

Raggi cosmici

La terra viene investita da un flusso di particelle cariche e neutre di alta energia di origine extraterrestre

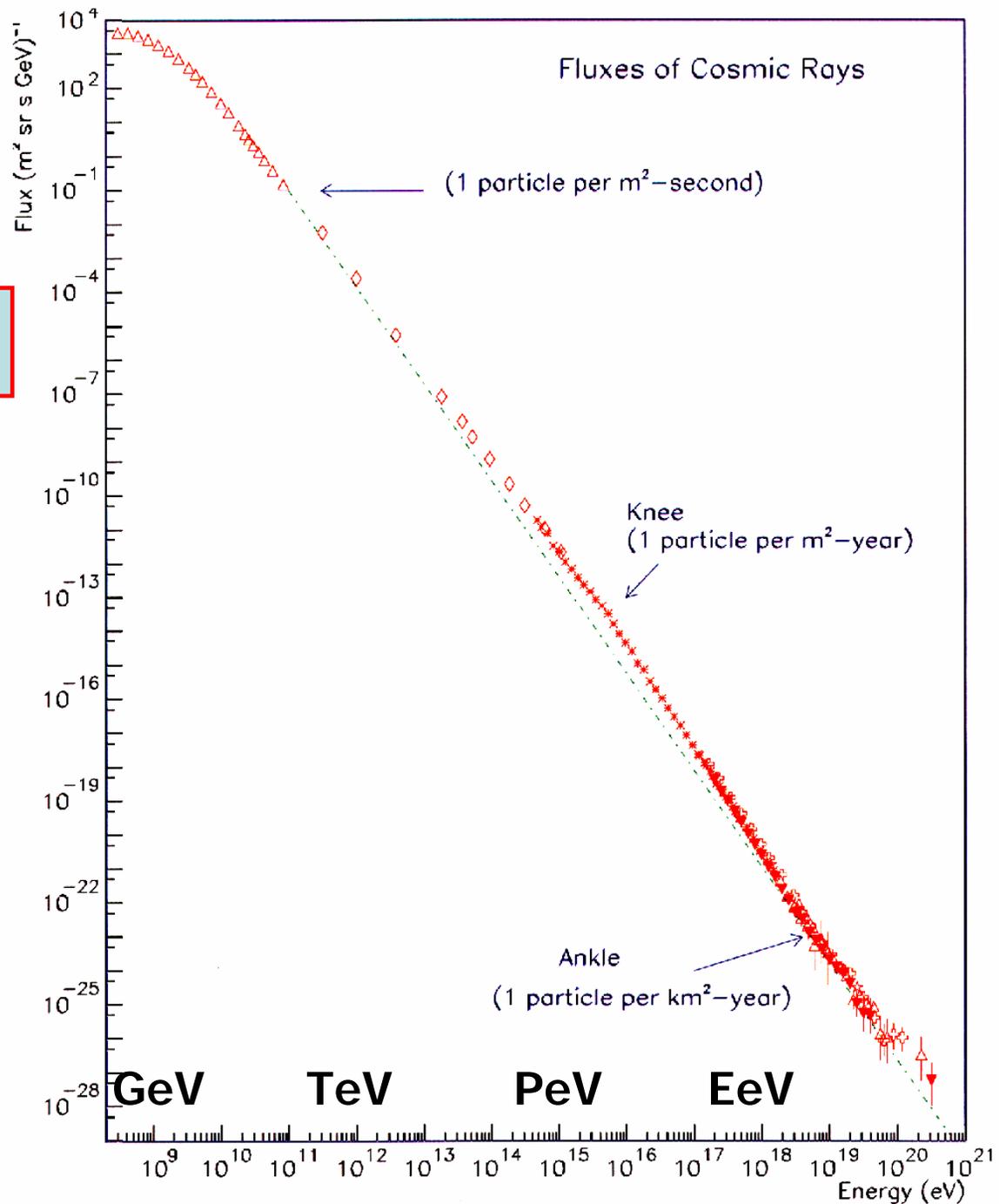
Il flusso di tali particelle è pari a circa 1000 per metro quadro per secondo (90% protoni, 9% elio ed il resto nuclei pesanti).

I raggi cosmici hanno avuto un ruolo storico nello sviluppo della fisica subnucleare, ma le domande fondamentali :

- ◇ da dove provengono ?
- ◇ quali sono i meccanismi di accelerazione?

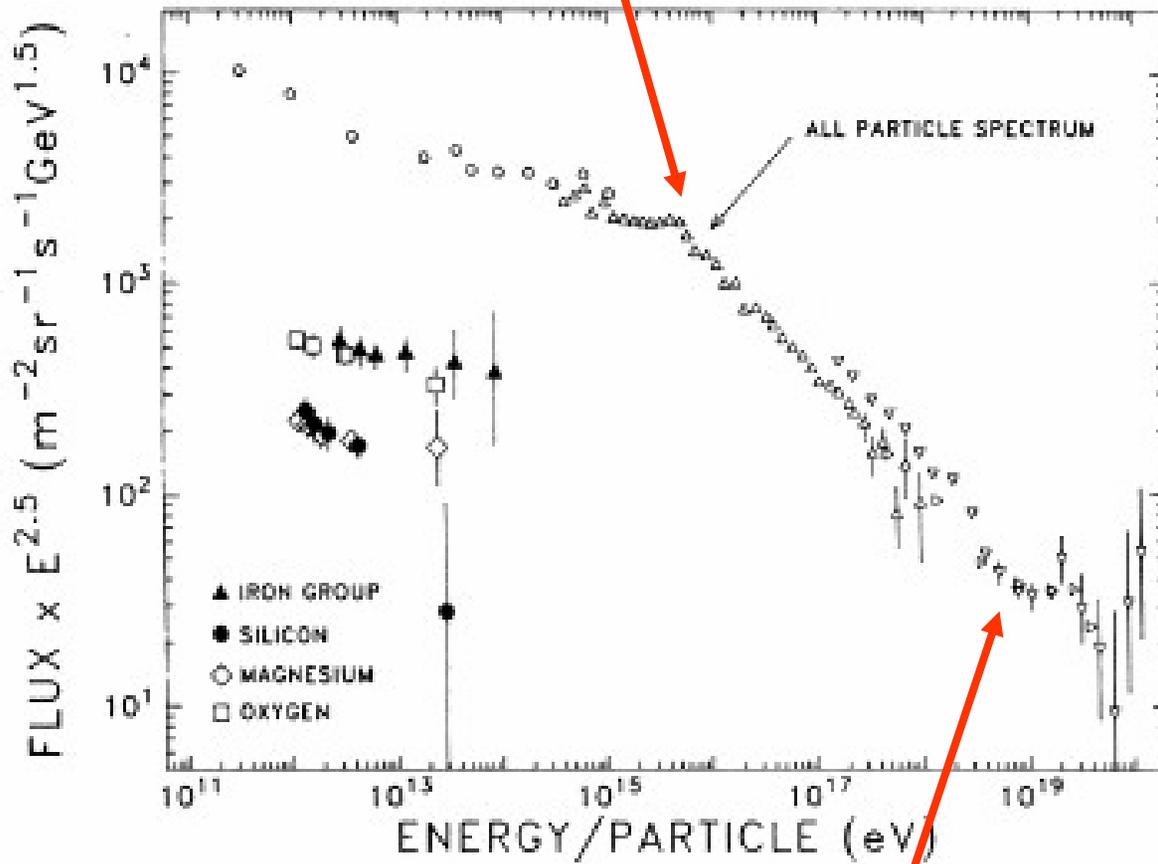
aspettano ancora risposte completamente esaurienti

Spettro d'energia



Discontinuita' nello spettro

ginocchio



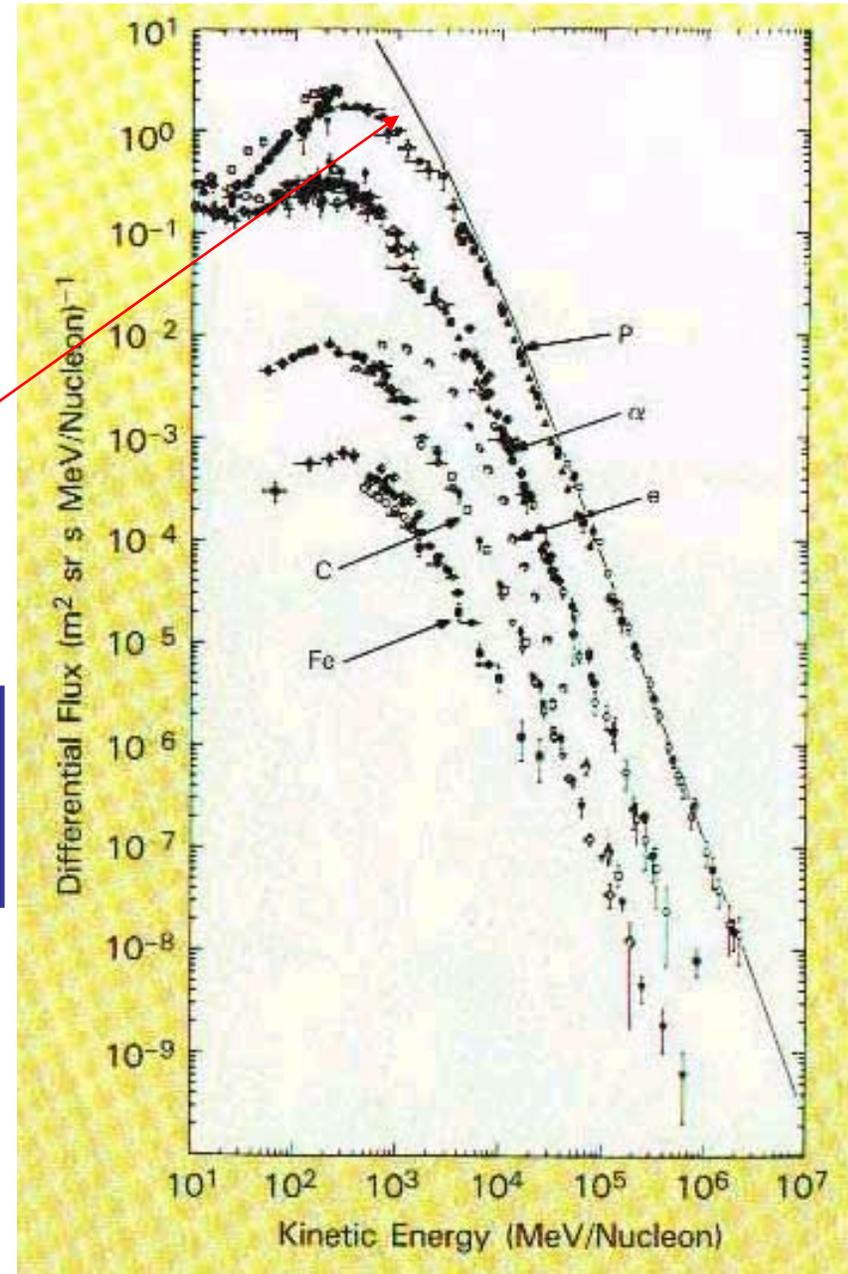
Spesso riportato spettro moltiplicato per E^2 o $E^{2.5}$. Alquanto rischioso, poiché fortemente influenzato da errori sistematici in energia misurata in esperimenti diversi.

caviglia

Composizione elementare

Composizione elementare dei raggi cosmici

Curva continua: distribuzione corretta tenendo conto del taglio a basse energie introdotto dal campo magnetico



Problemi aperti

Domande fondamentali:

- 1) Da dove vengono?
- 2) Quali sono i meccanismi di accelerazione?

Risposte di prima approssimazione :

- 1) Essenzialmente di provenienza galattica- (giroraggio)
- 2) Meccanismo di Fermi

Confinamento dei RC nella Galassia

Campo magnetico galattico uguale a circa $3\mu\text{G}$

Raggio dell'orbita :

$$\frac{\gamma m v^2}{r} = Z e v B \quad \text{con } v = c \Rightarrow$$

$$r = \frac{\gamma m c}{Z e B} = \frac{E}{Z e B c} = \left(\frac{pc}{Ze} \right) \frac{1}{Bc} \Rightarrow \frac{E[\text{GeV}]}{0.3 B[\text{T}] Z}$$

$R = \text{Rigidita}' \uparrow$

Per una particella di 100 GeV e $B = 3\mu\text{G} = 3 \times 10^{-10} \text{T}$:

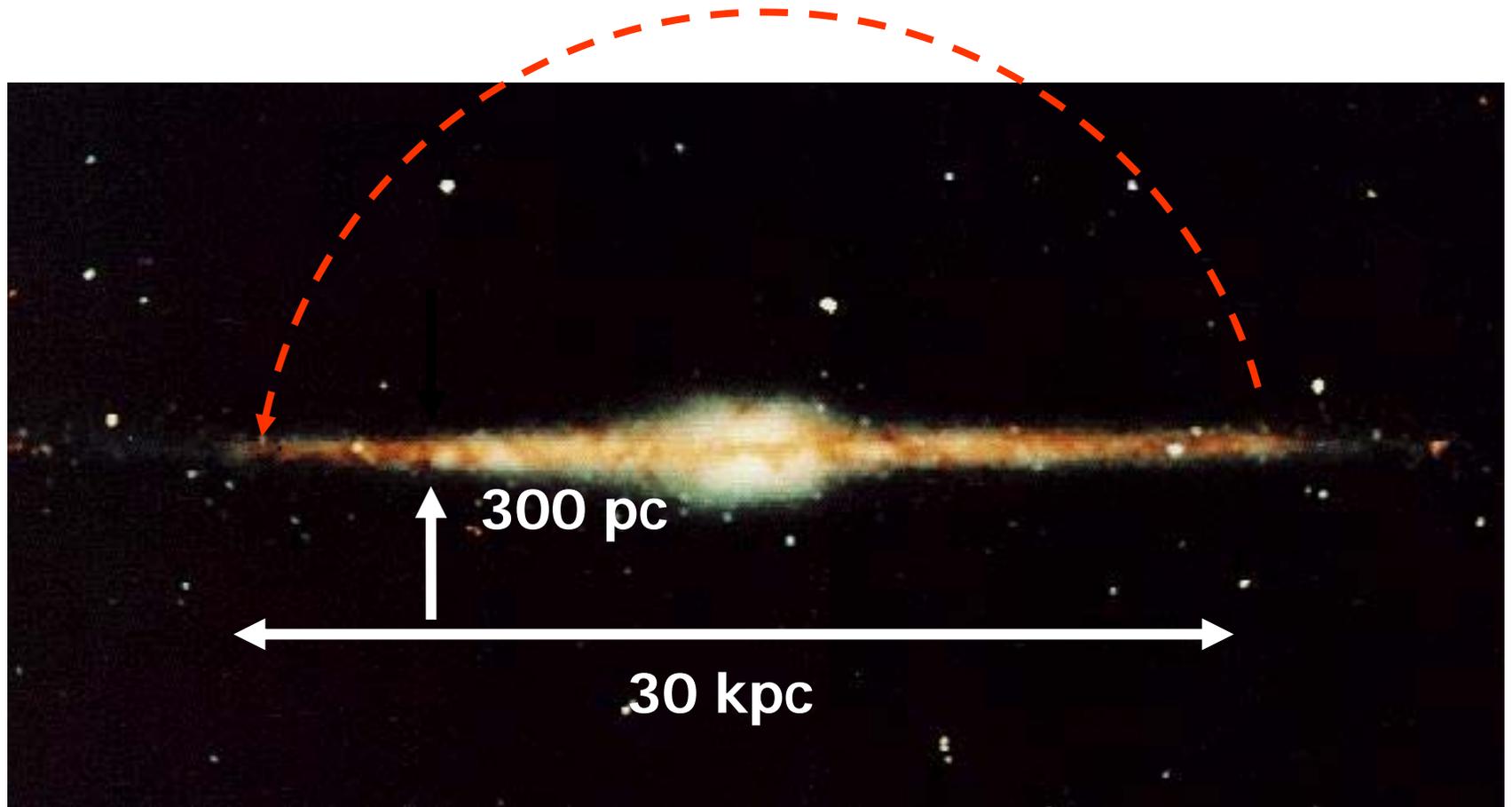
Se protone $\Rightarrow R = 100 \text{ GV}$; $r = 3.2 \times 10^{-5} \text{ pars. (pc)}$

Se nucleo di Fe $\Rightarrow R = 4 \text{ GV}$; $r = 1.2 \times 10^{-6} \text{ pc}$

Se energia = 100 TeV $\Rightarrow r_p = 0.03 \text{ pc} \ll \text{spessore del disco Galattico (300 pc)}$

Confinamento dei RC nella Galassia

Protone da $5 \cdot 10^{19}$ eV (50 PeV) in un campo di $3 \mu\text{G}$



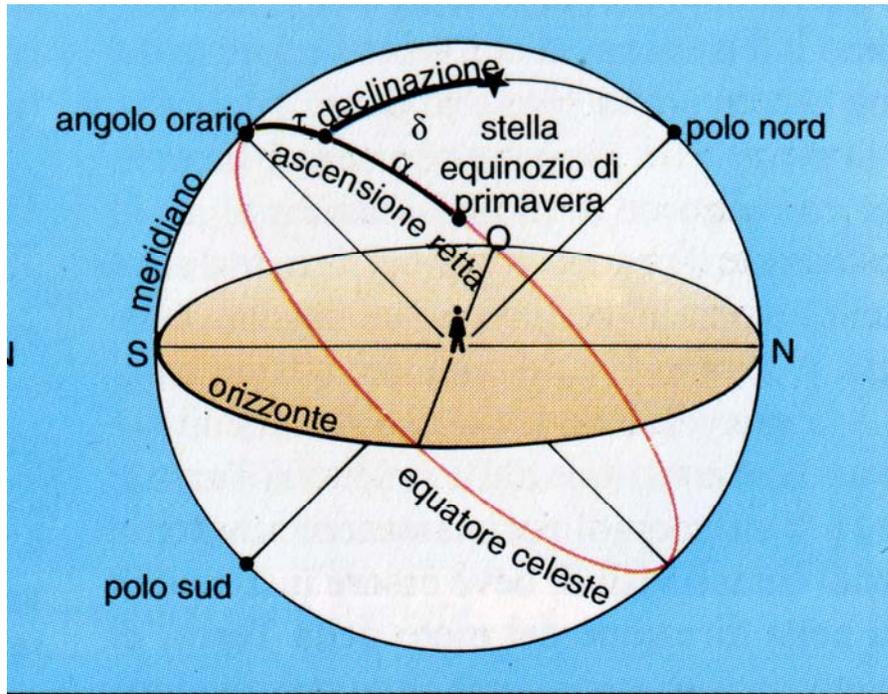
Confinamento dei RC nella Galassia

Protone da $5 \cdot 10^{19}$ eV (50 PeV) in un campo di $3 \mu\text{G}$

→ $r = 18$ kpc: confrontabile con le dimensioni della Galassia

Per energie elevate ci aspettiamo una qualche anisotropia

Sistemi di coordinate[1]

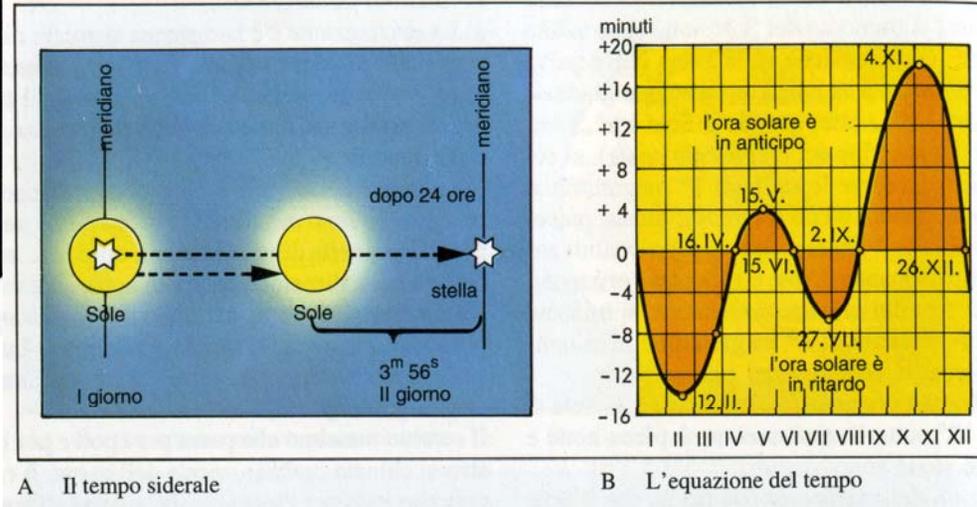


B Coordinate equatoriali: ascensione

Coordinate equatoriali:

ascensione retta e
declinazione

Ascensione retta R.A. (α)
declinazione δ



Tempo siderale → diverso
dal tempo solare

Sistemi di coordinate[2]

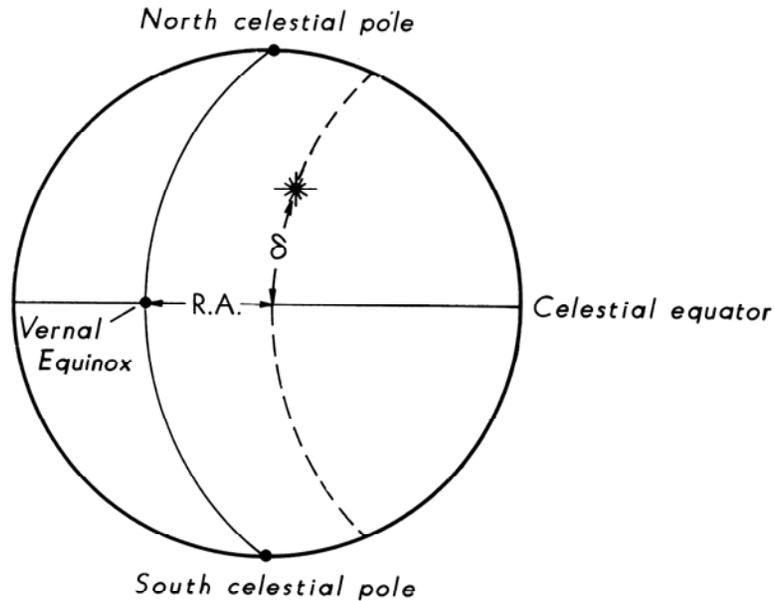


FIGURE 8.1 Astronomical coordinate system showing definitions of right ascension (R.A.) and declination (δ)

and δ is given by

$$\begin{aligned} S_D &= \sin \delta_L \cos \theta + \cos \delta_L \sin \theta \sin \phi \\ C_D &= (1 - S_D^2)^{1/2} \\ \delta &= \tan(S_D/C_D) \end{aligned}$$

and

$$\begin{aligned} S_H &= -\cos \phi \\ C_H &= -\sin \phi \sin \delta_L + \tan \theta \cos \delta_L \\ R.A. &= t_S - \tan(S_H/C_H) \end{aligned}$$

Coordinate equatorial:
 ascensione retta e declinazione
 Ascensione retta R.A. (α)
 declinazione δ

Relazione tra
 [ascensione retta – declinazione]
 e [zenith (θ) – azimuth(ϕ)]

δ_L e' la latitudine locale
 t_S e' il tempo siderale locale

Sistemi di coordinate[3]

Coordinate Galattiche:
ascensione retta e declinazione
latitudine galattica b
longitudine galattica l

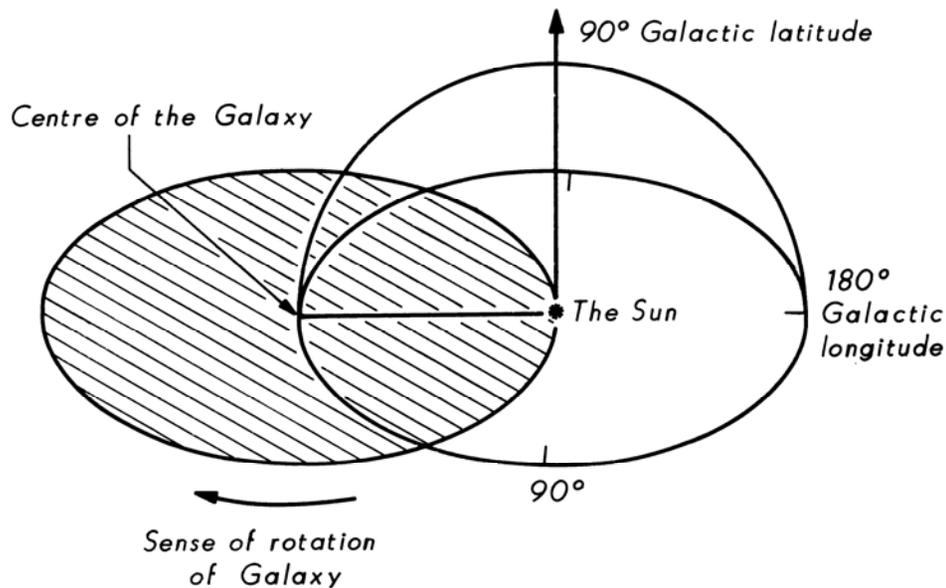


FIGURE 8.3 Definition of galactic coordinate system.

Sistemi di coordinate[4]

Relazione tra
[ascensione retta-declinazione]
e [latitudine-longitudine galattica]

8.5 Galactic Coordinates

Recent searches for anisotropy have used galactic coordinates because interpretation in terms of cosmic ray origin models is more straightforward. Galactic coordinates have the equator in the galactic plane (see Fig. 8.3), and the north galactic pole is defined by a perpendicular to the galactic plane going through the sun's position in the galaxy. Conversion from $R.A.$ and δ coordinates to galactic latitude (b^{II}) and longitude (l^{II}) coordinates is accomplished using the following transformations

$$\begin{aligned}Q &= 192.2\pi/180 - R.A. \\C_X &= 0.460200 \cos Q - 0.887815 \tan \delta \\S_X &= \sin Q \\l^{II} &= 303 - 180 \tan(S_X/C_X)/\pi\end{aligned}$$

and

$$\begin{aligned}S_B &= 0.460200 \sin \delta + 0.887815 \cos \delta \cos Q \\C_B &= (1 - S_B^2)^{1/2} \\b^{II} &= 180 \tan(S_B/C_B)/\pi\end{aligned}$$

Definizioni dell'anisotropia

**Rivelatore che opera in modo uniforme rispetto al tempo siderale
efficienza dipende fortemente dalla declinazione δ , ma non dalla R.A.
Si cerca allora eventuali asimmetrie in quest'ultima (chiamiamola θ)
Analisi armonica \rightarrow N eventi ad angoli θ_i**

Ampiezza della prima armonica :

$$r = (a^2 + b^2)^{1/2}; \quad \text{dove :}$$

$$a = 2/N \sum_{i=1}^N \cos \mathcal{G}_i; \quad b = 2/N \sum_{i=1}^N \sin \mathcal{G}_i$$

Fase :

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right)$$

Si usa determinare prima e seconda armonica in funzione dell'energia,
attraverso conteggio del rate in funzione del tempo siderale e fit :

$$R(t) = A + B \sin \left(\frac{2\pi t}{24} + \phi_1 \right) + C \sin \left(\frac{2\pi t}{12} + \phi_2 \right)$$

B, ϕ_1 = ampiezza e fase della prima armonica

C, ϕ_2 = ampiezza e fase della seconda armonica

Normalmente si riporta B/A in funzione dell'energia, in coordinate galattiche.

Anisotropy

Log E (eV)

12

14

16

18

19-20

$\delta(\%)$

~ 0.05

~ 0.1

~ 0.6

~ 2

~ 20

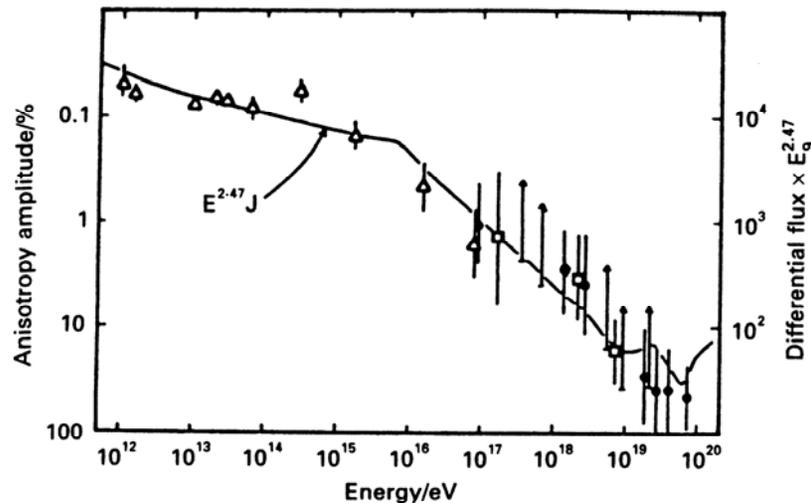


Figure 9.7. The amplitude of the anisotropy in the distribution of arrival directions of cosmic rays as a function of energy. In each case, a best fitting sine wave has been fitted to the data and the percentage amplitude of this harmonic measured. The solid line shows the shape of the differential spectrum of cosmic rays. (From A. M. Hillas (1984). *Ann. Rev. Astr. Astrophys.*, **22**, 425.)

Anisotropia dei raggi cosmici

Le asimmetrie misurate ad oggi sono molto piccole e crescono all'aumentare dell'energia.

Al di sotto di circa 10 GeV gli effetti del campo magnetico solare mascherano la direzione di provenienza.

Per energie elevate, il massimo dell'asimmetria sembra puntare nella direzione del supercluster locale di galassie.

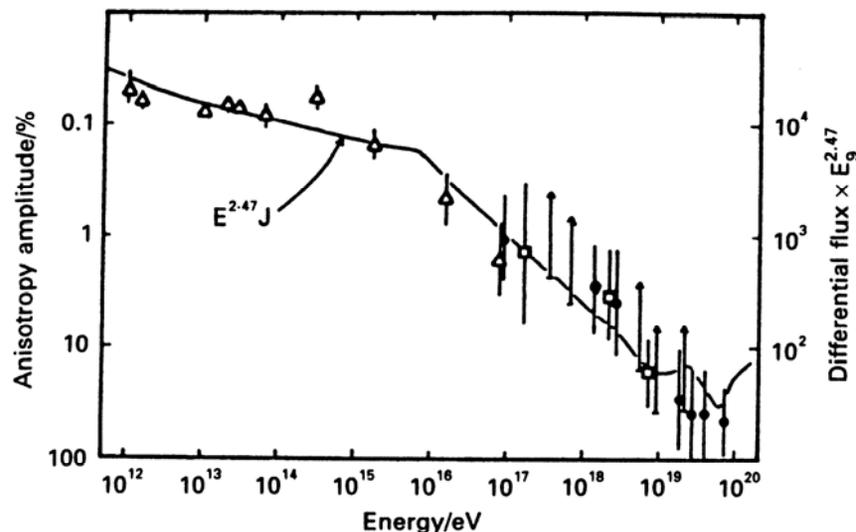
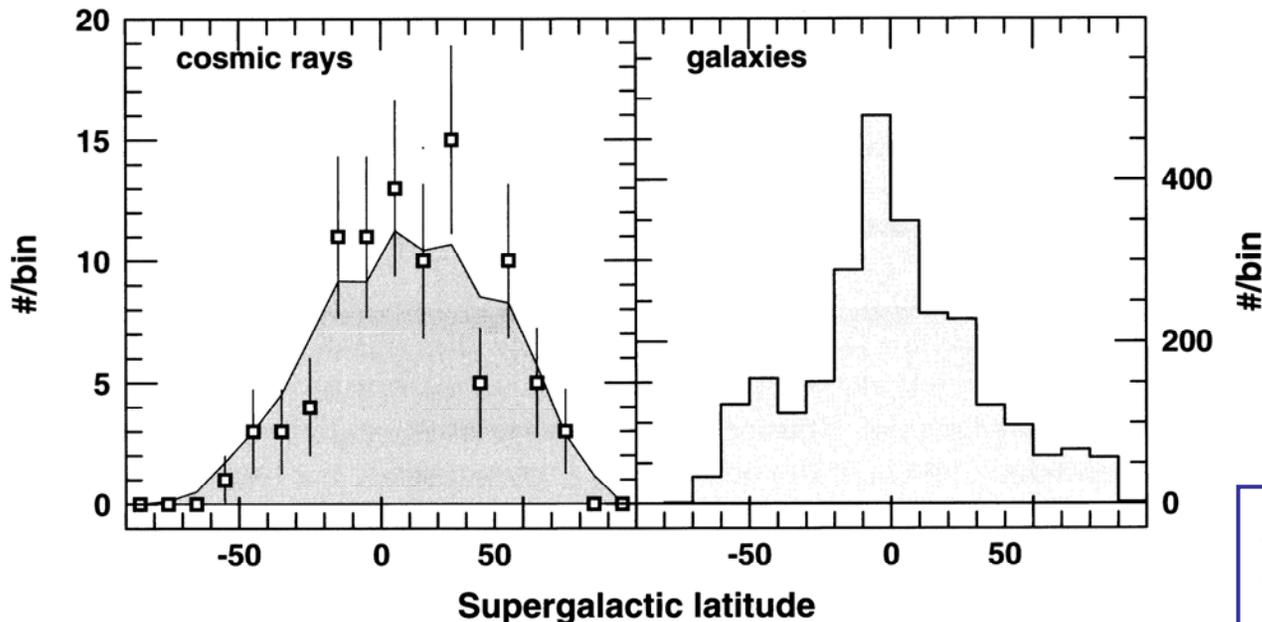


Figure 9.7. The amplitude of the anisotropy in the distribution of arrival directions of cosmic rays as a function of energy. In each case, a best fitting sine wave has been fitted to the data and the percentage amplitude of this harmonic measured. The solid line shows the shape of the differential spectrum of cosmic rays. (From A. M. Hillas (1984). *Ann. Rev. Astr. Astrophys.*, **22**, 425.)

Anisotropia ad alte energie [Agasa+..]

Asimmetria ad alte energie ($E > 4 \times 10^{19}$ eV)

Dati di AGASA (47) + Haverah Park (27) + Yakutsk (12) + Volcano Ranch (6)



A sinistra: curva continua
→ distribuzione in latitudine
supergalattica degli eventi
attesi dai vari esperimenti
in assenza di anisotropie.
A destra: distribuzione in
latitudine supergalattica
delle Galassie entro
80 Mpc.

Distribuzione di materia
→ concentrazione di galassie
entro 20° dal piano
supergalattico.
Distribuzione dei raggi c.
→ nessun eccesso

Fig. 9.18. Distribution of the supergalactic latitude of a set of 92 UHECR of energy above 4×10^{19} eV (left-hand panel) and the positions of nearby galaxies ($z < 0.02$) in the field of view of the air shower arrays.

Anisotropia ad alte energie [Agasa+..]

Distribuzione in bins angolari di 1°

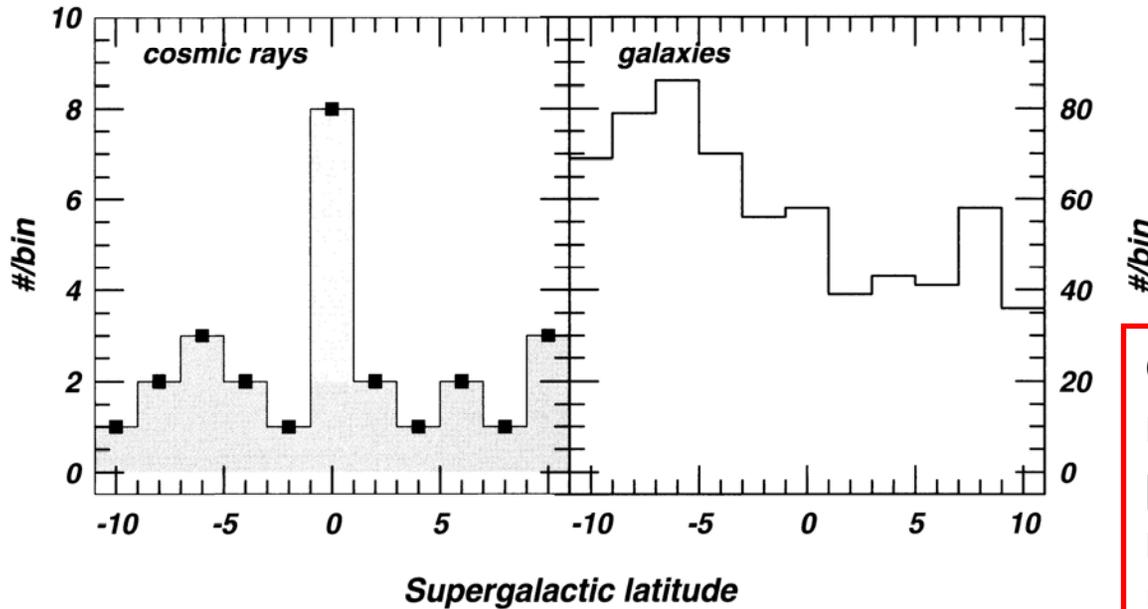


Fig. 9.19. Same as in Fig. 9.18 in 1 degree bins.

Ora le Galassie "vicine" non mostrano alcuna particolare concentrazione, mentre i raggi cosmici hanno un picco entro 1° dal piano supergalattico

Large-scale isotropy
Small-scale clustering

Anisotropia ad alte energie{Agasa+...}

Direzioni d'arrivo di 114 eventi con $E > 4 \times 10^{19}$ eV

Eventi indicati con cerchietti
grandi $\rightarrow E > 10^{20}$ eV

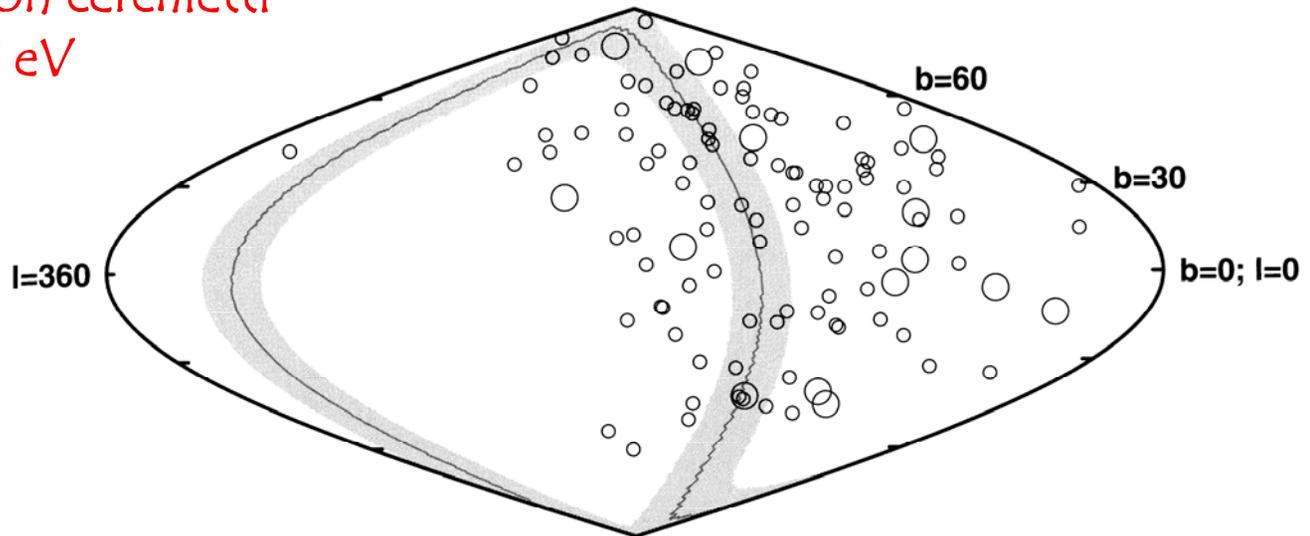
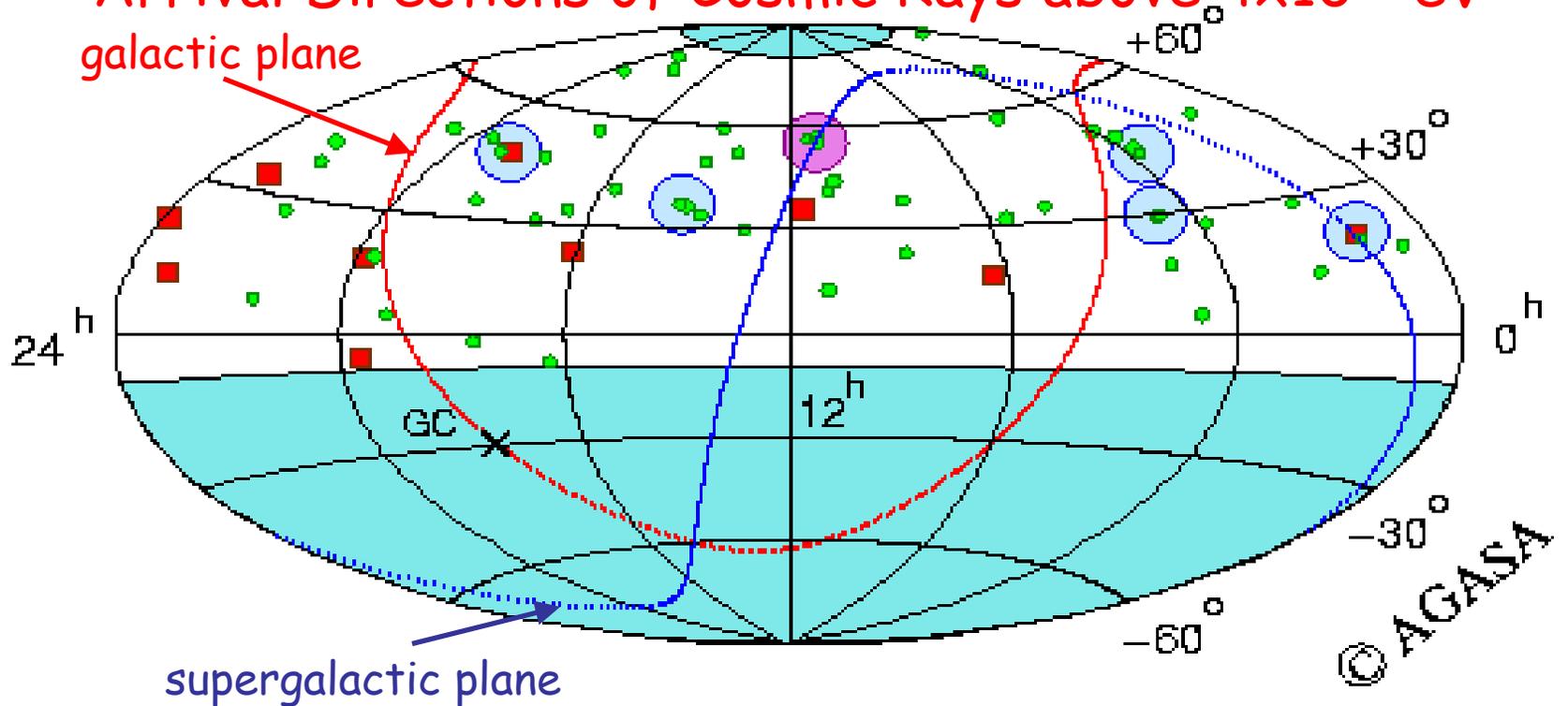


Fig. 9.20. Arrival directions of a sample of 114 cosmic ray events of energy above 4×10^{19} eV. Events of energy above 10^{20} eV are plotted with bigger circles. The shaded area shows the supergalactic plane. The plot is centered on the Galactic anticenter - the Galactic center is split on the two sides at $b=0^\circ, l=0, 360^\circ$.

Arrival Directions of Cosmic Rays above 4×10^{19} eV



Akeno 20 km^2 , 17/02/1990 - 31/07/2001, zenith angle $< 45^\circ$

Red squares : events above 10^{20} eV, **green circles** : events of $(4 - 10) \times 10^{19}$ eV

Shaded circles = clustering within 2.5° .

Chance probability of clustering from isotropic distribution is $< 1\%$.

Anisotropia [Agasa]

Correlazioni angolari tra sorgenti diverse

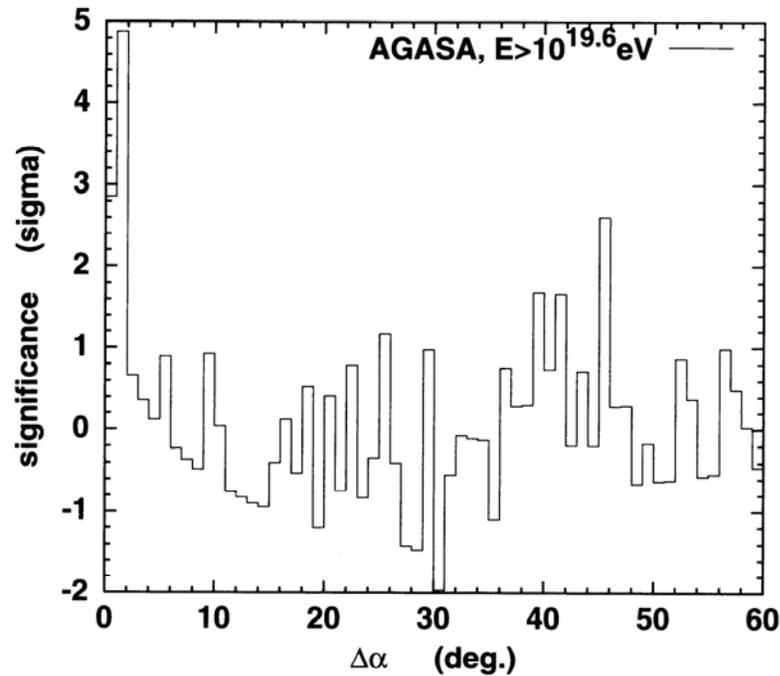


Fig. 9.21. Significance of the self-correlation in the AGASA data above 4×10^{19} eV in standard deviations σ .

Small-scale clustering

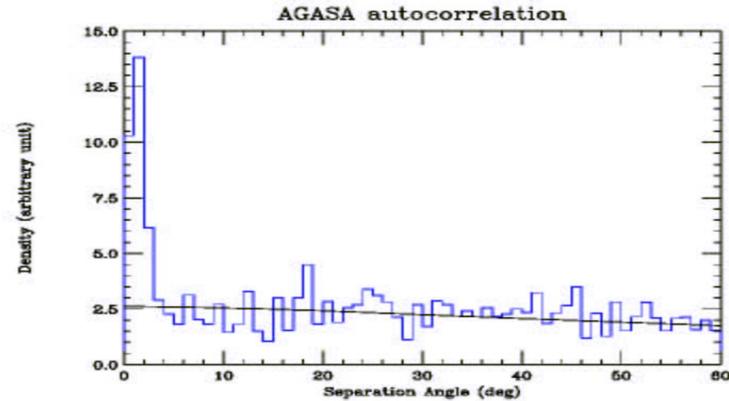


Figure 34: Distribution of angular distances between pairs of 59 AGASA events with energy $\geq 4 \times 10^{19}$ eV weighted by the inverse of the solid angle of the angular bin. The solid line is the distribution expected for random arrival directions.

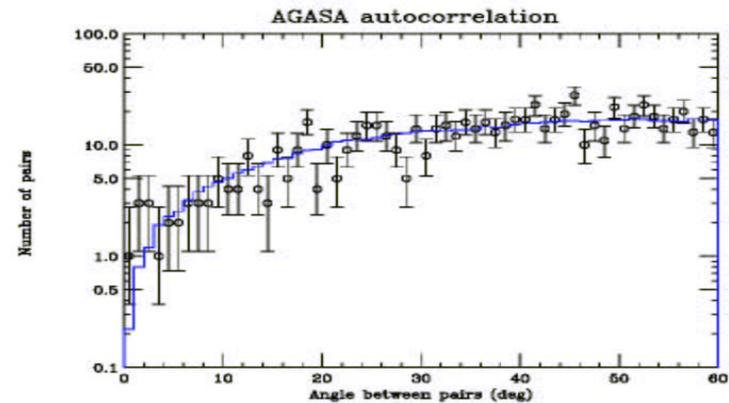


Figure 35: Distribution of angular distances between pairs of 57 AGASA events with energy $\geq 4 \times 10^{19}$ eV. The histogram is the distribution expected for random arrival directions. The errors represent 68% confidence limits.

Radio-Loud Galaxies

Angular correlation of ultra-high energy cosmic rays with compact radio-loud quasars

Amitabh Virmani,
Astropart. Phys.17,
489, 2002

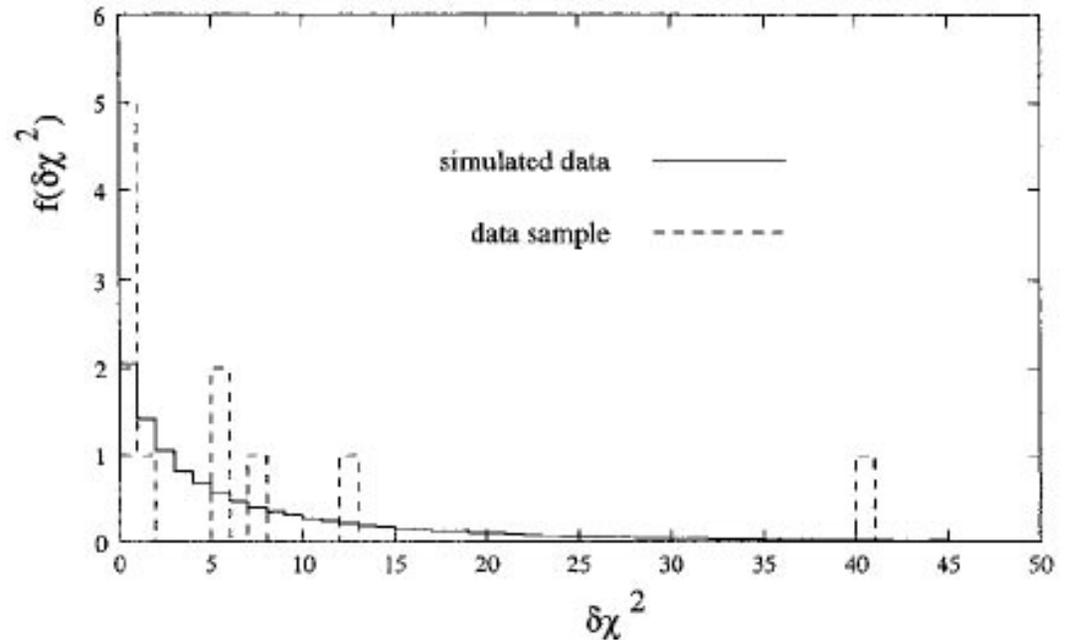


Fig. 1. The distribution of residual $\delta\chi^2$ for individual events for the data set (dashed line) and the simulated data (solid line). Both distributions are normalized to the total number of 11 events cited in the text.

Composizione e tempo di "residenza" dei RC nella Galassia

Nuclei primari carbone ossigeno ferro (prodotti dalla nucleosintesi stellare).

Nella radiazione cosmica si trovano Litio, Berillio e Boro facilmente prodotti da reazioni di spallazione.

Il rapporto primari a secondari porta alle seguenti conclusioni:

- I raggi cosmici nella loro vita attraversano circa $5-10 \text{ g/cm}^2$
- Lo spessore attraversato diminuisce al crescere dell'energia
Lo spessore trasversale della galassia è circa 10^{-3} g/cm^2
- RC. attraversano migliaia di volte la galassia
- RC alta energia passano minor tempo nella galassia

Tempo di residenza dei RC

La misura del rapporto degli isotopi instabili con quelli stabili di nuclei “secondari” permette di valutare il *tempo di residenza* τ_{conf} dei R.C: *nella galassia*.
In particolare l’isotopo più usato come orologio cosmico è il ^{10}Be che ha una vita media di 3.9×10^6 anni

Calcolo della densità d'energia

Spettro dei protoni, corretto per il taglio magnetico

$$\frac{dF_p}{dE} = 1.8 \times \left(\frac{E}{\text{GeV}} \right)^{-2.7 \pm 0.05} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1} \text{ GeV}^{-1}$$

$$\begin{aligned} \text{Densità d'energia: } \rho_{CR} &= \frac{4\pi}{c} \int_1^{\infty} E \frac{dF_p}{dE} dE = \frac{4\pi}{c} \int_1^{\infty} E \times 1.8 \times E^{-2.7} dE = 8 \times 10^{-10} \text{ GeV/cm}^3 = \\ &= 1.28 \times 10^{-12} \text{ erg/cm}^3 \end{aligned}$$

Energetica dei Raggi Cosmici

Densità di energia locale dei raggi cosmici:

$$\rho_E = 0.8 \text{ eV/cm}^3$$

Densità di energia magnetica:

$$\rho_B = 0.2 \text{ eV/cm}^3$$

Densità di energia cinetica del gas interstellare:

$$\rho_{\text{gas}} = 1.0 \text{ eV/cm}^3$$

Densità d'energia luminosa:

$$\rho_L = 0.3 \text{ eV/cm}^3$$

Densità d'energia della radiazione cosmica di fondo:

$$\rho_{\text{CMB}} = 0.3 \text{ eV/cm}^3$$

Coincidenze casuali ?

Parametrizzazione dello spettro energetico

Spettro dei protoni, corretto per il taglio magnetico

$$\frac{dF_p}{dE} = 1.8 \times \left(\frac{E}{\text{GeV}} \right)^{-2.7 \pm 0.05} \quad \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{GeV}^{-1}$$

da cui si ottiene una luminosita':

$$L_{cr} \cong 1.5 \times 10^{41} \quad \text{erg} \times \text{s}^{-1}$$

Compatibile con l'energia liberata nelle esplosioni di SN nella Galassia:

1 SN ogni 50 anni (1.58×10^9 s)

Energia/SN = 10^{51} erg \rightarrow

Energia media liberata/s = $10^{51} / 1.58 \times 10^9 = 6 \times 10^{41}$ erg/s

Ammettendo un'efficienza media di conversione del 25%

$\rightarrow L_{SN} = 1.5 \times 10^{41}$ erg s⁻¹

(Ginzburg e Syrovatskii -1964)

Calcolo della Luminosità

Spettro dei protoni, corretto per il taglio magnetico

$$\frac{dF_p}{dE} = 1.8 \times \left(\frac{E}{\text{GeV}} \right)^{-2.7 \pm 0.05} \quad \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{GeV}^{-1}$$

$$\text{Luminosità: } L_{CR} = \frac{1}{\tau_{conf.}} \int \rho_{RC} dV = \frac{4\pi}{c} \int \frac{1}{\tau_{conf.}} E \frac{dF_p}{dE} dE dV$$

Densità colonnare vista da raggi cosmici di energia E: $X(E) = 6.9 \times E^{-0.5} \text{ g cm}^{-2}$

dove: $X(E) = \int \rho dx \cong \bar{\rho} c \tau_{conf.} \Rightarrow \tau_{conf.} = \frac{X(E)}{\rho}$; ne segue:

$$L_{CR} = 4\pi \int \bar{\rho} dV \int \frac{1}{X(E)} E \frac{dF_p}{dE} dE$$

$\int \bar{\rho} dV = \text{massa totale del gas nella Galassia: } M_{gas} = 4.8 \times 10^9 M_S$

$$\Rightarrow L_{CR} \cong 1.5 \times 10^{41} \text{ erg s}^{-1}$$

Accelerazione dei Raggi Cosmici

Accelerazione negli shock di SN ?

Possibile solo fino a circa 10^{15} eV

Energie piu' elevate ?

Interazione con piu' SNR' \rightarrow fino a 10^{18} eV

Alle energie piu' elevate: prevalentemente nuclei

Vincoli sulle possibili sorgenti:

Campo magnetico B nella zona dello shock; dimensione R della zona di accelerazione \rightarrow

$$E = 0.9 Z B R \beta c$$

(E in EeV, B in μG ed R in kpc. β = velocita' dello shock) . Per β fissato \rightarrow

$$\log B \sim \log E - \log R \text{ (Hillas plot)}$$

In un grafico di $\log B$ vs $\log R \rightarrow$ rette parallele, aventi intercetta data da $\log E$.

Hillas plot

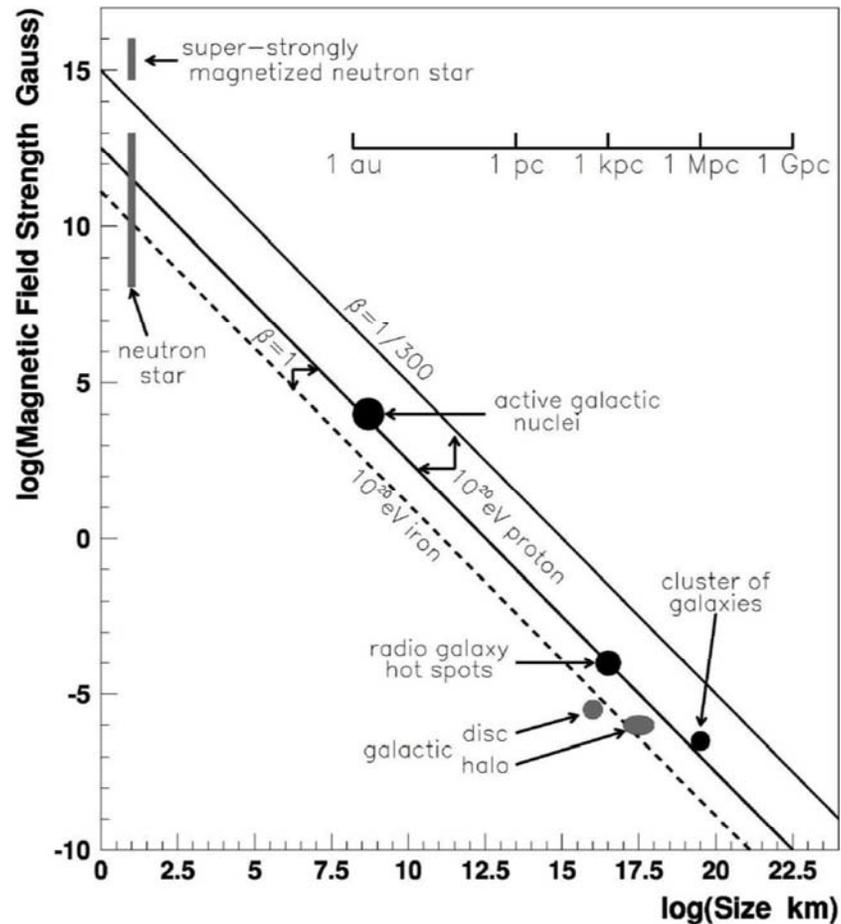


FIG. 2. The size and magnetic-field strength of possible astronomical objects that are particle source and acceleration candidates. β is a characteristic velocity of scattering centers. Objects below the diagonal line cannot accelerate protons to 10^{20} eV. Modified from Hillas, 1984.