

Rivelatori per sciami adronici

Sciame adronici: cascate iniziate da un nucleone o da un nucleo

Produzione di mesoni π , carichi e neutri (rapporto 2/1)

Mesoni neutri decadono in due fotoni e danno inizio ad una cascata elettromagnetica

Mesoni carichi possono:

a) reinteragire, dando luogo ad altri mesoni carichi e neutri

b) decadere in mesoni μ e neutrini

Nelle prime fasi, dominano i decadimenti (densità dell'aria troppo bassa); successivamente dominano le reinterazioni.

Processo continua fino a quando i mesoni prodotti hanno energia sufficiente a produrre altri mesoni

I mesoni μ in genere raggiungono il suolo, senza ulteriori interazioni o decadimenti

Lo sciame prodotto ha una componente elettromagnetica ed una adronica, rivelabile alla fine attraverso i mesoni μ che arrivano al rivelatore.

Sviluppo degli sciami adronici

Ad alte energie la lunghezza d'interazione e' maggiore di quella di radiazione (120 vs 85 g cm⁻²) → componente adronica dello sciame penetra piu' in profondita', continuando a generare la componente e.m.
D'altronde, la molteplicita' dei secondari nelle interazioni adroniche e' molto maggiore di 2 (caso e.m.). Cio' compensa in parte la maggiore lunghezza d'interazione.

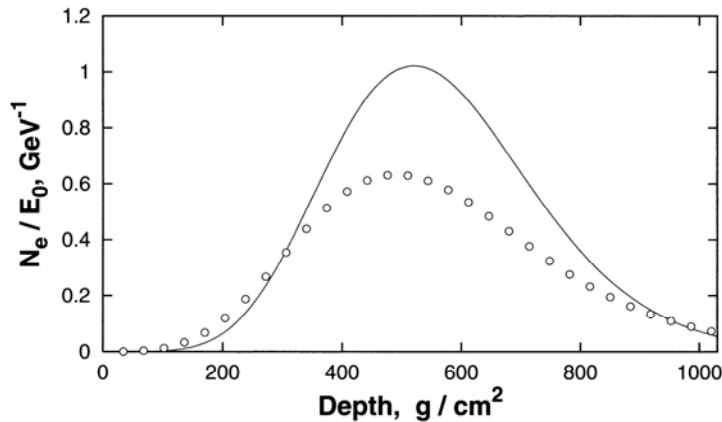


Fig. 8.8. Average shower profiles of proton (points) and photon (line) initiated showers. Both primary particles are of energy 10^5 GeV. The quantity shown is the total number of electrons divided by the primary energy in GeV.

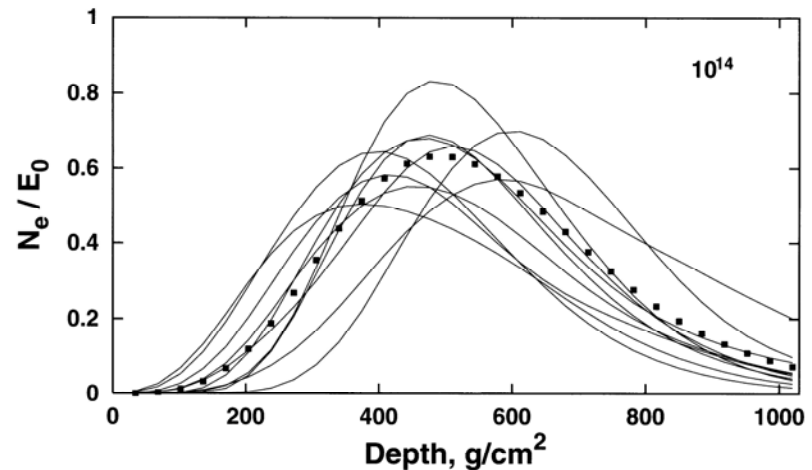


Fig. 8.9. Shower profiles of ten individual showers (lines) are compared to the average shower profile of 10^5 GeV vertical proton shower.

Distribuzione laterale e contenuto in μ degli sciami adronici

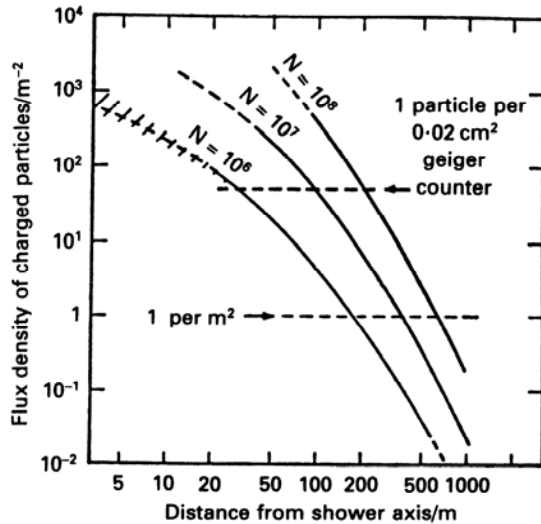


Figure 9.8. The distribution of charged particles as a function of distance from the axes of extensive air-showers of different sizes as described by the total number of particles in the shower. (From A. M. Hillas (1972). *Cosmic Rays*, page 87. Oxford: Pergamon Press.)

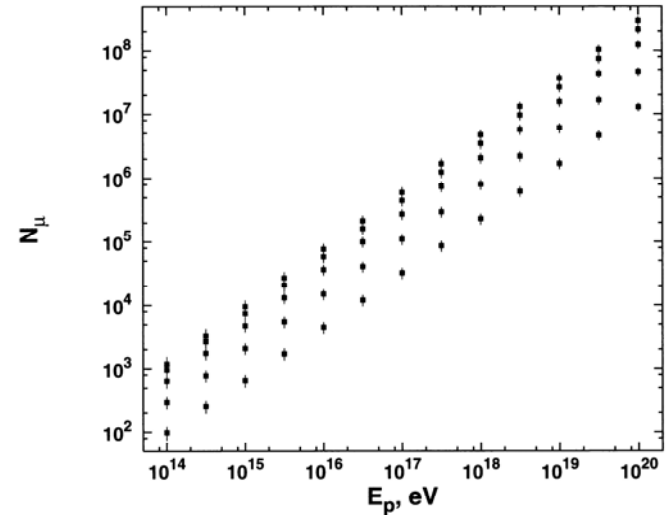


Fig. 8.11. Average number of muons at sea level in vertical proton showers as a function of the primary energy in GeV. From top to bottom the muon energy thresholds are 0.3, 1, 3, 10, and 30 GeV.

Distribuzione laterale

La piu' gran parte degli esperimenti non misurano direttamente la distribuzione longitudinale, ma quella laterale

Misure in un piano perp. all'asse dello sciame, ad una qualche profondita' atmosferica

Larghezza dominata dallo scattering multiplo degli elettroni (adroni presenti solo nel "core") → distribuzione laterale simile a quella puramente e.m. (a parte i mesoni μ)

$$\rho(r) = \frac{N}{(r_1)^2} f\left(s, \frac{r}{r_1}\right)$$

$$f\left(s, \frac{r}{r_1}\right) = \left(\frac{r}{r_1}\right)^{s-2} \left(1 + \frac{r}{r_1}\right)^{s-4.5} \frac{\Gamma(4.5-s)}{2\pi \Gamma(s)\Gamma(4.5-2s)}$$

*N = n° elettroni
nello sciame*

*s = "eta" dello
sciame*

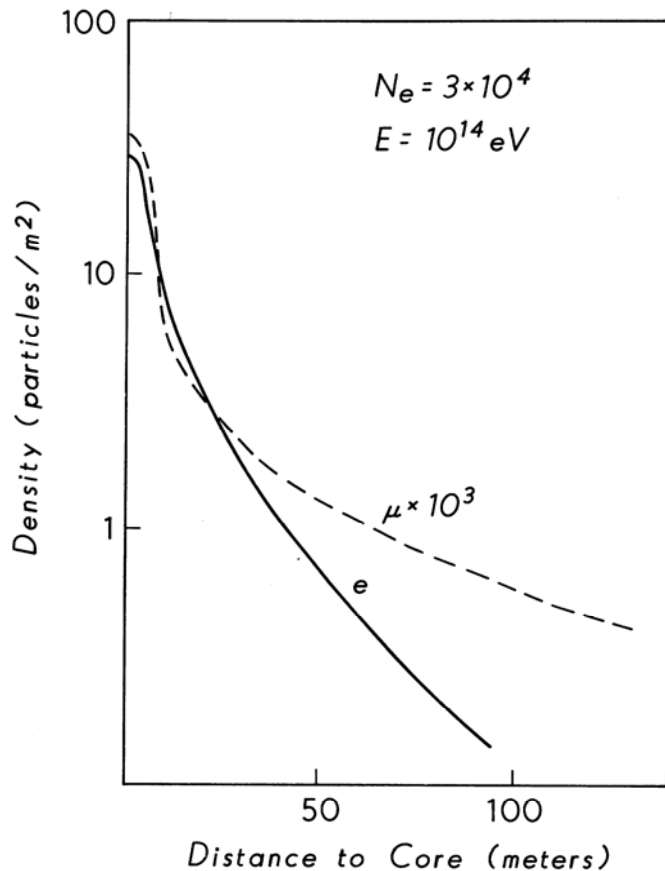
r_1 = raggio di Moliere (79 m al livello del mare)

raggio di Moliere (in unita' di X_0) = $\frac{\text{costante di scattering multiplo}}{\text{energia critica}}$

Distribuzione laterale muoni vs e.m.

*numero di μ dipendente da
probabilità di **decadimento**
vs **interazione***

*Componente muonica riflette
la natura, oltre che l'energia,
dell'adrone iniziale*



$$\rho_{\mu}(r) = 18 r^{-0.75} \left(1 + \frac{r}{320} \right)^{-2.5} \left(\frac{N_e}{10^6} \right)^{0.75} \quad (\mu/\text{m}^2)$$

Distribuzione laterale dei μ per sciami di diverse dimensioni

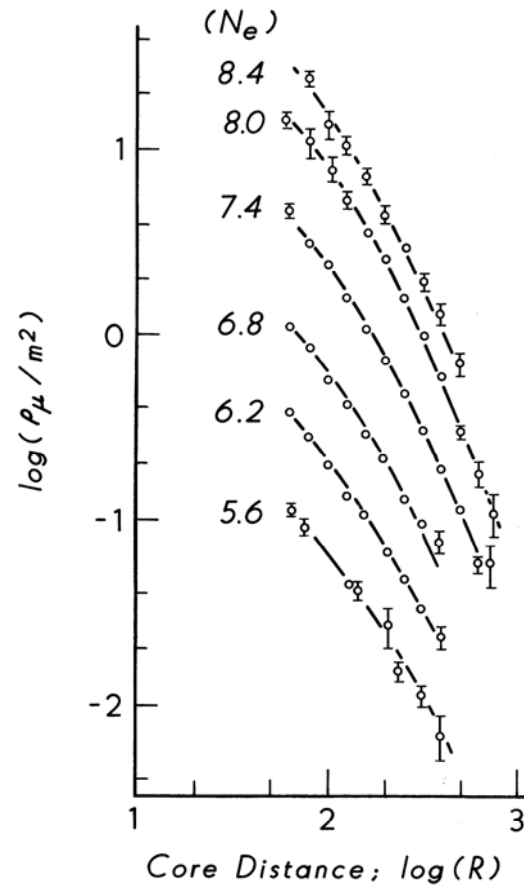


FIGURE 3.4 The muon lateral distribution for R in meters for different shower sizes ($\log N_e$). Circles are data, solid lines are result of fitting Eq. 3.8.

Sciame: sviluppo laterale per particelle incidenti diverse (p, Fe, γ)

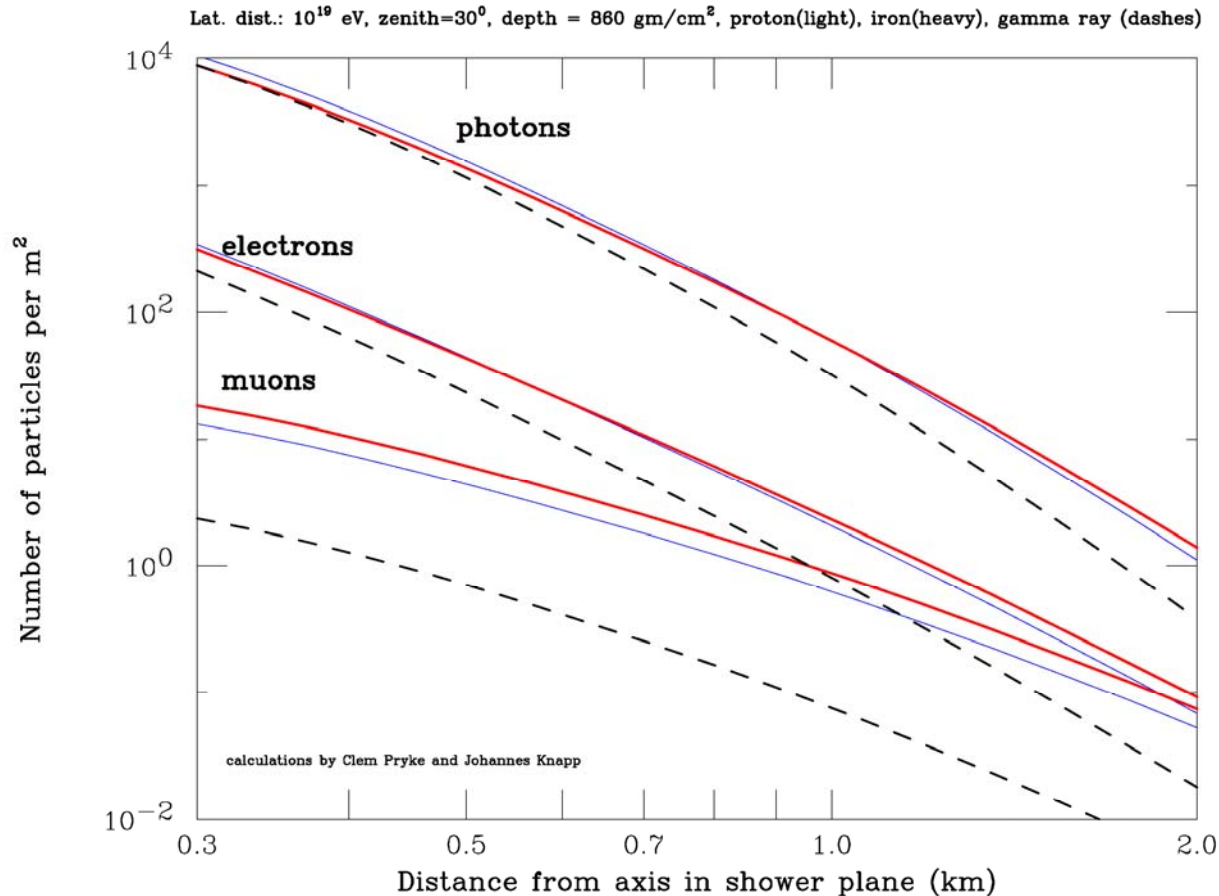


Figure 13: Simulations of the lateral distribution of shower particles. The curves are averages over many showers. These are the densities in the plane perpendicular to the axis of 10^{19} eV proton, iron, or gamma ray initiated showers.

Simulazioni MC e misure sperimentali (Auger)

Sciami con zenit $< 60^\circ$

Sciami con angoli maggiori (**sciami orizzontali**) dominati da mesoni μ
← componente e.m. fortemente assorbita.

Sciame di 10^{19} eV produce, al suo massimo, 7×10^9 particelle ~ vicine all'asse dello sciame (~ direzione part. incidente) 80% delle particelle entro ~100 m dall'asse

Energia dello sciame :

$$E \cong 2.2 \int N_e(X) dX \quad (\text{MeV})$$

$$2.2 \text{ MeV}/(\text{g cm}^2) = \frac{dE}{dx} \text{ per elettroni all'energia critica}$$

$N_e(X)$ = numero di particelle dello sciame alla profondità atmosferica X (g/cm^2)

La determinazione dell'energia richiederebbe la conoscenza di $N(X)$.

Cio' e' possibile nei rivelatori a fluorescenza.

Nei rivelatori di superficie si ricorre a misure della distribuzione laterale

Distribuzione laterale

Contributo degli adroni trascurabile a distanze maggiori di circa 100 m

Densita` di fotoni quasi uguale per sciame da P e da Fe tra 500 e 1000 m

Densita` di elettroni “ “ “ “

Sciame da Fe comincia a svilupparsi piu` in alto → particelle piu` disperse

Ma anche piu` attenuate → due effetti si compensano

Sciami indotti da fotoni molto diversi (distribuzione molto piu` “stretta”)

Si sviluppano molto piu` in profondita` nell'atmosfera → facile identificazione

Inoltre, contributo dei μ negli sciame iniziati da fotoni molto minore (5 volte)

Distribuzioni laterali dell'energia per protoni da 10^{19} eV

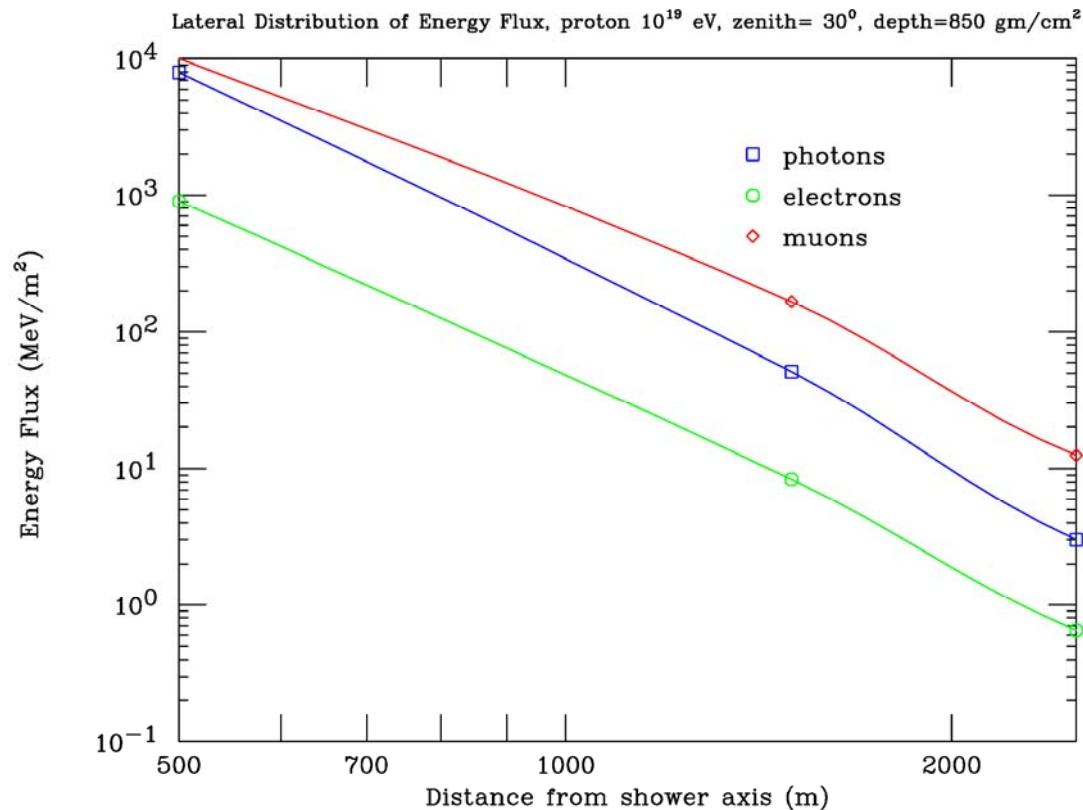


Figure 16: The lateral distribution of the integrated energy flux for each shower component.

Componenti dell'energia dello sciame

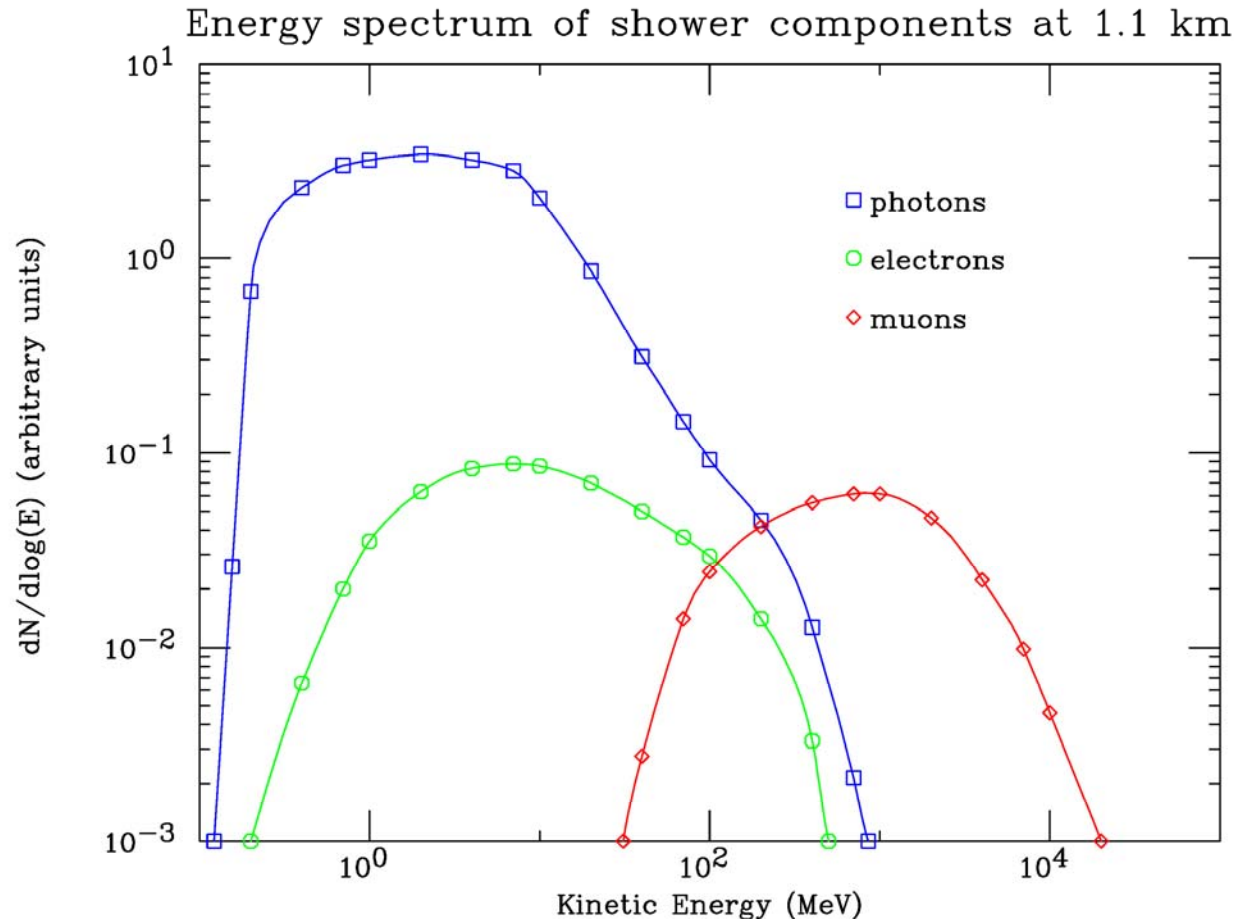


Figure 15: Energy spectrum of the shower components at 1.1 km. The spectrum of the electromagnetic components does not vary much beyond 1 km. At 2 km the peak of the muon spectrum is shifted from 1 GeV to 600 MeV.

Distribuzione longitudinale degli sciame

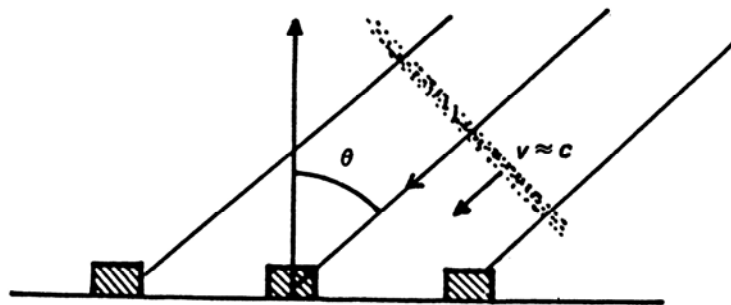


Figure 9.9. A diagram illustrating the arrival of an extensive air-shower at zenith angle θ .

Monte Chacaltaya (Bolivia) 5200 m $\rightarrow$ 5200 (kg m^{-2})

Misure a valori diversi di θ rispetto al piano orizzontale

Lunghezza effettiva attraversata da un raggio cosmico: $5200 \sec\theta$ (kg m^{-2})

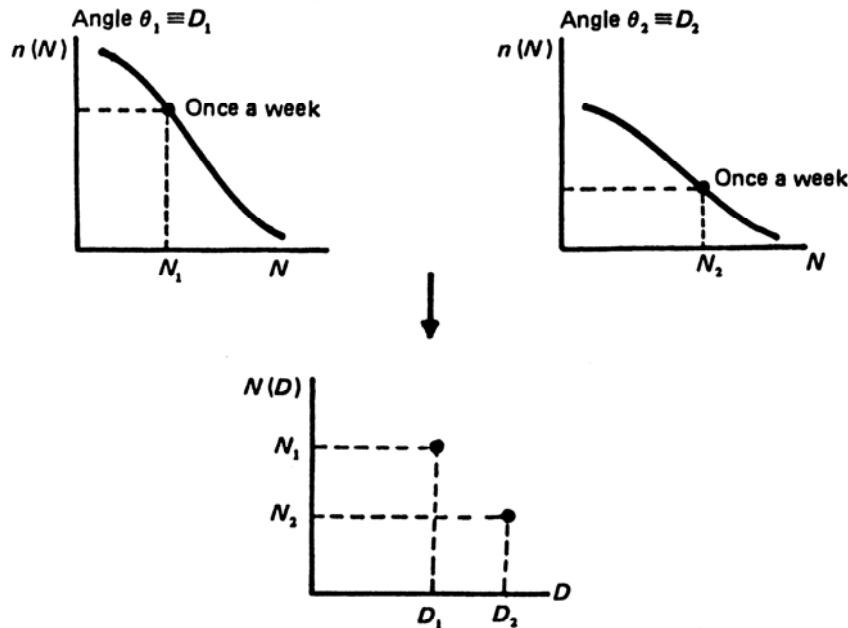
Due eventi di uguale energia hanno frequenze temporali uguali, indipendentemente dall'angolo !

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

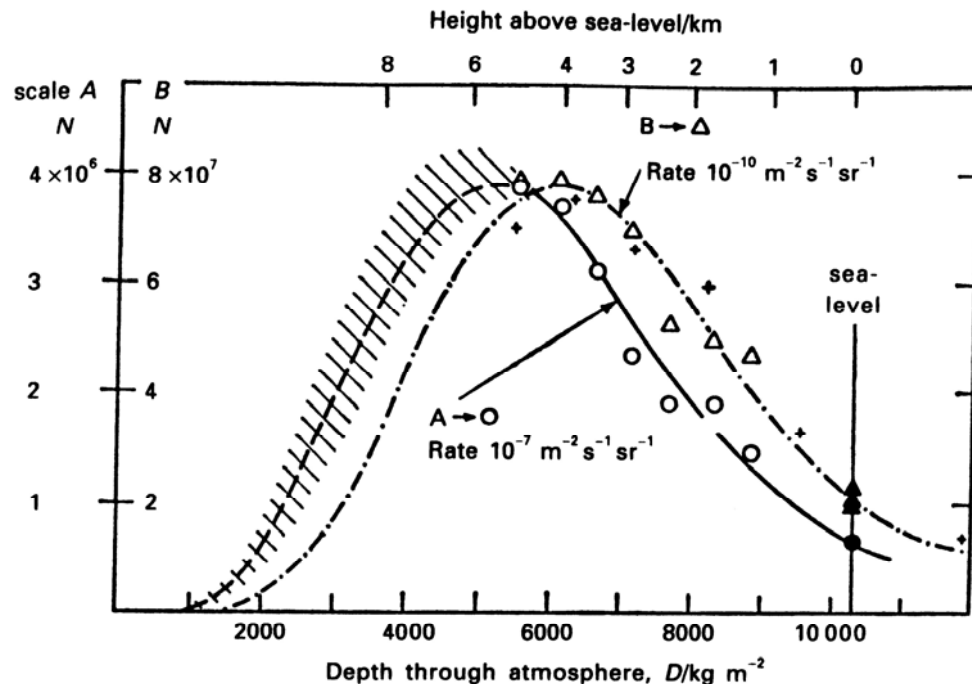
Distribuzione longitudinale degli sciame



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

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 $5200 \sec \theta \text{ kg m}^{-2}$.

Distribuzione longitudinale degli sciami



Distribuzione ottenuta
con il metodo descritto
in precedenza

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.)

Distribuzione longitudinale degli sciami

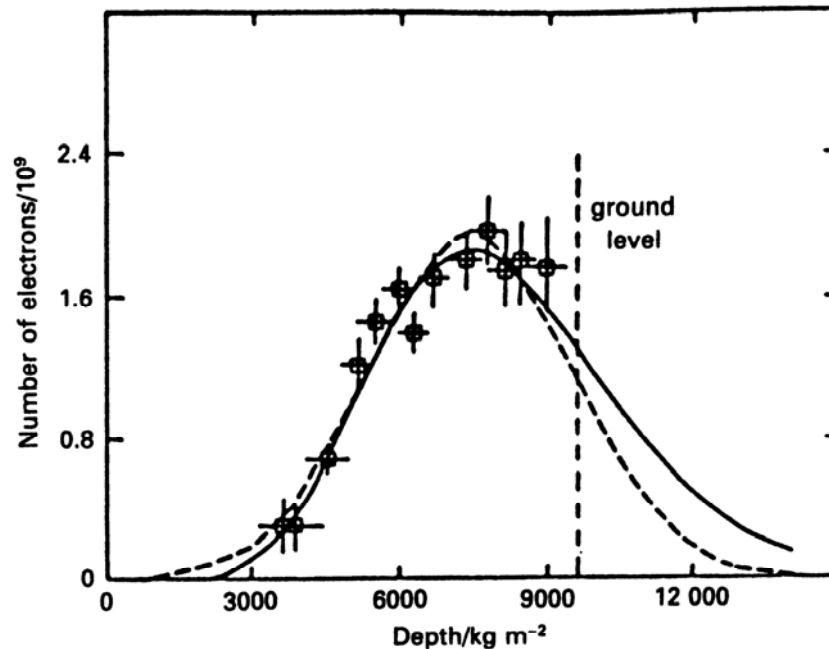


Figure 9.12. The determination of the development of an extensive air-shower through the atmosphere using the 'Fly's Eye' technique. The energy of the primary particle was 2×10^{18} eV and the angle of the shower from the vertical was 28° . (From A. A. Watson (1985). *19th intl. cosmic ray conference*,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

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

Sciami: sviluppo longitudinale

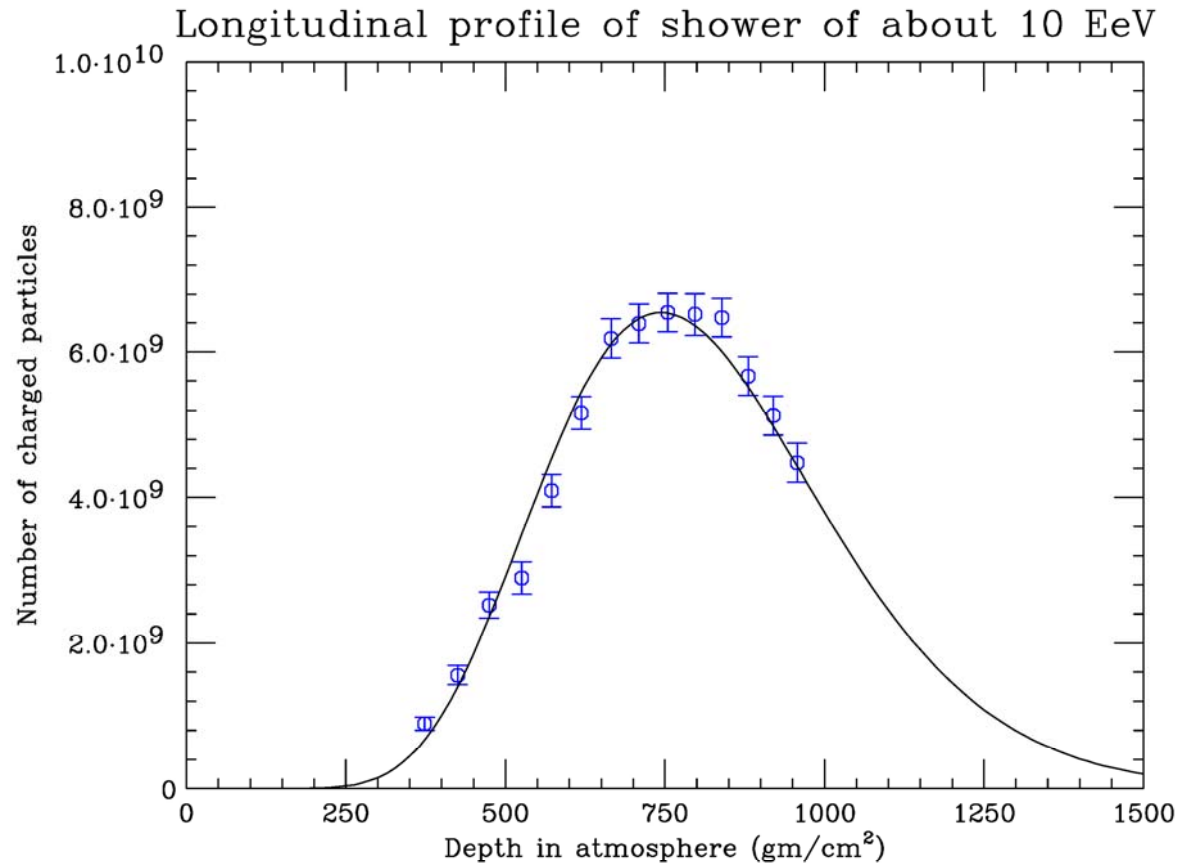


Figure 11: Longitudinal development of a 9 EeV shower in the atmosphere. The solid line is an empirical fit to the shower development. The red points are the measurements of the shower development by detection of its nitrogen fluorescence.

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)

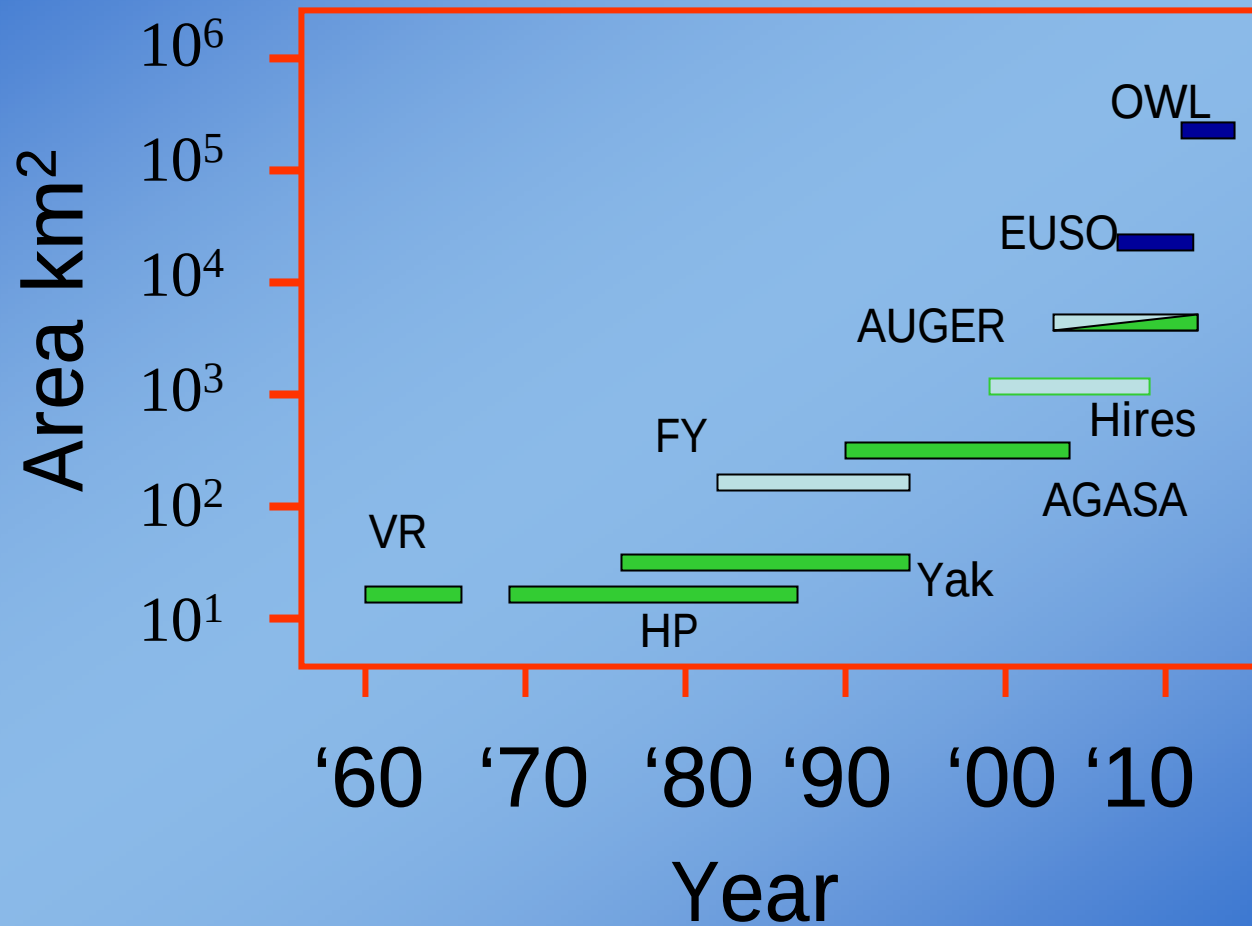
Fluttuazioni minori poiche' e.g. nel caso del Fe → 56 nucleoni → 56 sciame di singolo nucleone, ciascuno dei quali ha 1/56 dell'energia

Minore energia → minore $X_{\max}$

($X_{\max}$ e' una funzione crescente dell'energia)

Detectors for UHECR

Detectors for UHECR



Rivelatori di fluorescenza

FLY's EYE TECHNIQUE

Azoto dell'atmosfera eccitato dalle particelle dello sciame → emissione di luce in modo isotropo in 10-50 ns
Banda ottica: 300-400 nm
Buona trasparenza dell'atmosfera ($\lambda \sim 15$ km).
Piccolo numero (~ 4) di fotoni/m

Esempio:
 10^9 elettroni che attraversano
700 m di atmosfera a 20 km dal rivelatore:
di fotoni emessi: 2.8×10^{12}
sparsi su di una superficie di:
 $\pi D^2 = 5 \times 10^{13} \text{ cm}^2 \rightarrow 0.056 \text{ ph/cm}^2$

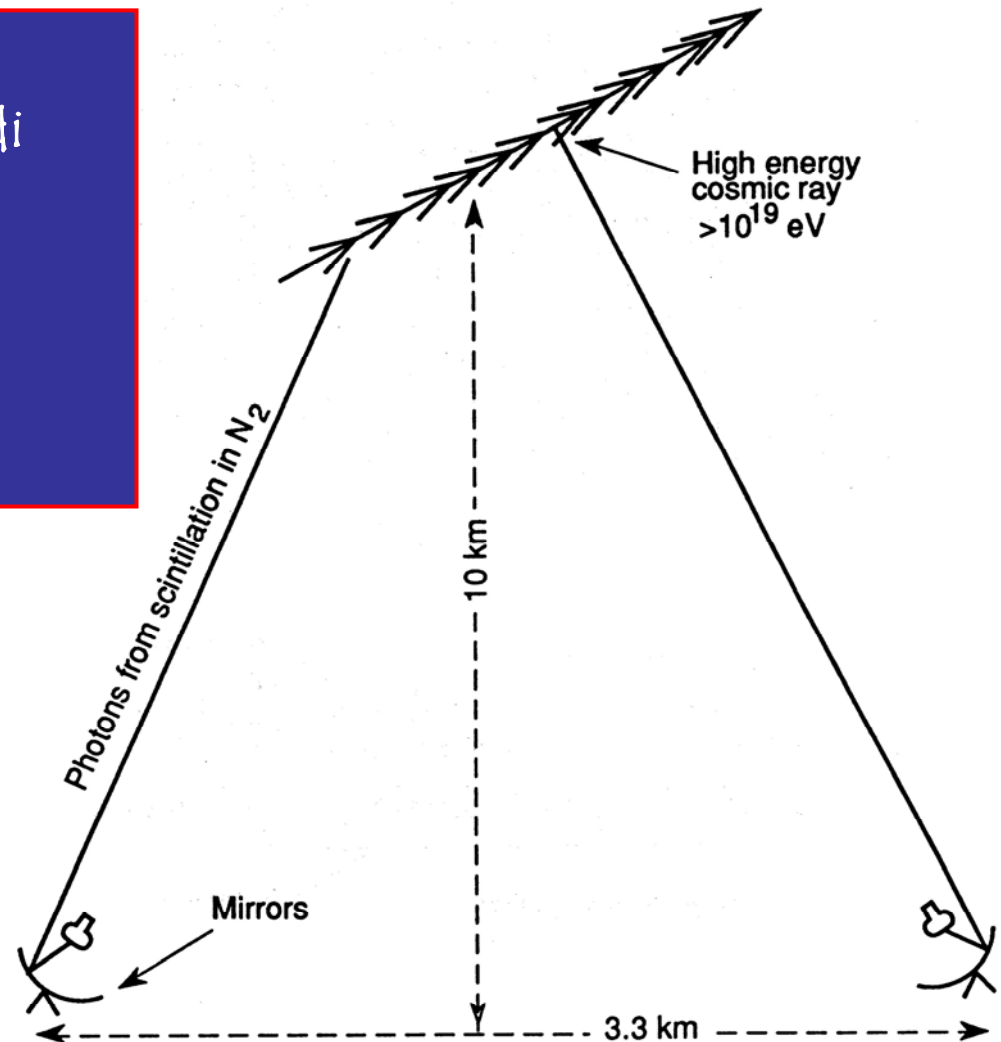


Figure 17: Fly's Eye technique [14].

Rivelatori di fluorescenza: spettro di emissione

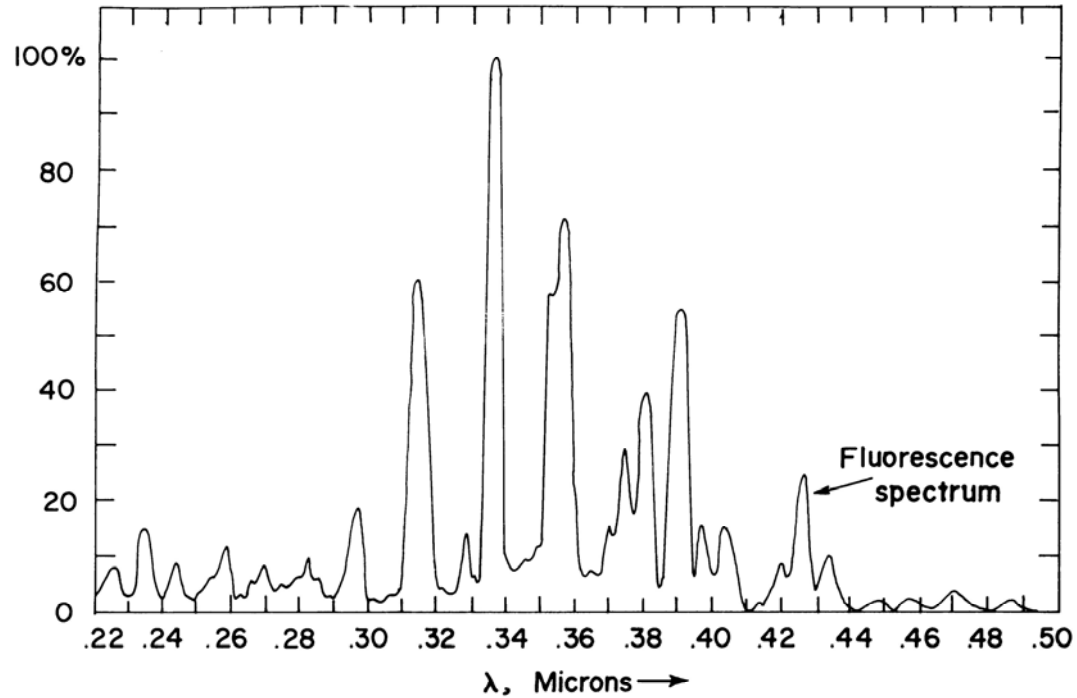


FIGURE 6.1 Spectrum of nitrogen fluorescence in the near ultraviolet.

Rivelatori di fluorescenza: fotoni per unita' di percorso

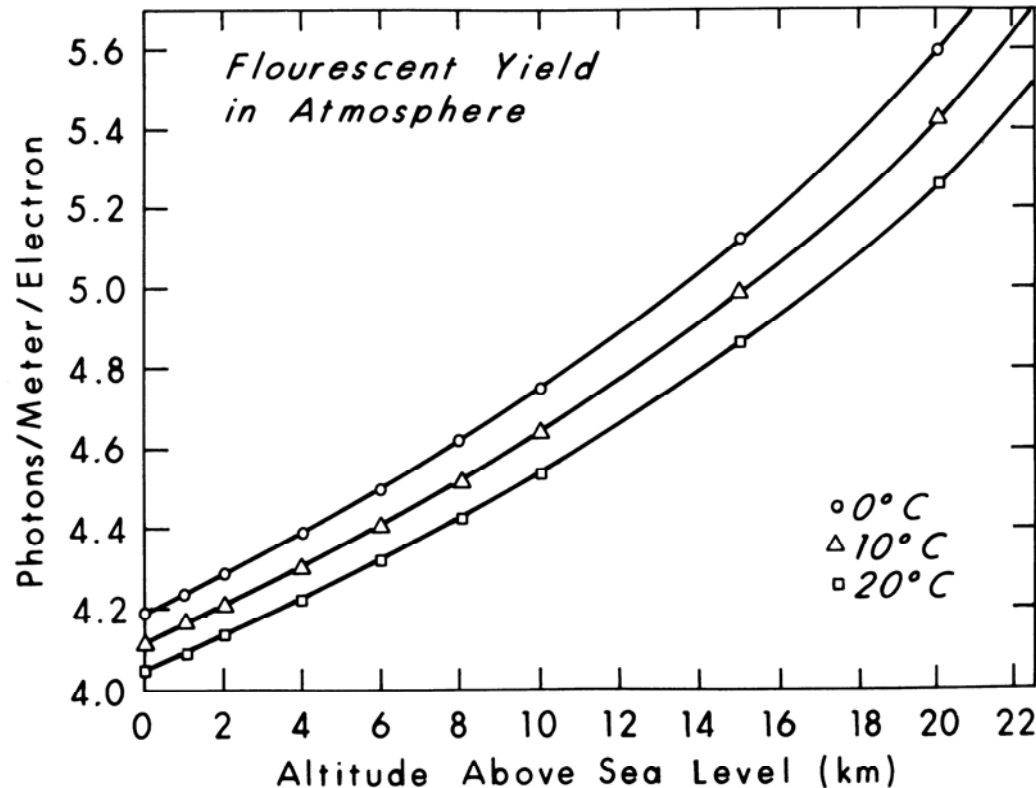


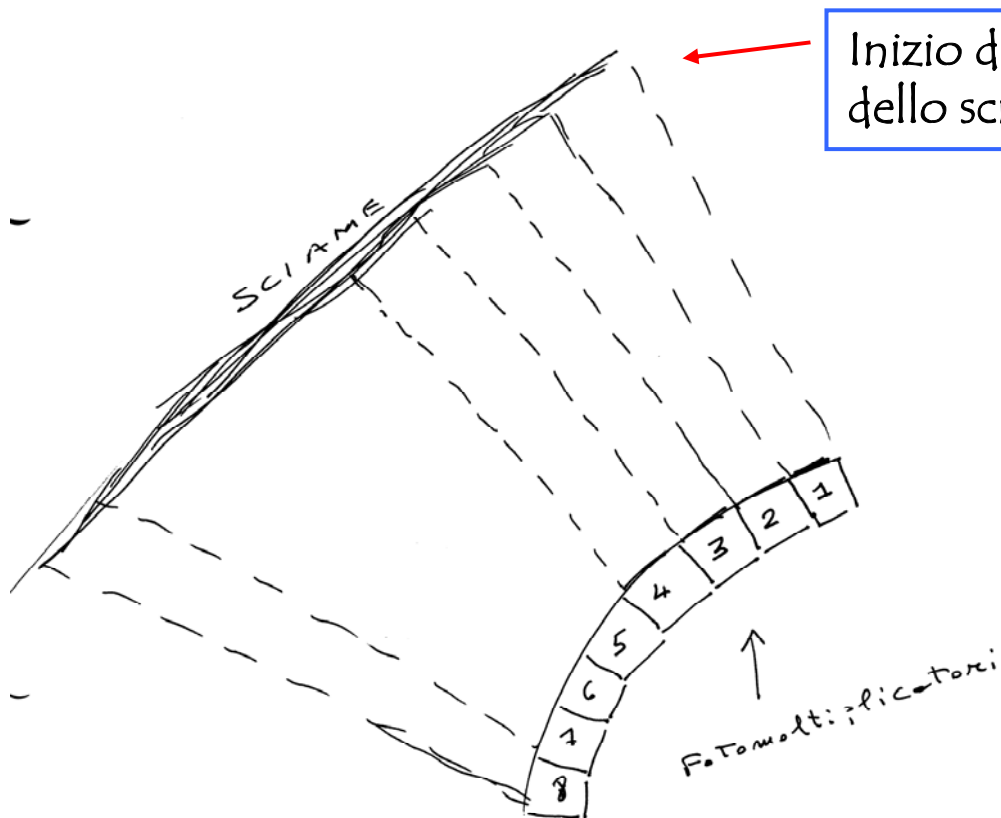
FIGURE 6.2 Temperature and altitude dependence of nitrogen fluorescence yield.

Il numero di fotoni per unita' di lunghezza dipende relativamente poco dalla temperatura e dall'altezza

Rate di produzione di fotoni all'incirca indipendente dalla pressione: se la pressione aumenta, aumenta dE/dx e quindi si potrebbe pensare che aumenti il # di fotoni; ma aumentano anche le collisioni tra atomi di N_2 , che causano de-eccitazione

Per risalire all'energia dal numero di particelle cariche rivelate, occorre conoscere la densita' dell'atmosfera nella zona di sviluppo dello sciame

Rivelatori di fluorescenza: sviluppo temporale



Inizio dello sviluppo
dello sciame

I fotoni di fluorescenza emessi
via via che lo sciame si sviluppa
sono "visti" in sequenza dai
fotomoltiplicatori 1, 2, 3,....
I fotomoltiplicatori sono disposti
su di una superficie approssimativ-
-amente sferica. Ciascun PMT "vede"
solo un ristretto campo angolare
(~ 1 grado).

Maggiori rivelatori sviluppati:
Fly's eye (Utah)
HiRes
Auger

Rivelatori di fluorescenza: schema base

Luce raccolta da grandi specchi, poi focalizzata sul mosaico di PMT di figura

Per un tale rivelatore, lo sciame appare come un punto luminoso che si muove nel cielo alla velocità della luce

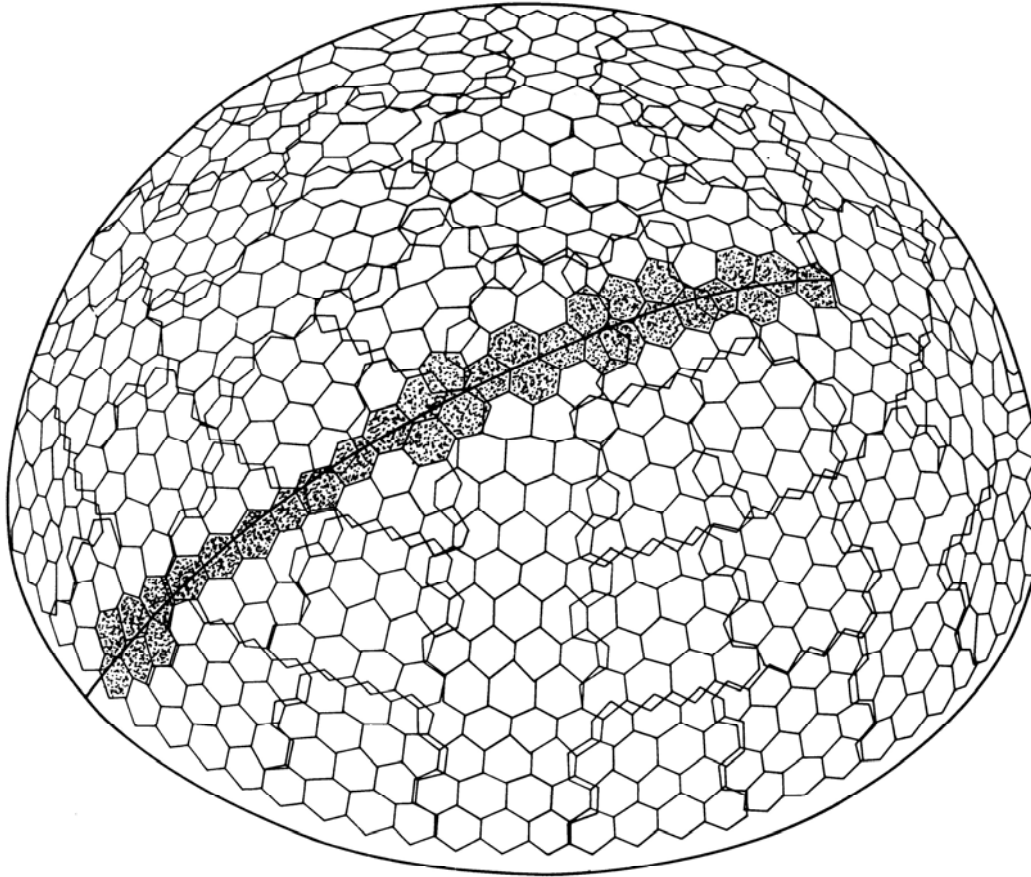


FIGURE 6.3 “Fly’s Eye” phototube apertures. Shaded region represents light from EAS striking the detector. The solid line indicates the EAS trajectory across the sky.

Rivelatori di fluorescenza: aspetto degli eventi

Il piano che contiene la circonferenza passante per i fotomoltiplicatori interessati e' quello che contiene lo sciame ed il rivelatore

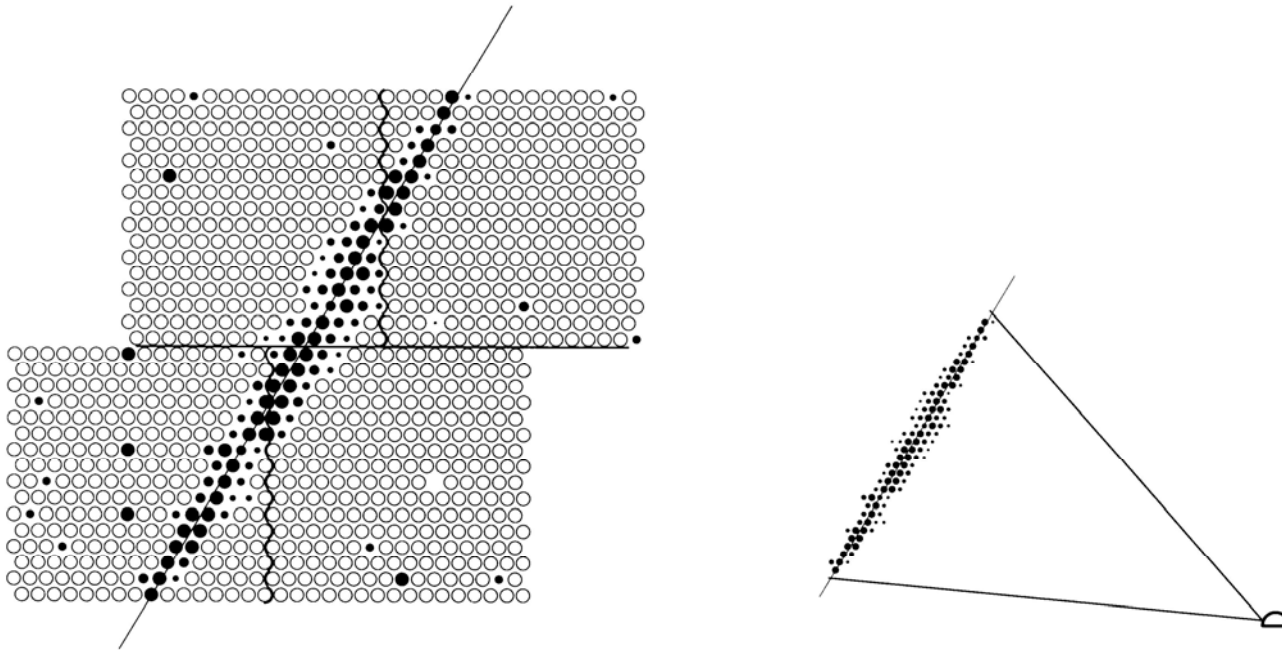


Fig. 8.17. The left-hand panel shows an image of a shower detected by a fluorescent detector. PMTs fire in brief intervals to outline the shower trajectory. Some PMTs are fired because of chance coincidences. The right-hand panel shows how the observed shower trajectory and the detector itself (the little hemisphere at lower right) define the shower-detector plane.

Rivelatori di fluorescenza: rumore

Rumore ottico da:

- luce stellare
- radiazione diffusa dalla Galassia
- luce dovuta a processi chimici nell'atmosfera
- Luce Cerenkov da raggi cosmici

Segnali tipici →

500-1000 fotoelettroni per sciame

Fondo tipico →

500,000 fotoni/(m² sr μs)

Rumore :

$$N_{noise} \cong (\varepsilon A B \Delta\Omega \Delta t)^{\frac{1}{2}}$$

ε = efficienza quantica dei PMT

A = area dello specchio

B = luce di background

$\Delta\Omega$ = angolo solido sotteso dal singolo PMT

Δt = tempo d'integrazione dell'elettronica

Segnale :

$$N_{ph} \cong N_e N_\gamma \varepsilon \left(\frac{1 + \cos \theta}{\sin^2 \theta} \right) \frac{A}{4\pi r^2} e^{-r/\lambda_R} c \Delta t$$

N_e = numero di elettroni dello sciame nel campo di vista del PMT

N_γ = fotone prodotto per elettrone nel processo di fluorescenza

λ_R = lunghezza di scattering dei fotoni nell'atmosfera (Rayleigh)

r = distanza del segmento di sciame visto dal PMT, da questo

θ = angolo tra la direzione dello sciame e la congiungente il segmento di sciame con il PMT

Rivelatori di fluorescenza: rumore

Rumore :

$$N_{noise} \cong (\varepsilon A B \Delta\Omega \Delta t)^{\frac{1}{2}}$$

ε = efficienza quantica dei PMT

A = area dello specchio

B = luce di background

$\Delta\Omega$ = angolo solido sotteso dal singolo PMT

Δt = tempo d'integrazione dell'elettronica

Segnale :

$$N_{ph} \cong N_e N_\gamma \varepsilon \left(\frac{1 + \cos \theta}{\sin^2 \theta} \right) \frac{A}{4\pi r^2} e^{-r/\lambda_R} c \Delta t$$

N_e = numero di elettroni dello sciame nel campo di vista del PMT

N_γ = fotone prodotto per elettrone nel processo di fluorescenza

λ_R = lunghezza di scattering dei fotoni nell'atmosfera (Rayleigh)

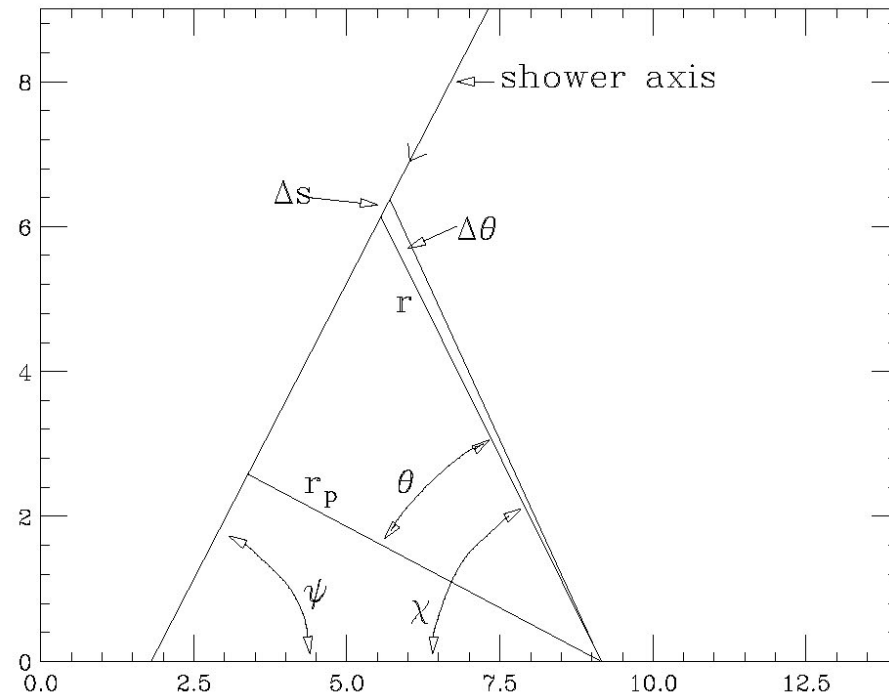
r = distanza del segmento di sciame visto dal PMT, da questo

θ = angolo tra la direzione dello sciame e la congiungente il segmento di sciame con il PMT

$$\text{Rapporto segnale/rumore : } S/N = N_e N_\gamma \sqrt{\frac{\varepsilon A \Delta t}{B \Delta\Omega}} \frac{1 + \cos \theta}{4\pi R_p^2} e^{-r/r_\lambda}$$

Dove R_p e' la distanza tra la retta lungo cui si propaga lo sciame, ed il rivelatore

Rivelatori di fluorescenza: geometria e segnale



Numero di fotoelettroni al rivelatore:

$$p_e = \left[(\Delta s \eta) \varepsilon \left(\frac{A}{4\pi r^2} \right) \delta \right] N_e; \text{ dove:}$$

A = area dello specchio (m^2)

Δs = lunghezza del segmento di sciame

ε = efficienza ottica (prodotto dell'efficienza quantica del PMT, del coefficiente di trasmissione del filtro adoperato e della riflettività dello specchio)

η = numero di fotoni di fluorescenza per metro

r = distanza del segmento di sciame

δ = trasmissione ottica sulla distanza r

$$r = r_p / \cos \theta; \quad \Delta s = r \Delta\theta / \cos \theta \Rightarrow \frac{p_e}{A} = \frac{\eta \varepsilon \Delta\theta}{4\pi} \frac{\delta}{r_p} N_e$$

Rivelatori di fluorescenza: numero di p.e.

Numero di fotoelettroni al rivelatore:

$$\frac{p_e}{A} = \frac{\eta \varepsilon \Delta\theta}{4\pi} \frac{\delta}{r_p} N_e$$

Numericamente, e.g.:

$$\eta = 4.5 \text{ fotoni/m}; \varepsilon = 0.16; \Delta\theta = 1^\circ (0.0174 \text{ rad}) \Rightarrow$$

$$\frac{p_e}{m^2 \text{ grado}} \cong 10^{-6} \frac{\delta}{r_p} N_e \quad (\text{con } r_p \text{ in km})$$

Per uno sciame di 10^{19} eV, al massimo dello sciame $\Rightarrow \approx 7 \times 10^9$ particelle;

inoltre, lunghezza d'attenuazione $\cong 10$ km; segue che per $r_p = 20 \text{ km}$:

$$50 \text{ } p_e / m^2 \quad \text{in un angolo di } 1^\circ$$

Rivelatori di fluorescenza: ricostruzione degli eventi

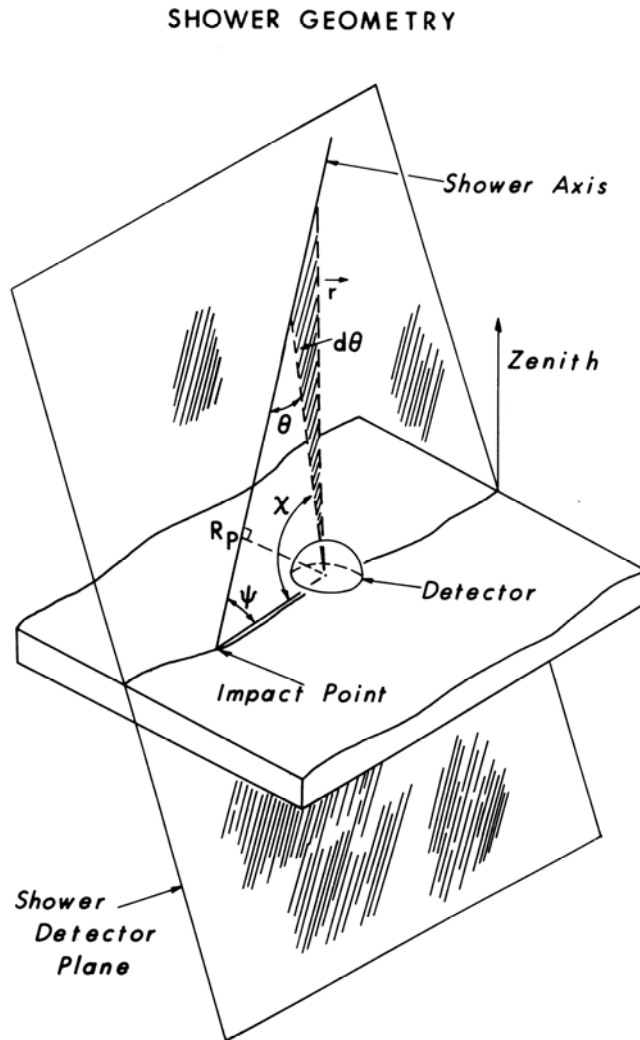
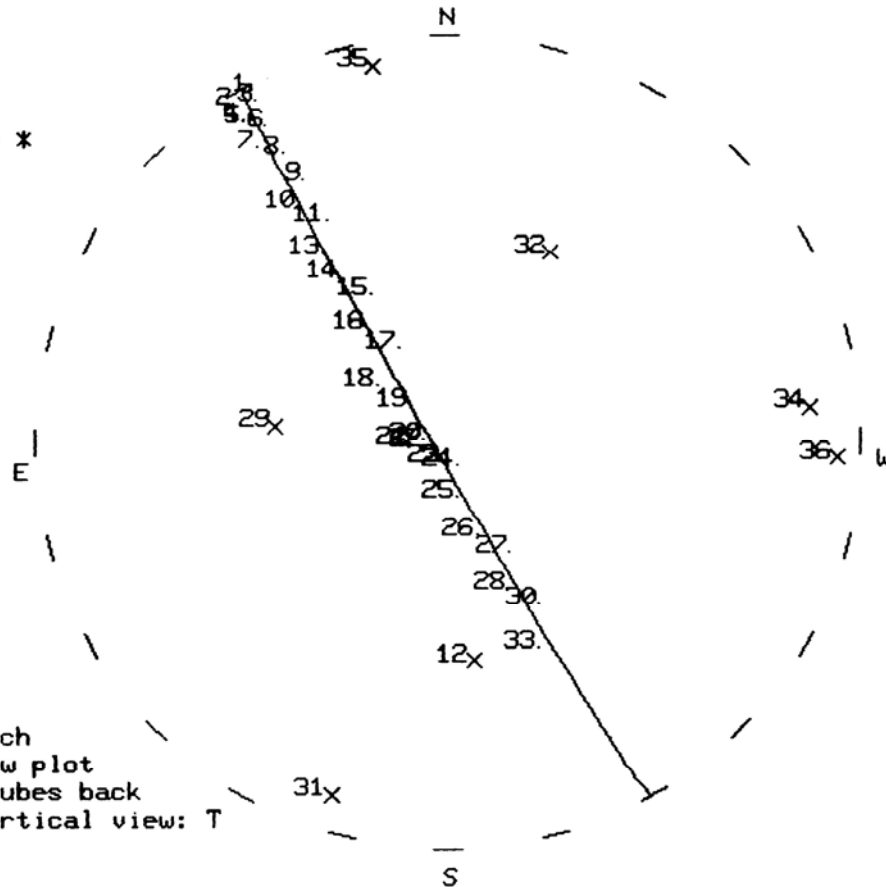


FIGURE 6.4 Reconstruction geometry. Once the shower detector plane is determined, the remaining variables to be determined are R_p and ψ . The shaded area $d\theta$ represents the field of view of a tube.

Rivelatori di fluorescenza: timing

FILE 9-22- 1
EVENT 340
FEII TRIG STATUS= *

M-Modify
T-Time fit
A-Accept event
R-Reject event
P-Prt evt/Chg latch
N/Q/S-#,Quick,Slow plot
U/B-Unslice,all tubes back
H/V-Horizontal,Vertical view: T



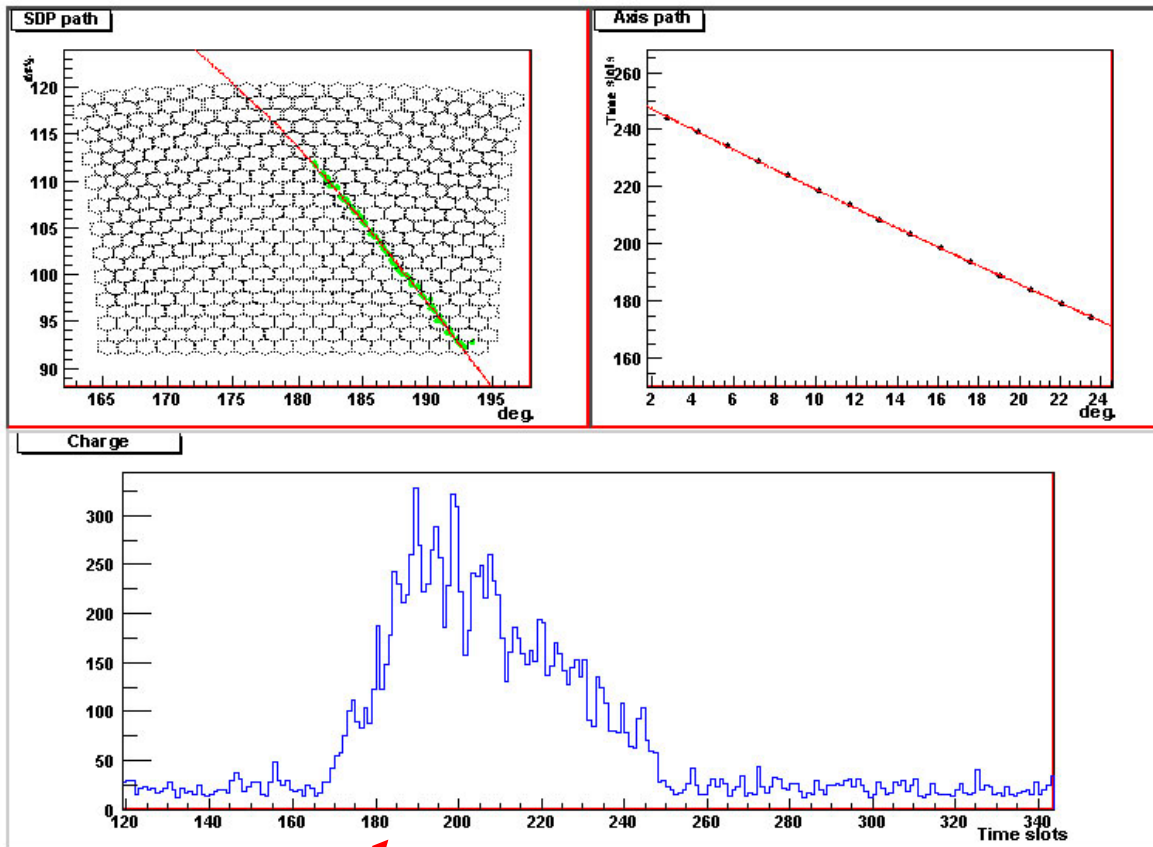
Timing dell'evento

I fotomoltiplicatori forniscono segnali consecutivamente, via via che lo sciame entra nel "campo di vista" di ciascun PMT

Velocita' angolare dell'immagine di uno sciame verticale:
 $\sim 1^\circ/\mu\text{s}$ ad una distanza di 20 km. Cambia molto al cambiare della inclinazione dello sciame

FIGURE 6.5 Typical event showing phototubes triggered by light from the EAS.

Rivelatori di fluorescenza: evento tipico



Luce rivelata in funzione del tempo
(bins di 100 ns)

L'informazione in alto a sinistra, insieme alla direzione in cui punta ciascun PMT, serve a definire il piano che contiene il rivelatore e lo sciame (SDP). La normale a tale piano è determinata con la precisione di qualche decimo di grado.

In alto a destra: tempo d'arrivo dei fotoni su ciascun PMT in funzione dell'angolo χ_i . Utile per determinare la direzione dello sciame nel piano SDP

Ricostruzione "Mono"

spazio percorso tra l'istante in cui lo sciame passa per il punto O

e quello in cui la radiazione emessa in P raggiunge il rivelatore: $c(t_i - t_0) = l_i + d_i$

$$\chi_i + \beta_i = \frac{\pi}{2} - \psi \Rightarrow \beta_i = \frac{\pi}{2} - \psi - \chi_i \Rightarrow \tan \beta_i = \frac{1}{\tan(\psi + \chi_i)}$$

$$\alpha = \psi + \chi_i$$

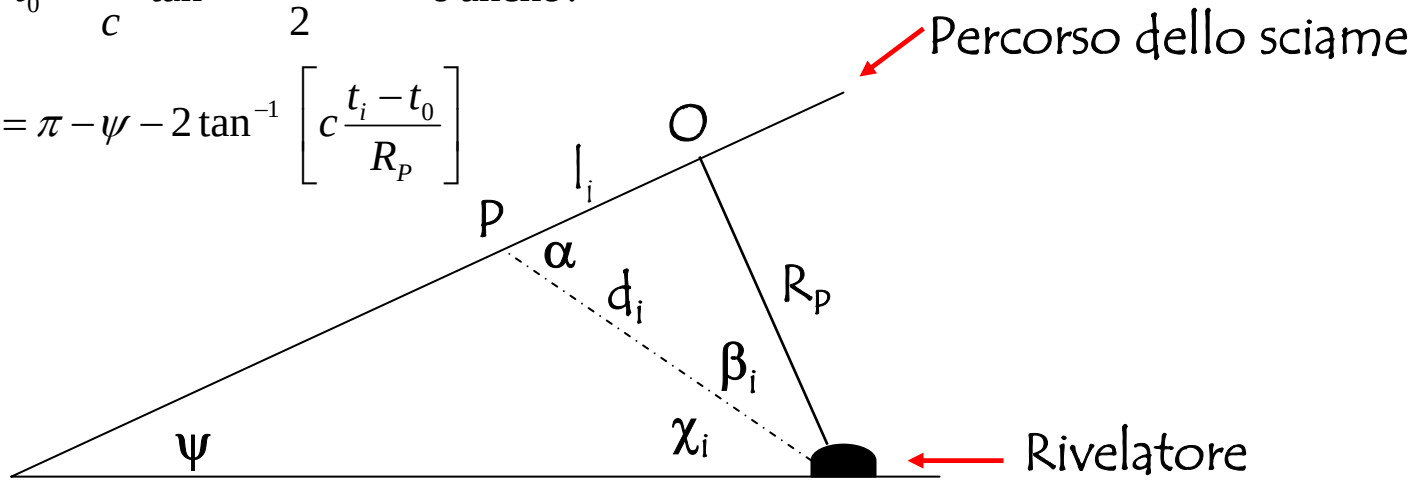
$$c(t_i - t_0) = l_i + d_i = R_p \tan \beta_i + R_p / \sin \alpha = R_p \left[\frac{1}{\tan(\psi + \chi_i)} + \frac{1}{\sin(\psi + \chi_i)} \right] = R_p \left[\frac{1 + \cos(\psi + \chi_i)}{\sin(\psi + \chi_i)} \right] =$$

$$= R_p \tan \frac{\pi - \psi - \chi_i}{2}$$

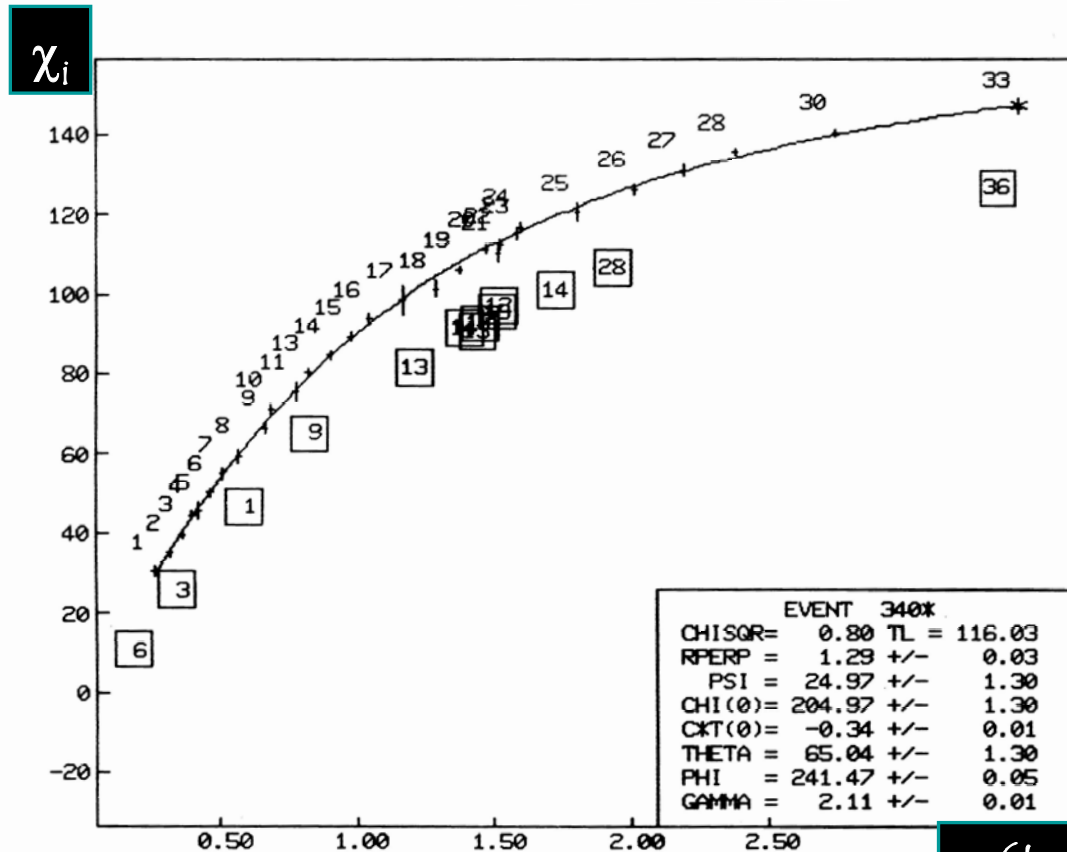
Per cui :

$$t_i - t_0 = \frac{R_p}{c} \tan \frac{\pi - \psi - \chi_i}{2} \quad \text{o anche:}$$

$$\chi_i = \pi - \psi - 2 \tan^{-1} \left[c \frac{t_i - t_0}{R_p} \right]$$



Rivelatori di fluorescenza: Fit Mono



Fit ai dati sperimentali χ_i vs t_i facendo uso della formula ricavata $\rightarrow$

R_p, Ψ, t_0
che caratterizzano lo sciame

Spesso piu' combinazioni di t_0, R_p e Ψ fittano i punti sperimentali
L'ambiguita' puo' esser risolta misurando il tempo d'arrivo a terra del fronte dello sciame
(Rivelatori ibridi)
o anche il metodo "stereo")

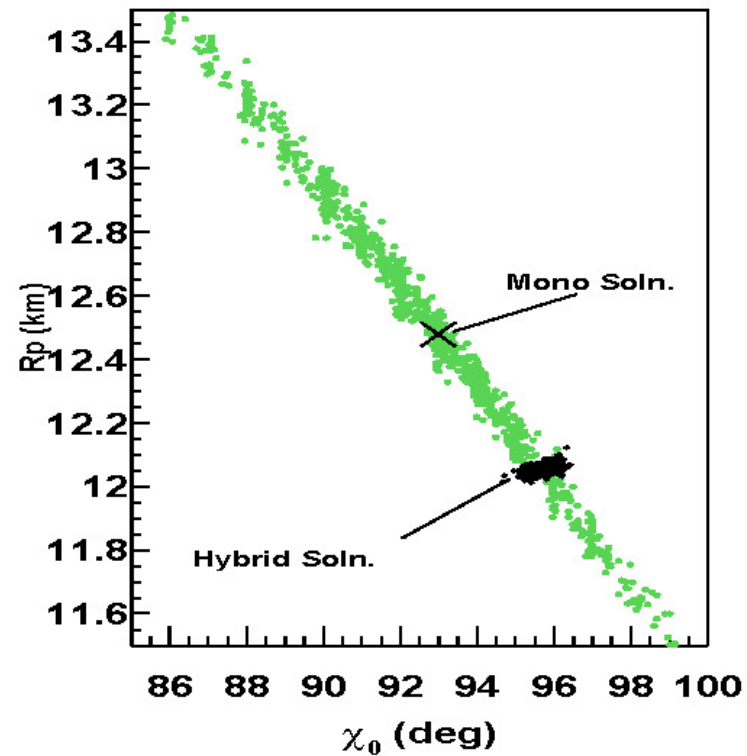
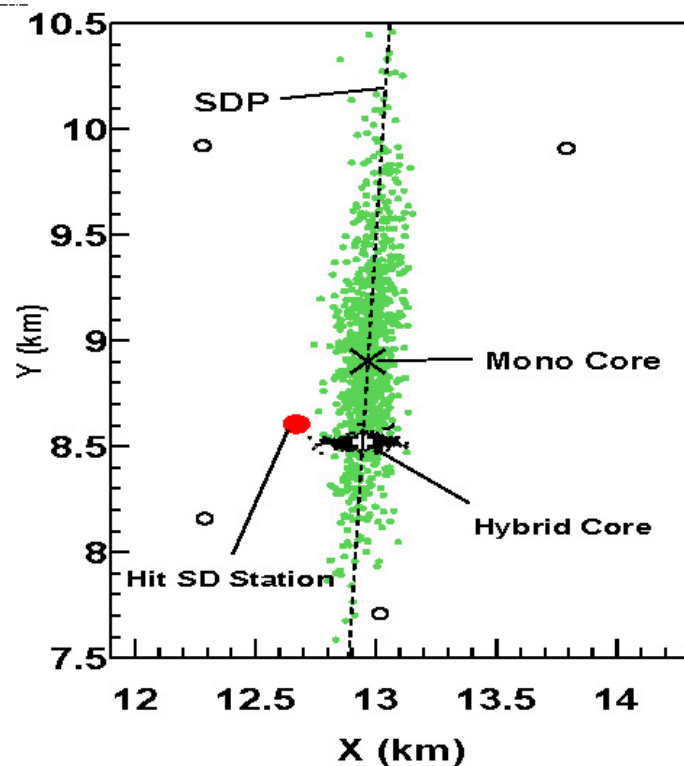
$$c(t_i - t_0)/R_p$$

FIGURE 6.6 Typical event timing curve. Solid line is result of fit to relative timing of Eq. 6.4

Fit Mono: ambiguita'

Spesso piu' combinazioni di R_p e Ψ fittano i punti sperimentali
L'ambiguita' puo' esser risolta misurando il tempo d'arrivo a terra del fronte dello sciame

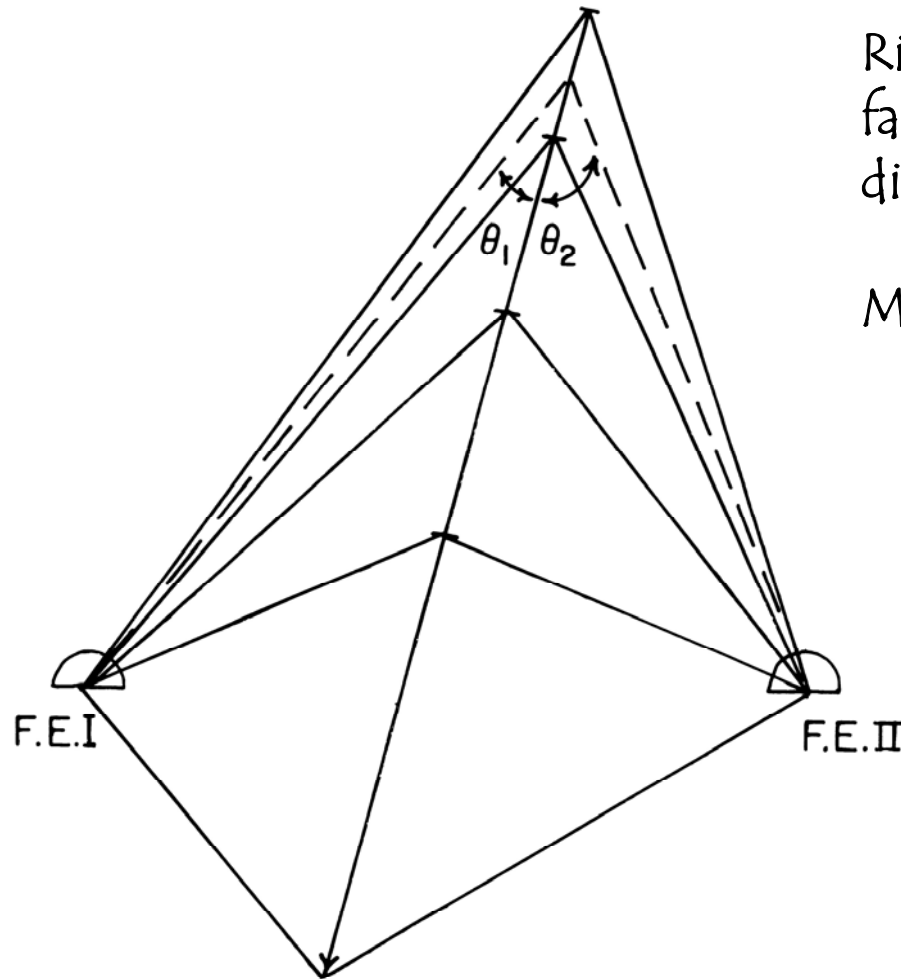
(Rivelatori ibridi o metodo stereo)



Fit Mono vs Rivelatore “Ibrido”

	Errore su $R_p(m)$	Errore su $\Psi(\text{gradi})$
Rivelatore Mono	921	8.05
Rivelatore Ibrido	21	0.24

Rivelatori di fluorescenza: Metodo “Stereo”

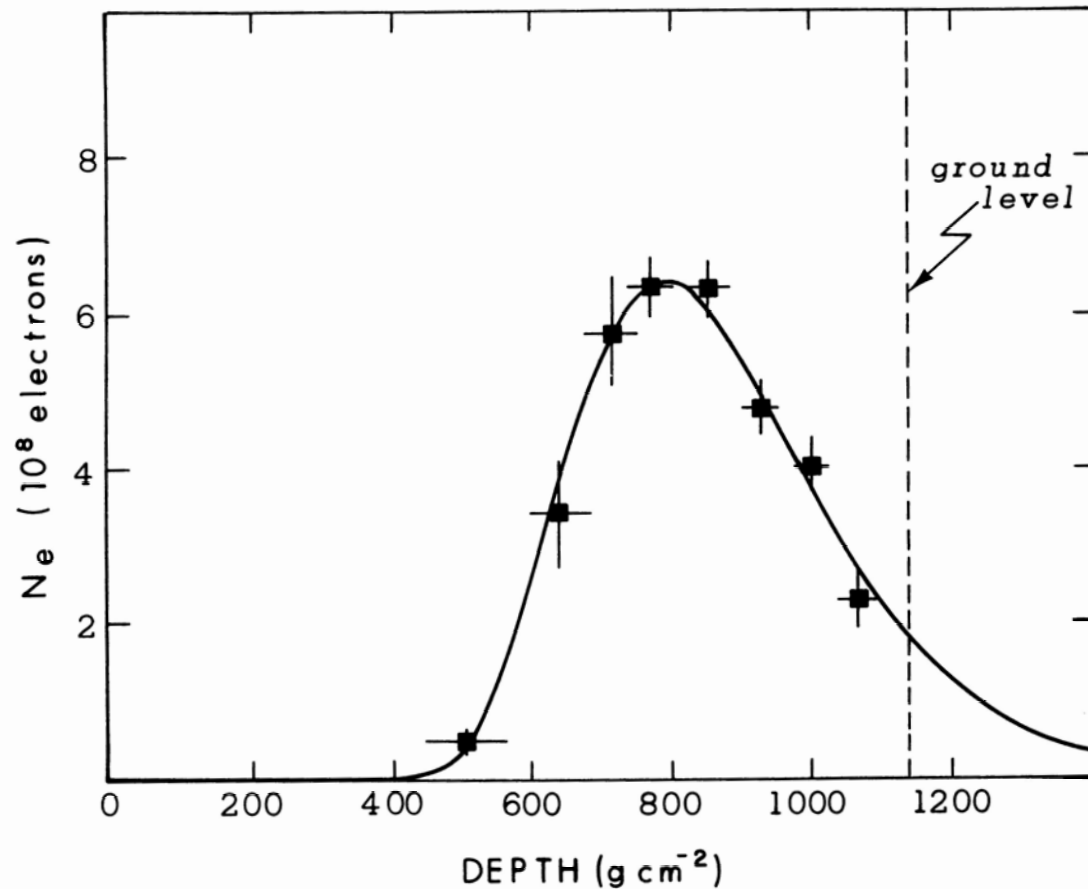


Ricostruzione molto migliorata
facendo uso di due o piu' rivelatori
distanti (metodo stereo)

Ma accettanza ridotta !

FIGURE 6.7 Reconstruction geometry for EAS seen in stereo. θ_1 and θ_2 are emission angles with respect to Fly's Eye I and II.

Rivelatori di fluorescenza: profilo dello sciame



Profilo dello sciame
a varie profondita'

FIGURE 6.9 Typical reconstructed shower size as a function of atmospheric depth.

Rivelatori di fluorescenza: energia mancante

Rivelatori a fluorescenza efficienti solo ad altissime energie (maggiore di $\sim 10^{17}$ eV)

L'energia vista è sostanzialmente quella associata alla componente elettromagnetica dello sciame

Necessario apportare correzioni per l'energia non rivelata (mesoni μ ...)

Molto importanti anche le correzioni per l'attenuazione della luce, legata allo scattering Rayleigh e Mie (sugli aerosol).

Importante un continuo monitoring della attenuazione della luce.

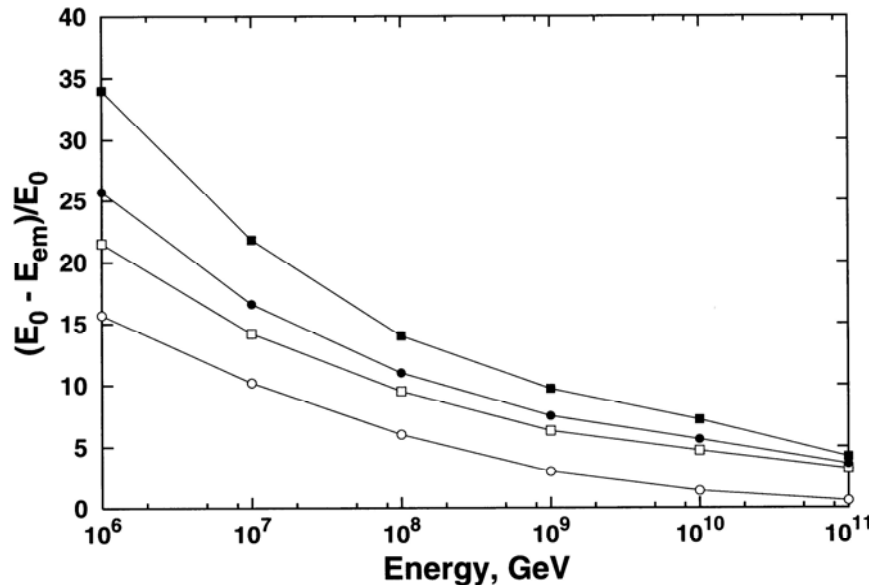


Fig. 8.18. Fraction of missing energy (%) in extensive air showers as a function of the primary energy. Circles indicate proton showers, squares are for primary He, dots for CNO, and filled squares for Fe.

Rivelatori di fluorescenza: correzioni

Variazioni temporali della lunghezza d'attenuazione al sito di Auger

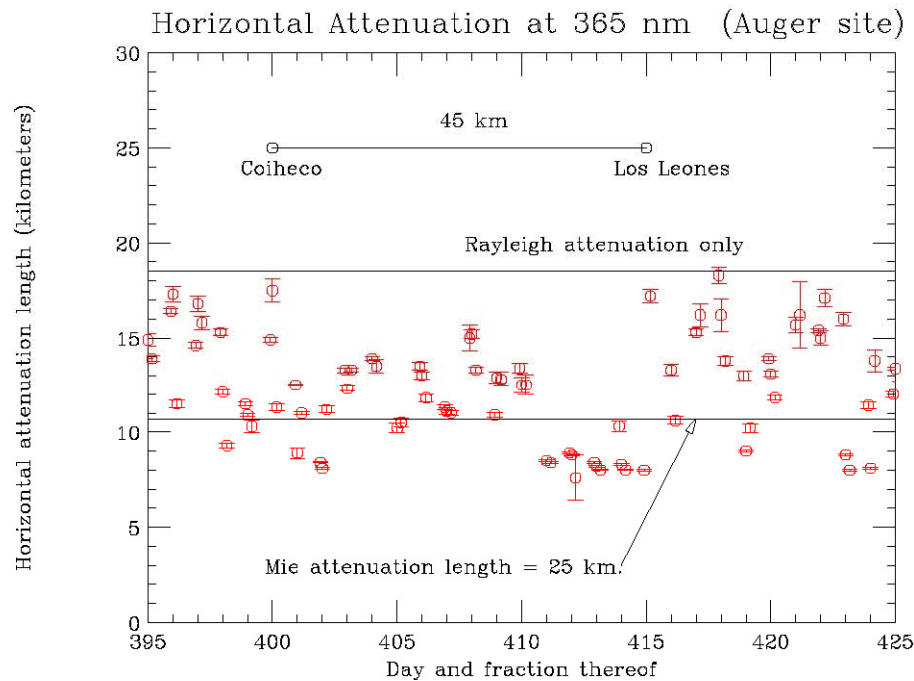


Figure 28: The horizontal attenuation length at the Auger Observatory site, 1400 meters elevation.

Rivelatori di fluorescenza: fondo

Effetti del "fondo" dovuto alla luce Cerenkov diretta ed a quella diffusa

La luce Cerenkov e' concentrata a piccoli angoli rispetto alla direzione dello sciame. Se questo punta verso il rivelatore (entro circa 25°) il contributo della luce Cerenkov diviene importante. Via via che lo sciame si allarga questo genera una ulteriore luce Cerenkov diffusa ad angoli maggiori.

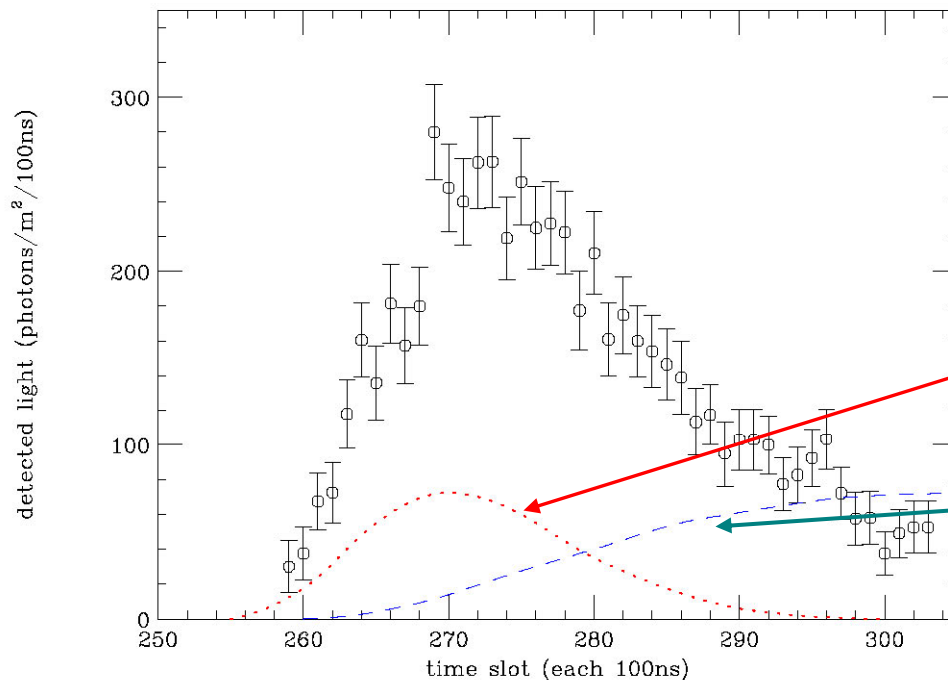


Figure 29: A typical light curve vs time measured by one of the Auger fluorescence telescopes. The points with errors are the observed photons/m²/100ns entering the telescope. Shown is the total signal and the contributions to it by Cherenkov light. The direction of this shower was chosen to show both direct Cherenkov light (dots) and scattered Cherenkov light (dashes).

Rivelatori di fluorescenza: misura dell'energia

Determinazione dell'energia dello sciame.

Nota la dimensione $N_e(X)$ dello sciame, l'energia (elettromagnetica) e' ottenibile da:

$$E = \left(\frac{\varepsilon_0}{X_0} \right) \int N_e(X) dX$$

ε_0 = energia critica

X_0 = lunghezza di radiazione

$$\frac{\varepsilon_0}{X_0} \cong 2.18 \text{ MeV } g^{-1} \text{ cm}^{-2}$$

Occorre poi correggere per l'energia non rivelata (non e.m.) quale quella associata ai neutrini, agli adroni ed ai mesoni μ

Correzioni tipiche sono di circa il 13% a 10^{17} eV e di circa il 5% a 10^{19} eV

Gli errori statistici tipici sono di +/-15%; quelli sistematici di +/-20%

Fluorescenza: Fly's Eye[1]

Rivelatore Fly's Eye:

Utah. 160 km a sud di Salt Lake City

operativo tra il 1981 ed il 1992

Due rivelatori: FE-I ed FE-II distanti 3.4 km

FE-I: 67 specchi con diametro di 1.6 m

Ciascuno specchio visto da 12-14 PMT → totale 880 PMT

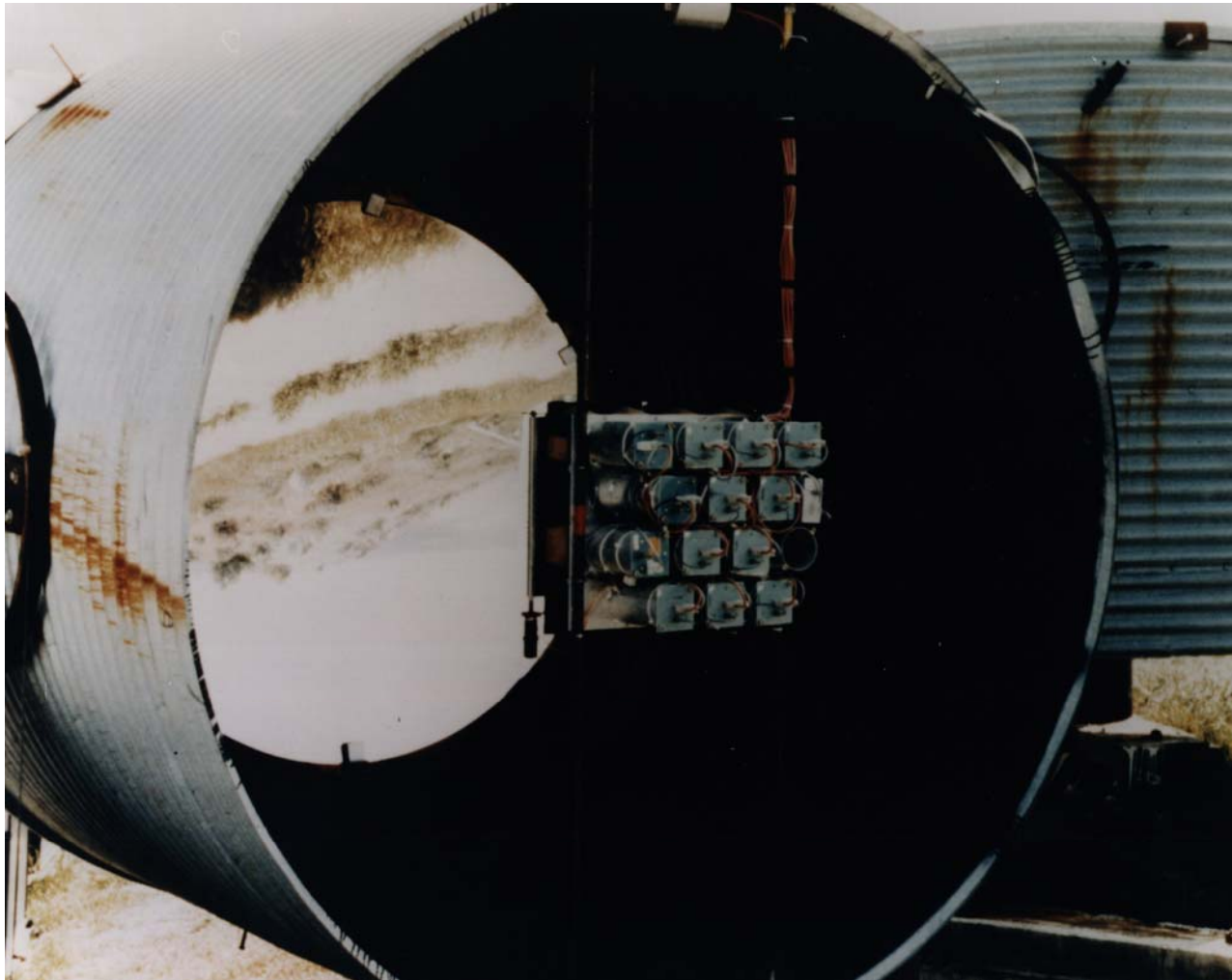
FE-II: 36 specchi con un totale di 464 PMT

Ricostruzione con solo FE-I → monoculare

Ricostruzione con FE-I + FE-II → stereo

Fluorescenza: Fly's Eye[2]

Rivelatore Fly's Eye:
Utah. 160 km a sud di Salt Lake City

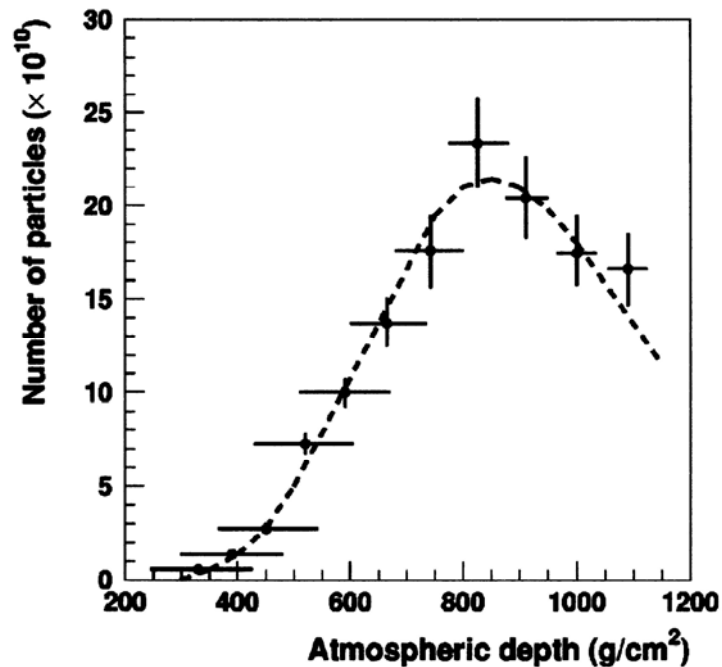


Fluorescenza: Fly's Eye[3]

Rivelatore Fly's Eye:
Utah. 160 km a sud di Salt Lake City



Fluorescenza: Fly's Eye[4]



Profilo longitudinale dell'evento
di 3×10^{20} eV osservato da Fly's Eye

FIG. 13. Longitudinal profile of the 3×10^{20} -eV event, the highest-energy event detected by Fly's Eye I. From Bird *et al.*, 1995.

Fly's Eye: Accettanza

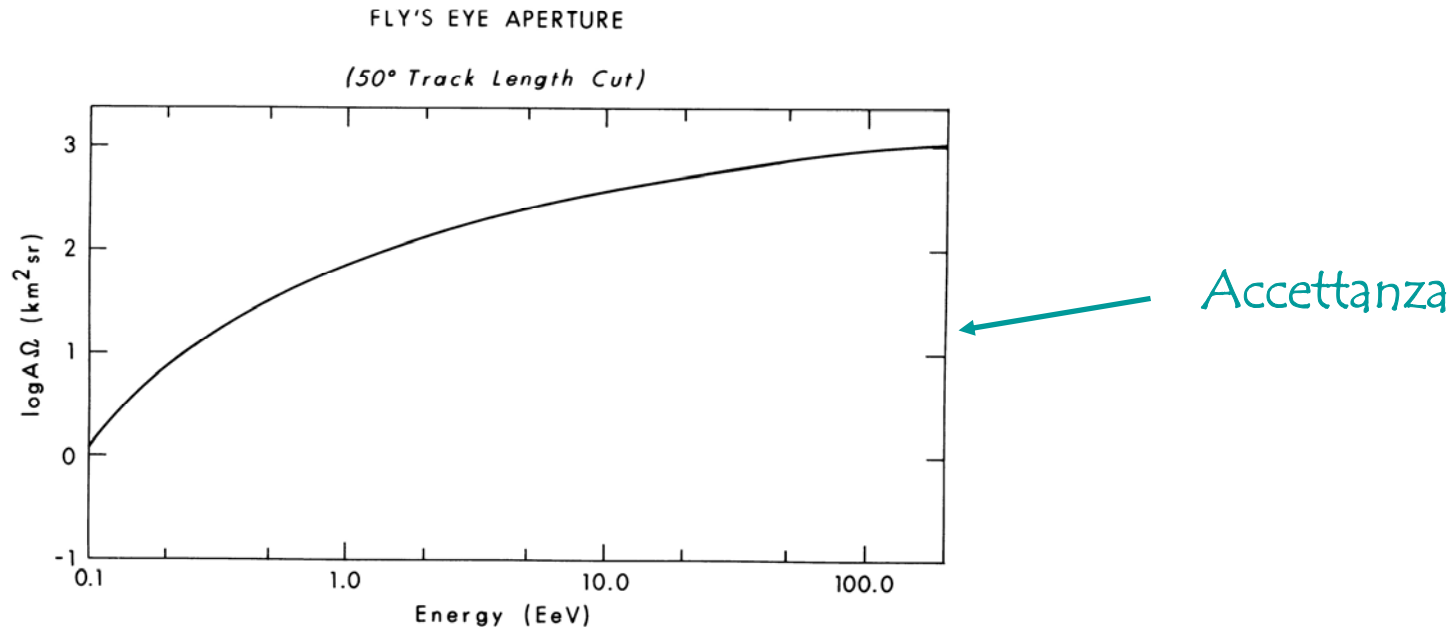


FIGURE 6.10 “Fly’s Eye” aperture in $\text{km}^2\text{-sr}$ as a function of shower energy.

Calcolo del flusso dei raggi cosmici in funzione dell'energia :

$$J(E) = \frac{dN/dE}{t \times A\Omega(E)}$$

dN/dE = numeri di eventi osservati per bin di energia

t = tempo effettivo di esposizione

$A\Omega(E)$ = accettanza del rivelatore (calcolabile con metodi montecarlo)

HiRes

Successore di Fly's Eye
High Resolution (Fly's Eye) experiment

Due stazioni separate di 12.6 km

HiRes-I: 21 specchi (3.8 m^2) con vista del cielo di 360° in azimuth e da 3 a 17° in elevazione. In opera dal 1997

HiRes-II: ?? specchi con vista del cielo di 360° in azimuth e da 3 a 31° in elevazione

Cielo visto in "spicchi" di $1^\circ \times 1^\circ$ dai PMT

Lunghezze d'attenuazione tipiche in HiRes: $\sim 15 \text{ km}$

Cio' corrisponde a fattori correttivi di ~ 4 a distanze di 20 km e di ~ 7 a 30 km . Notare che gli eventi di piu' alta energia sono quelli che richiedono maggiori fattori correttivi.

L'attenuazione inoltre dipende fortemente dalla lunghezza d'onda λ (va' come λ^4) e cambia di quasi un fattore 5 fra 310 e 390 nm .

E' quindi anche importante conoscere bene l'emissione di fluorescenza in funzione di λ .

Rivelatori di superficie: AGASA

Akeno Giant Air Shower Array

Akeno, Giappone

Rivelatore di superficie di circa 100 km^2

111 scintillatori, ciascuno di 2.2 m^2 , spazati di circa 1 km

Operativo dal 1990

Situato ad un'altezza di 900 m (profondità atmosferica: 920 g cm^{-2})

Nel lato Sud-Est: Array di 156 scintillatori su una superficie di 1 km^2

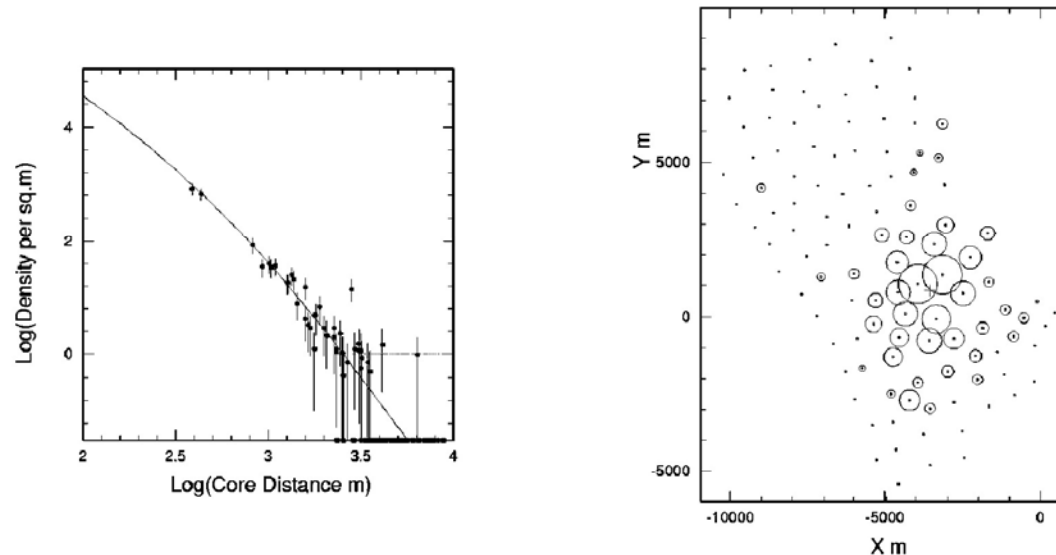


FIG. 11. The detector arrangement of AGASA, together with one of the highest-energy events observed by this array. Dots in the right-hand figure show the detector positions, and open circles are charged-particle densities observed by each detector, whose radius corresponds to the logarithm of the density. The left-hand figure shows the lateral distribution. From Hayashida *et al.*, 1997a.

AGASA

Funzione laterale di distribuzione adoperata:

$$\rho(r) \propto \left(\frac{r}{R_M}\right)^{-1.2} \left(1 + \frac{r}{R_M}\right)^{-(\eta-1.2)} \times \left[1 + \left(\frac{r}{1000}\right)^2\right]^{-0.6}$$

dove:

R_M = raggio di Moliere (= 91.6 m al livello di Akeno)

$$\eta \equiv \eta(\theta) = (3.84 \pm 0.11) - (2.15 \pm 0.56)(\sec \theta - 1)$$

Effetto sistematico su $S(600)$ dovuto ad incertezze in $\eta(\theta) \Rightarrow \pm 7\%$

per angoli inferiori a 45°

Apportate correzioni per attenuazione atmosferica per sciame inclinati

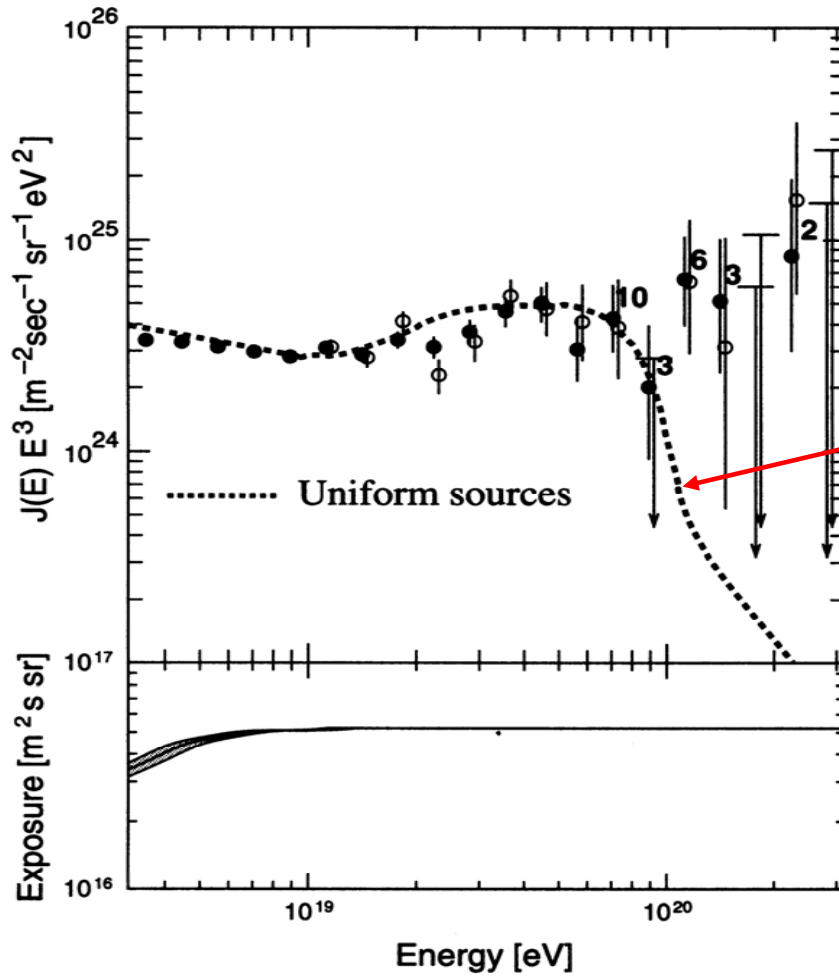
Energia ricavata con il metodo $S_o(600)$:

$$E = 2.03 \times 10^{17} S_o(600) \text{ eV}$$

dove $S_o(600)$ e' la densita' (per m^2) misurata a 600 m dall'asse dello sciame (riportata a sciame ad incidenza verticale, cioe' corretta per l'angolo)

AGASA

Eventi di alta energia osservati in AGASA (Dati 2003)



Andamento previsto in base all'effetto GZK

AGASA

Verifica dell'energia ricostruita, facendo uso degli eventi che sono visti dal piccolo rivelatore della zona Sud-Est →
156 scintillatori spazati di 120 m. Confronto tra energia ricostruita con $S_0(600)$ con quella ottenuta da: $E[\text{eV}] = 3.9 \times 10^{15} (N_e/10^6)^{0.9}$

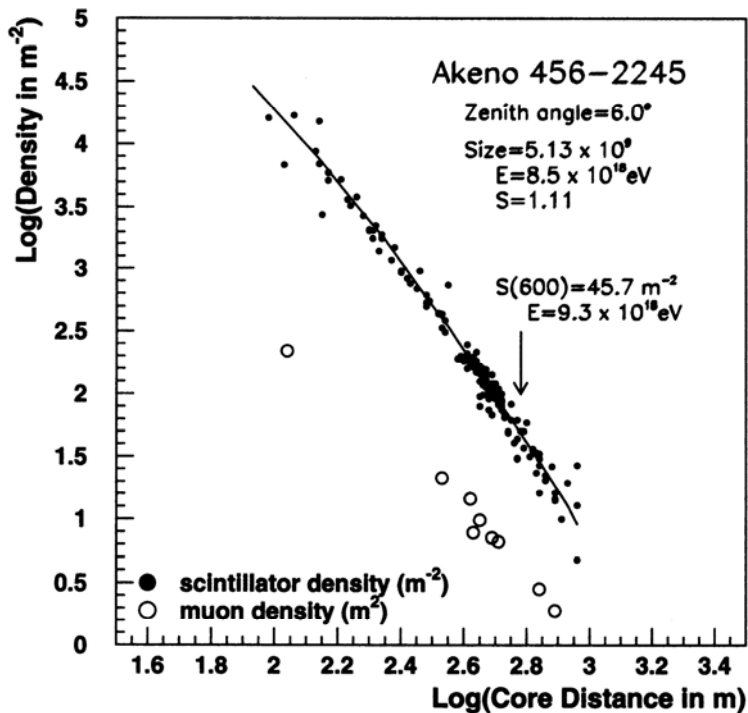


Fig. 15. Comparison of energies determined from N_e and $S(600)$ for one of the largest events landing inside the 1 km² array.

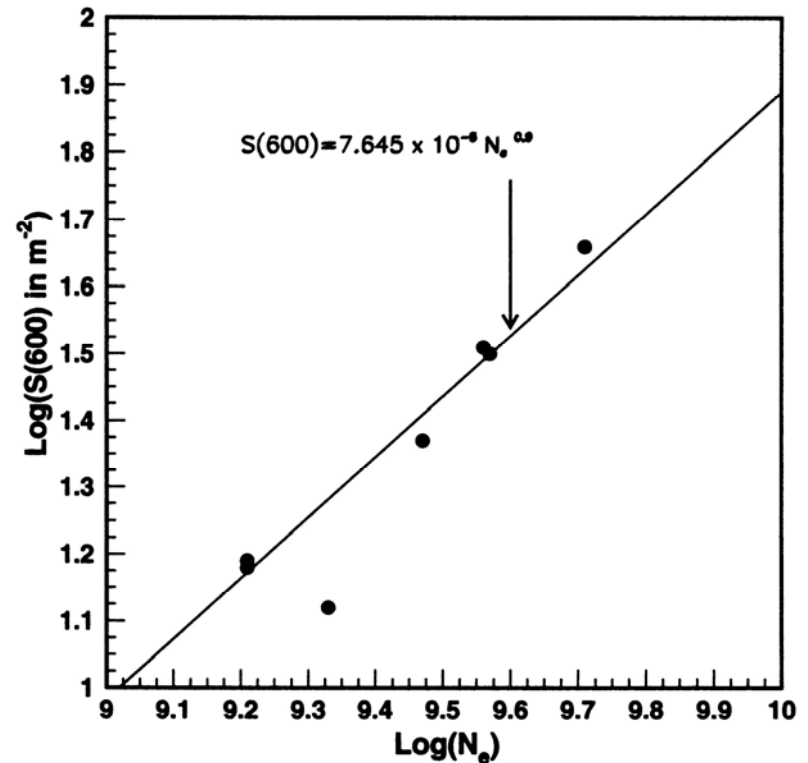


Fig. 16. $S(600)$ and N_e for the events landing well inside the 1 km² array. A solid line is $S(600)$ - N_e relation derived from Eqs. (1) and (17).

Greisen-Zatsepin-Kuzmin cutoff

$$P + \gamma \rightarrow n + \pi^+$$

$$(E+\varepsilon)^2 - (P-\varepsilon)^2 = E^2 - P^2 + 4 \varepsilon E = (940+140)^2 \text{ MeV}^2 =$$

$$=(1.08 \cdot 10^9)^2 \text{ eV}^2 \Rightarrow E_{\text{max}} = 7 \cdot 10^{19} \text{ eV}$$

Calcolo dettagliato $\rightarrow$ $E_{\text{max}} \sim 50 \text{ EeV}$

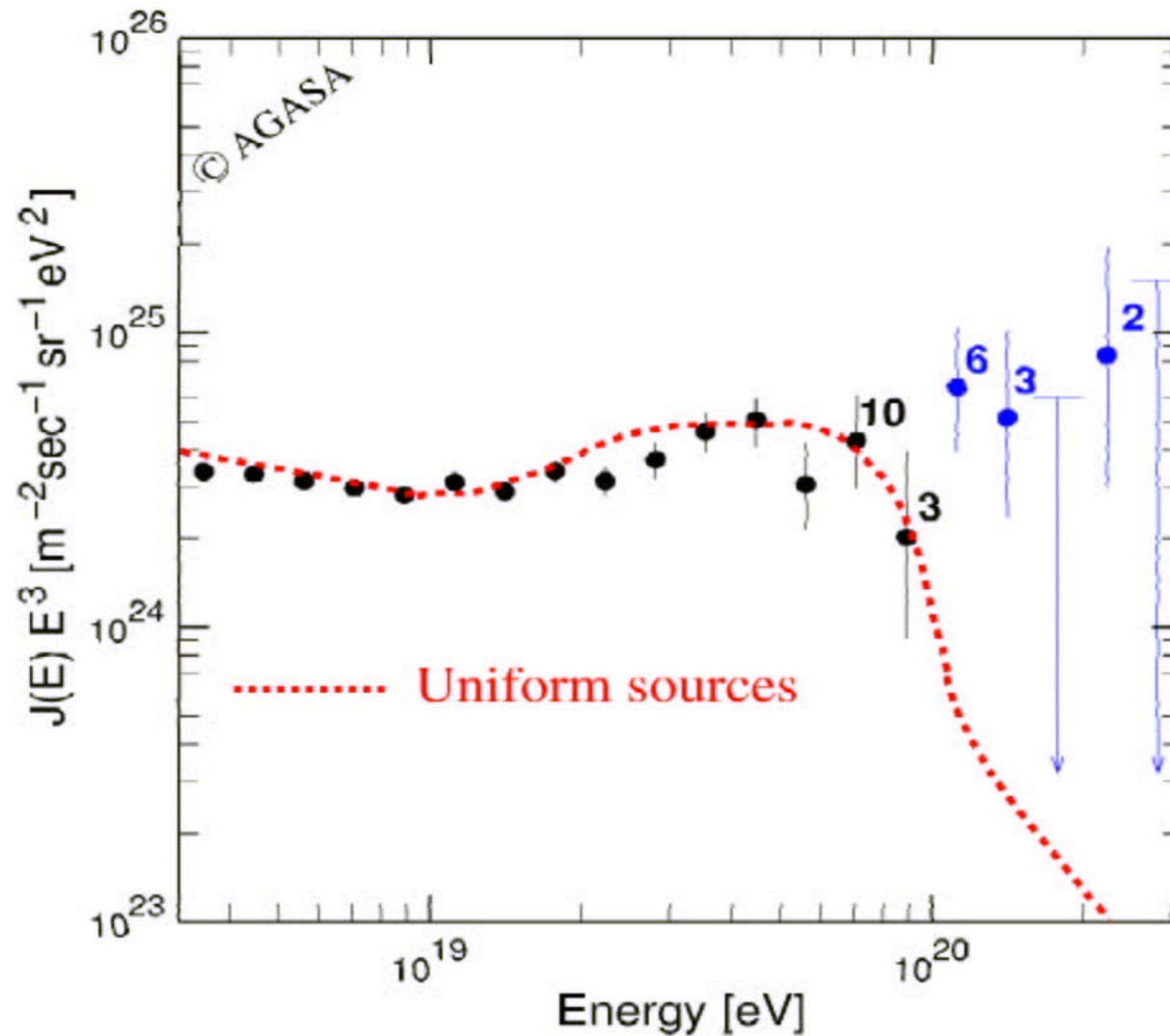
Lunghezza d'assorbimento $\sim 10 \text{ Mpc}$ (sopra i 50 EeV)

$$[\lambda_{\gamma p} = (n_{\text{CMB}} \sigma_{p+\gamma_{\text{CMB}}})^{-1}]$$

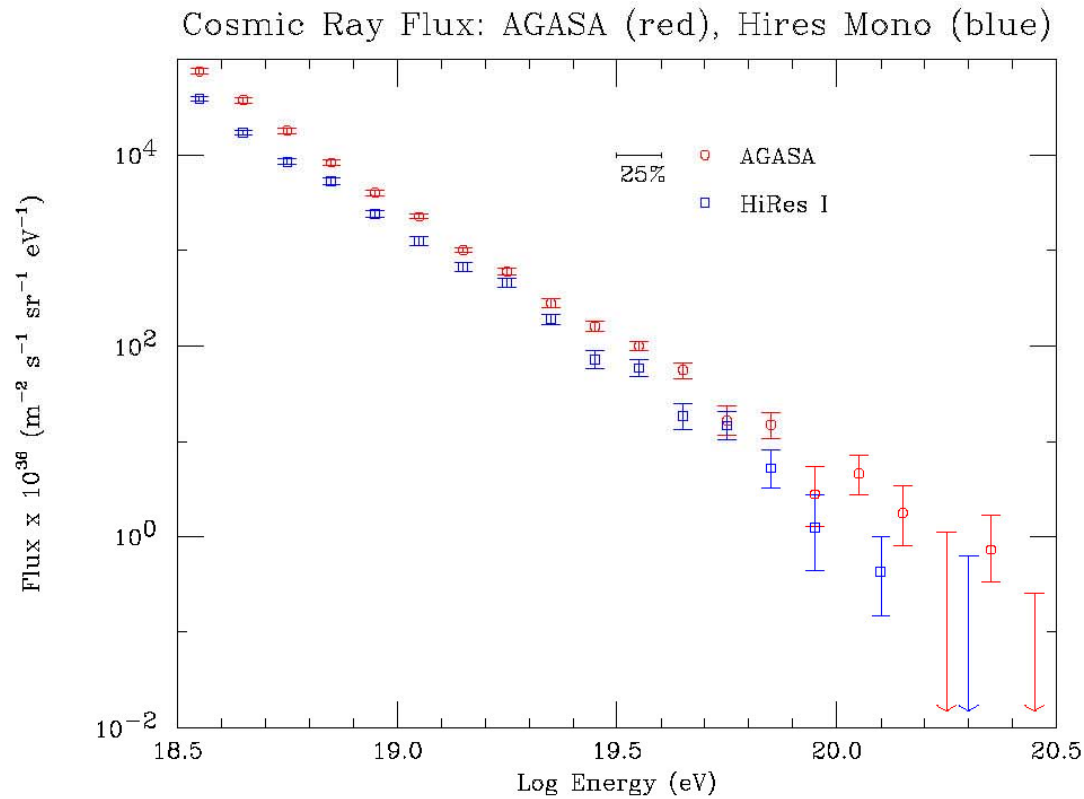
$$\text{con } n_{\text{CMB}} = 400 \text{ cm}^{-3} \text{ e } \sigma_{p+\gamma_{\text{CMB}}} = 10^{-28} \text{ cm}^2]$$

Il che implica che raggi cosmici di energia superiore a 50 EeV non possono aver origine da distanze superiori a about 50 Mpc

GZK cutoff ?



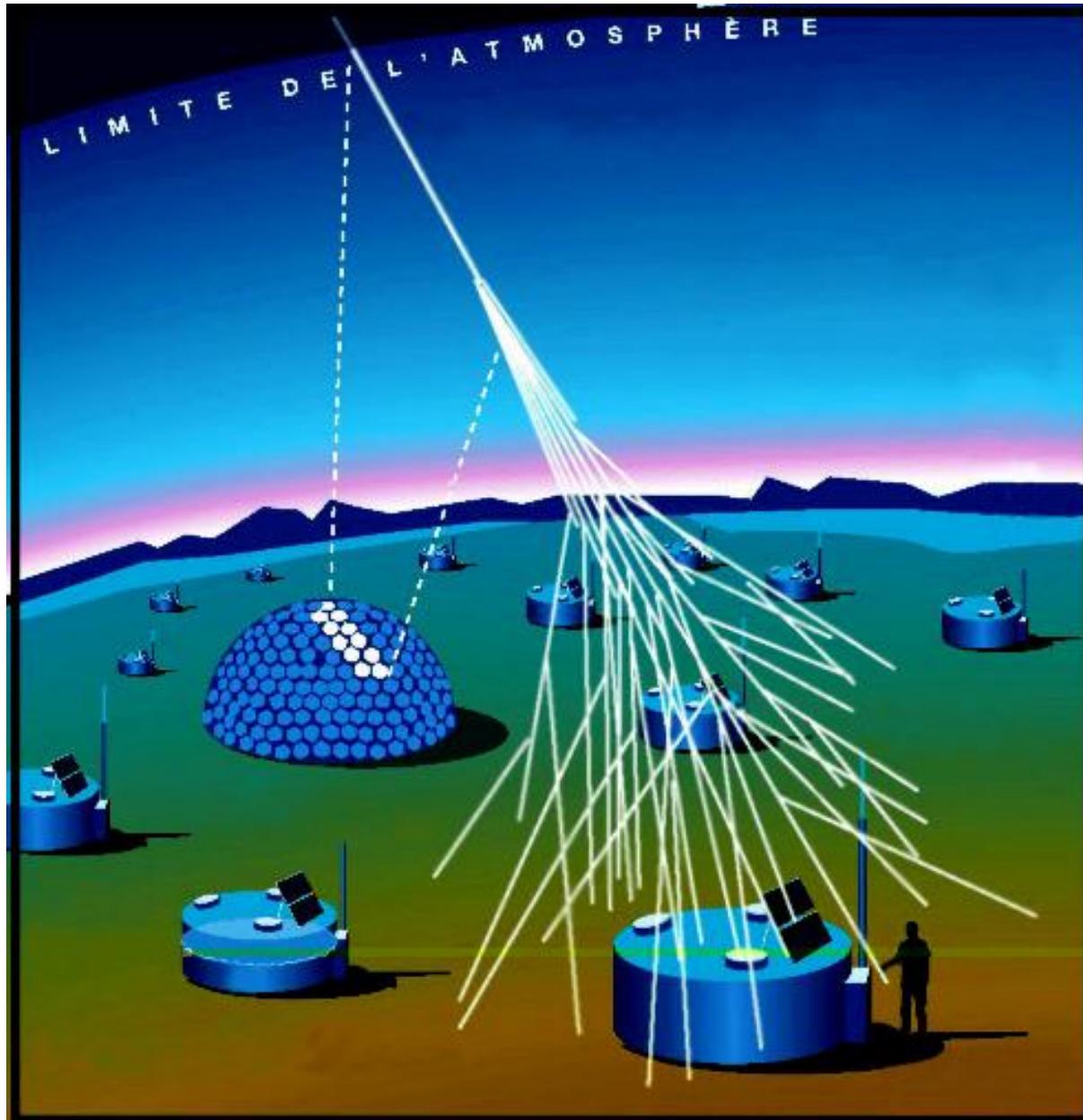
HiRes vs AGASA



L'evidenza di AGASA per la violazione di GZK e' decisamente piu' convincente di quella di HiRes

Figure 31: Plot of the AGASA spectrum (circles) and the HiRes I monocular spectrum (squares) for energies $\geq 10^{18.5}$.

Auger project



Auger details

Rivelatore "ibrido" costituito da rivelatori di fluorescenza e di superficie

- Un rivelatore (3000 km²) in Argentina
- Un rivelatore (da costruire) negli Stati Uniti

Costruzione del primo rivelatore in stadio avanzato

Rivelatore di superficie, costituito da 1600 vasche d'acqua (rivelatori Cerenkov in acqua). Spaziatura 1.5 km

vasche cilindriche: 3.6 m diametro; 1.2 m altezza (12 m³ acqua)

vista da 3 PMT da 9". Misura calorimetrica dell'energia

Energia fornita da pannelli solari + batterie di

scorta. Sistema completamente autonomo:

wireless LAN comm.+GPS synchronization

Rivelatore di fluorescenza: 24 specchi raggruppati in 4 locazioni diverse

Auger details

Rivelatore di fluorescenza: 24 specchi raggruppati in 4 locazioni diverse
Ciascun telescopio ha un campo di vista di 30° sia in azimuth che zenith.
Le 4 stazioni alla periferia dell'array di superficie consistono ciascuna di 6 telescopi, con un campo di vista complessivo di 180° verso l'interno dell'array.

Area di ciascun telescopio: 12 m^2

Uso di un filtro ottico e lente di correzione

Nel fuoco di ciascuno specchio: camera costituita da 20×22 pmt

Copertura angolare di ciascun pmt: 1.5×1.5 gradi.

13200 PMT in totale



The Auger Collaboration

Participating Countries - 50 Institutions, >250 Scientists

Argentina

Australia

Bolivia*

Brazil

Czech Republic

France

Germany

Greece

***Associate**

Italy

Mexico

Poland

Slovenia

Spain

United Kingdom

USA

Vietnam*

Participating US institutions:

UCLA

Case Western

Chicago

Colorado

Colorado State

Fermilab (and ANL)

Louisiana State

Michigan Tech

Minnesota

Nebraska

New Mexico

Northeastern

Penn State

Utah

Auger (sito)

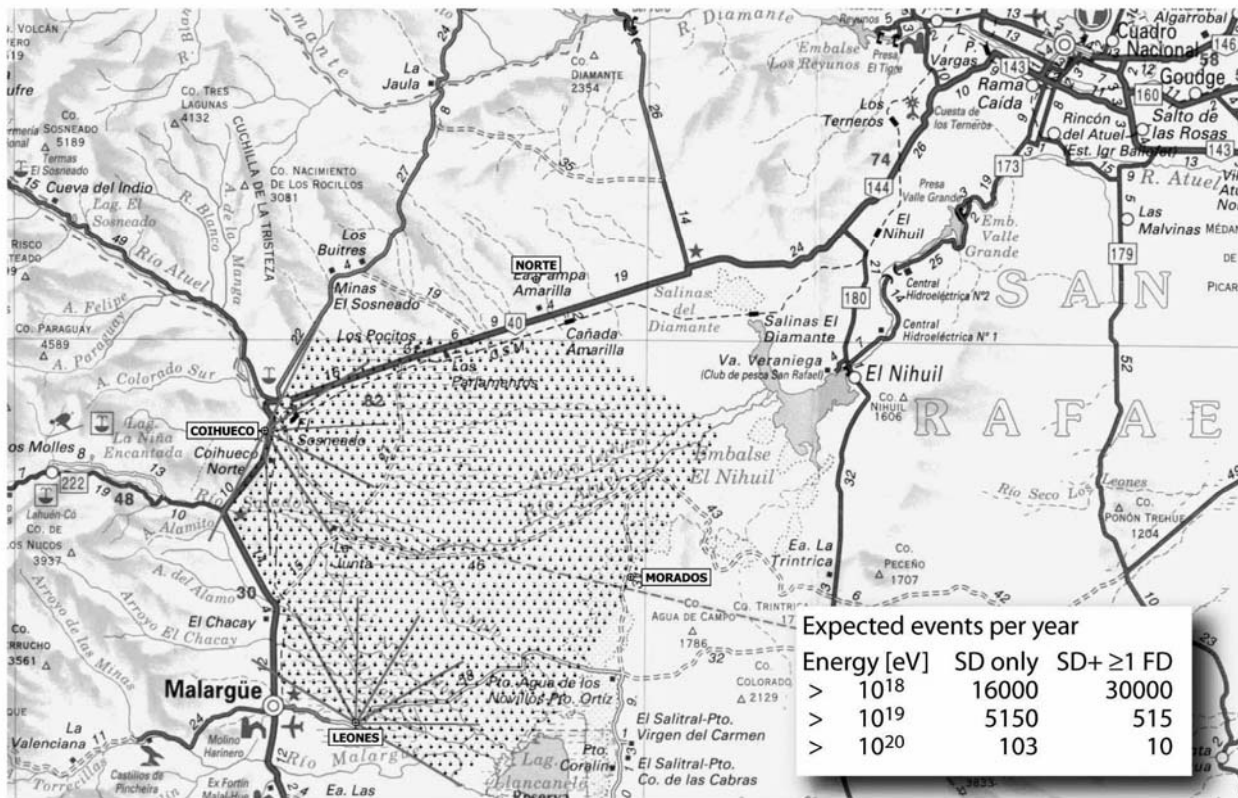
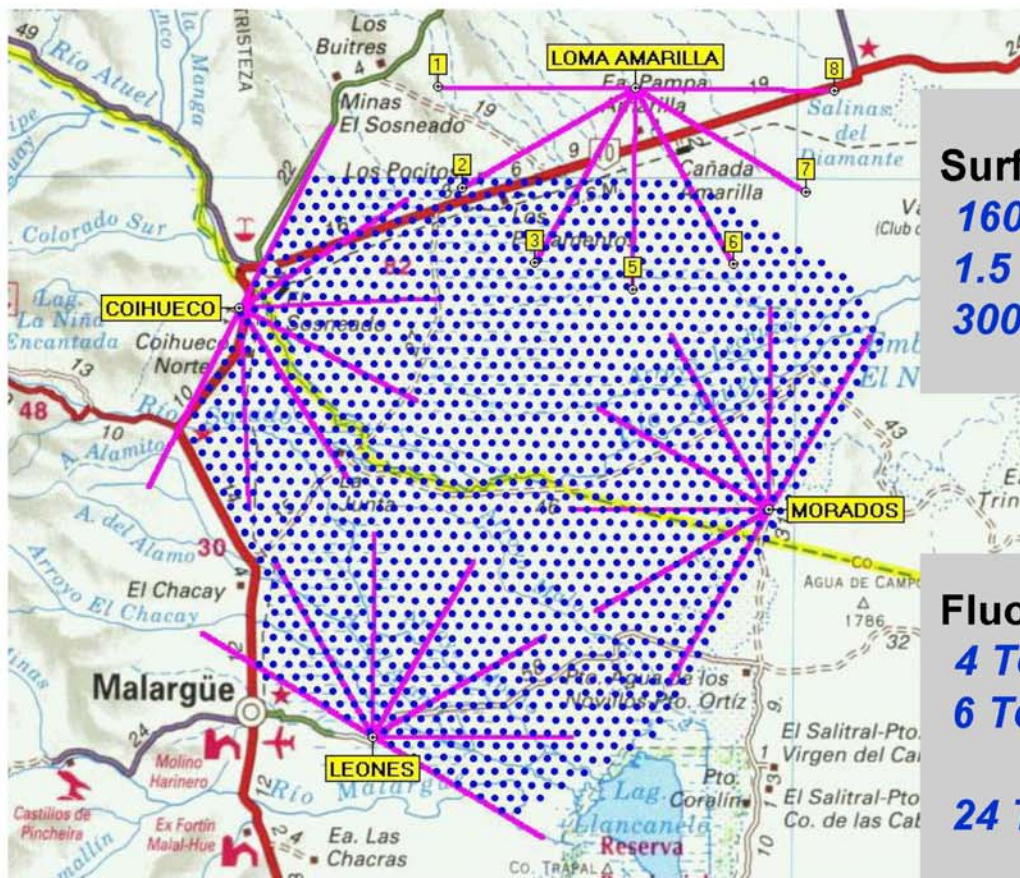


Fig. 2. Location and layout of the Southern Pierre Auger Observatory in Mendoza, Argentina. Each dot represents one water Cherenkov detector. The four telescope stations are placed on small elevations called LEONES, COIHUECO, MORADOS and NORTE. The fields of view for some telescopes are indicated. The inset gives the expected number of events per year for the full configuration assuming the AGASA energy spectrum.



PIERRE
AUGER
OBSERVATORY

The Observatory Plan



Surface Array
1600 detector stations
1.5 Km spacing
3000 Km²

Fluorescence Detectors
4 Telescope enclosures
6 Telescopes per enclosure
24 Telescopes total

Auger (layout)

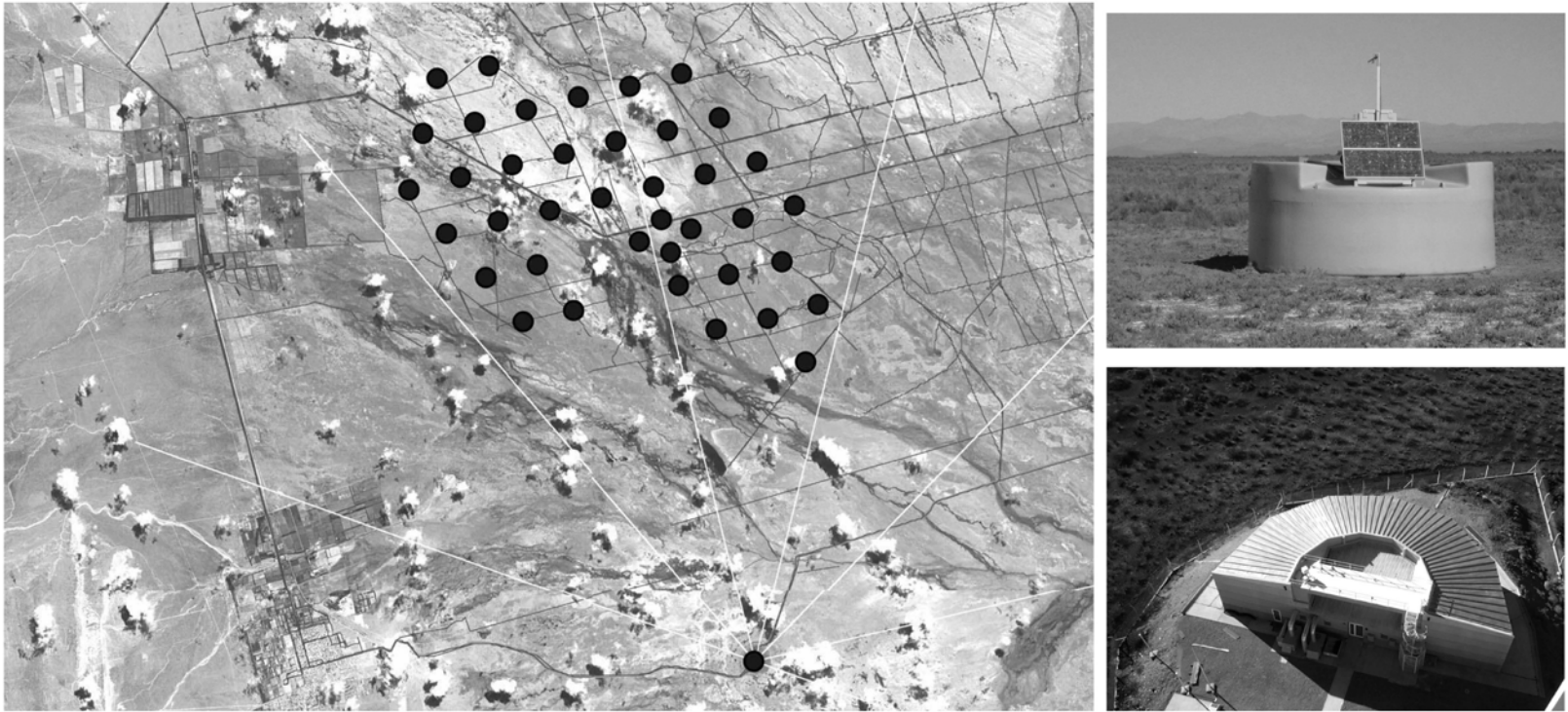


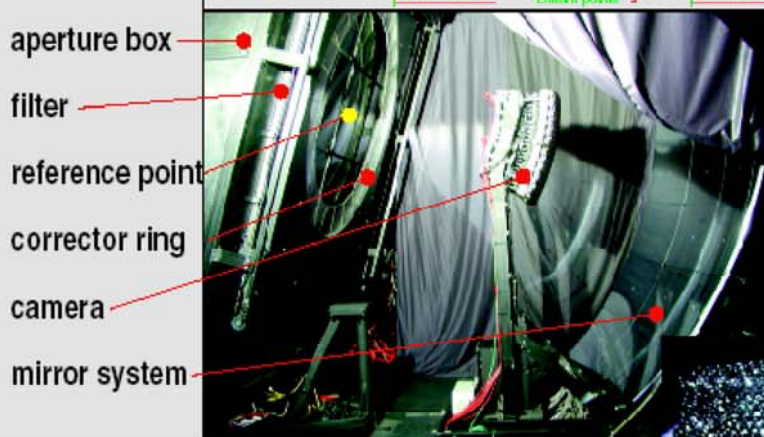
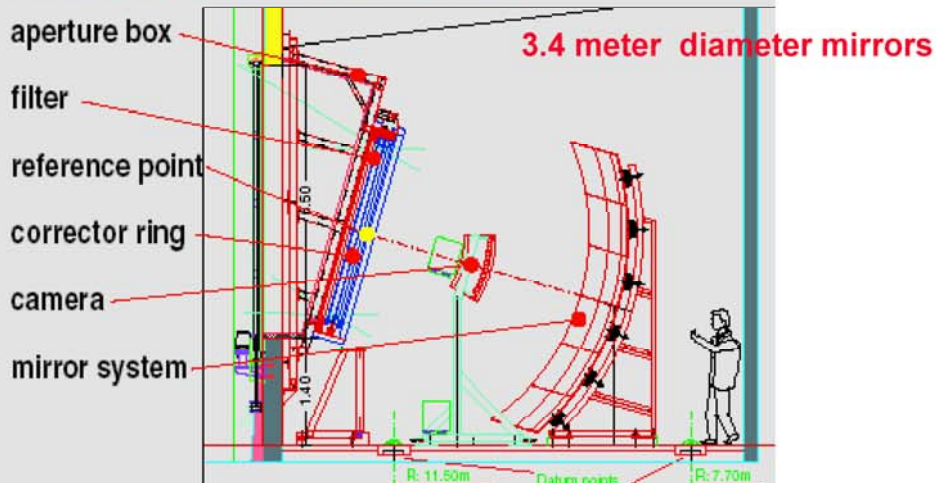
Fig. 3. Layout of the Engineering Array. Black dots are at the positions of water Cherenkov tanks. The black square is at the position of the first fluorescence detector station on the Los Leones hill. The white lines indicate the fields of view of the individual telescopes. Right: Photographs of a water Cherenkov detector in the field and of the Los Leones telescope building.



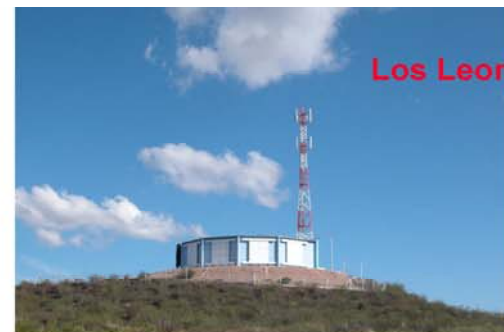
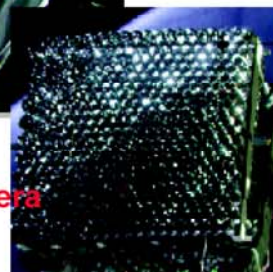
PIERRE
AUGER
OBSERVATORY

The Fluorescence Detectors

Schmidt Telescope at Los Leones



440 pixels per camera



Los Leones

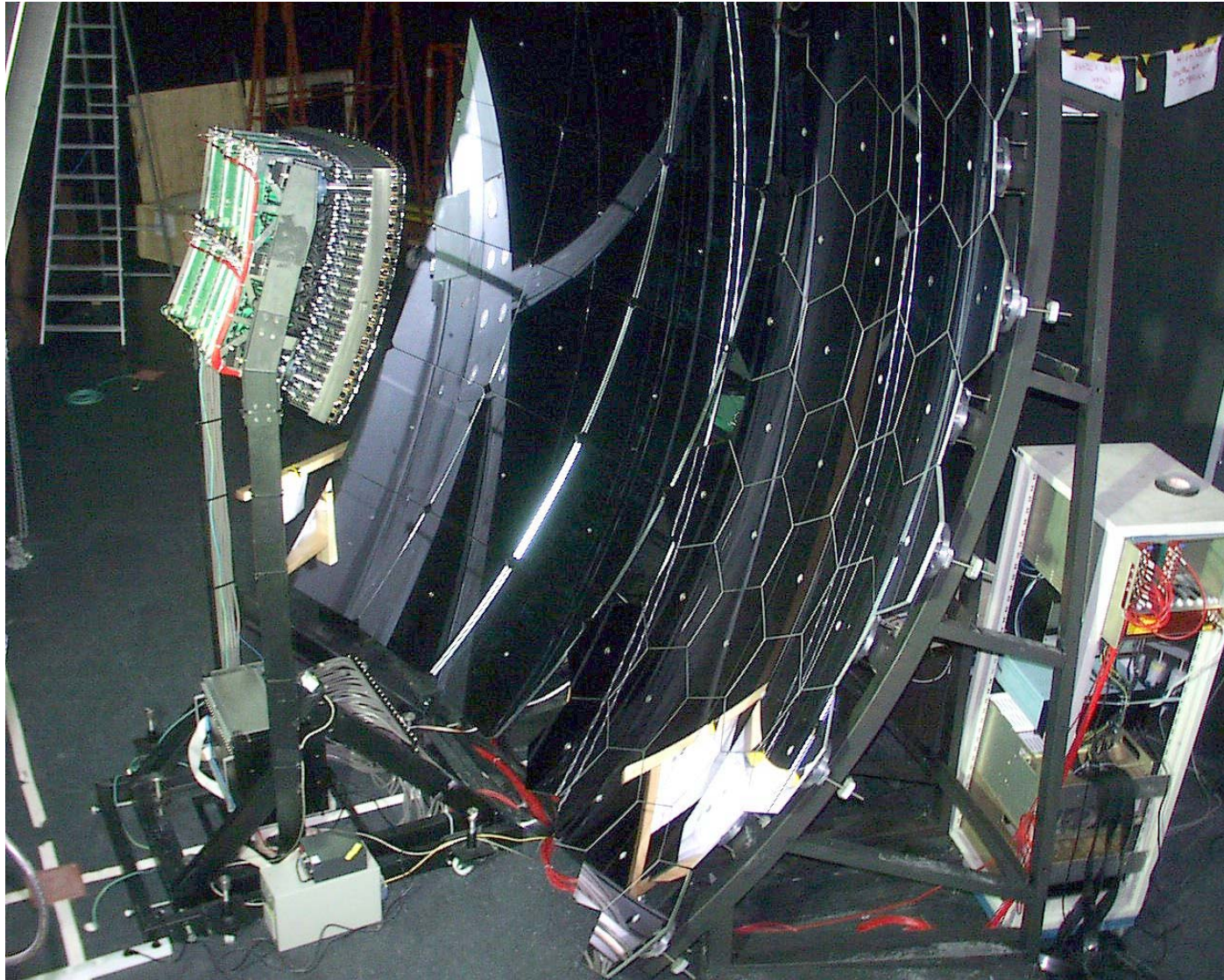


Coihueco

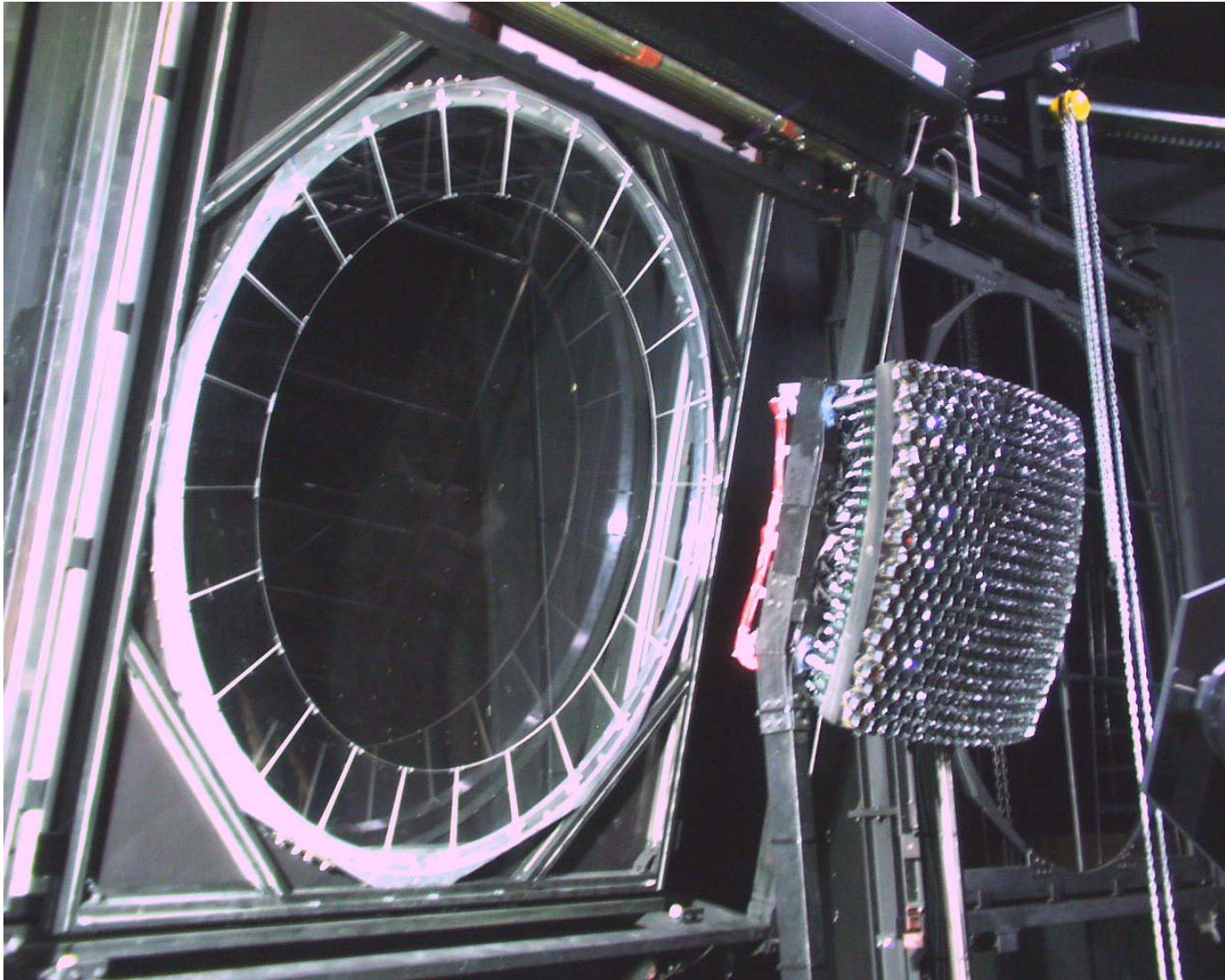


Los Morados -
under construction

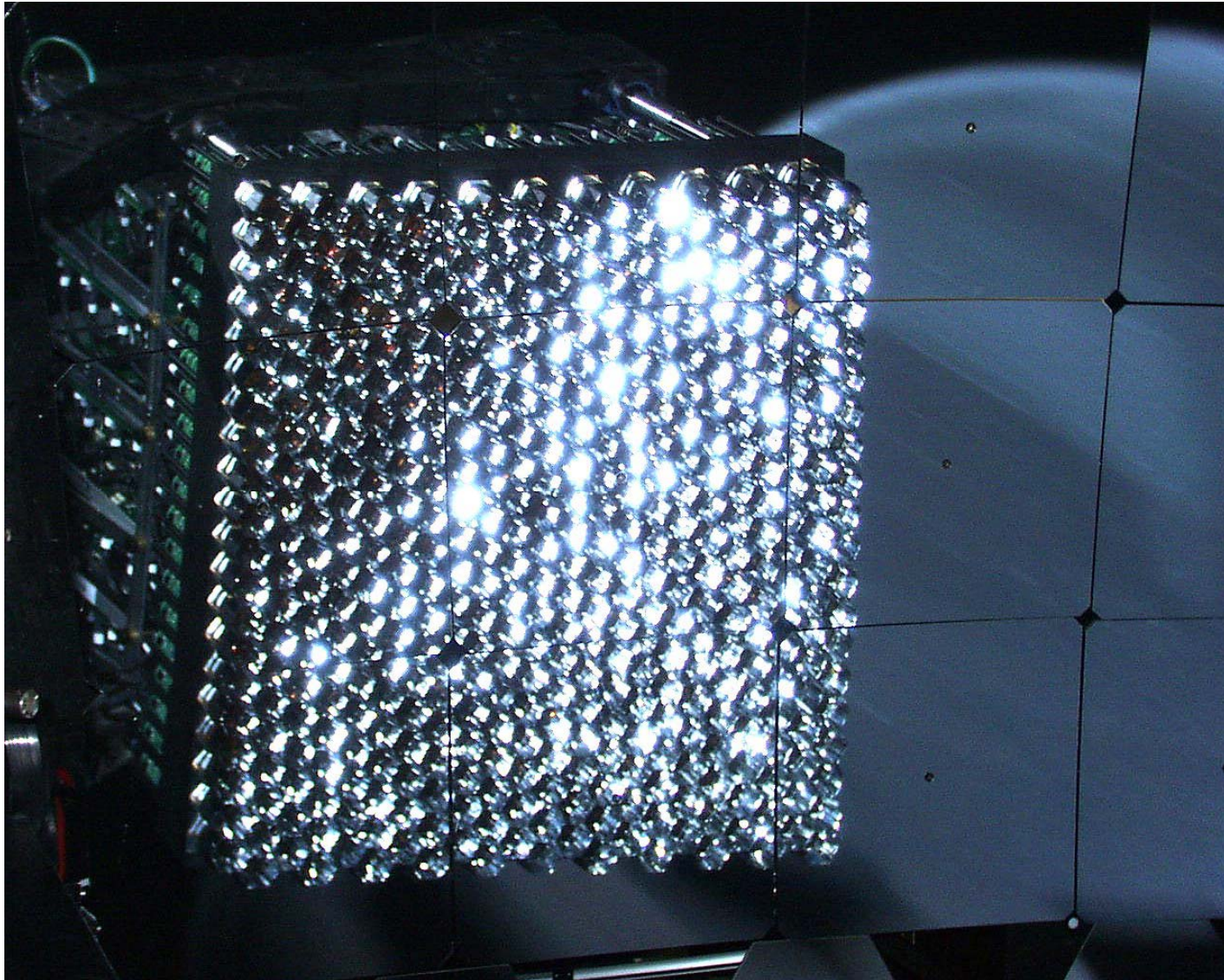
Auger (fluorescenza)



Auger (fluorescenza)



Auger (fluorescenza)



Atmospheric Monitoring and Calibration

To realize the full advantage of the calorimetric fluorescence measurement, absolute calibration and careful atmospheric measurements are necessary.

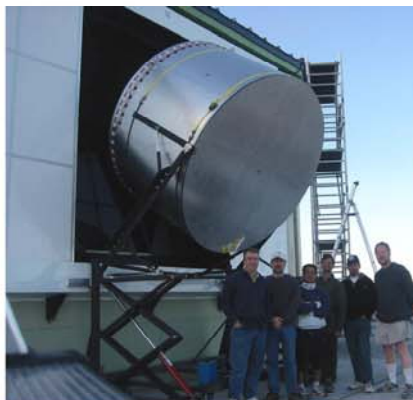
– Atmospheric Monitoring

- *Lidar for atmospheric profiling and “shooting the showers” (atmospheric measurement along the shower path).*
- *Fixed vertical and steerable lasers at array center for atmospheric monitoring, timing and calibration checks.*
- *Continuous horizontal attenuation monitors.*
- *Balloon borne atmospheric measurements.*

– Absolute Calibration

- *End to end absolute calibration*

Drum for uniform illumination of each fluorescence camera – part of end to end calibration .



Lidar at each Fluorescence

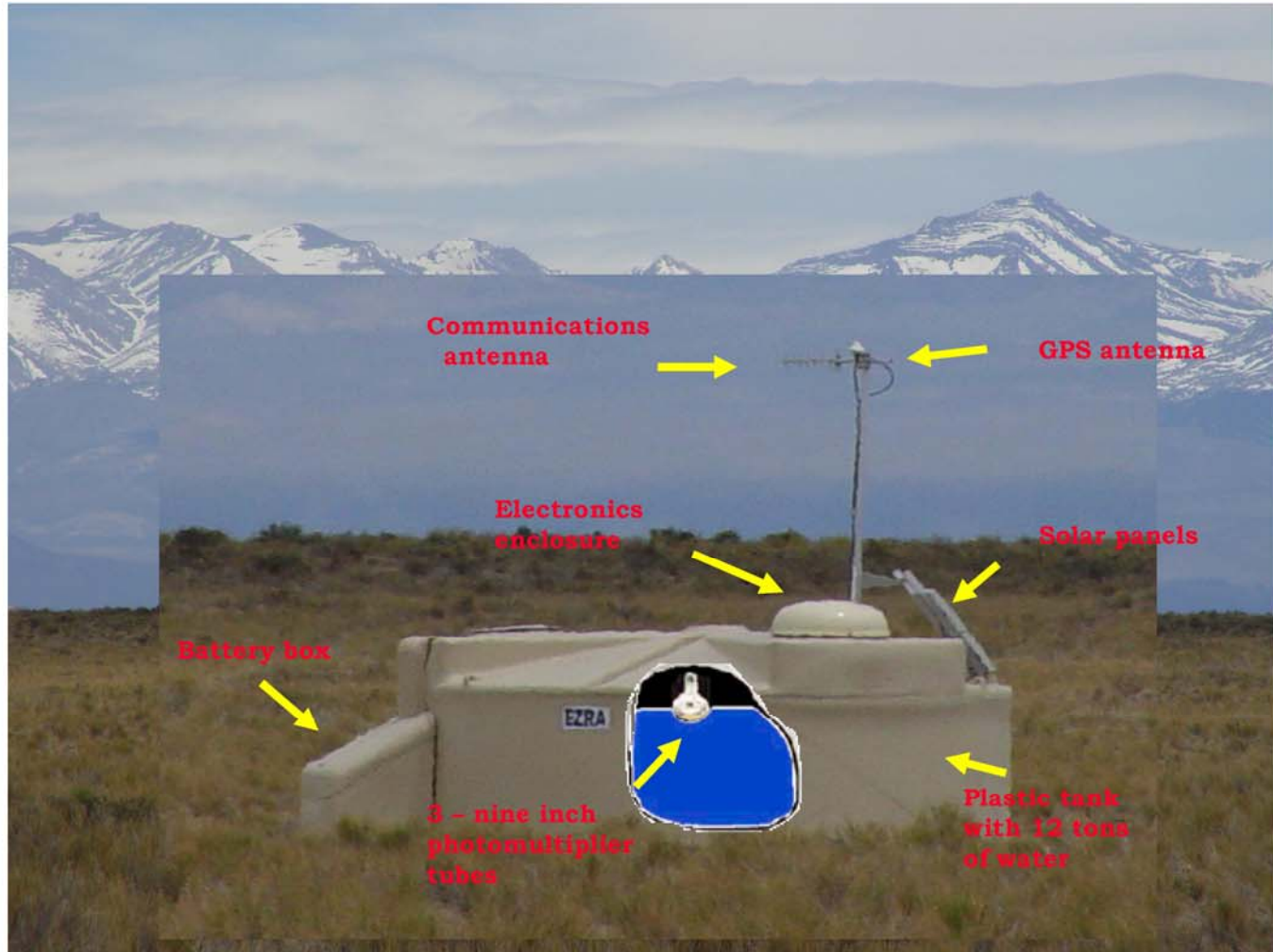


Central Laser Facility (laser optically linked to adjacent surface detector tank)

Year around balloon borne atmospheric measurements.



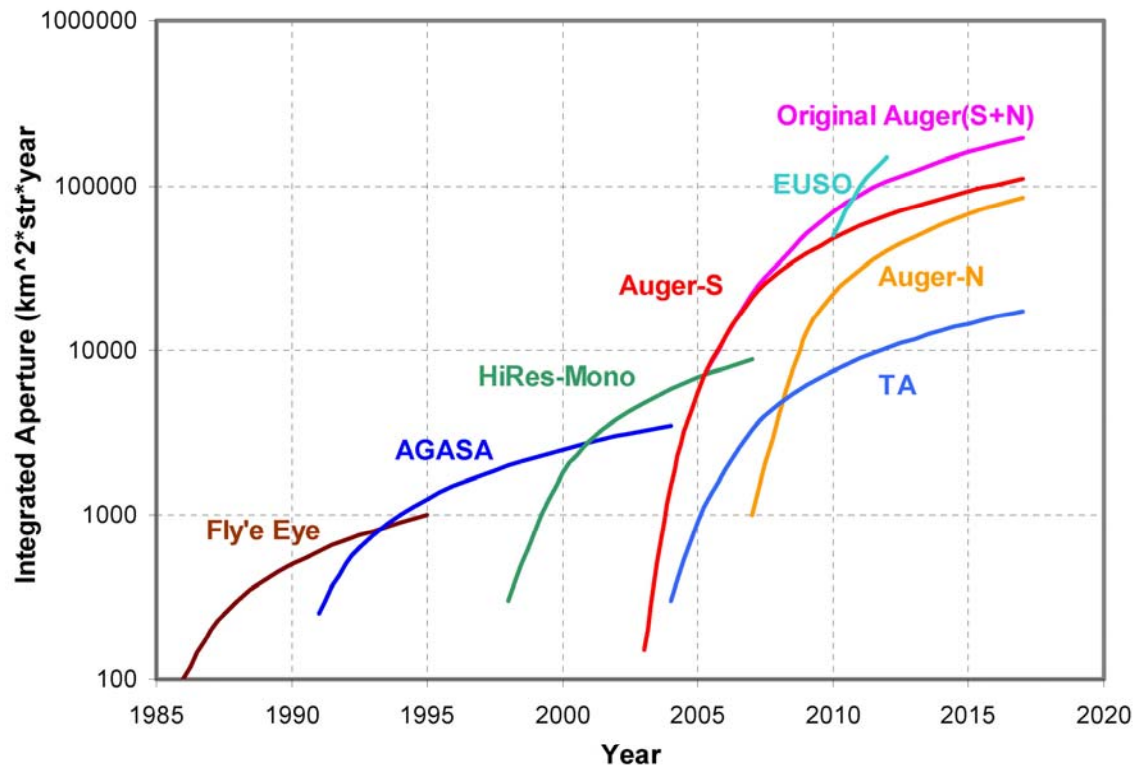
The Surface Array



Auger sensitivity



Integrated Sensitivity (at 10^{20} eV)



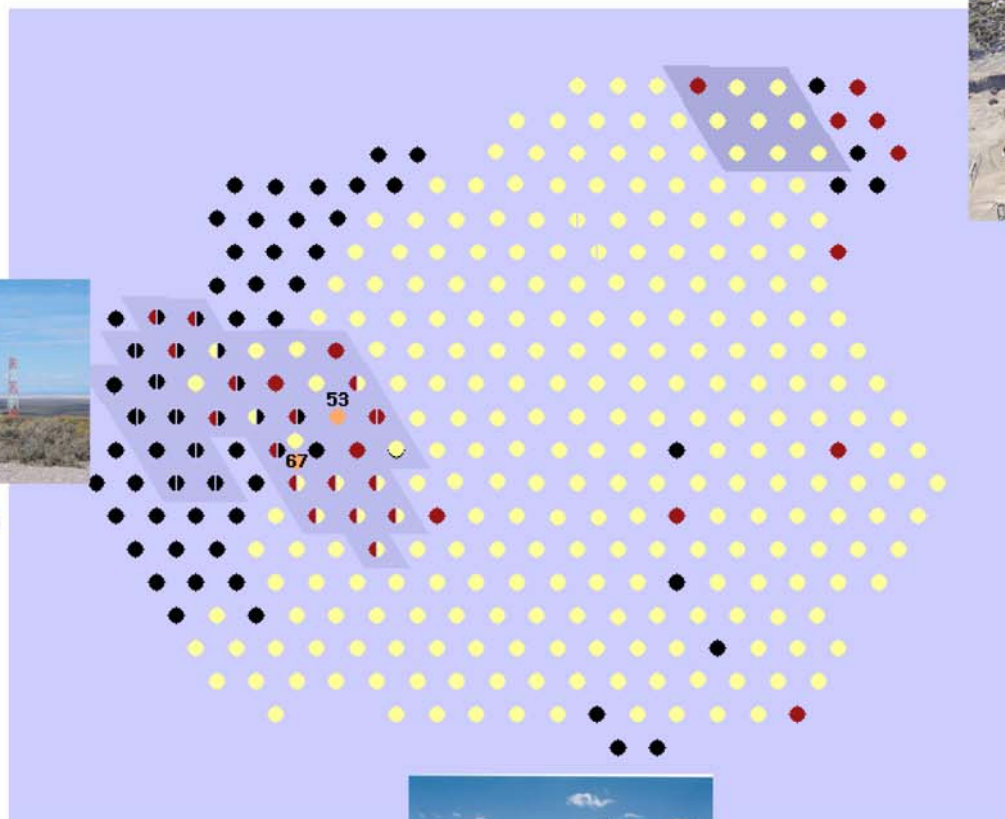


PIERRE
AUGER
OBSERVATORY

Status



Coihueco



Los Morados

Surface Array

- 350 surface detector stations deployed
- 270 surface detector stations have electronics and are operational – **World's largest array!** 

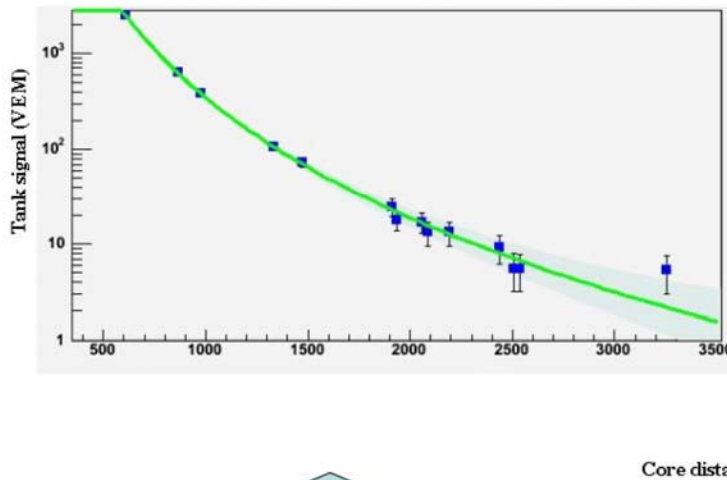
Fluorescence detectors

- 6 telescopes operational in Los Leones
- 2 telescopes operational in Coihueco



Los Leones

Risultati di AUGER



Mon Dec 29 09:23:45 2003

Easting = 470343 ± 21 m

Northing = 6095432 ± 25 m

dt = 126.8 ns

Theta = 34.4 ± 0.3 deg

Phi = $140.1 \pm 0.3/\sin(\text{Theta})$ deg

R = 12.5 ± 0.8 km

S(1000) = 347.8 ± 8.43 VEM

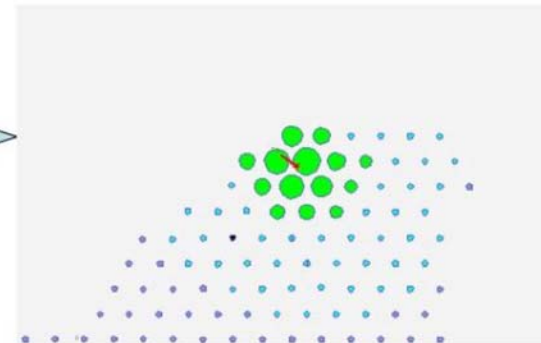
E = 75.2 EeV $\pm 3\%$

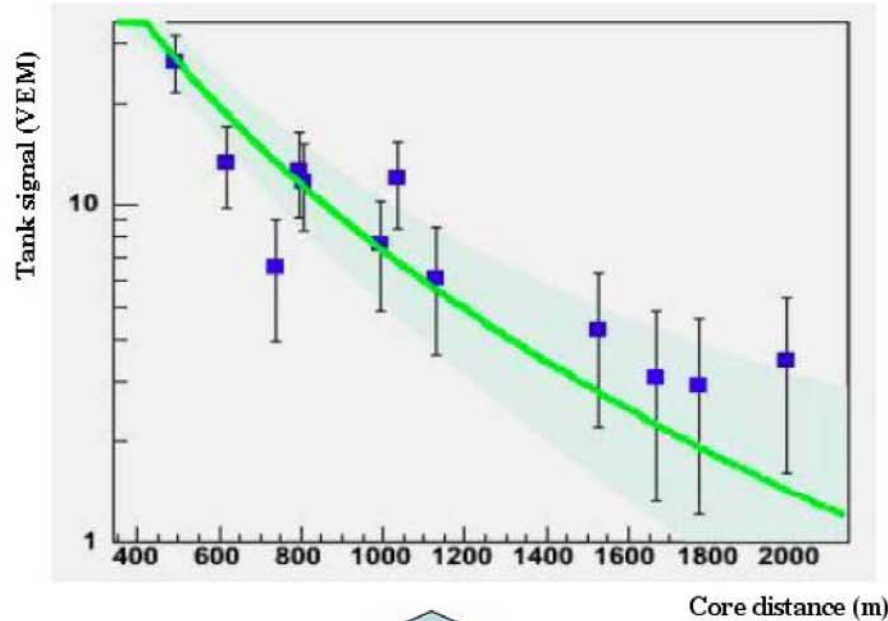
(stat. error only)

PRELIMINARY

Lateral Distribution Function Fit

Surface Array view





Mon Feb 16 21:57:03 2004
 Easting= $477789 \pm 120\text{m}$
 Northing= $6083293 \pm 173\text{m}$
 dt= 49.1ns

$\Theta = 71.3 \pm 0.4 \text{ deg}$
 $\Phi = 51.3 \pm 0.3/\sin(\theta) \text{ deg}$

$R = 30.3 \pm 8.3 \text{ km}$

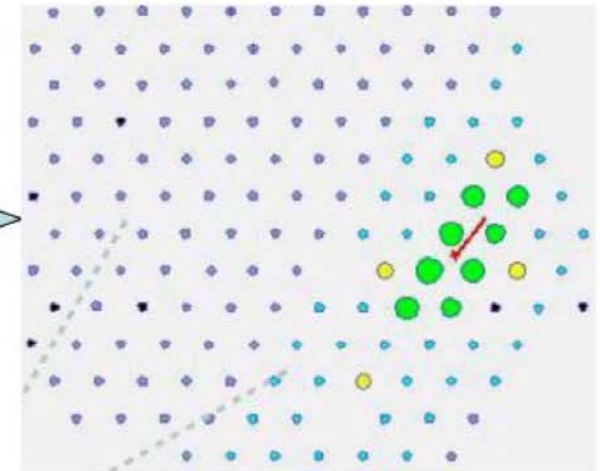
Energy estimate preliminary

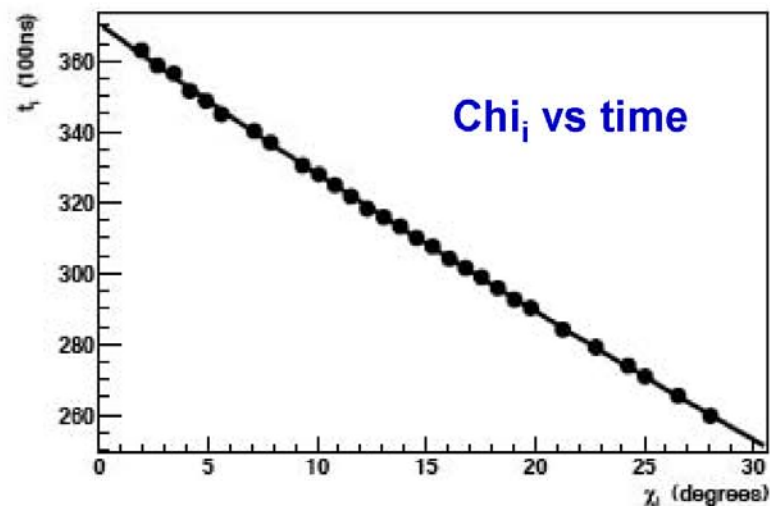
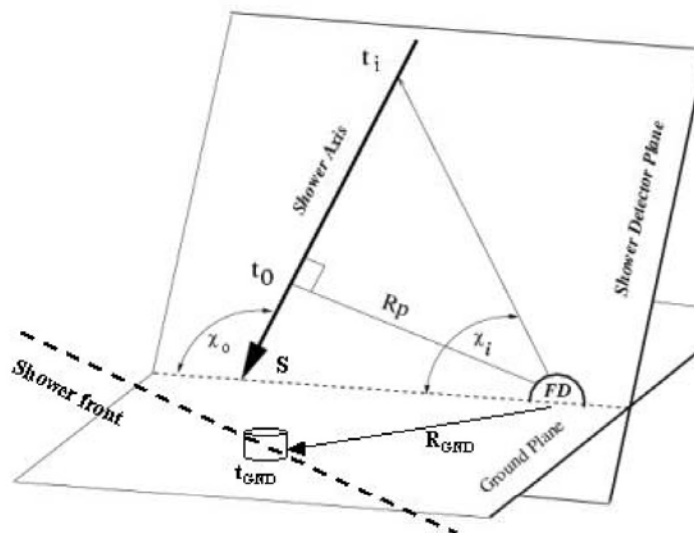
$S(1000) = 7.31 \pm 0.70 \text{ VEM}$
 $E = 10.52 \text{ EeV} \pm 10\%$

Error statistical only

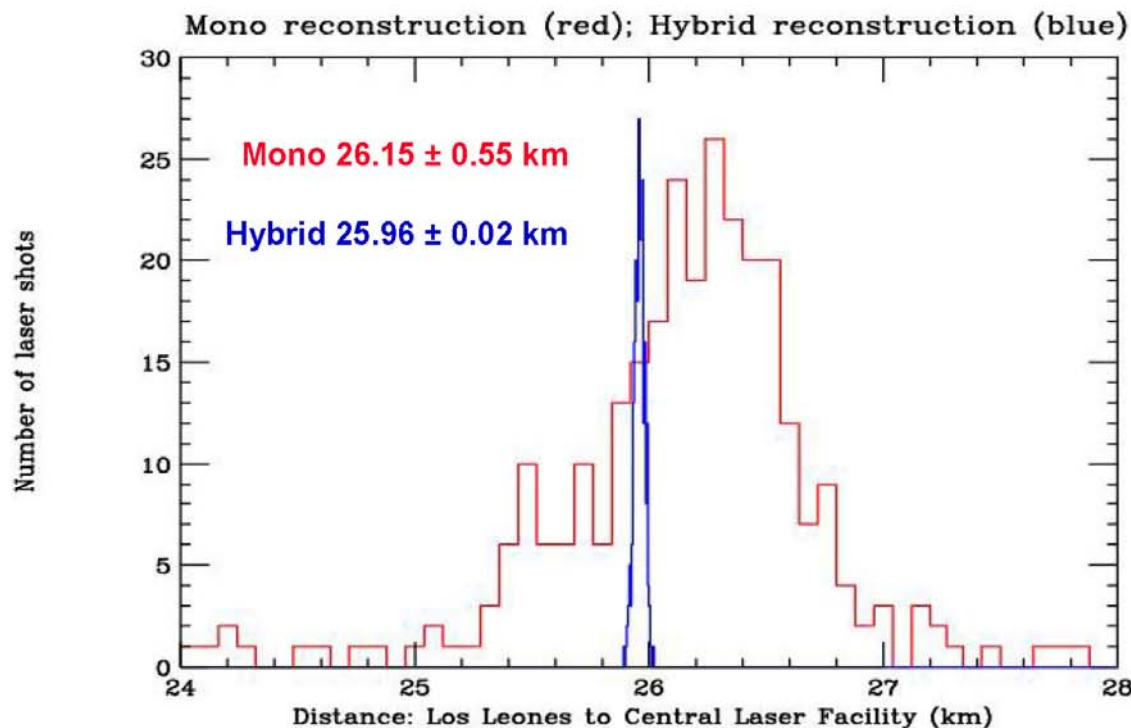
Lateral Distribution Function Fit

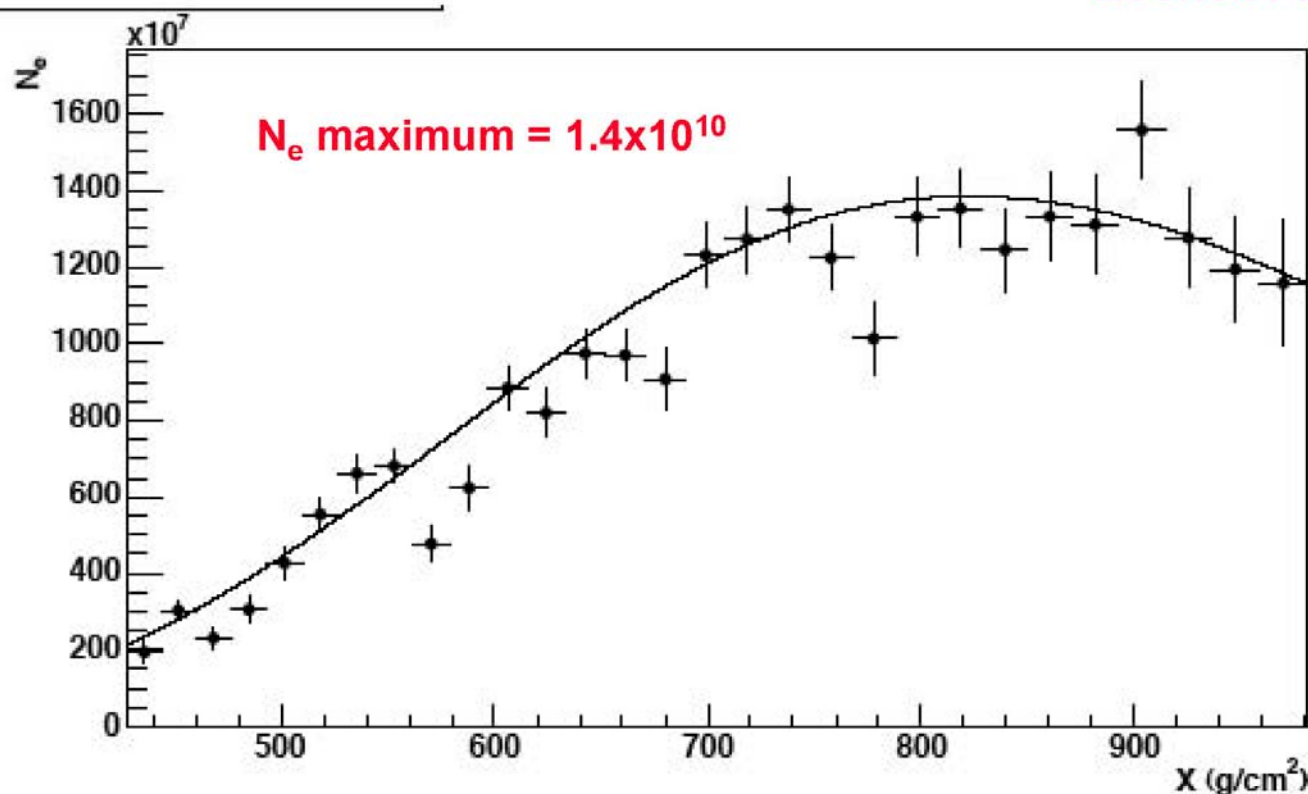
Surface Array view





Calibration with
central laser
facility and
Celeste





N_e maximum $\sim 7 \times 10^{10}$ for energy = 10^{20} eV

FD energy $\sim 2 \times 10^{19}$ eV

(preliminary)

SD energy = 2.1×10^{19} eV



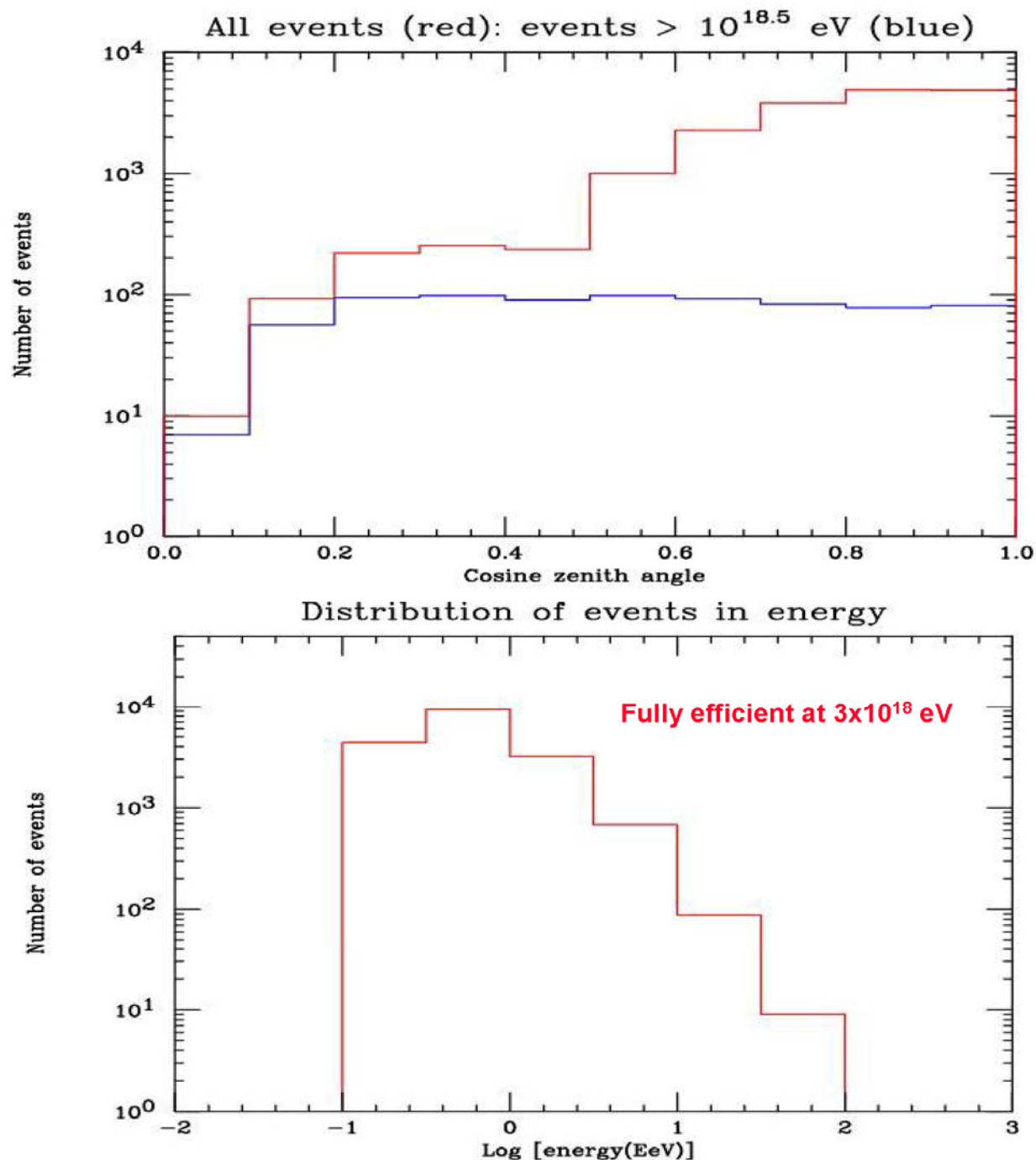
December 18, 2003
to March 25, 2004

17688 events
<180> tanks active
~1 event/tank/day

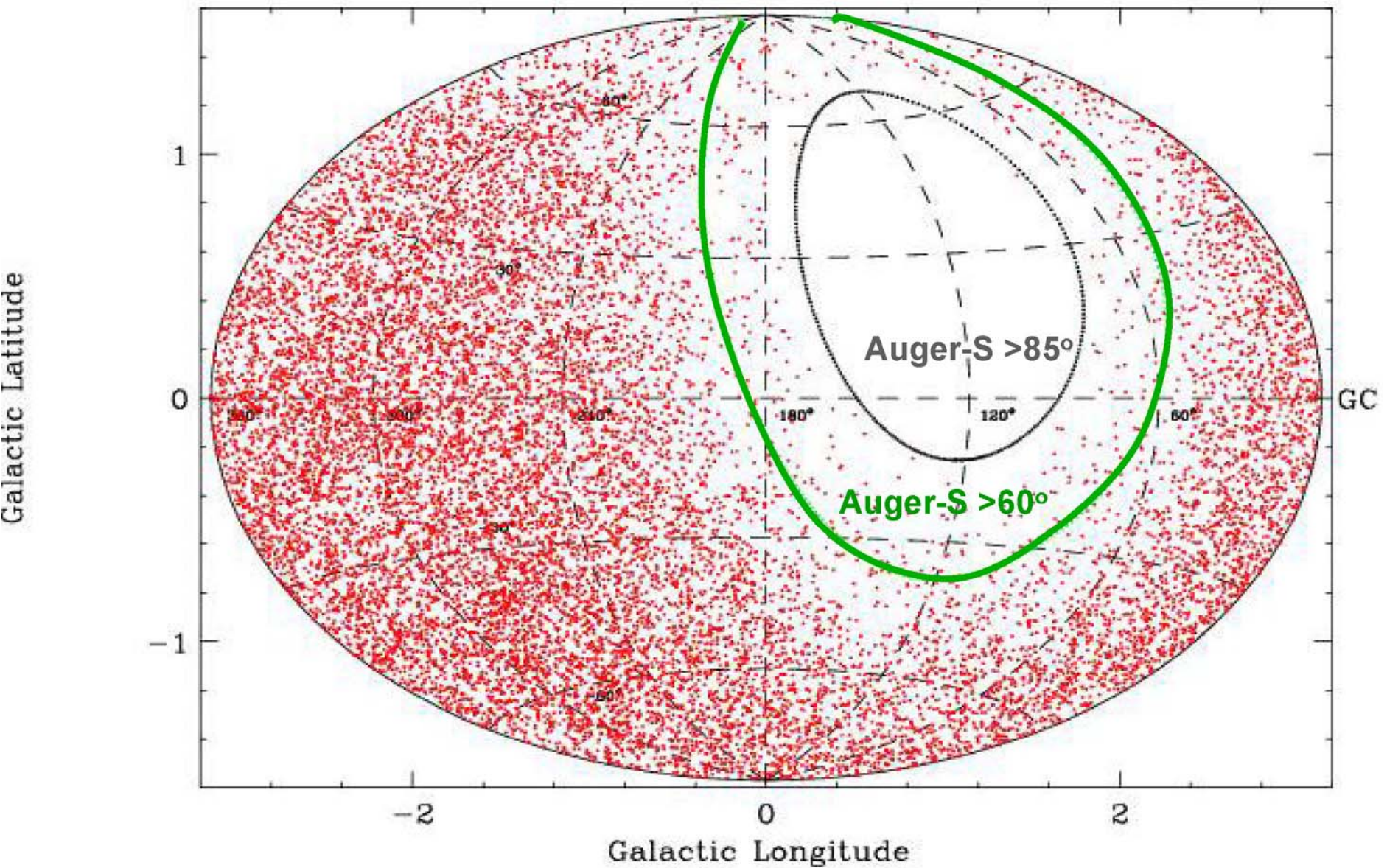
Energy estimates
preliminary!

Not a spectrum

SAGENAP April 2004.
J. Cronin



Distribution of Auger events: 60 deg bound (green), 85 deg bound (black)





Conclusion

Technical performance excellent

Expect: ~445000 events/year 10^{17} - 10^{18} eV

~125670 events/year 10^{18} - 10^{19} eV

~3150 events/year $> 10^{19}$ eV

10% of these are hybrid

(scaling from present yields)

Greatest Problem:

Cash flow from Western Hemisphere!



Cost and Funding

Auger South Total Project Cost:

March 99 - \$54.6M

October 01 - \$53.8M

January 04 – \$47.5M

However, available funding reduced by about \$10M as a result of the collapse of the Argentine economy as well as financial problems in Brazil and Mexico.

The participating countries have been asked to make up this shortfall –
In hand - \$2M, likely additional - \$6M, requests pending - \$2M

Connecting Quarks with the Cosmos (NAS – Turner Report):

***Eleven Science Questions for the New Century –
Recommendation:***

“Determine the origin of the highest energy gamma rays, neutrinos and cosmic rays.

***The Committee supports the broad approach already in place,
and recommends that the United States ensure the timely
completion and operation of the Southern Auger array.....”***

Auger USA

Pruitt Mound in Colorado Site



View to west, Sept 23, 2003

Auger USA



Site Comparison

	Southern Site	Northern Sites under Consideration	
Location/Geography			
Country	Argentina	USA	USA
State (Province)	Mendoza	Utah	Colorado
Latitude	35 -35.3 South	39 North	37 45' North
Longitude	68.9 – 69.4 West	112 West	102 45' West
Altitude	1300 m (E) 1500 m (W)	1400-1450m	1330 m (SW) 1220 m (NE)
Maximum Area (confirmed)	5,800 km ²	7,200 km ²	15,000 km ²
Geography	Flat with a gentle slope	Great Basin	High plains, gentle slope
Land Usage	Ranching (goat, cattle), small farming	Ranching, farming	Ranching, farming
Infrastructure			
Nearby Local Town	Malargue	Delta / Fillmore	Lamar
Population	18,000	3,000 / 2,000	9,000
Major City/ Airport	Mendoza, San Rafael	Salt Lake City	Denver
Distance to Site	420 km, 200 km	210 km	320 km
Weather			
Temperature (Summer)	January 20°C	July mean 24°C	July mean 25°C
(Winter)	July 4°C	January mean -3°C	January mean -2°C
"Cloudiness"		≈ 10%	≈ 7.5%
Irradiance	≈ 380 W/m ²	≈ 253 W/m ²	≈ 250 W/m ²
Land Ownership			
Private	≈100 owners (95%)	≈200 owners (20%)	≈280 owners (95%)
Federal-Owned	0 %	BLM (75%)	negligible
State-Owned	≈ 5%	≈ 5%	≈ 5%

Rivelatori a fluorescenza vs superficie

J. Cronin:

In metaphorical terms the fluorescence technique resembles a beautiful prima donna who needs constant pampering. Then she will sing with such beauty that shivers run up and down your spine.

By contrast the surface array technique reminds one of a chanteuse in a smoky bar who sings with the same passion, no matter how she feels or how she is treated.