

# Astrofisica e particelle elementari

aa 2007-08

Lezione 5

Bruno Borgia

# 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.

# SCOPERTA DEI RAGGI COSMICI (2)

- 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.

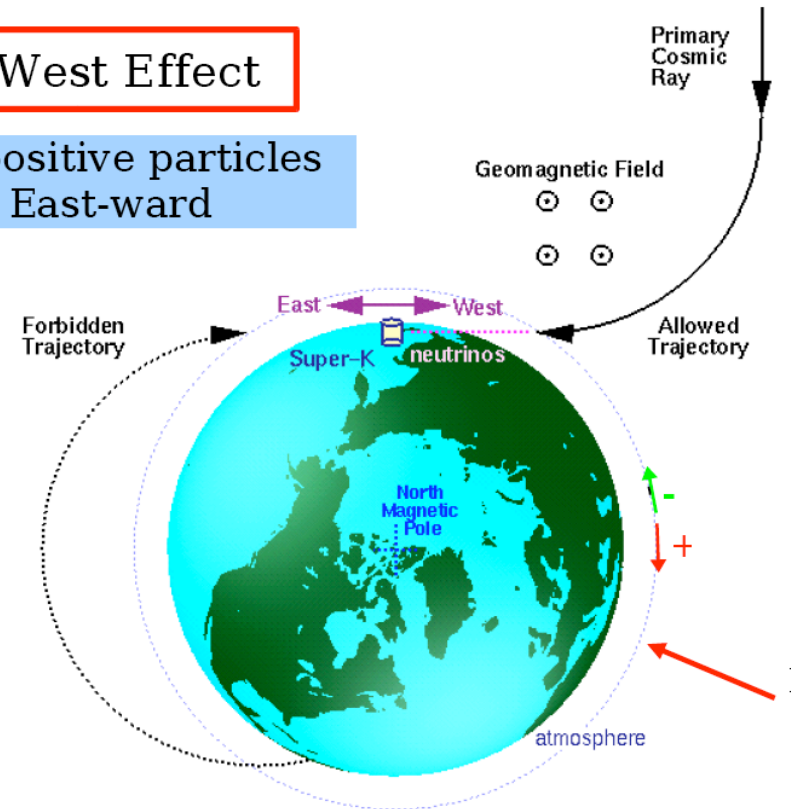


# SCOPERTA DEI RAGGI COSMICI (3)

- 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 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.

## East-West Effect

More positive particles going East-ward



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



# 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*

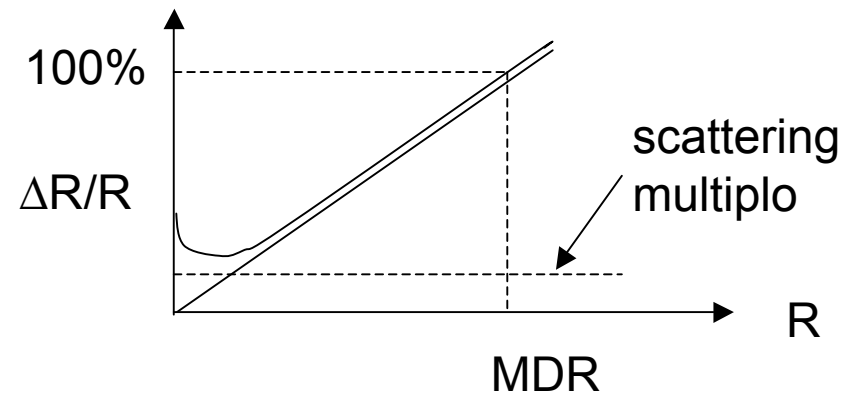
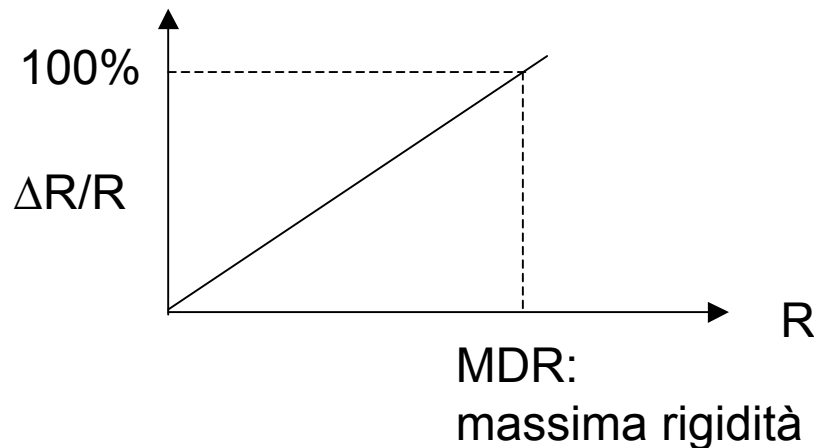
- *modelli di trasporto*

- *fondo per ricerca di nuove particelle*

- *calcolo neutrini atmosferici*

# ALCUNE DEFINIZIONI

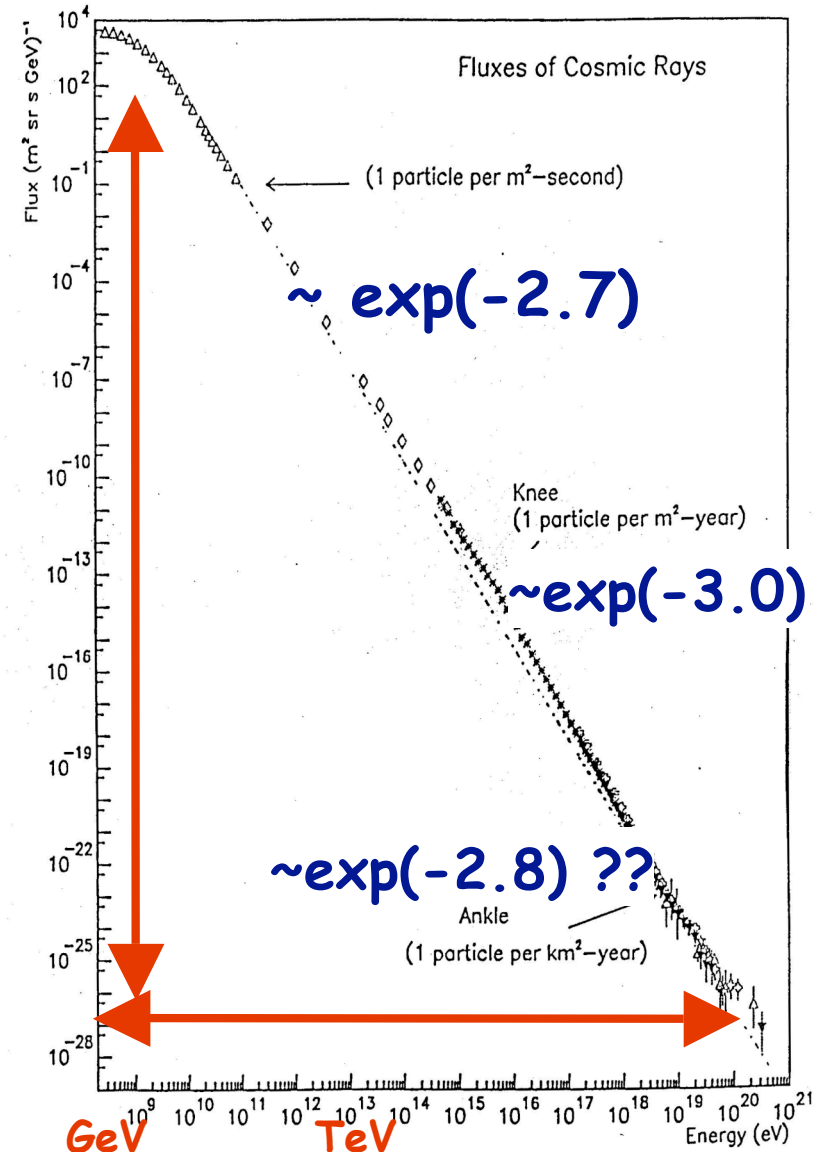
- Flusso di particelle  $\frac{dN}{dEd\Omega dAdt} : [MeV^{-1}sr^{-1}cm^{-2}s^{-1}]$
- fattore geometrico (GF): accettazione  $[cm^2 sr]$
- Esposizione = GF x tempo
- Rigidità  $R = p/Ze: [volt/c]$



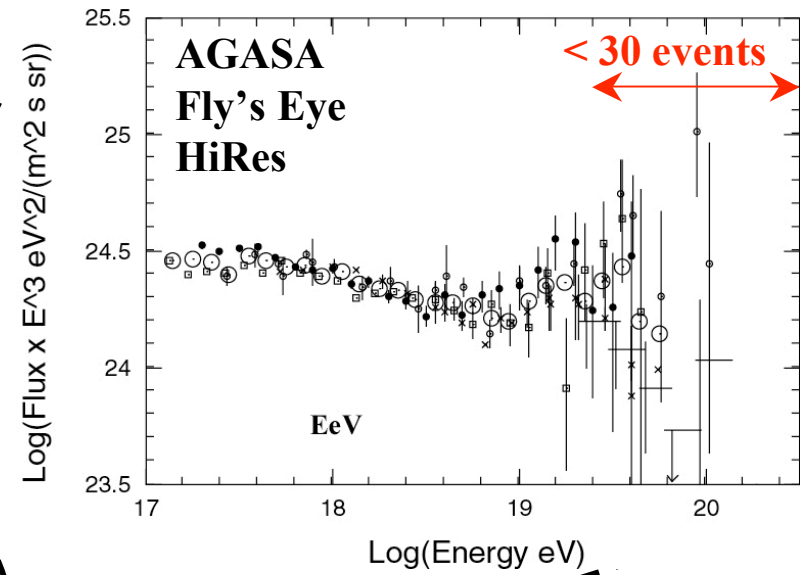
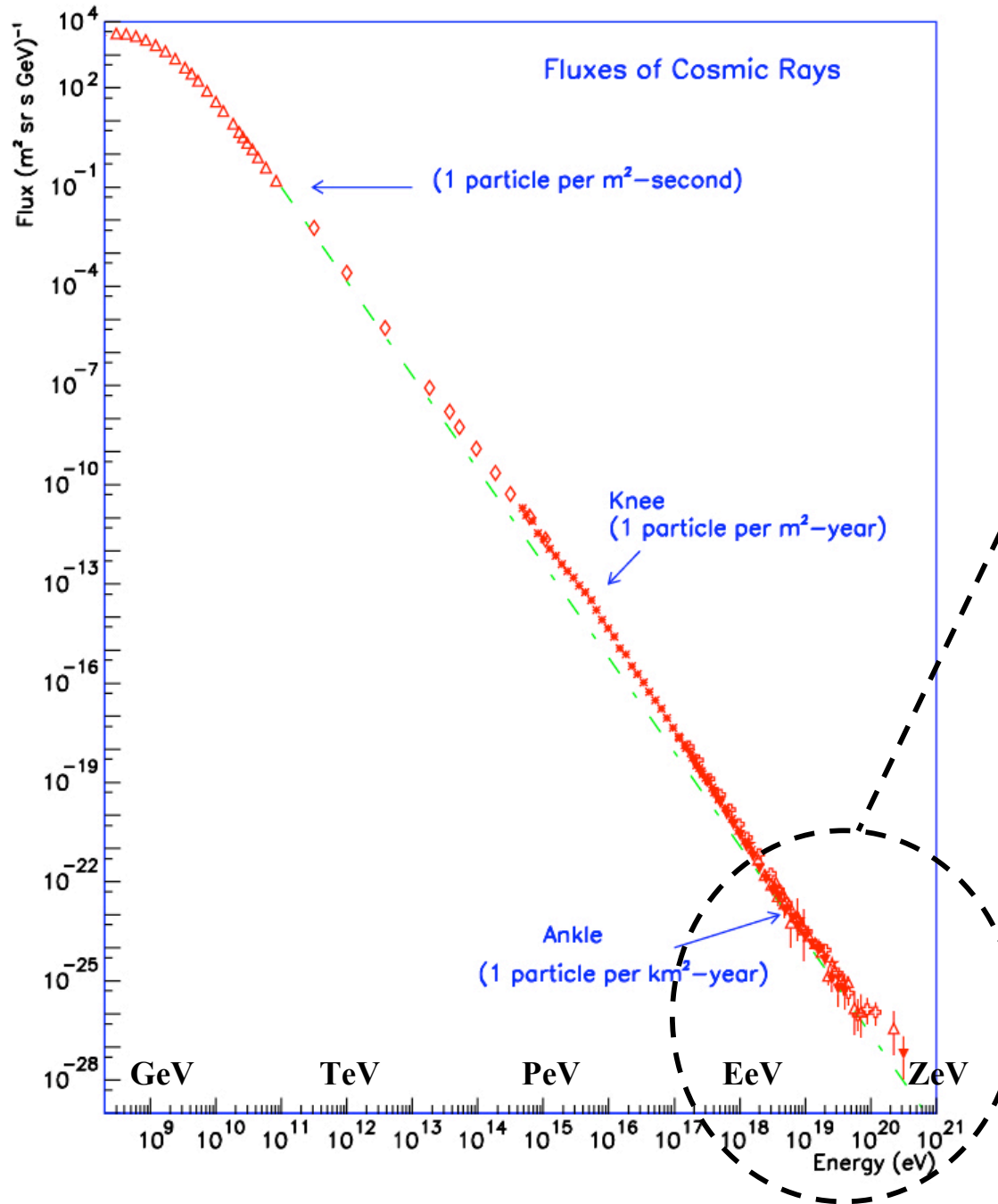


# CARATTERISTICHE SPETTRO RC

- 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?

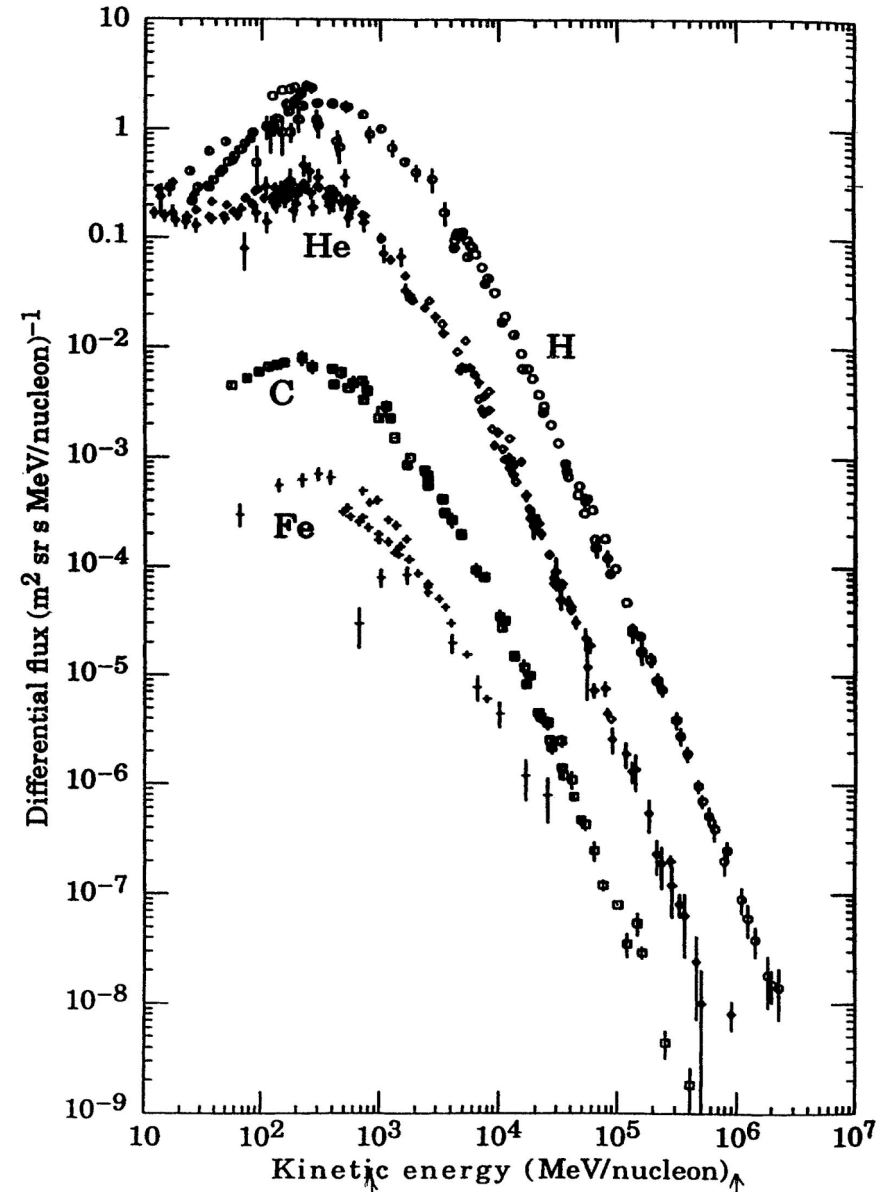


# SPETTRO RC “ANKLE”



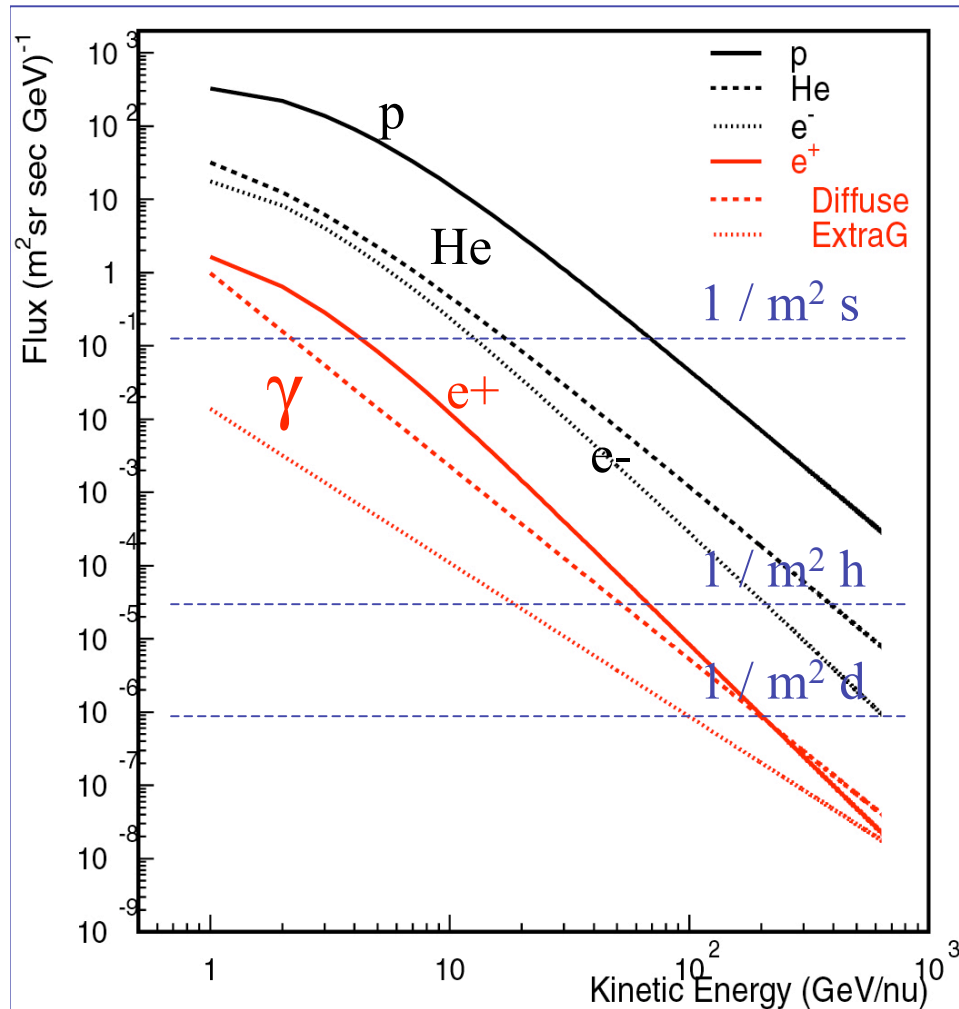
# SPETTRO RC

- 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

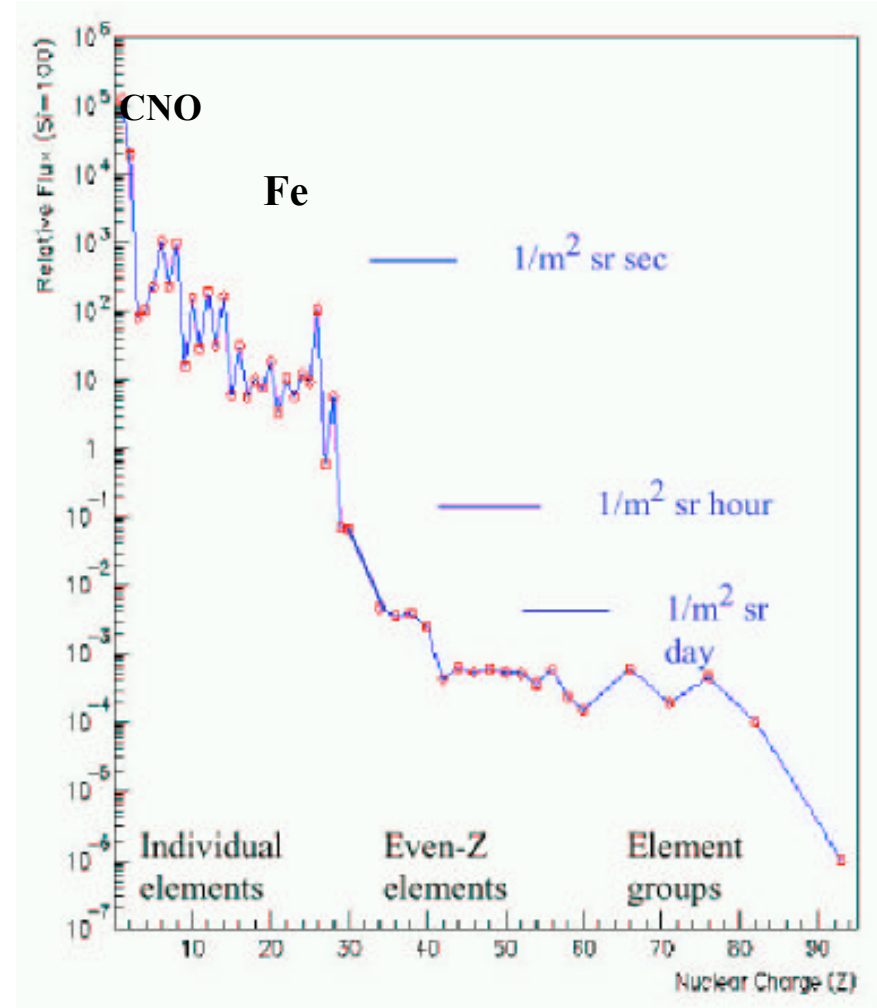


# SPETTRO RC

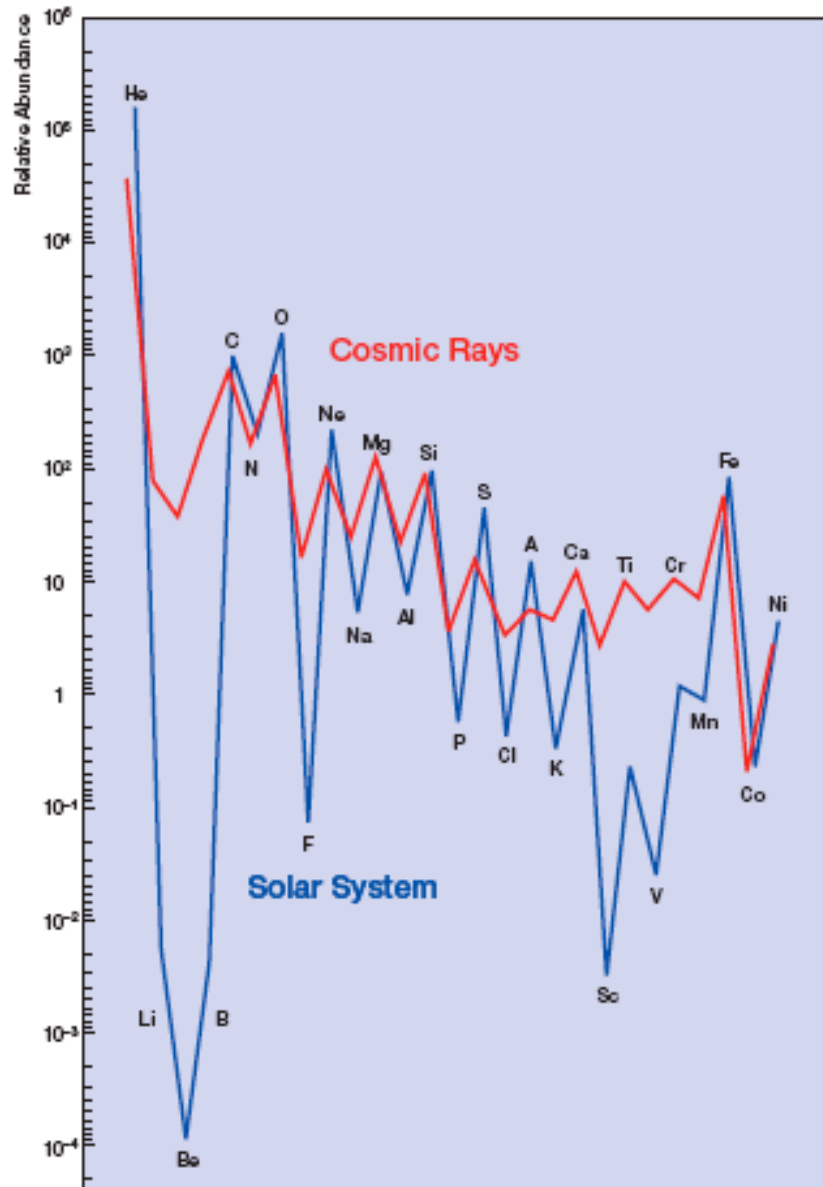
spettro particelle



composizione elementi



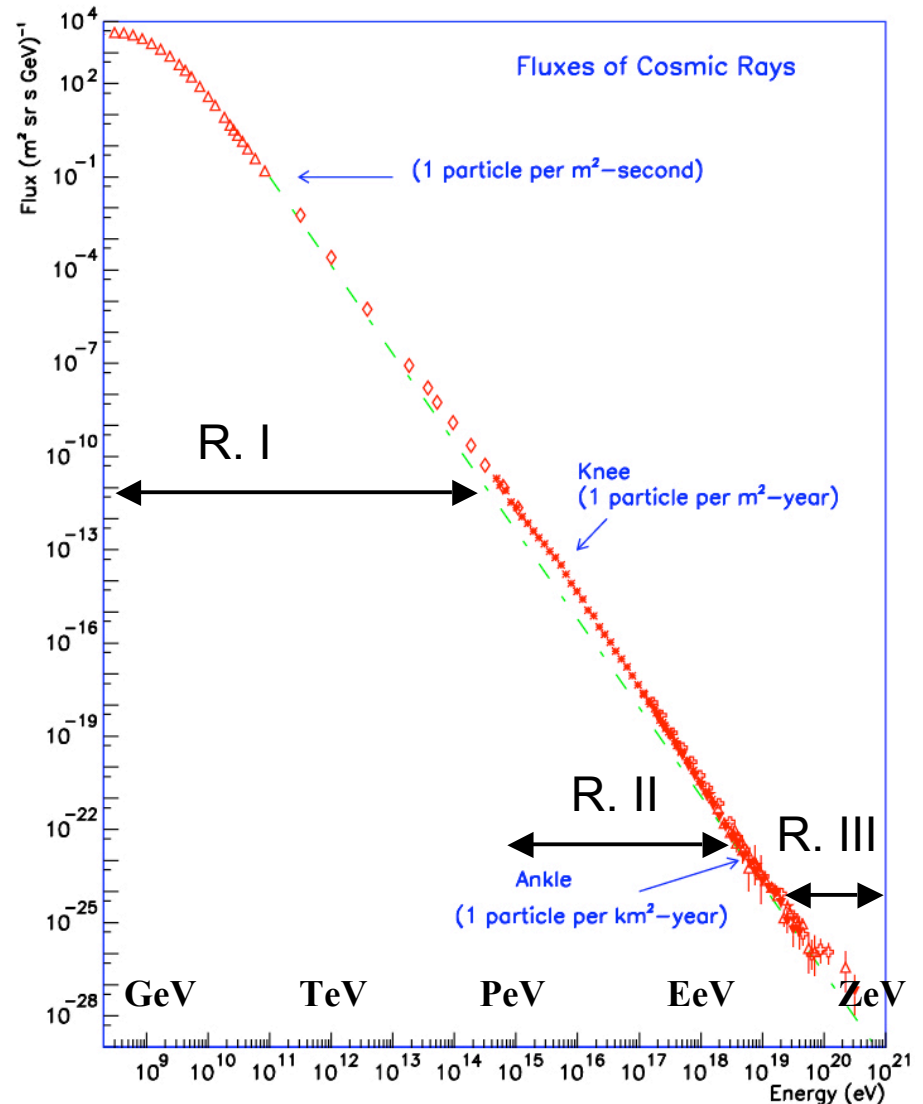
# COMPOSIZIONE CHIMICA RC



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

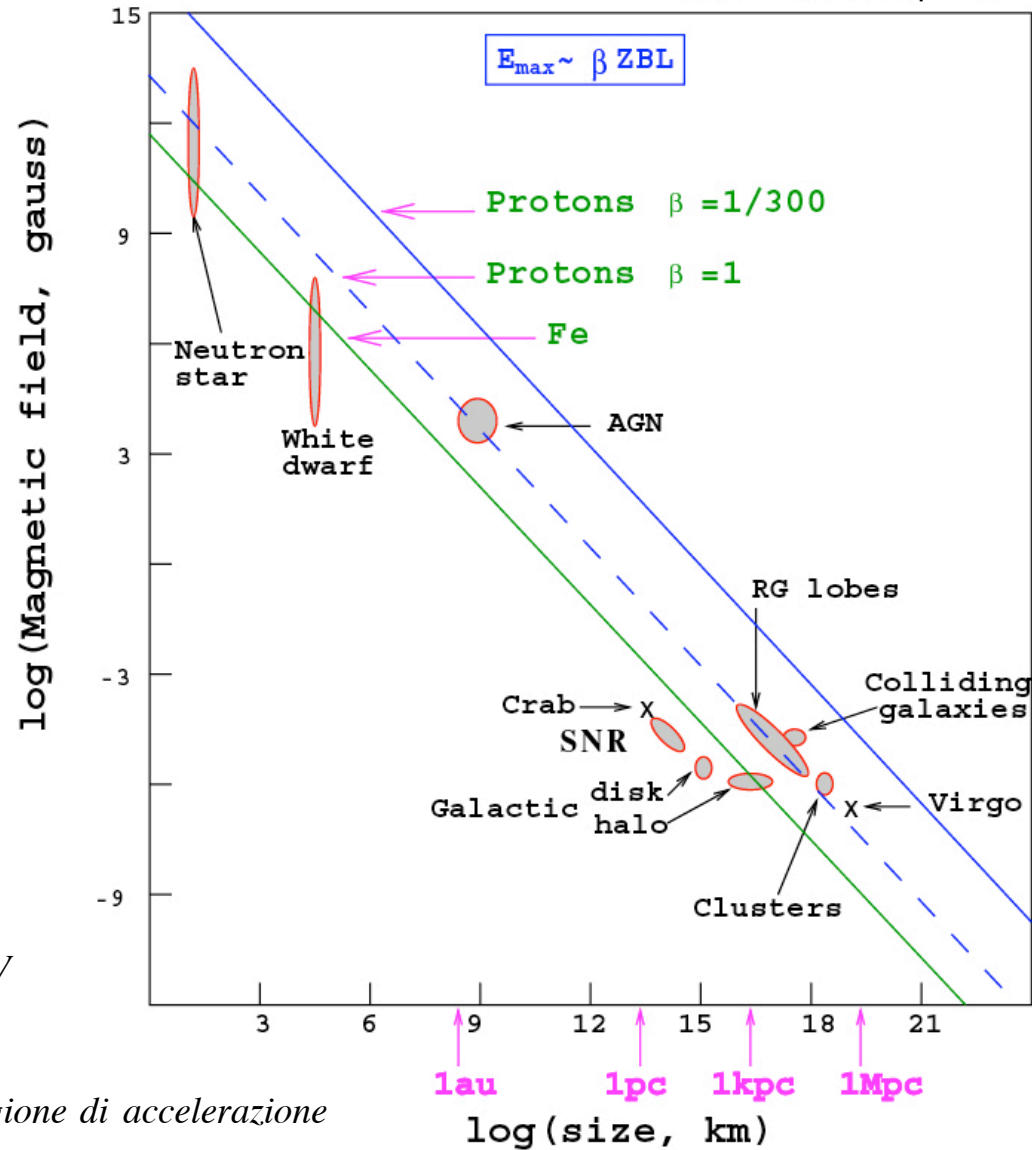
# STUDIO RC / 3 REGIONI

- REGIONE I: composizione elementi, ricerca antinuclei, flussi nuclei alti Z / *palloni, satelliti*
- REGIONE II: spettro E, indicazione di composizione chimica / *esperimenti EAS, Sciame 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

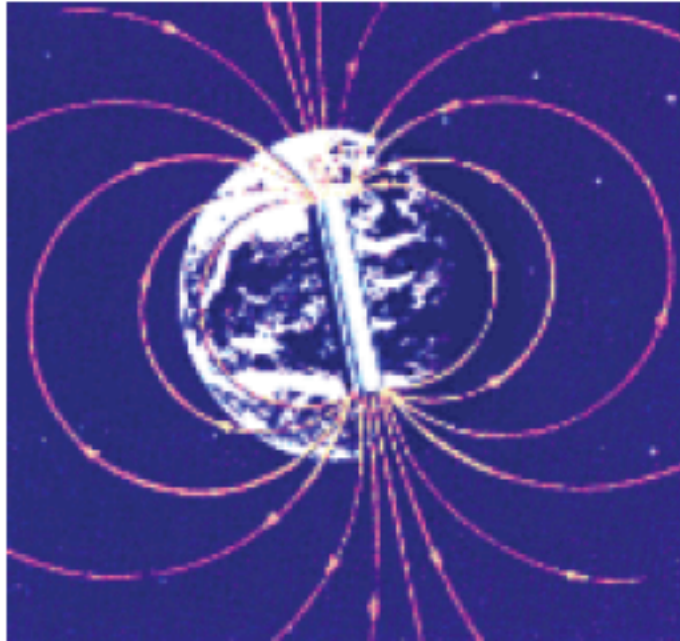
- L'asse del dipolo magnetico è inclinato rispetto all'asse di rotazione della Terra e attualmente si trova 101°W-75°N.
- Il campo magnetico terrestre, dipolo NS, impedisce alle particelle con rigidità bassa di raggiungere la superficie della Terra.
- Non tutte le traiettorie delle particelle positive (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:

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

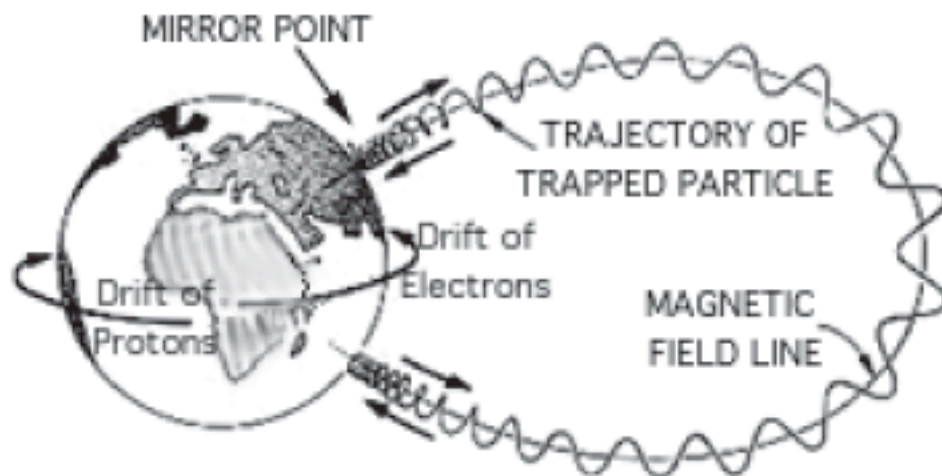
$$R = p_{\perp} / 0.3 \times B = 10 \text{ m}$$



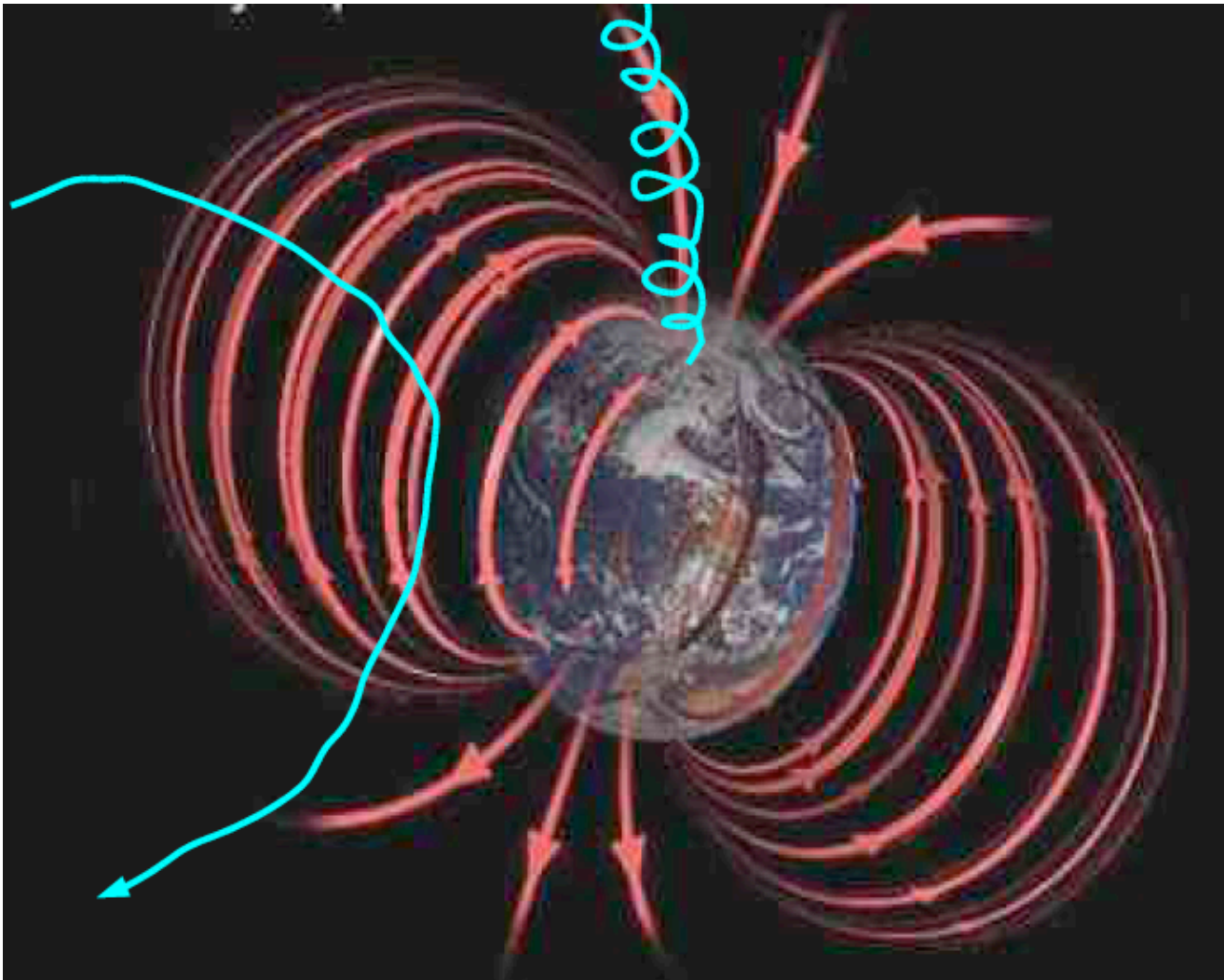
# EFFETTO LATITUDINE



- 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

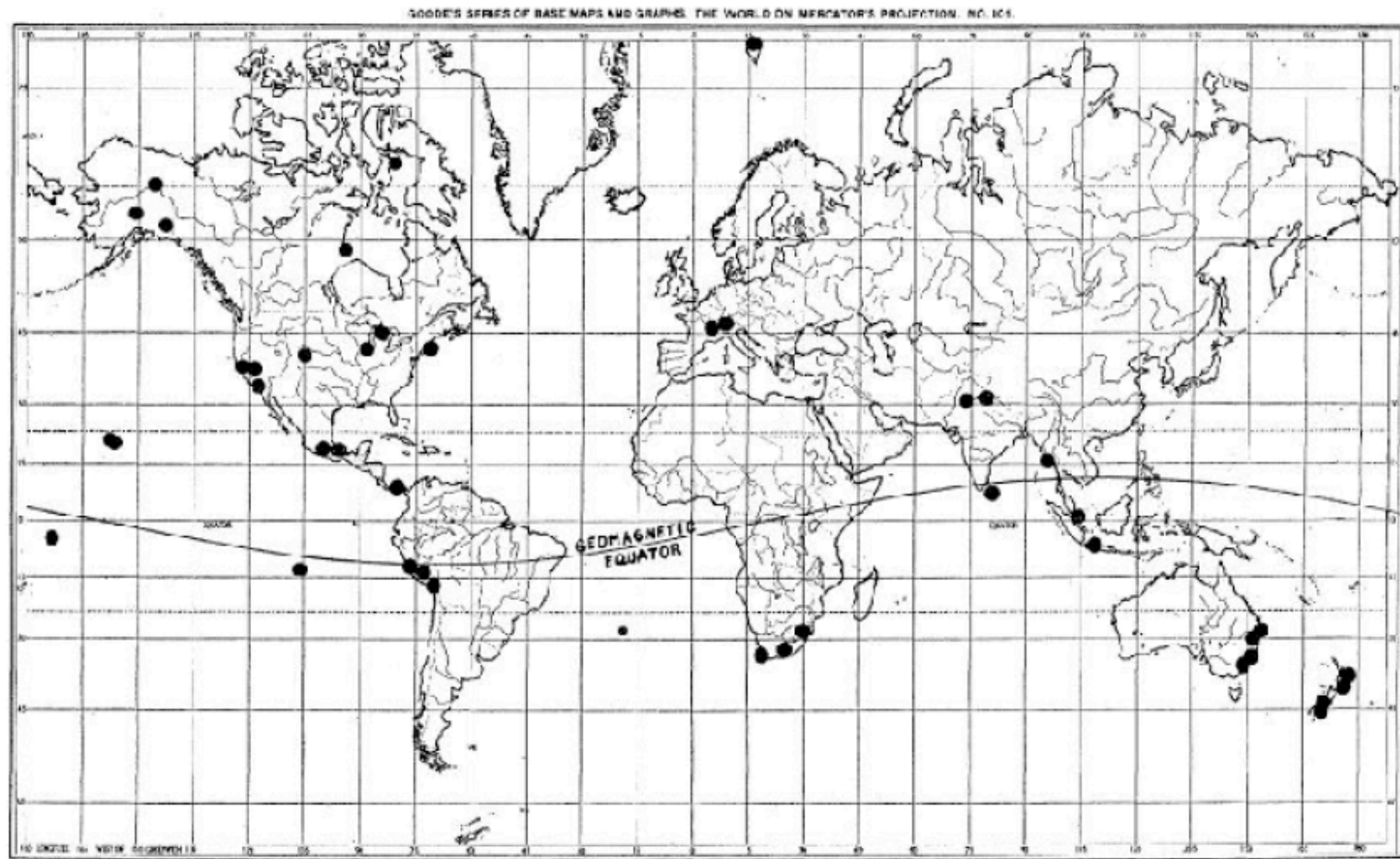


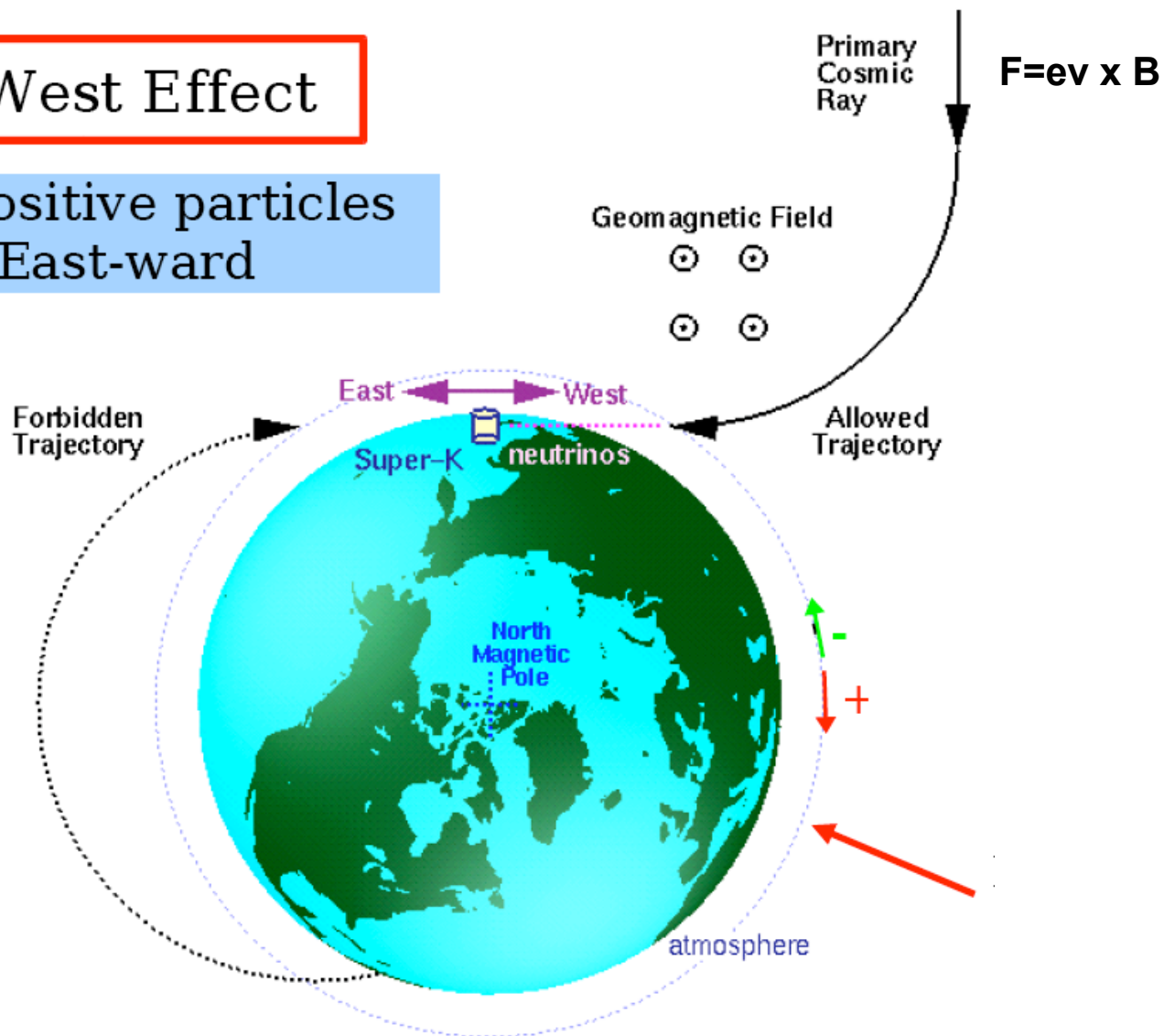
Fig. 1. Map showing location of our major stations for observing cosmic rays.

**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 
$$Ze\mathbf{v} \times \mathbf{B} = mv^2/r$$
$$B = (\mu_0/4\pi) M/r^3$$

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 ( $\sin \theta = +1$ )  $pc = 59.6 \text{ GeV}$

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

# Coordinate di Størmer

