

Astrofisica e particelle elementari

aa 2010-11

Lezione 1

Astrofisica e particelle

Il contesto

Raggi cosmici

Spettro

Composizione chimica

Effetto est ovest

Bruno Borgia

Astrofisica e Particelle

- **Programma di massima**
 - I raggi cosmici: scoperta, spettro, accelerazione, misure
 - Radiazione gamma, sorgenti, misure
 - I neutrini, sorgenti, misure
 - L'Universo
 - Espansione dell'universo
 - Radiazione e materia
 - Nucleosintesi
 - Bariogenesi
 - Materia oscura, candidati
 - Supersimmetrie
 - Ricerca di materia oscura, ricerche dirette ed indirette
 - Ricerca dell'antimateria
 - Onde gravitazionali?
- D. Perkins: Particle Astrophysics; Oxford University Press

MICRO
PARTICLE PHYSICS

GWS STANDARD MODEL

MACRO
COSMOLOGY

HOT BIG BANG
STANDARD MODEL



HAPPY MARRIAGE
Ex: NUCLEOSYNTHESIS

BUT ALSO



- COSMIC MATTER-ANTIMATTER ASYMMETRY
- INFLATION
- DARK MATTER + DARK ENERGY

“OBSERVATIONAL” EVIDENCE FOR NEW PHYSICS BEYOND
THE (PARTICLE PHYSICS) STANDARD MODEL

L'Universo

- Oggetti “visibili”:

Stelle, pianeti, supernove, quasar, pulsar, stelle di neutroni, ecc.

Galassie: aggregazione di stelle, $\approx 10^{11}$, dalla struttura caratteristica, frequentemente ellittica o a spirale.

Al centro: popolazione II: stelle più vecchie, rigonfiamento, alone.

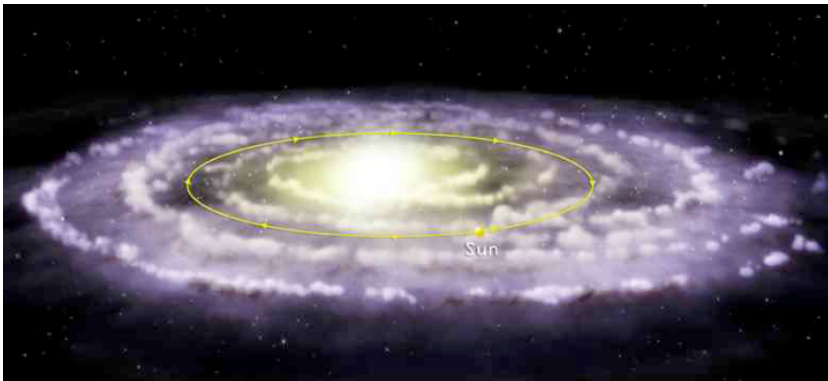
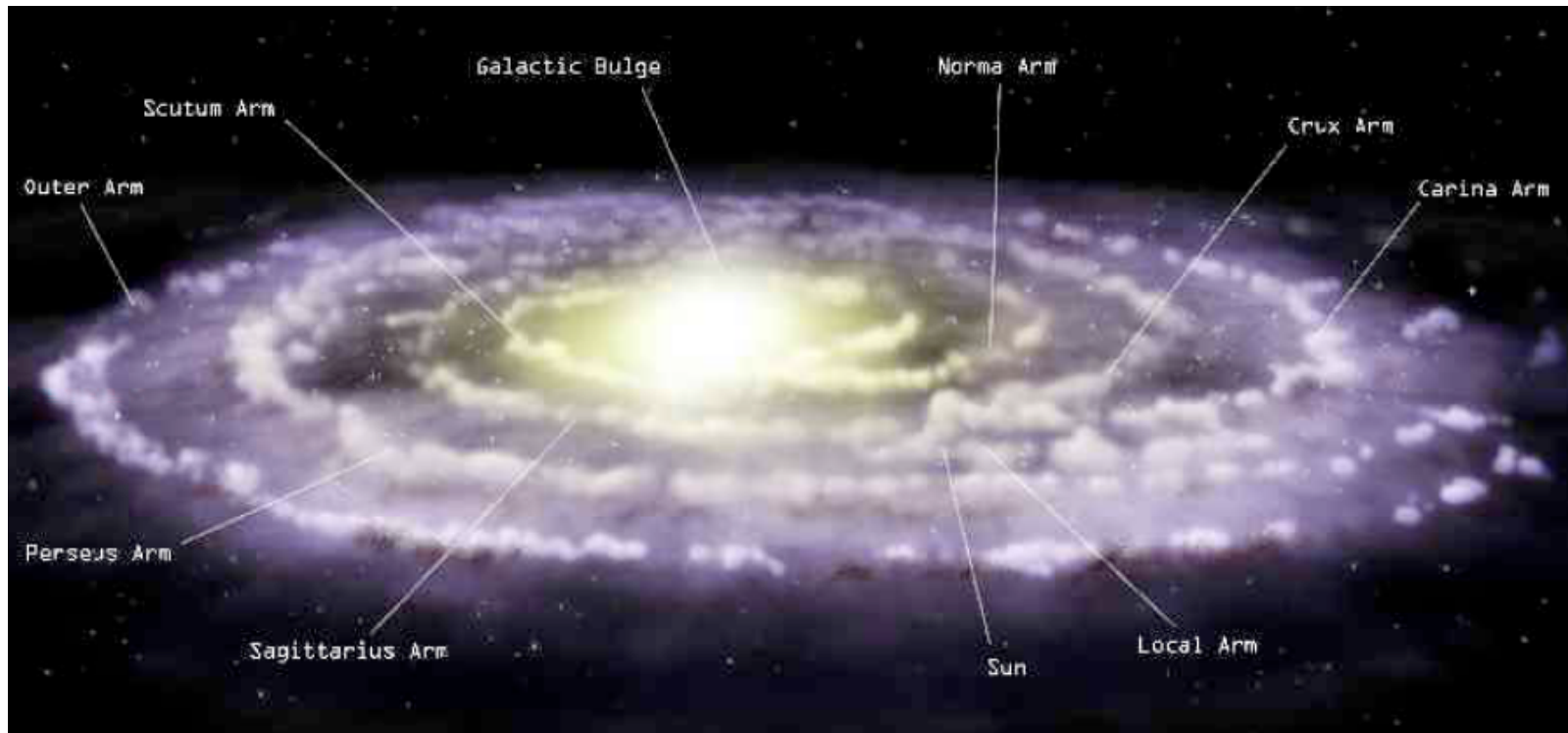
In periferia: popolazione I: stelle più giovani.

Ammassi di galassie formano i cluster. La Galassia appartiene al Gruppo Locale. Le galassie sono dell'ordine di 10^{11} .

- Oggetti “non visibili”:

Costituiscono la gran “parte” dell'universo.

La Galassia

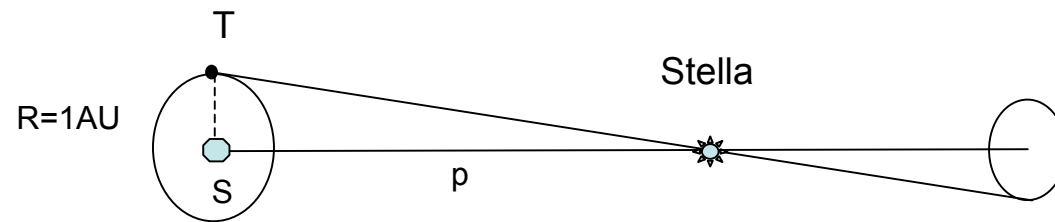


Distanza Sole-centro Galassia
 7.94 ± 0.42 kpc
 $1 \text{ pc} = 3.3 \text{ ly} = 3.1 \cdot 10^{16} \text{ m}$

Distanze

La misura o, per le stelle più lontane, la stima della loro distanza dal Sole, preso come riferimento per correggere il moto della Terra, si basa su diversi metodi.

- Parallasse: la posizione apparente di una stella vicina rispetto alle stelle più lontane dipende dalla posizione della Terra nella sua orbita.



Risulta quindi

$$R = p \cdot 2\pi / (360^\circ \cdot 60' \cdot 60'')$$

$$p(1'') = R \cdot (360^\circ \cdot 60' \cdot 60'') / 2\pi \approx 2.06 \cdot 10^5 \text{ AU}$$

1 AU = 1.5×10^{11} m distanza della Terra dal Sole, (unità astronomica)

1 pc = 3.1×10^{16} m = 3.3 ly (parsec)

Con strumenti terrestri: $\Delta p \approx \pm 0.01''$;

satellite Hipparcos: $\Delta p \approx \pm 0.001''$

satellite Gaia (lancio dicembre 2011): $\Delta p \approx \pm (20 \cdot 10^{-6})''$

Distanze

Cefeidi: stelle di luminosità variabile presenti nelle spirali delle galassie.

Periodo da 1d a 50 d, masse 5 - 15 $M_{\odot}$.

Dimensione dell'orbita stimata da $R = \int v_x dt = x_2 - x_1$, troppo piccola per essere un sistema di due stelle binarie.

Pulsazione radiale dovuta alla propagazione di onde sonore nel materiale stellare.

La luminosità delle stelle può essere stimata dalla relazione:

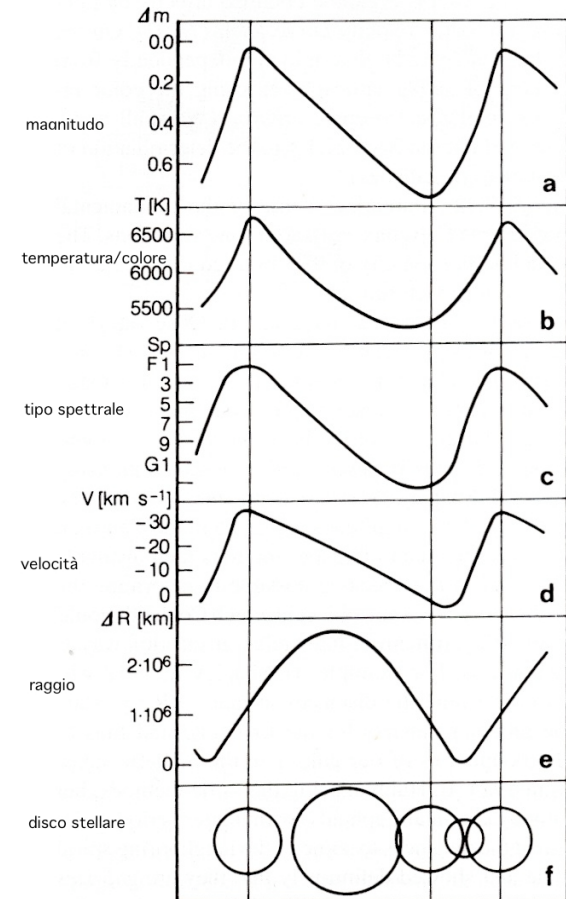
$$L = \pi R^2 F$$

dove F è il flusso di radiazione che dipende dalla temperatura della superficie. F si stima da misure spettroscopiche, mentre R si calcola dall'integrale di cui sopra.

La luminosità apparente è data da

$$f = R^2 F / r^2$$

dove r è la distanza della stella. Distanza luminosa.



Magnitudo

La luminosità delle stelle si misura in magnitudo. Le stelle più luminose hanno magnitudo negative e la scala è logaritmica.

Due stelle di luminosità s_1 e s_2 hanno una differenza in magnitudo m data da m_1
 $- m_2 = -2.5 \log(s_1/s_2) \quad [\text{mag}]$

Se m è la magnitudo apparente all'osservatore, la magnitudo assoluta M è riferita alla luminosità della stella ad una distanza convenzionale di riferimento presa uguale a 10 pc.

Quindi poiché $s \propto S/r^2$, la differenza tra m ed M è data da:

$$m - M = 2.5 \times 2 \log (r[\text{pc}]/10) = 5 \log r - 5$$

La distanza r calcolata dalla formula di sopra si chiama “distanza modulo”.

Oltre la dipendenza dalla distanza, occorre tener conto anche dell'assorbimento della luce nel mezzo interstellare e quindi applicare una correzione con la distanza.

SCOPERTA DEI RAGGI COSMICI

- 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

- 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



La scoperta dei raggi cosmici

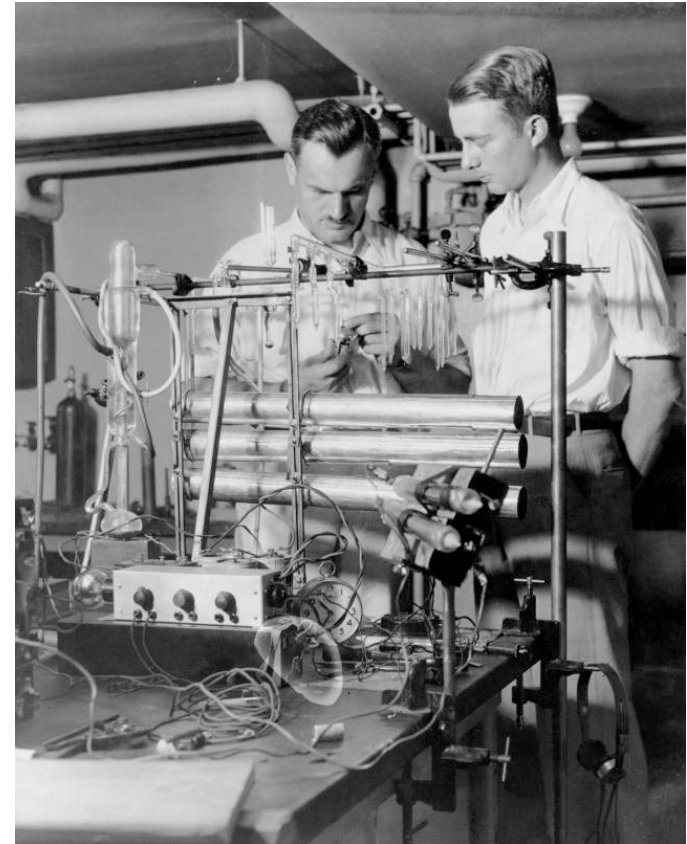
Domenico Pacini (Marino 1878, Roma 1934)
dal 1907 al 1910 condusse misure con un
elettroscopio immerso in acqua in una scatola
di rame nel golfo di Livorno e nel lago di
Bracciano a varie profondità.
Osservò una diminuzione della radiazione
ionizzante che attribuì ad origine indipendente
dall'azione 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



La natura dei raggi cosmici

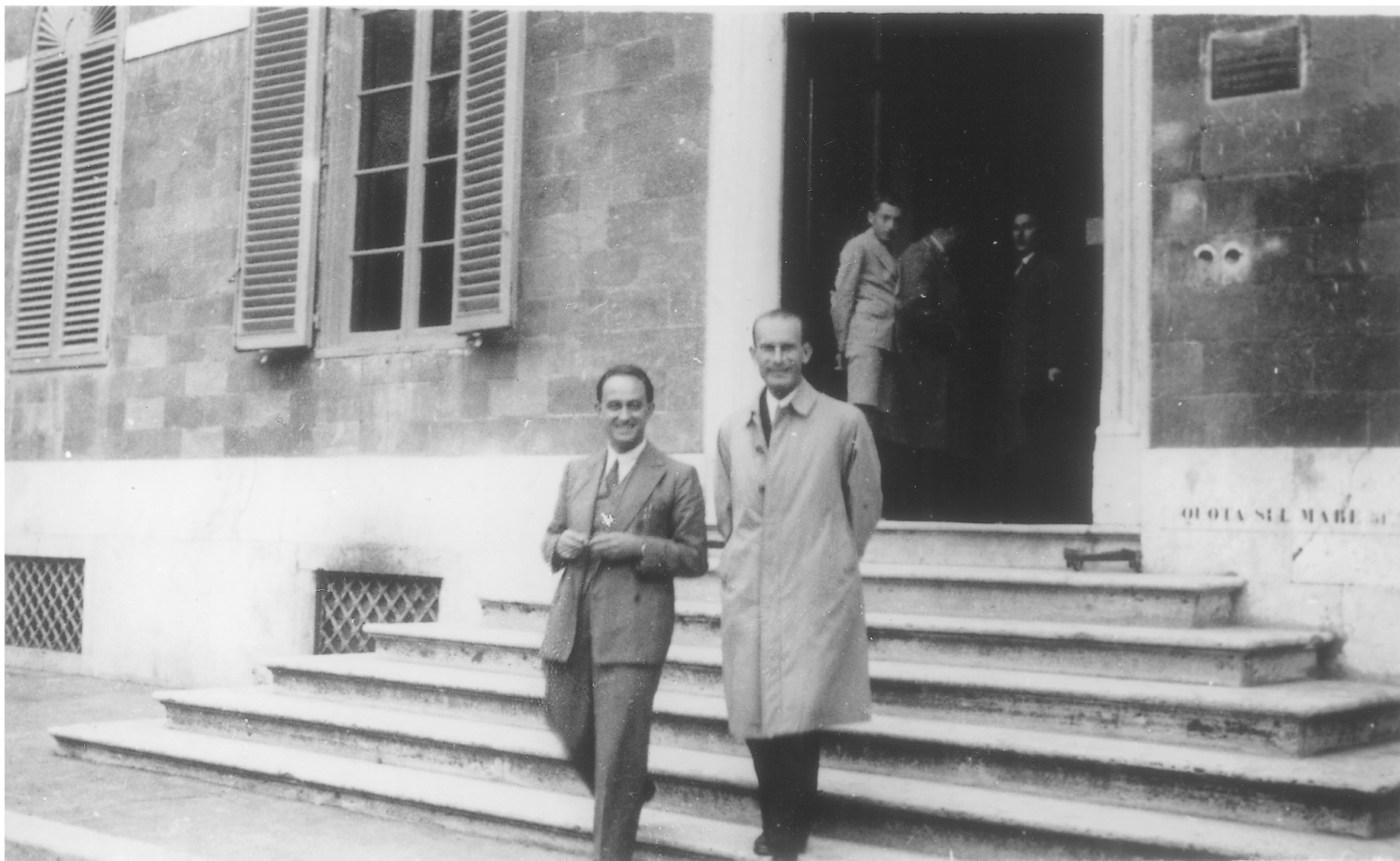
Dopo Hess, fu Robert Millikan, nel 1925, ad interessarsi a questa radiazione, e a lui si deve il nome di *raggi cosmici*: egli riteneva che fossero composti principalmente da raggi gamma. Arthur Compton e prima di lui Bruno Rossi, ipotizzò, al contrario, che fossero composti da particelle cariche: successive 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.





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.



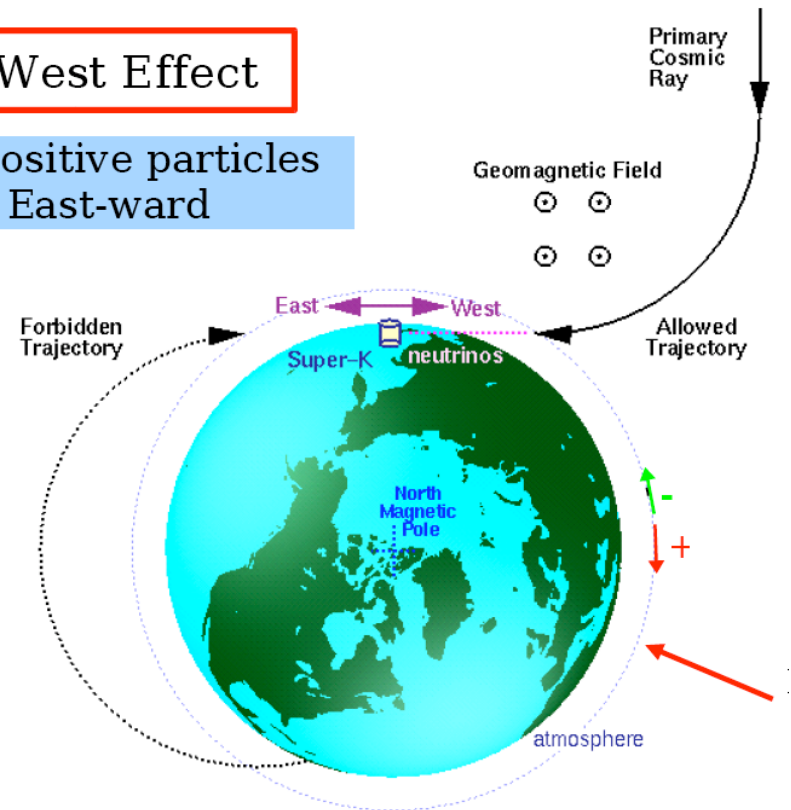
Robert Millikan con Marie Curie.

SCOPERTA DEI RAGGI COSMICI

- 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.

East-West Effect

More positive particles going East-ward



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



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

LA COMPOSIZIONE DEI RC

Componente carica

- Protoni (85%)
- Nuclei ed isotopi (12% He, 1% nuclei pesanti)
- Elettroni (2%)
- Antimateria:
 - antiprotoni ($p/p \sim 10^{-4}$)
 - positroni ($e^+/e^+ + e^- \sim 10^{-1}$)
 - Antideuterio ?
 - antinuclei ? —

Componente neutra

- Raggi gamma
- Neutroni
- Neutrini (non “veri” RC)

Componente neutra punta alla sorgente!

SPETTRI DEI RC

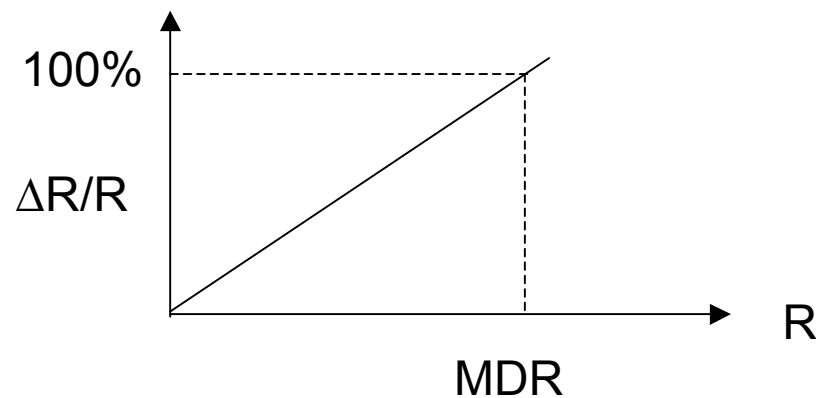
- Misura precisa della loro energia e abbondanza

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

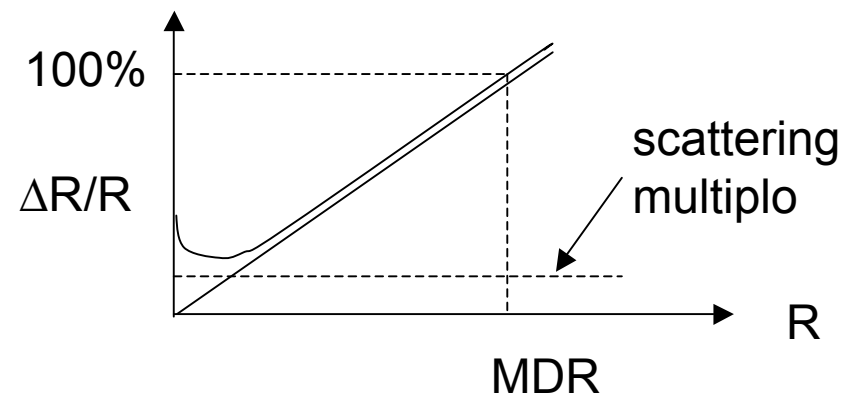
- *sorgenti*
- *meccanismi di accelerazione*
- *interazioni con ISM*
- *modelli di trasporto*
- *ricerca di nuove particelle*
- *calcolo neutrini atmosferici*

ALCUNE DEFINIZIONI

- Flusso di particelle $\frac{dN}{dE d\Omega dA dt} : [MeV^{-1} sr^{-1} cm^{-2} s^{-1}]$
- fattore geometrico (GF): accettazione $A \times \Delta\Omega \quad [cm^2 sr]$
- Esposizione = GF x tempo
- Rigidità: $R = p/Ze : [volt/c]$

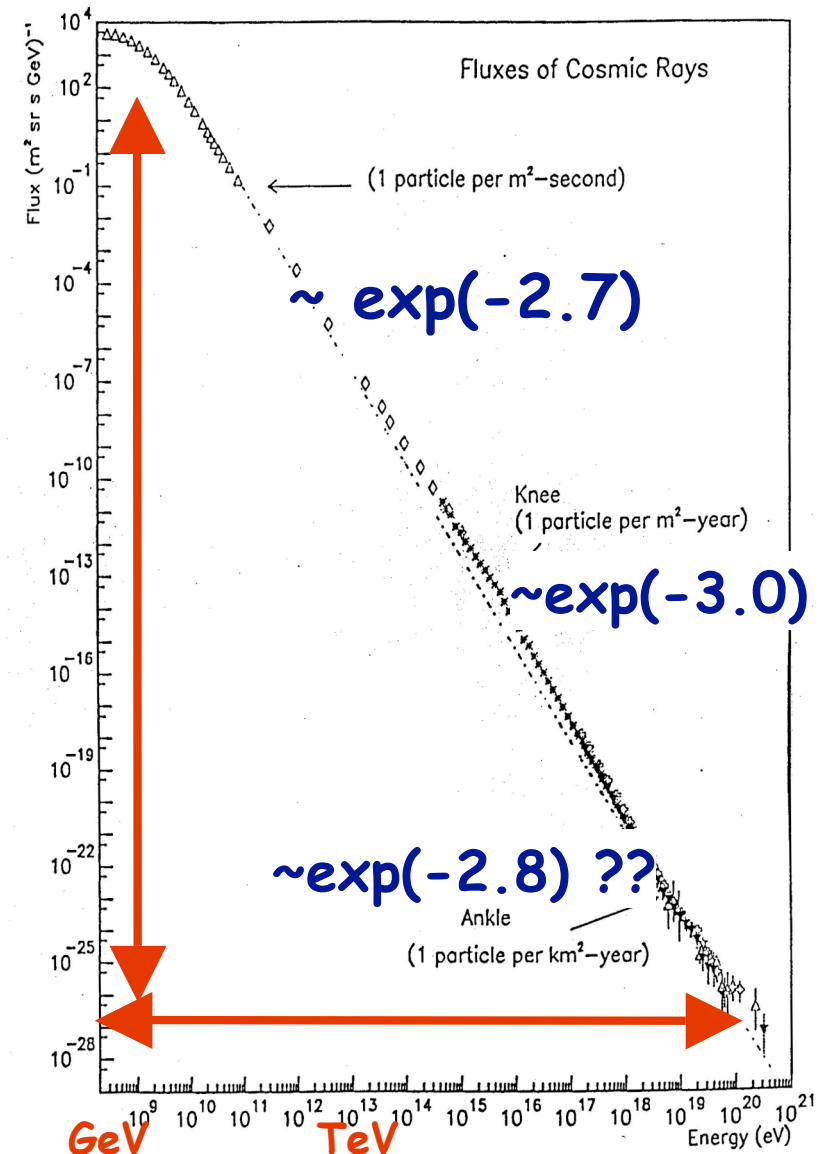


MDR
massima rigidità rivelabile



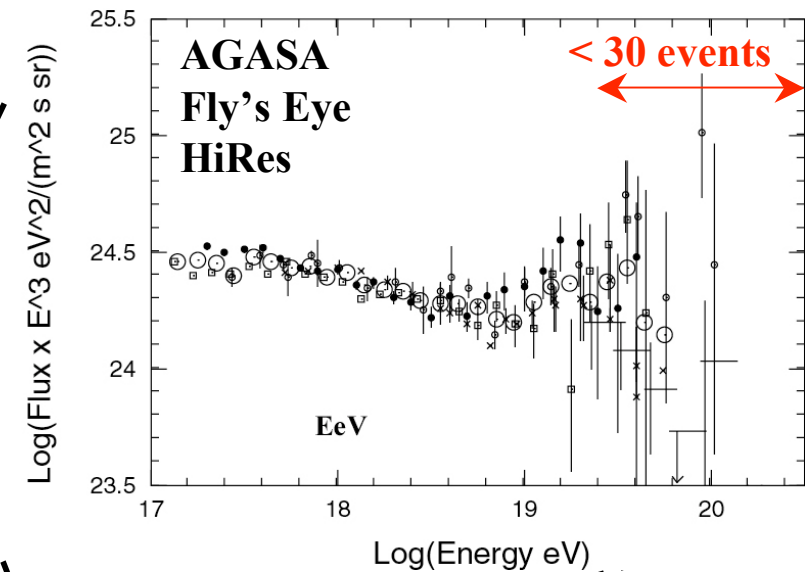
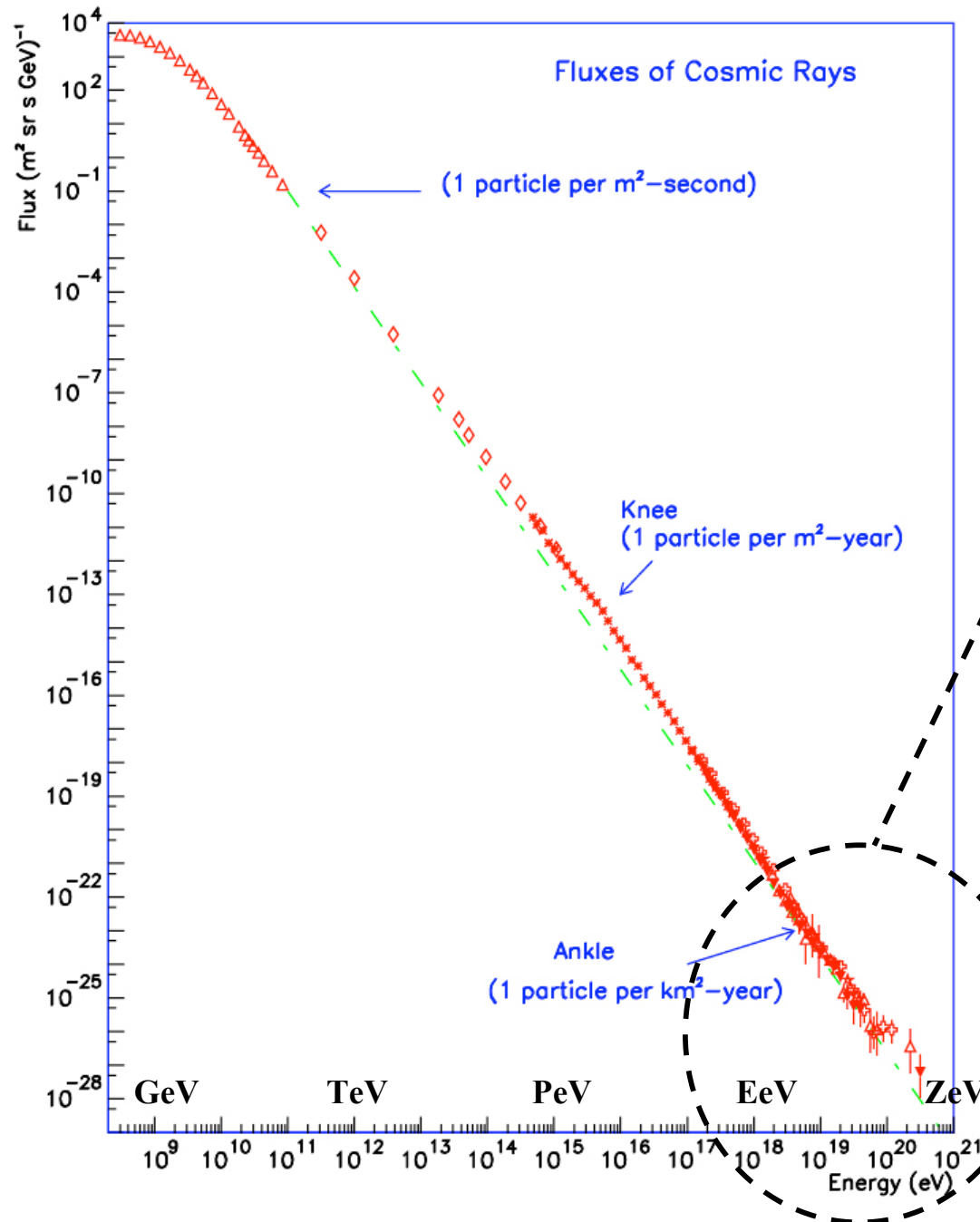
CARATTERISTICHE SPETTRO RC

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



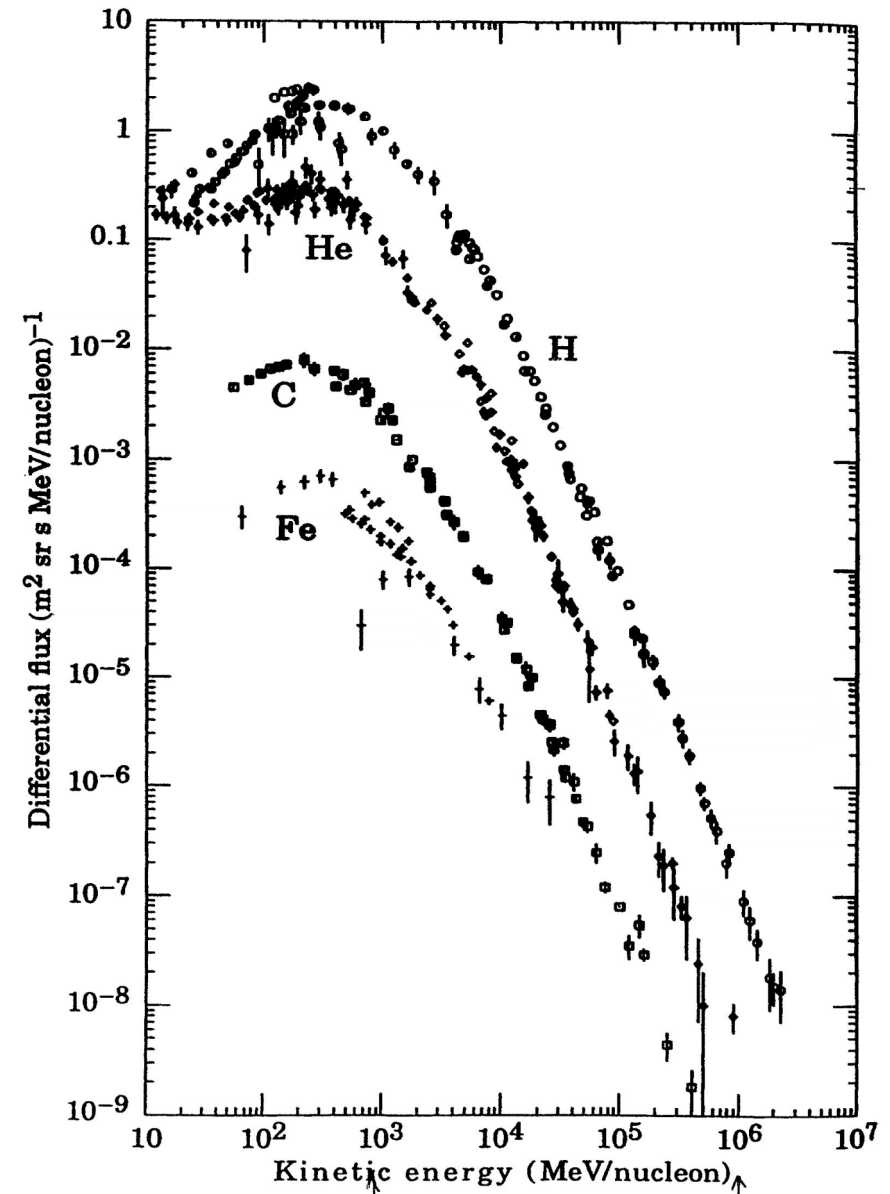
SPETTRO RC

“ANKLE”



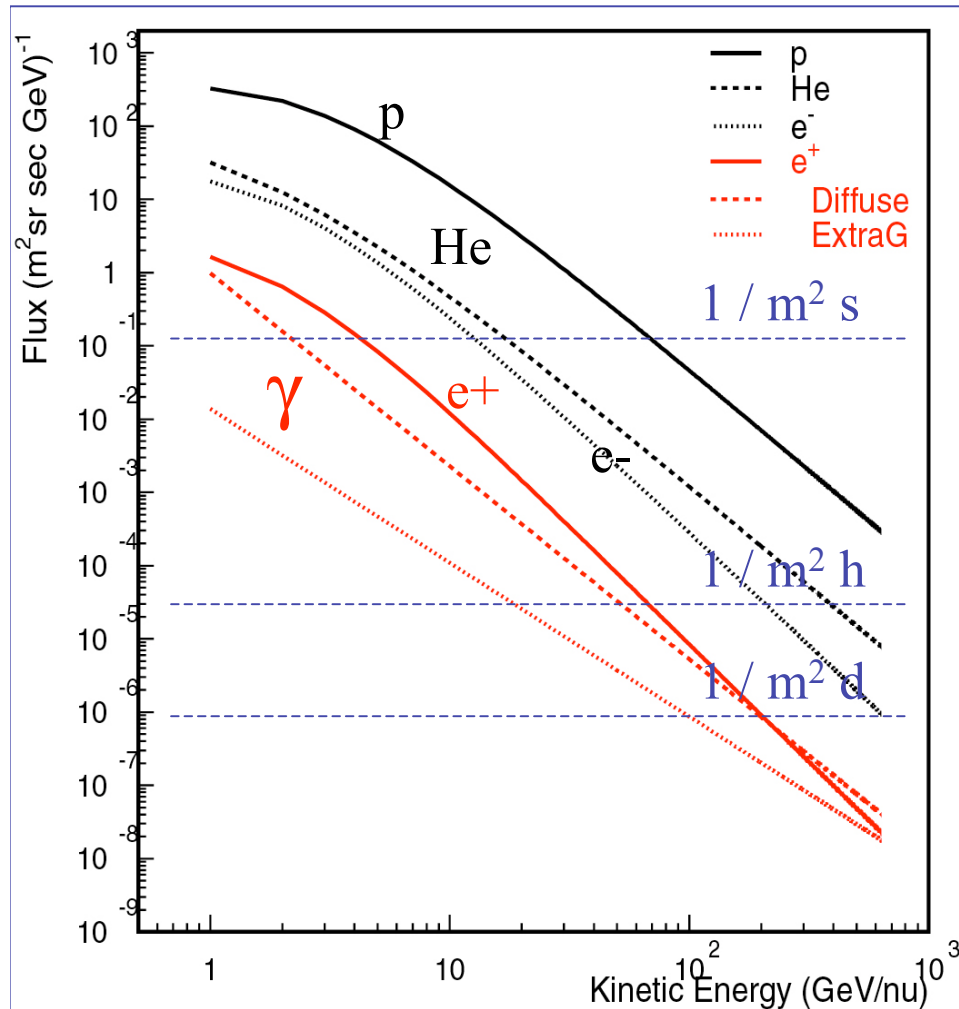
SPETTRO RC

- 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 ν atmosferici

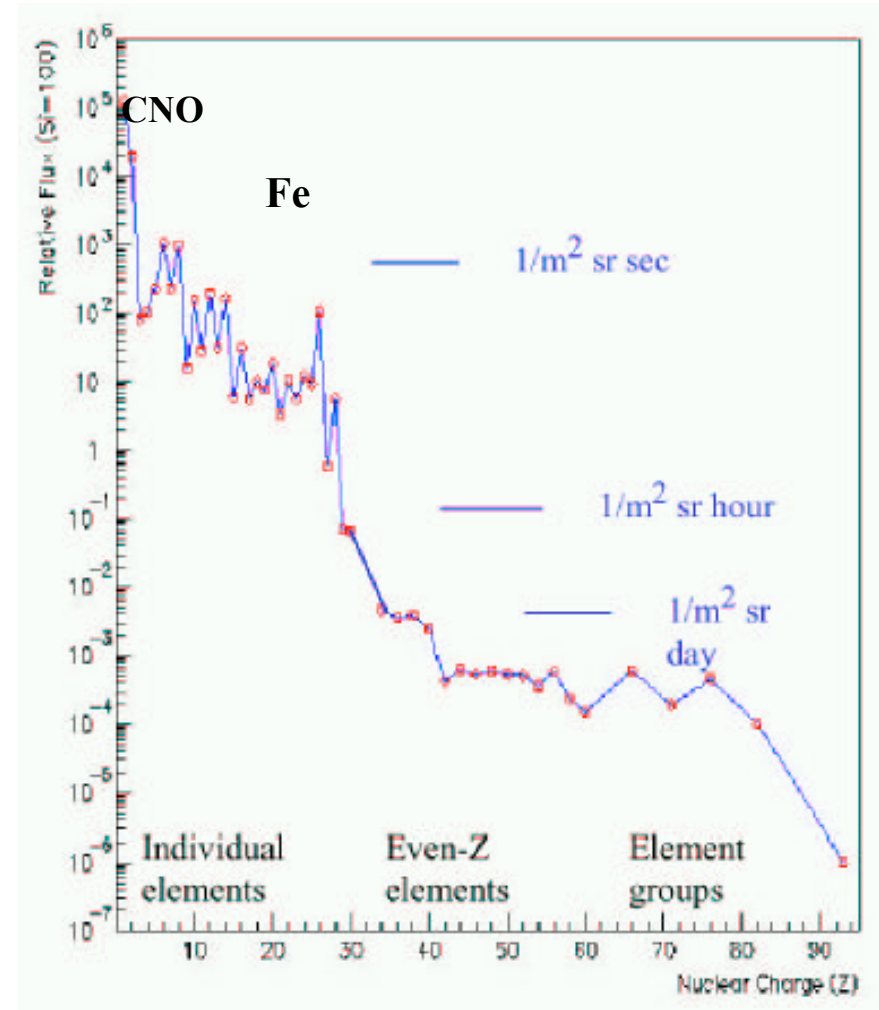


SPETTRO RC

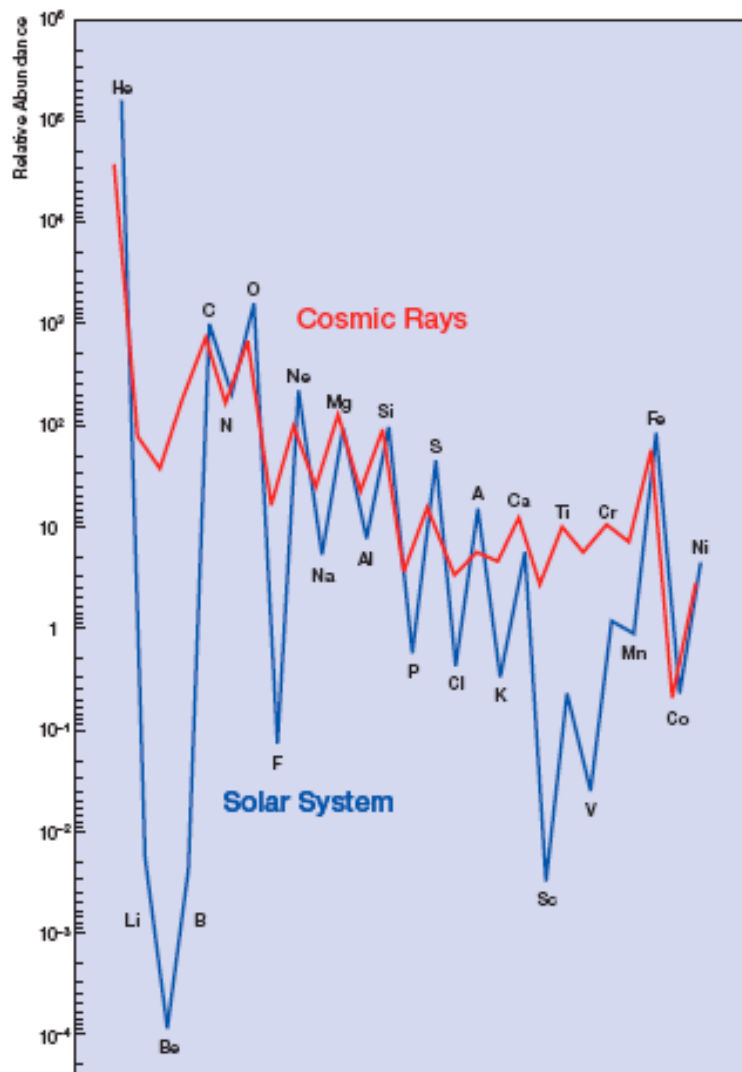
spettro particelle



composizione elementi



COMPOSIZIONE CHIMICA RC

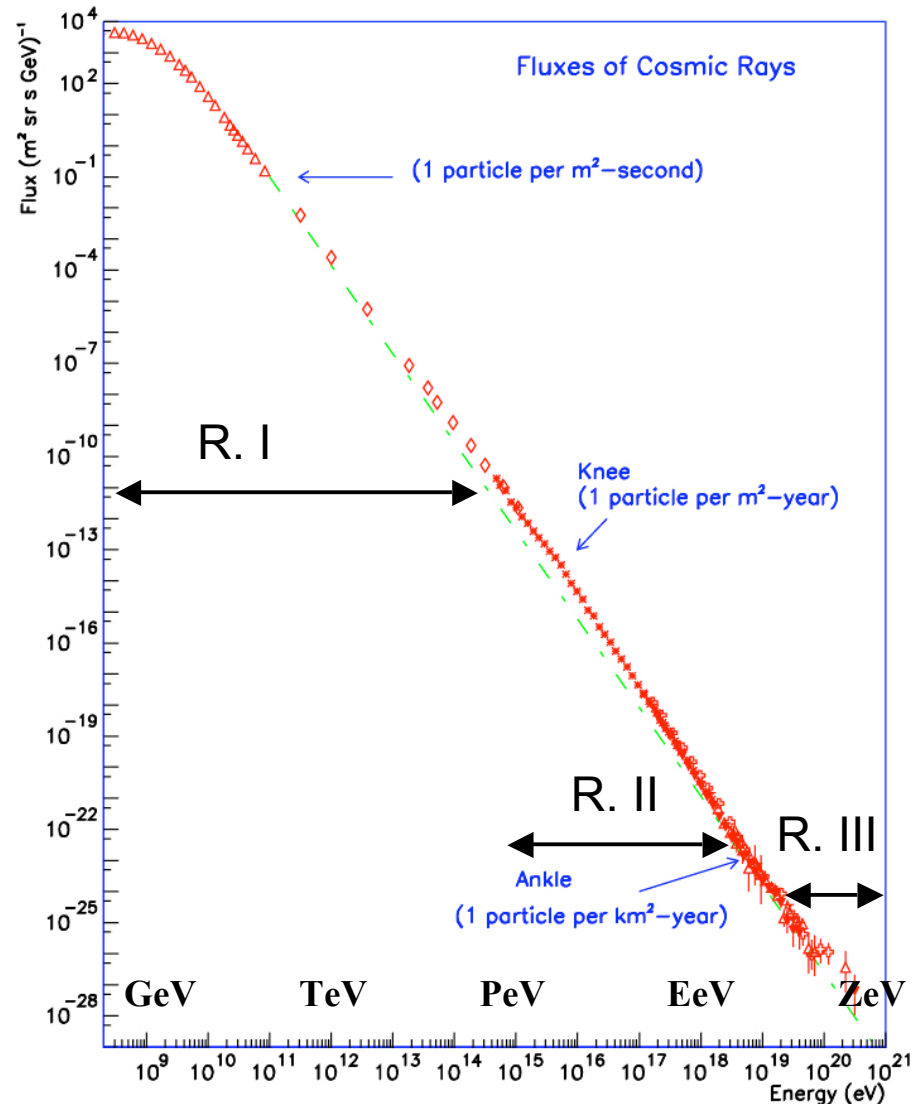


rispetto agli elementi presenti nel sistema solare

- 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

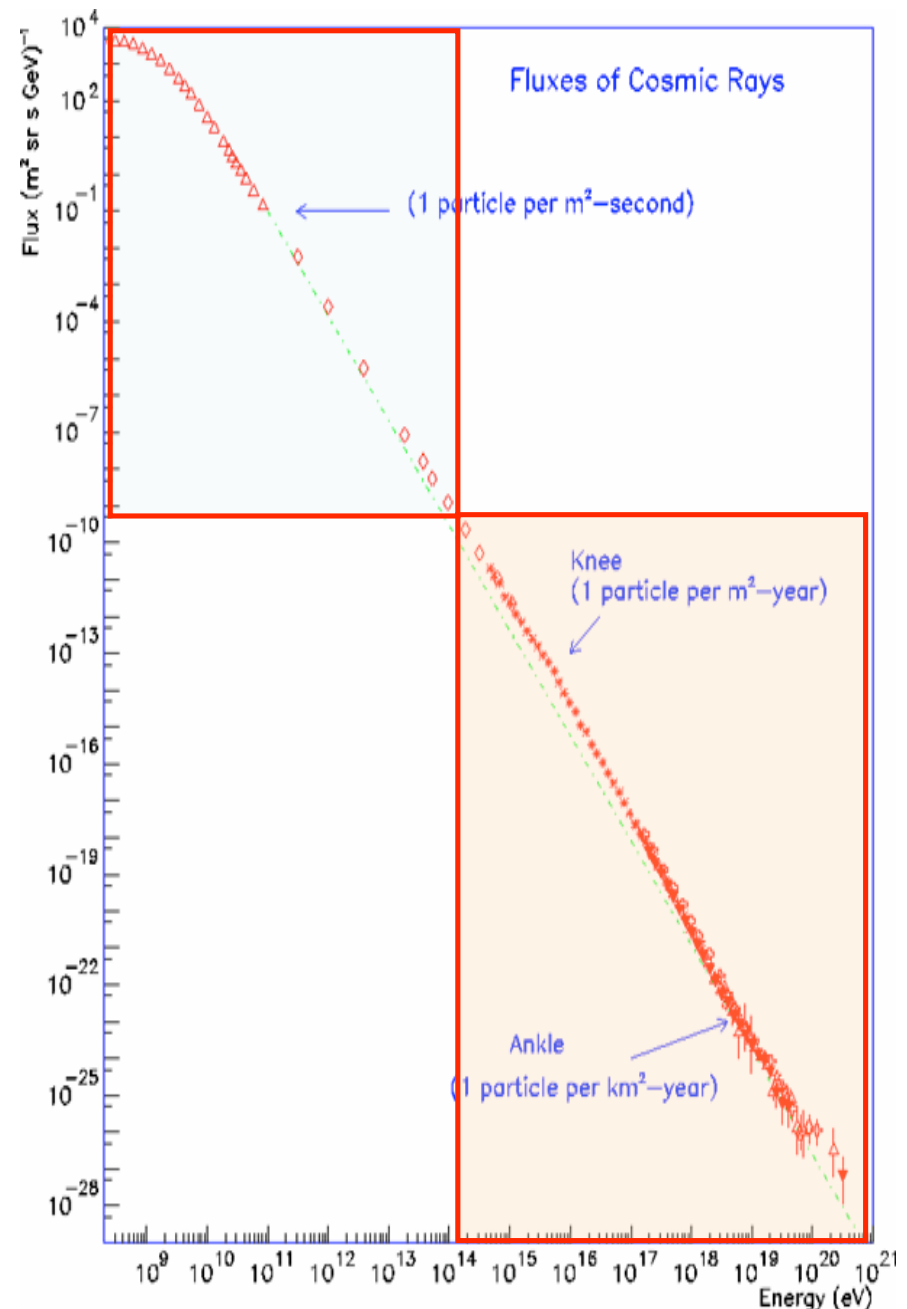
STUDIO RC / 3 REGIONI

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

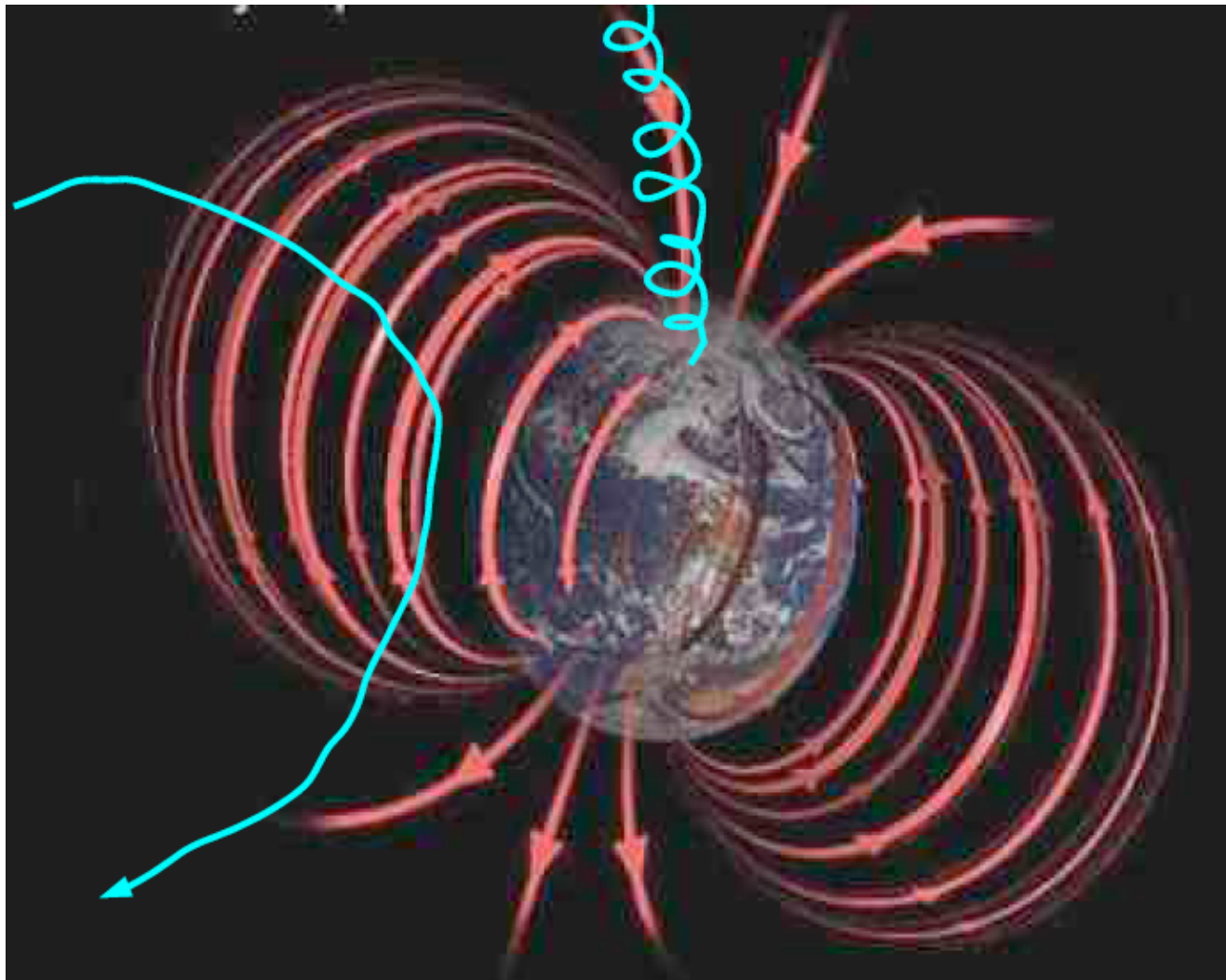


METODI DI MISURA DEI RAGGI COSMICI

- Misure dirette, $E < 10^{14}$ eV
 - Particelle alto Z
 - Antiparticelle
 - Nuclei leggeri ed isotopi
 - Composizione sotto il ginocchio
- Misure indirette, $E > 10^{14}$ eV
 - Composizione al ginocchio
 - UHECR



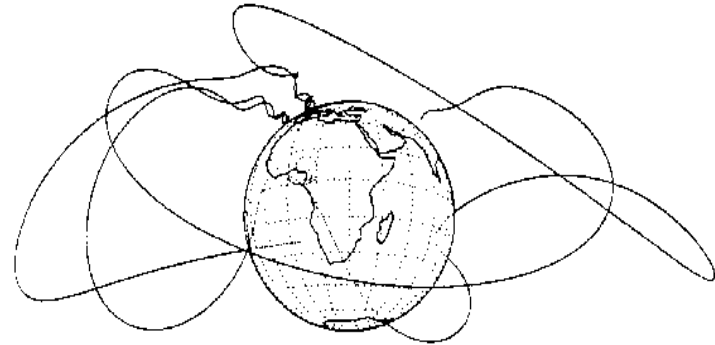
EFFETTO DI LATITUDINE



Al polo magnetico
possono arrivare
particelle di
qualunque rigidità

EFFETTI DEL CAMPO TERRESTRE

Effetto latitudine: I RC carichi arrivano da tutte le direzioni e sono deflessi dal campo terrestre. Il flusso dei RC dipende dalla latitudine geomagnetica, è maggiore ai Poli piuttosto che all'equatore.

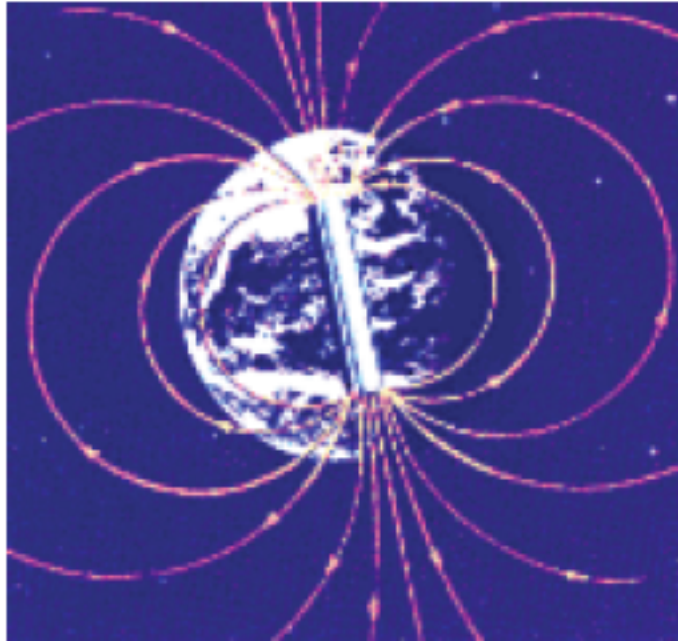


Ogni latitudine ha una rigidità (p/Z) di cut-off, al di sotto della quale nessuna particella che arrivi in verticale può arrivare a basse altitudini.

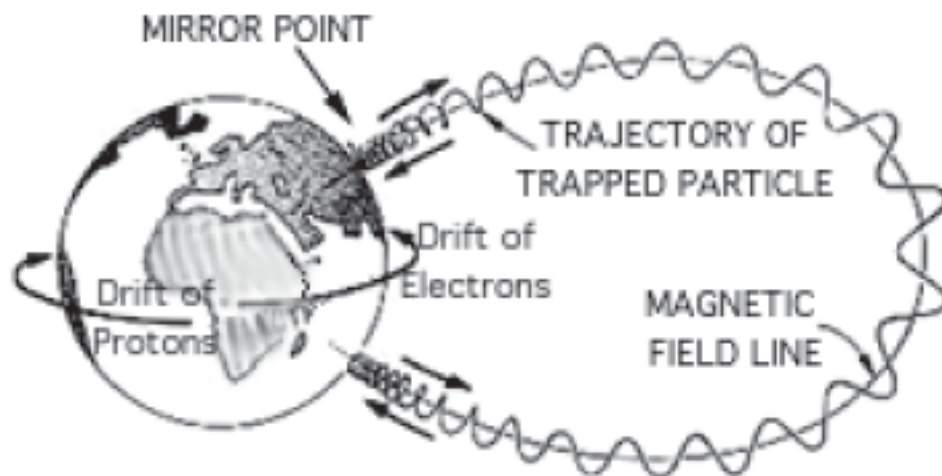
Effetto Est-Ovest: Il valore del cut-off dipende dalla direzione di arrivo e dal segno della carica. I Raggi Cosmici **positivi** penetrano a più bassa energia se provengono da **Ovest**, mentre i **negativi** sono più facilitati se provengono da **Est**.

Poiché i RC sono principalmente **carichi positivamente**, si misura una **asimmetria Est-Ovest**.

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



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:

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

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

COMPTON (1933) Cosmic Rays are CHARGED

GEOGRAPHIC STUDY OF COSMIC RAYS

389

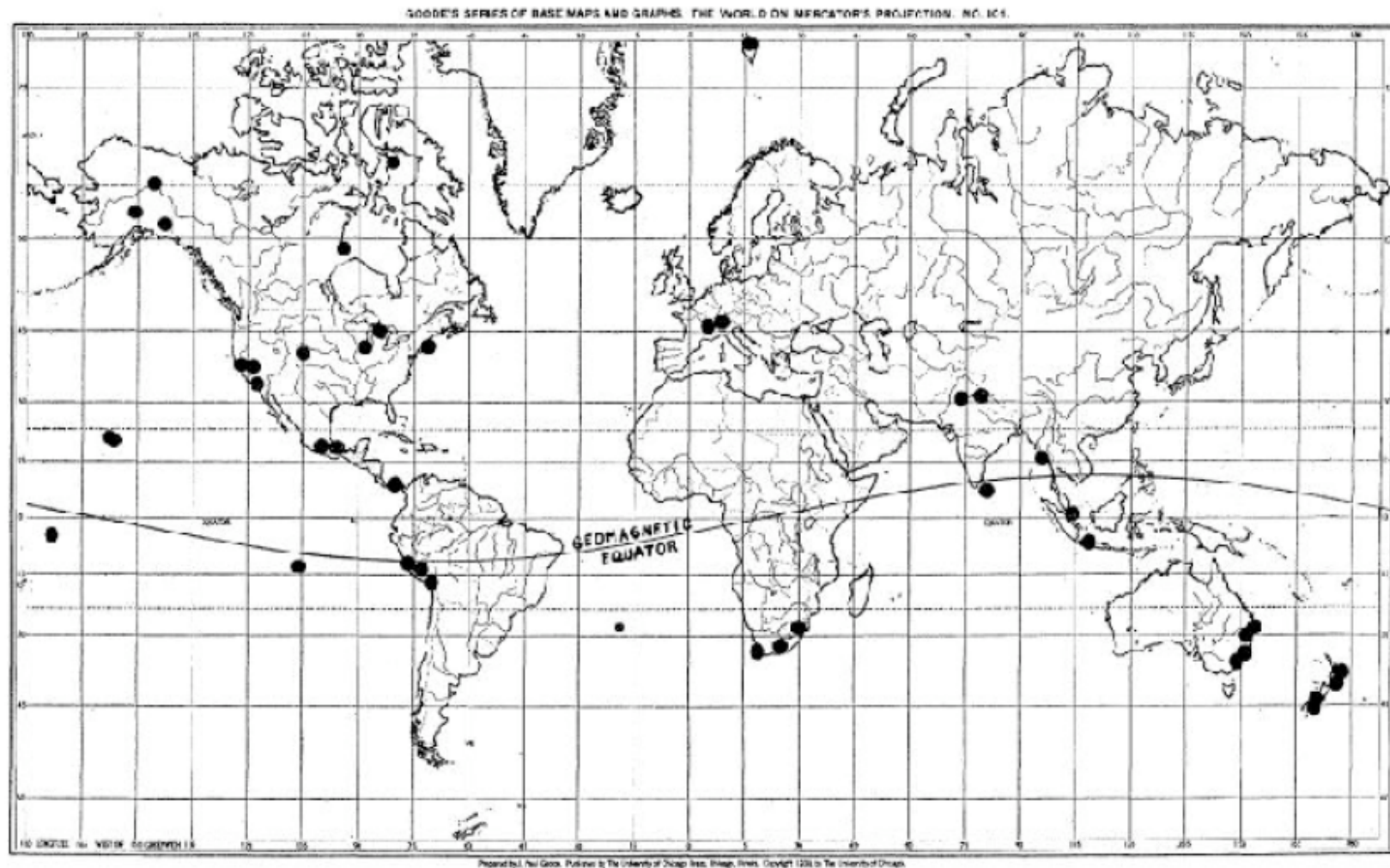


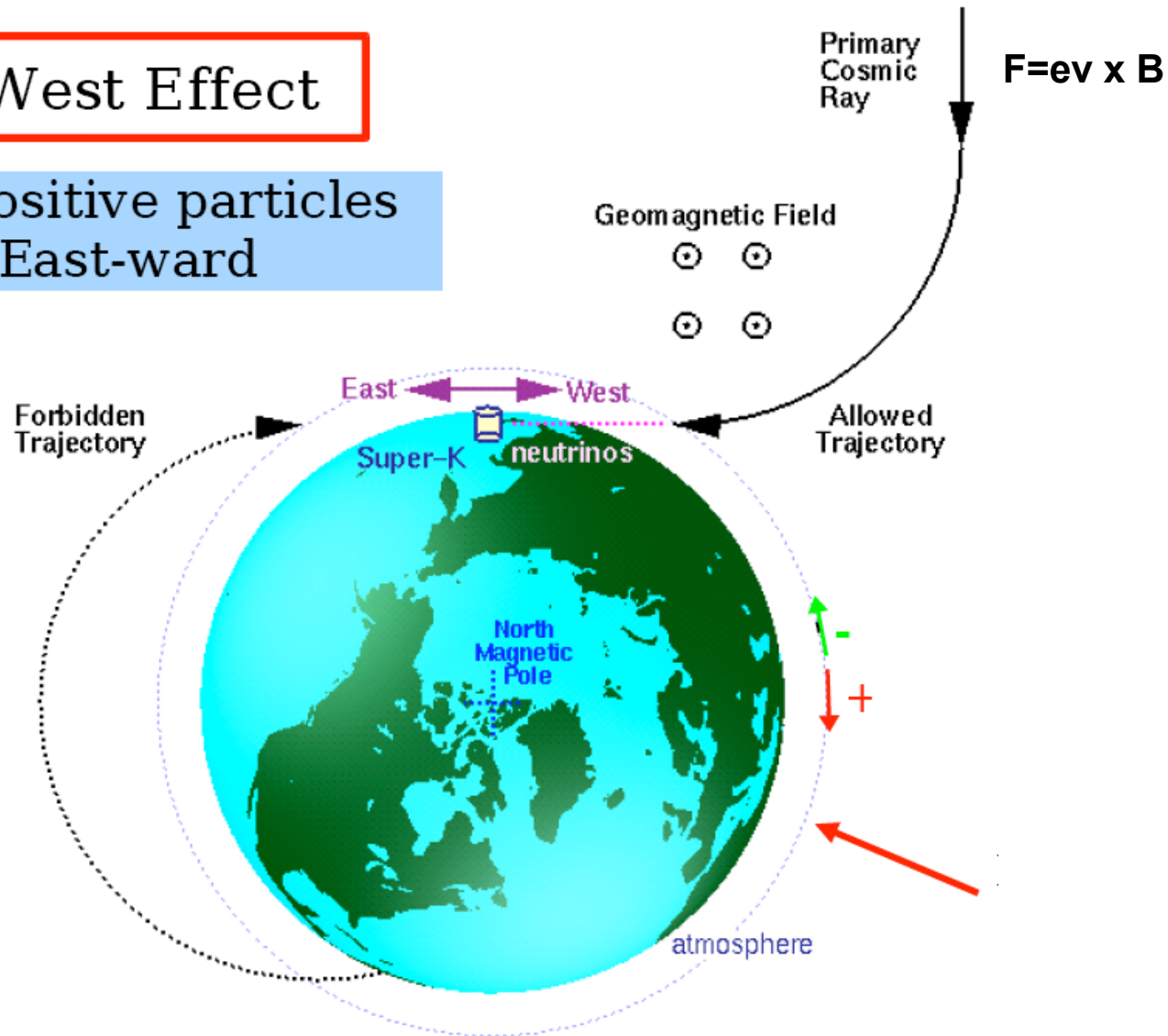
Fig. 1. Map showing location of our major stations for observing cosmic rays.

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:

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

Dove $\rho = r/r_s$, distanza dal centro del dipolo in unità di Størmer

λ : latitudine geomagnetica

θ : 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

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

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

