## Sistemi di coordinate[1]



B Coordinate equatoriali: ascensione

Coordinate equatoriali: ascensione retta e declinazione Ascensione retta R.A. ( $\alpha$ ); declinazione  $\delta$   $\delta$  = distanza angolare di un astro dall'equatore celeste (positiva a nord)  $\alpha$  = angolo dal primo punto d'ariete al cerchio orario passante per l'astro

Punto d'ariete = punto in cui l'eclittica taglia l'equatore celeste (il 21 Marzo)

Tempo siderale  $\rightarrow$  diverso dal tempo solare



## Sistemi di coordinate[2]



**FIGURE 8.1** Astronomical coordinate system showing definitions of right ascension (R.A.) and declination  $(\delta)$ 

and  $\delta$  is given by

$$S_D = \sin \delta_L \cos \theta + \cos \delta_L \sin \theta \sin \phi$$
  

$$C_D = (1 - S_D^2)^{1/2}$$
  

$$\delta = \tan(S_D/C_D)$$

and

$$S_H = -\cos \phi$$
  

$$C_H = -\sin \phi \sin \delta_L + \tan \theta \cos \delta_L$$
  

$$R.A. = t_S - \tan(S_H/C_H)$$

Coordinate equatoriali: ascensione retta e declinazione Ascensione retta R.A. ( $\alpha$ ) declinazione  $\delta$ 

Relazione tra [ascensione retta – declinazione] e [zenith ( $\theta$ ) – azimuth( $\phi$ )]

 $\delta L$  e' la latitudine locale  $t_s$  e' il tempo <u>siderale</u> locale

## Sistemi di coordinate[3]



FIGURE 8.3 Definition of galactic coordinate system.

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

## 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  $\delta$  coordinates to galactic latitude  $(b^{II})$  and longitude  $(l^{II})$  coordinates is accomplished using the following transformations

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

and

$$S_B = 0.460200 \sin \delta + 0.887815 \cos \delta \cos \zeta$$
  

$$C_B = (1 - S^2_B)^{1/2}$$
  

$$b^{II} = 180 \tan(S_B/C_B)/\pi$$

## Definizioni dell'anisotropia

Per energie inferiori a 1 EeV → diffusione nei campi magnetici Galattici → isotropia Definizione dell'anisotropia:

 $\delta = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad dove \ I_{\max} \ ed \ I_{\min} \quad sono \ le \ int \ ensita' \ massima \ e \ min \ ima \\ dei \ raggi \ cos \ mici, \ in \ funzione \ delle \ coordinate \ (e.g. \ coordinate \ galattiche)$ 

Se i raggi cosmici originassero tutti da una qualche regione (e.g. il piano galattico)

$$\Rightarrow I(\theta) = \overline{I} + \delta \cdot \overline{I} \cos \theta \quad dove \, \overline{I} \, e' \, l' \text{ int } ensita' \, media.$$
  

$$Per \, \theta = 0 \Rightarrow I = \overline{I}(1 + \delta)$$

Se i RC diffondono dalla sorgente con un coefficiente di diffusione  $D \Rightarrow \delta = \frac{3D}{c} \cdot \frac{1}{n(r)} \left| \frac{dn(r)}{dr} \right|$ Misure della formazio

n(r) e' la densita' di particelle e  $\frac{dn(r)}{dr}$  il suo gradiente

Misure dell'anisotropia → Informazioni su D

### Possibile cause di anisotropia

Per energie superiori a 1 EeV → protoni dovrebbero esibire una qualche anisotropia, se originati nel piano galattico

Nuclei pesanti → minore raggio di Larmor → ridotta anisotropia

Anisotropia dovrebbe diminuire al diminuire dell'energia ed al variare della composizione verso nuclei piu' pesanti

Problemi sperimentali ← accettanza del rivelatore dipendente dalle coordinate galattiche

Pierre Sokolsky: Introduction to Ultrahigh Energy Cosmic Ray Physics Cap. 8

#### Analisi armonica (coordinate astronomiche)

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

Selezione di eventi entro una data banda di declinazione. Ampiezza della prima armonica :

$$\mathbf{r} = (\mathbf{a}^2 + b^2)^{1/2}; \text{ dove:}$$
  
$$\mathbf{a} = 2/N \sum_{i=1}^N \cos \theta_i; \quad b = 2/N \sum_{i=1}^N \sin \theta_i$$

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 :

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

 $B, \phi_1 =$ ampiezza e fase della prima armonica

 $C, \phi_2 = ampiezza e fase della seconda armonica$ 

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

#### Anisotropia dei raggi cosmici (coordinate astronomiche)

B/A aumenta da circa il 0.1% a 10 TeV a circa 10% a 10 EeV

Nessuna conclusione invece per le fasi



**FIGURE 8.2** Dependence of amplitude of first harmonic on energy. Amplitude is corrected for latitude of observation. See Ref.[12] for key to experiments.

# Anisotropie (coordinate galattiche)

Se le sorgenti sono galattiche e seguono la ditribuzione di materia nella galassia, si dovrebbe vedere una anisotropia verso il piano galattico (cioe' in funzione della latitudine galattica b).

Spessore apparente del disco galattico misurato dall'anisotropia, dipendente dall'energia (effetto dei campi magnetici) Parametrizzazione di Wdowczyk e Wolfandale:

 $I(b)=I_0[(1-f_E) + f_E e^{-b^2}]$ 

b= latitudine galattica (radianti) f<sub>E</sub> = fattore di arricchimento galattico (dipendente dall'energia)

Dall'analisi di W&W sembra che vi sia un aumento di  $f_E$  all'aumentare dell'energia fino a circa 10<sup>19</sup> eV  $\rightarrow$  origine galattica Ma, ad energie superiori, la tendenza si inverte !!

Vedasi M.S Longair, vol. II cap. 20

# Anisotropia (coordinate galattiche)

Parametrizzazione usata da Haverah – Park, Yakutsk e Sidney:

 $I(b) = I_0(1+s b)$ 

s e' l'asimmetria Rapporto tra i valori misurati di se quelli attesi per una distribuzione isotropa

Debole anisotropia osservata Non significativa



**FIGURE 8.4** Anisotropy as a function of energy in galactic coordinates. R is the ratio of data to what is expected for an isotropic distribution. Positive values of R indicate an excess from north galactic latitudes; while negative values represent a southern latitude excess.  $\Delta$ =Haverah Park data; o=Yakutsk data.

# Anisotropia (coordinate galattiche) Fly's Eye

#### Rapporto tra anisotropia osservata e predetta – a varie energie

→ Nessun effetto





FIGURE 8.5 Anisotropy in galactic latitude coordinate as a function of energy from "Fly's Eye" measurements.

# Anisotropia (coordinate galattiche)

Parametro f<sub>E</sub>

f<sub>E</sub>tende a decrescere con l'energia → Contributo dal piano galattico decrescente



FIG. 26. Energy dependence of the galactic plane enhancement parameter  $f_E$  from Haverah Park, Fly's Eye, and AGASA.

Haverah Park +Fly's Eye+AGASA

### Anisotropia ad alte energie [Agasa+..]

Asimmetria ad alte energie (E>4x10<sup>19</sup> eV)

Dati di AGASA (47) + Haverah Park (27)+ Yakutsk (12)+ Volcano Ranch (6)+ Fly's Eye(24)



FIG. 27. Galactic (left) and supergalactic latitude (right) distribution of arrival directions of 114 cosmic rays from five experiments (Volcano Ranch, Haverah Park, Yakutsk, Fly's Eye, and AGASA). Energy thresholds are  $4 \times 10^{19}$  eV. Solid lines are the sum of expected distributions of each experiment from uniform distribution. From Uchihori, 1999. A sinistra: curva continua →distribuzione in latitudine galattica degli eventi attesi dai vari esperimenti in assenza di anisotropie. A destra: distribuzione in latitudine supergalattica

### Anisotropia ad alte energie [Agasa+..]

Asimmetria ad alte energie (E>4x10<sup>19</sup> 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

## Anisotropia ad alte energie [Agasa+..]

#### Distribuzione in bins angolari di 1º



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 1º dal piano supergalattico

### Anisotropia ad alte energie{Agasa+...]

Direzioni d'arrivo di 114 eventi con E>4x10<sup>19</sup> eV

Eventi indicati con cerchietti grandi → E>10<sup>20</sup> eV



**Fig. 9.20.** Arrival directions of a sample of 114 cosmic ray events of energy above  $4 \times 10^{19}$  eV. Events of energy above  $10^{20}$  eV are plotted with bigger circles. The shaded are 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 $4 \times 10^{19}$ eV



Akeno 20 km<sup>2</sup>, 17/02/1990 - 31/07/2001, zenith angle < 45°

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  $4 \times 10^{19}$  eV in standard deviations  $\sigma$ .

## Anisotropie in Auger [1]

#### "Clusters" of Cosmic Rays ?

- AGASA claims significant small-scale clustering above 4.0×10<sup>19</sup> eV
- 5 doublets +1 triplet in 57 events
- Analysis criticized on statistical grounds C.B. Finley, SW, Astroparticle Physics 21(2004)359
- Lack of a well-defined a priori hypothesis

   (angular scale, energy cut), chance probability
   8%



#### Anisotropie in Auger [2]

#### **HiRes Stereo Data Set**

 HiRes stereo events currently provide the sharpest image of the northern sky, with 0.6° angular resolution and a systematic error not larger than 0.2° (from star surveys and lasers)



Equatorial Coordinates

HiRes stereo data 1999 December to 2004 January

## Anisotropie in Auger [3]

#### **HiRes Anisotropy Studies**

- HiRes has performed extensive searches for deviations from isotropy
  - Astrophys. J. 623 (2005) 164: Search for pointlike sources of UHECRs above 4.0×10<sup>19</sup> eV Using a Maximum Likelihood Ratio Test (AGASA+HiRes Data)
  - Astrophys. J. 610 (2004) L73: Search for small-scale anisotropy (clustering)
  - Astrophys. J. (subm.): Search for correlations of cosmic ray arrival directions with BL Lac objects
- No point sources and no deviation from anisotropy found
- No confirmation of any prior claims of anisotropy with statistically independent HiRes stereo data set

### Anisotropie in Auger [4]

#### **Source at the Galactic Center ?**

- AGASA: 4 σ excess near the Galactic center
- Criticism: cuts are a posteriori and chance probability is meaningless
  - Integrated event density over 20° radius
  - Excess is observed in narrow energy band from 0.8 to 3.2 EeV
- However: also excess in archival SUGAR data (1968-1979)

Significance [σ]



N. Hayashida et al., Astroparticle Phys. 10 (1999) 303 J.A. Bellido et al., Astroparticle Phys. 15 (2001) 167

### Anisotropie in Auger [5]

#### **Galactic Center ?**

- Galactic Center is a "natural" site for cosmic ray acceleration
  - Supermassive black hole
  - Dense clusters of stars
  - Stellar remnants
  - SNR (?) Sgr A East
- SUGAR excess is consistent with a point source, indicating neutral primaries
- Neutrons would go undeflected, and neutron decay length at 10<sup>18</sup> eV is comparable to the distance to the Galactic center (~8.5 kpc)



Chandra

## Anisotropie in Auger [6]

#### **Auger Galactic Center**

- Good visibility of Galactic center (right ascension 266.4°, declination -28.9°) from southern site
- Event statistics already larger than previous experiments (3 times AGASA, 10 times SUGAR)
- Data from 1 January 2004 through 5 June 2005 from surface detector array (1.5° resolution) and hybrid data (0.6° resolution)
- AGASA excess is in energy range where Auger is not fully efficient (> 30% p, > 50% iron): but even in the worst case (proton signal on iron-dominated background), a 5.2 σ excess is expected if AGASA source is real



#### Anisotropie in Auger [8]

#### **Galactic Center**

- AGASA excess is not confirmed
- Searches considering a systematic energy shift between AGASA and Auger show no excess
- Upper limit for flux from the Galactic center (95% CL)

 $\Phi_{\rm s} < 3.1 \ \xi \ \varepsilon \times 10^{-15} \ {\rm m}^{-2} \ {\rm s}^{-1}$ 

ξ flux uncertainty (1 for Auger, 2.5 AGASA)

ε iron/proton detection efficiency ratio (1...1.6)

• SUGAR flux (J.A. Bellido et al.)  $\Phi_{\rm s} < ~(9\pm3)~\times 10^{-14}~m^{-2}~s^{-1}$ 

# Raggi cosmici

# Considerazioni energetiche



## Parametrizzazione dello spettro energetico

Spettro dei protoni, corretto per il taglio magnetico

$$\frac{dF_p}{dE} = 1.8 \times \left(\frac{E}{GeV}\right)^{-2.7 \pm 0.05}$$

$$cm^{-2}s^{-1}sr^{-1}GeV^{-1}$$

da cui si ottiene una luminosita':

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

Compatíbile con l'energía líberata nelle esplosíoní dí SN nella Galassía:

1 SN ogní 50 anní (1.58x10<sup>9</sup> s)  
Energía/SN=10<sup>51</sup> erg →  
Energía medía líberata/s=10<sup>51</sup>/1.58x10<sup>9</sup>=6x10<sup>41</sup> erg/s  
Ammettendo un'efficienza medía dí conversione del 25°
$$JL_{SN}$$
=1.5x10<sup>41</sup> erg s<sup>-1</sup>  
(Ginzburg e Syrovatskii -1964)

# Calcolo della lumínosíta'

Spettro dei protoni, corretto per il taglio magnetico

$$\frac{dF_p}{dE} = 1.8 \times \left(\frac{E}{GeV}\right)^{-2.7\pm0.05} cm^{-2}s^{-1}sr^{-1}GeV^{-1}$$
Luminosita':  $L_{CR} = \frac{1}{\tau_{conf.}} \int \rho_{RC} dV = \frac{4\pi}{c} \int \frac{1}{\tau_{conf.}} E \frac{dF_p}{dE} dE dV$ 
Densita' colonnare vista da raggi cosmici di energia  $E: X(E) = 6.9 \times E^{-0.5} g cm^{-2}$ 
dove :  $X(E) = \int \rho dx \cong \overline{\rho} c \tau_{conf.} \Rightarrow \tau_{conf.} = \frac{X(E)}{\overline{\rho}}$ ; ne segue :
 $L_{CR} = 4\pi \int \overline{\rho} dV \int \frac{1}{X(E)} E \frac{dF_p}{dE} dE$ 
 $\int \overline{\rho} dV = \text{massa totale del gas nella Galassia}: M_{gas} = 4.8 \times 10^9 M_S$ 
 $\Rightarrow L_{CR} \cong 1.5 \times 10^{41} \ erg \ s^{-1}$ 



# Energetica dei Raggi Cosmici

```
Densità di energia locale dei raggi cosmici:
                          \rho_{\rm F}=0.8~{\rm eV/cm^{3}}
Densita' di energia magnetica:
                          \rho_{\rm B}=0.2 \, {\rm eV/cm^3}
Densita' di energia cinetica del gas interstellare:
                         \rho_{das}=1.0 eV/cm<sup>3</sup>
Densita' d'energia luminosa:
                          \rho_1 = 0.3 \text{ eV/cm}^3
Densita' d'energia della radiazione cosmica di fondo:
                        \rho_{CMB}=0.3 eV/cm<sup>3</sup>
Coincidenze casuali?
```

# Accelerazione dei Raggi Cosmici

```
Accelerazione negli shock di SN ?
Possibile solo fino a circa 10^{15} \text{ eV}
Energie piu' elevate ?
Interazione con piu' SNR' \rightarrow fino a 10<sup>18</sup> 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 ZBR \beta c
(E in EeV, B in \muG ed R in kpc. \beta = velocita' dello
shock). Per \beta fissato \rightarrow
                     logB~logE-logR (Hillas plot)
In un grafico di logB vs logR\rightarrow rette parallele, aventi intercetta
data da logE.
```





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

## Problemí apertí

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

# Problemí apertí (Millikan)

