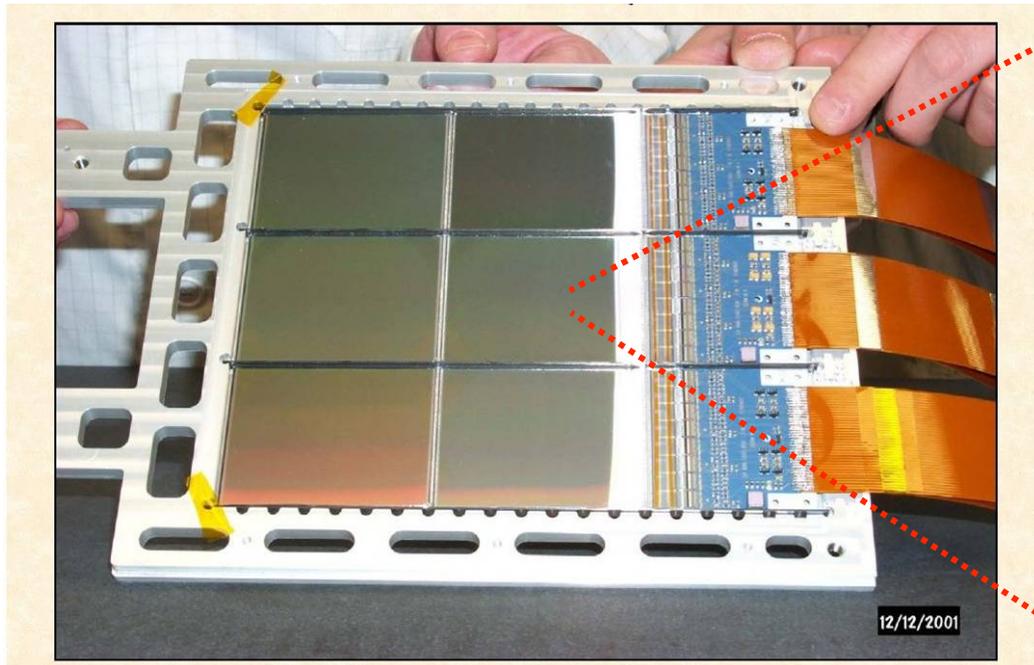
- Magnete Permanente

- 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

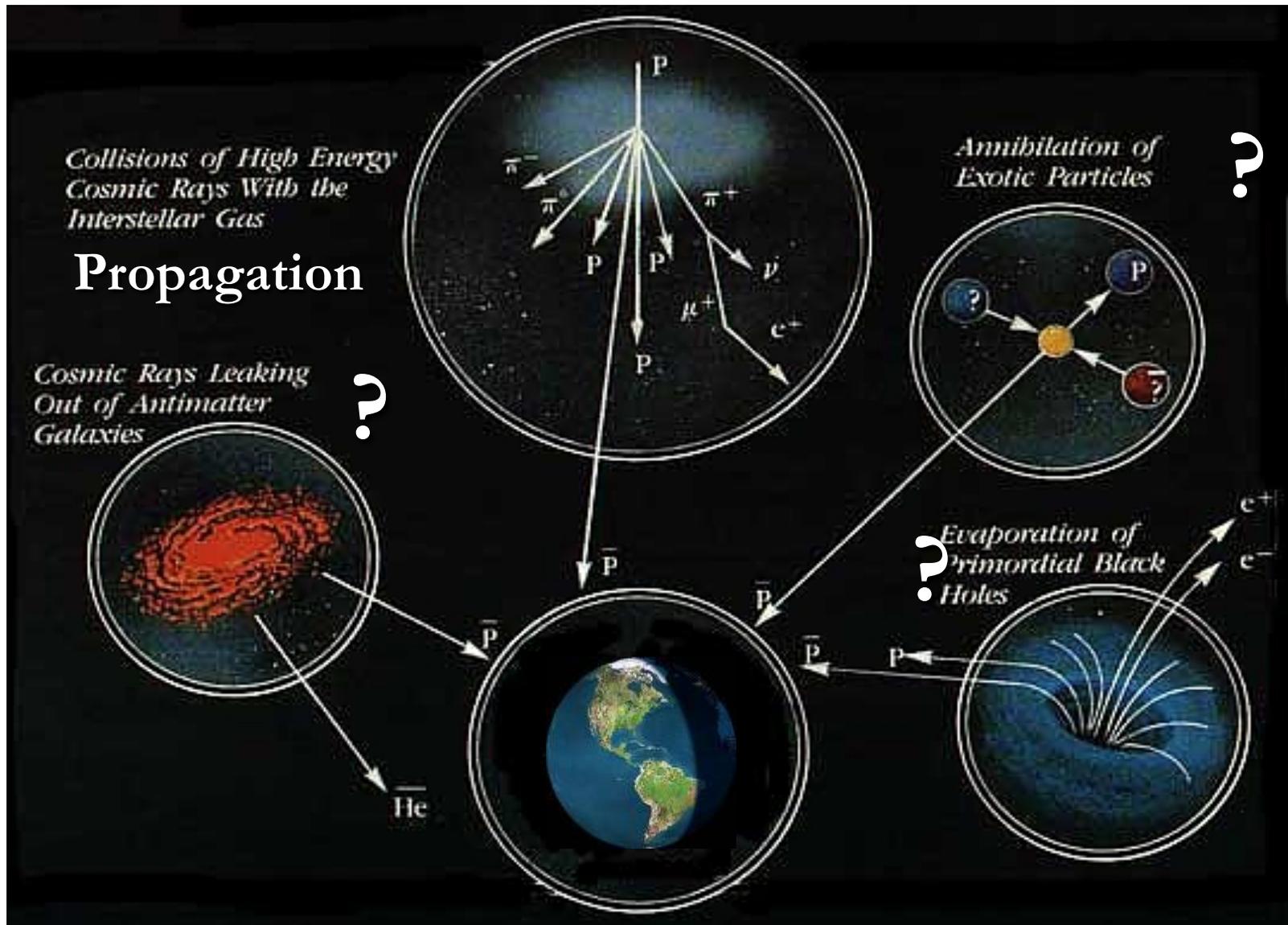


Calorimetro Elettromagnetico

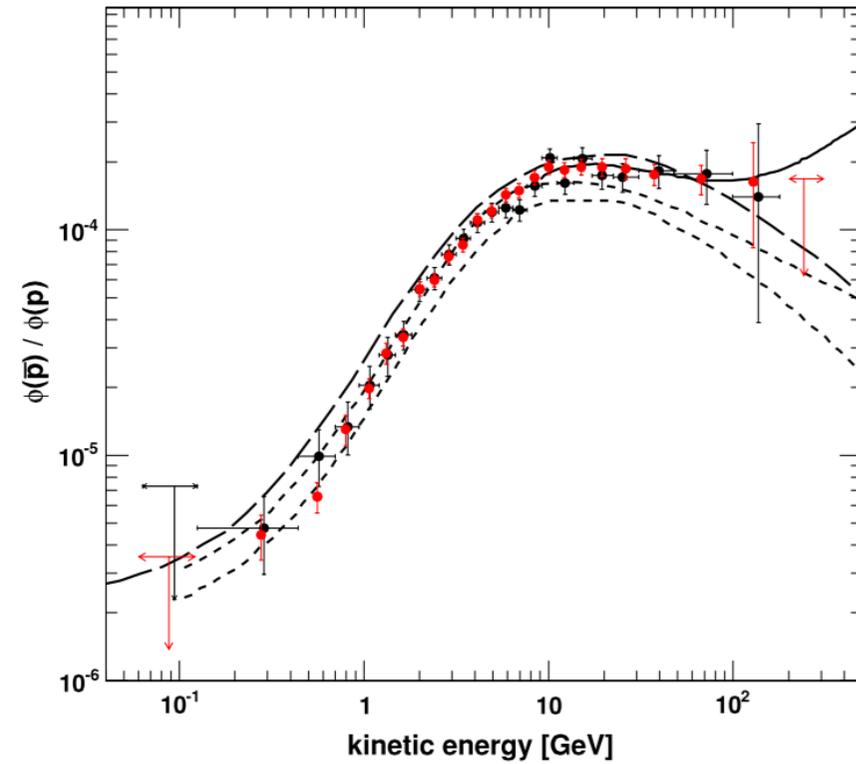
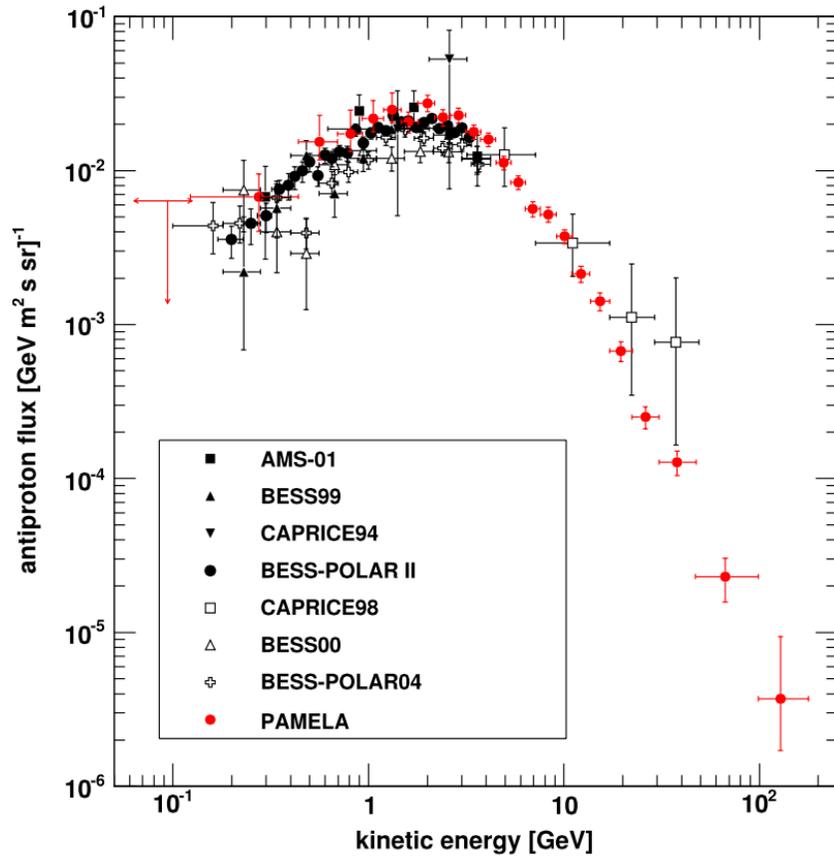
- 44 single-sided silicon sensor planes (380 μm thick) interleaved with 22 plates of tungsten absorber for a total depth of 16.3 X0 (0.6 nuclear interaction lengths).
- A self-trigger system was implemented in the calorimeter read-out electronics to measure high-energy electrons



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

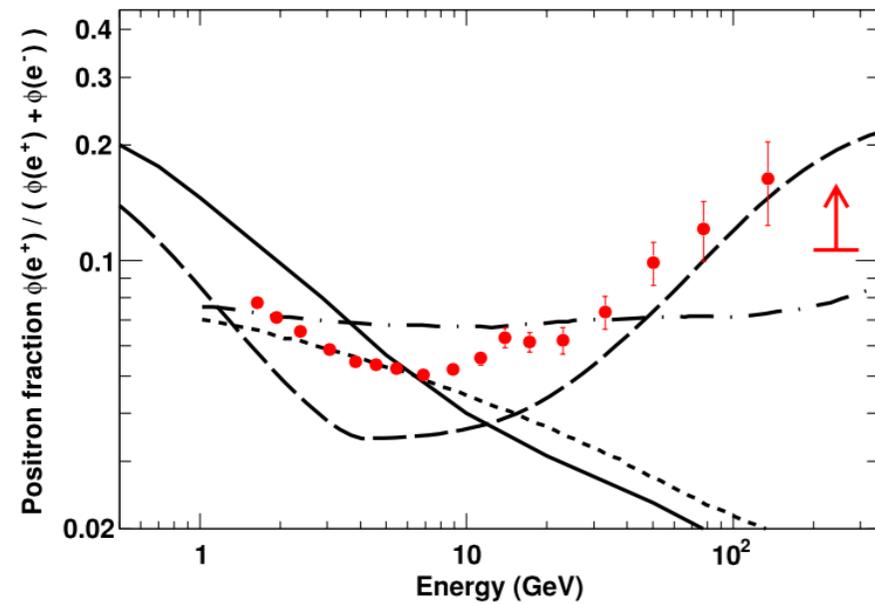
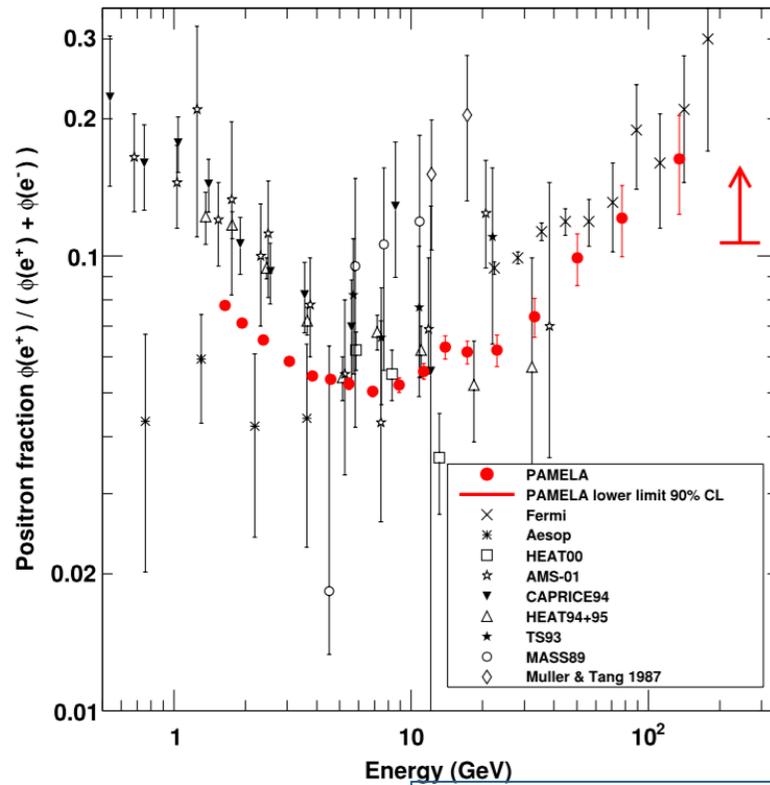


Antiprotons



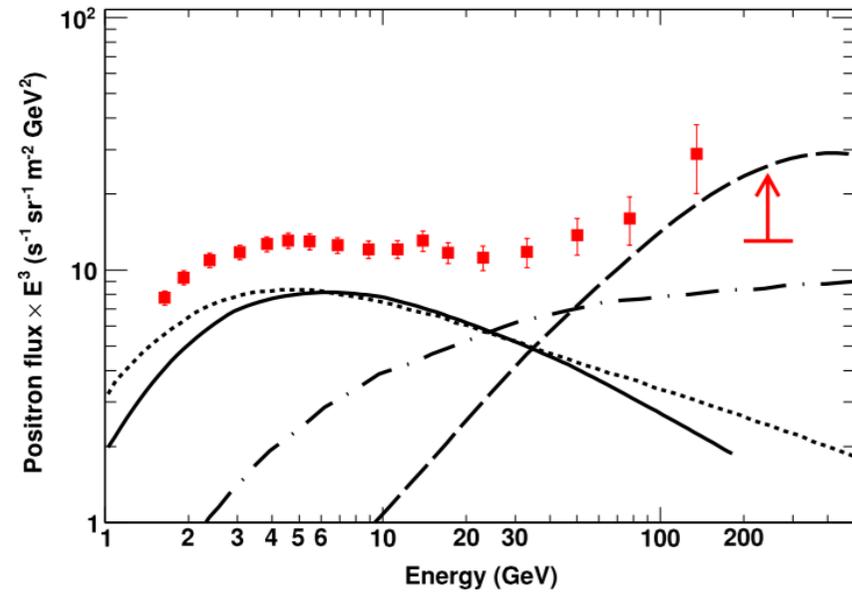
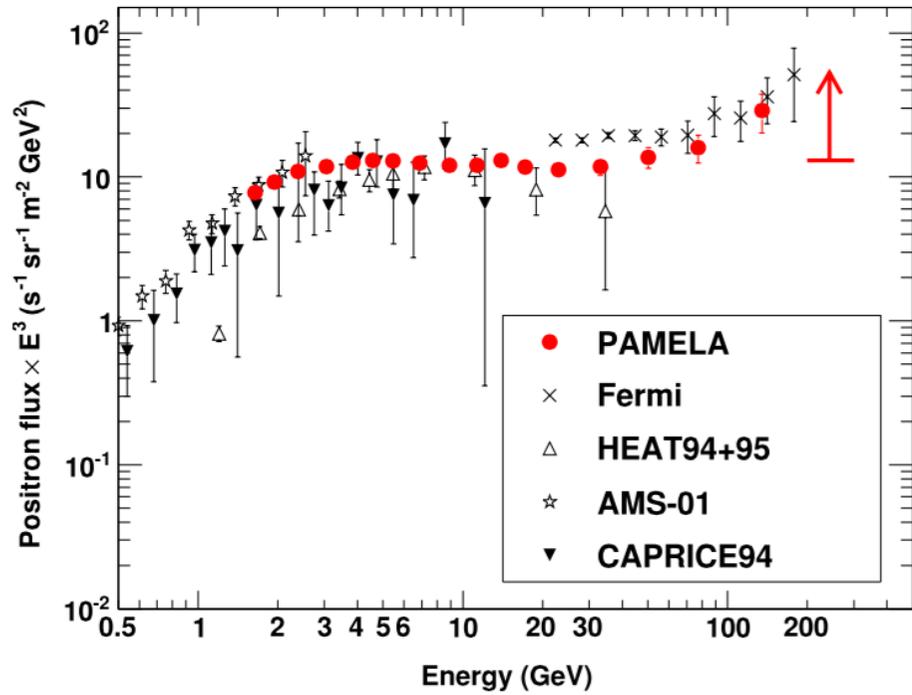
O. Adriani et al. Physics reports 544 (2014)

Positrons



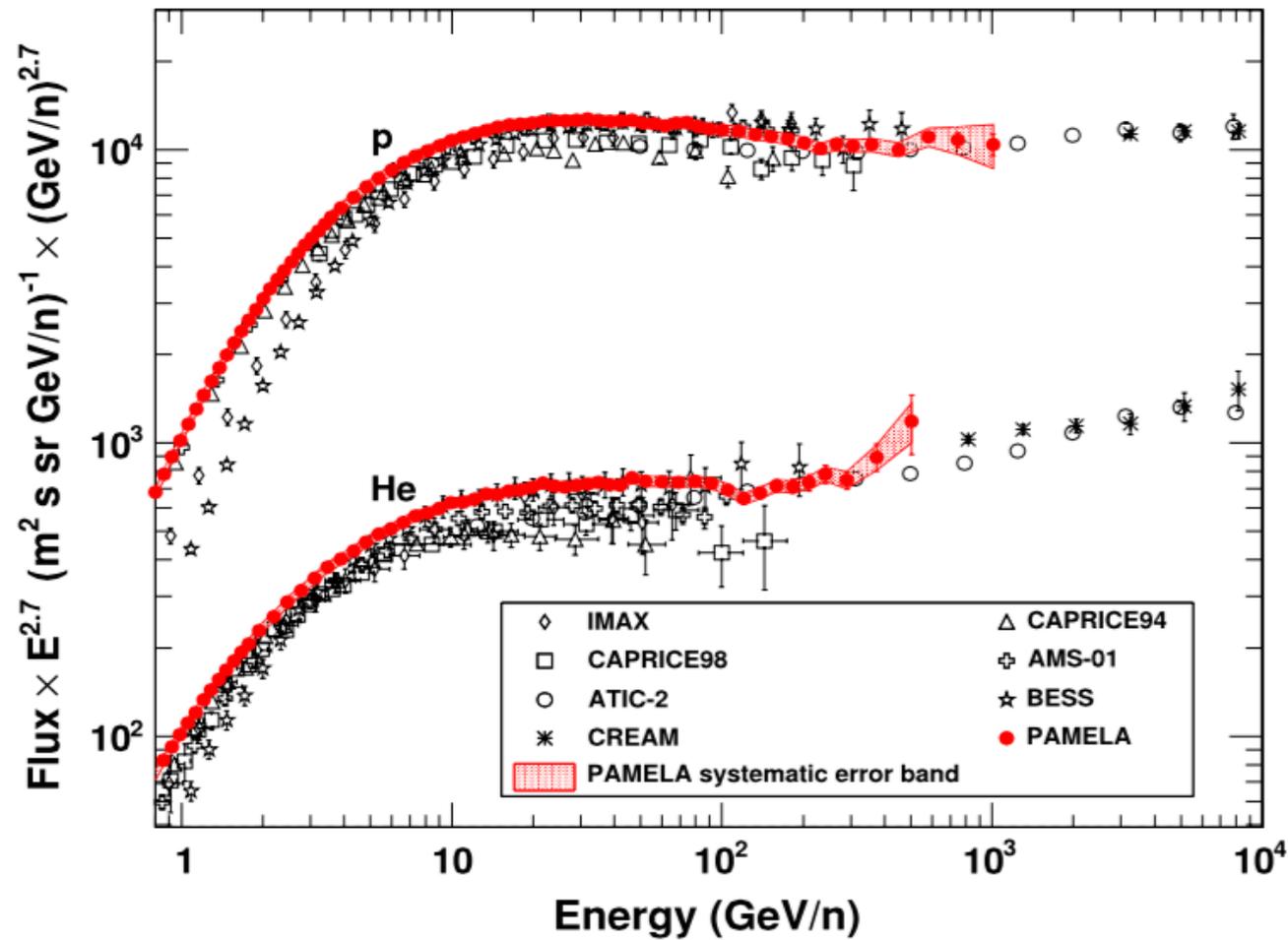
O. Adriani et al. Physics reports 544 (2014)

Positrons



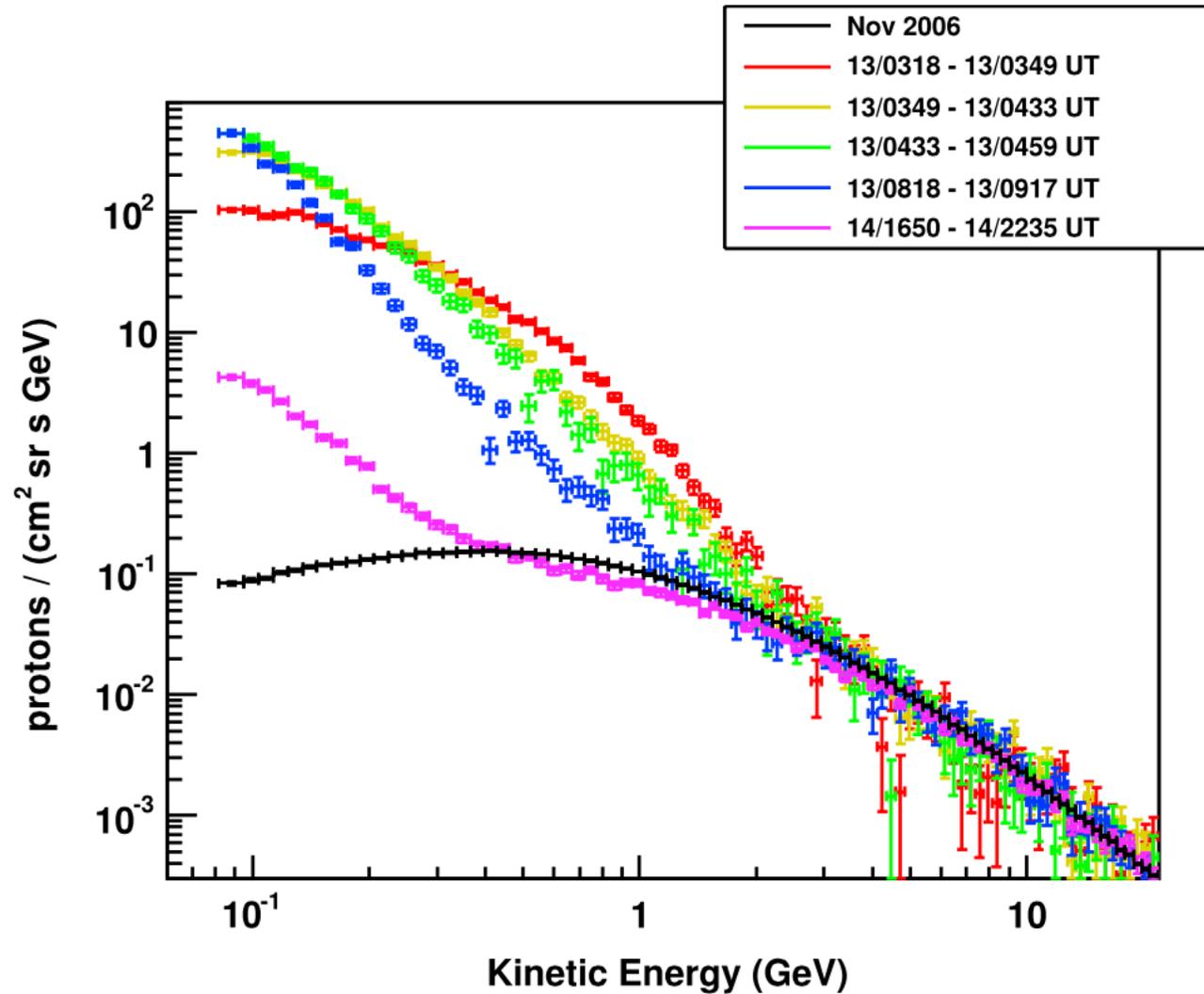
O. Adriani et al. Physics reports 544 (2014)

Galactic Cosmic Rays



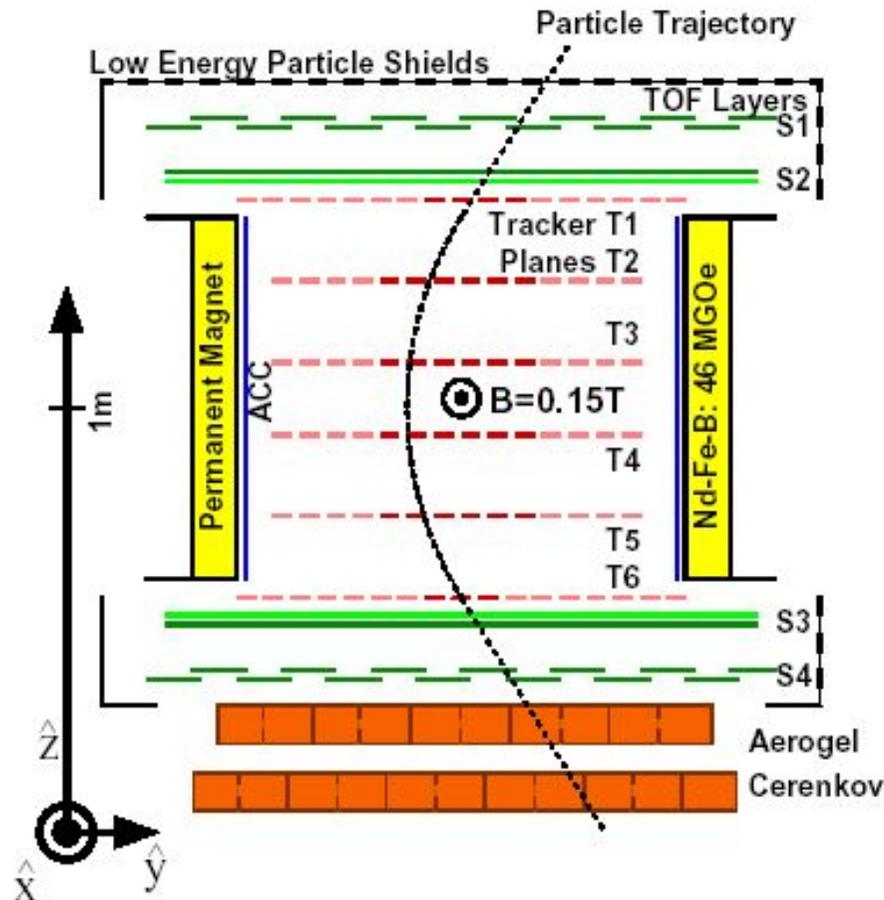
O. Adriani et al. Physics reports 544 (2014)

Solar events



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

AMS01



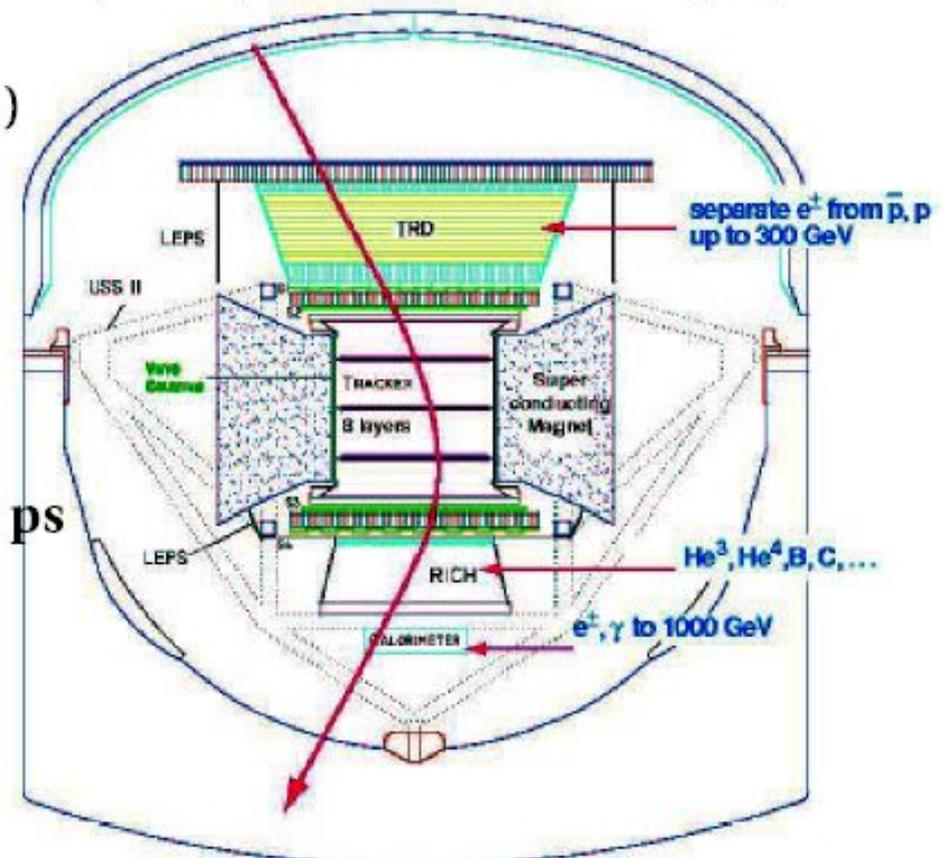
- ◆ Magnet : 1024 blocks of $Nd_2Fe_{14}B$
- ◆ TOF: four planes of scintillators
 - velocity and Z measurement
- ◆ Tracker: six planes of DS Silicon Microstrip Detectors
 - Charge sign and Rigidity measurements
 - Z measurement up to Oxygen
- ◆ Aerogel Threshold Cerenkov
 - velocity measurement
- ◆ Anticounters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

AMS is a Large Acceptance Magnetic Spectrometer for:

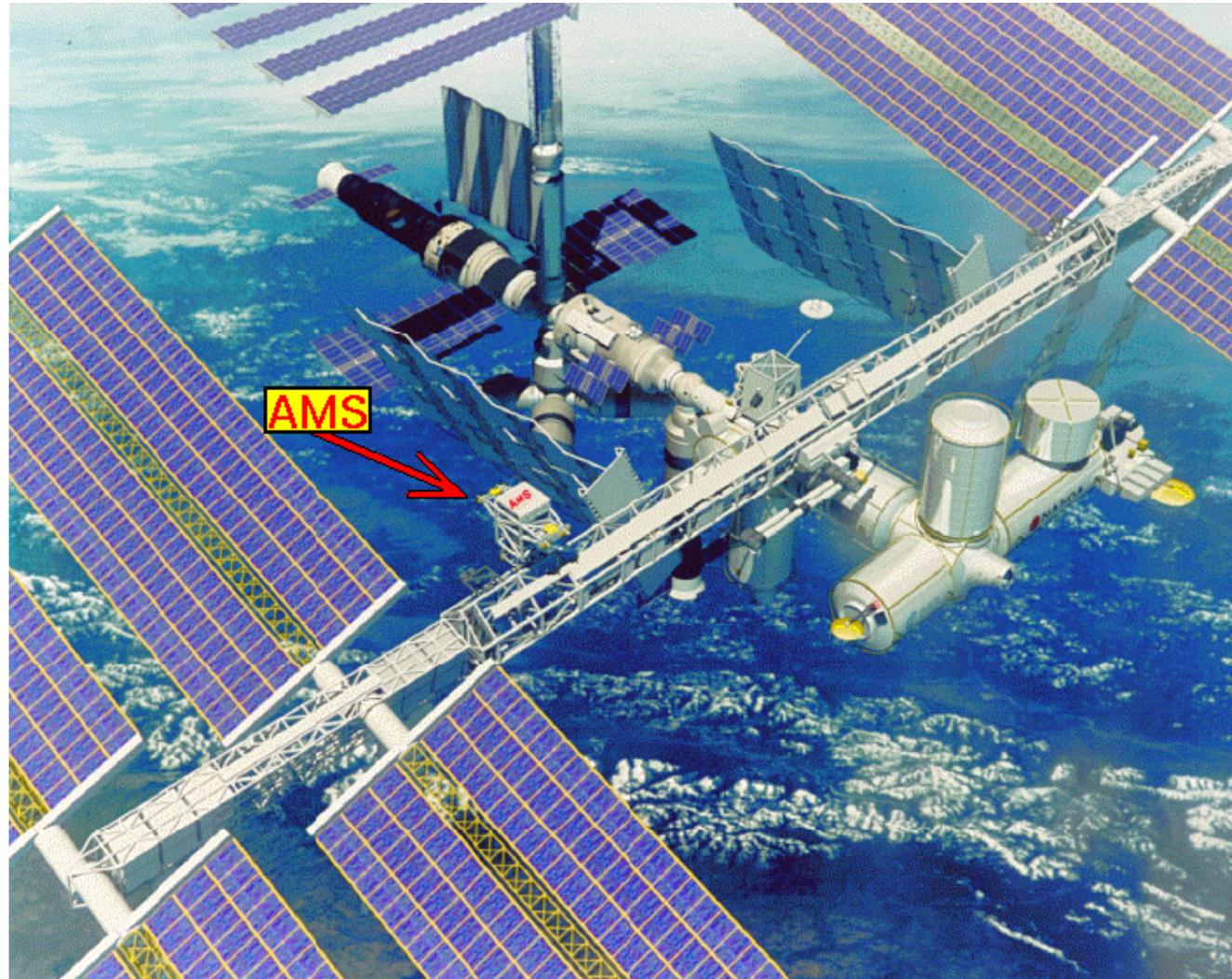
- Antimatter Search ($\overline{\text{He}}, \overline{\text{C}}$)
- Accurate measurements of Cosmic-ray composition and energy spectra
- Dark Matter Signatures ($e^+, \overline{p}, \overline{D}, \gamma$)

→ *High-energy γ -ray sky exploration*

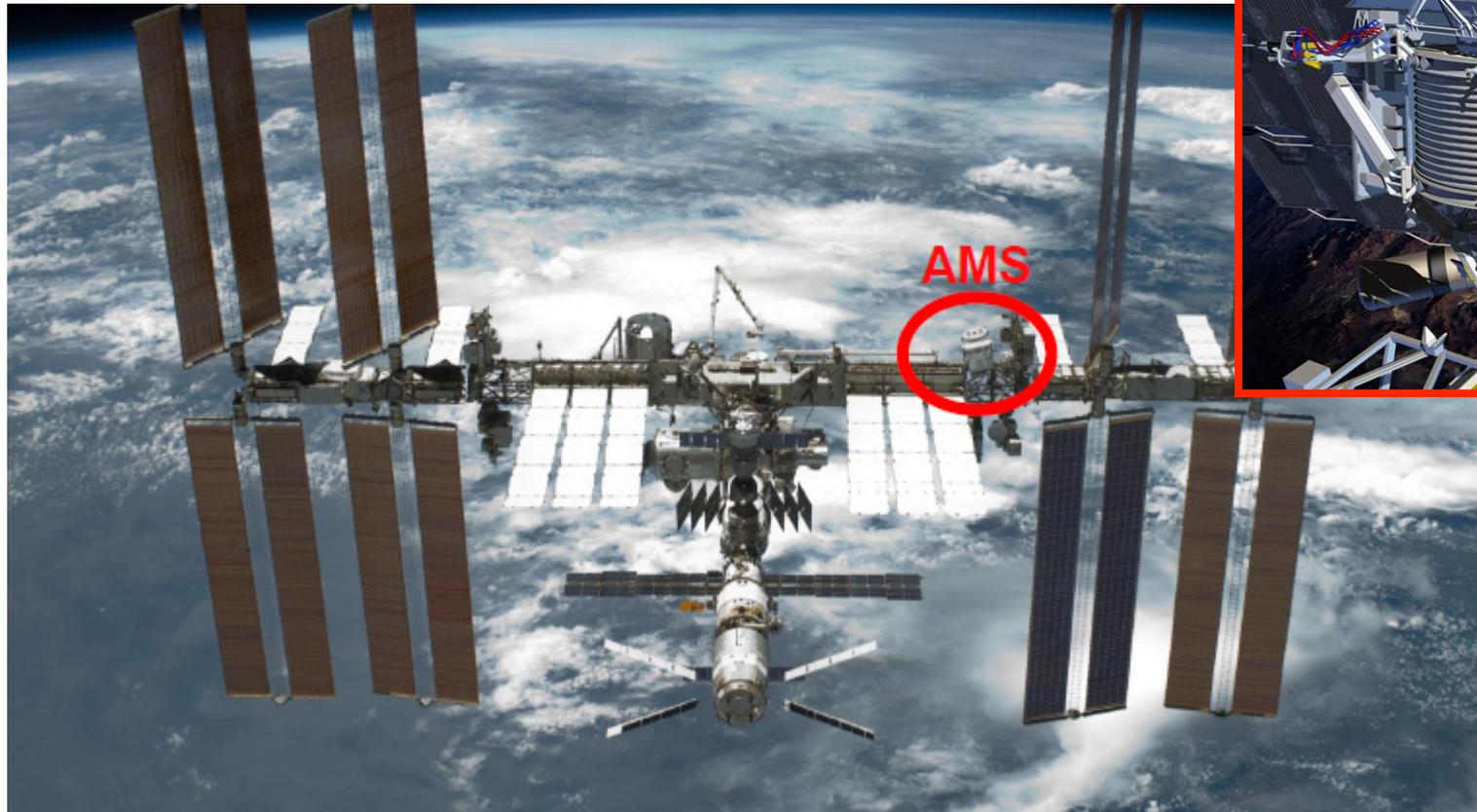
- Superconducting Magnet: **0.8 T**
- 4 layers of Scint. Counters (ToF): **120 ps**
- 8 layers Si-Tracker: **MDR 2 – 3 TeV**
- Gaseous TRD: **h/e $10^2 - 10^3$**
- Pb-Sci. ECAL: **h/e $O(10^3)$**
- Aerogel (1.05) RICH: **$\frac{d\beta}{\beta} = 0.07 - 1\%$**



AMS



Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) Experiment



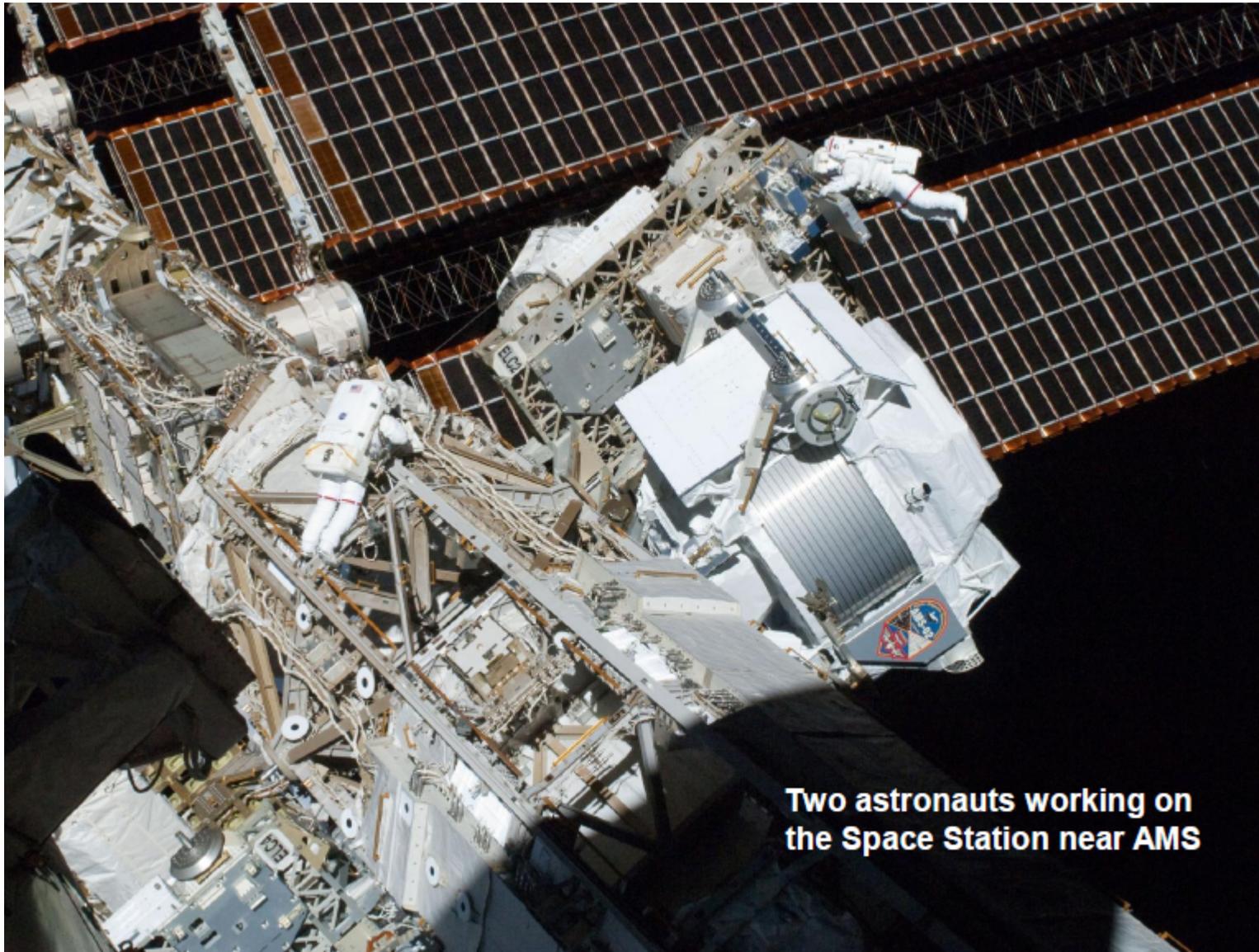
- **ISS : 108 m x 80m, 420 t**
- **orbit height 400km**

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

AMS Transfer to the Shuttle, 26 March 2011



© Michele Famiglietti / AMS Collaboration

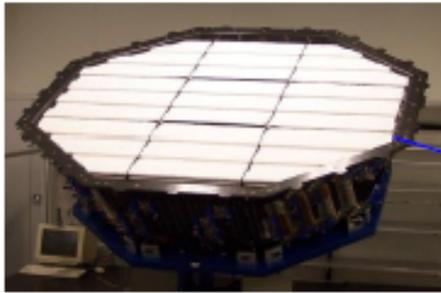


Two astronauts working on the Space Station near AMS

AMS features



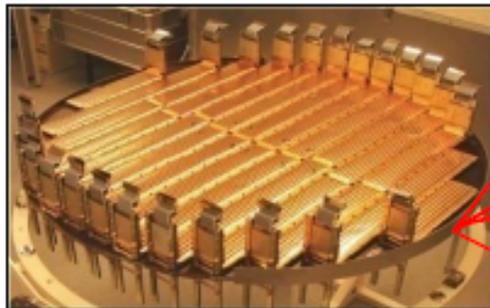
TRD



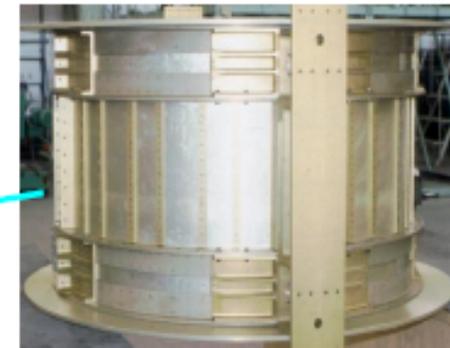
TOF



Silicon Tracker



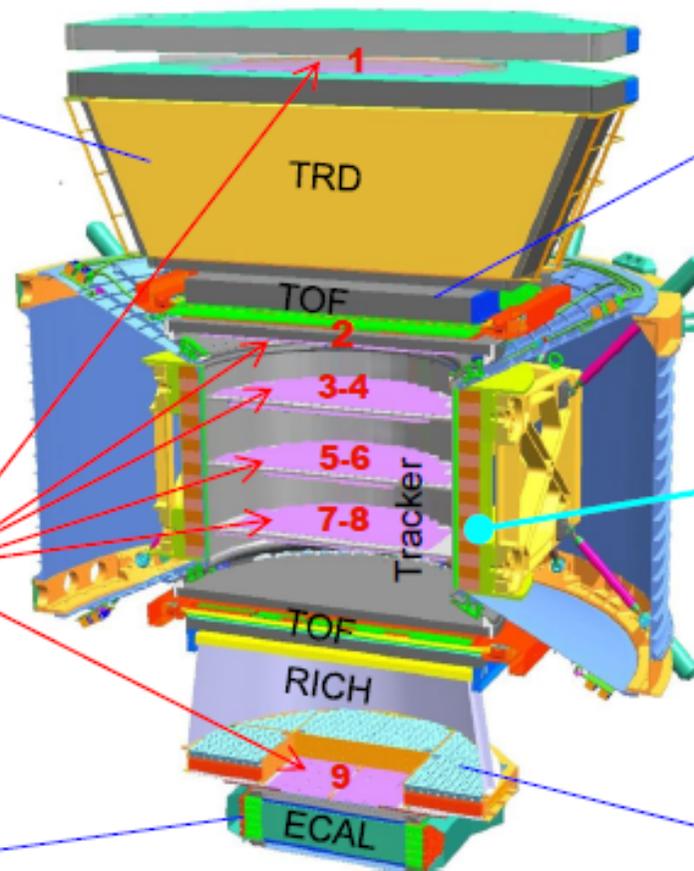
Magnet

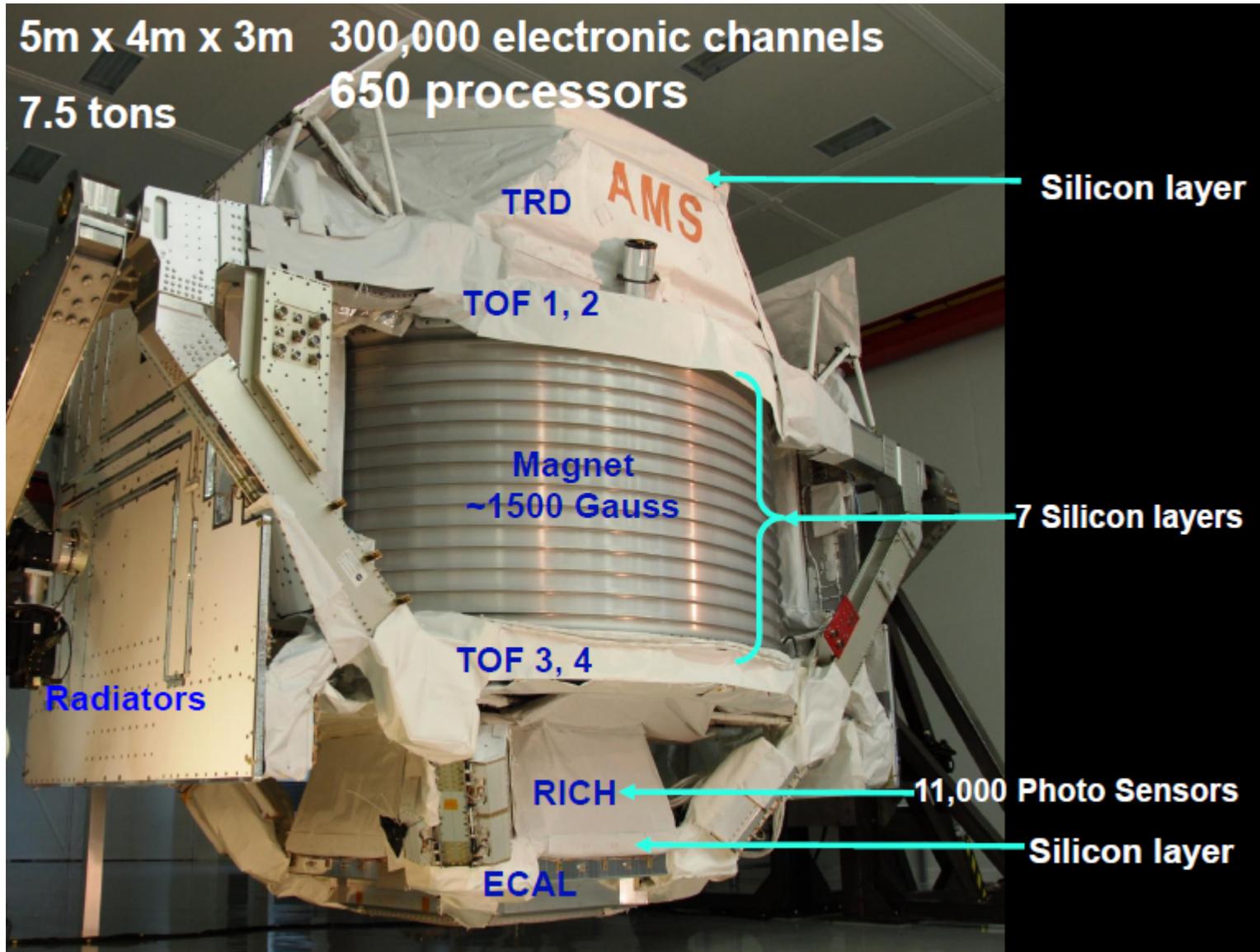


ECAL

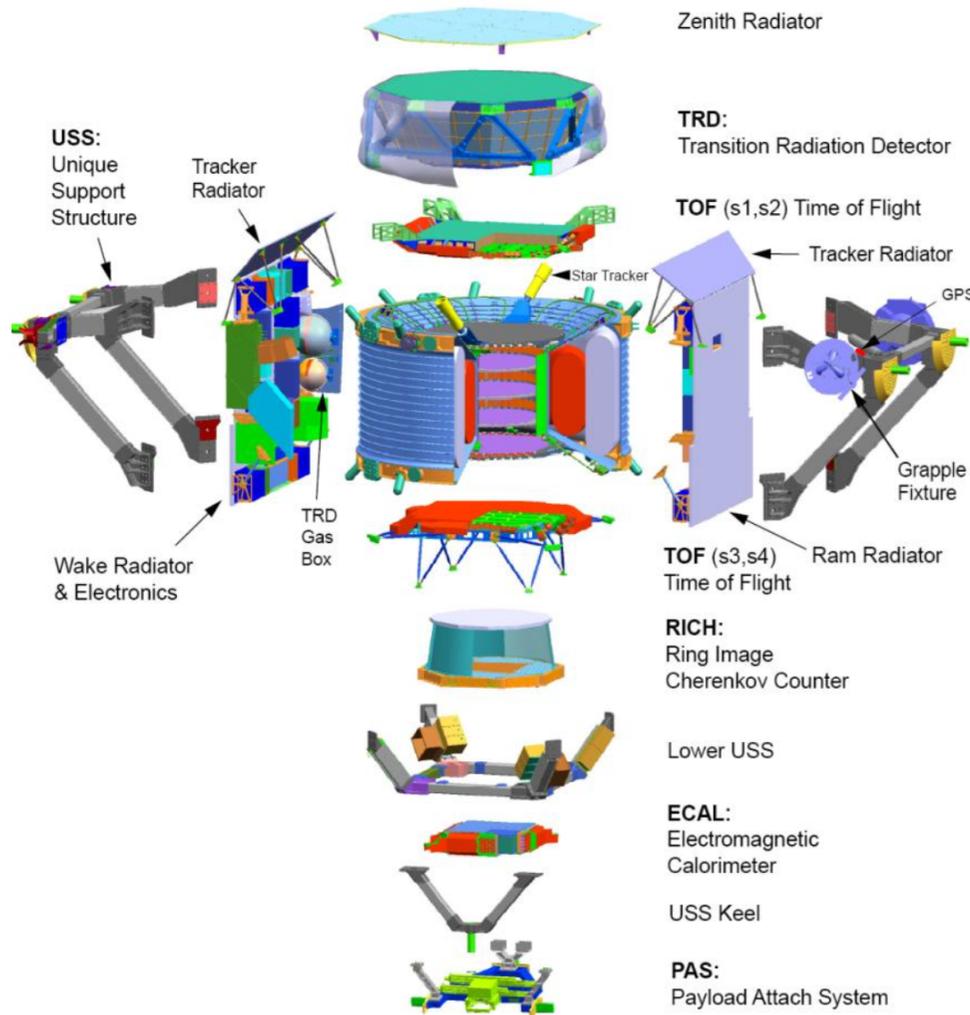


RICH





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 calorimeter⁶⁹.

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**

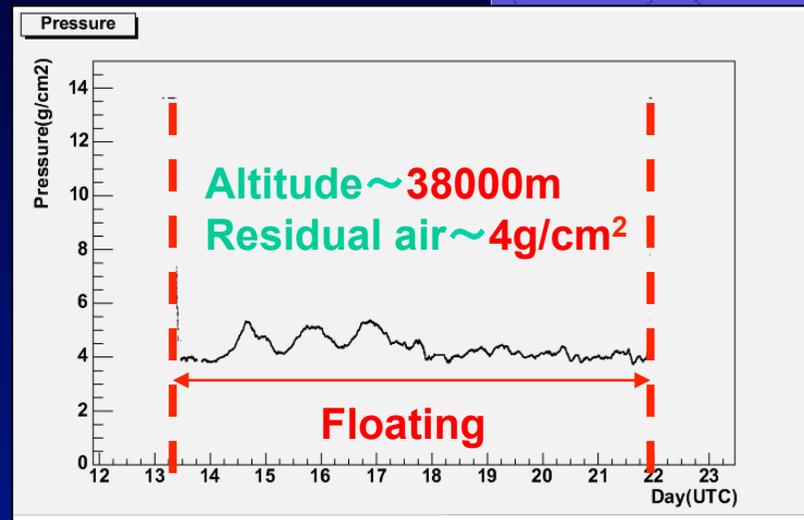
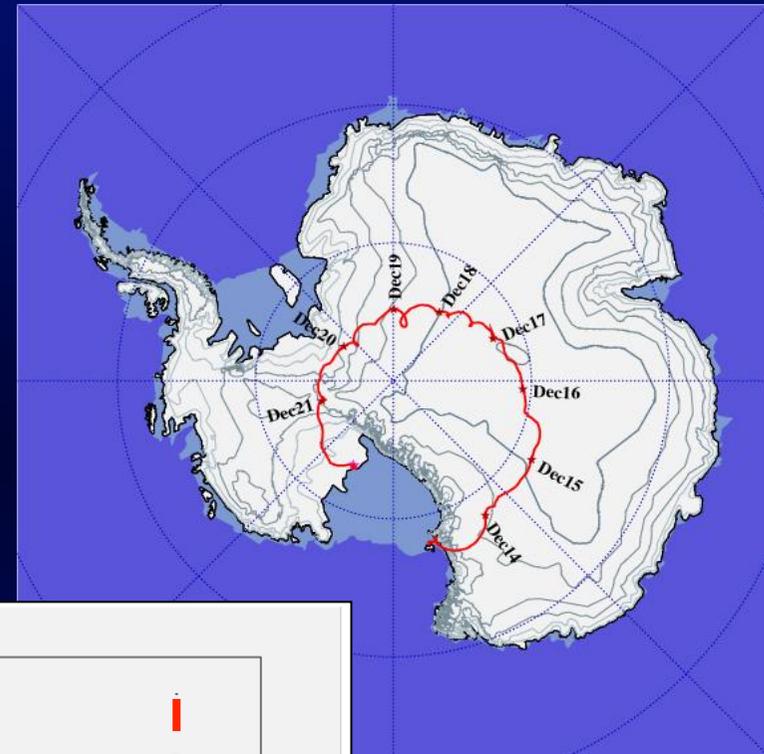
antiproton: Novel primary origins (PBH, DM)

antihelium: Asymmetry of matter/antimatter

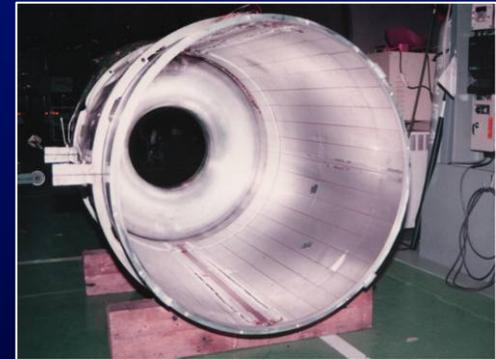
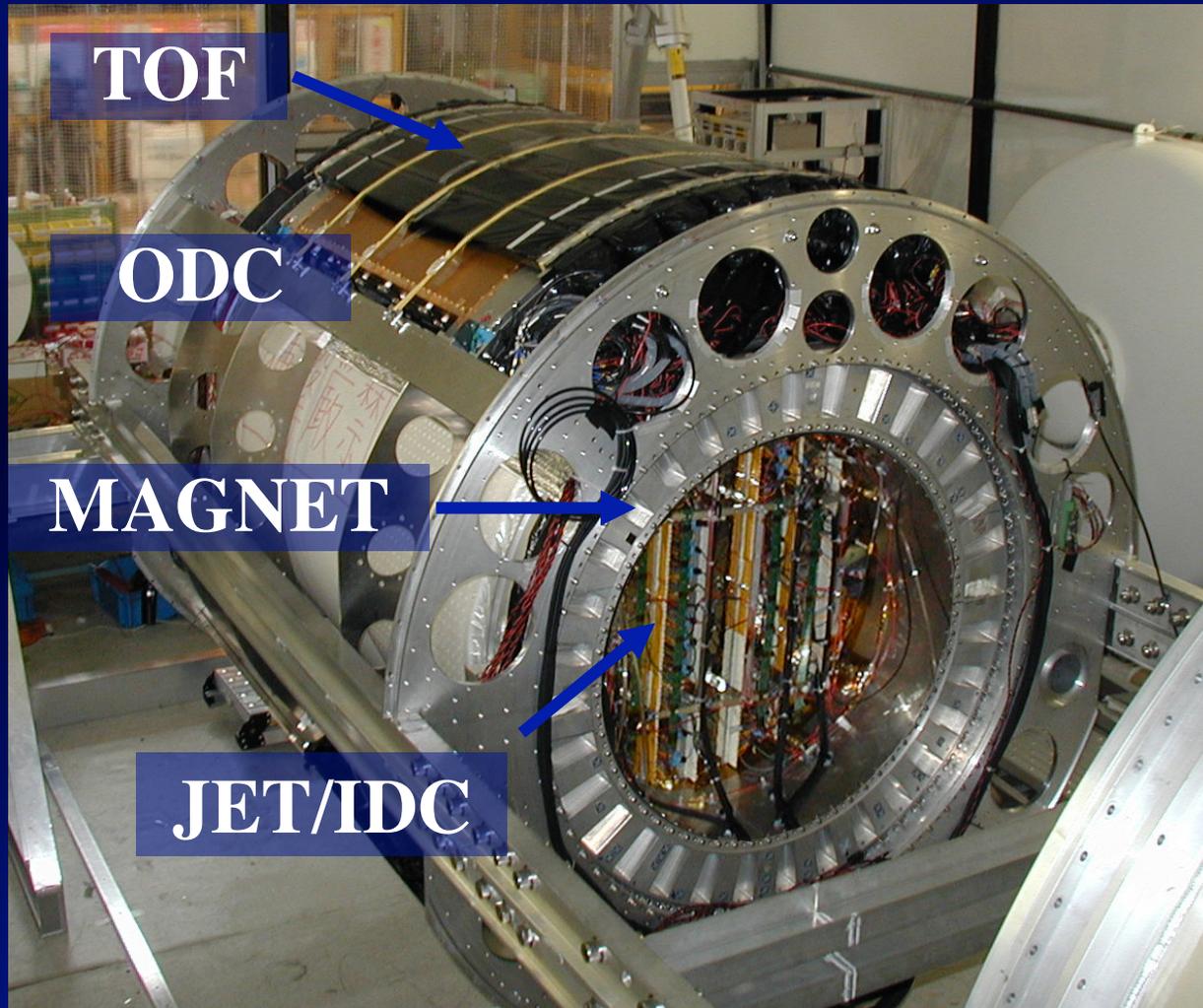
Precise Measurement of Cosmic-ray flux:
highly precise measurement at < 1 TeV

BESS-Polar 2004

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



BESS-TeV Spectrometer



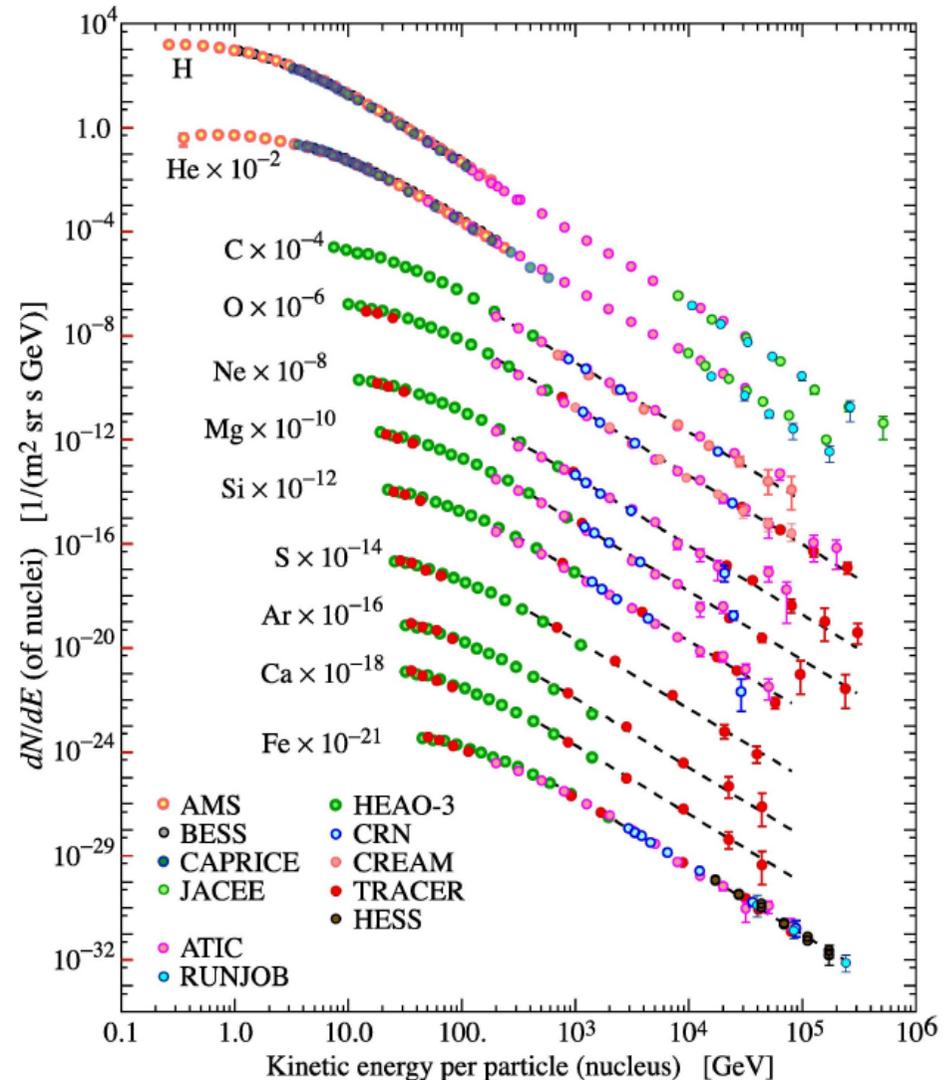
Risultati sulle misure dirette: protoni e nuclei

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

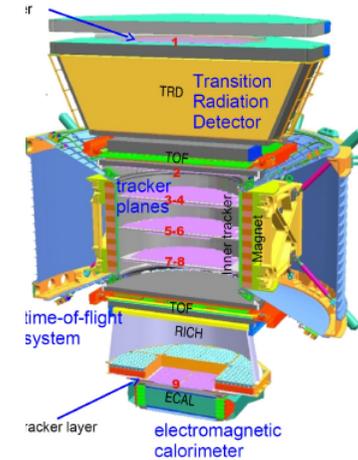
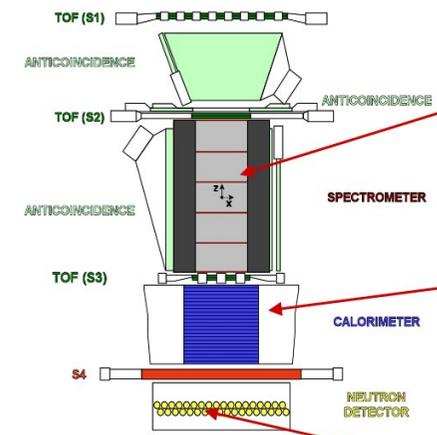
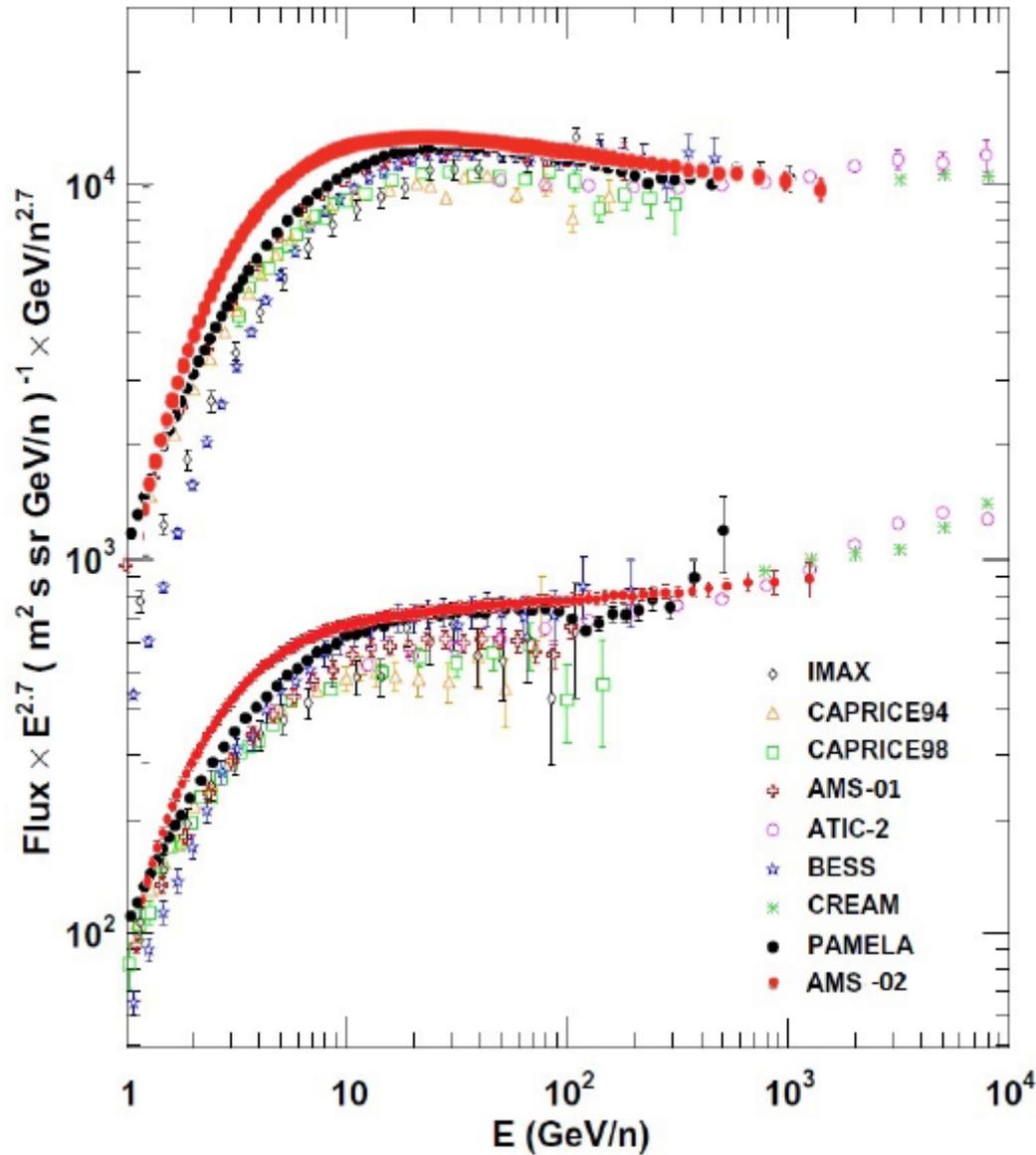
- The spectral index is almost the same for all nuclear species.

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

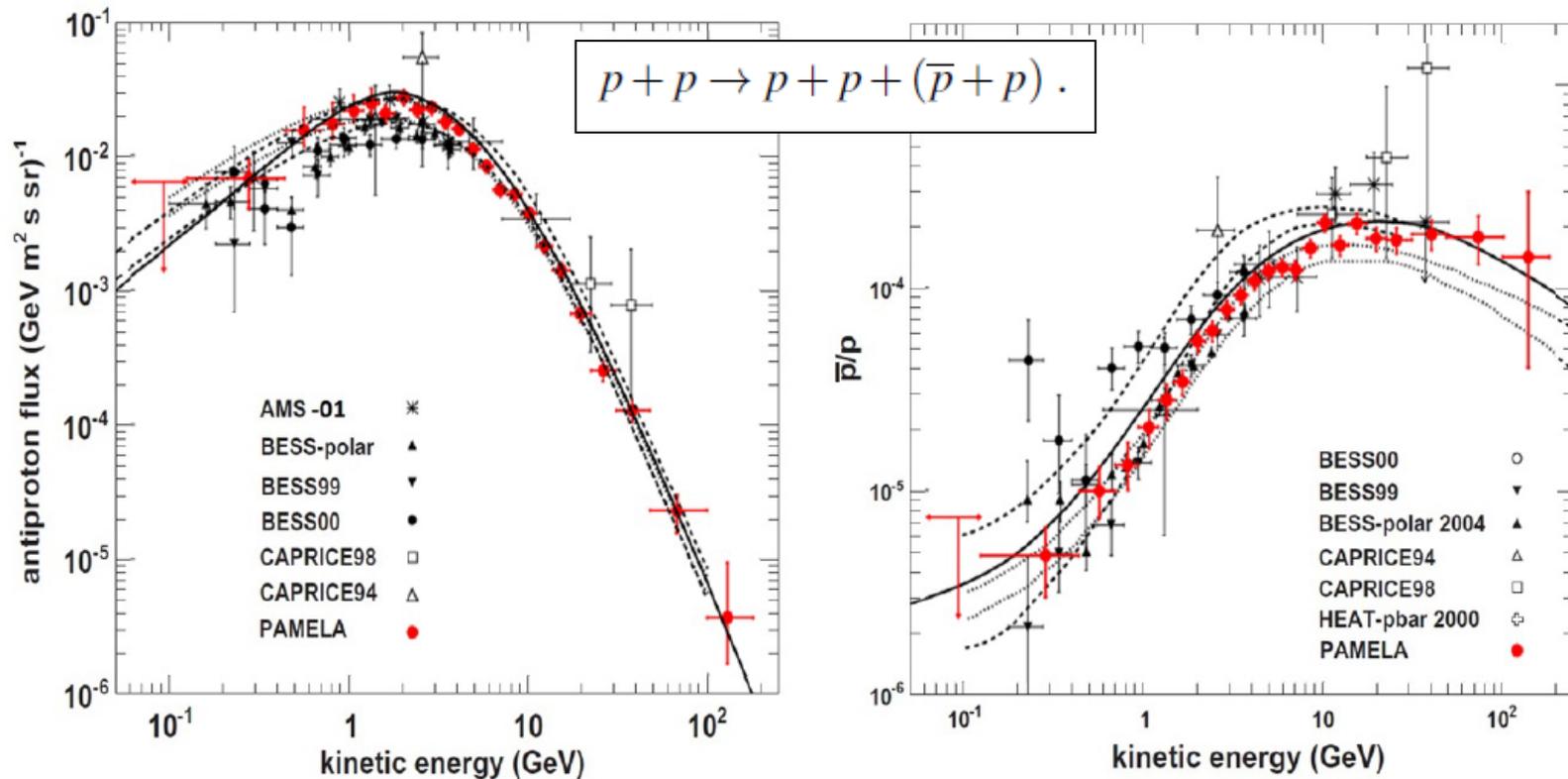
- This is one of the fundamental input for the theories studying the acceleration mechanisms of CRs



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



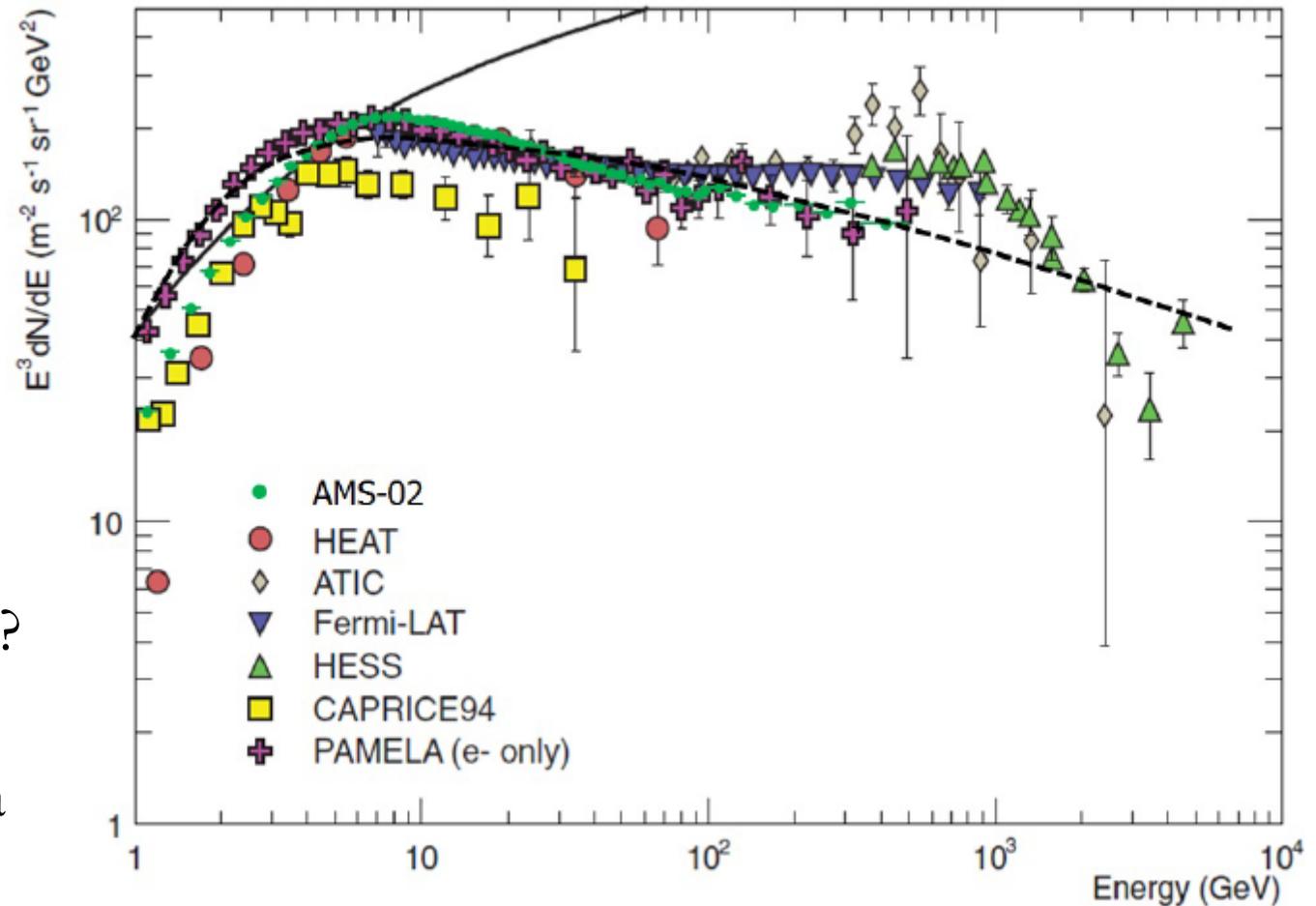
Antimateria nella Galassia: antip/p



- 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

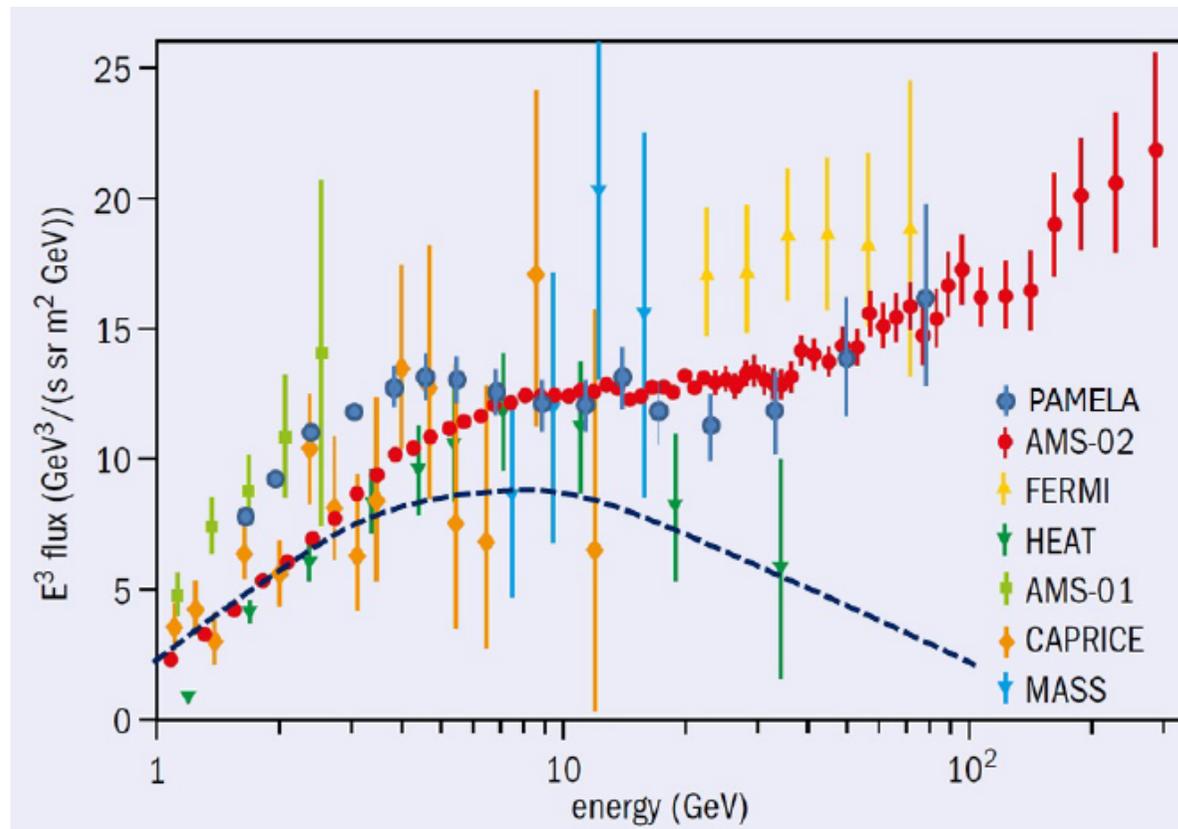
Gli elettroni nei RC

- 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!



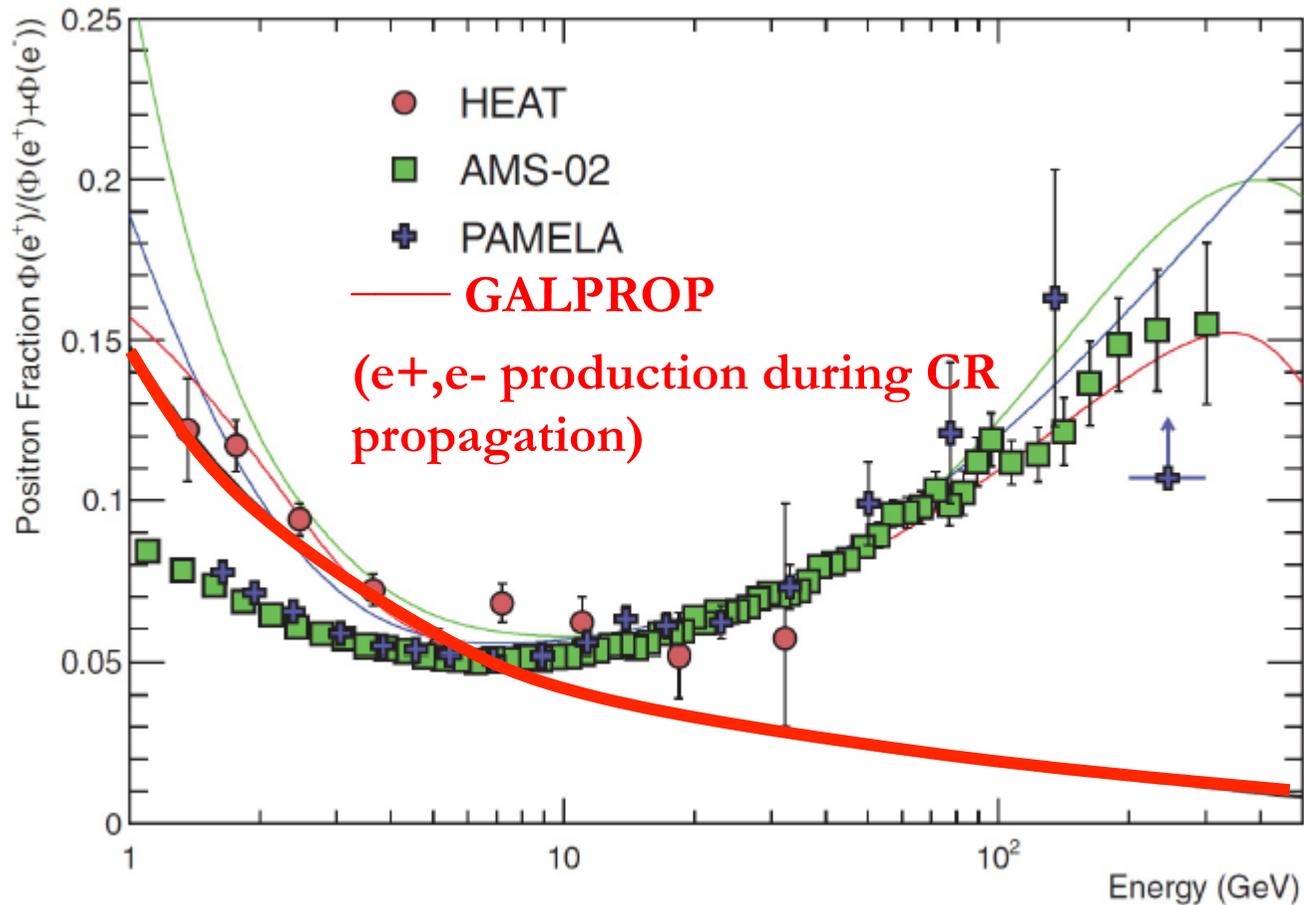
- **Effetti delle perdite di energia degli elettroni.** Queste producono la radiazione EM osservata in varie bande dagli astrofisici, dal radio ai raggi X

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!

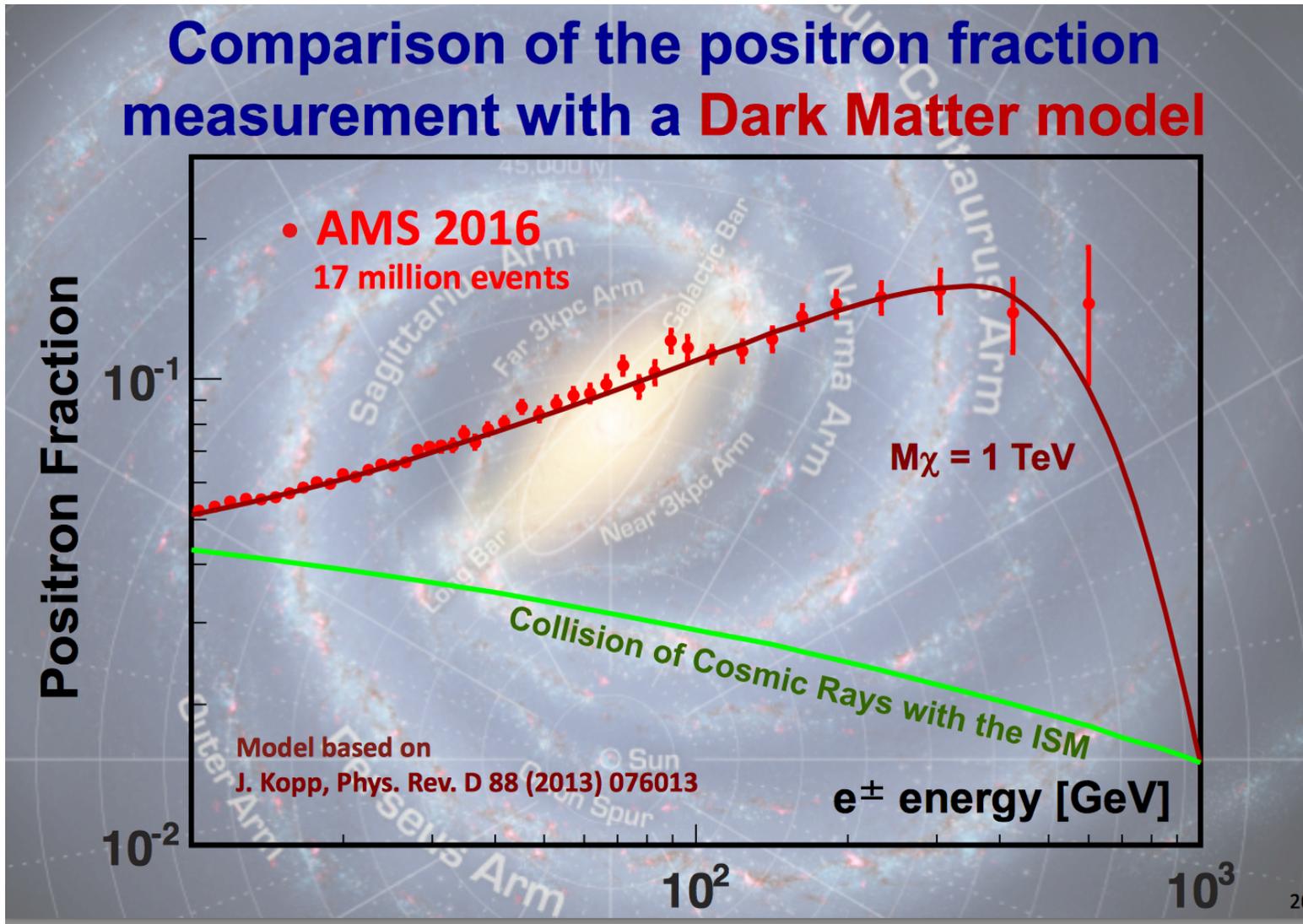
AMS-02 (e^+/e^-)



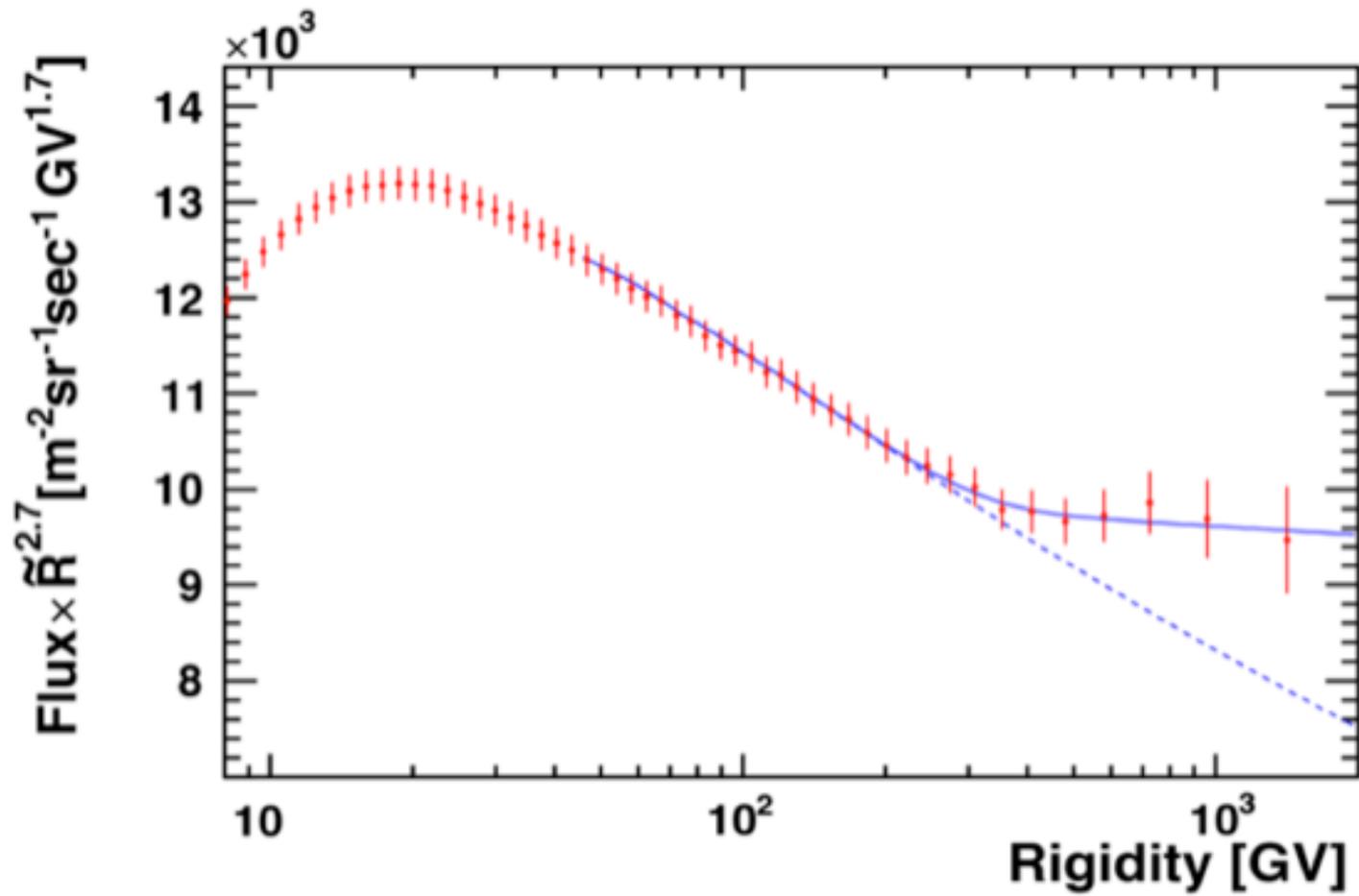
- The e^+ absolute flux as function of E
- Unexplained excess w.r.t. the propagation model

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

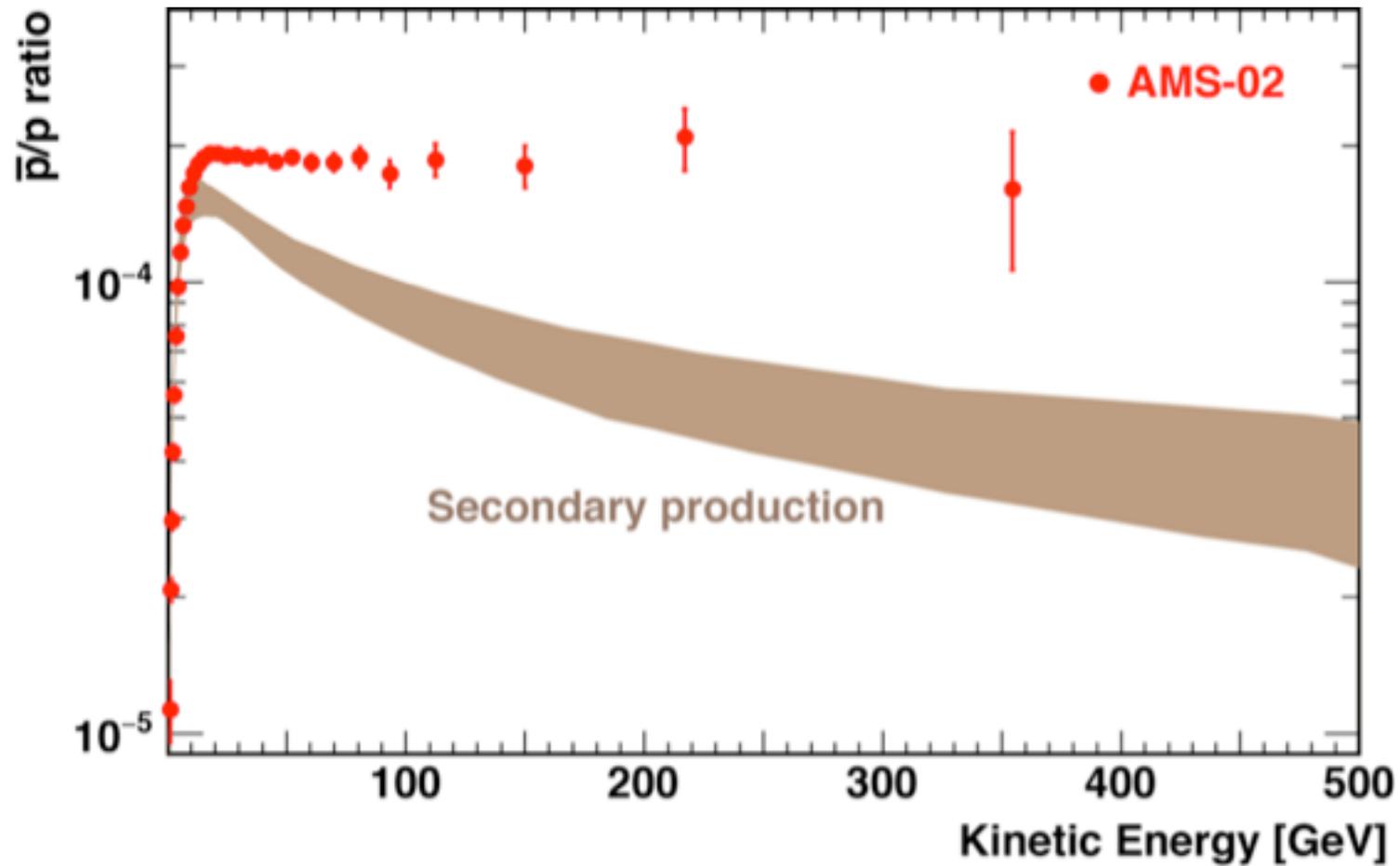
AMS02 – e⁺/e⁻



AMS02 - protons



AMS02 - antiprotons



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 $\sim 3 \times 10^{32}$ 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} m³
- **Energy density CR** $\sim 10^{-13}$ J m⁻³ (10^{-6} eV m⁻³)
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⁻¹
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

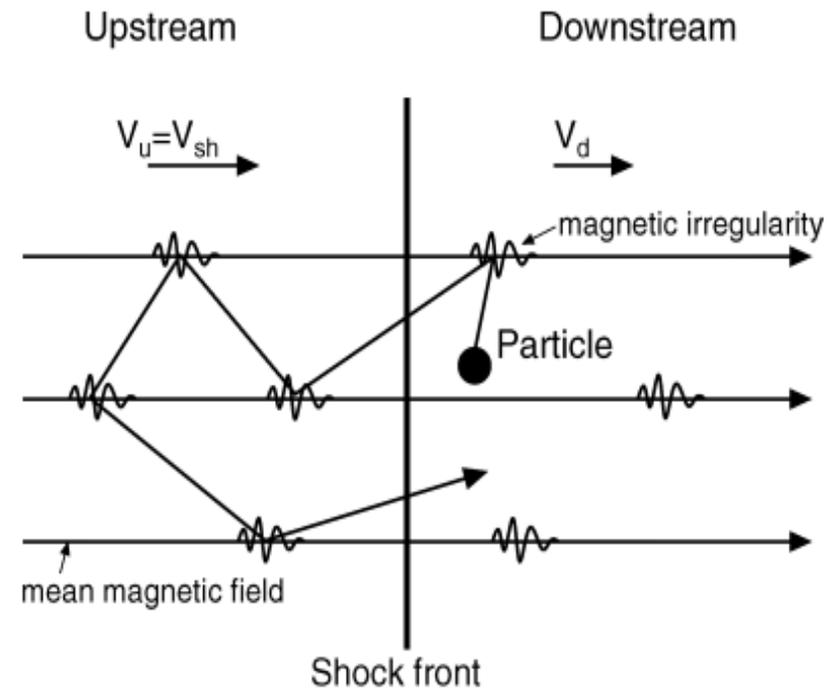
- **Supernovae - a likely source!**
- Synchrotron radiation observed from SN so we know high energy particles are involved. Total particle energy estimated at $\sim 10^{42}$ J per SN
- Taking 1 SN every 100 years,
=> 3×10^{32} J/s. **(also, SN produce heavies)**

Galactic Sources

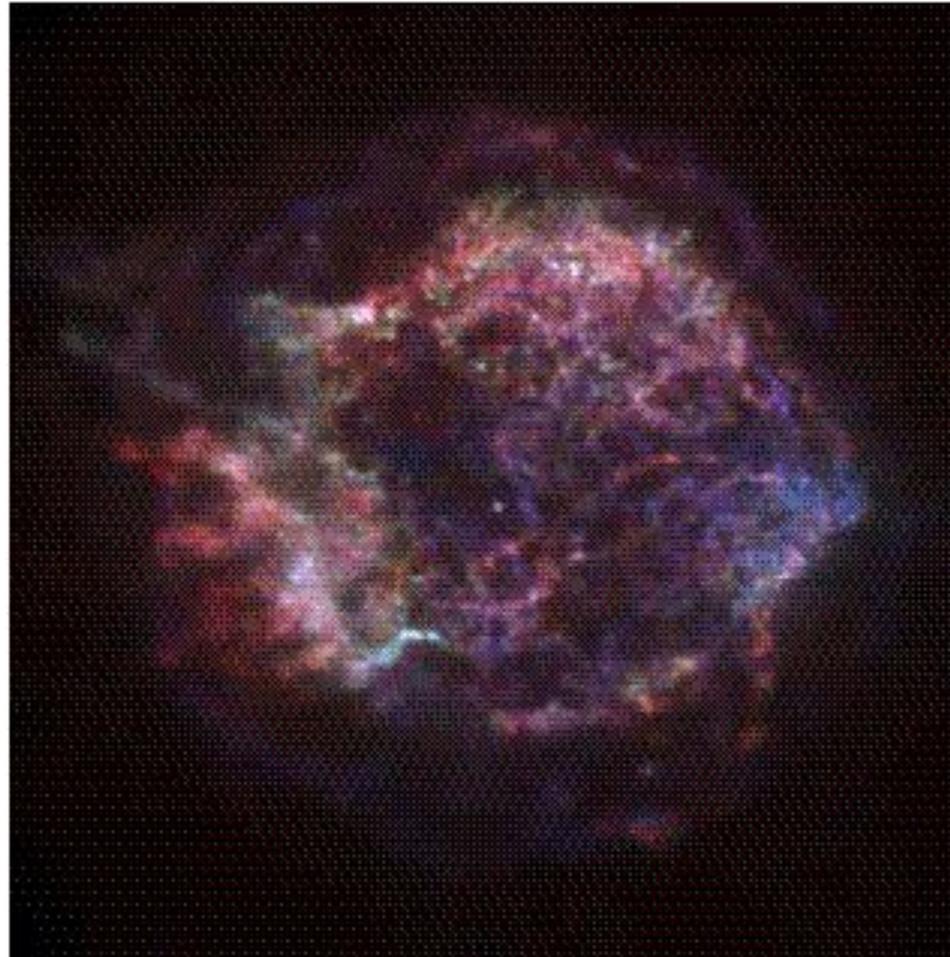
- Why SNR?
 - Energy argument
 - Fermi Acceleration Mechanism (1st order)
 - “elastic” collisions $\Delta E = \xi E$ e $P_{\text{esc}} = \text{const}$
 - Power Law Spectrum $\Gamma \sim 2$

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

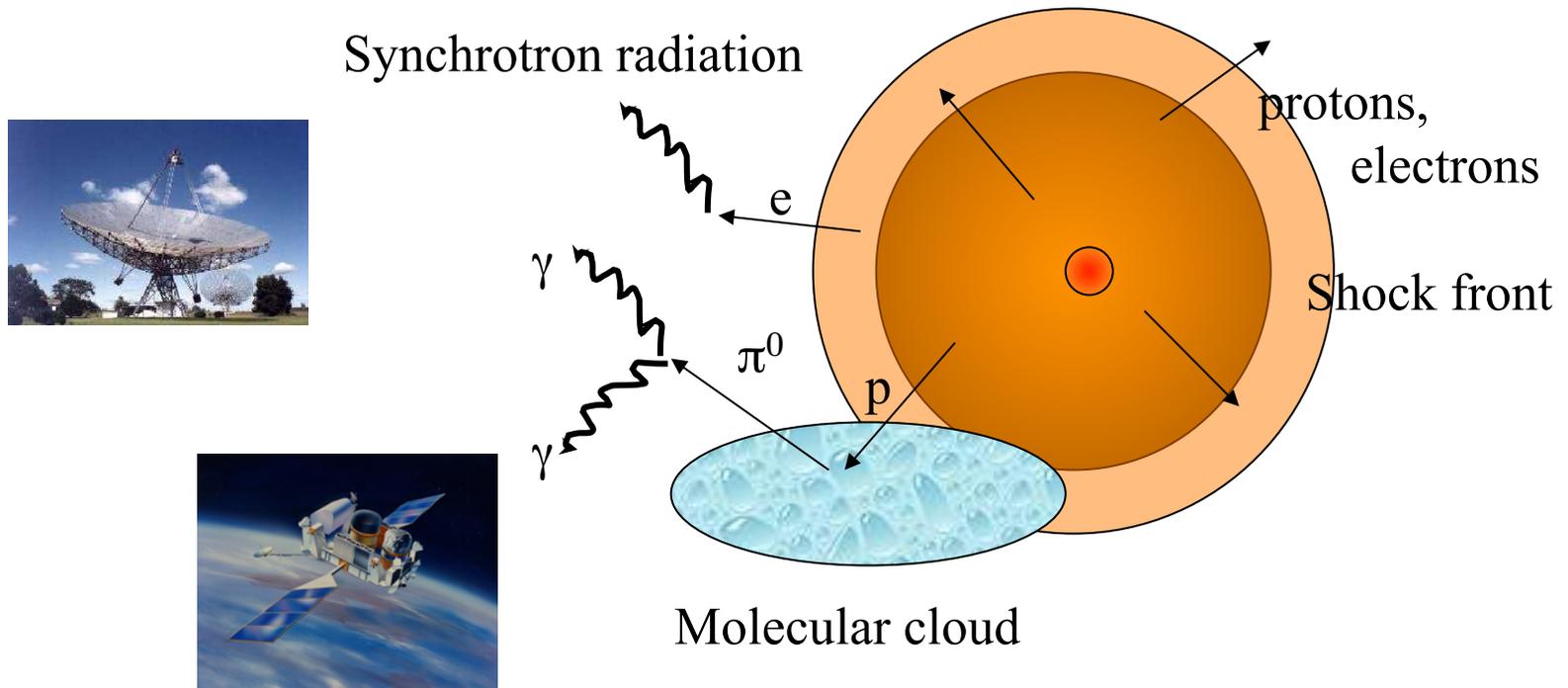
$$P_{SNR} = \frac{10^{51} \text{erg}}{30 \text{anni}} = 10^{42} \frac{\text{erg}}{\text{s}}$$



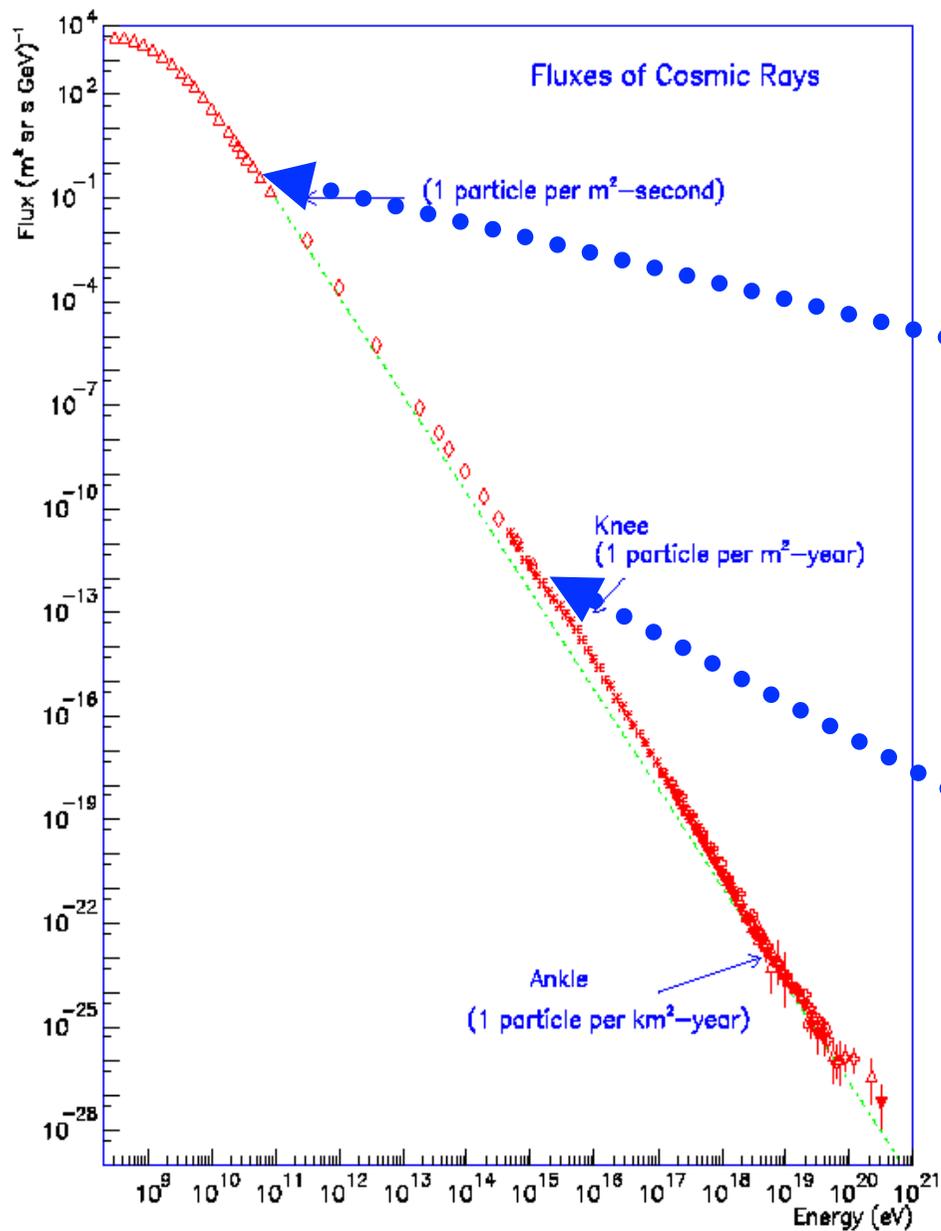
Supernovae and Remnants



Supernova Remnants

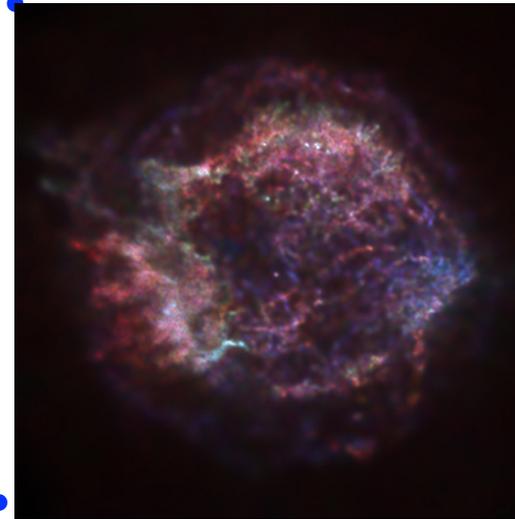


Nearby molecular clouds can provide targets for ions accelerated at the SNR shock. Gamma-rays are then produced by neutral pion decay pointing out the production of hadronic cosmic rays



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 !

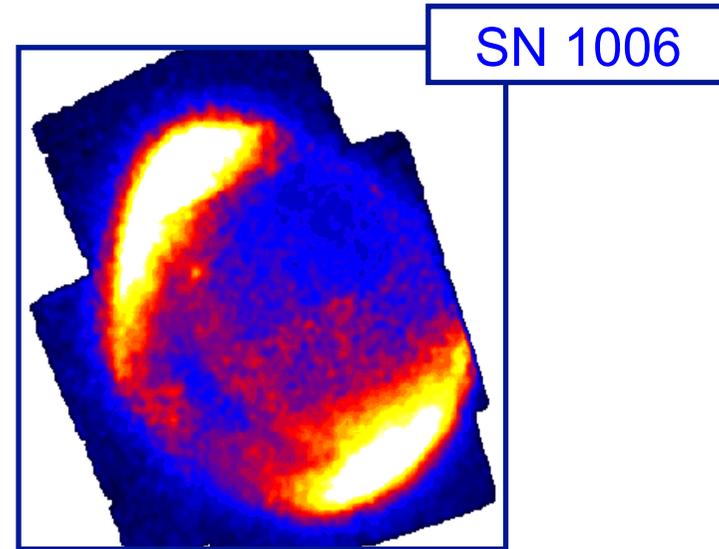
Supernovae and Cosmic Rays

- Most scientists believe that Galactic CR are accelerated in SNR shocks
- EGRET detected π^0 bump at 68 MeV \rightarrow direct evidence of nucleon-nucleon interactions
- EGRET detected γ -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 ~ 100 TeV. Observational clues?

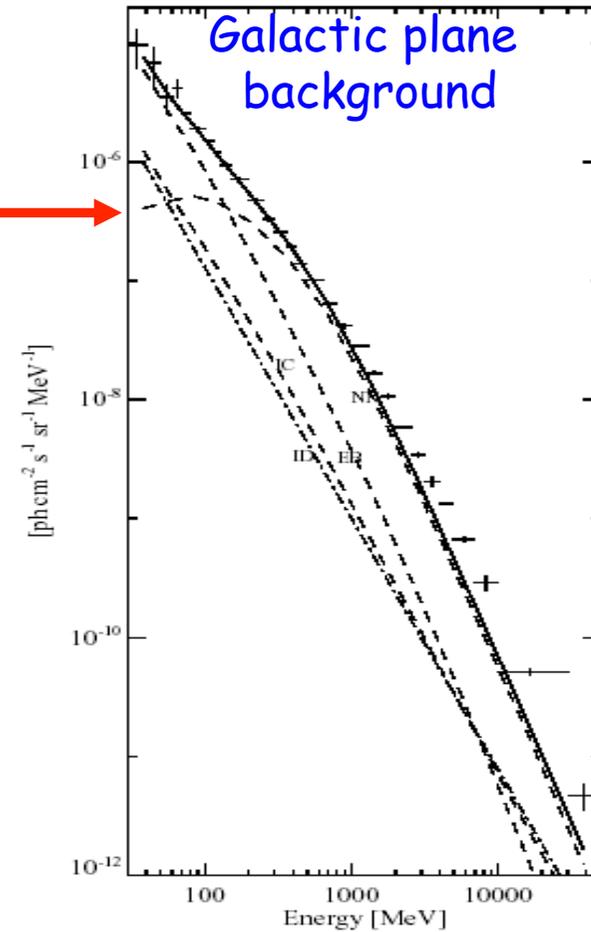
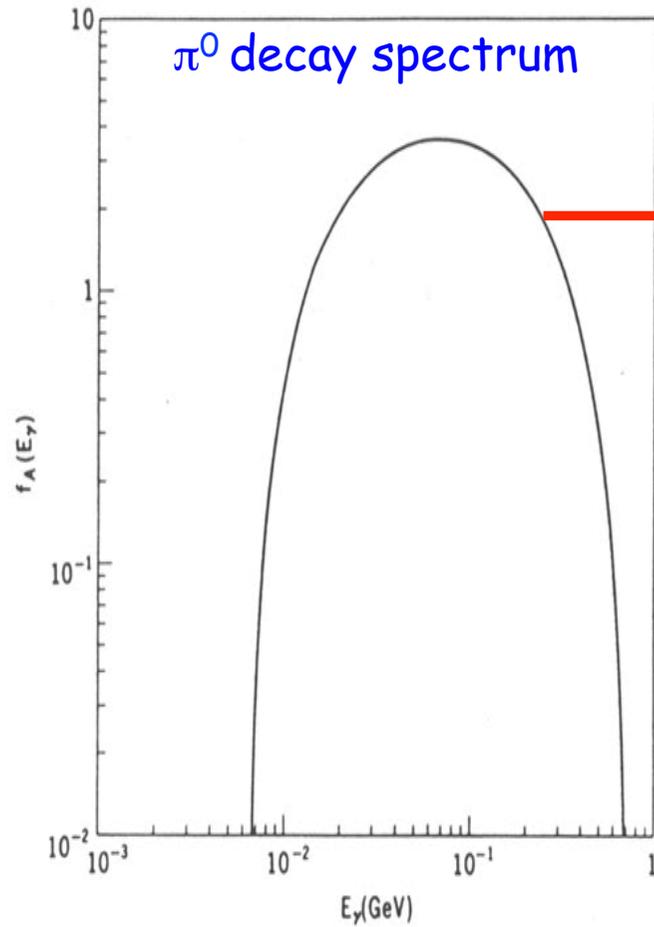
Brightest X-ray zones of SN 1006 feature **non-thermal** spectra. Likely origin: synchrotron emission of relativistic e^- up to ~ 100 TeV in a $\sim 10^{-5}$ G magnetic field. In agreement with TeV gamma-ray observations.



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**.

π^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)

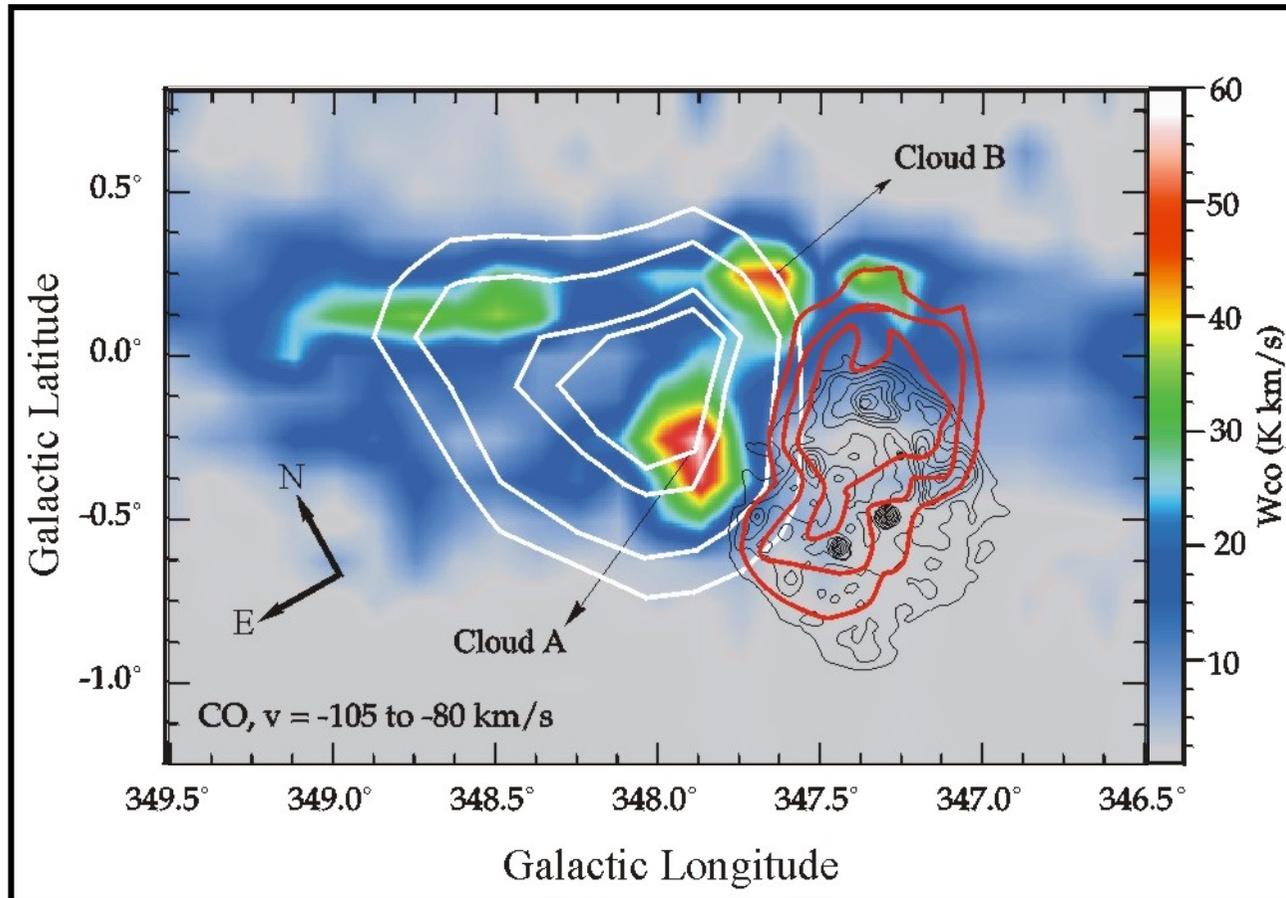
GeV SNR Detection strategy

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



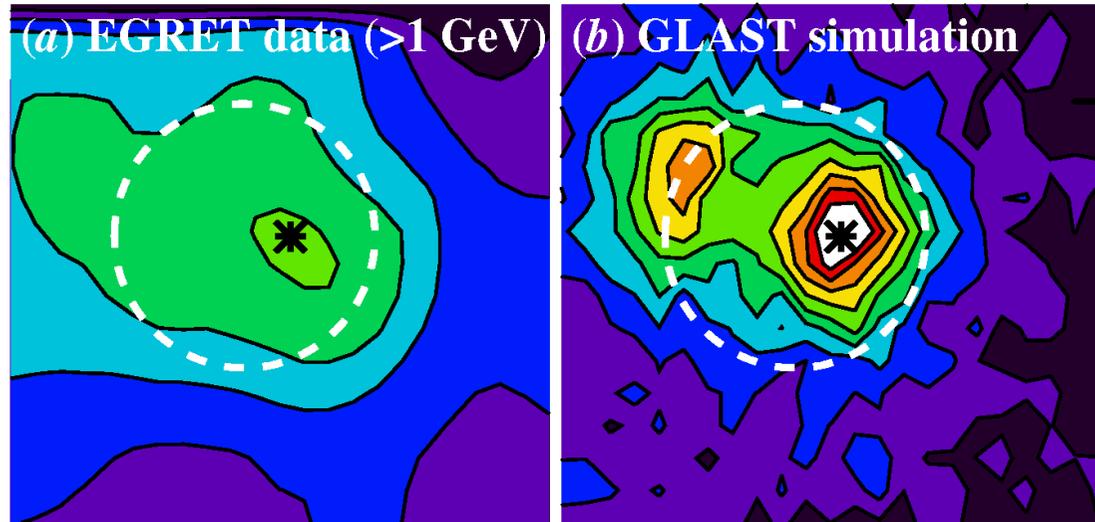
- Molecular cloud near SNR $\rightarrow \epsilon_{\text{CR}} \gg 1\text{eV/cm}^3$
- $R = \text{CO}(J=2 \rightarrow 1) / \text{CO}(J=1 \rightarrow 0)$
- $R \sim 0.7$, but $R \rightarrow 2.5$ for excited clouds

Supernovae



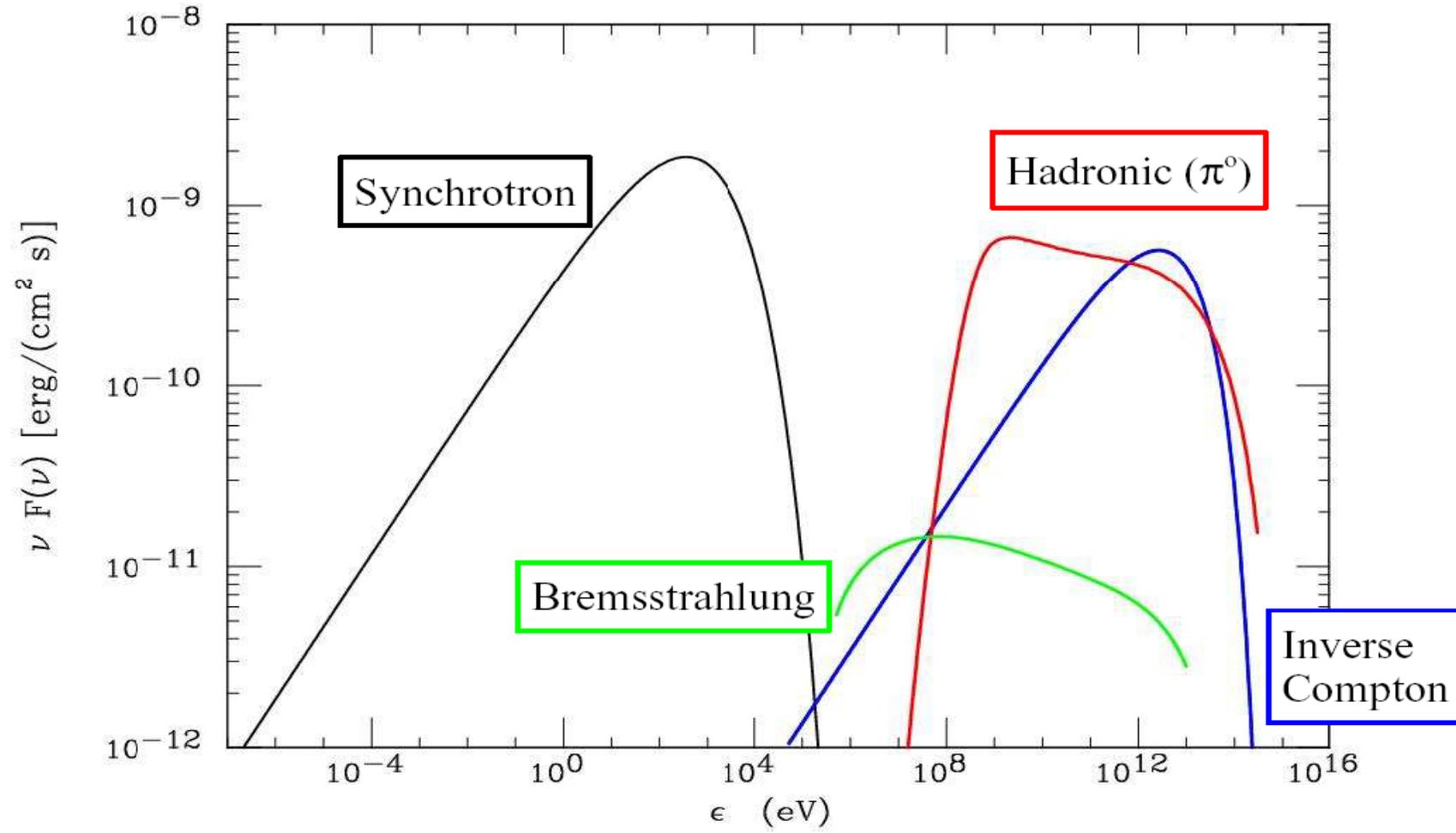
SNR and cosmic rays

- For SNR candidates, the LAT sensitivity and resolution will allow mapping to separate extended emission from the SNR from possible pulsar components.
- Energy spectra for the two emission components may also differ.
- Resolved images will allow observations at other wavelengths to concentrate on promising directions.

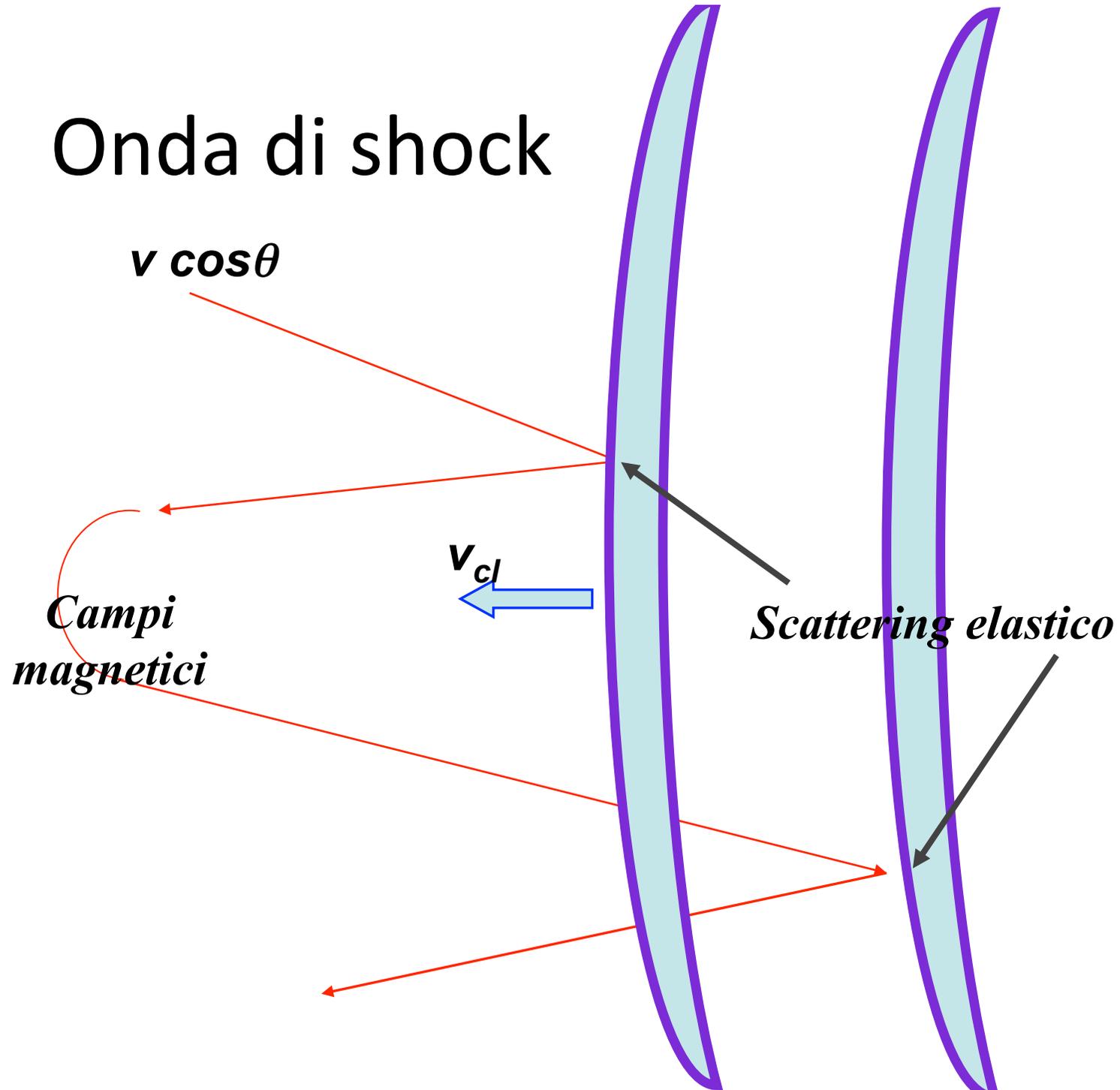


(a) Observed (EGRET) and (b) simulated LAT (1-yr sky survey) intensity in the vicinity of γ -Cygni for energies >1 GeV. The coordinates and scale are the same as in the images of γ -Cygni in the box at left. The dashed circle indicates the radio position of the shell and the asterisk the pulsar candidate proposed by Brazier et al. (1996).

Supernova Remnants



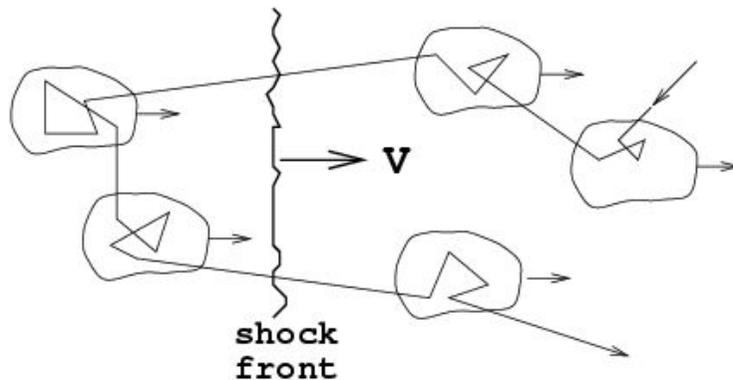
Onda di shock



1st order Fermi mechanism

- Basic principles:
 - Strong shock
 - Scattering by irregularities

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

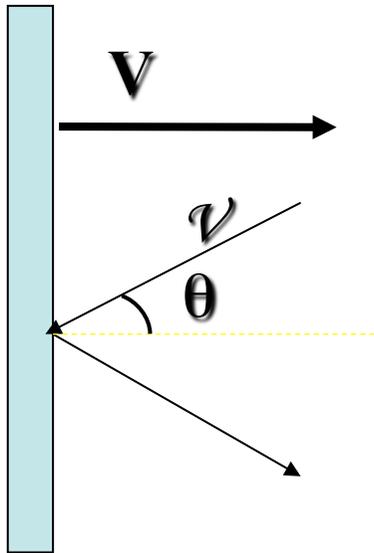


shock frame

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

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

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

SR osservatore

SR onda shock

- Quadrimpulso particella

$$(E, p_x)$$

$$(E', p'_x)$$

$$E' = \gamma(E + Vp_x)$$

$$p'_x = \gamma\left(p_x + \frac{V}{c^2}E\right)$$

- Urto elastico:

$$E' \xrightarrow{\text{urto}} E'$$

$$p'_x \xrightarrow{\text{urto}} -p'_x$$

- Conseguenze dell'urto:

$$E = \gamma(E' - Vp'_x) \xrightarrow{\text{urto}} \gamma(E' - V(-p'_x)) \equiv E^*$$

- dove E^* = energia della particella dopo l'urto:

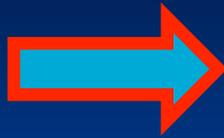
$$E^* \equiv \gamma(E' - V(-p'_x))$$

$$E^* = \gamma \left[\gamma(E + Vp_x) + V\gamma\left(p_x + \frac{V}{c^2}E\right) \right]$$

- Ricordando che:

$$p_x = mv\gamma \cos\theta$$

$$E = mc^2\gamma$$



$$\frac{p_x}{E} = \frac{mv\gamma \cos\theta}{mc^2\gamma} = \frac{v}{c^2} \cos\theta$$

$$E^* = \gamma \left[\gamma(E + Vp_x) + V\gamma \left(p_x + \frac{V}{c^2} E \right) \right] = \gamma^2 \left[(E + 2Vp_x + \frac{V^2}{c^2} E) \right] =$$

$$= \gamma^2 E \left[1 + 2V \frac{p_x}{E} + \frac{V^2}{c^2} \right] = \gamma^2 E \left[1 + 2V \frac{v \cos\theta}{c^2} + \frac{V^2}{c^2} \right] \stackrel{\text{Taylor}}{\cong}$$

$$= \left(1 + \frac{V^2}{c^2} \right) E \left[1 + 2V \frac{v \cos\theta}{c^2} + \frac{V^2}{c^2} \right] \stackrel{\text{Taylor}}{\cong}$$

$$\stackrel{\text{2ordine}}{=} E \left[1 + 2 \frac{Vv \cos\theta}{c^2} + 2 \frac{V^2}{c^2} \right]$$

- L'energia guadagnata dalla particella nell'urto con l'onda di shock nel sistema S (Galassia):

$$\Delta E = E^* - E = \left[2 \frac{Vv \cos \theta}{c^2} + 2 \frac{V^2}{c^2} \right] \cdot E$$

$$\underset{v \approx c}{\cong} \left(2 \frac{V \cos \theta}{c} \right) \cdot E$$

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{E^* - E}{E} = \left(2 \frac{V \cos \theta}{c} \right)$$

- In altri termini, il rapporto tra energia finale e iniziale è >1 nel caso in cui la particella si diriga contro l'onda ($\cos \theta > 0$):

$$\frac{E^*}{E} = \left(1 + 2 \frac{V \cos \theta}{c} \right)$$

- Mediando (ossi, integrando) su tutti gli angoli per cui $\cos \theta > 0$:

$$\langle \cos \theta \rangle = \frac{\int_0^1 \cos \theta \cdot \cos \theta d\theta}{\int_0^1 \cos \theta d\theta} = \frac{2}{3}$$

$$\left\langle \frac{E^*}{E} \right\rangle = \left(1 + \frac{4}{3} \frac{V}{c} \right) = \mathbf{B}$$

$$\langle E^* \rangle = \mathbf{B} \langle E \rangle$$

eq. 4.1

Accelerazione ricorsiva

- Dalla eq. 4.1 abbiamo ottenuto che in ogni urto frontale, la particella guadagna energia:
- La particella inoltre rimane nella zona di accelerazione con una certa probabilità P
- Dopo k collisioni:

$$E^f = \mathbf{B} \cdot E_o$$

$$P$$

- Energia in possesso della particella
- Numero di particelle con energia E

$$E = E_o \mathbf{B}^k$$

$$N = N_o P^k$$

$$\begin{aligned} \ln(E / E_o) &= k \ln B \\ \ln(N / N_o) &= k \ln P \end{aligned}$$



$$\frac{\ln(N / N_o)}{\ln(E / E_o)} = \frac{\ln P}{\ln B} \equiv \alpha$$

eq. 4.2

$$\frac{N}{N_o} = \left(\frac{E}{E_o} \right)^\alpha$$

eq. 4.3

- La formula trovata si riferisce al numero N di particelle con energia $>E$, ossia $N=N(>E)$ è la funzione integrale di:

$$\frac{dN(E)}{dE} \propto E^{\alpha-1}$$

eq. 4.4

- La 4.4 rappresenta la distribuzione differenziale del numero di particelle in un certo intervallo di energia.
- La 4.4 ha la forma di uno spettro di potenza, con $\gamma=\alpha-1$.
- Questo è quanto cercavamo per lo spettro (osservato) dei RC. Il problema è ora determinare il valore di γ . Dalla 4.2:

$$\gamma = \alpha - 1 = \frac{\ln P}{\ln B} - 1$$

eq. 4.5

- Quindi, occorre determinare il valore del rapporto tra $\ln P/\ln B$

Stima del coefficiente $\alpha = \ln P / \ln B$

- Flusso di particelle relativistiche VERSO il fronte d'onda:

$$F[s^{-1}] = \rho[cm^{-3}] \cdot c[cm/s] \cdot A[cm^2]$$

- Le particelle nella regione *downstream* non vengono di nuovo accelerate. Il flusso di queste particelle verso sinistra è:

$$F' = \rho \cdot v_s \cdot A$$

- La probabilità che il RC oltrepassi il fronte d'onda e venga persa (ossia NON venga riaccelerato):

$$\bar{P} = \frac{F'}{F} = \frac{\rho \cdot v_s \cdot A}{\rho \cdot c \cdot A} = \frac{v_s}{c}$$

- La probabilità che il RC rimanga nella regione di accelerazione:

$$P = 1 - \bar{P} = 1 - \frac{v_s}{c}$$

eq. 4.6

Il valore stimato di α

- $\gamma(\alpha)$ definito dalla eq. 4.5:

$$\gamma = \alpha - 1 = \frac{\ln P}{\ln B} - 1$$

- L'equazione 4.6

$$P = 1 - \bar{P} = 1 - \frac{v_s}{c}$$

- B dalla eq. 4.1, con $V = 3/4 v_s$

$$\left\langle \frac{E^*}{E} \right\rangle = \left(1 + \frac{4V}{3c} \right) = \left(1 + \frac{4(3/4)v_s}{3c} \right) \mathbf{B}$$

- Quindi, se $(V/c) \ll 1$:

$$\alpha = \frac{\ln P}{\ln B} = \frac{\ln\left(1 - \frac{v_s}{c}\right)}{\ln\left(1 + \frac{v_s}{c}\right)} \stackrel{Taylor}{\cong} \frac{-\frac{v_s}{c}}{\frac{v_s}{c}} = -1.0$$

e quindi

$$\gamma = \alpha - 1 = -2$$

eq. 4.7

Spettro energetico alle sorgenti

- Il modello di Fermi **predice** quindi uno spettro energetico delle particelle in prossimità delle sorgenti (eq. 4.4) del tipo:

$$\frac{dN(E)}{dE} \propto E^{\alpha-1} = E^{-2}$$

- Si tratta di una predizione che si accorda coi dati sperimentali. La pagina seguente riporta una slide già vista:
- Occorre ora mostrare che:
 - L'energetica delle SN riesce a spiegare tutta l'energia associata ai RC
 - La velocità dell'onda di shock NON è relativistica
 - Come le particelle vengono fatte "rimbalzare" verso l'onda di shock
 - La massima energia cui si può giungere con questo modello

Spettro dei RC alle sorgenti

- Il risultato appena ottenuto è estremamente importante, perché permette di avere informazioni sullo spettro energetico dei RC alle sorgenti.
- Poiché il flusso dei RC sulla Terra è stazionario, vi deve essere equilibrio tra:
 - Spettro energetico misurato: $\Phi(E) \propto E^{-2.7} (\text{erg} / \text{cm}^3 \cdot \text{GeV})$
 - Spettro energetico alle Sorgenti: $Q(E) \propto E^{-?} (\text{erg} / \text{s} \cdot \text{GeV})$
 - Probabilità di diffusione: $\tau(E) \propto E^{-0.6} (\text{s})$

Parametri caratteristici di un'onda di shock da Supernova

- Osservazioni di Supernovae (da altre Galassie):
 $1/\tau = 1 \text{ SN} / 30 \text{ anni}$
- Energia emessa sotto forma di energia cinetica:
 $K = 10^{51} \text{ erg}$
- Massa caratteristica delle Supernovae:
 $M = 10 M_{\odot} (= 10 \times 2 \times 10^{33} \text{ g})$
- “Potenza” alimentata dalle esplosioni di SN:
 $W = K/\tau = 10^{51} / 30(3 \times 10^7 \text{ s}) = 10^{42} \text{ erg/s}$
- Velocità di propagazione dell'onda di shock:

$$V = \sqrt{\frac{2K}{M}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{51} \text{ erg}}{10 \cdot (2 \cdot 10^{33} \text{ g})}} = 3 \cdot 10^8 \text{ cm/s}$$



$$\frac{V}{c} = 10^{-2}$$

eq. 4.8

Massima energia per i RC da SN

- Incremento di energia in un singolo urto (eq.4.1):

$$\langle E \rangle = \mathbf{B} \langle E_o \rangle = \left(1 + \frac{4V}{3c} \right) \langle E_o \rangle$$

$$\Delta E = \langle E \rangle - \langle E_o \rangle = \frac{4V}{3c} \langle E_o \rangle = \eta \langle E_o \rangle; \quad \eta \approx 10^{-2}$$

- Tempo che intercorre tra due urti successivi: T_{ciclo} ;
- Numero massimo di urti possibili: $N_{cicli} = T_{OS} / T_{ciclo}$;
- La massima energia raggiungibile è dunque:

$$E_{max} = N_{cicli} \Delta E = \frac{\eta E_o \cdot T_{OS}}{T_{ciclo}}$$

eq. 4.11

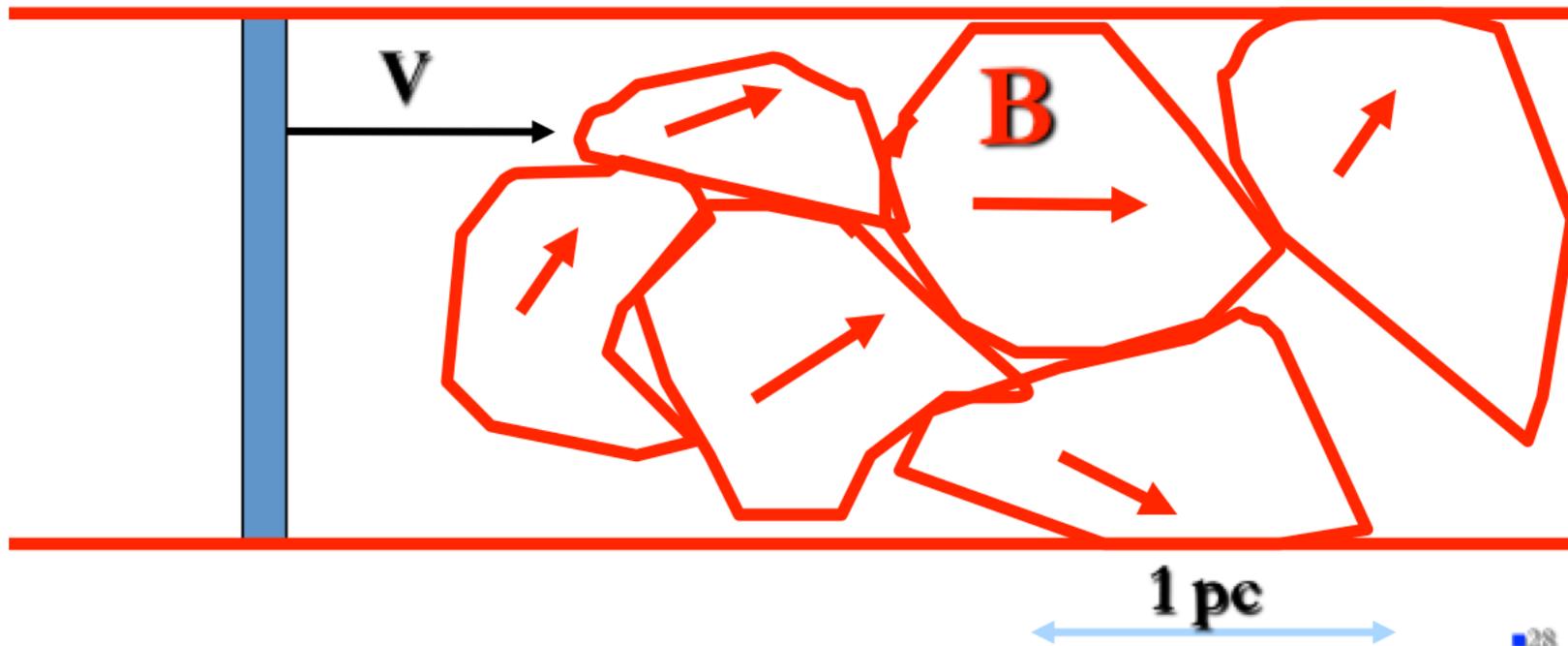
- Occorre dunque stimare il parametro T_{ciclo} ;

Stima di T_{ciclo}

$$T_{ciclo} = \frac{\lambda_c}{V}$$

λ_c = Lunghezza caratteristica della particella
confinata = raggio di Larmor nel
campo magnetico Galattico

$$\lambda_c \approx r_L = \frac{E}{ZeB}$$



- Se assumiamo: $\lambda_c \approx r_L = \frac{E}{ZeB}$

- Allora: $T_{ciclo} = \frac{\lambda_c}{V} = \frac{E}{ZeBV}$

- Possiamo determinare la massima energia (eq. 4.11):

$$E_{\max} = N_{cicli} \Delta E = \frac{\eta E \cdot T_{OS}}{T_{ciclo}} \longrightarrow E_{\max} = \frac{\eta E \cdot T_{OS}}{T_{ciclo}} = \eta E \left(\frac{ZeBV}{E} \right) \cdot T_{OS}$$

$$\eta = \frac{4V}{3c} \longrightarrow E_{\max} = \frac{4ZeB}{3c} V^2 \cdot T_{OS}$$

$$B = 3 \times 10^{-6} G$$

$$V = 5 \times 10^8 cm/s$$

$$T_{OS} = 10^3 y = 3 \times 10^{10} s$$

$$E_{\max} = \frac{4ZeB}{3c} V^2 \cdot T_{OS} = 480 \cdot Z \quad erg = 3 \times 10^{14} Z \quad eV$$

$$E_{\max} = 300 \times Z \quad TeV$$

eq. 4.12

Conclusioni circa il modello

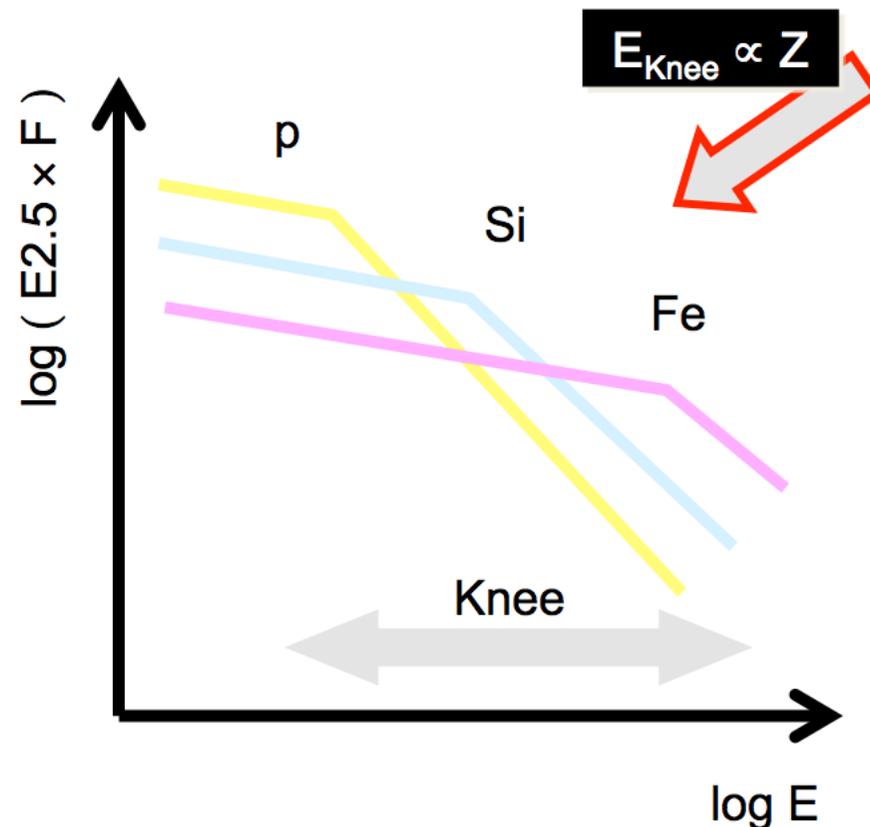
- Il modello di accelerazione dei RC da parte di SN fonda la sua giustificazione sulla concordanza tra energia cinetica emessa (10^{42} erg/s) e la “potenza” sotto forma di RC nella Galassia:
 $W_{\text{CR}} = 5 \times 10^{40}$ erg/s
- Un meccanismo che trasferisca il $\sim 5\%$ di energia verso particelle relativistiche (RC) è sufficiente per spiegare i RC galattici sino ad energie $\sim 10^{15}$ eV.
- Il meccanismo di Fermi ha proprio una efficienza $\eta = \frac{V}{c} \cong 5 \times 10^{-2}$
- Nella regione di accelerazione, lo spettro energetico dei RC è descritto da una legge di potenza:

$$\frac{dN(E)}{dE} \propto E^{\alpha-1} = E^{-2}$$

- La legge di potenza alla sorgente del tipo E^{-2} si confronta con l'osservazione sperimentale di uno spettro del tipo $E^{-2.7}$ sulla Terra, tenendo conto della probabilità di fuga dalla Galassia vs. E
- L'energia *massima* che i RC possono acquisire in queste regione di accelerazione è

$$E_{\max} = 300 \times Z \quad TeV$$

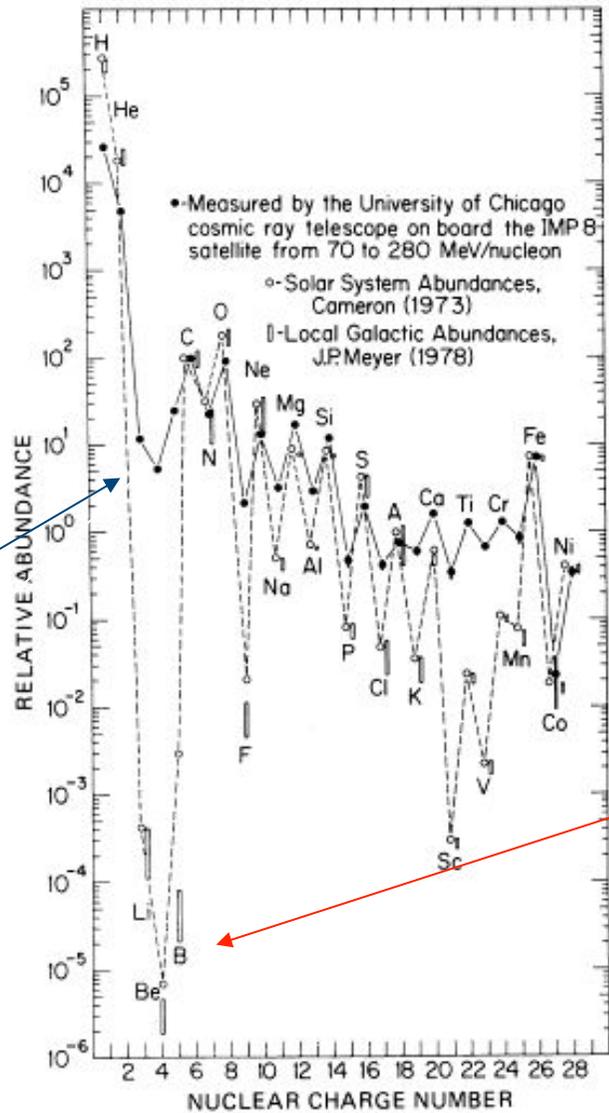
- In corrispondenza di questa energia, si trova una struttura nello spettro osservato (ginocchio). La previsione del modello è che il ginocchio dipende dalla rigidità (ossia, da Z) della particella



Astrofisica Nucleare e Subnucleare

Propagazione di Raggi Cosmici

CR observations



CR component

Solar system

3. Propagazione dei RAGGI COSMICI nella Galassia (Cap. 5 libro)

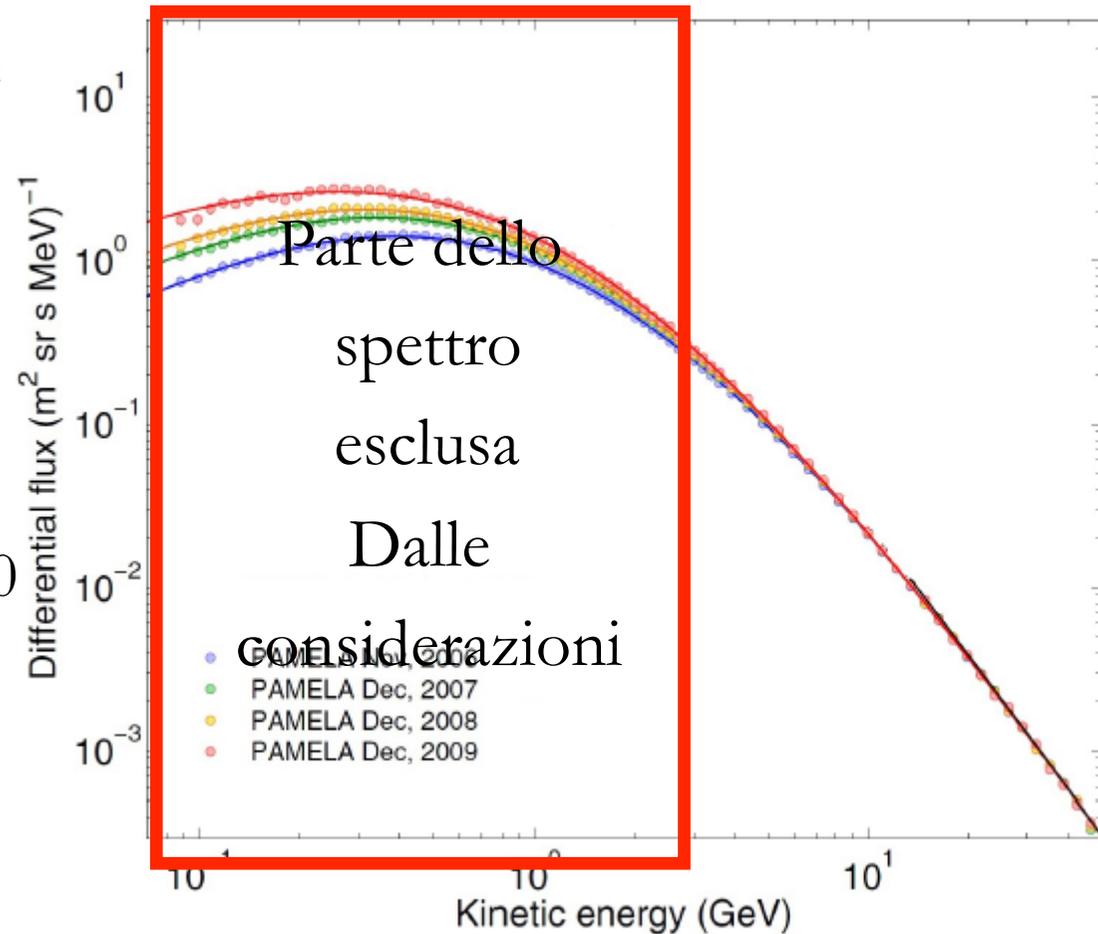
Corso “Astrofisica delle particelle”

Prof. Maurizio Spurio

Università di Bologna a.a. 2013/14

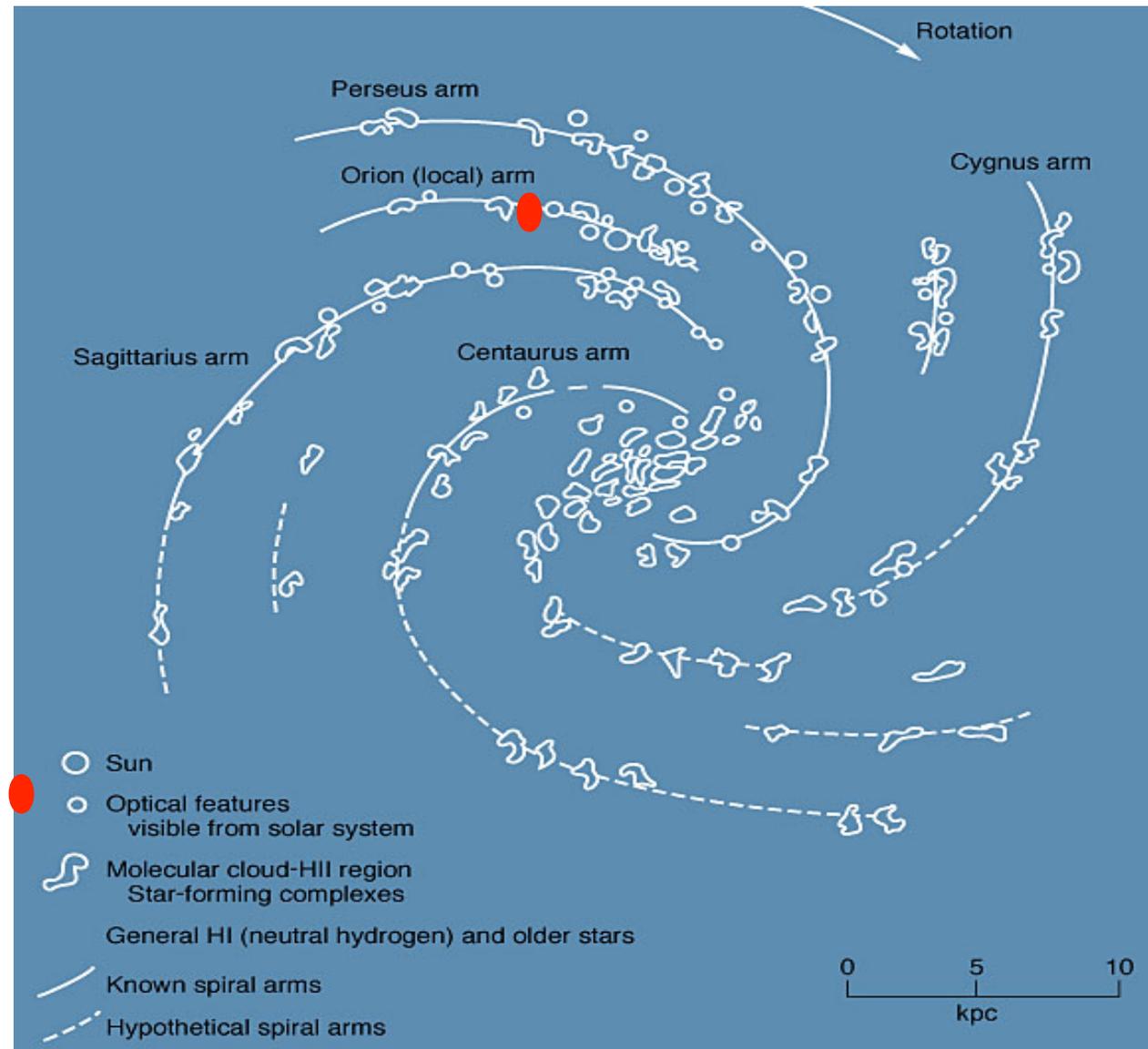
Modulazione dei RC di bassa energia dovuta al ciclo del Sole

- Variazioni del ciclo solare per energie $< \sim 3$ GeV
- Cfr dati di PAMELA
- RC con $E > 3$ GeV non affetti dal ciclo solare
- Flusso di RC di bassa energia (>1 GeV): ~ 1000 p/(m²s sr).

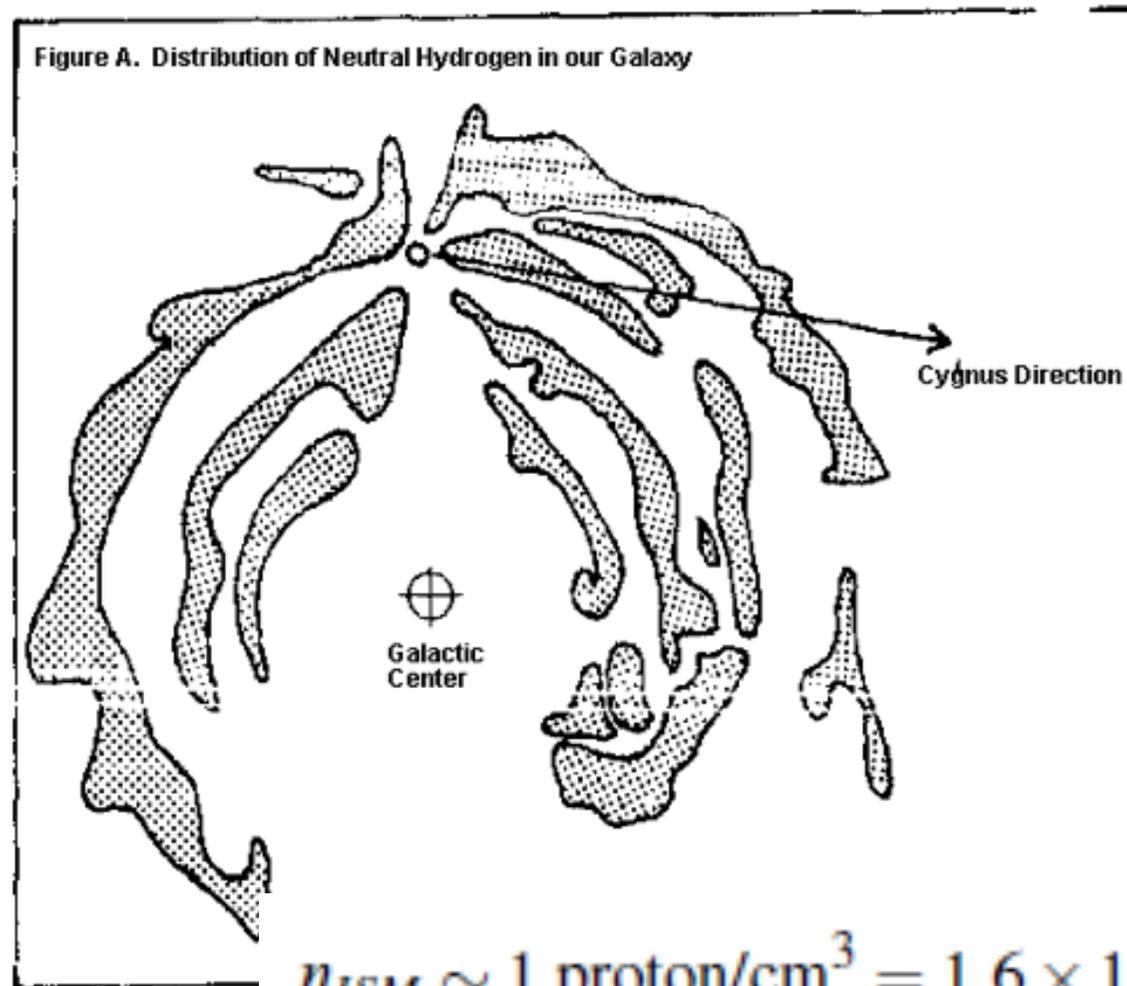


La Galassia

- Il gas interstellare o intragalattico (GI) è il mezzo in cui si formano le stelle.
- Contribuisce per il 5% alla massa della Galassia



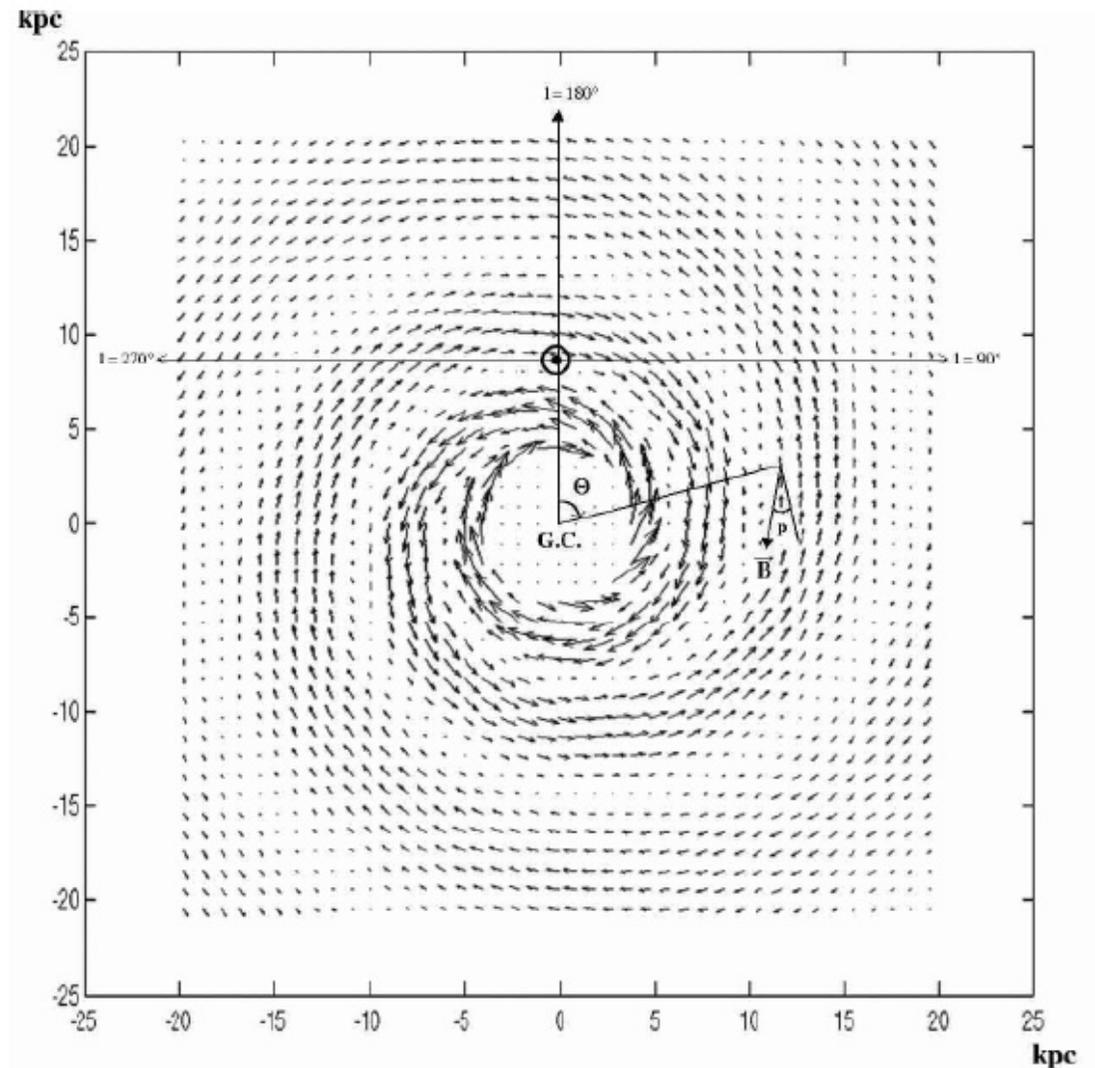
Distribuzione di idrogeno neutro nella Galassia



Copyright (c) 1997 by Michael

Il campo magnetico galattico

- Si misura tramite la polarizzazione della luce delle stelle
- Intensità media:
3-4 μGauss
- Coerenti su scale di
1-10 pc



Nubi Gassose

- Scoperte con astronomia radio
- Il gas viene riscaldato da vari meccanismi:
 - Esplosioni di SN
 - Radiazione U.V. da stelle giganti
 - Eccitazione/ionizzazione da RC
- Si raffredda con altri meccanismi:
 - Bremsstrahlung (gas caldi, $K > 10^7$ K)
 - Diseccitazione 10^4 K $< T < 10^7$ K
 - Emissione termica

Densità media del mezzo Interstellare

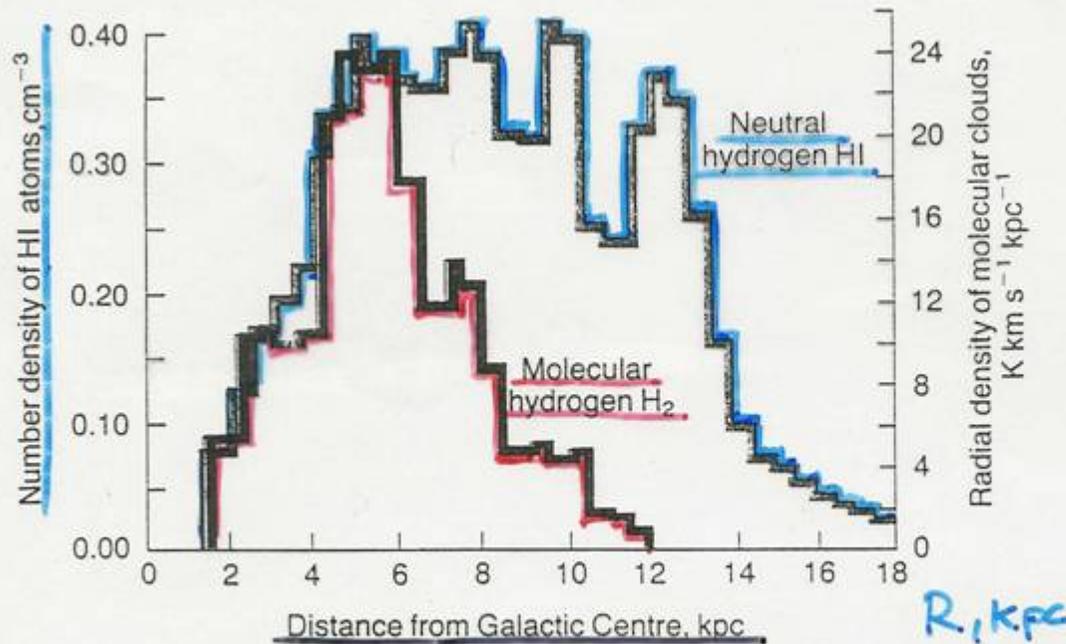


Figure 17.2. The radial distribution of atomic and molecular hydrogen as deduced from radio surveys of the Galaxy in the 21-cm line of atomic hydrogen and from millimetre surveys of the molecular emission lines of carbon monoxide, CO. (After D. Michalis and J. Binney (1981). *Galactic astronomy: structure and kinematics*, pp. 535, 554. San Francisco: W.H. Freeman and Co.)

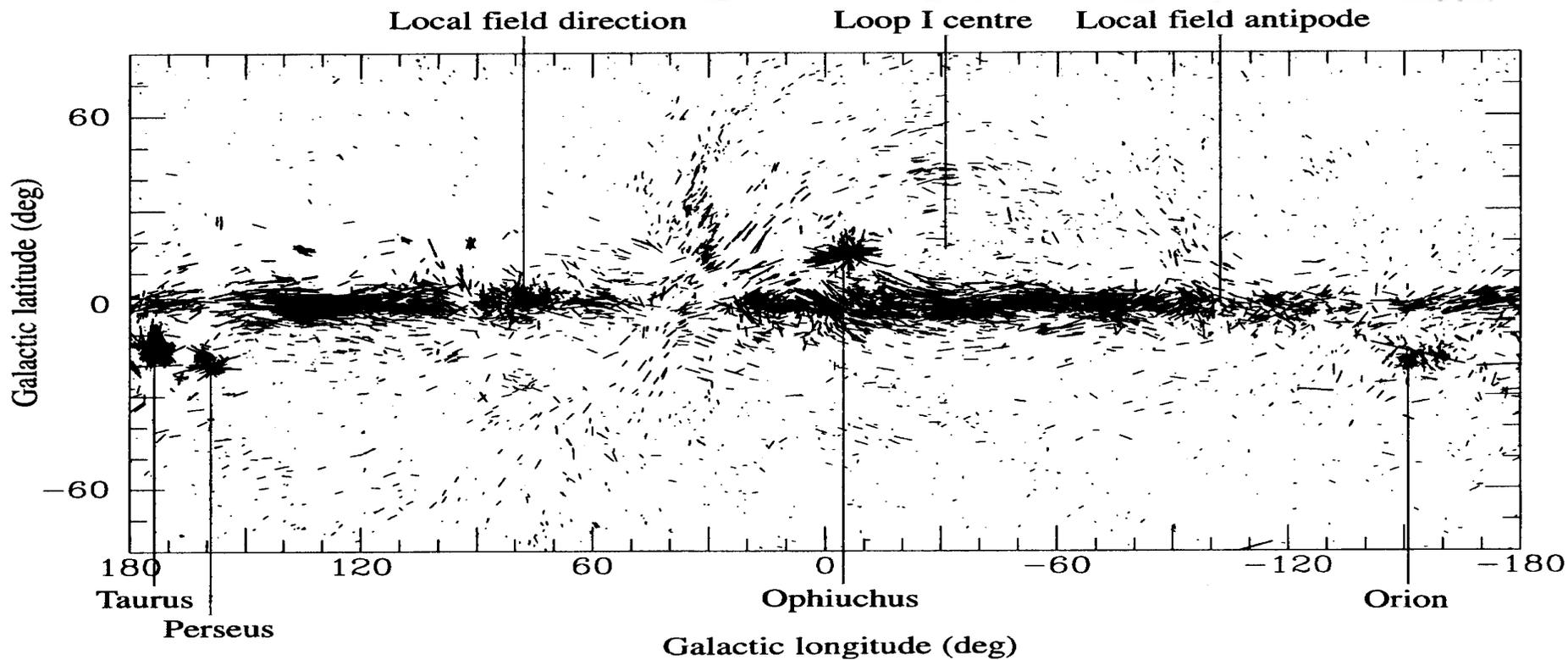
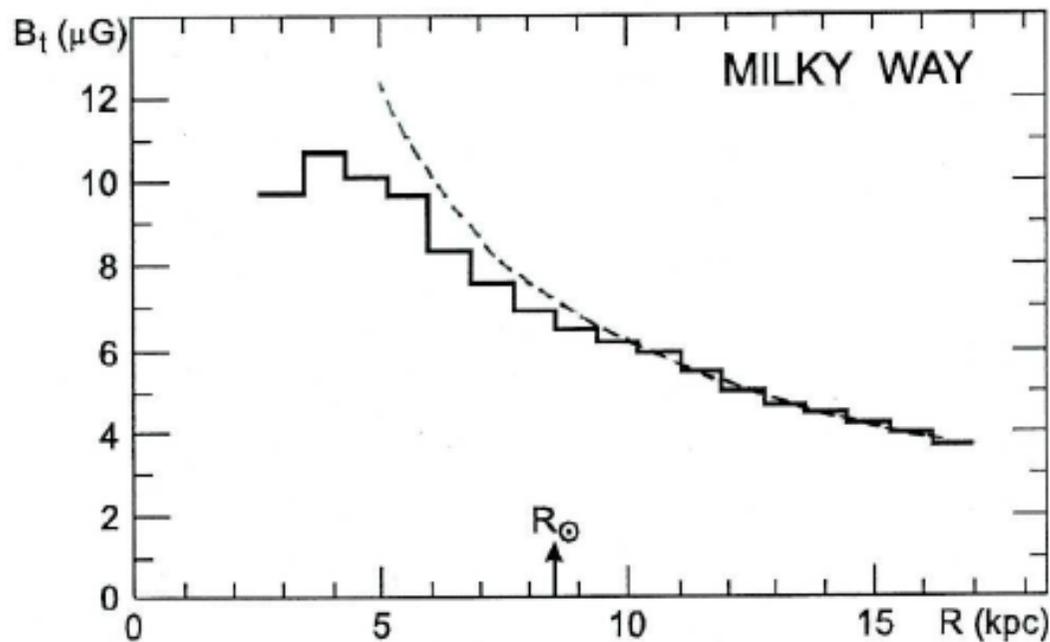
- Figura 17.2 libro

$$\rho_{\text{ISM}} = 1 \text{ p/cm}^3 = 1.6 \times 10^{-24} \text{ g/cm}^3$$

NOME	IL MEZZO INTERSTELLARE		T (K)
	CONSTITUENTI	Rivelati da...	
MOLECOLARI NUBI	H ₂ , CO CS etc	Linee molecolari Emiss. Polveri	~0.5% 40% 1000
NUBI DI H NUBI DIFFUSE	H, C, O neutri	linee di 21 cm Linee Assorbim.	5% 40% 1-100
INTERNEBULE	H, H ⁺ , e ⁻ (ionizz. 40%)	21 cm + assorbim. Linee H	40% 20% 0.1-1
CORONE stellari	H ⁺ , e ⁻ ... O ⁵⁺	soft X (0.1-2 keV)	~50% 0.1% 1000

Intensità di B

Zweibel & Heiles 1997, Nature 385,131
Berdyugin & Teerikorpi 2001, A&A 368,635

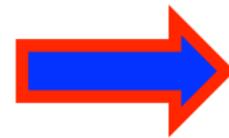


Richiamo: moto di un RC nel campo magnetico Galattico

$$mv^2 / r = pv / r = ZevB / c$$

$$r = pc / ZeB$$

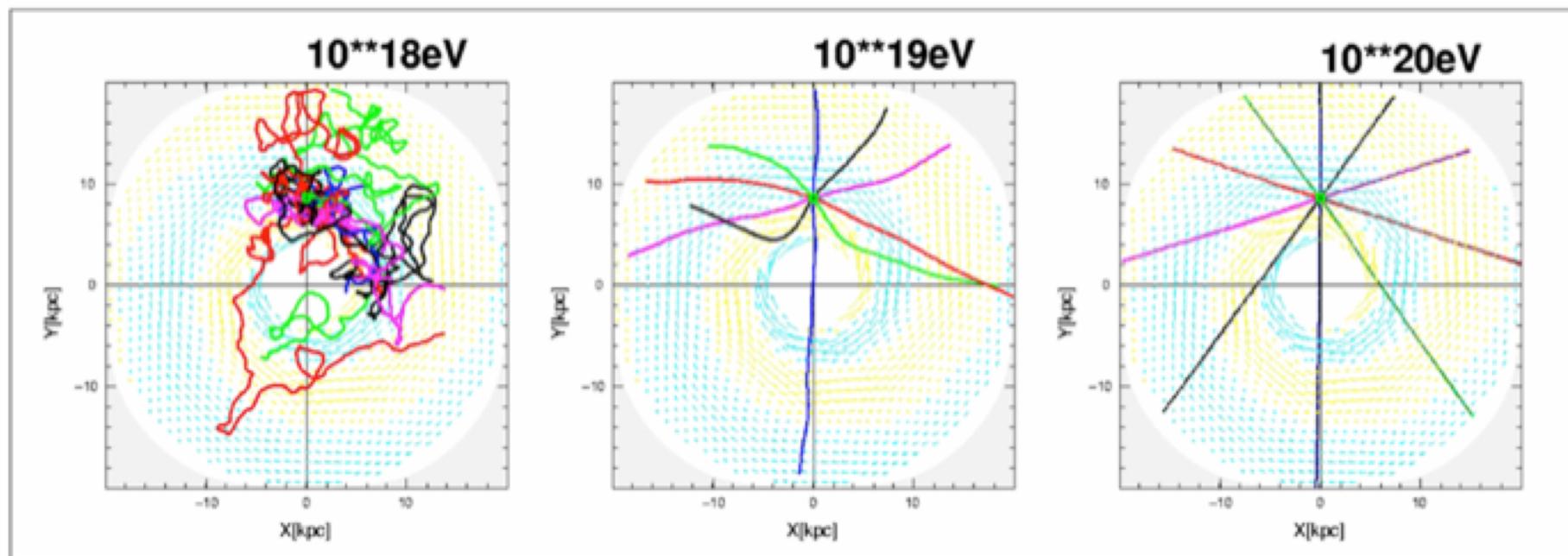
$$r(\text{cm}) = \frac{1}{300} \frac{E(\text{eV})}{ZB(\text{G})}$$



$$(10^{12} \text{ eV}) = 10^{15} \text{ cm} = 3 \times 10^{-4} \text{ pc}$$

$$r = (10^{15} \text{ eV}) = 10^{18} \text{ cm} = 3 \times 10^{-1} \text{ pc}$$

$$(10^{18} \text{ eV}) = 10^{21} \text{ cm} = 300 \text{ pc}$$



Abbondanze dei nuclei nel Sistema Solare

- Sono rappresentative delle abbondanze degli elementi nel mezzo interstellare

Ref: Mashnik, astro/ph:
0008382

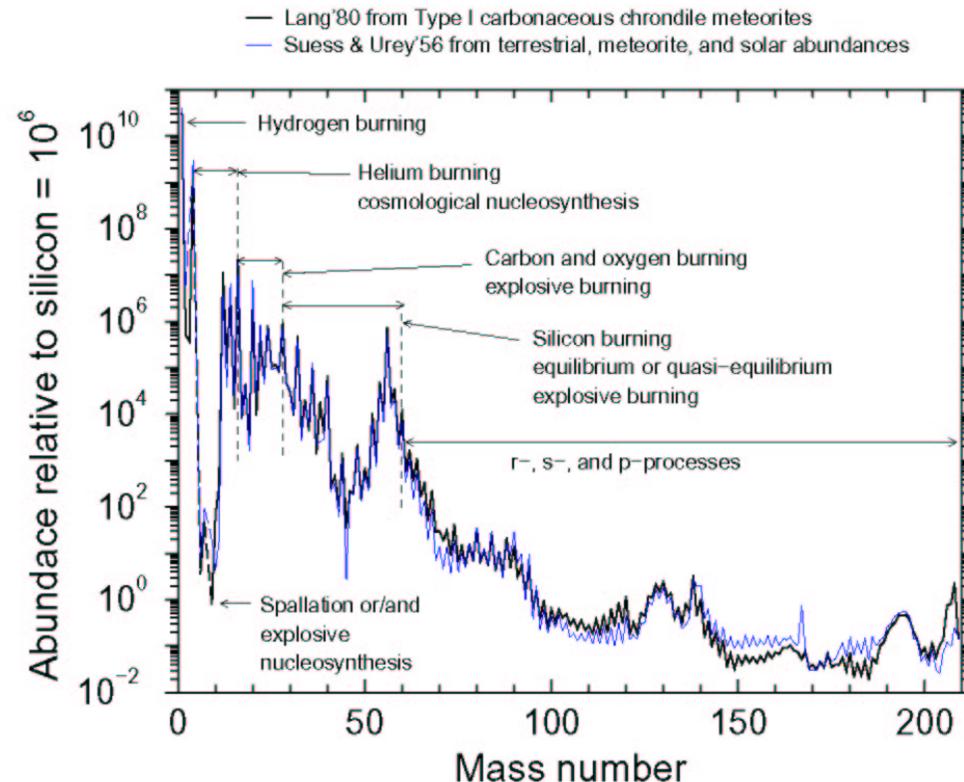


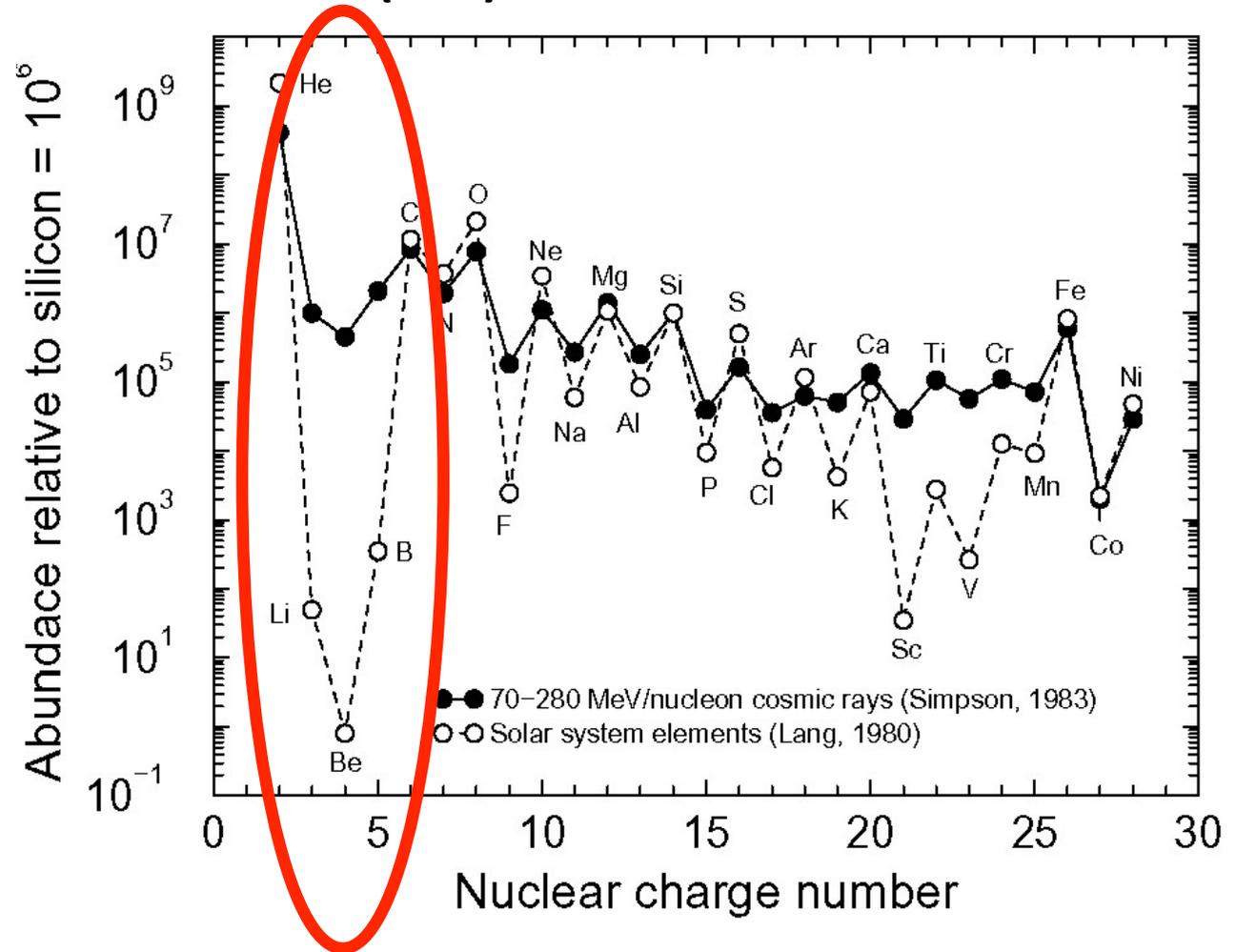
Fig. 1.— Abundances of solar system nuclides plotted as a function of mass number. The thin blue curves shows old data compiled in Table III by Suess and Urey (1956) which are based on measurements of terrestrial, meteoric, and solar abundances. These data were used by Burbidge, Burbidge, Fowler, and Hoyle (1957) in postulating the basic nucleosynthetic processes in stars in their seminal work which become widely known as “B²FH,” the “bible” of nuclear astrophysics. The thick black curve shows newer data from the compilation published in Table 38 by Lang (1980) which are based upon measurement of Type I carbonaceous chondrite meteorites, and are thought to be a better representation than Suess and Urey’s curve. The nuclear processes which are thought to be the main stellar mechanisms of nuclide production are shown as well in the figure.

Confronto tra le abbondanze dei vari nuclidi nei RC e nel mezzo IG

- I RC hanno una composizione chimica analoga a quella del Sistema Solare (Solar System Abundance, SSA)?
- Se sì, questo indica una origine simile a quella del SS.
- Le abbondanze degli elementi nei RC si determinano tramite esperimenti di misura diretta dei RC
- Si notano alcune discrepanze rispetto al SSA, in particolare in corrispondenza al gruppo Li,Be,B e del gruppo prima del Fe

Abbondanze relative dei RC e del sistema solare (SS)

- H e He sono dominanti (98%), leggermente in difetto rispetto SS
- Buon accordo tra CR e SS per molti elementi, in particolare C, O, Mg, Fe.
- Elementi leggeri Li, Be, B e quelli prima del ferro Sc, V sono straordinariamente abbondanti nei RC rispetto SSA

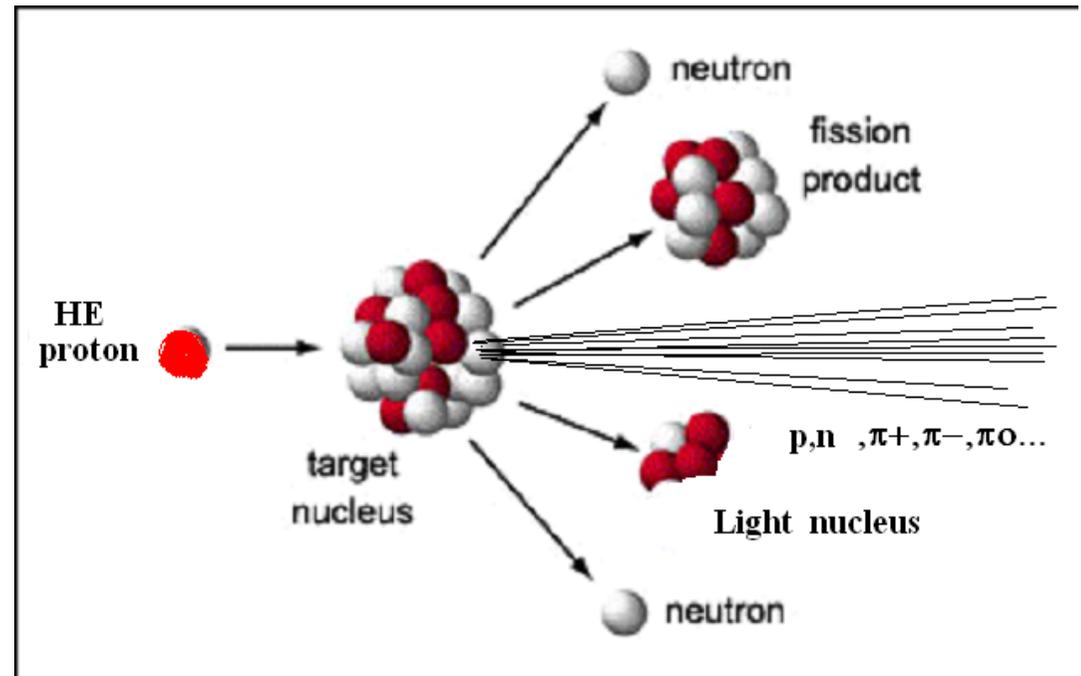


Produzione di Li, Be, B nei RC

- ${}^6\text{Li}$, Be, B sono catalizzatori delle reazioni di nucleosintesi. Ciò significa che NON sono rilasciati al termine della vita stellare. Il solo ${}^7\text{Li}$ ha una piccola percentuale di origine cosmologica, mentre ${}^6\text{Li}$, Be, B non sono stati prodotti dal big bang.
- Li, Be, B sono prodotti temporaneamente durante la catena di fusione, ma vengono “consumati” durante le reazioni (vedere cap. 8): le stelle consumano questi elementi durante la loro vita.
- Quale è l’origine di questi elementi rari?
- \Rightarrow Reeves, Fowler & Hoyle (1970) ipotizzarono la loro origine come dovuta all’interazione dei RC (spallazione e fusione di $\alpha + \alpha$) con il mezzo interstellare (ISM).

Interazioni di alta energia di p con nuclei

- Il p interagisce con un solo nucleone nel nucleo
- Nell'interazione p-nucleone vengono prodotte molte particelle (pioni principalmente)



- Nel Sistema di riferimento del laboratorio, le particelle sono emesse in avanti.
- In genere, pochi (1 o 2) nucleoni partecipano all'interazione, e vengono rimossi dal nucleo originario. La parte rimanente è in uno stato eccitato, e alcuni frammenti (n, α) possono evaporare. La parte rimanente viene chiamata frammento nucleare, o nucleo di spallazione.

Meccanismo di propagazione

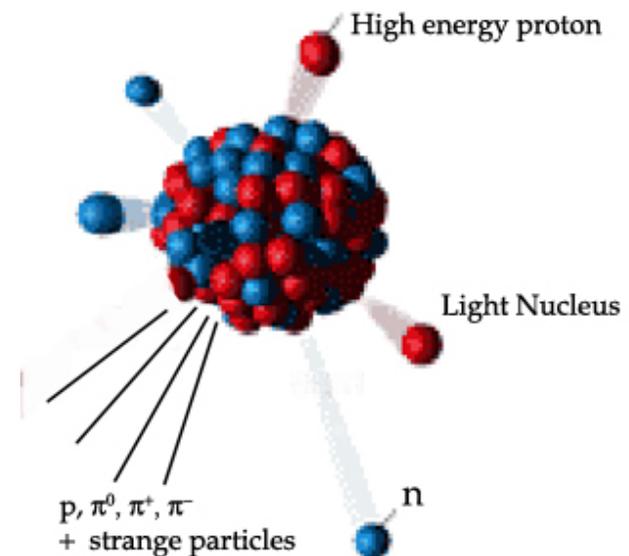
- Gli elementi del gruppo M(=C,N,O) sono gli elementi candidati a produrre L(=Li,Be,B) durante la propagazione.
- Il processo fisico con cui gli M producono gli L è la spallazione, urto con i protoni del GI.

- Quale quantità di materiale:

$$\xi = \rho L \text{ (gcm}^{-2}\text{)}$$

i nuclei M devono attraversare per produrre, nel rapporto osservato, gli elementi L.

- Il problema può essere impostato con un sistema di equazioni differenziali.



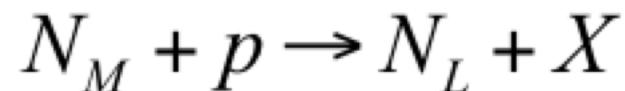
- Costruiamo un “modellino giocattolo” di propagazione dei RC, in cui le ipotesi di partenza sono:

- **Nessuna presenza di nuclei Leggeri (N_L) alle sorgenti dei RC**
- **Una certa quantità di nuclei Medi (N_M), che durante la propagazione diminuisce a causa della spallazione**

$$N_L(0) = 0$$

$$N_M(0) = N_M^0$$

- **Il processo di spallazione P_{ML} :**



avviene con una probabilità $0 \leq P_{ML} \leq 1$. $P_{ML} = \frac{\sigma_{spall.}}{\sigma_{tot.}}$

- Sperimentalmente, $P_{ML} = 28\%$.



$$\frac{d}{d\xi} N_M(\xi) = -\frac{N_M(\xi)}{\lambda_M} \quad (1)$$

$$\frac{d}{d\xi} N_L(\xi) = -\frac{N_L(\xi)}{\lambda_L} + \frac{P_{ML}}{\lambda_M} N_M(\xi) \quad (2)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{N_0 \cdot \sigma_i}$$

$$\sigma_i \propto \sigma_0 \cdot A_{\text{mdo}}^{2/3}$$

$$\sigma_M = (45 \text{ mb}) \cdot A_M^{2/3} = 280 \text{ mb}$$

$$\sigma_L = (45 \text{ mb}) \cdot A_L^{2/3} = 200 \text{ mb}$$

$$\lambda_M = \frac{1}{(6 \times 10^{23} \cdot 280 \text{ mb})} = 6.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$$

$$\lambda_L = \frac{1}{(6 \times 10^{23} \cdot 200 \text{ mb})} = 8.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$$

- lunghezza di interazione nucleare

- Valori dei parametri in (1) e (2)

- La soluzione dell'eq. 1 è:

$$N_M(\xi) = N_M^0 \cdot e^{-\xi/\lambda_M} \quad (3)$$

- Moltiplicando ambo i membri della (2) per e^{ξ/λ_L}

$$\frac{d}{d\xi} N_L(\xi) \cdot e^{\xi/\lambda_L} = -\frac{N_L(\xi)}{\lambda_L} \cdot e^{\xi/\lambda_L} + \frac{P_{ML}}{\lambda_M} N_M(\xi) \cdot e^{\xi/\lambda_L}$$



$$\frac{d}{d\xi} (N_L(\xi) \cdot e^{\xi/\lambda_L}) = \frac{P_{ML}}{\lambda_M} N_M^0 \cdot e^{(\xi/\lambda_L - \xi/\lambda_M)}$$

- Questa, è una equazione del tipo:

$$\frac{d}{dx} (y(x) \cdot e^{x/\lambda_L}) = B \cdot e^{(x/\lambda_L - x/\lambda_M)} \quad (4)$$

$$\text{dove } B = \frac{P_{ML}}{\lambda_M} N_M^0$$

$$\frac{d}{dx} \left(y(x) \cdot e^{x/\lambda_L} \right) = B \cdot e^{(x/\lambda_L - x/\lambda_M)} \quad (4)$$

■ Proviamo con una soluzione del tipo:

$$y(x) = N_L(\xi) = c \cdot \left(e^{-x/\lambda_L} - e^{-x/\lambda_M} \right) \quad (5)$$

■ Con le condizioni al contorno:

$$y(x) = 0 = N_L(0) = 0$$

$$\frac{d}{dx} \left[c \cdot \left(e^{-x/\lambda_L} - e^{-x/\lambda_M} \right) \cdot e^{x/\lambda_L} \right] = B \cdot e^{(x/\lambda_L - x/\lambda_M)}$$

$$\frac{d}{dx} \left[c \cdot \left(1 - e^{-x/\lambda_M + x/\lambda_L} \right) \right] = B \cdot e^{(x/\lambda_L - x/\lambda_M)}$$

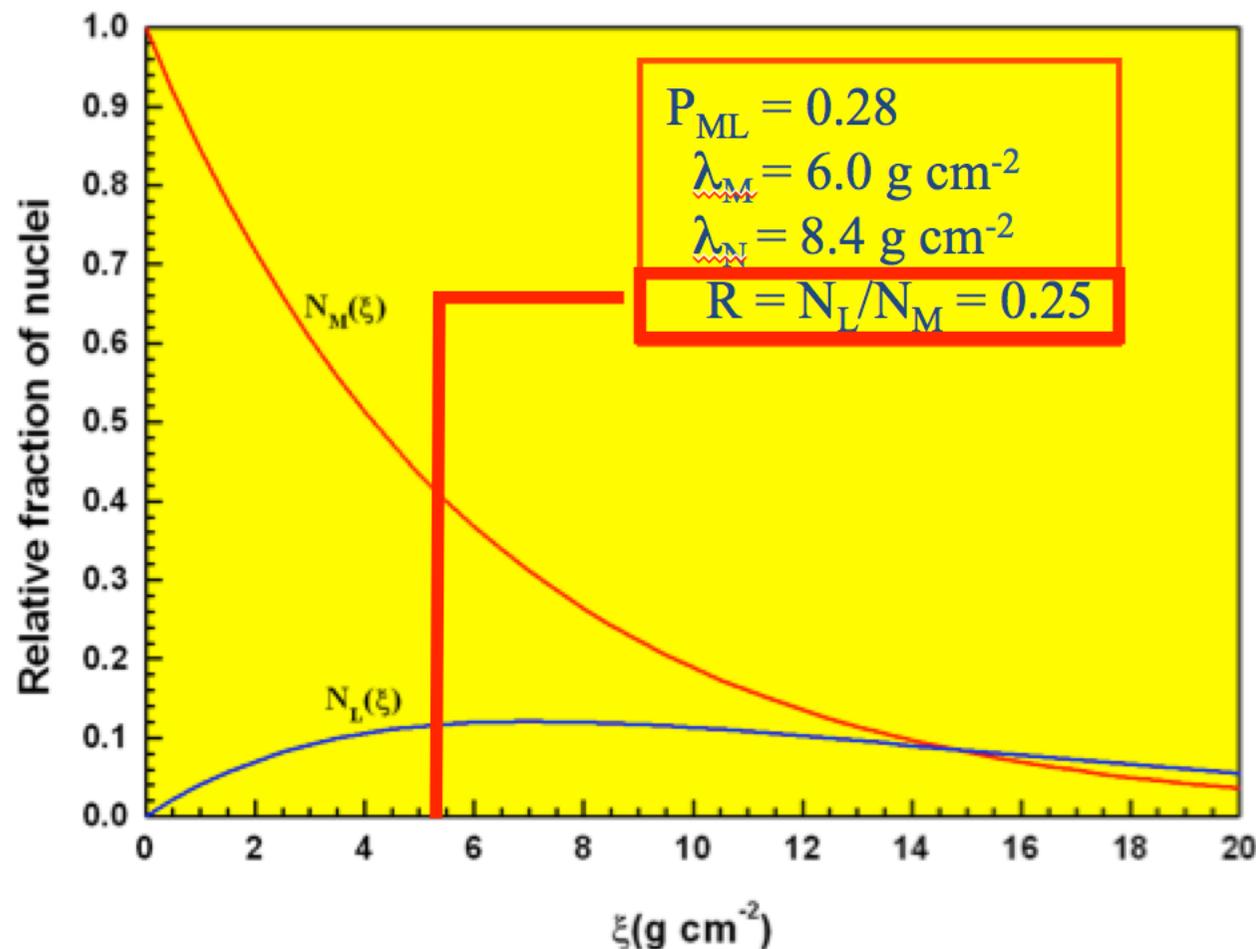
$$c \cdot \left(\frac{1}{\lambda_M} - \frac{1}{\lambda_L} \right) = B$$

$$c = B \cdot \frac{\lambda_M \lambda_L}{\lambda_L - \lambda_M}$$

- Inserendo il valore di “c” nella (5) otteniamo finalmente:

$$N_L(\xi) = \left(\frac{P_{ML}}{\lambda_M} N_M^0 \right) \cdot \left(\frac{\lambda_M \lambda_L}{\lambda_L - \lambda_M} \right) \cdot \left(e^{-\xi/\lambda_L} - e^{-\xi/\lambda_M} \right) \quad (6)$$

$$N_M(\xi) = N_M^0 \cdot e^{-\xi/\lambda_M} \quad (3)$$



- **Quindi:** perché i RC, presentino R osservato, devono avere attraversato nella Galassia uno spessore di “materiale equivalente” pari a $\xi_T = 4.8 \text{ g cm}^{-2}$.
- La Terra non ha una posizione privilegiata nella Galassia; un qualsiasi altro osservatore misura lo **stesso** numero.

3.7 Stima del tempo di confinamento da ξ_T : Galassia senza alone.

- ❑ Il modello semplificato conferma la produzione di Li, Be, B da parte degli elementi del gruppo C,N,O con le abbondanze relative come sperimentalmente misurate;
- ❑ Il modello, senza ulteriori correzioni, non funziona altrettanto bene per riprodurre le abbondanze di Mn, Cr, V da parte del Ferro (potete immaginare perché ?)
- ❑ Dal valore ottenuto di $\xi_T=4.8 \text{ g cm}^{-2}$ è possibile ottenere una stima del tempo di confinamento dei RC nella galassia. Infatti:

$$\xi_T = \rho_{CR} \cdot c \cdot \tau$$

$$\rho_{CR} = 1p/cm^3 = 1.6 \times 10^{-24} \text{ g.cm}^{-3}$$

$$\tau = \frac{4.8 (\text{g.cm}^{-2})}{3 \times 10^{10} (\text{cm/s}) \cdot 1.6 \times 10^{-24} (\text{g.cm}^{-3})} = 10^{14} \text{ s} = 3 \times 10^6 \text{ y}$$

Stima del tempo di confinamento nella Galassia con alone

- Nel caso si consideri la densità della Galassia con alone di DM:

$$\rho_{CR} = 0.3 p/cm^3$$

$$\tau_{Alone} = \frac{4.8 (g \cdot cm^{-2})}{0.3 \times 3 \times 10^{10} (cm/s) \cdot 1.6 \times 10^{-24} (g \cdot cm^{-3})} = 10^7 y$$

- Si noti che in ogni caso, se i RC si movessero di moto rettilineo, la distanza percorsa nel tempo τ sarebbe:

$$L = c \cdot \tau = 3 \times 10^{10} \times 10^{14} = 3 \times 10^{24} cm = 10^6 pc$$

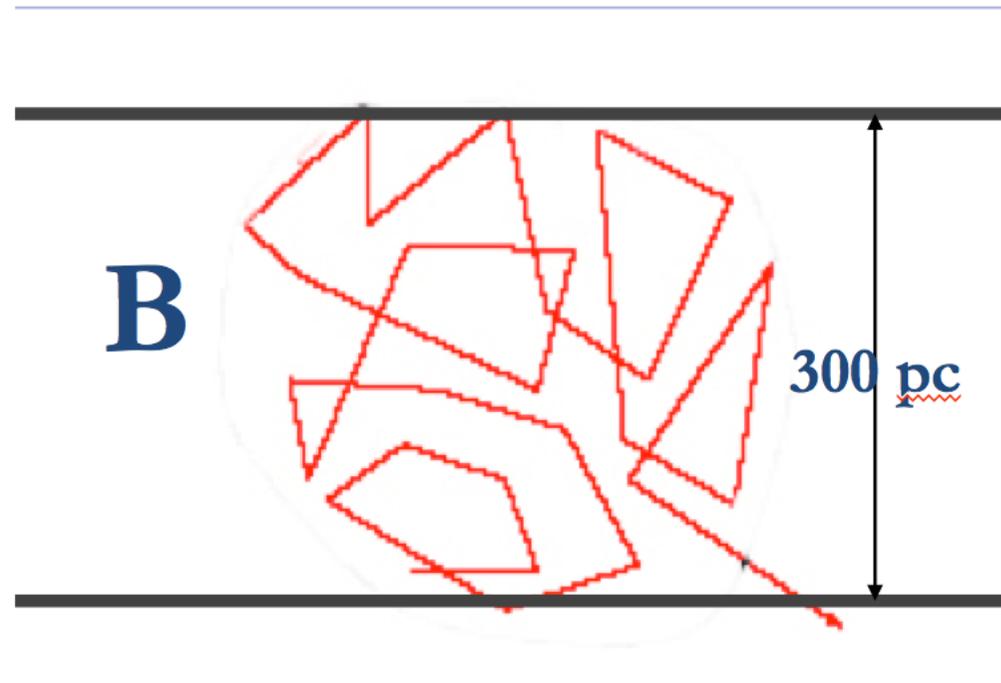
valore molto maggiore delle dimensioni della Galassia.

- τ rappresenta il tempo di diffusione dei RC dalla Galassia.
- In seguito, occorre raffinare il modello per determinare $\tau = \tau(E)$

Se il moto dei RC fosse rettilineo:

$$L_{\min} = \tau_D c = 3 \cdot 10^{10} \cdot 10^{14} \text{ cm/s s} = 10^6 \text{ pc} \gg 15 \text{ kpc} = r_{\text{galax}}$$

Ciò conferma che i RC hanno una direzione continuamente modificata durante τ (dal Campo Magnetico Galattico)



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 $\tau(E)$.

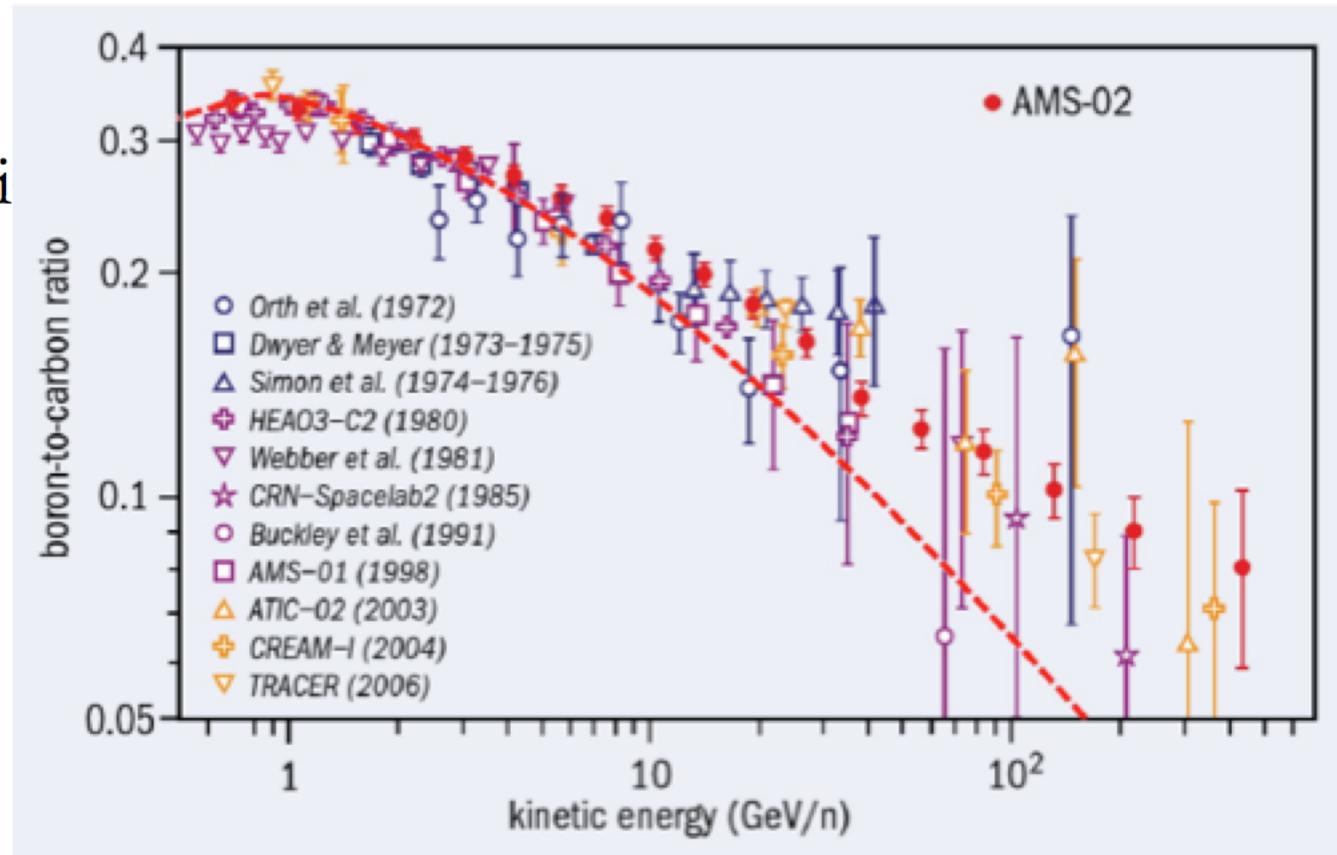
Dipendenza del rapporto B/C vs. E

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

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

- Poiché $\tau \sim \xi$

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



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

3.10 L'orologio dei Raggi Cosmici

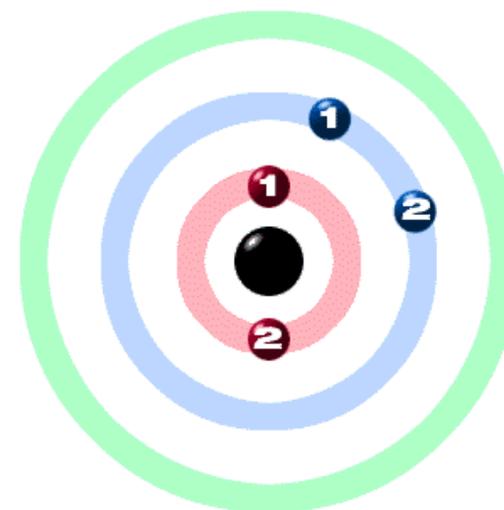
- Nel 1958, Hayakawa et al., stabilirono che le abbondanze dei secondari radioattivi potevano essere impiegati come “orologi” dei RC misurando il flusso (relativo) degli isotopi radioattivi e confrontandolo con quello aspettato se nessun decadimento fosse avvenuto.
- Per poter misurare il tempo di permanenza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

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

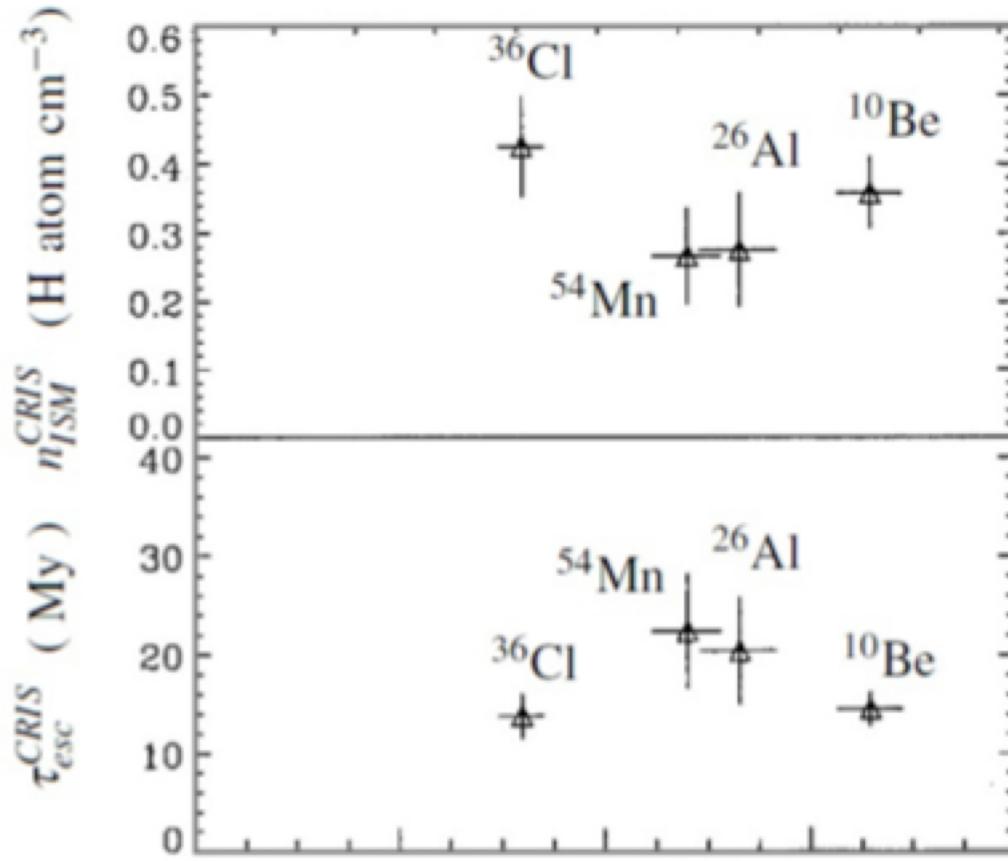
$$\tau_F \equiv t^* = 2.2 \times \tau_{10} = 8 \times 10^6 \text{ y}$$

Interpretazione delle misure del tempo di fuga in termini di modello

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

↓

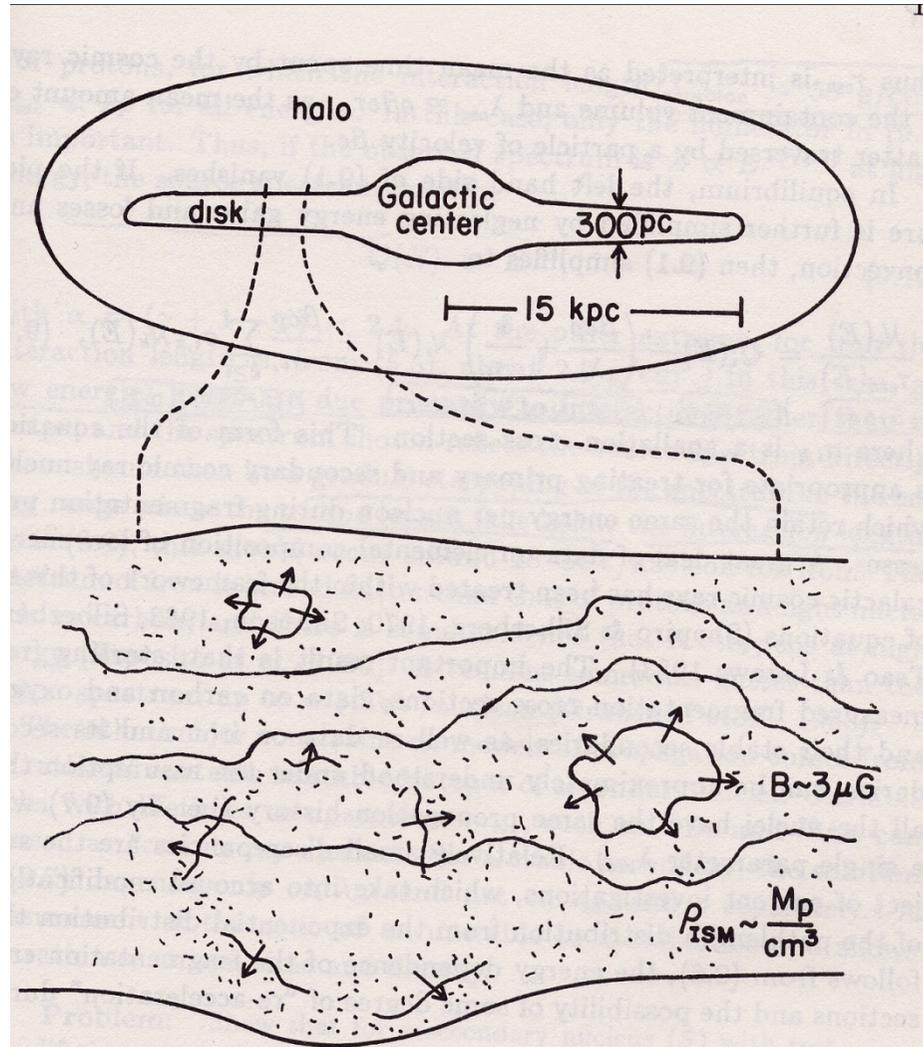
$$\rho_{ISM} = \frac{\lambda_f}{c \cdot \tau_f}$$



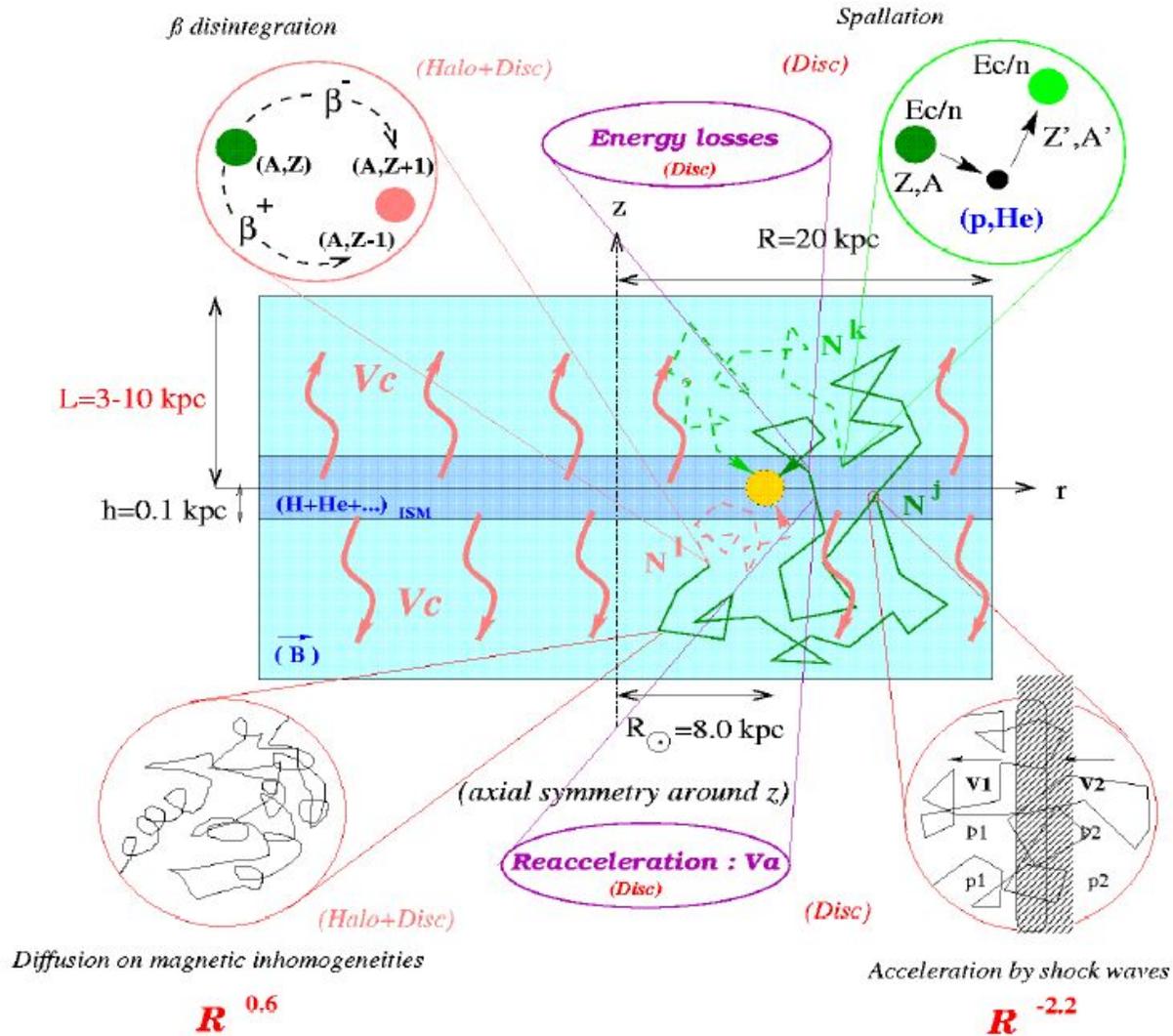
Le misure dei tempi di permenenza dei RC favoriscono scenari di propagazione nel volume con densità tipiche minori della densità media del disco galattico ($1\text{p}/\text{cm}^3$): altra evidenza *dell'alone galattico*

- 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



Cosmic Rays Propagation

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

- Diffusion**: Points to the term $\nabla \cdot (D_i \nabla N_i)$.
- E loss or gain**: Points to the term $-\frac{\partial}{\partial E} [b_i(E) N_i(E)]$.
- Convection**: Points to the term $-\nabla \cdot \mathbf{u} N_i(E)$.
- Cascade**: Points to the integral 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 term $-p_i N_i$.
- Source**: Points to the term $+Q_i(E, t)$.

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