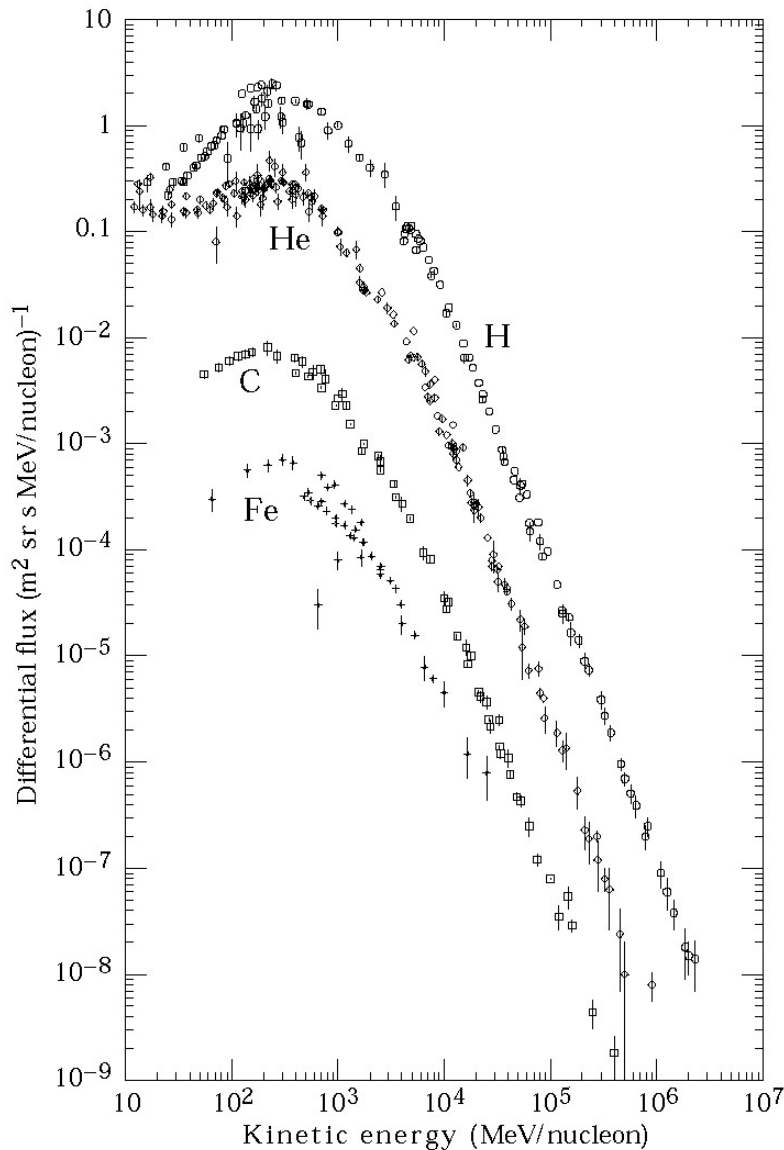


Raggi cosmici

Riepilogo della puntata precedente

Flussi differenziali



Z	Elemento	Flusso relativo
1	H	540
2	He	26
3-5	Li-B	0.40
6-8	C-O	2.20
9-10	F-Ne	0.30

Flusso di elettroni circa due ordini di grandezza inferiore a quello dei protoni

Flusso di positroni circa 1/20 di quello degli elettroni

Flusso di antiprotoni circa un decimillesimo di quello dei protoni

Tipi di misure

- a) Misure dirette → Palloni o Satelliti
- b) Misure indirette → Rivelatori di sciami

Rivelatori di sciami:

Per sciami elettromagnetici
→ Cerenkov nell'atmosfera

Per sciami adronici → Arrays di grande superficie
→ Rivelatori Auger



FLY's EYE TECHNIQUE

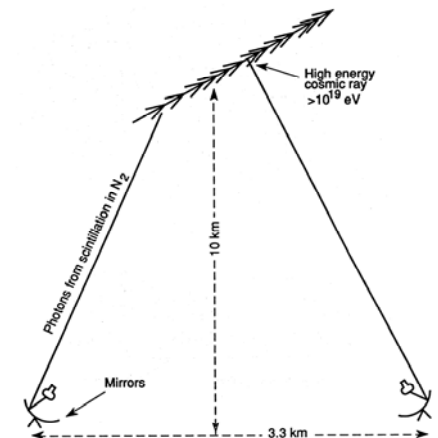
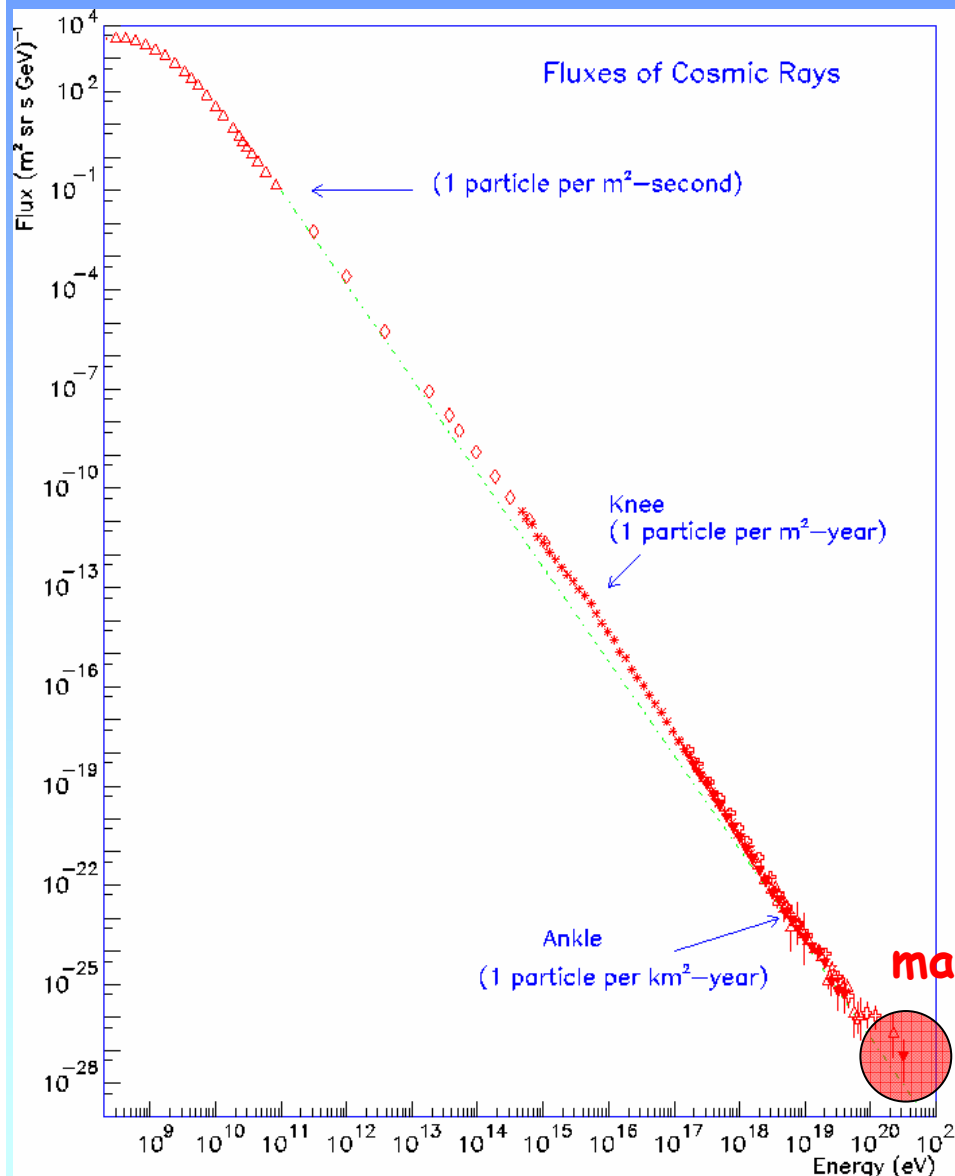
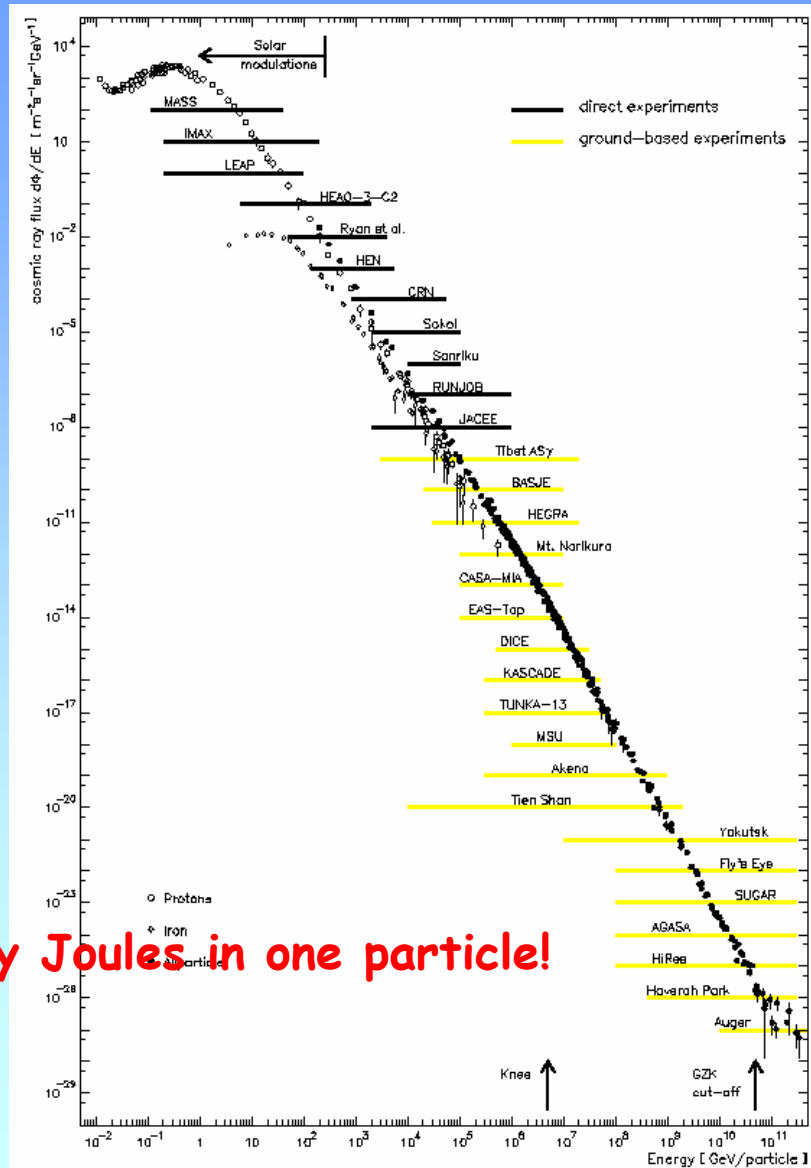


Figure 17: Fly's Eye technique [14].

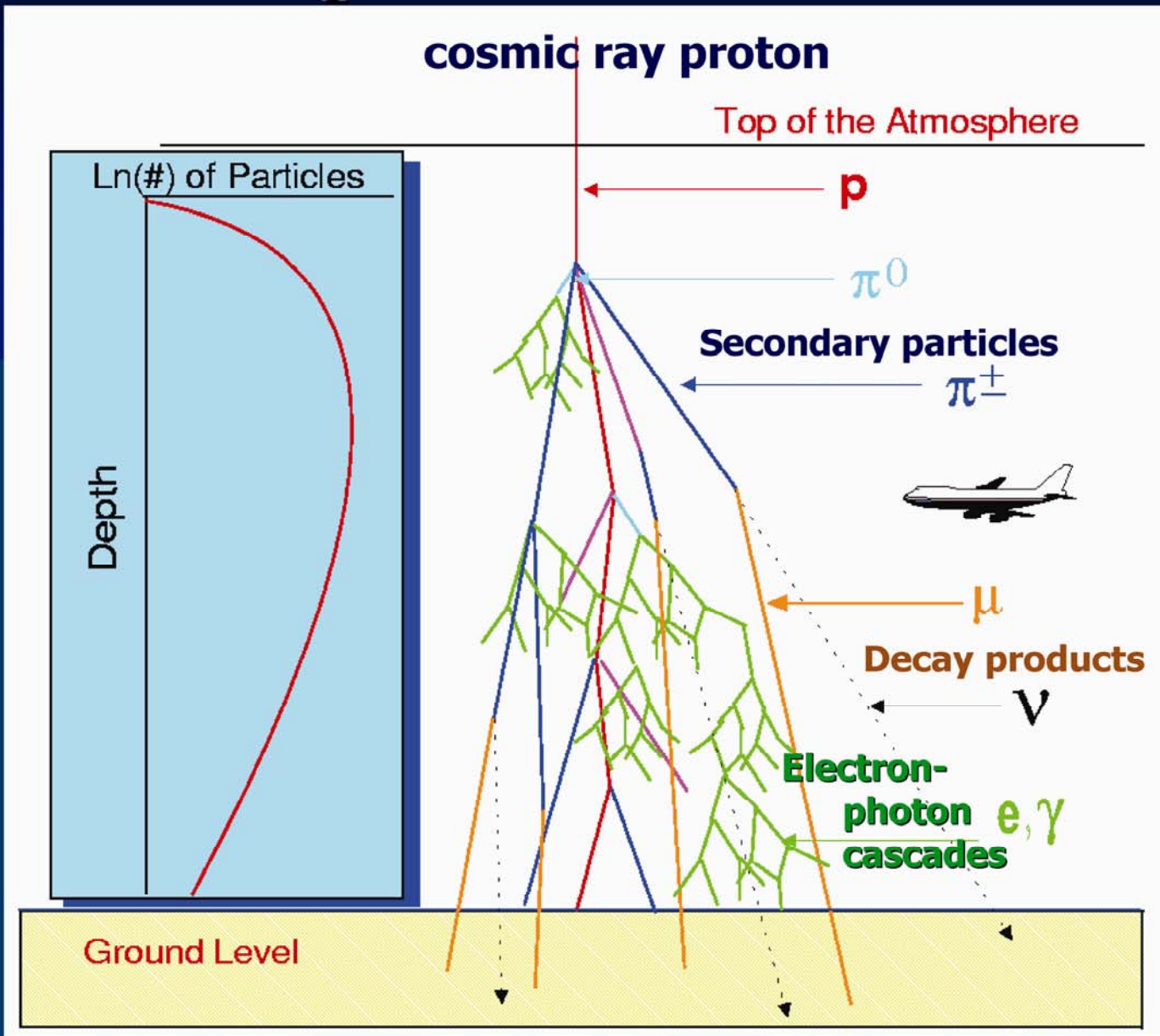
The cosmic ray spectrum stretches over some 12 orders of magnitude in energy and some 30 orders of magnitude in differential flux:



many Joules in one particle!



Le componenti dello sciame



Sciame

- P e nuclei interagiscono sulla sommità dell'atmosfera con lunghezza interazione λ :

$$\lambda = \frac{A}{\sigma_{p-Aria} N_A} \cong 65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$$

- Spessore atmosfera = 1000 g cm^{-2}
- Numero di lunghezze di interazione = $1000/65 \sim 15$
- I RC interagendo coi nuclei dell'atmosfera generano uno sciame

Nel CM !

$$p + N \longrightarrow \pi^{\pm}, \pi^0, K^{\pm}, K, p, n, + \dots (\text{exotic})$$

$$\pi^0 \longrightarrow \gamma\gamma \quad \tau_{\pi} = 1.8 \cdot 10^{-16} \text{ s}$$

$$\pi^{\pm} \longrightarrow \mu^{\pm} \nu_{\mu} \quad \tau_{\pi} = 2.5 \cdot 10^{-8} \text{ s}$$

$$\mu^{\pm} \longrightarrow e^{\pm} \nu_e \nu_{\mu} \quad \tau_{\pi} = 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

Profondita' atmosferica X (g/cm²)

$$X(h) = \int_h^{\infty} \rho(h_1) dh_1$$

Pressione atmosferica/densita' proporzionale a temperatura

Se T fosse costante :
$$X = X_0 \exp\left(-\frac{h}{h_0}\right)$$

$$X_0 = 1030 \text{ g/cm}^2$$

dove h_0 scala dell'altezza atmosferica

$\underline{h}_0 = 8 \text{ km}$ per $h < 5 \text{ km}$

$\underline{h}_o = 6.4 \text{ km}$ al di sopra della troposfera

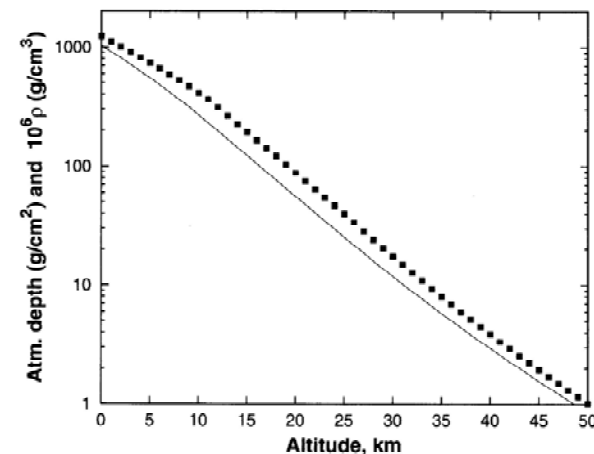


Fig. 6.1. Altitude dependence of the vertical atmospheric depth X (line), and the atmospheric density ρ (points) from the atmospheric model of (6.3)

- Sviluppo dello sciame EM in atmosfera.
- Fotoni (creazione di coppie) ed elettroni (bremmstrahlung) hanno la stessa $R = \ln 2 \, \xi$: il numero di particelle *raddoppia* ogni R .

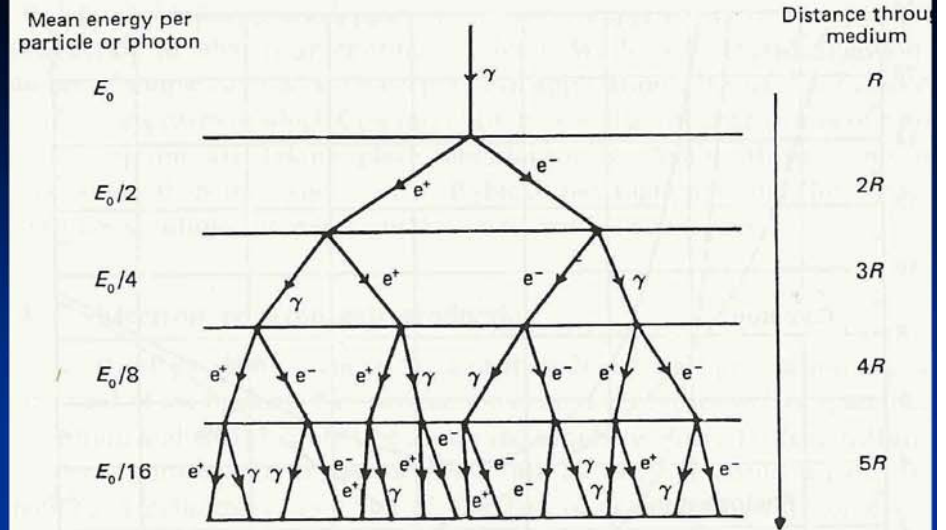


Figure 4.17. A simple model for an electromagnetic shower.

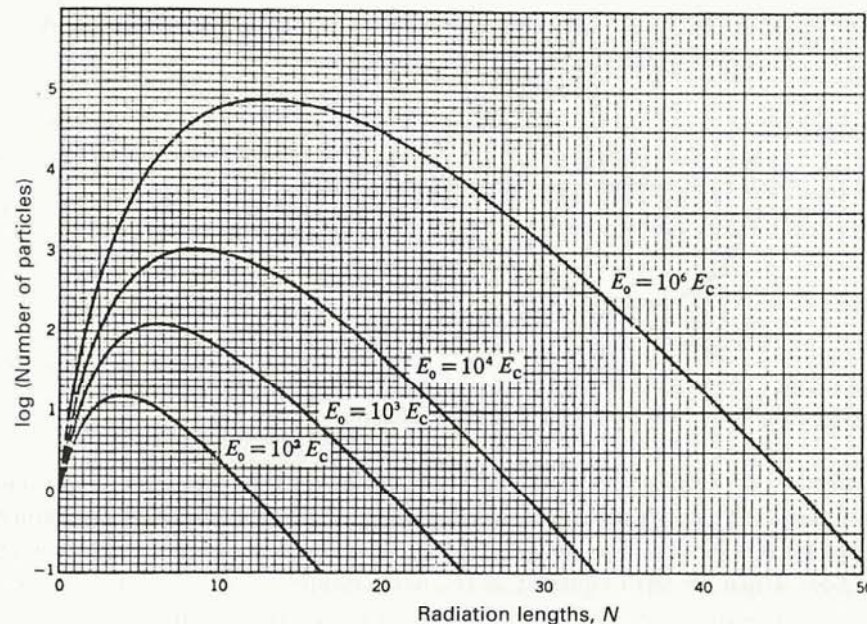


Figure 4.18. The total number of particles in a shower initiated by an electron of energy E_0 as a function of depth through the medium measured in radiation lengths N ; E_c is the critical energy. (From B. Rossi and K. Greisen (1941). *Rev. Mod. Phys.*, **13**, 240.)

- Lo sciame si arresta quando l'energia media delle particelle uguaglia l'energia critica.
- In aria, $E_c = 80 \text{ MeV}$
- $R(\text{aria}) \sim 40 \text{ g cm}^{-2}$
- Atmosfera = 25 lunghezze di radiazione

Caratteristiche degli sciami e.m.

$$N = 2^n$$

dove N = numero di particelle prodotte
dopo n lunghezze di radiazione

$$N_{\max} = E_0 / E_c$$

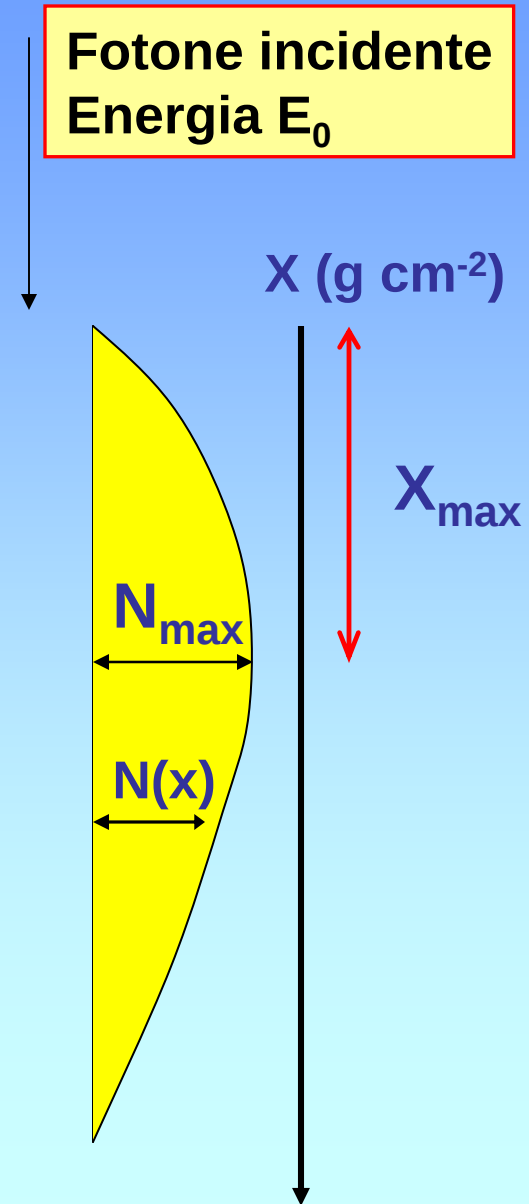
$E_0 \rightarrow$ energia del fotone iniziale

$E_c \rightarrow$ energia critica = 80 MeV

$N_{\max}$ = numero di particelle nel punto di
massimo sviluppo dello sciame

$$X_{\max} = n \xi_0 \ln 2 = \xi_0 \ln(E_0 / E_c)$$

$X_{\max} \rightarrow$ posizione del punto di max sviluppo



Caratteristiche degli sciami adronici

Per sciami adronici i valori di $X_{\max}$ ed $N_{\max}$ dipendono dalle caratteristiche dell'interazione; mediamente:

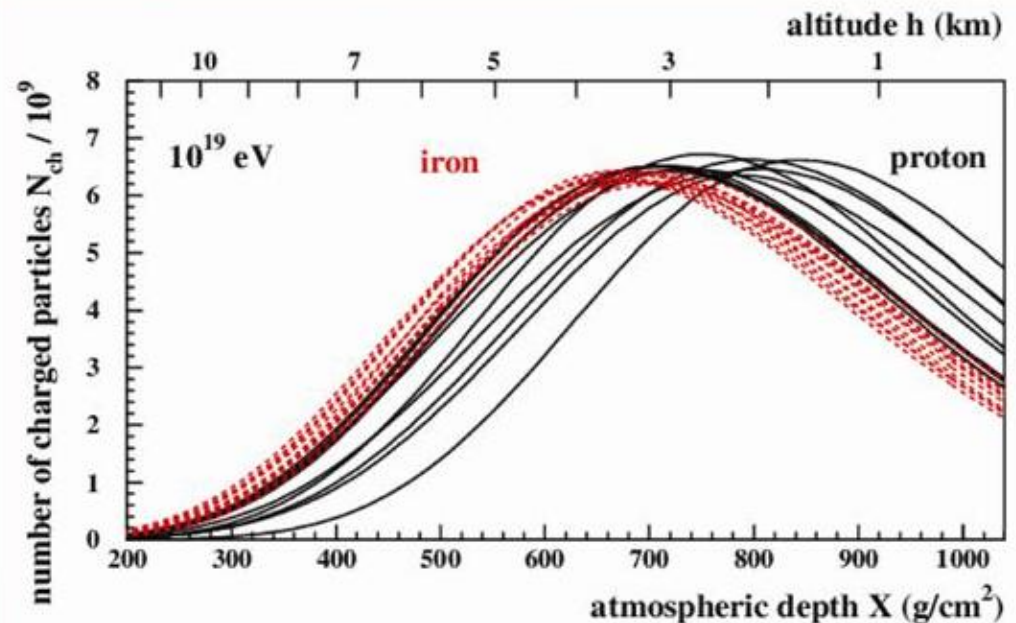
$$N_{\max} = (1.1-1.6) E_0 \text{ (GeV)}$$

Per energie dell'ordine dell'EeV $\rightarrow$ circa 10^9 particelle al massimo dello sciame.

Circa 1/3 dell'energia della particella si ritrova nella componente e.m. dello sciame.

No di particelle in funzione di X

Fluttuazioni maggiori per nuclei leggeri $\leftarrow$ minore sezione d'urto



Sciami adronici (interazioni di protoni o nuclei)

Flusso di π nell'atmosfera

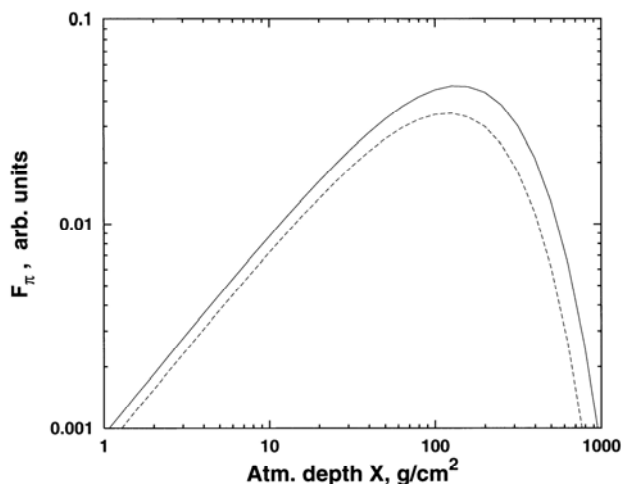


Fig. 6.3. Pion flux in the atmosphere calculated with (6.8) and (6.9) neglecting decay, solid line, and with decay, dashes. The normalization of the two curves is arbitrary, only the shape is correct.

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 è la lunghezza media d'assorbimento dei mesoni π nell'atmosfera

Fluttuazioni

Posizione del max: $X_{\max}$ fluttua come conseguenza delle fluttuazioni nella posizione della prima interazione.

*Fluttuazioni minori per nuclei pesanti !
(anche $X_{\max}$ e' minore)*

*Fluttuazioni minori poiche' e.g. nel caso del Fe →
56 nucleoni → 56 sciame di singolo nucleone,
Ciascuno dei quali ha 1/56 dell'energia
Minore energia → minore $X_{\max}$
($X_{\max}$ e' una funzione crescente dell'energia)*

Elongation rate (sciame e.m.)

Per uno sciame e.m.:

$$X_{\max} = \xi_0 \ln (E / E_c)$$

Elongation rate: $ER = dX_{\max}/d\log E$ incremento di $X_{\max}$ per decade di energia

$$dX_{\max}/d\log E = d/d\log E (\xi_0 \ln E)$$

$$\xi_0 \ln E = \xi_0 \log E \cdot \ln 10 = 2.3 \xi_0 \log E \rightarrow$$

$$ER = 2.3 \xi_0 = 84 \text{ g/cm}^2/\text{decade}$$

(energia critica in aria=80 MeV; $\xi_0 = 36 \text{ g/cm}^2$)

Elongation rate (sciame adronici)

Modello:

prima interazione (energia E) $\rightarrow N \pi^0 = 2N$ sciame
e.m. di energia $E/2N$

$$\rightarrow X_{\max} = \xi_0 \ln(E/2NE_c)$$

$$\rightarrow ER = 2.3 \xi_0 [1 - d(\ln N / d \log E)] < 2.3 \xi_0$$

Elongation rate (sciami adronici)

Dal modello di sovrapposizione, per un nucleo di energia E e massa A , Gaisser ottiene:

$$X_{\max} = (1-B) \xi_0 [\ln(E/E_c) - \langle \ln A \rangle] \quad \text{con: } B = B_g + B_\lambda$$

dove: $B_g = d \ln[n(E)] / d \ln(E)$

(rate di aumento della molteplicità dei secondari con l'energia;

$$B_\lambda = \beta d(\lambda_N + \lambda_\pi) / d(\ln E)$$

(dipendenza dall'energia delle lunghezze di interazione per nucleoni e mesoni π)

[$B=0$ per sciami e.m.; $B < 1$ per sciami adronici]

Elongation rate: $ER = (1-B) \xi_0 [1 - d \langle \ln A \rangle / d \ln E]$

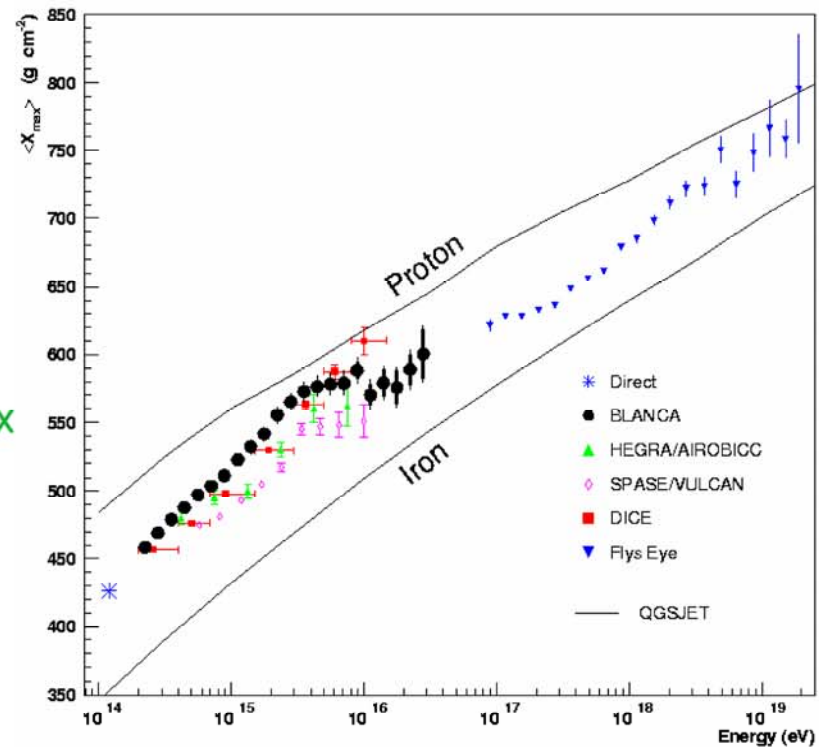
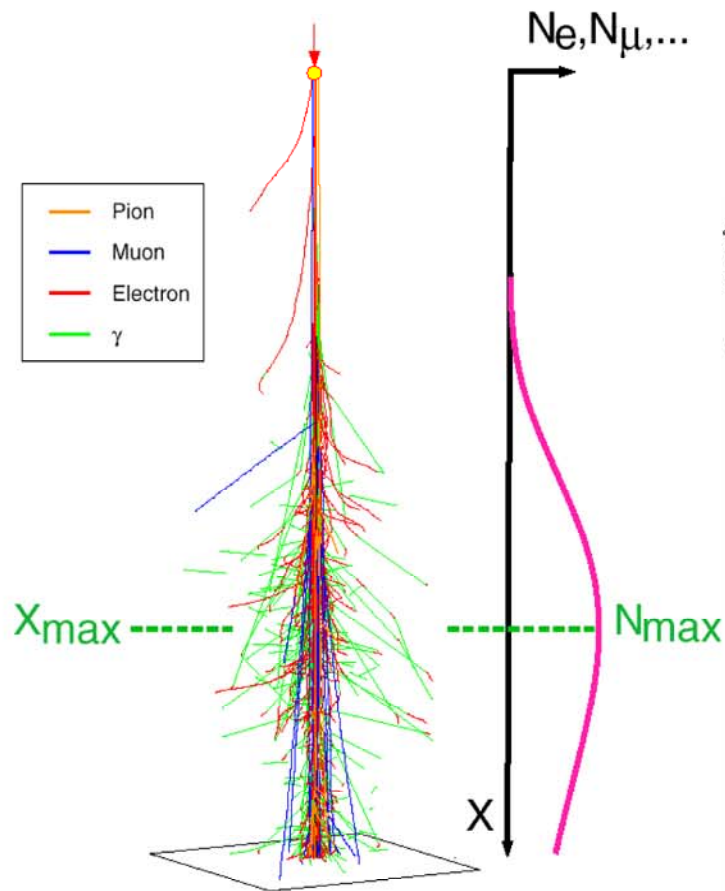
Se $\langle \ln A \rangle$ non dipende dall'energia $\rightarrow ER = (1-B) \xi_0$

ER fornisce indicazioni sulla variazione della composizione con l'energia.

Ad es. Se la composizione cambia da puro Fe a puro p in una decade, ER diviene 184 g/cm^2

Composizione in massa da $X_{\max}$

Mass composition from shower depth



Densita' di μ per Fe e P

Sperimentalmente sciame iniziati da Fe generano 1.45 volte piu' μ che quelli iniziati da P.

Spiegabile (qualitativamente) facendo uso del modello di "sovrapposizione" (sciame iniziato da Fe = 56 sciame iniziati da P, ciascuno di energia $1/56 E$).

Dato empirico: $\mu/em \sim E^{0.92}$

Inoltre: $N_e \sim E \rightarrow$

$$\begin{aligned} \mu(\text{Fe})/\mu(\text{P}) &= [\underbrace{\mu(\text{Fe})/em(\text{Fe})}_{(E/56)^{0.92}}] [\underbrace{em(\text{Fe})/em(\text{P})}_{56}] [\underbrace{em(\text{P})/\mu(\text{P})}_{E^{-0.92}}] = \\ &= 56/56^{0.92} = 56^{0.08} = 1.38 \end{aligned}$$

Distribuzioni in energia

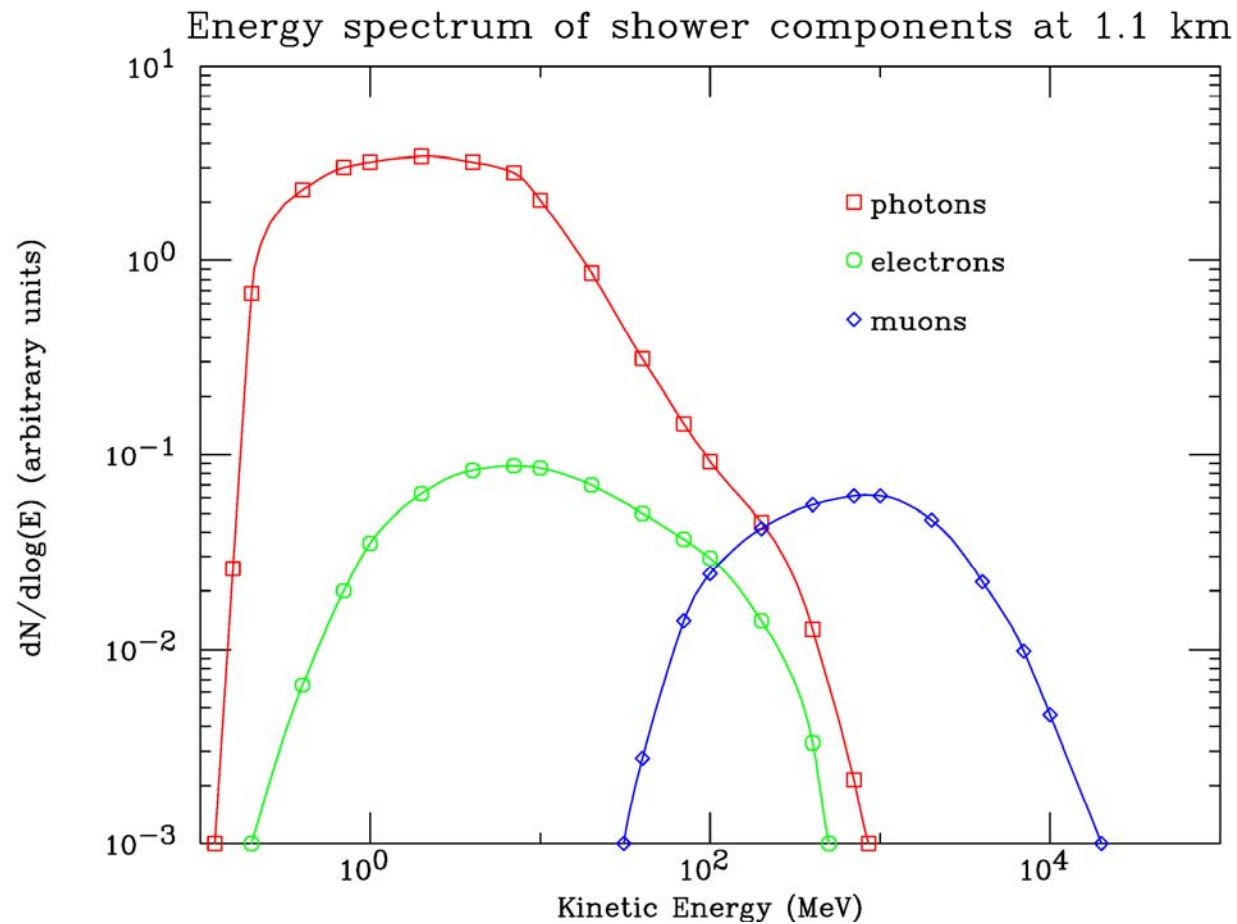


Figure 15: Energy spectrum of the shower components at 1.1 km. The spectrum of the electromagnetic components does not vary much beyond 1 km. At 2 km the peak of the muon spectrum is shifted from 1 GeV to 600 MeV.

Distribuzioni laterali integrate dell'energia per ciascun componente dello sciame

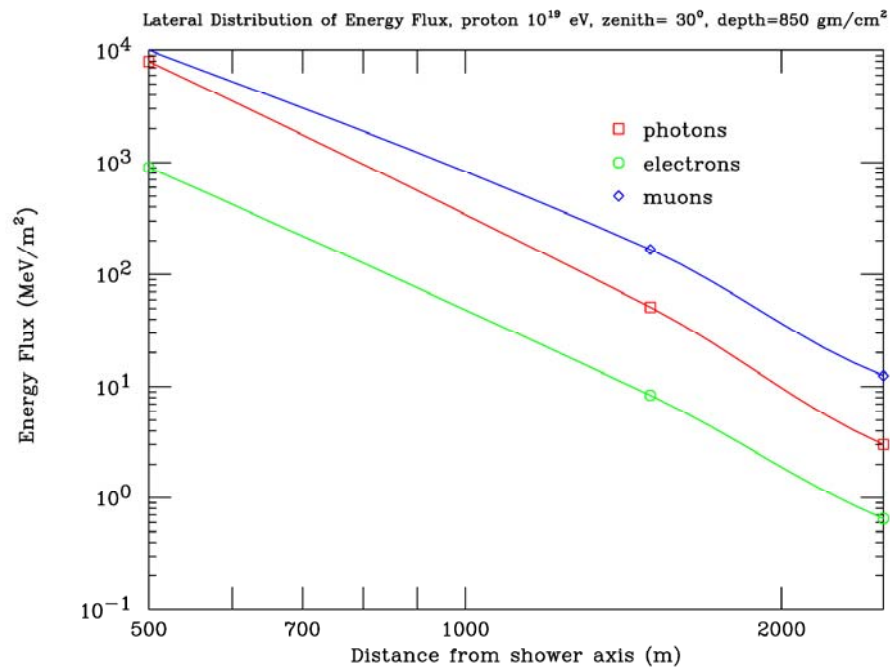


Figure 16: The lateral distribution of the integrated energy flux for each shower component.

***A grandi distanze dall'asse il flusso
di energia ← muoni***

Sviluppo longitudinale degli sciami adronici

Fluttuazioni nella posizione della prima collisione e nella frazione di energia persa $\rightarrow$ fluttuazioni in $X_{\max}$

Sciame indotto da nucleo di energia E_0 e peso atomico $A \sim A$ sciame indotti da protoni, di energia $E_0 / A \rightarrow X_{\max}$ piu' piccolo e minori fluttuazioni sulla sua posizione

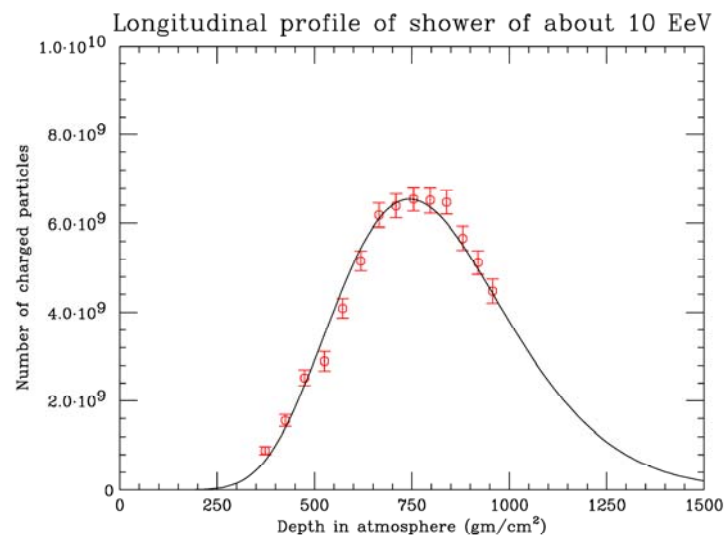


Figure 11: Longitudinal development of a 9 EeV shower in the atmosphere. The solid line is an empirical fit to the shower development. The red points are the measurements of the shower development by detection of its nitrogen fluorescence.

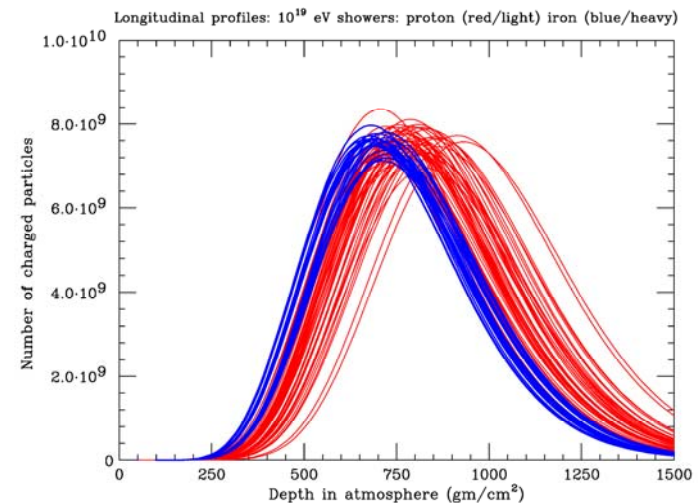


Figure 12: Simulated shower profiles for proton (light profiles) and iron (heavy profiles).

Misure dello sviluppo longitudinale

Cio' che un rivelatore di EAS misura e' la distribuzione laterale (numero di particelle/unita' di area a varie distanze radiali dal "core").

Relazione tra numero di particelle (dimensione N) dello sciame ed energia ?

Due sciami di uguale energia possono avere diversi valori di N a causa di un diverso punto di prima interazione ← diverso spessore di atmosfera attraversato.

Sciami da direzioni diverse hanno spessori medi che variano come : $X = X_0 \sec \theta$ (θ e' lo zenith)

Effettuiamo misure di N a valori diversi di θ

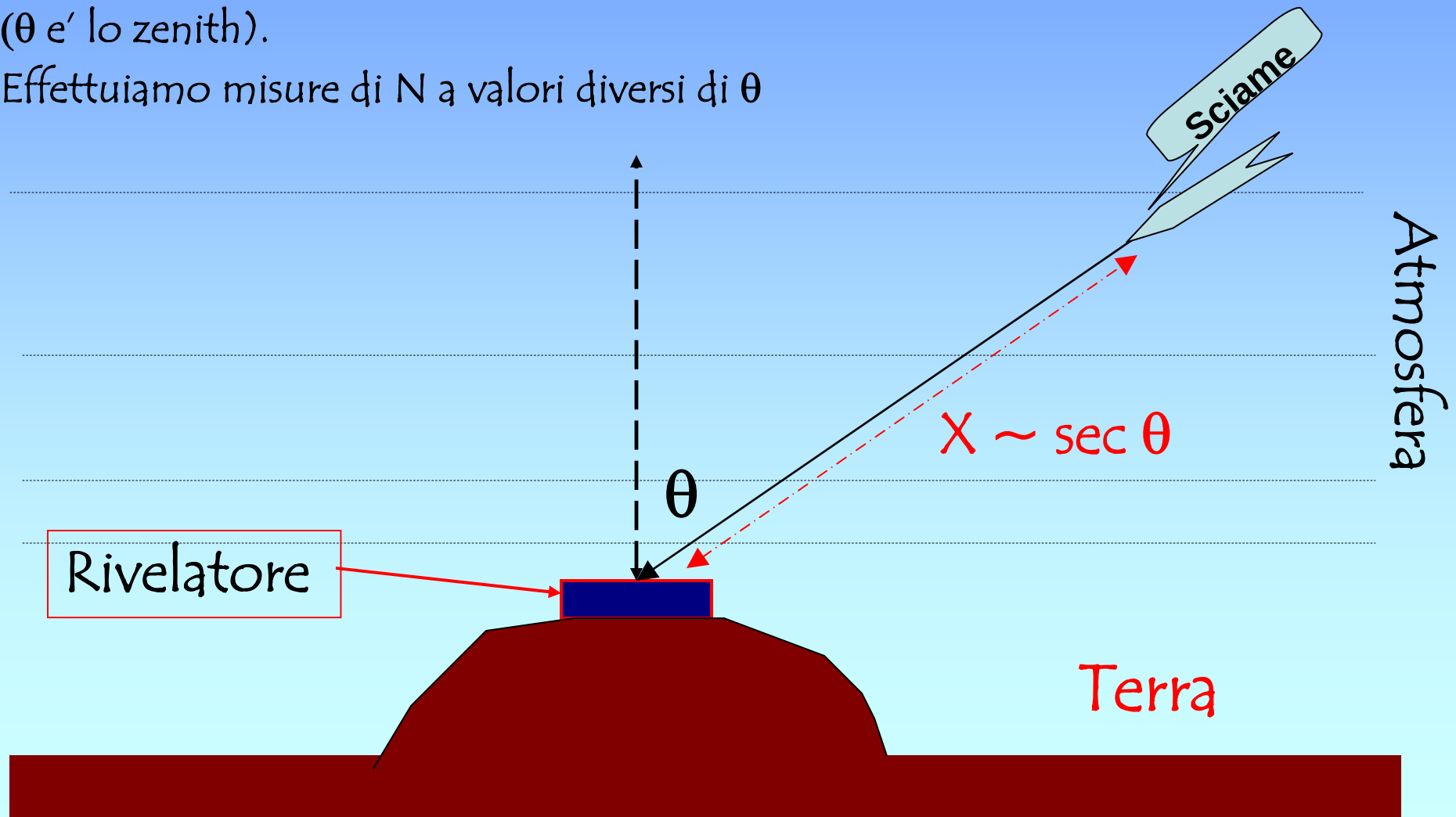
→ Modello dello sviluppo longitudinale dello sciame

Misure dello sviluppo longitudinale

Due sciame di uguale energia possono avere diversi valori di N a causa di un diverso punto di prima interazione $\leftarrow$ diverso spessore di atmosfera attraversato.

Sciame da direzioni diverse hanno spessori medi che variano come : $X = X_0 \sec \theta$ (θ e' lo zenith).

Effettuiamo misure di N a valori diversi di θ



Distribuzione longitudinale degli sciame

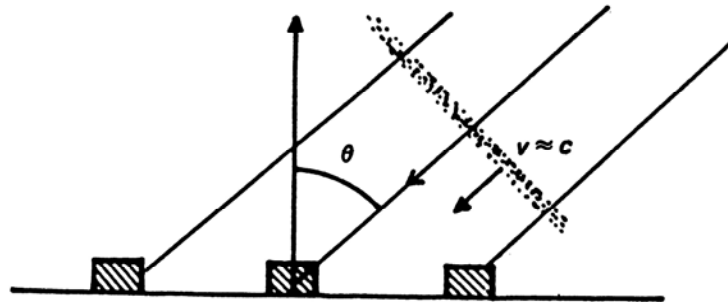


Figure 9.9. A diagram illustrating the arrival of an extensive air-shower at zenith angle θ .

Monte Chacaltaya (Bolivia) 5200 m $\rightarrow$ 520 (g cm^{-2})

Misure a valori diversi di θ rispetto al piano orizzontale

Lunghezza effettiva attraversata da un raggio cosmico: $520 \sec\theta$ (g cm^{-2})

Due eventi di uguale energia hanno frequenze temporali uguali, indipendentemente dall'angolo !

Eventi di ugual frequenza $\rightarrow$ uguale energia

Angolo θ misurato dalla differenza dei tempi d'arrivo sui diversi rivelatori.

Eventi di diverso θ corrispondono a diverse "profondità" D di sviluppo dello sciame

Distribuzione longitudinale degli sciami

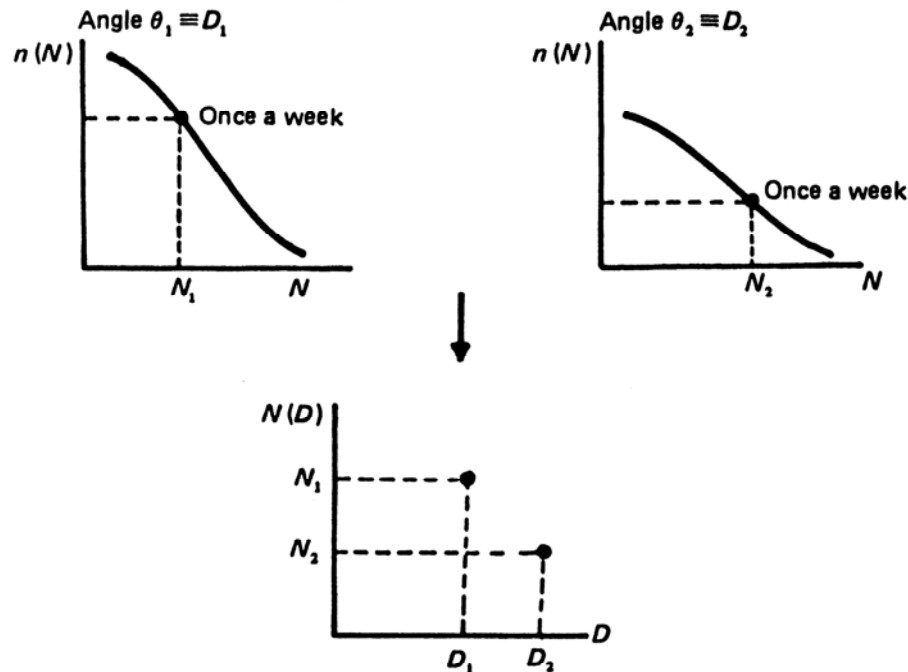


Figure 9.10. The determination of the development of extensive air-showers of different sizes through the atmosphere from observations at different zenith angles θ ; $n(N)$ is the rate of occurrence of showers of N particles. A zenith angle θ is equivalent to a depth through the atmosphere of $5200 \sec \theta \text{ kg m}^{-2}$.

Dalle distribuzioni delle $n(N)$ vs N si ottiene la distribuzione $N(D)$ che descrive lo sviluppo longitudinale medio dello sciame

1/week
 $\rightarrow E_1$

D_1	N_1
D_2	N_2
D_3	N_3
D_4	N_4
D_5	N_5
D_6	N_6

1/month
 $\rightarrow E_2$

D_1	N_1
D_2	N_2
D_3	N_3
D_4	N_4
D_5	N_5
D_6	N_6

$D_1 \rightarrow \cos \theta_1$
 $D_2 \rightarrow \cos \theta_2$
 $D_3 \rightarrow \cos \theta_3$

Distribuzione longitudinale degli sciami

Distribuzione ottenuta con il metodo descritto

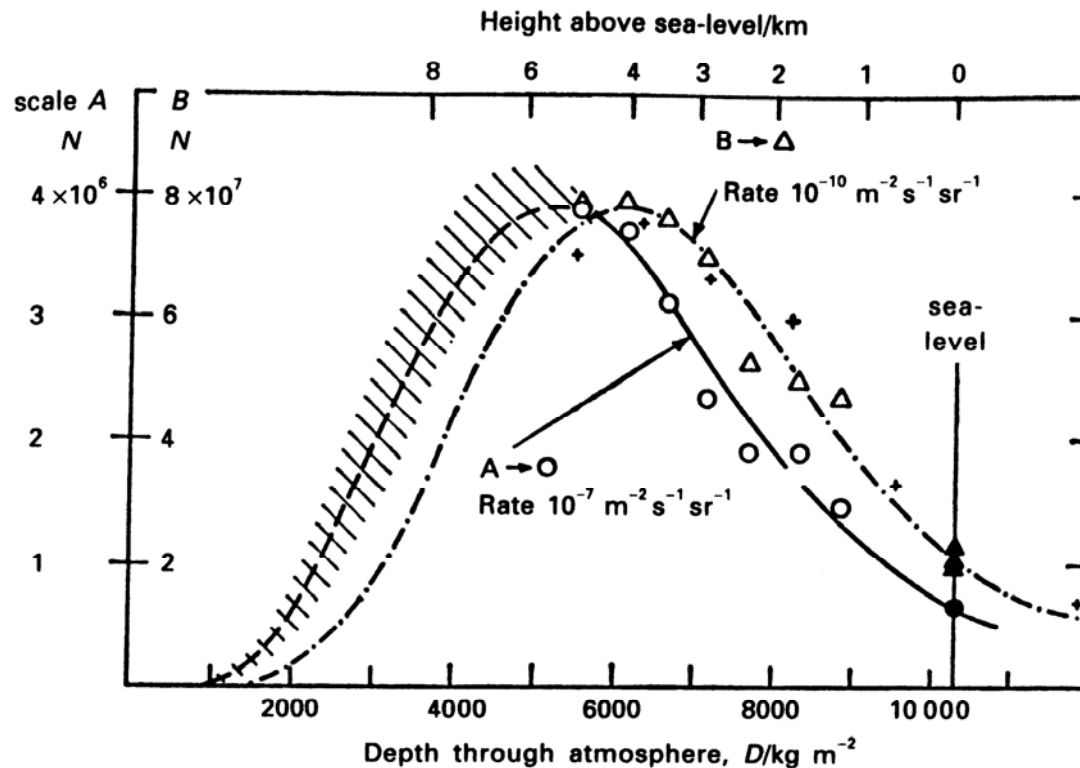
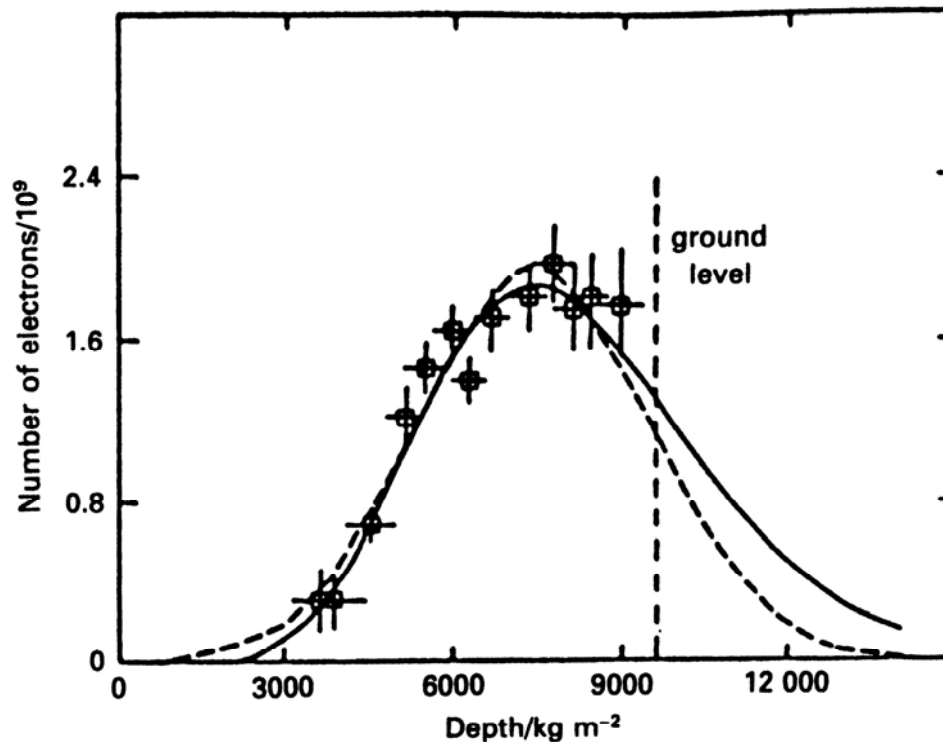


Figure 9.11. The number of particles N in showers which are detected at fixed rates A and B as a function of depth through the atmosphere from inclined showers at Chacaltaya and from sea-level laboratories. $N(D)$ shows approximately the growth and decay of showers of a particular energy. The continuation of the curves to path lengths less than 5200 kg m^{-2} is based upon theory. (From A. M. Hillas (1972). *Cosmic rays*, page 89, Oxford: Pergamon Press.)

M.S.Longair, vol. 1
Cap. 9.4

Distribuzione longitudinale degli sciami



Metodo alternativo adoperato
piu' recentemente
→ fluorescenza

Figure 9.12. The determination of the development of an extensive air-shower through the atmosphere using the 'Fly's Eye' technique. The energy of the primary particle was 2×10^{18} eV and the angle of the shower from the vertical was 28° . (From A. A. Watson (1985). *19th intl. cosmic ray conference*, La Jolla, USA, Vol. 9, page 111.)

$$N(X) = N_{\max} \left(\frac{X - X_0}{X_{\max} - X_0} \right)^{\frac{X_{\max} - X_0}{\lambda}} \exp \left[\frac{X_{\max} - X}{\lambda} \right]$$

Determinazione dell'energia

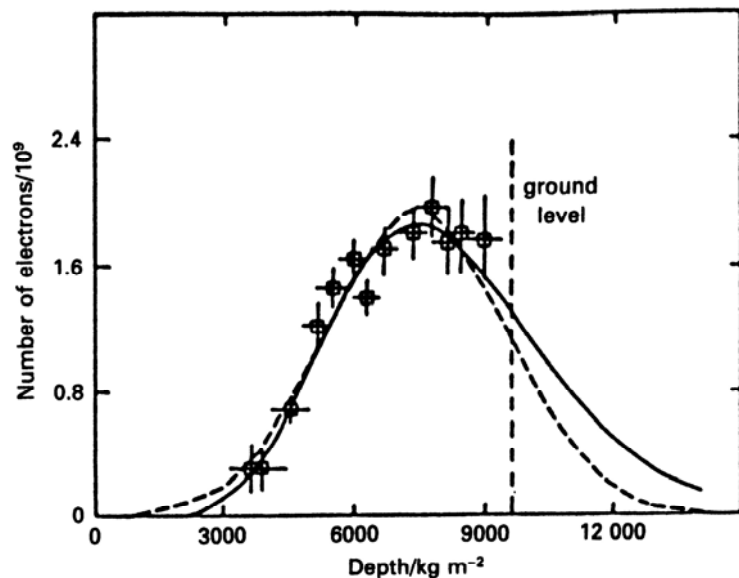


Figure 9.12. The determination of the development of an extensive air-shower through the atmosphere using the 'Fly's Eye' technique. The energy of the primary particle was 2×10^{18} eV and the angle of the shower from the vertical was 28° . (From A. A. Watson (1985). *19th intl. cosmic ray conference*, La Jolla, USA, Vol. 9, page 111.)

In figura, N è il numero di elettroni/positroni relativistici a ciascuna profondità

Perdita d'energia $\rightarrow 0.22 \text{ MeV}/(\text{kg m}^{-2})$

Perdita d'energia globale $\rightarrow \text{area sotto la curva} \times 0.22 \text{ MeV}$

Energia totale della componente e.m.

$\Downarrow$

$$\int 0.22 N_e(D) dD \quad [\text{MeV}]$$

Determinazione dell'energia

Misura della densità di particelle → energia

Sviluppo longitudinale fluttua da sciame a sciame

*Fluttuazioni in densità delle particelle dello sciame lontano dal “core” sono piccole (Hillas)
Tale densità è indipendente da:*

- caratteristiche dell'interazione primaria*
- natura della particella primaria*
- E' un'ottima stima dell'energia primaria*

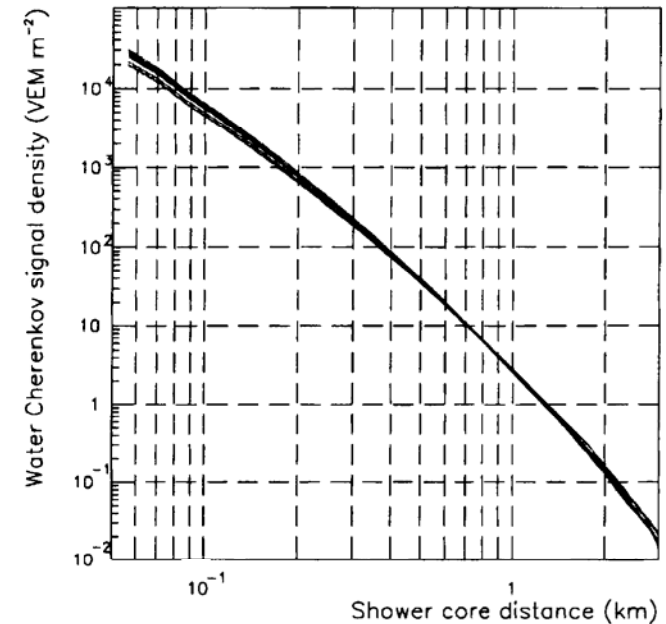


FIG. 20. Several examples of lateral distributions of water Čerenkov detector signals $[\rho(r)]$ in units of energy loss of vertically penetrating muons (250 MeV), which shows that the fluctuation of $\rho(r)$ between 600 and 1000 m from the shower core is less than 15%. From Pierre Auger Project Design Report, 1997.

e.g. Auger (Cerenkov)

$$E_0[eV] = 5.25 \times 10^{17} \times \rho(600)^{1.023}$$

$\rho(600)$ = densità numero equivalente di μ a 600 m dall'asse

AGASA (Scintillatori)

$$E_0[eV] = 2.15 \times 10^{17} \times S(600)^{1.015}$$

$S(600)$ = numero equivalente di particelle incidenti

verticalmente a 600 m dall'asse

Ulteriori caratteristiche importanti

Contenuto in mesoni μ e relativa distribuzione radiale

Contenuto e.m. e relativa distribuzione radiale

Contenuto adronico e relativa distribuzione radiale

Rapporto μ /e.m.

Varie parametrizzazioni empiriche adoperate per le diverse distribuzioni radiali (elettroni, μ , adroni..)

Esperimento "Kaskade"

$$N_{\mu}^{\text{tr}} = 2\pi \int_{40m}^{200m} \rho_{\mu}(r) r dr$$

Fornisce una stima dell'energia del primario, indipendente dalla massa.

Distribuzione laterale

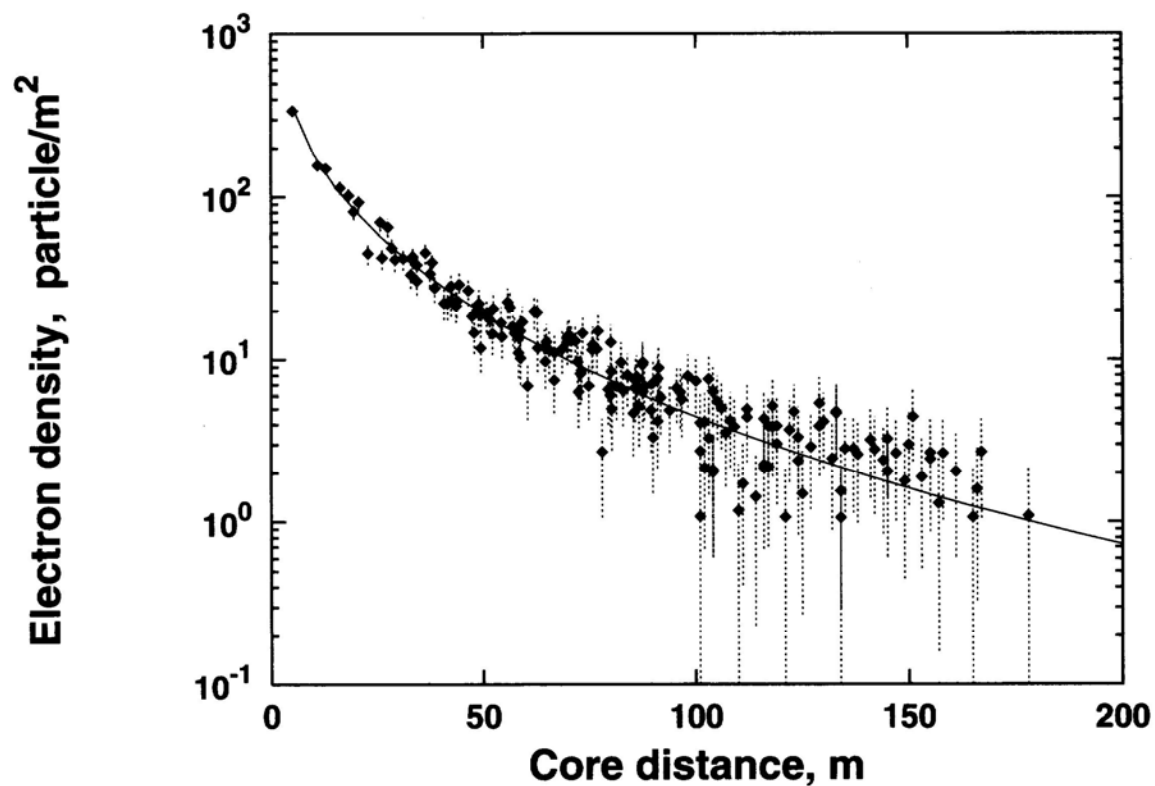


Fig. 8.15. The density distribution for the shower mapped in Fig. 8.13. The line shows the average charged particle lateral distribution.

Distribuzioni laterali dell'energia per ciascun componente dello sciame

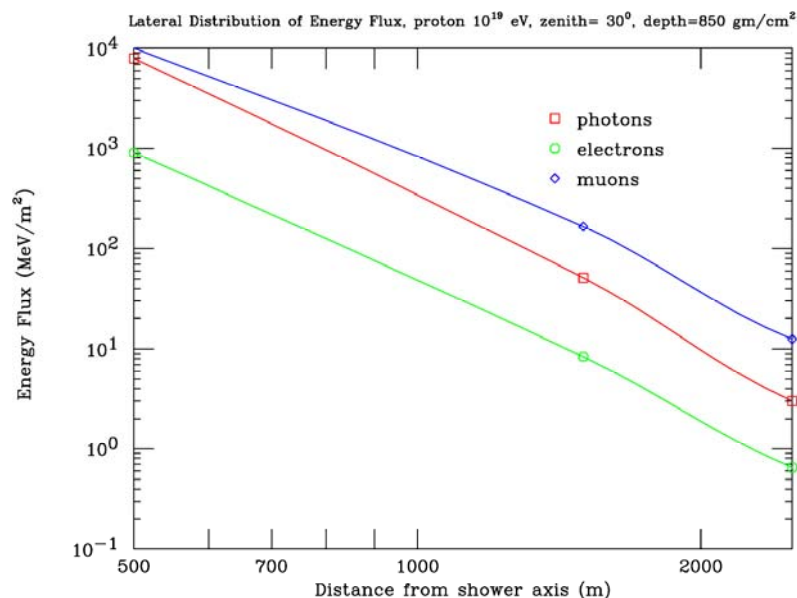


Figure 16: The lateral distribution of the integrated energy flux for each shower component.

A grandi distanze dall'asse il flusso di energia e' costituito prevalentemente da muoni

***Cio' che alcuni tipi di rivelatori misurano e' l'energia depositata per unita' di area
Esempio: rivelatori cerenkov ad acqua***

Informazioni sulla composizione da correlazioni μ - elettroni

Sciame indotto da nucleo pesante (A) $\rightarrow$ sezione d'urto maggiore ($A^{2/3}$)
Punto di prima collisione piu' in alto $\rightarrow$ sciame si sviluppa prima

$\rightarrow$ A sciame da protone, ciascuno di energia $1/A$ $\rightarrow$ particelle prodotte - piu' numerose ma piu' lente : componente e.m. si attenua prima - Inoltre componente muonica piu' ricca

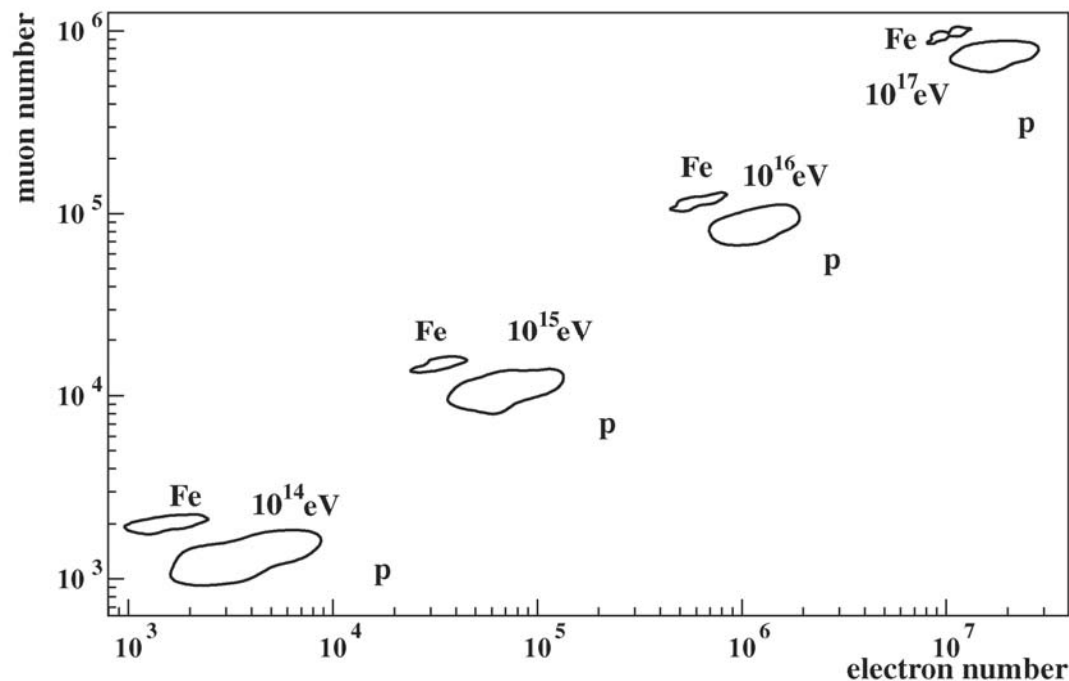


Figure 18. The (N_μ, N_e) -correlation from MC simulations shown for proton and iron primaries at various energies. The lines represent the half-width maxima of the distributions (courtesy of Heck, KASCADE collaboration).

Informazioni sulla composizione da correlazioni μ - elettroni

$\langle N_e \rangle$ diminuisce all'aumentare di A
 $\langle N_\mu \rangle$ aumenta " " "

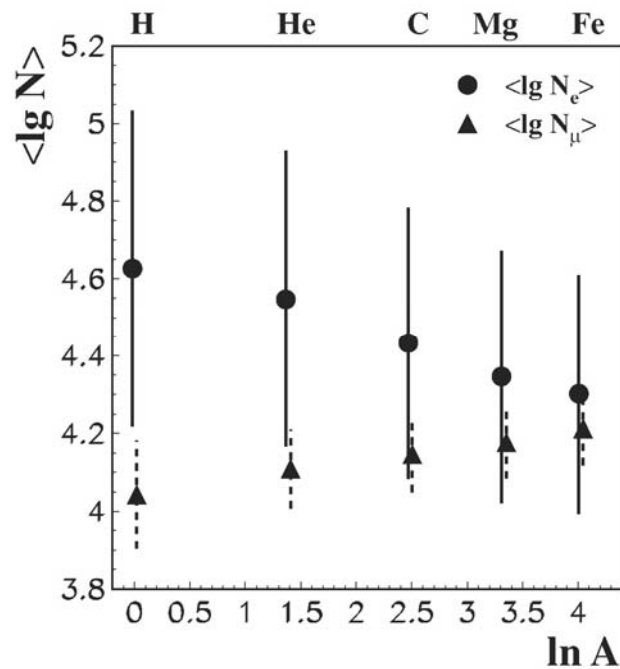


Figure 19. Dependence of the EAS particle numbers N on the primary mass. The error bars represent the fluctuations for 50 simulated EAS observed at sea-level. The simulations refer to CORSIKA [15] for the energy range 1–1.78 PeV and zenith distance $\Theta \in [0^\circ, 42^\circ]$.

Correlazioni μ - elettroni

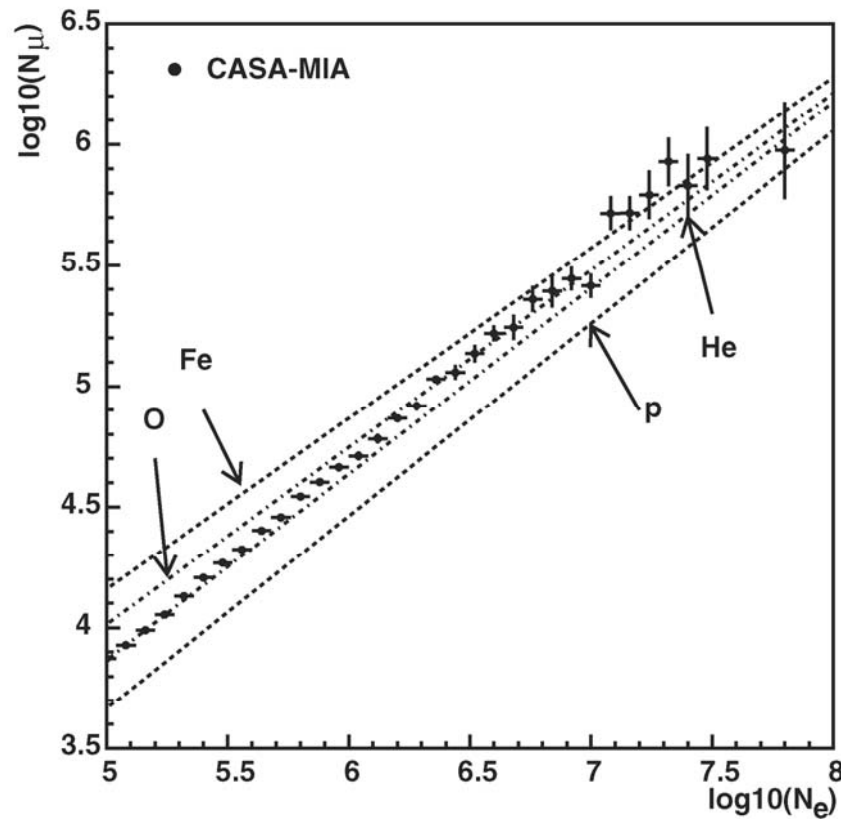


Figure 9. The muon to electron shower size correlation measured by the CASA-MIA experiment [78]. The data are compared to MC simulations of different primaries. The distribution is used for an estimate of the mass composition in the knee region.

Correlazioni μ - elettroni

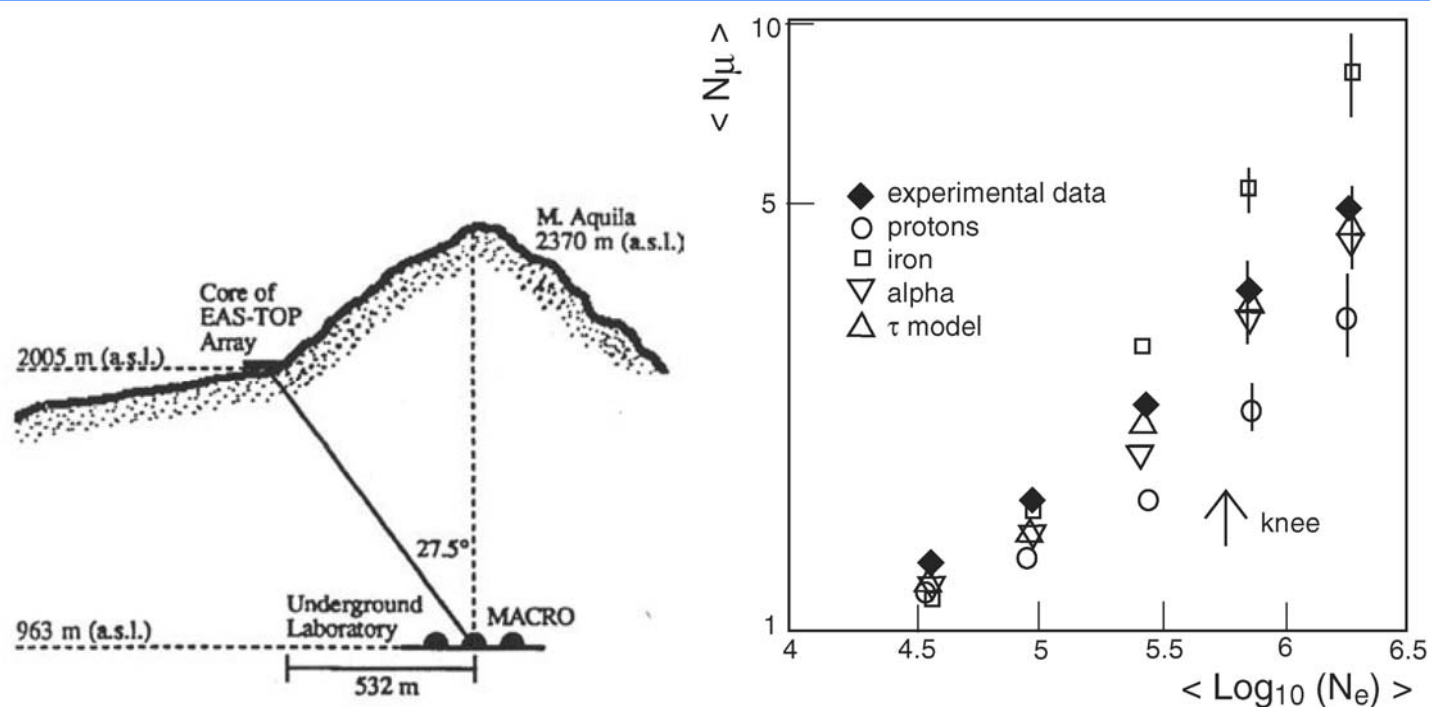


Figure 10. The dark matter detector MACRO combined with the EAS-TOP array for cosmic ray studies (from [83]). The muon multiplicity measured deep underground (> 13 TeV) correlated with the shower size provides the mass sensitivity [84].

Informazioni sulla composizione
dei primari in MACRO-EAS_TOP

Uso combinato della misura di μ ed elettroni

Determinazione dell'energia in modo indipendente da A
 $\text{Log}(N_e + 60 N_\mu)$

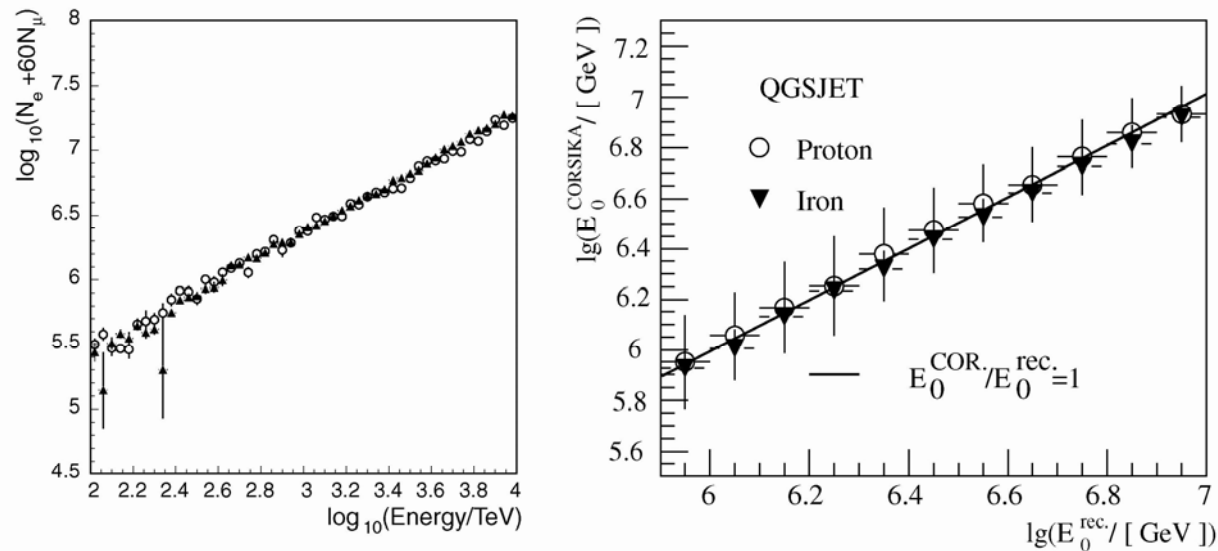


Figure 22. Left: the CASA-MIA [20] energy parameter $\lg(N_e + 60N_\mu)$ as a function of energy for protons ($\circ$) and iron ($\blacktriangle$). Right: energy calibration curve of KASCADE data by Weber *et al* [110]. The energy is parameterized as a function of N_e and N_μ^{tr} .

Vedasi questa referenza
(su:http://www.df.unipi.it/~flaminio/astroparticelle/Haungs_Rebel_Roth.pdf)

INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHING
Rep. Prog. Phys. **66** (2003) 1145–1206

REPORTS ON PROGRESS IN PHYSICS
PII: S0034-4885(03)31552-0

Energy spectrum and mass composition of high-energy cosmic rays

Andreas Haungs, Heinigerd Rebel¹ and Markus Roth

Valori tipici degli errori sulla misura di E

AGASA = Akeno Giant Air Shower Array

$$\frac{\Delta E}{E} \cong \pm 30\% \quad \text{per } E = 3 \times 10^{19} \text{ eV}$$
$$\frac{\Delta E}{E} \cong \pm 25\% \quad \text{per } E = 10^{20} \text{ eV}$$

Haverah Park $\rightarrow$ $\frac{\Delta E}{E} = 17\%$

Fly's Eye (stereo) $\rightarrow$ $\frac{\Delta E}{E} = 20\% \quad \text{per } E > 2 \times 10^{18} \text{ eV}$

Yakutsk $\rightarrow$ $\frac{\Delta E}{E} = 25\% \quad \text{per } E > 10^{19} \text{ eV}$

Valori tipici degli errori sulla misura angolare

AGASA = Akeno Giant Air Shower Array

$$\Delta\theta \cong 2.8^0 \quad \text{per } E = 10^{19} \quad eV$$

$$\Delta\theta \cong 1.8^0 \quad \text{per } E = 4 \times 10^{19} \quad eV$$

Domanda: a quale estensione spaziale corrispondono per un oggetto al centro della nostra galassia ?

Fine