

# Astrofisica e particelle elementari

aa 2009-10

Lezione 4

Parità

Violazione di CP

Raggi cosmici

Spettro

Composizione chimica

Effetto est ovest

Bruno Borgia

# Parità intrinseca

- Nella reazione  $\pi^- + d \rightarrow n + n$  il numero di nucleoni è conservato e quindi l'assegnazione della parità intrinseca dei nucleoni è convenzionale.
- Se in una reazione si creano nucleone ed antinucleone, o comunque fermione antifermione, è possibile determinare la loro parità relativa.
- Nella teoria di Dirac, i fermioni e gli antifermioni hanno parità opposte. C.S.Wu e Shakhnov lo hanno provato con un esperimento in cui positroni emessi da una sorgente di  $^{64}\text{Cu}$  formano con gli elettroni dell'assorbitore di piombo il positronio. Il positronio, nello stato fondamentale, può decadere in 3  $\gamma$  dallo stato di tripletto  $^3\text{S}_1$  oppure in 2  $\gamma$  dallo stato di singoletto  $^1\text{S}_0$ .
- L'esperimento misura il processo  $e^+e^- \rightarrow 2\gamma$ .

$$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$$

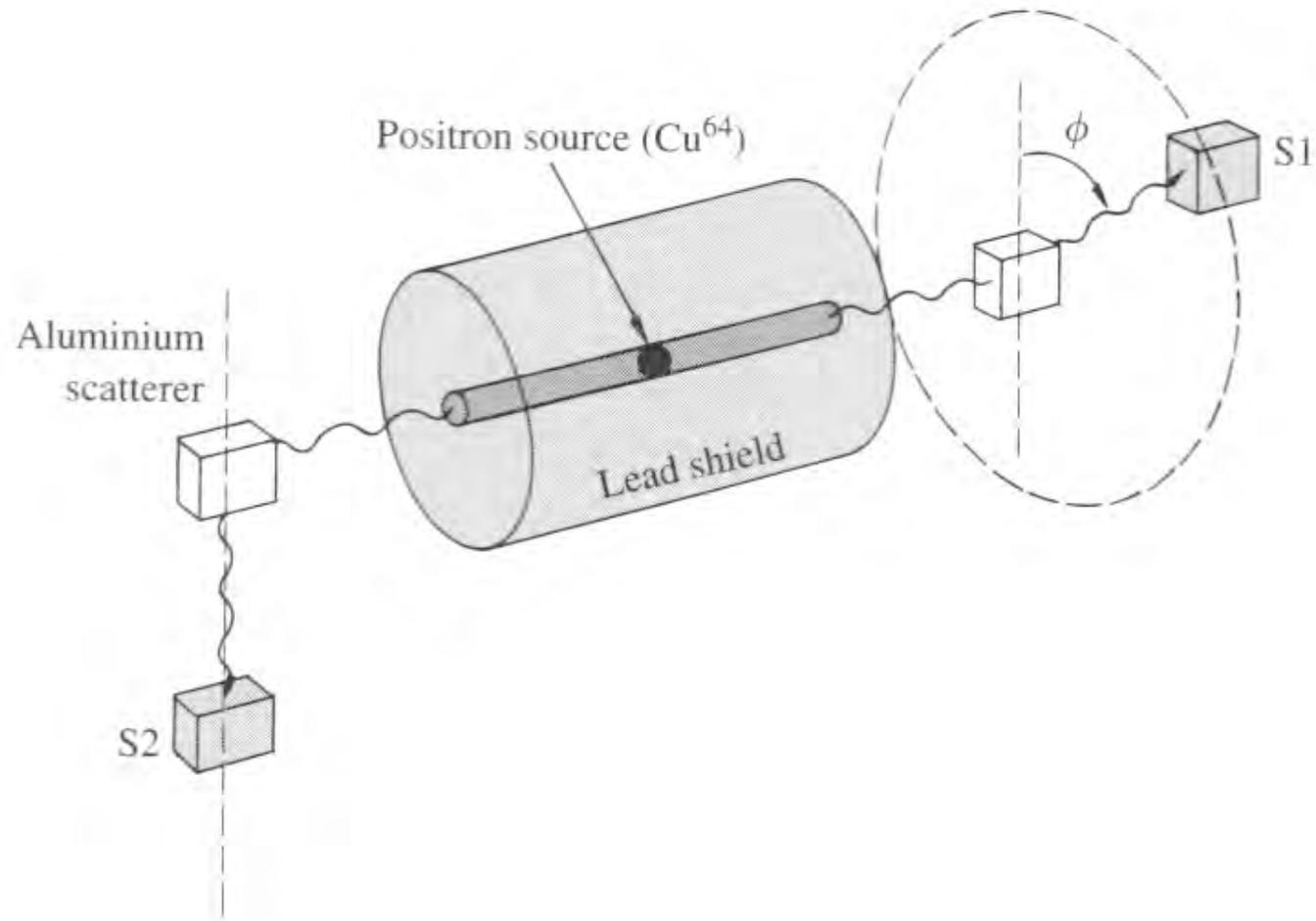
- Le funzioni d'onda lineari nel momento e nella polarizzazione più semplici che descrivono i due fotoni, sono

$$\psi_1(2\gamma) = A(\vec{\epsilon}_1 \cdot \vec{\epsilon}_2) \propto \cos \phi$$

$$\psi_2(2\gamma) = B(\vec{\epsilon}_1 \times \vec{\epsilon}_2) \cdot \vec{k} \propto \sin \phi$$

con A e B costanti,  $\phi$  angolo tra i piani di polarizzazione.

- $\psi_1$  è uno scalare e quindi positivo sotto parità,  $\psi_2$  è un prodotto scalare tra un vettore assiale ed uno polare, quindi pseudoscalare, negativo sotto parità.
- $\psi_1$  richiede un positronio con  $P=1$ ,  $\psi_2$  invece richiede  $P=-1$
- Poiché il positronio è in onda s,  $l=0$ , la parità misurata è la stessa del sistema  $e^+e^-$ .  $(-1)^{l+s+1}$
- La misura della polarizzazione dei fotoni è ottenuta con lo scattering su blocchetti di alluminio ed il risultato conferma  $P=-1$ .
- L'esperimento quindi conferma che fermione antifermione hanno parità opposta.



# CPT

- Le operazioni di coniugazione di carica C, di inversione di parità P e inversione temporale sono connesse dalla invarianza sotto le tre operazioni C, P e T prese in qualunque ordine, in qualunque interazione. Teorema CPT.
- Il teorema CPT predice che le masse, i momenti magnetici, le vite medie delle particelle e delle antiparticelle siano identiche. Ciò è verificato sperimentalmente con grande accuratezza in diversi casi.
- Mentre CPT è universale, non lo sono separatamente C, P. Non lo è neanche CP e quindi T.

# Decadimenti del $K^0$

- La violazione di CP è stata osservata per la prima volta nel decadimento del K neutro.
- Il K neutro è prodotto nelle interazioni forti come autostato della stranezza,  $K^0$  e  $\text{anti}K^0$ .
- Nel decadimento il K neutro decade in autostati di CP, con  $2\pi$  o  $3\pi$ , come sovrapposizione di  $K^0$  e  $\text{anti}K^0$ .

- $K_S \rightarrow \pi^+\pi^-; \quad \pi^0\pi^0$

- $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0; \quad \pi^0\pi^0\pi^0$

- $K_S = (K^0 + \text{anti} K^0)\sqrt{1/2} \quad \tau=0.089 \text{ ns} \quad \text{CP} = +1$

- $K_L = (K^0 - \text{anti} K^0)\sqrt{1/2} \quad \tau=51.7 \text{ ns} \quad \text{CP} = -1$

con la convenzione  $\text{CP}|K^0\rangle = |\text{anti} K^0\rangle$

- In effetti gli stati  $K_S$  e  $K_L$  non sono autostati puri di CP, ma

$$K_S = N(K_1 - \varepsilon K_2)$$

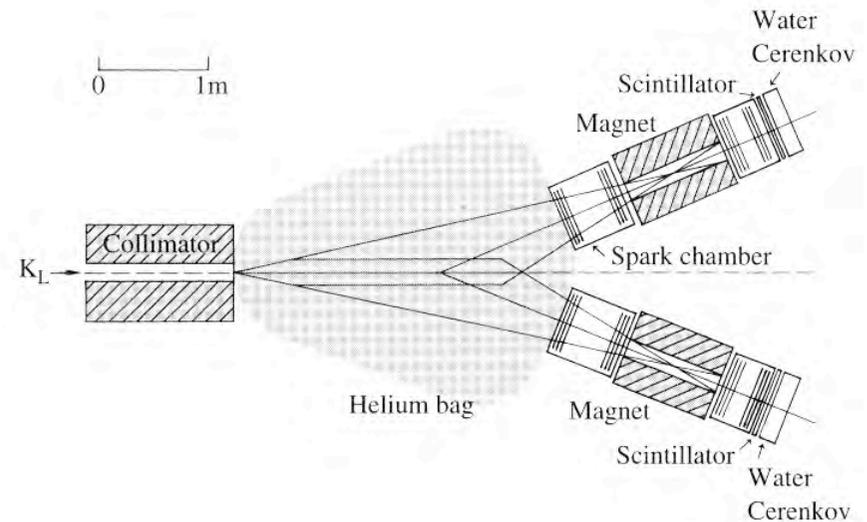
$$K_L = N(K_2 + \varepsilon K_1)$$

con  $K_1$  autostato di  $\text{CP}=+1$  e  $K_2$   $\text{CP}=-1$

# L'esperimento di Christenson, Cronin, Fitch, Turlay

- Christenson, Cronin, Fitch, Turlay nel '64 osservarono una piccola violazione ( $\approx 10^{-3}$ ) di CP nel decadimento del  $K_L$ .
- Infatti una piccola frazione di  $K_L$  decade in  $2\pi$  che hanno  $CP=+1$ .
- $\epsilon \approx 2.3 \times 10^{-3}$
- La violazione è anche apparente nel decadimento leptonic.
- Sia  $R^+$  la frequenza di decadimento  $K_L \rightarrow e^+ \nu_e \pi^-$  ;  
 $R^-$  la frequenza di  $K_L \rightarrow e^- \text{antiv}_e \pi^+$  , si ha

$$(R^+ - R^-) / (R^+ + R^-) = (3.3 \pm 0.1) \times 10^{-3}$$



# Violazione di CP

- Esiste quindi un modo per distinguere le cariche senza ambiguità:

*l'elettrone positivo è il leptone più frequente nel decadimento del  $K_L$*

- La violazione di CP nel decadimento del K può avere origine nello stato iniziale con vita media definita che non è uno stato puro di CP, *violazione indiretta*, oppure può avvenire nel decadimento stesso, *violazione diretta*.
- Evidentemente la violazione di CP ha una grande rilevanza in astrofisica per la manifesta assenza di antimateria.
- Il problema è se il livello di violazione di CP osservato è sufficiente a spiegare l'asimmetria materia-antimateria.

# SCOPERTA DEI RAGGI COSMICI (1)

- Alla fine del 1800 i fisici, studiando la conducibilità dei gas con gli elettroscopi a foglioline d'oro, scopersero che per quanto isolassero gli elettroscopi da sorgenti di radiazione, essi si scaricavano lentamente. Nel 1901 C.T.R.Wilson, in Inghilterra, suggerì che la ionizzazione del gas potesse essere dovuta a radiazione da sorgenti al di fuori dell'atmosfera e dotata di un grandissimo potere di penetrazione.
- Nel 1907 Padre Theodore Wulf in Olanda inventò un elettroscopio che permetteva di fare misure fuori del laboratorio. Furono fatte misure sulla torre Eiffel, in montagna, per verificare che allontanandosi dalla Terra, diminuiva la radiazione. In effetti la diminuzione non fu trovata, anzi in alcuni casi fu osservato un aumento della ionizzazione.

# La scoperta dei raggi cosmici (2)

Domenico Pacini (Marino 1878, Roma 1934) dal 1907 al 1910 condusse misure con un elettroscopio immerso in acqua in una scatola di rame nel golfo di Livorno e nel lago di Bracciano a varie profondità.

Osservò una diminuzione della radiazione ionizzante che attribuì ad origine indipendente dall'azione diretta delle sostanze radioattive nel terreno.

Hess conosceva i lavori di Pacini, ma non li citò mai anche dopo le rimostranze di Pacini.

D. Pacino, N. Cimento 3(1912)93



# SCOPERTA DEI RAGGI COSMICI (3)

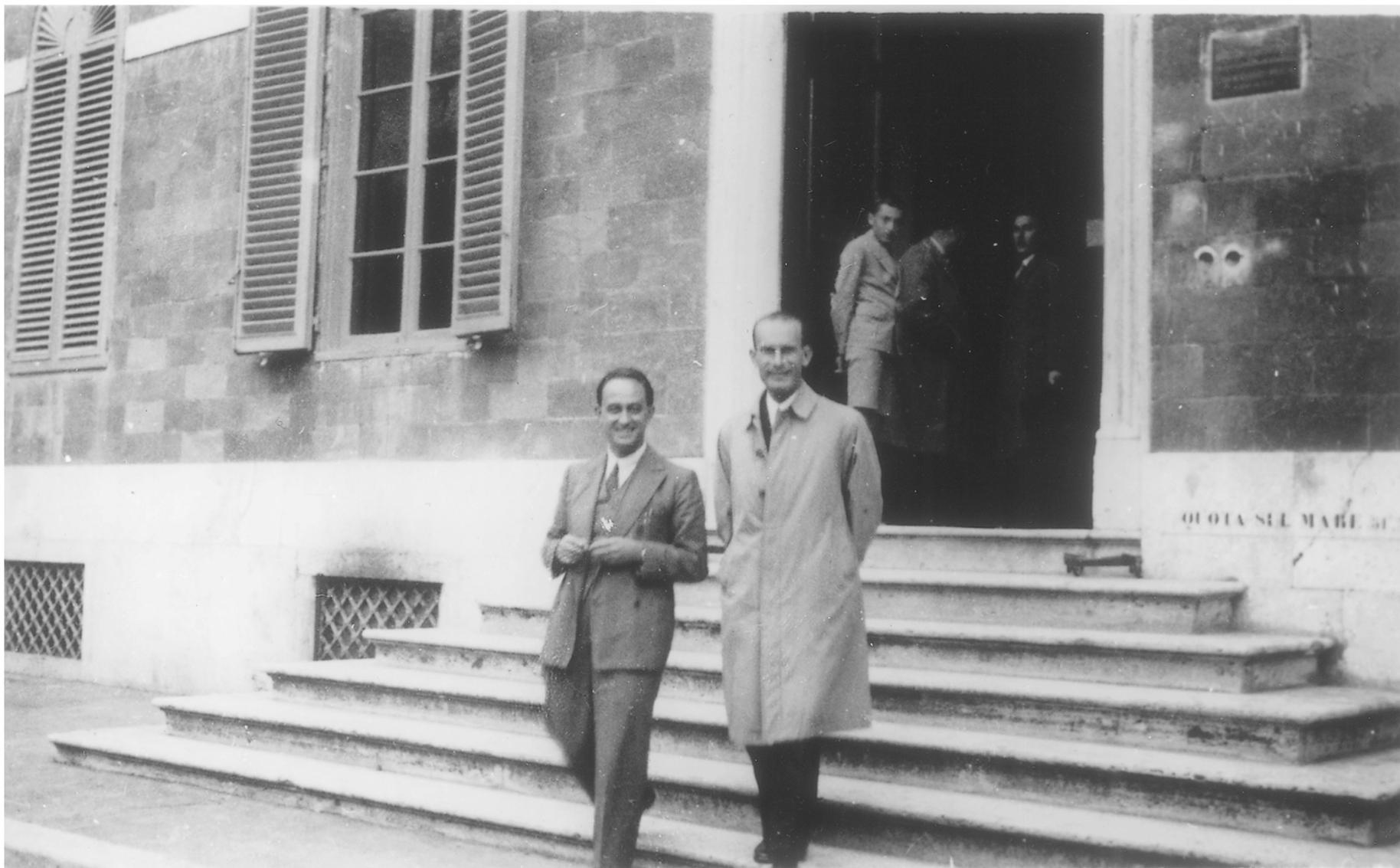
- Il 12 Agosto 1912, Victor Hess, austriaco, raggiunse in pallone l'altezza di 5350m con due camere di ionizzazione sigillate ermeticamente. Inizialmente la ionizzazione diminuì, ma a circa 1500m iniziò ad aumentare ed a 5000m era circa il doppio che alla superficie terrestre. Hess concluse che la ionizzazione era dovuta a radiazione di grande potere penetrante proveniente fuori dell'atmosfera.
- Nel 1936 gli fu assegnato il premio Nobel per la fisica.

V. Hess, Phys. Z. 13(1913)93





Roma, ottobre 1931. Il gruppo dei partecipanti al Congresso Internazionale di Fisica Nucleare.



Enrico Fermi e Franco Rasetti al Congresso di Roma del 1931.



Bruno Rossi con Enrico Fermi, Roma 1931.

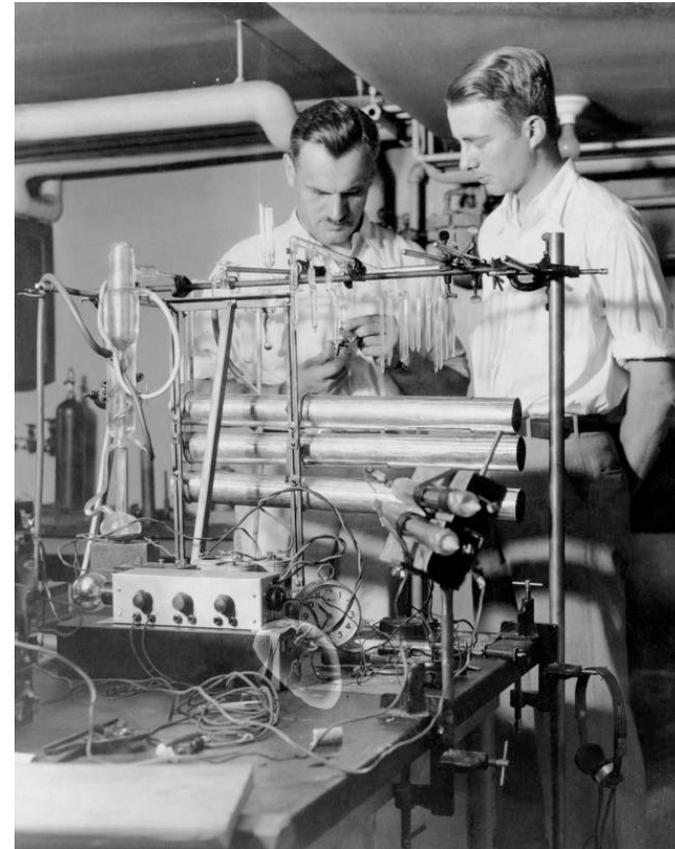


Robert Millikan con Marie Curie.

# La natura dei raggi cosmici

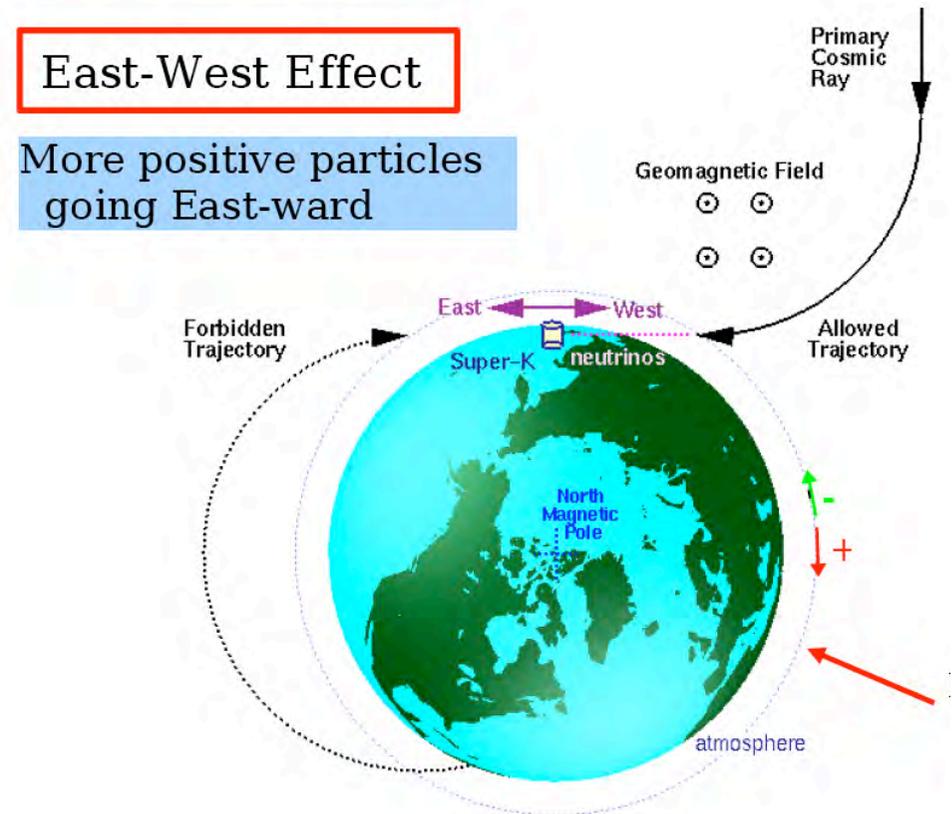
Dopo Hess, fu Robert Millikan, nel 1925, ad interessarsi a questa radiazione, e a lui si deve il nome di *raggi cosmici*: egli riteneva che fossero composti principalmente da raggi gamma. Arthur Compton e prima di lui Bruno Rossi, ipotizzò, al contrario, che fossero composti da particelle cariche: successive misurazioni dimostrarono la validità di questa seconda ipotesi. La distribuzione delle radiazione, 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: toccò a Thomson dimostrare sperimentalmente la giustezza dell'idea dell'italiano.



# SCOPERTA DEI RAGGI COSMICI (5)

- Nel 1927, viaggiando da Amsterdam a Java, Clay osservò una variazione dell'intensità dei RC con la latitudine, diminuendo avvicinandosi all'Equatore. Di conseguenza concluse che la parte preponderante della RC è formata da particelle cariche.
- Nel 1930 Bruno Rossi mostrò che se la maggior parte dei raggi cosmici avesse una determinata carica, ci debba essere un effetto est-ovest.
- Nel 1933 due gruppi americani, T.H.Johnson e L.Alvarez con A.H.Compton misurarono l'effetto est-ovest, determinando che i RC sono predominantemente positivi.



$$B_{\text{equatore}} = 0.3 \text{ Gauss}$$

$$p \text{ (GeV/c)} = 0.3 \text{ B(Tesla)R(metri)}$$



Il laboratorio della Testa Grigia per lo studio dei raggi cosmici, realizzato nel 1947 presso la stazione superiore della funivia del Plateau Rosa sopra Cervinia, a 3500 metri di quota.

# EVOLUZIONE STUDIO DEI RC

- proprietà di base di elettricità e magnetismo
- scoperta delle particelle elementari
- astrofisica: sorgenti, campi magnetici eliosfera, meccanismo accelerazione nelle onde d'urto delle supernove
- fisica nucleare nelle stelle e nelle supernove
- fisica delle particelle: oscillazione dei neutrini, massa dei neutrini
- cosmologia: materia oscura/supersimmetria?
- nuova fisica

# SPETTRI DEI RC

- Misura precisa della loro energia e abbondanza

adroni, nuclei,  $e^\pm$ , raggi gamma

- *sorgenti*

- *meccanismi di accelerazione*

- *interazioni con ISM*

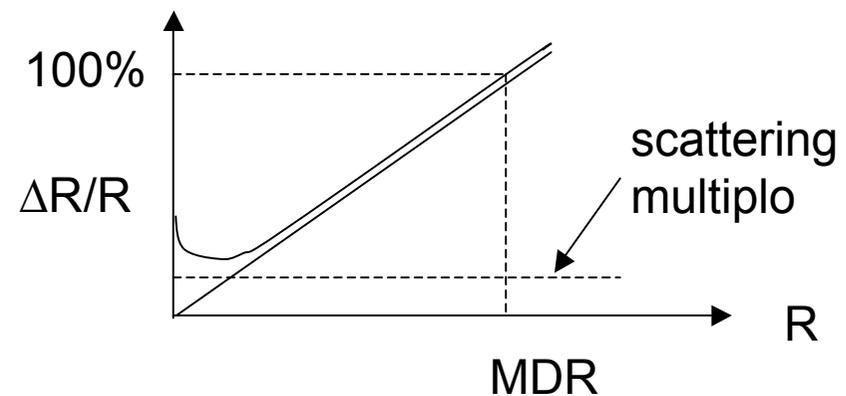
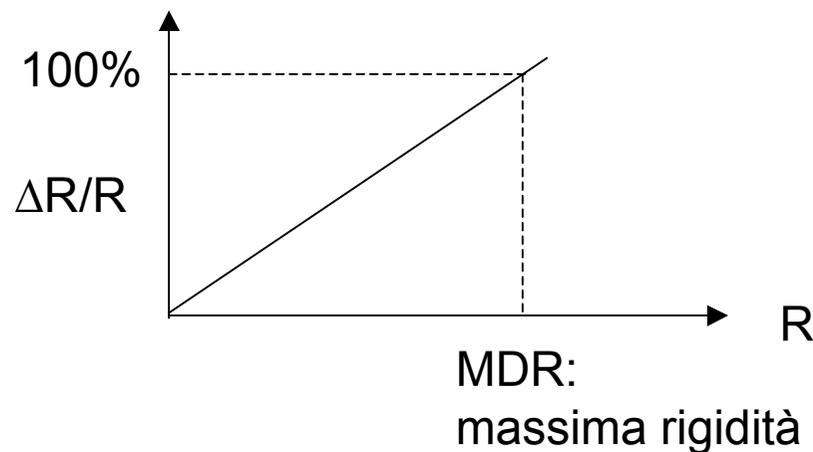
- *modelli di trasporto*

- *fondo per ricerca di nuove particelle*

- *calcolo neutrini atmosferici*

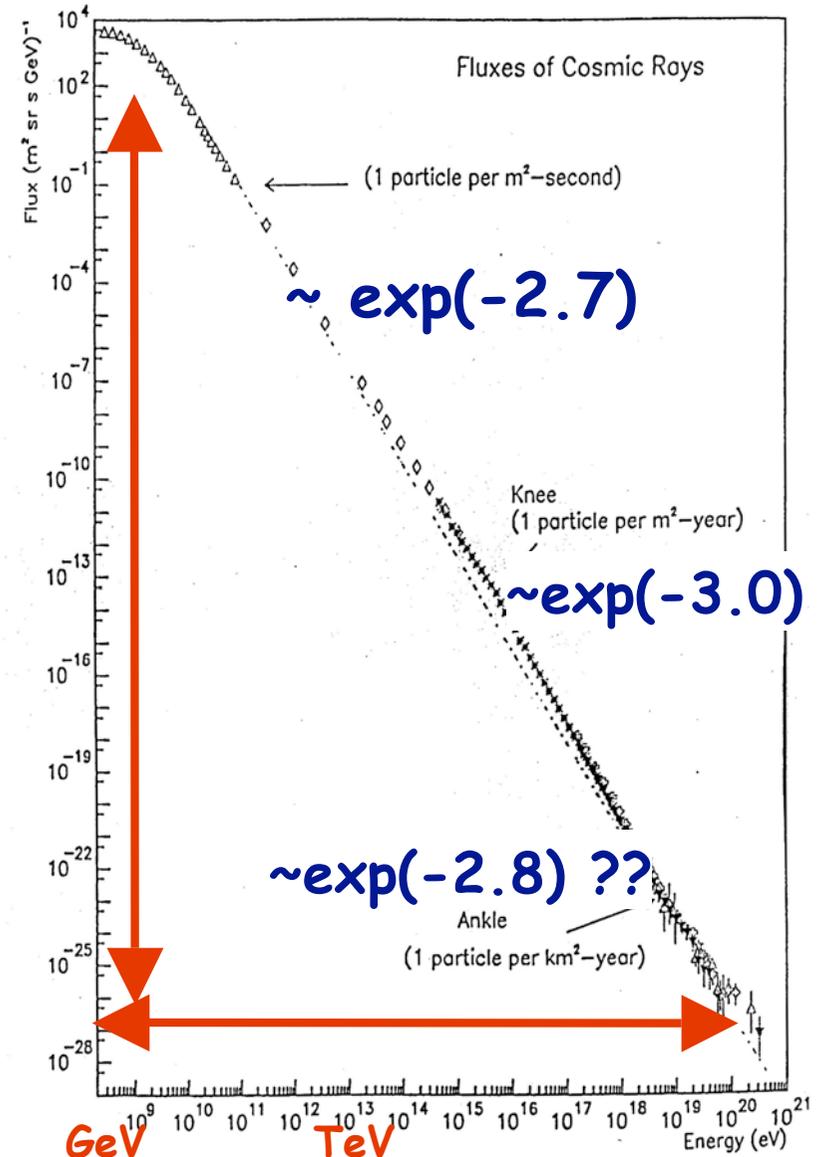
# ALCUNE DEFINIZIONI

- Flusso di particelle  $\frac{dN}{dEd\Omega dAdt} : [MeV^{-1}sr^{-1}cm^{-2}s^{-1}]$
- fattore geometrico (GF): accettazione  $[cm^2 sr]$
- Esposizione = GF x tempo
- Rigidità  $R = p/Ze : [volt/c]$

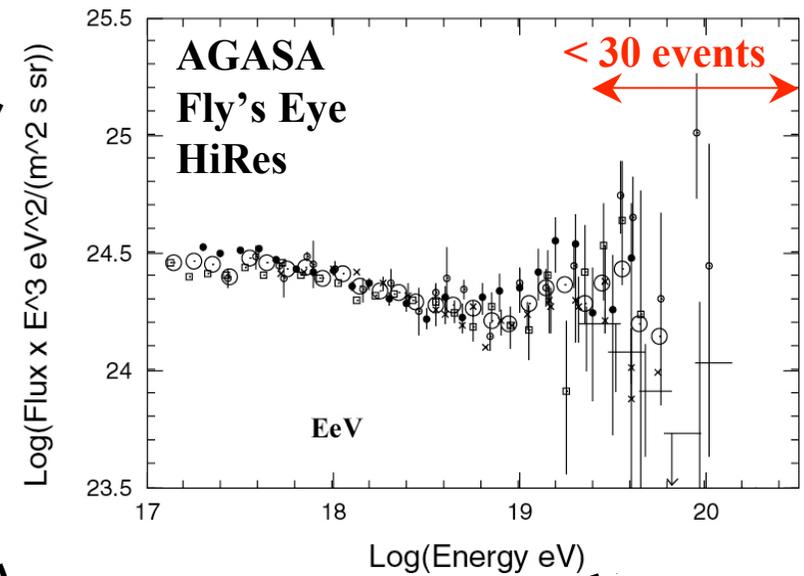
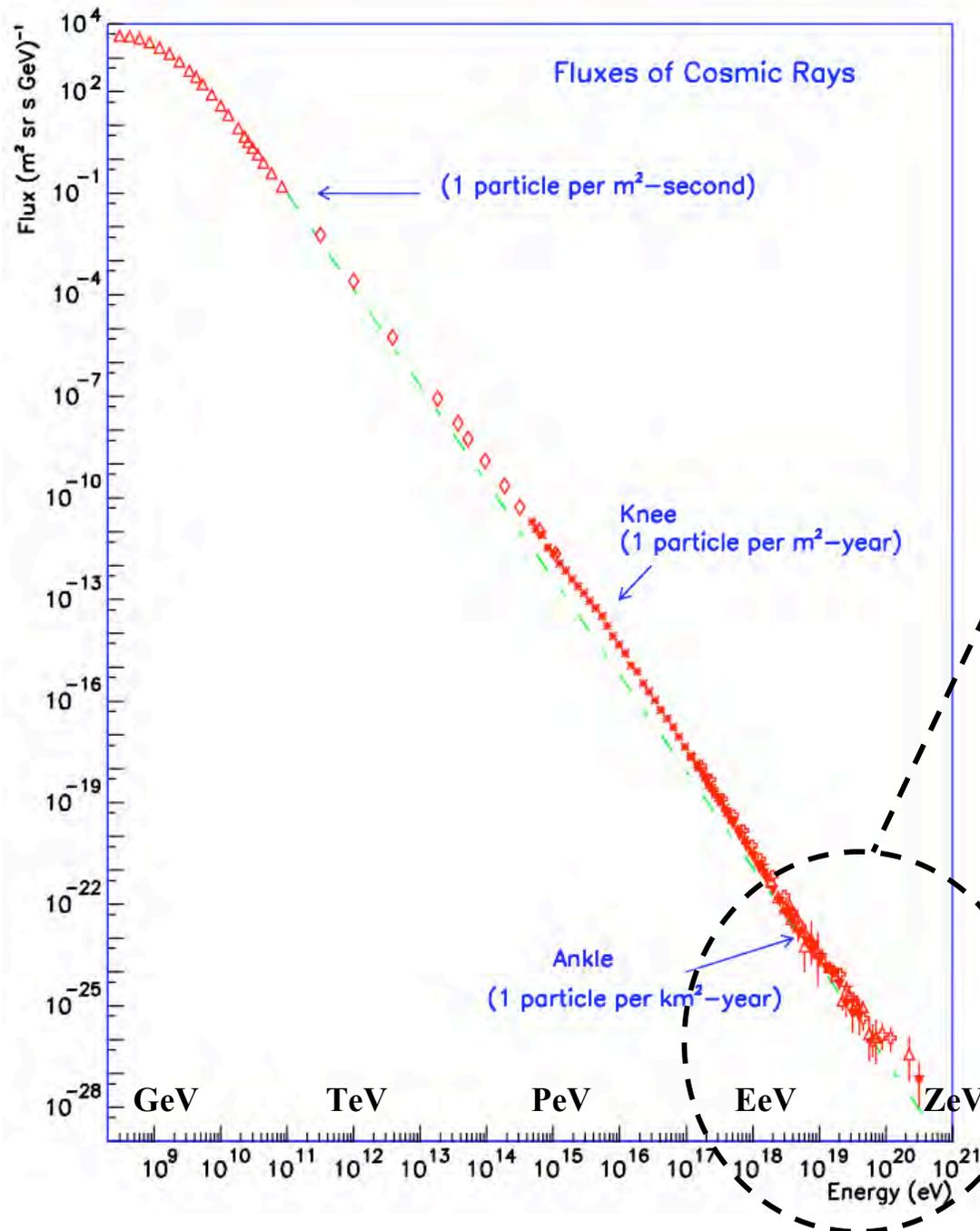


# CARATTERISTICHE SPETTRO RC

- RC: 100 MeV -  $10^{20}$  eV
- prodotti e accelerati nelle esplosioni delle supernove
- >12 ordini in  $E$
- >30 ordini in  $\Phi$
- legge di potenza
- regione del ginocchio?
  - ☒ meccanismo di accelerazione
  - ☒ meccanismo di propagazione
  - ☒ composizione elementi
  - ☒ nuova particella
- regione della “caviglia”, origine extragalattica?

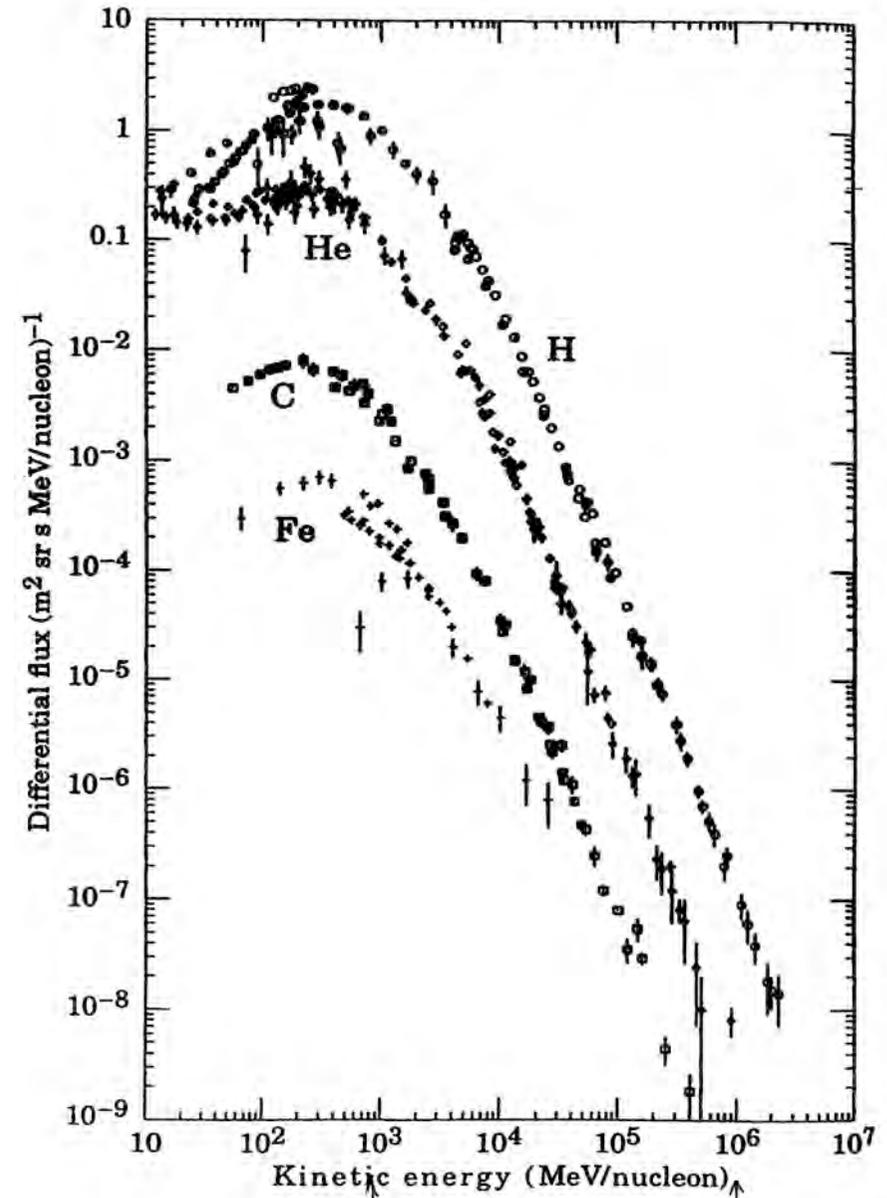


# SPETTRO RC “ANKLE”



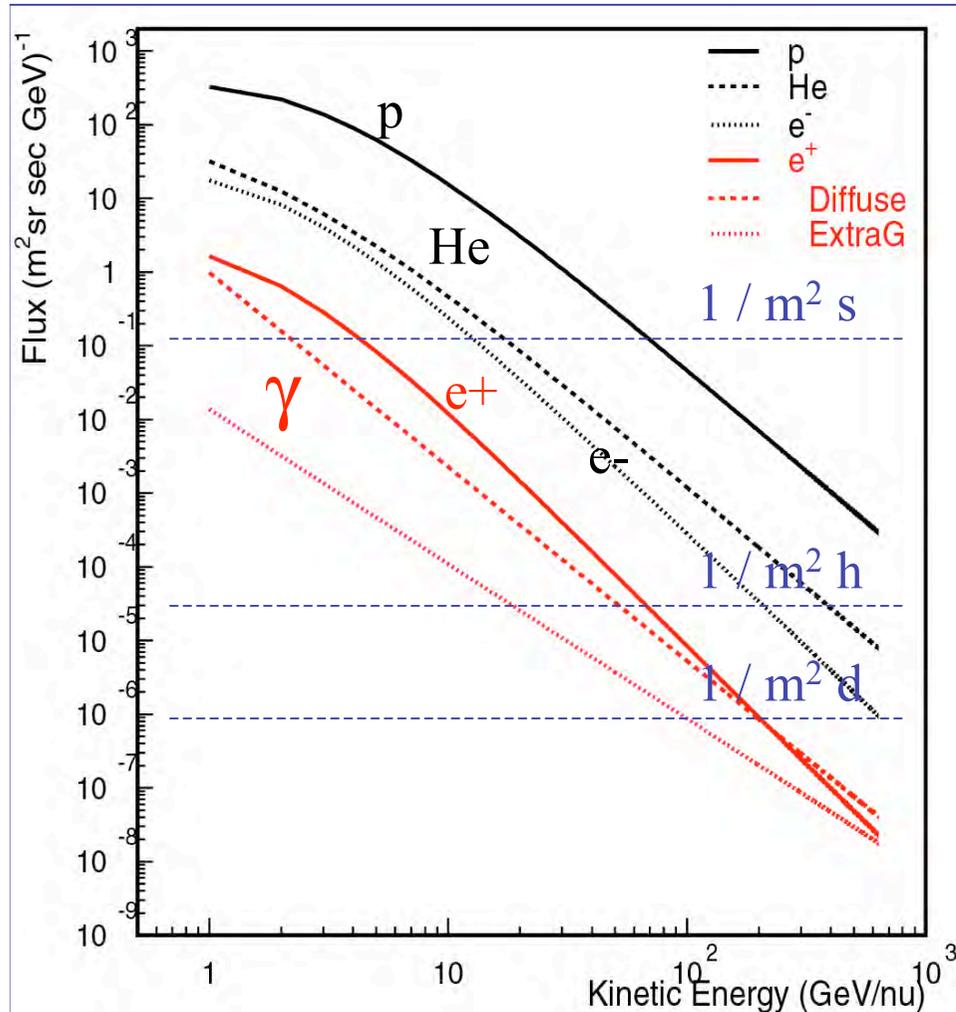
# SPETTRO RC

- p and He nuclei sono **dominanti** (90% p, 9% He)
- tutti gli elementi sono presenti fino all'Uranio
- atomi raggiungono la eliosfera **completamente ionizzati**
- flussi assoluti e forma degli spettri sono fondamentali per calcolare il flusso di  $\nu$  atmosferici

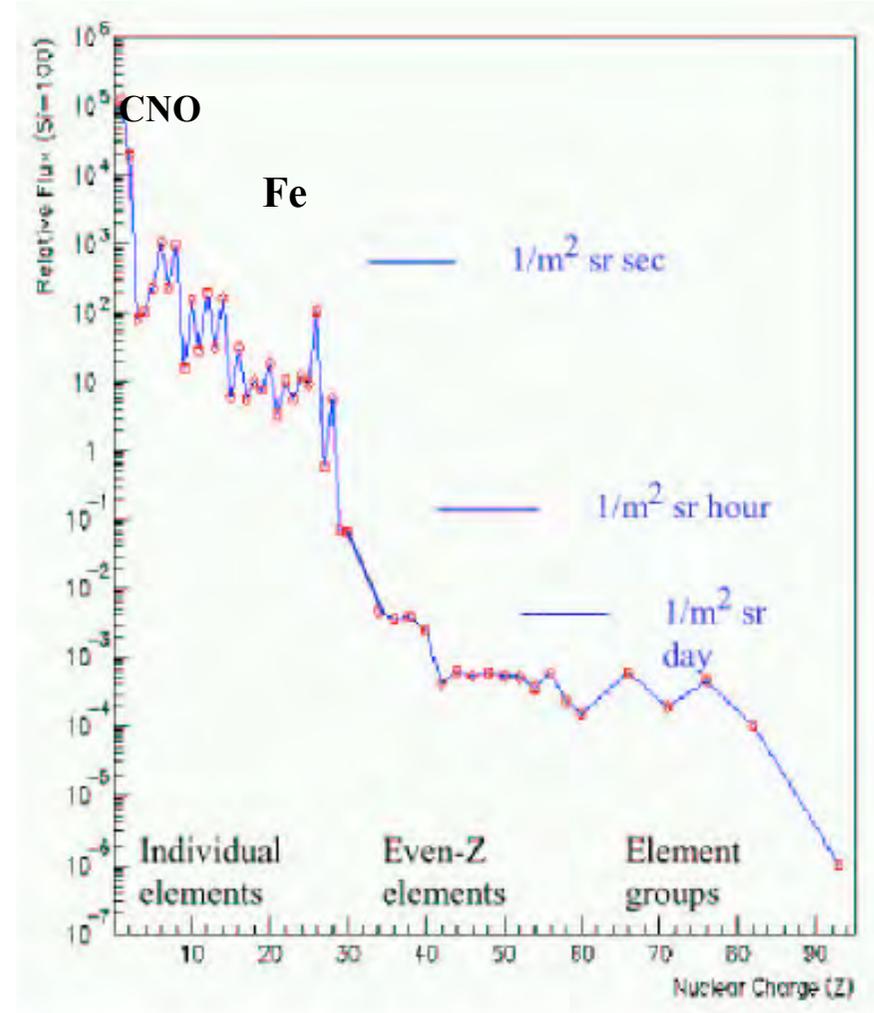


# SPETTRO RC

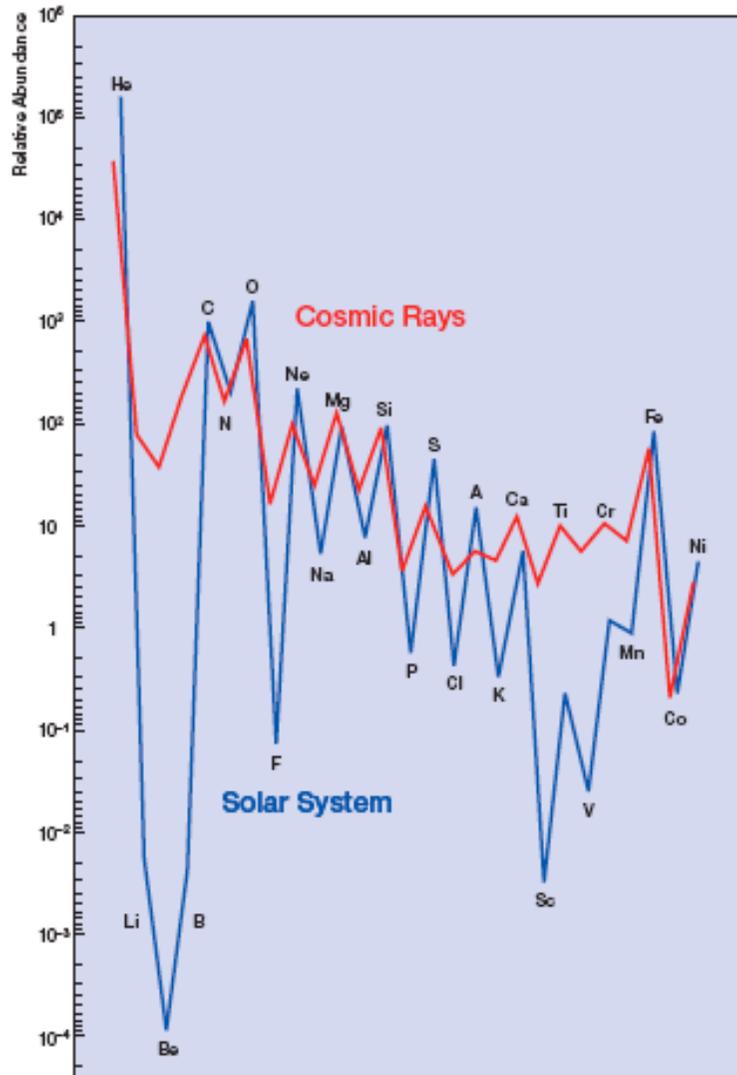
spettro particelle



composizione elementi



# COMPOSIZIONE CHIMICA RC

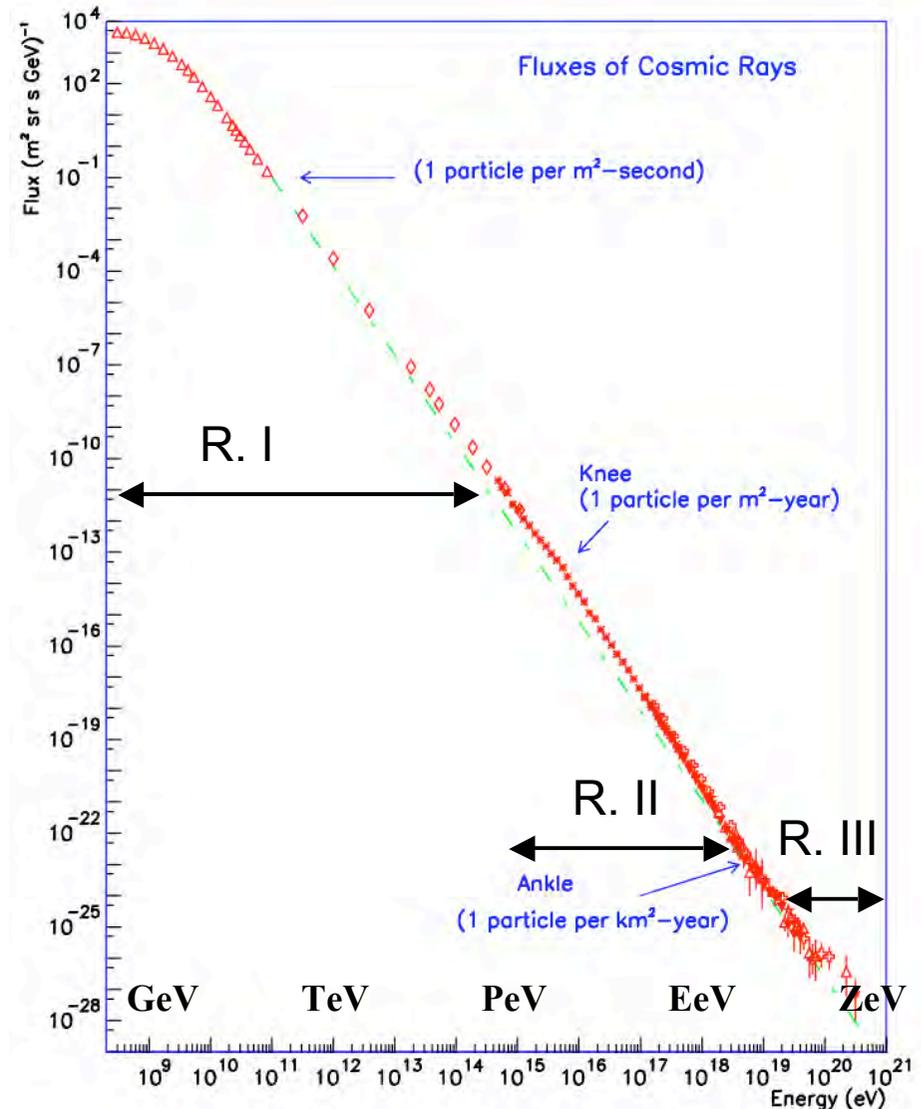


rispetto agli elementi presenti nel sistema solare

- Li, Be, B arricchiti
  - Sc, Ti, V, Cr, Mn arricchiti
- non sono prodotti nella nucleosintesi nelle stelle,
- sono prodotti:
    - ✓ spallazione tra p, He con C N O nelle esplosioni delle supernove
    - ✓ nelle spallazioni dal Fe nel ISM

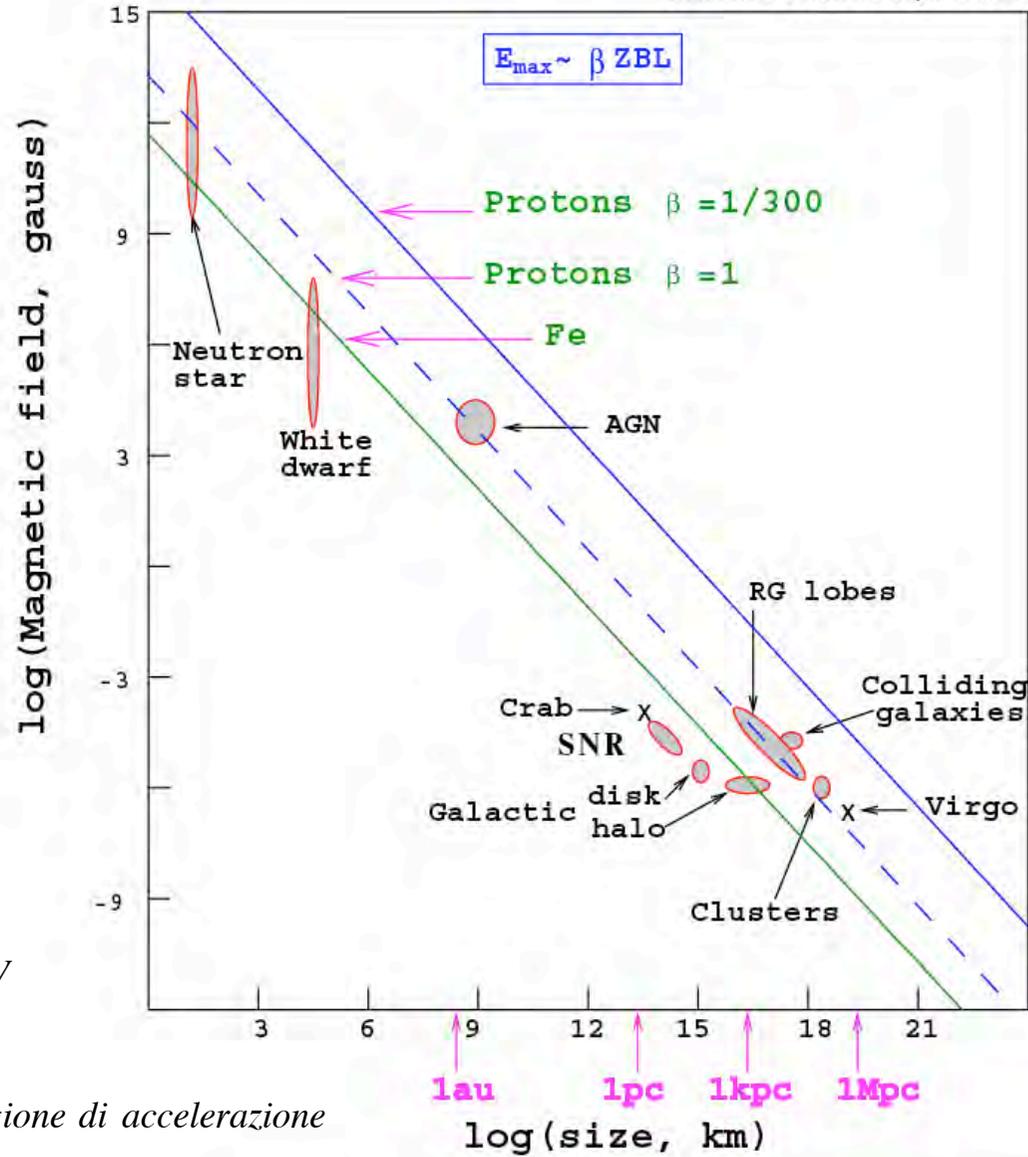
# STUDIO RC / 3 REGIONI

- REGIONE I: composizione elementi, ricerca antinuclei, flussi nuclei alti Z / *palloni, satelliti*
- REGIONE II: spettro E, indicazione di composizione chimica / *esperimenti EAS, Sciami Estesi Atmosferici*
- REGIONE III: nuova fisica?, mappa delle sorgenti?



## Hillas-plot (candidate sites for E=100 EeV)

Letessier-Selvon astro-ph/0006111



$$E_{\max} \approx \beta Z \left( \frac{B}{1 \mu\text{G}} \right) \left( \frac{R}{1 \text{kpc}} \right) 10^{18} \text{ eV}$$

$\beta$  = velocità onda d'urto

$B$  = campo magnetico della regione di accelerazione

$R$  = dimensione della regione

Size and magnetic field strength of possible acceleration sites.  
 Objects below the diagonal lines cannot accelerate the corresponding elements (Iron with  $\beta = 1$  or protons  $\beta = 1$  and  $\beta = 1/300$ ) above  $10^{20}$  eV.

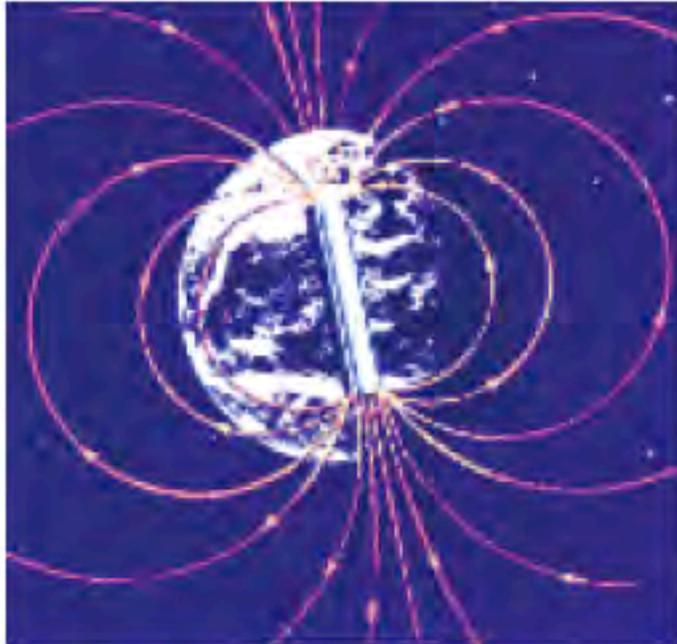
# EFFETTI GEOMAGNETICI

- L'asse del dipolo magnetico è inclinato rispetto all'asse di rotazione della Terra e attualmente si trova 101°W-75°N.
- Il campo magnetico terrestre, dipolo NS, impedisce alle particelle con rigidità bassa di raggiungere la superficie della Terra.
- Non tutte le traiettorie delle particelle positive (protoni) possono raggiungere l'atmosfera dall'esterno del campo magnetico terrestre.
- Il procedimento standard per verificare se una traiettoria è permessa, è quello di iniettare un antiprotone dalla sommità dell'atmosfera in tutte le direzioni e vedere se sfugge dal campo magnetico terrestre senza essere intrappolato o intercettare la superficie della Terra. Tutte le direzioni per cui un antiprotone può sfuggire, è una traiettoria permessa per un protone che proviene dallo spazio.
- Ad esempio elettroni di bassa energia del vento solare:

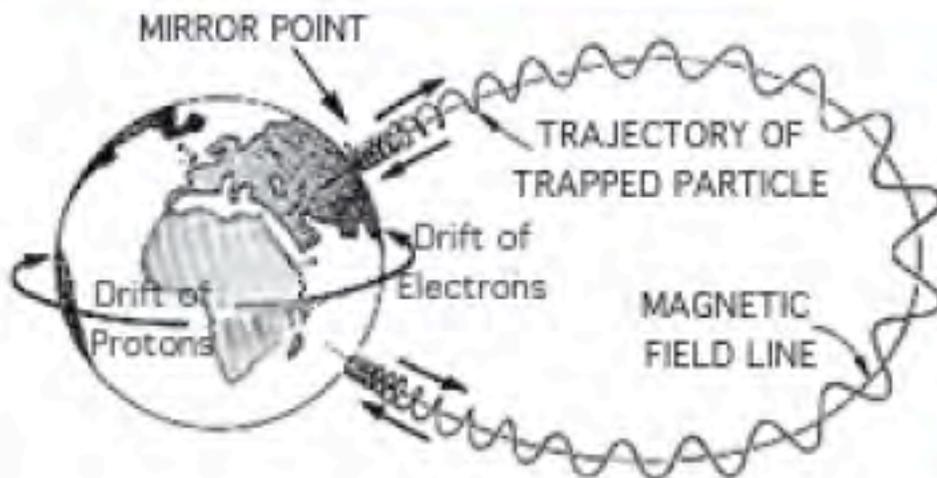
$$p_{\perp} = 30 \text{ keV}; \quad B = 0.1 \text{ gauss}$$

$$R = p_{\perp} / 0.3 \times B = 10 \text{ m}$$

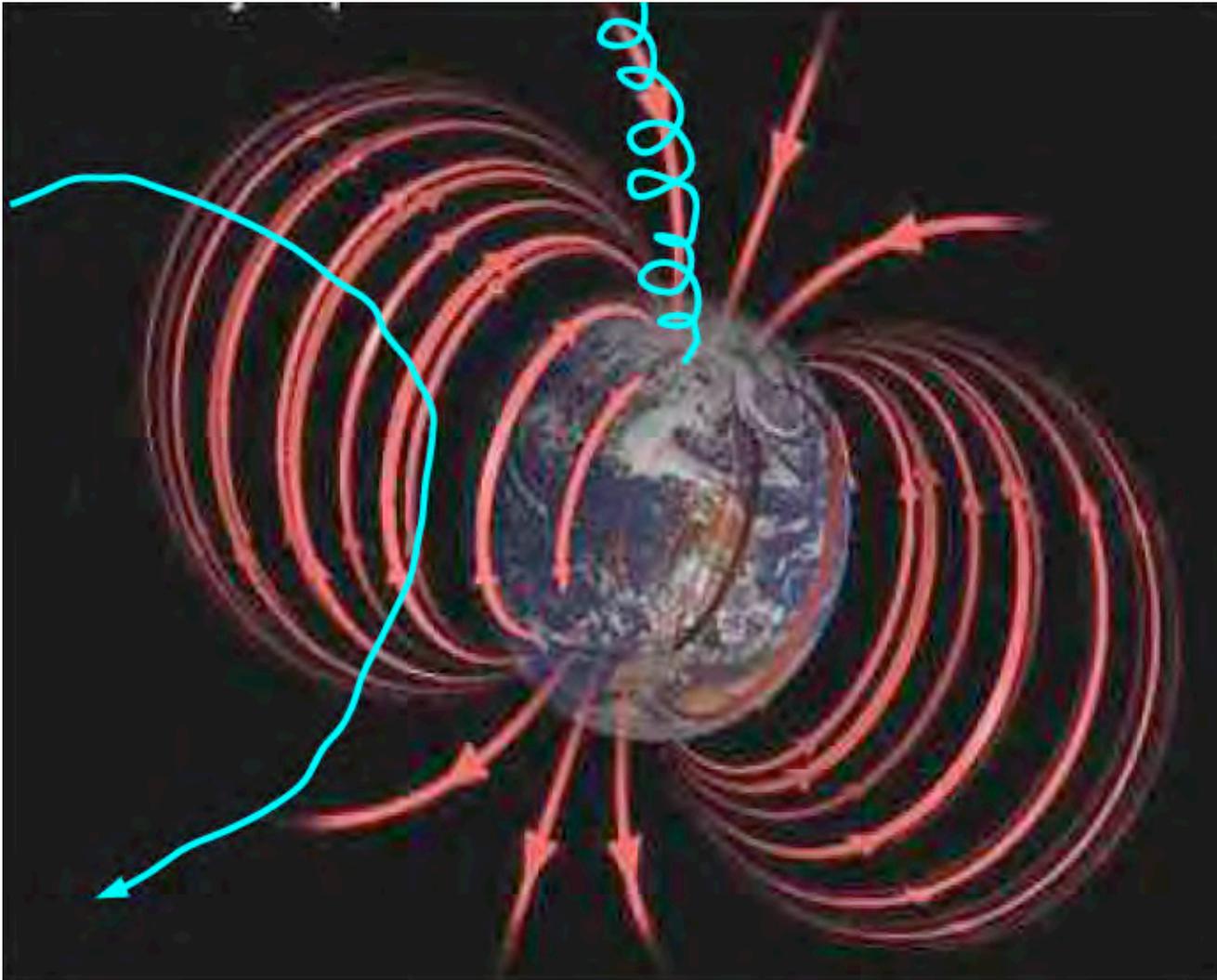
# EFFETTO LATITUDINE



- Gli elettroni del vento solare vengono intrappolati e spiraleggiano intorno alle linee di B
- “Ribalzano” nelle zone di alto B
- Possono penetrare nell’atmosfera e provocare le aurore boreali a grandi latitudini
- La concentrazione di particelle del vento solare è sufficientemente densa da distorcere il campo magnetico terrestre, le aurore possono verificarsi anche a basse latitudini



# EFFETTO DI LATITUDINE



Al polo magnetico  
possono arrivare  
particelle di  
qualunque rigidità

# COMPTON (1933) Cosmic Rays are CHARGED

## GEOGRAPHIC STUDY OF COSMIC RAYS

389

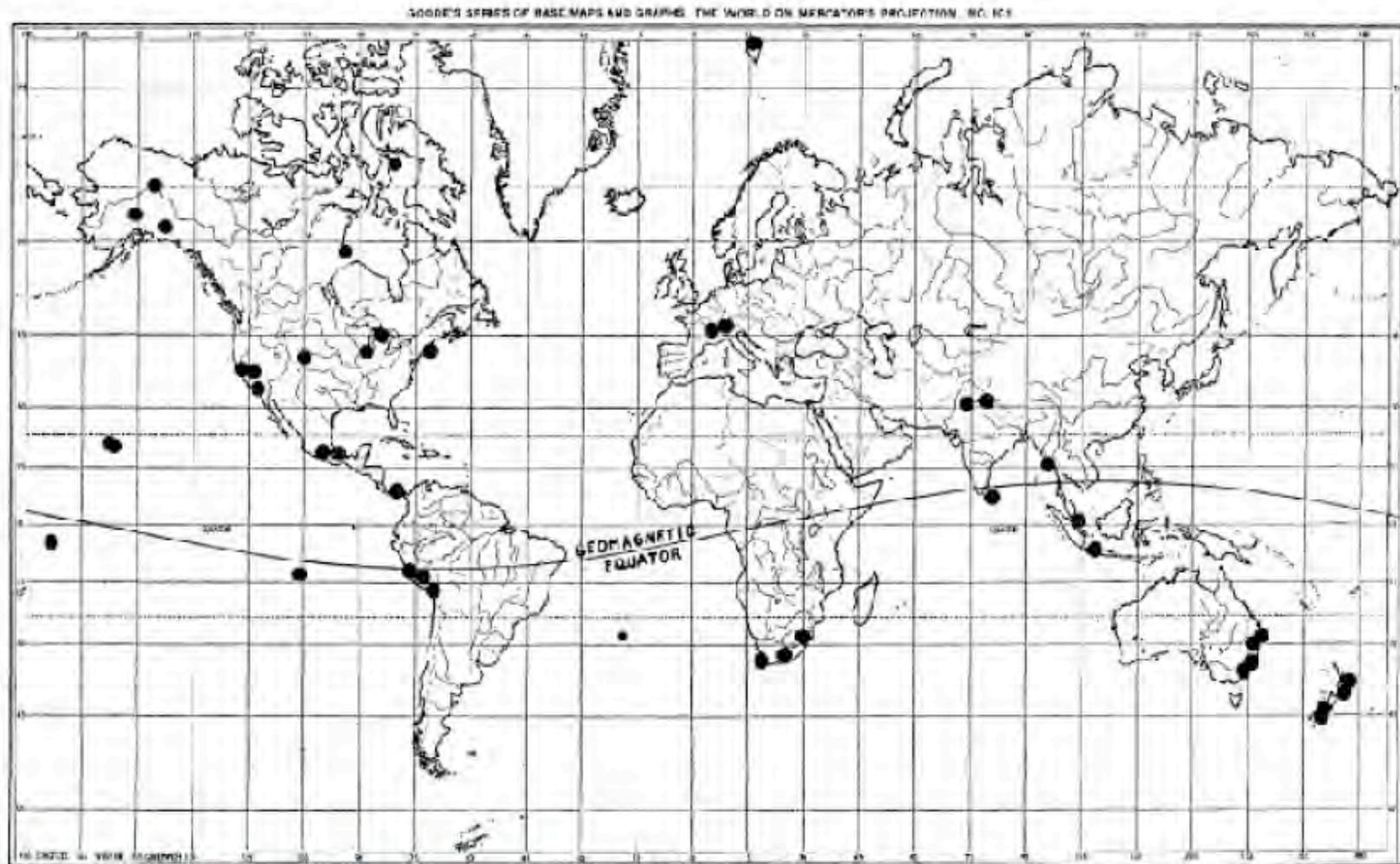


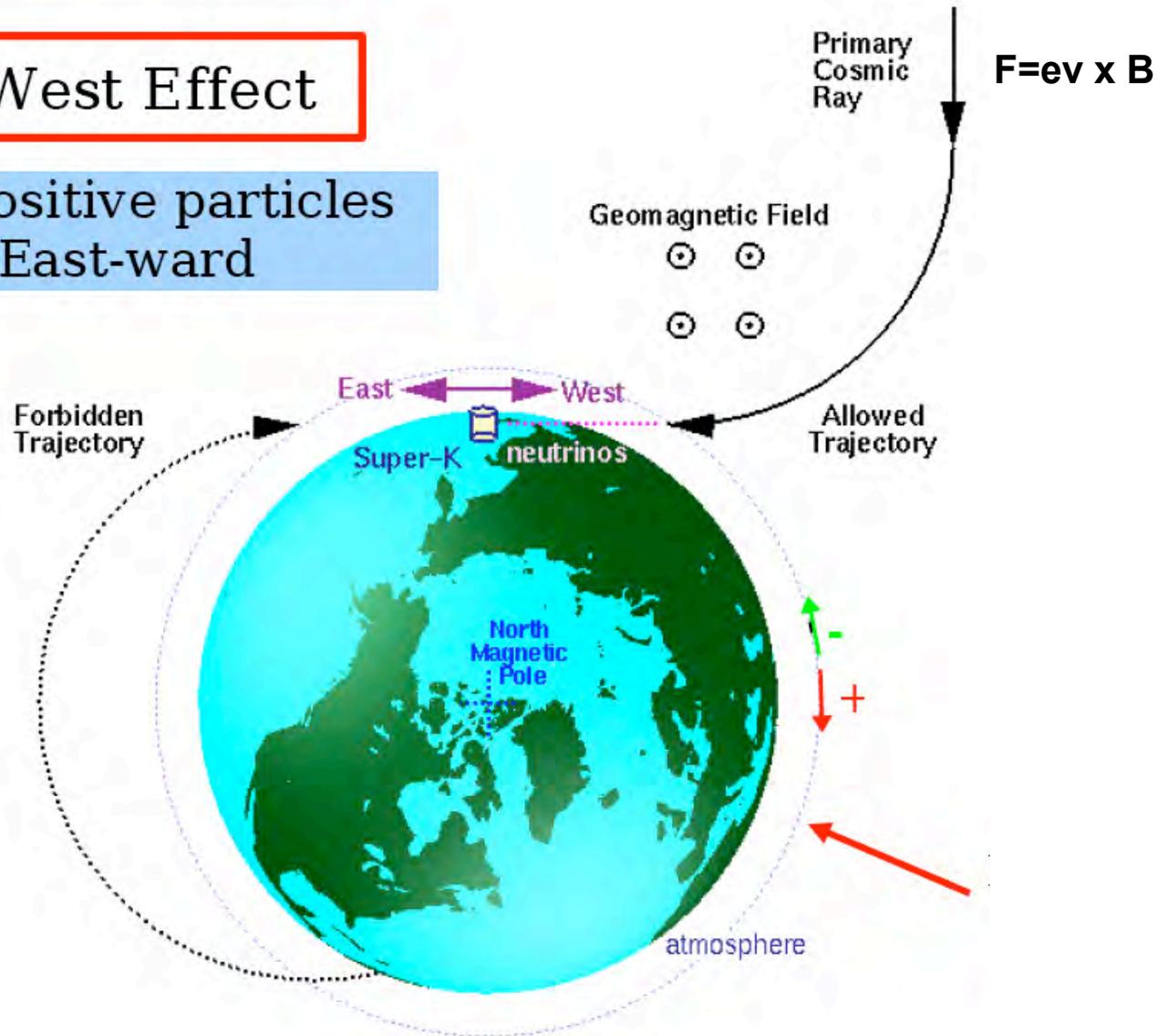
Fig. 1. Map showing the location of our major stations for observing cosmic rays.

**LATITUDE EFFECT**

# EFFETTO EST-OVEST

East-West Effect

More positive particles going East-ward



# CARICA IN CAMPO DIPOLARE

- Particella di carica  $Ze$ , velocità  $v$ , momento  $p$ , con traiettoria circolare equatoriale di raggio  $r$  intorno ad un dipolo magnetico di momento  $M$ .

- Si ha 
$$Zev \times \mathbf{B} = mv^2/r$$
$$B = (\mu_0/4\pi) M/r^3$$

Il raggio dell'orbita è

$$r_s = \left[ \left( \frac{\mu_0}{4\pi} \right) \frac{MZe}{p} \right]^{1/2}$$

ed è chiamato unità Størmer.

Il momento del protone che ha una unità di Størmer intorno alla Terra, è

$$p/Z = 59.6 \text{ GeV}/c$$

con  $M=8 \times 10^{22} \text{ A m}$ ;  $r_T = 6.38 \times 10^6 \text{ m}$ ;  $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ;  $\mu_0/4\pi=10^{-7} \text{ H/m}$

$1 \text{ GeV}=1.6 \times 10^{-10} \text{ J}$        $c = 2.99 \times 10^8 \text{ m/s}$

# CARICA IN CAMPO DIPOLARE

- Størmer ha dimostrato che l'equazione del moto ha la forma:

$$b = r \sin \theta \cos \lambda + \frac{\cos^2 \lambda}{r}$$

dove  $r$ : distanza dal centro del dipolo in unità di Størmer

$\lambda$ : latitudine geomagnetica

$\theta$ : angolo tra la velocità ed il piano meridiano che si muove con la particella

$b$ : parametro d'impatto con l'asse del dipolo

Si trova che la condizione critica per i momenti permessi si ha per  $b > 2$  e l'equazione per il cut-off diviene

$$r = \frac{\cos^2 \lambda}{1 + (1 - \sin \theta \cos^3 \lambda)^{1/2}}$$

Per particelle che arrivano verticali:

a  $\lambda = 50^\circ \text{N}$  il momento di cut-off è  $pc = 1.1 \text{ GeV}$

a  $\lambda = 0^\circ$  (equatore magnetico) si ha  $pc = 14.9 \text{ GeV}$

Per particelle che arrivano da Est ( $\sin \theta = +1$ )  $pc \geq 59.6 \text{ GeV}$

Per particelle che arrivano da Ovest ( $\sin \theta = -1$ )  $pc \geq 10.2 \text{ GeV}$

# Coordinate di Størmer

