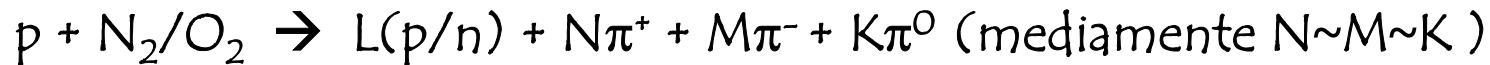


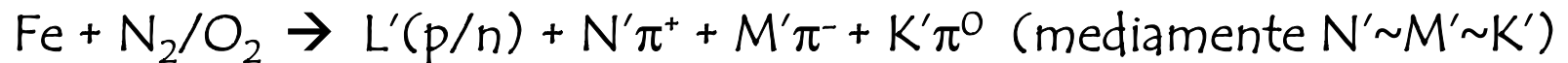
Interazioni adroniche di protoni e nuclei nell'atmosfera

Flusso dei mesoni μ

Reazioni primarie in alta atmosfera:

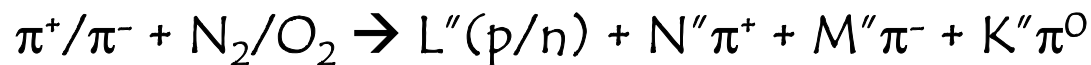


.....

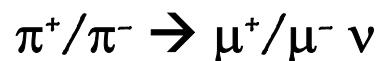


I mesoni prodotti possono anche essere $K(+,-,0)$ anziché π

Seguite da interazioni dei mesoni carichi:



o decadimenti dei mesoni carichi:



o decadimenti dei mesoni neutri:



Interazioni adroniche di protoni e nuclei nell'atmosfera

Flusso dei mesoni μ

Flusso dei mesoni μ che arrivano al suolo (o in esperimenti sotterranei) $\rightarrow$ informazioni su composizione dei primari (p/Fe....).

Calcolo dei flussi attesi per i mesoni μ

Occorre:

- 1) calcolare preliminarmente il flusso dei mesoni π^+/π^- prodotti
- 2) seguire i mesoni μ prodotti nei decadimenti, tenendo conto della perdita d'energia e probabilit  di decadimento ($\tau \sim \mu\text{s}$ nel sistema di quiete del μ)

Calcolo di 1) effettuato con metodi montecarlo, tenendo conto di quel che si   appreso da misure fatte ad acceleratori sulle sezioni d'urto d'interazione dei protoni e nuclei

Interazioni adroniche di protoni e nuclei nell'atmosfera
Flusso dei mesoni μ

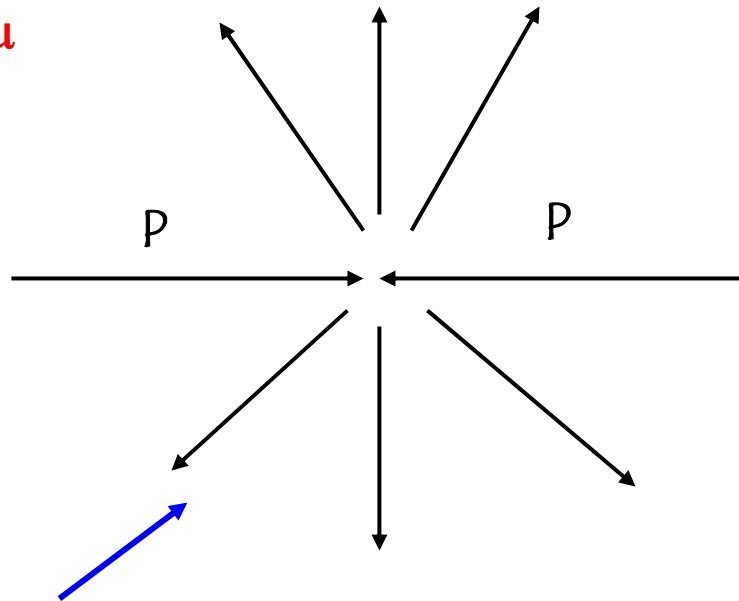
Misure fatte/future ad acceleratori sulle sezioni d'urto d'interazione dei protoni e nuclei:

E_p (TeV)	Energia nel cms (TeV)	Misure delle σ
1	0.043	Cern SpS Collider
10^1	0.137	Cern SpS Collider
10^2	0.433	FNAL
10^3	1.37	→ LHC
10^4	~4	→ LHC
10^5	~10	→ LHC

Interazioni adroniche di protoni e nuclei nell'atmosfera

Flusso dei mesoni μ

Inoltre le misure fatte agli acceleratori sono prevalentemente nella zona centrale della collisione; i dati rilevanti per la fisica dei raggi cosmici sono quelli nella zona di frammentazione in avanti, cioè a grandi valori della rapidità'. Ciò è particolarmente vero per il calcolo dei flussi dei mesoni μ



Misure a colliders adronici
(zona centrale)

Flusso di π nell'atmosfera

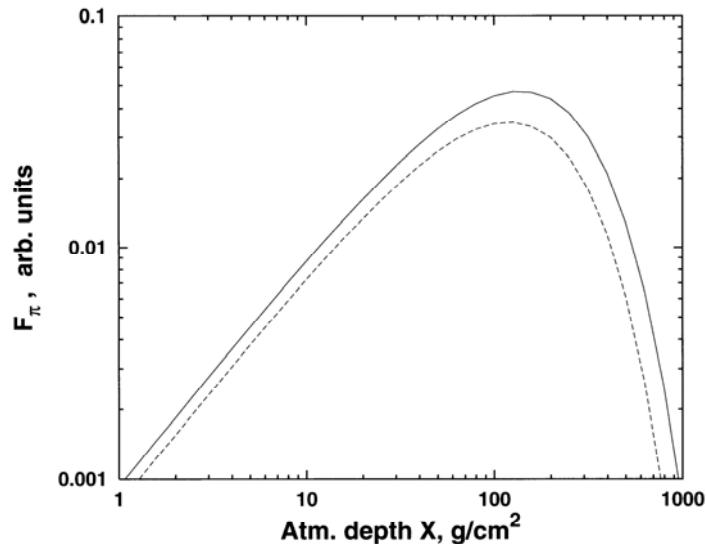


Fig. 6.3. Pion flux in the atmosphere calculated with (6.8) and (6.9) neglecting decay, solid line, and with decay, dashes. The normalization of the two curves is arbitrary, only the shape is correct.

Curva continua: calcolo effettuato ignorando i decadimenti dei mesoni π ; curva tratteggiata tiene conto dei decadimenti.

Aumento iniziale dovuto alla produzione a cascata di mesoni π da parte di quelli prodotti nelle prime interazioni

Diminuzione dopo $\sim 100 \text{ g/cm}^2$, dovuta al fatto che i mesoni prodotti hanno ormai energie troppo basse per dar luogo ad altre reazioni di produzione

La decrescita $\sim \exp(-X/\Lambda_\pi)$, dove Λ_π e' la lunghezza media d'assorbimento dei mesoni π nell'atmosfera

Produzione di mesoni μ da parte di mesoni π nell'atmosfera

ε = energia critica $\rightarrow$ energia a cui la probabilit  d'interazione dei mesoni π/K in aria uguaglia quella di decadimento

Particelle di energia $E \ll \varepsilon$ decadono sempre

Particelle di energia $E \gg \varepsilon$ interagiscono sempre

Lunghezza di decadimento d_j [g cm^{-2}]:

$$1/d_j = \varepsilon_j / (E X \cos \theta)$$

Calcolo dello spettro dei μ :

$$P_\mu(E, X) = \sum_i \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \frac{dg_{i\mu}(E, E')}{dE} D_i(E', X) dE'; \text{ dove:}$$

$i = 1 \rightarrow$ mesoni π ; $i = 2 \rightarrow$ mesoni K

$\frac{dg_{i\mu}(E, E')}{dE}$ = spettro dei μ prodotti dal decadimento dei π ($i = 1$) o K ($i = 2$) di energia E'

$D_i(E', X)$ = spettro dei π o K alla profondit  X [g cm^{-2}] pesato con la probabilit  di decadimento

$E_{\min}$ = minima energia che un π/K deve avere per dar luogo ad un μ di energia E

$E_{\max}$ = massima energia che un π/K deve avere per dar luogo ad un μ di energia E

Flusso di μ nell'atmosfera

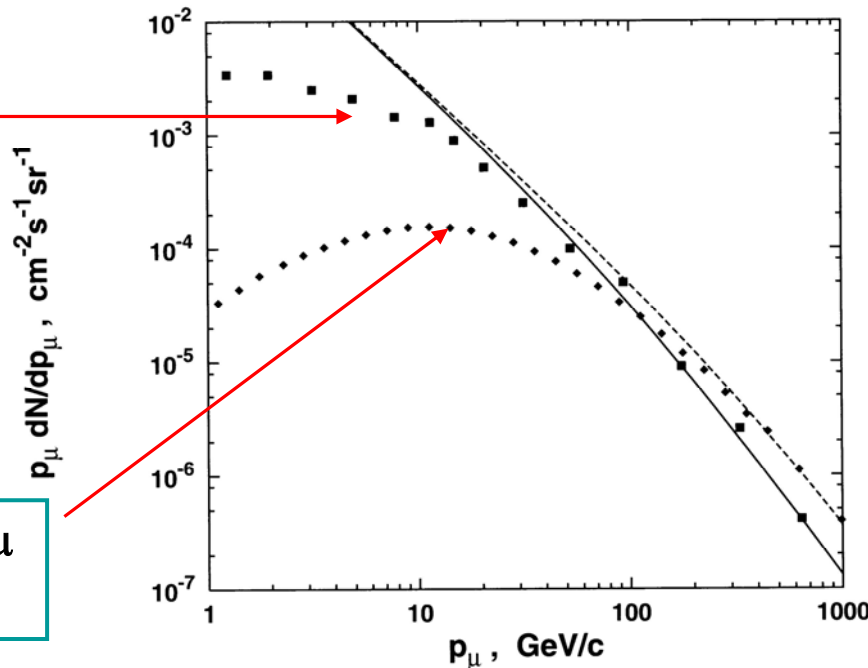
Calcolo di Gaisser, assumendo uno spettro di protoni : $1.8 E^{-2.7} [cm^{-2} s^{-1} sr^{-1} GeV^{-1}]$

$$\frac{dN_{\mu}}{dE_{\mu}} \cong 0.14 E_{\mu}^{-2.7} \left[\frac{1}{1 + \frac{1.1 E_{\mu} \cos \theta}{115 GeV}} + \frac{0.054}{1 + \frac{1.1 E_{\mu} \cos \theta}{850 GeV}} \right]$$

$\uparrow\uparrow$
 π

$\uparrow\uparrow$
 K

Misura su μ verticali



Misura su μ a 75°

Non tiene conto della perdita d'energia dei μ nell'atmosfera
 $\rightarrow$ approx. corretta solo ad alte energie

Fig. 6.4. The muon flux of (6.11) (solid line for vertical and dashed line for 75°) is compared to the vertical muon flux of Ref. [152], squares. The diamonds show the muon flux at the angle of 75° presented in Ref. [153].

Flusso di μ nell'atmosfera

Calcolo di Gaisser, assumendo uno spettro di protoni : $1.8 E^{-2.7} [cm^{-2} s^{-1} sr^{-1} GeV^{-1}]$

$$\frac{dN_{\mu}}{dE_{\mu}} \cong 0.14 E_{\mu}^{-2.7} \left[\frac{1}{1 + \frac{1.1 E_{\mu} \cos \theta}{115 GeV}} + \frac{0.054}{1 + \frac{1.1 E_{\mu} \cos \theta}{850 GeV}} \right]$$

$\Uparrow$
 π

$\Uparrow$
 K

Per piccoli valori di E_{μ} lo spettro ha la medesima dipendenza dall'energia di quello dei primari

Per grandi valori di E_{μ} lo spettro diviene piu' ripido ($E^{-3.7}$), poiche' lo spessore dell'atmosfera non e' sufficiente da dar tempo ai mesoni π/K di decadere :

lunghezza di decadimento di un π a 1000 GeV $\Rightarrow$ 55.7 km

In sciami non verticali lo spessore di atmosfera puo' divenire sufficiente perche' i π decadano (fattore $\cos \theta$) $\Rightarrow$ spettro dei μ diviene meno ripido a grandi angoli.

Flusso di μ nell'atmosfera

L'effetto descritto diviene evidente nel plot del rapporto tra flusso ad angolo θ e flusso verticale

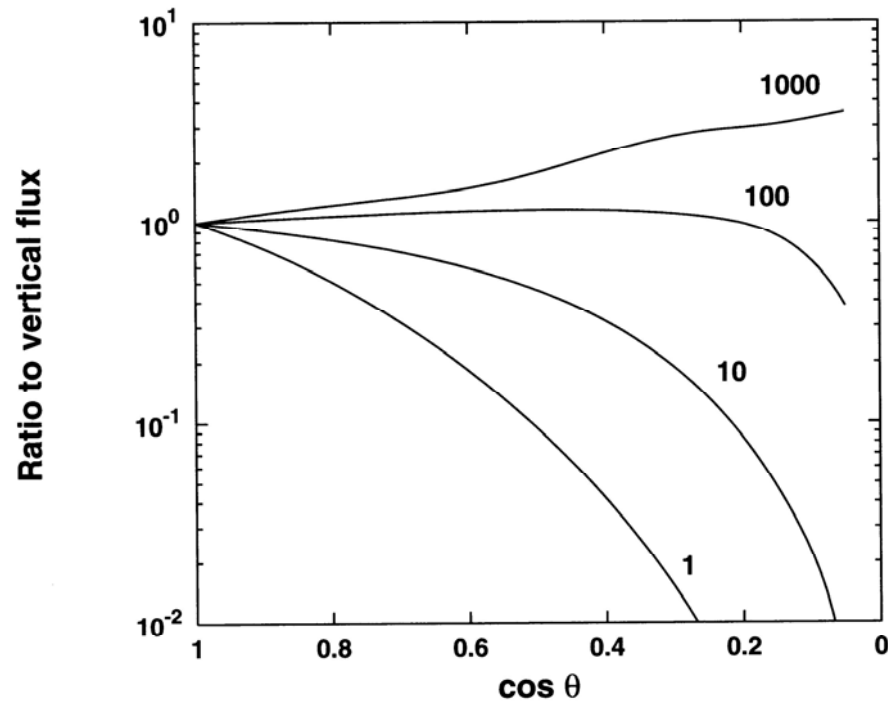
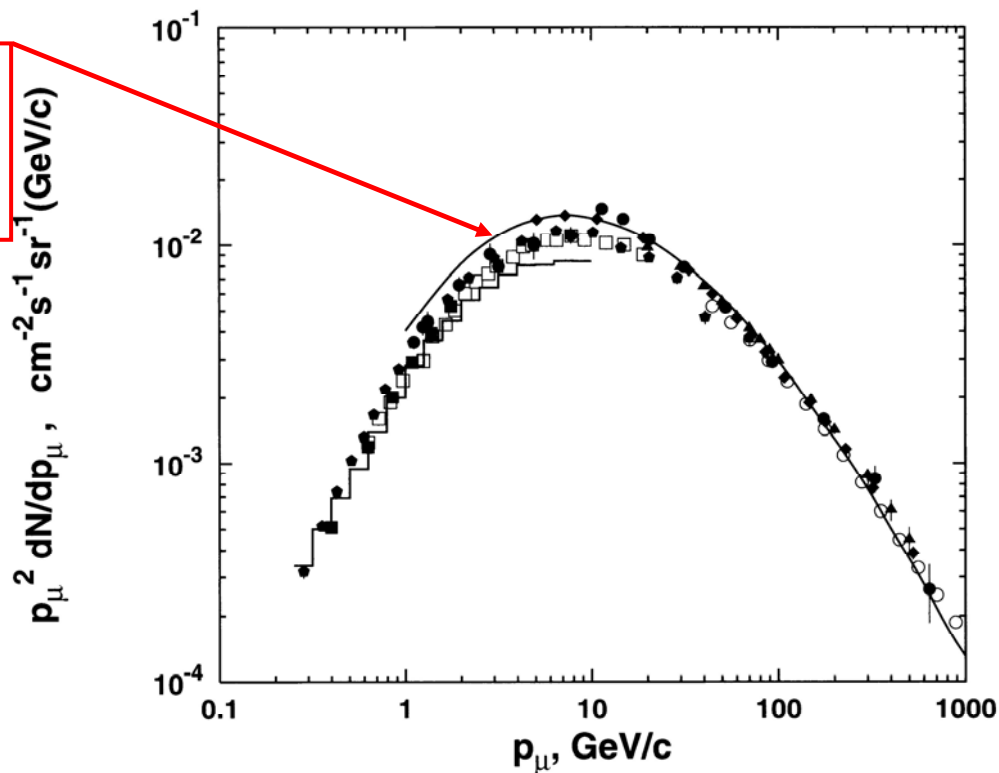


Fig. 6.5. The ratio of the inclined to the vertical muon flux as a function of the cosine of the zenith angle θ , from Ref. [154]. Muon momentum is given by each curve in GeV/c.

Misure sperimentali del flusso di μ nell'atmosfera

Flusso moltiplicato per
 p_μ^2

Disaccordo tra
dati e calcolo a
circa (1-20) GeV

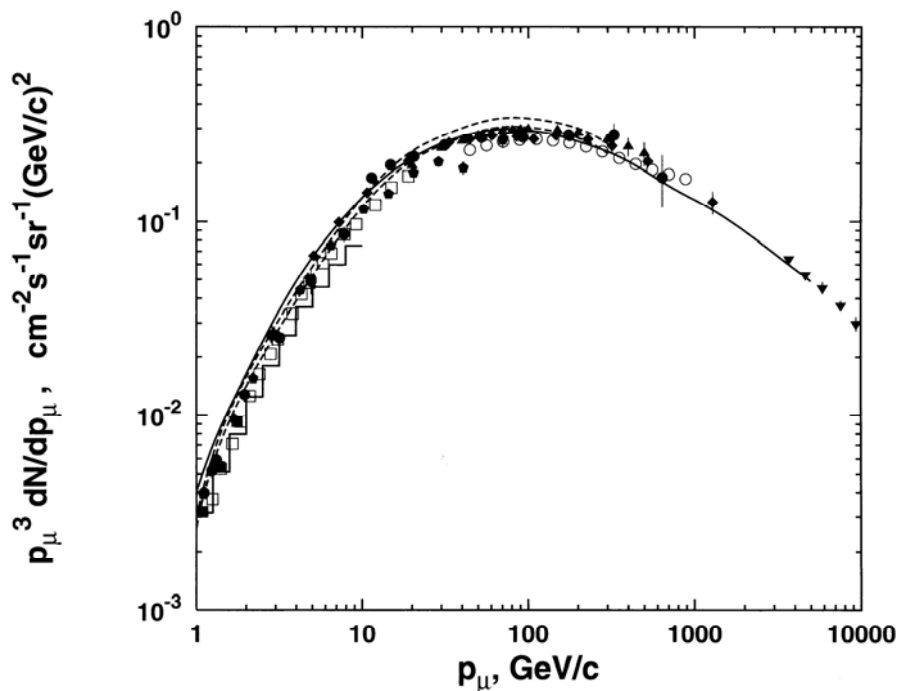


Linea continua:
flusso calcolato
(calcolo
unidimensionale)

Fig. 6.6. Muon ground differential energy spectra measured by different experiments weighted by p_μ^2 . See text for the references and symbols representing the data sets. The line is from Ref. [154] and the histogram, from Ref. [163].

Misure sperimentali del flusso di μ nell'atmosfera

Flusso moltiplicato per
 p_μ^3

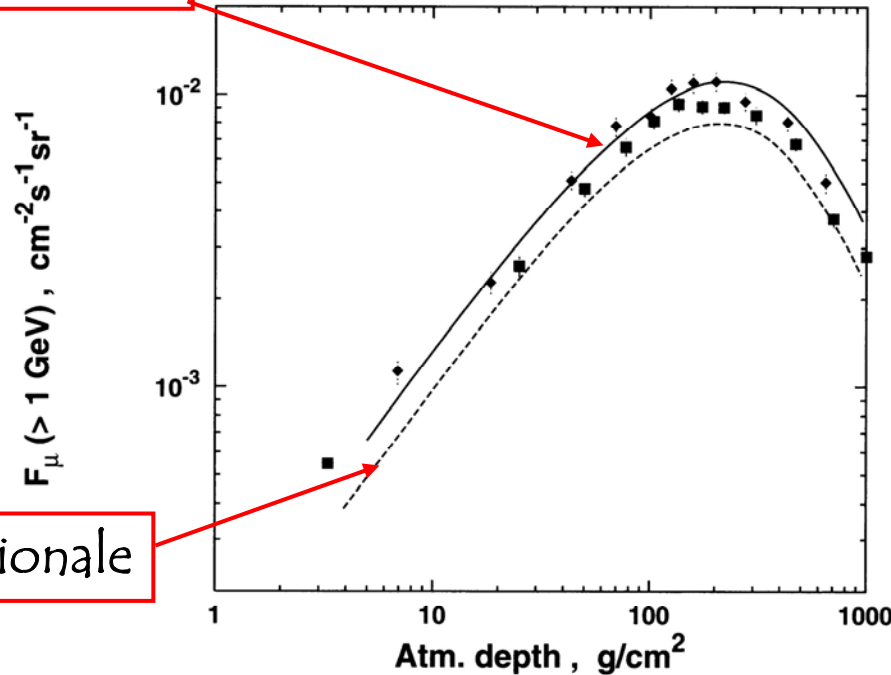


Linea continua:
flusso calcolato
(calcolo
unidimensionale)

Fig. 6.7. Ground muon differential energy spectra weighted by p_μ^3 . The symbols and the solid lines are the same as in Fig. 6.6. The dashed lines are the predictions of Ref. [164].

Flusso integrale ($E > 1$ GeV) dei μ nell'atmosfera in funzione della profondità

Calcolo unidimensionale



Calcolo tridimensionale

Fig. 6.8. Muon growth curve. The full squares are from Ref. [161] and the diamonds are from Ref. [165]. The predictions are from Refs. [154, 163], shown with a full and a dashed line respectively.

Flusso di μ nell'atmosfera: rapporto R positivi/negativi

R e' una misura indiretta del rapporto tra protoni e neutroni nella radiazione cosmica: se $R > 1 \rightarrow$ i protoni dominano

Misure effettuate
ad alta quota:
 3.9 g cm^{-2}
Risultati suggeriscono
 $\pi^+/\pi^- \sim 1.4$

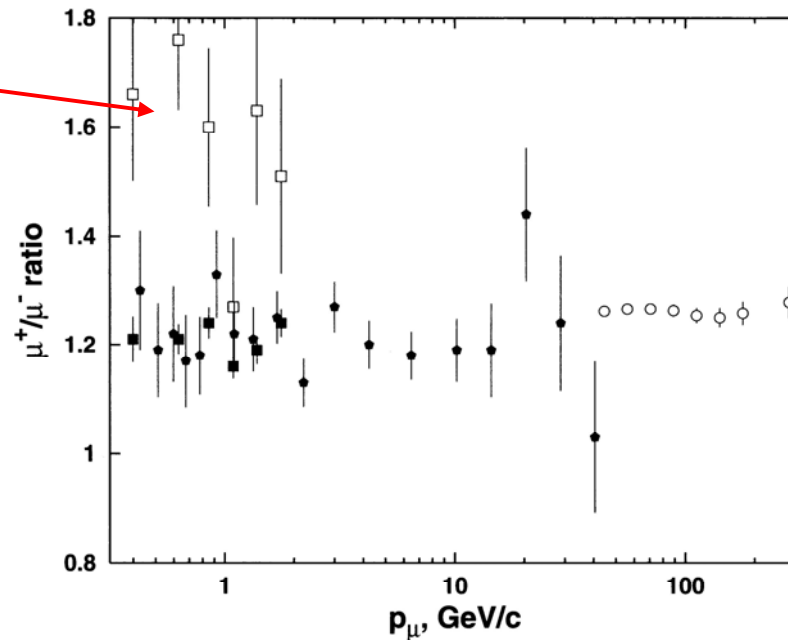


Fig. 6.9. Muon charge ratio. The full squares are from Ref. [161], the diamonds, from Ref. [165], and the circles from Ref. [156]. The open squares show the measurements of [161] at float level – average atmospheric depth of 3.9 g/cm^2 .

Flusso di μ nell'atmosfera: considerazioni riassuntive

Flusso e spettro in energia dei μ determinato dalla competizione tra interazioni secondarie dei π e K prodotti e decadimenti degli stessi.

Fattori che favoriscono le interazioni o i decadimenti:

- l'energia
- la distanza da terra del punto di produzione
- la densità dell'atmosfera

In particolare:

- All'aumentare dell'energia diminuisce il numero dei decadimenti.
- A basse energie (< 100 GeV) questi dominano e lo spettro in energia dei μ riproduce quello dei primari
- Ad alte energie, lo spettro dei μ diviene più ripido (una unità in meno nell'esponente)
- Il rapporto μ^+/μ^- vale circa 1.3, a tutte le energie a cui è stato misurato. Questo riflette l'eccesso di protoni rispetto ai neutroni nella composizione dei primari
- I μ della massima energia sono quelli prodotti nei primi stadi dello sviluppo dello sciame. Per questo motivo sono quelli che possono darci il massimo dell'informazione sulla composizione dei primari.

Flusso di μ nell'atmosfera: considerazioni riassuntive

-I μ della massima energia viaggiano vicinissimi all'asse dello sciame. Infatti l'impulso trasverso dei mesoni prodotti nelle interazioni adroniche dei primari e' inferiore a circa 800 MeV; se quindi il protone aveva un'energia di "appena" 1 TeV (10^6 MeV) l'angolo di emissione del mesone (all'incirca uguale a quello del μ), nella ipotesi che il mesone prenda solo meta' dell'energia del protone, e':
 $\theta = 0.8/5 \times 10^5 = 1.6 \times 10^{-6}$ rad.

Se il μ e' stato prodotto all'altezza di 20 km, a terra la sua distanza dal core dello sciame sara' di appena 3.2 cm

I μ piu' numerosi sono pero' ad energie piu' basse ed angoli maggiori

La molteplicita' dei μ dipende dall'energia, oltre che dalla composizione dei primari

Flusso di μ nell'atmosfera e composizione dei primari

Modello di "sovrapposizione" $\rightarrow$ uno sciame indotto da un nucleo di Fe equivale a 56 sciami indotti da protoni, aventi ciascuno $1/56$ dell'energia del nucleo.

I mesoni π prodotti saranno corrispondentemente piu' lenti e decadranno piu' probabilmente in μ .

Inoltre, gli stessi mesoni π saranno piu' numerosi $\rightarrow$ avremo un maggior numero di μ . Tuttavia, per produrre π e quindi μ della stessa energia, un nucleo pesante deve avere una energia molto maggiore di quella di un P. Qualitativamente:

Molteplicita' $n(E)$ dei π in interazioni di nucleoni: $n_p(E) \approx E^\alpha$ con $\alpha \cong 0.5$

Nell'interazione dei singoli nucleoni in un nucleo di Fe: $n(E) \approx \left(\frac{E}{A}\right)^\alpha$

La molteplicita' totale sara': $n_{Fe}(E) \approx A^\beta \left(\frac{E}{A}\right)^\alpha$ con: $\frac{2}{3} \leq \beta \leq 1$

Se prendiamo $\beta = 1 \Rightarrow \frac{n_{Fe}(E)}{n_p(E)} \cong \frac{A \left(\frac{E}{A}\right)^{0.5}}{E^{0.5}} = A^{0.5}$. Ovviamente, a parita' di energia.

Flusso di μ nell'atmosfera e composizione dei primari

La misura dell'energia puo' esser effettuata indipendentemente misurando la "dimensione" della componente elettromagnetica dello sciame (non sempre possibile).

Relazione meno approssimata tra A ed N_μ :

$$N_\mu(E_\mu \geq E_{\min}) = \frac{KA \sec \theta}{E_{\min}} \left(\frac{E_{\min}}{E_0/A} \right)^\alpha \left(1 - \frac{E_{\min}}{E_0/A} \right)^\beta ; \quad \text{con } E_{\min} \text{ in GeV, e:}$$

$$\alpha = -.757; \beta = 5.25; K = 14.5$$

Valida per $\theta \leq 60^\circ$

Composizione dei primari

Ad energie relativamente basse (fino a circa qualche centinaio di TeV) misure dirette effettuate su palloni o satelliti

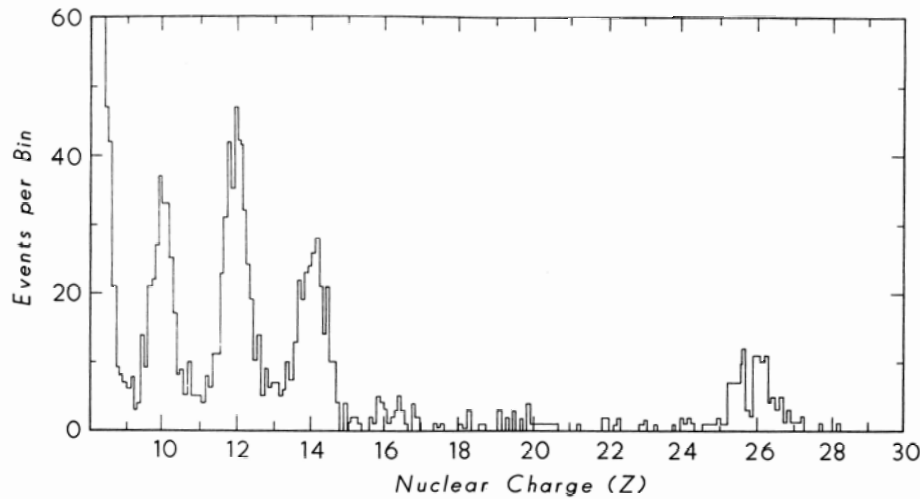


FIGURE 9.4 Charge resolution from University of Chicago space shuttle experiment.

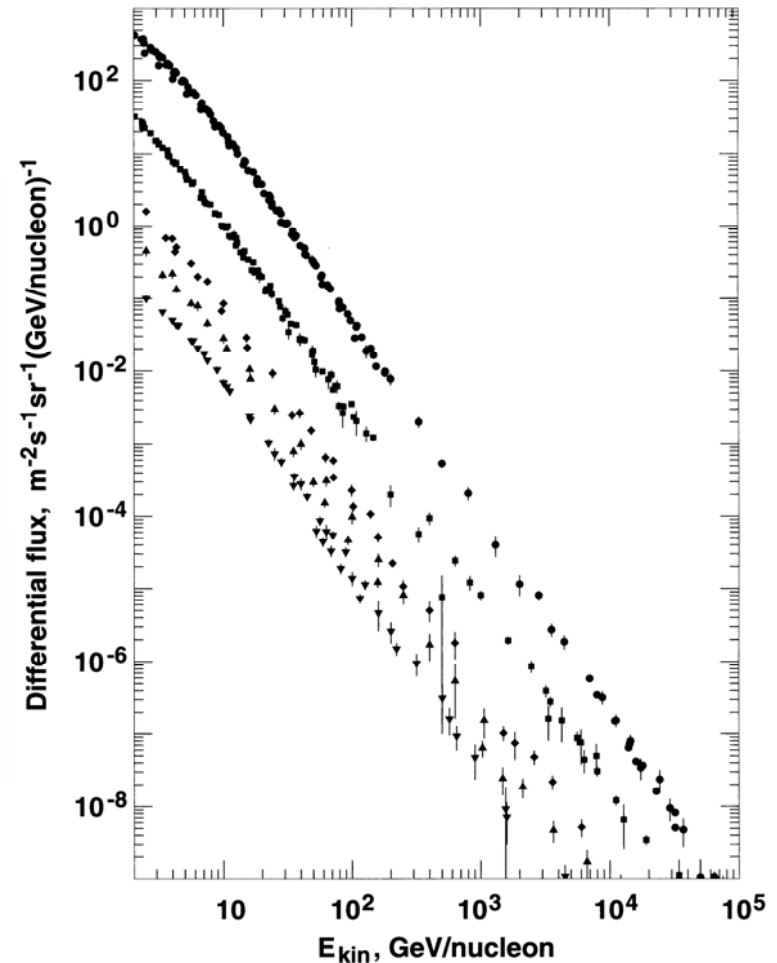


Fig. 5.10. Energy spectrum of cosmic rays in five mass groups: H, He, CNO, Ne-Si, and $Z > 17$.

Anomalie nella composizione dei primari

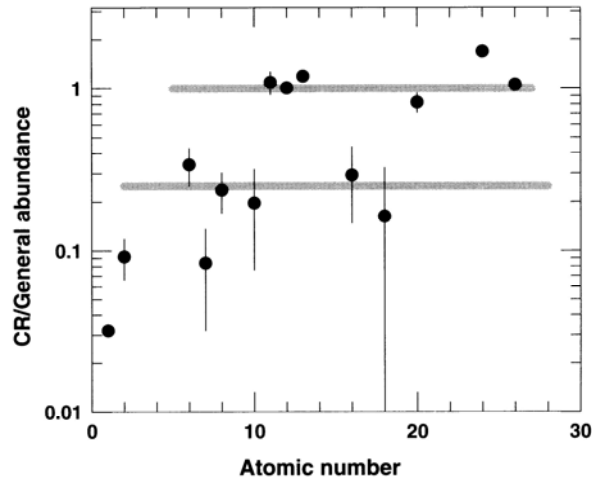


Fig. 5.9. The relative abundance of cosmic ray elements as a function of the atomic number of the element. The two shaded strips show the average abundance for high and low FIP elements. Note that H and He are notable exceptions with very low abundances.

Anomalie importanti per l'Idrogeno e l'Elio
(molto inferiori ai valori medi presenti nella Galassia)
Anomalie di fattori 3-4 per S, O, Ar

Molte spiegazioni proposte, nessuna in solido accordo con tutti i dati

Una spiegazione proposta: S, O, Ar hanno il potenziale di prima eccitazione (FIP) piu' alto degli altri.