

5. Misure sui RAGGI COSMICI tramite Sciami Estesi.

Corso “Astrofisica delle Particelle”

Prof. Maurizio Spurio

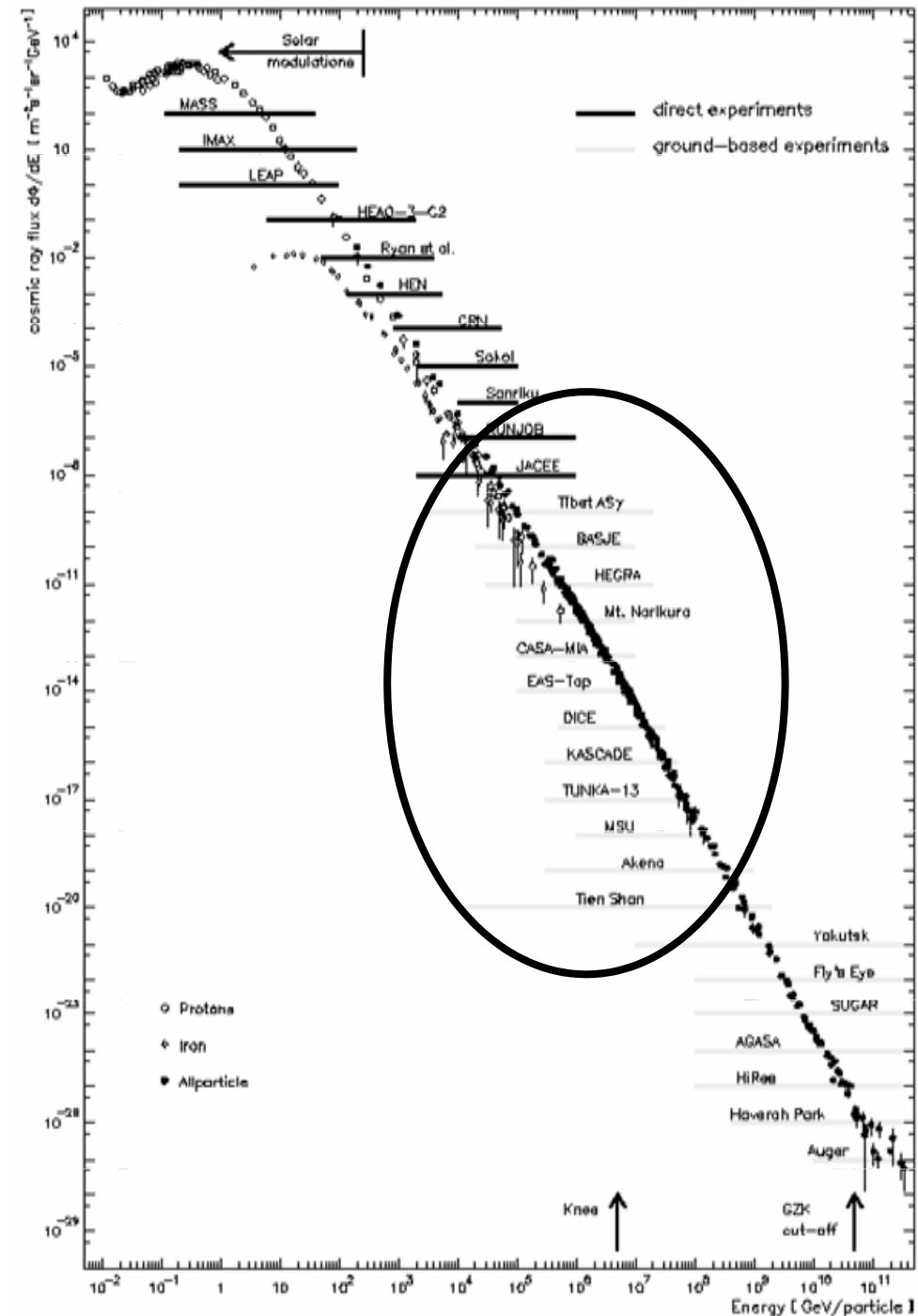
Università di Bologna. A.a. 2009/10

Outline

- Produzione di Sciami in Atmosfera (§5.1,§5.2)
- Rivelatori di Sciami estesi attorno 100 TeV (§5.3)
- Le misure del flusso per $100 < E < 10^6$ TeV (§5.4)
- Un modello di accelerazione: la pulsar (§5.5) (§5.6)
- Tecniche di rivelazione e spettro Energetico dei RC alle energie estreme, $E > 10^6$ TeV (§5.7)
- Alcuni esperimenti per $E > 10^{18}$ eV: Fly's Eye, HiRes, AGASA (§5.8), AUGER (§5.10)
- Cutoff GZK: energia di soglia e orizzonte (§5.9)
- Possibili sorgenti extragalattiche candidate (§5.11)

Spettro dei raggi cosmici (richiamo)

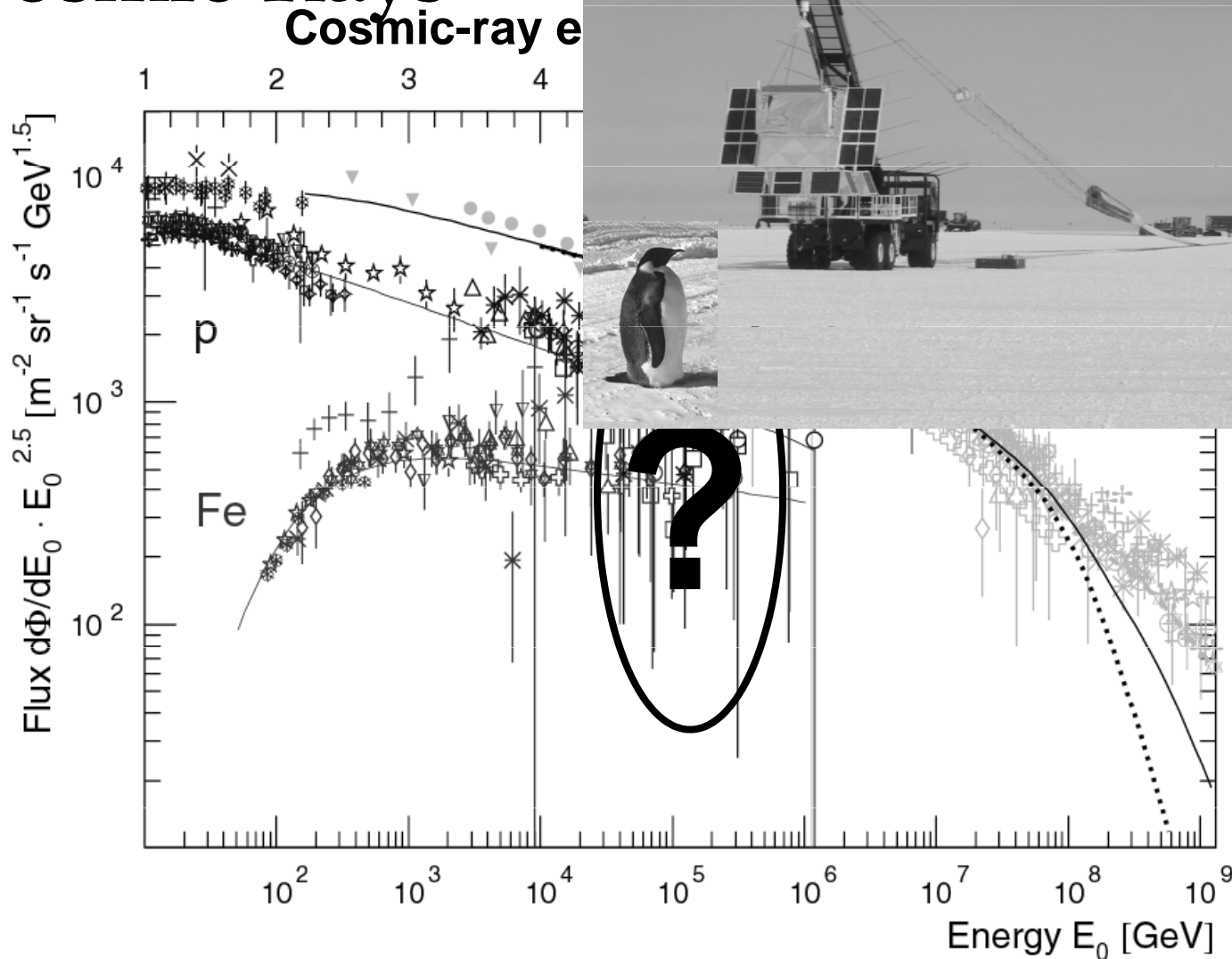
- $\Phi_{\text{TOT}} \sim 1000 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-2}\text{sr}^{-1}$
- Misure dirette: 90% p, 9% He, 1% nuclei pesanti
- Si estende per 13 ordini di grandezza in energia
- Per 32 ordini di grandezza in flusso
- Legge di potenza su tutto lo spettro, con due cambi di pendenza



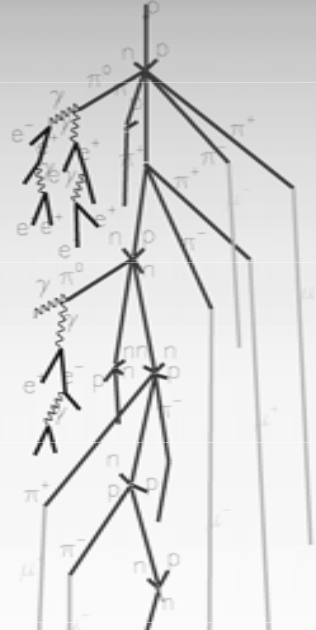
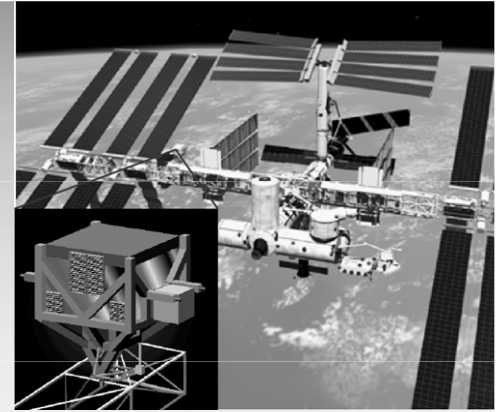
The Knee in the Energy Spectrum of Cosmic Rays

TRACER Balloon Flight
 Mc Murdo, Antarctica
 Dec. 12th – 26th, 2003

3 - 4 g/cm²



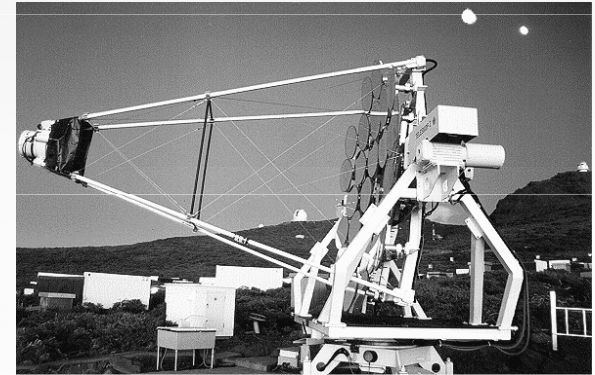
Observation of cosmic rays



Electrons Hadrons Muons



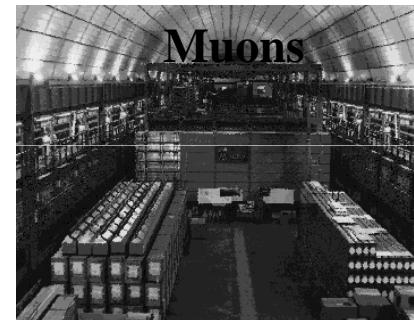
Fluorescence light



**Cerenkov light
(imaging & non-imaging)**



Neutrinos



Muons

5.1 Sciami estesi in Atmosfera

- L'interazione di un primario in Atmosfera origina uno sciame di particelle con 3 componenti:
 - Elettromagnetica (EM)
 - Muoni
 - adroni
- Le Energie dei RC molto maggiori delle E raggiungibili con acceleratori. E' possibile esplorare interazioni adroniche in regioni cinematiche non ancora studiate.
- Tevatron: protoni e antiprotoni collidono frontalmente con energia nel CdM pari a $\sqrt{s} = 2TeV$
- LHC: protoni protoni "head-on" con $\sqrt{s} = 14TeV$

**CORSIKA
Simulation
QGSJET/EGS4**

proton

$E=10^{14}$ eV

iron nucleus

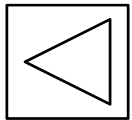
50 km

40 km

30 km

20 km

10 km

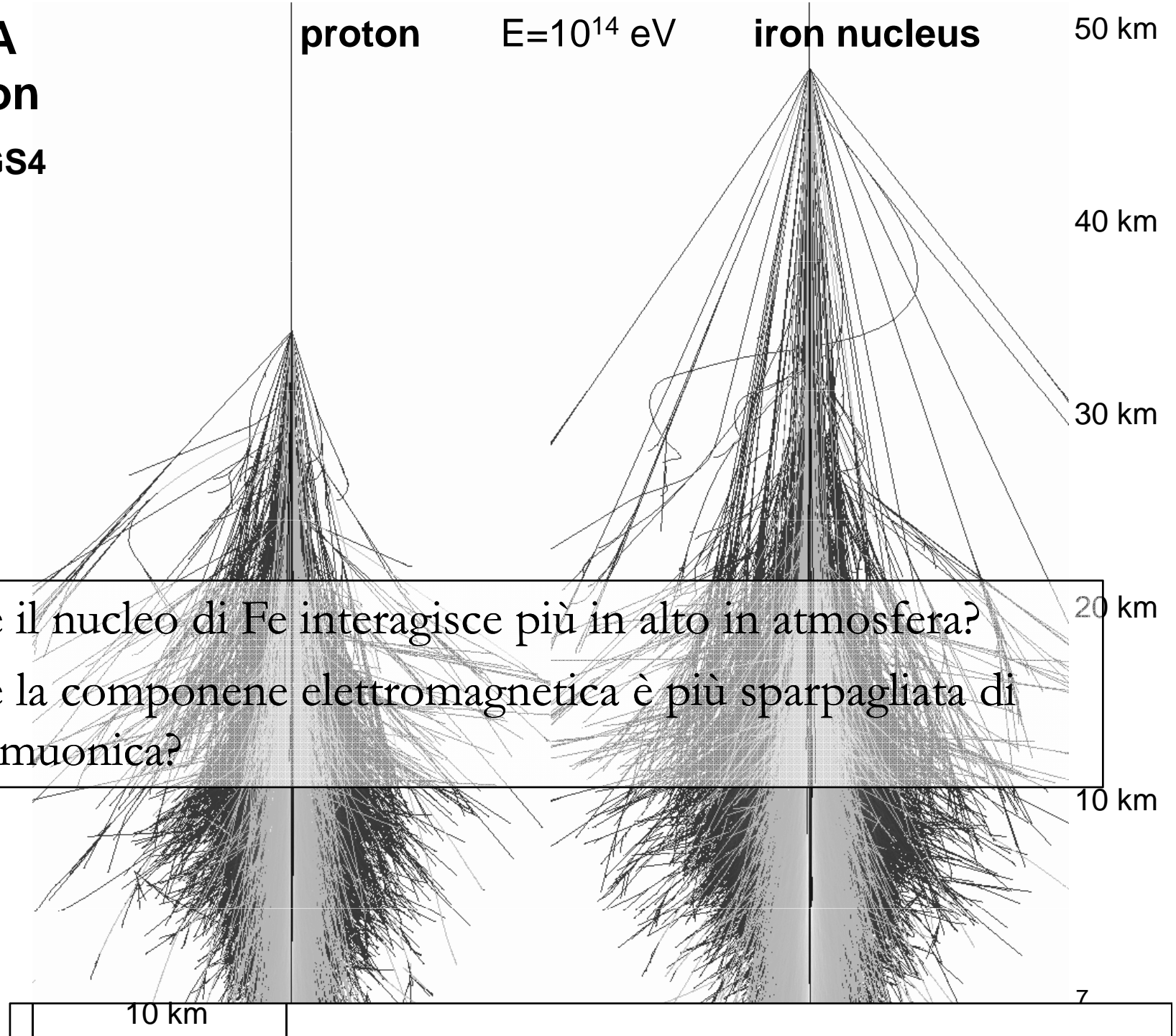


- Perché il nucleo di Fe interagisce più in alto in atmosfera?
- Perché la componente elettromagnetica è più sparpagliata di quella muonica?

e/ γ
 μ
h

10 km

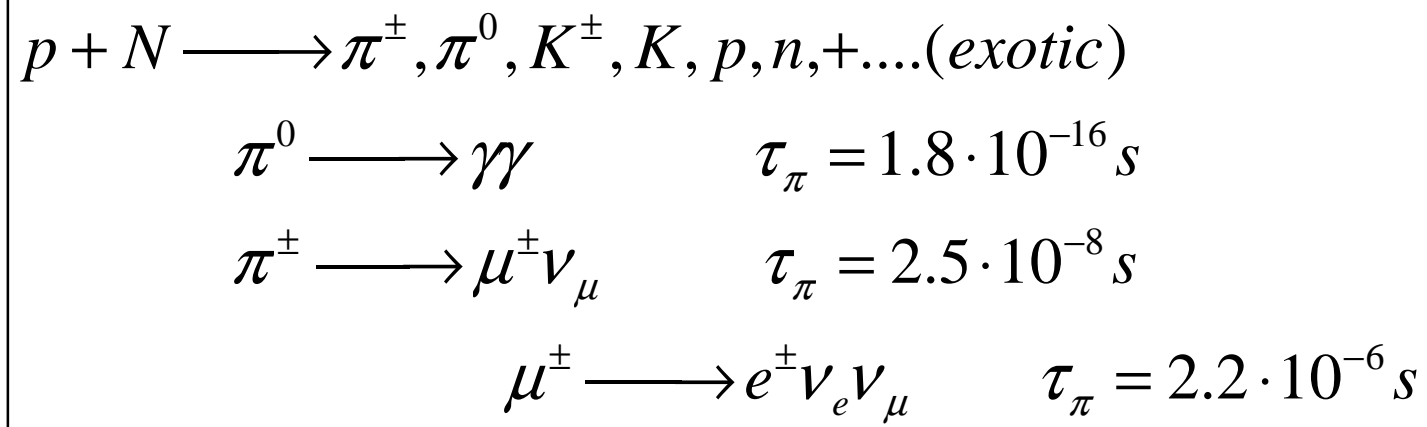
7



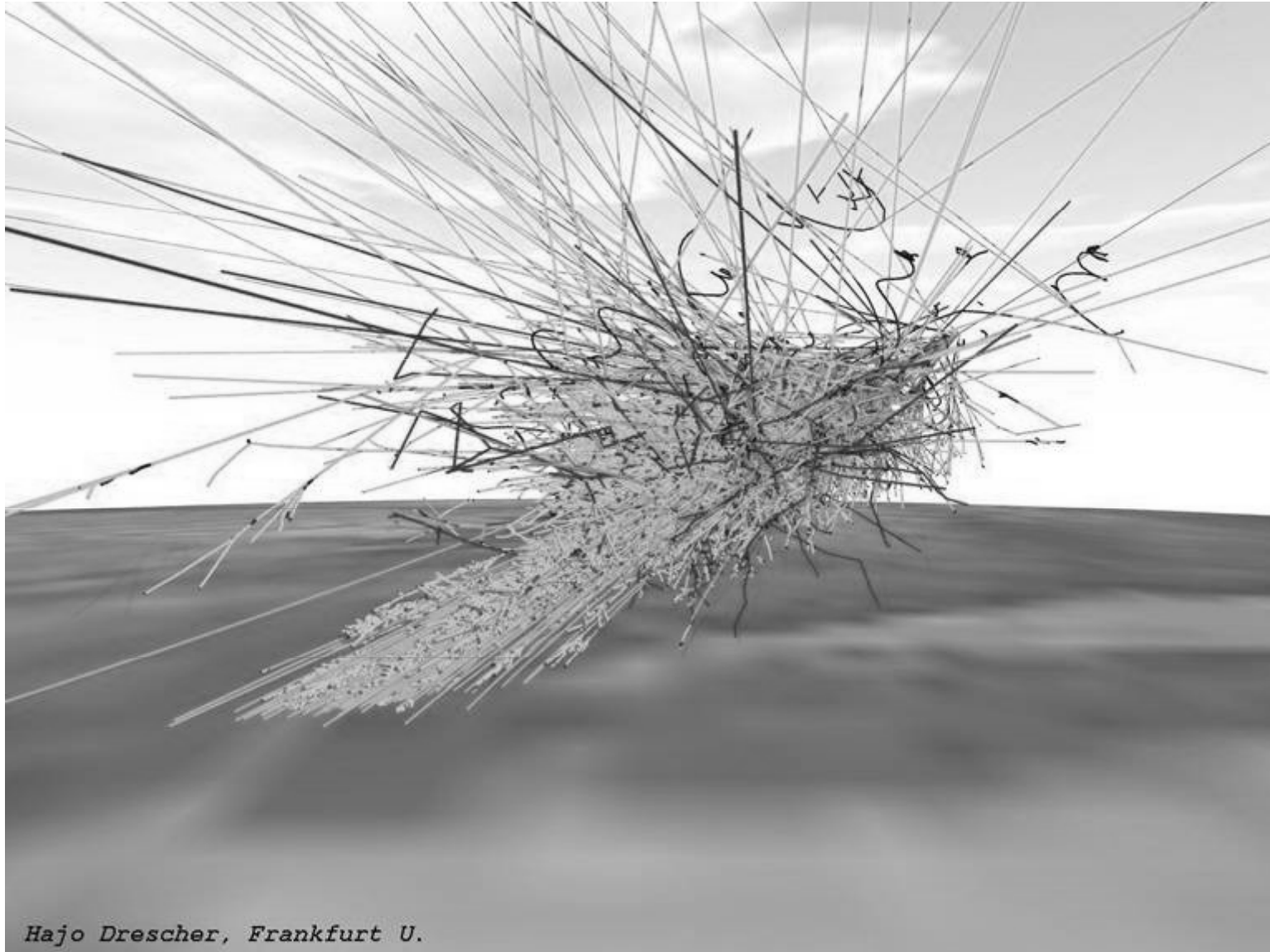
- P e nuclei interagiscono sulla sommità dell'atmosfera con lunghezza interazione λ :

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

- 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

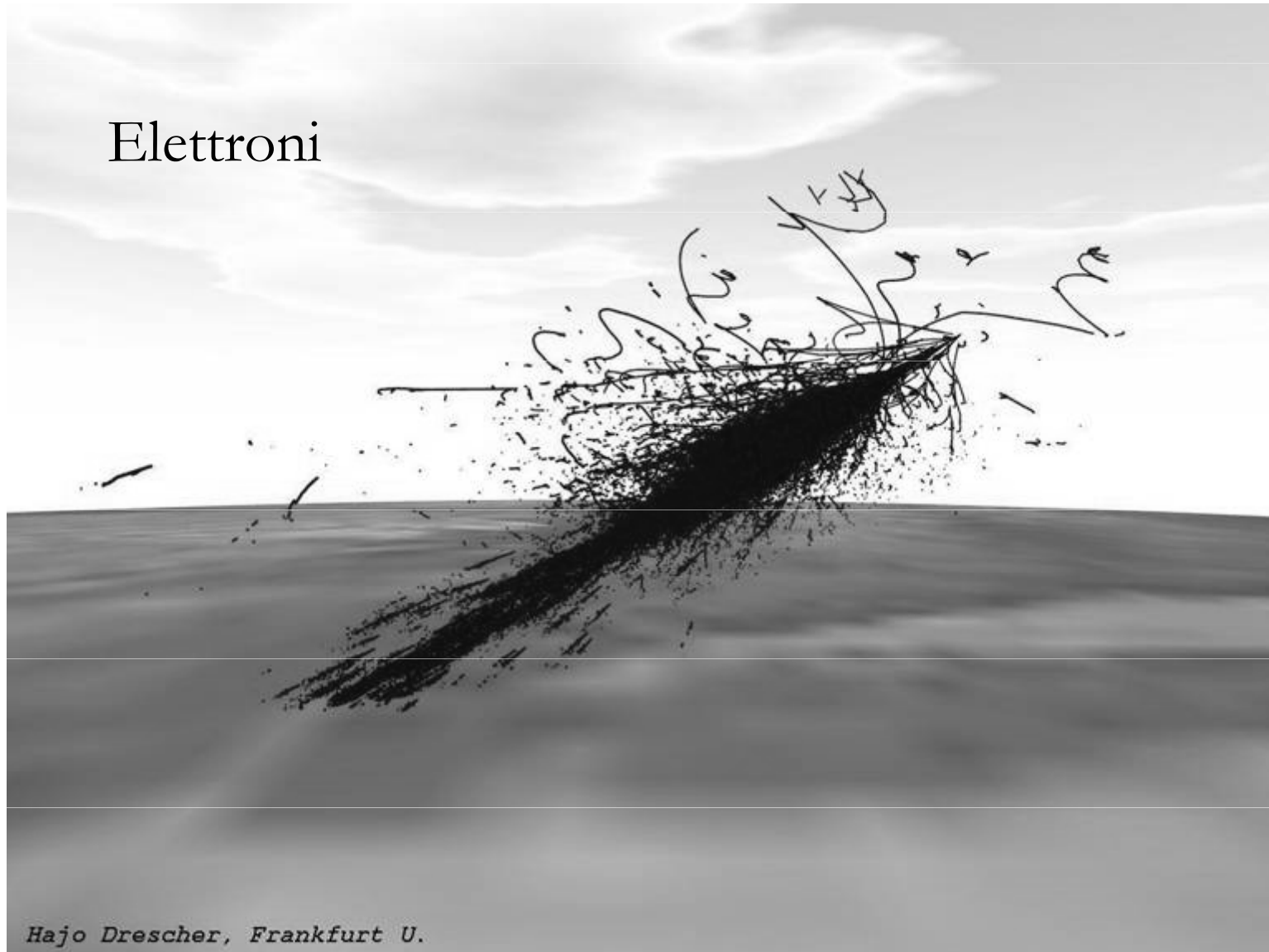


Simulazione MC di una interazione di un RC di altissima energia

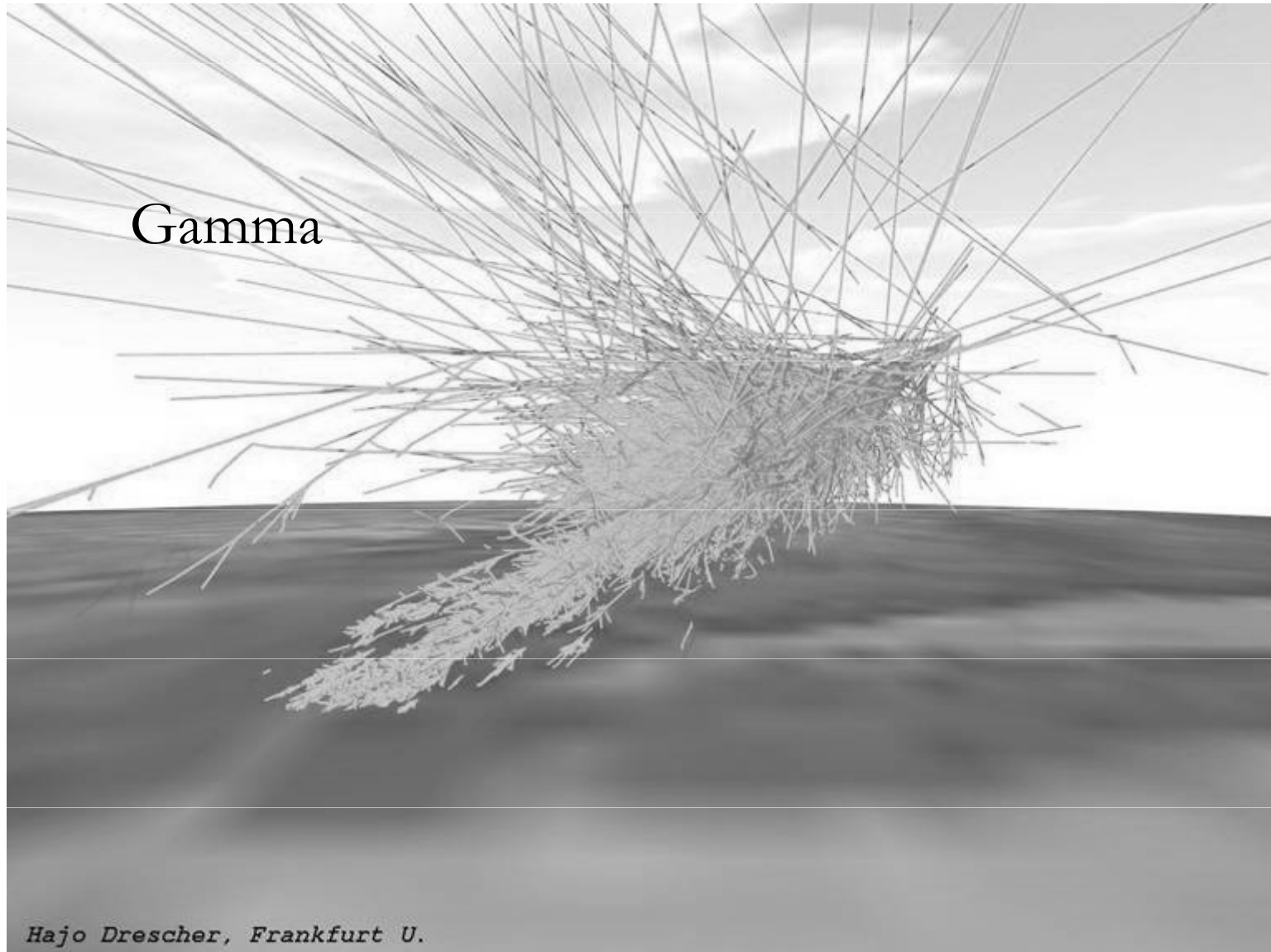


Hajo Drescher, Frankfurt U.

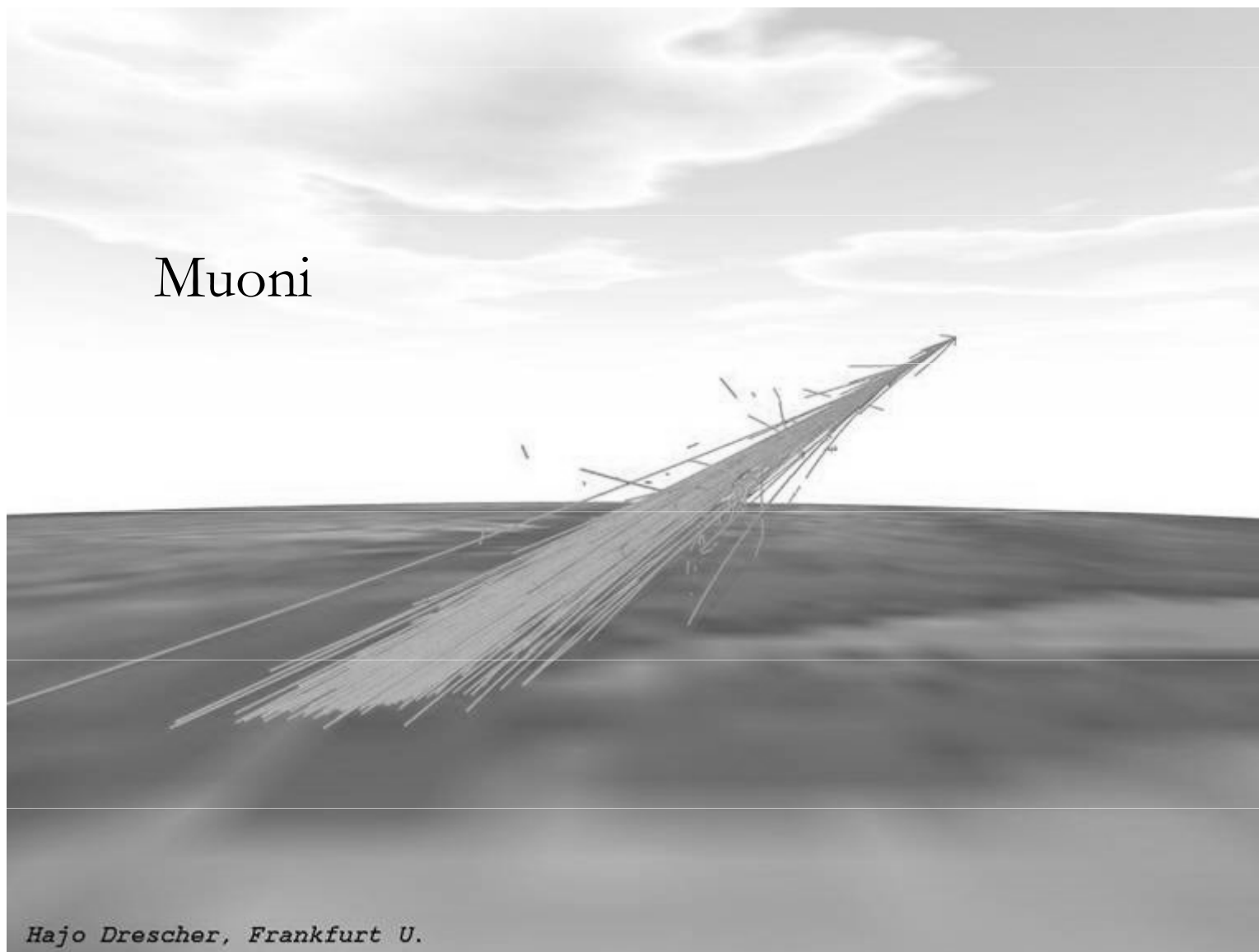
Simulazione MC di una Cascata



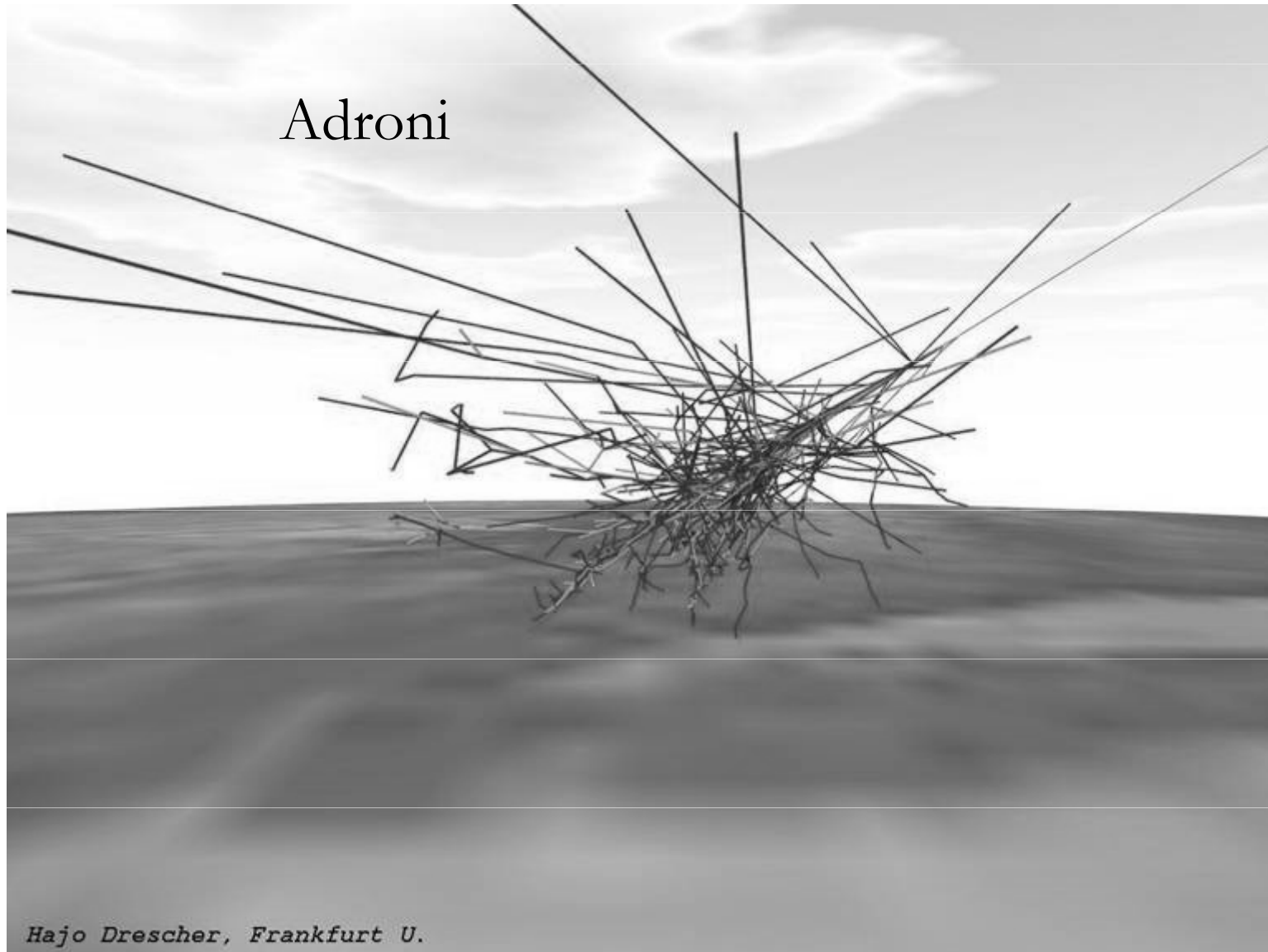
Simulazione MC di una Cascata



Simulazione MC di una Cascata



Simulazione MC di una Cascata



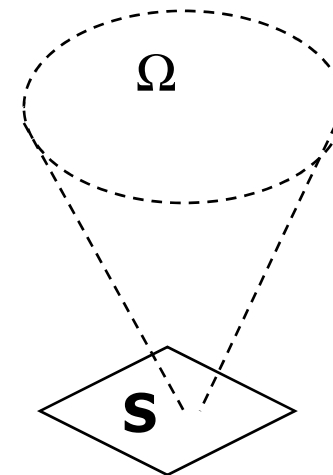
Come rivelare I RC di alta energia?

Per rivelare I raggi cosmici di energia elevata, occorre:

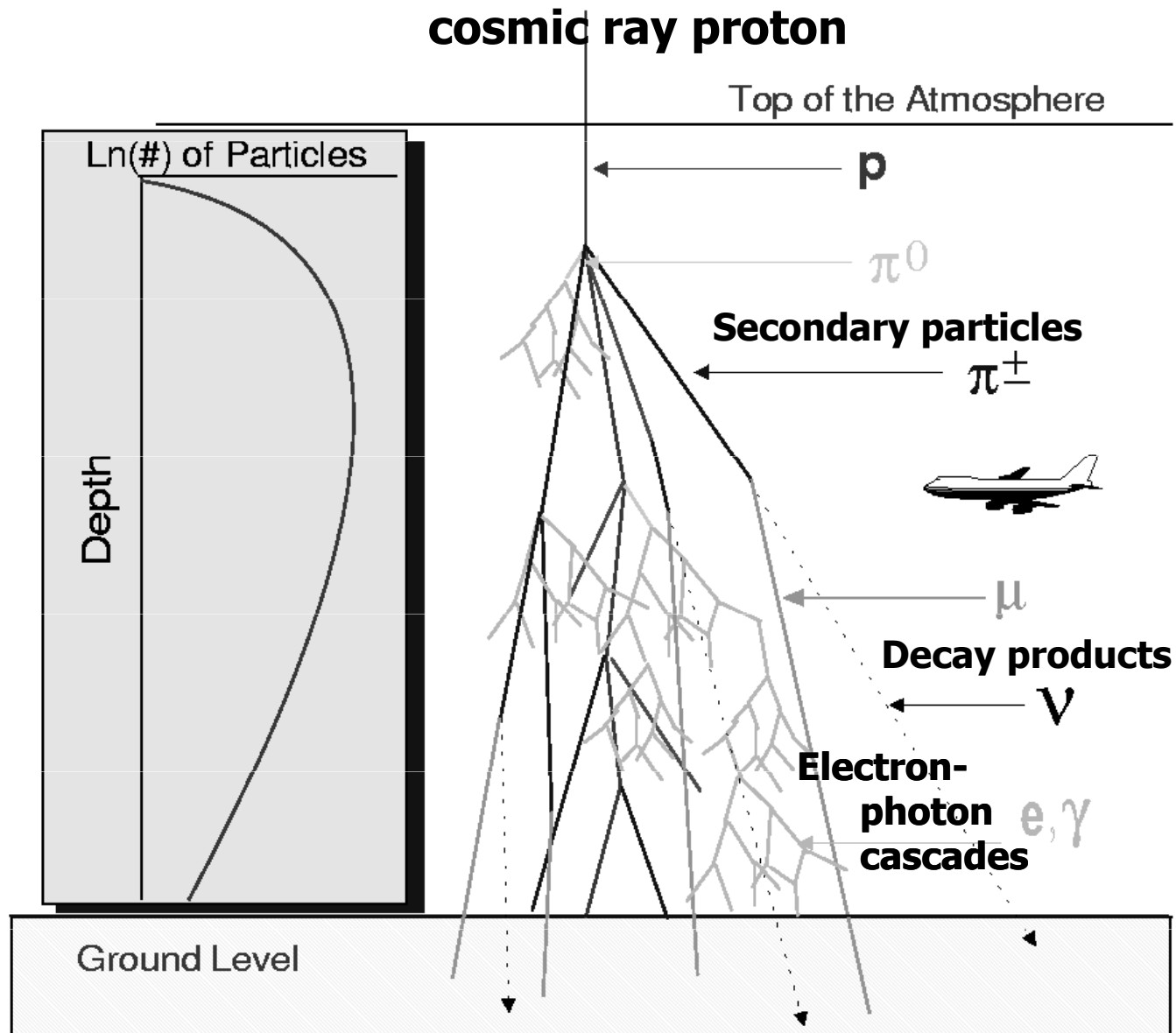
- Una grande area di raccolta, S
- Una grande accettazione in angolo solido, Ω
- Un grande tempo di esposizione T

La grandezza “exposure” $S\Omega T = \text{m}^2\text{-steradian-days}$
determina il numero di eventi di alta energia rivelabili.

Il flusso di primari con energia
 $E_0 > 10^{19}$ eV è circa:
 0.5 particelle per $\text{km}^2\text{-sr-year}$



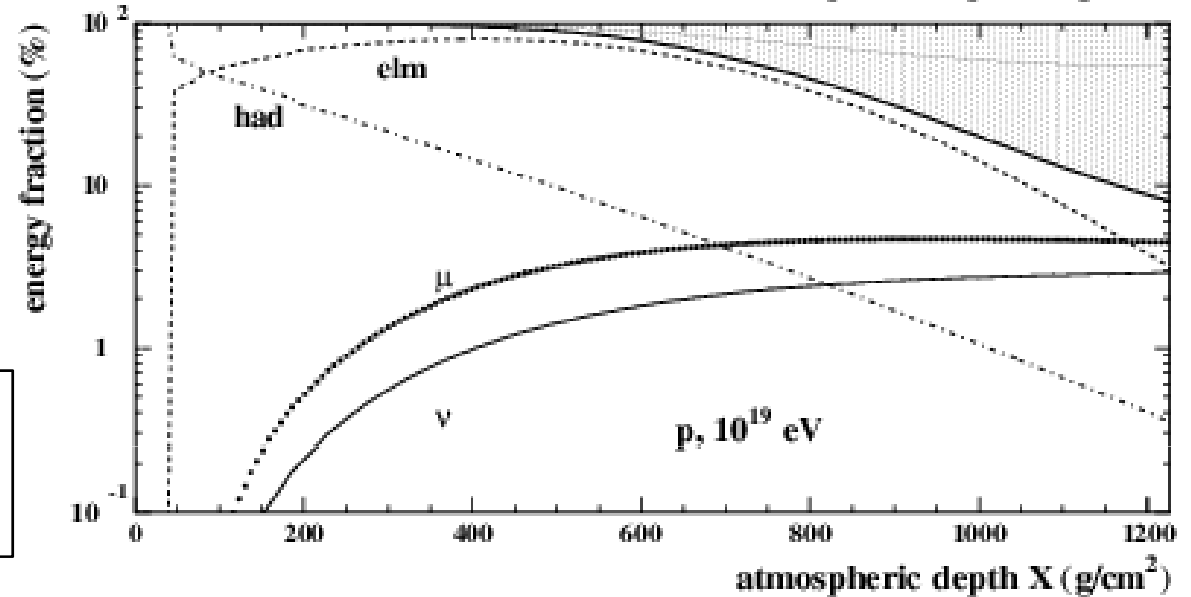
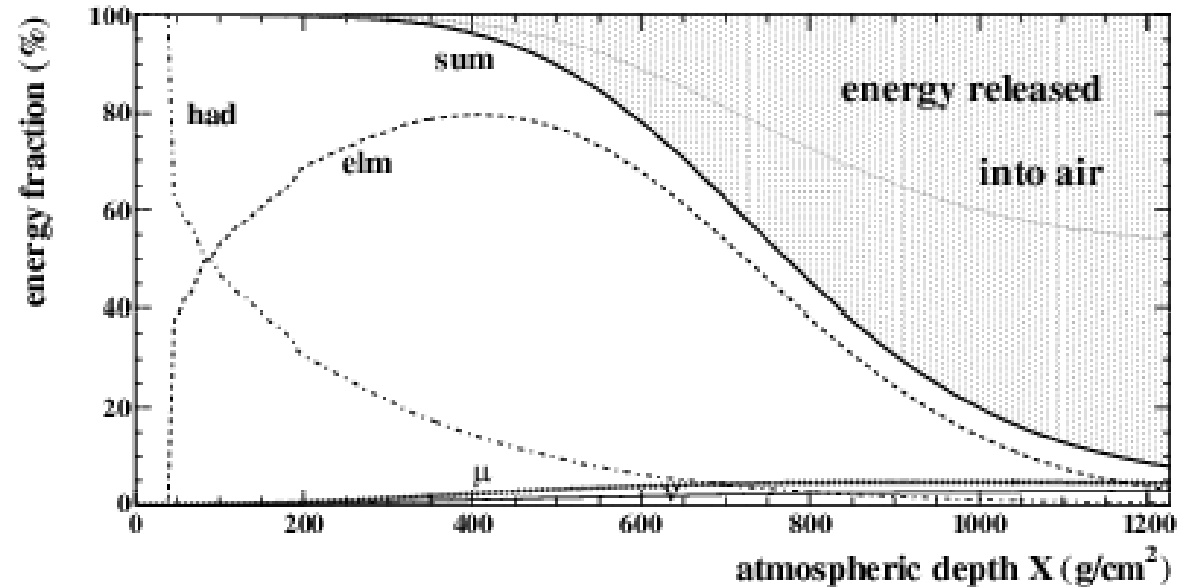
Le componenti dello sciame



Caratteristiche generali dello sciame

- Gli adroni vengono esponenzialmente attenuati
- Lo sciame EM si sviluppa esponenzialmente sino ad un massimo, la cui profondità aumenta con E_0 (E primario)
- Sulla superficie terrestre (ed underground), prevalentemente muoni

Domanda: *che differenza c'è tra le 2 figure?*



Caratteristiche generali dello sciame

- Un altro modo di vedere le cose:

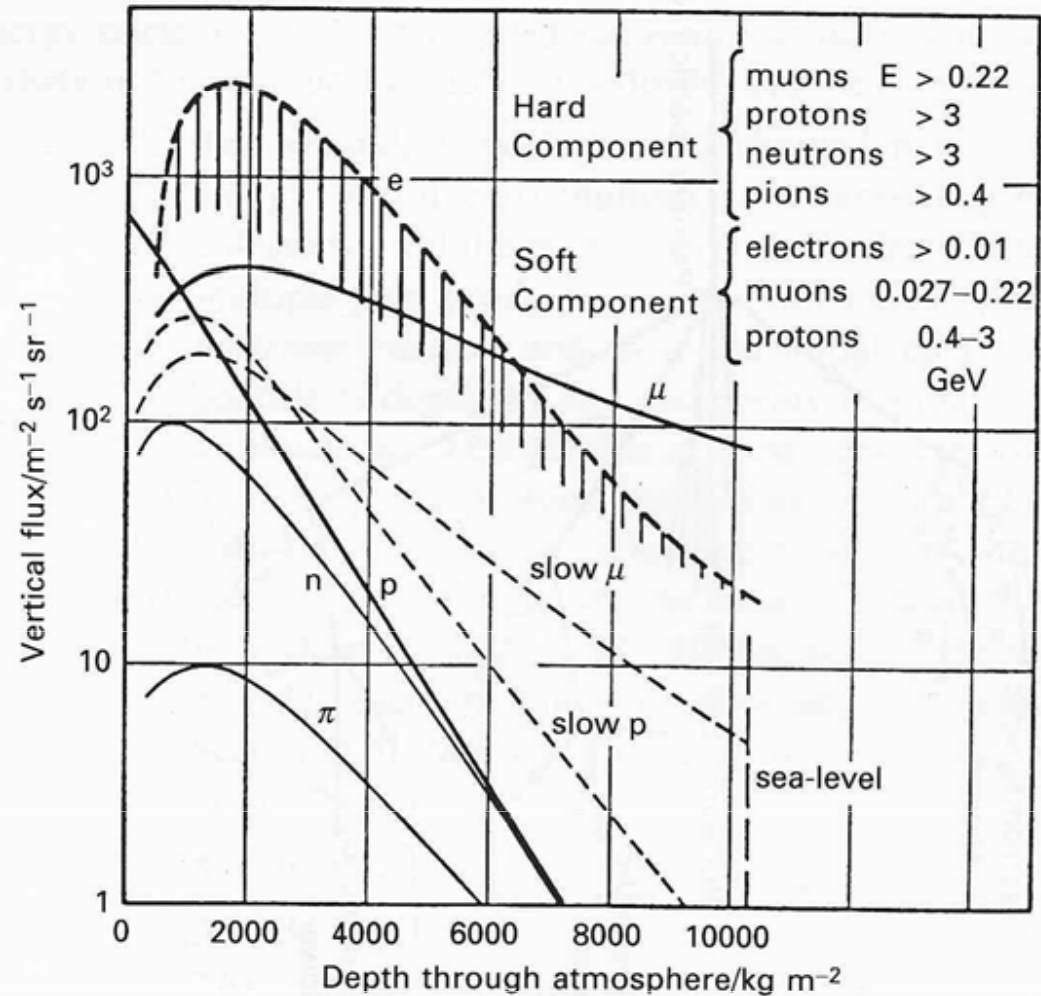


Figure 5.12. The vertical fluxes of different components of cosmic rays in atmosphere. (From A. M. Hillas (1972). *Cosmic rays*, page 50, Oxford: Pe

5.2 Lo sciame Elettromagnetico

- E' indotto dal decadimento dei mesoni neutri $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$
- Il principale meccanismo di interazione dei fotoni è la creazione di coppie, la perdita di energia descrivibile da:

$$-\frac{dE}{d\xi} = \frac{E}{\xi_0} \Rightarrow E(\xi) = E_0 \exp\left(-\frac{\xi}{\xi_0}\right)$$

- Definiamo la grandezza: $R = \xi_0 \ln 2$

da cui:

$$E(R) / E_0 = \exp\left(-\frac{\xi_0 \ln 2}{\xi_0}\right) = \frac{1}{2}$$

- Ciò significa che un elettrone ha 50% di probabilità di emettere un γ per bremsstrahlung dopo R.

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

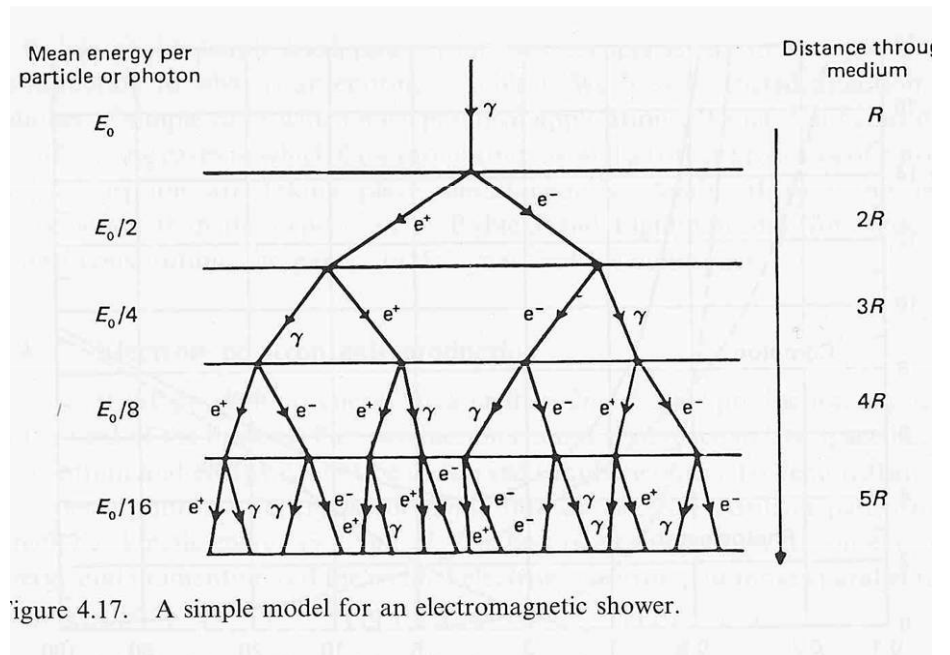


Figure 4.17. A simple model for an electromagnetic shower.

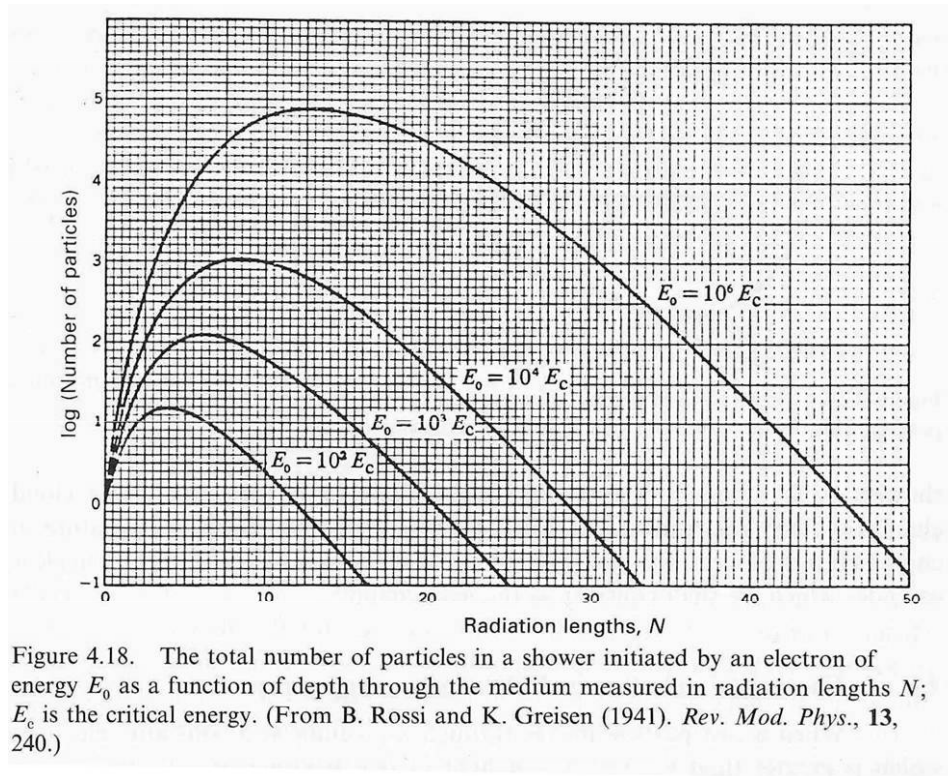


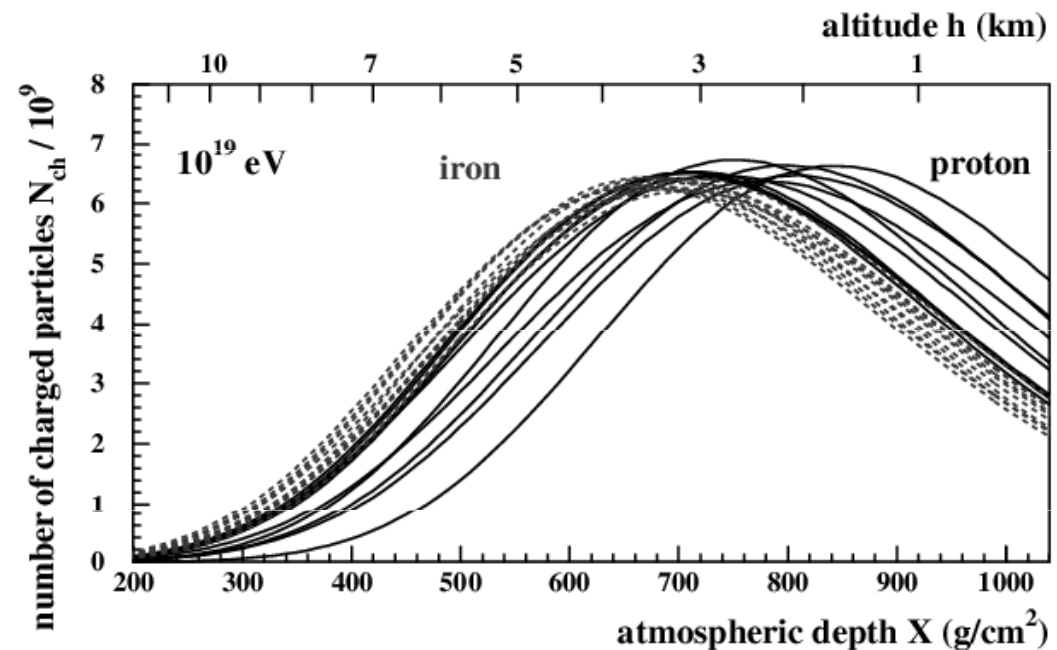
Figure 4.18. The total number of particles in a shower initiated by an electron of energy E_0 as a function of depth through the medium measured in radiation lengths N ; E_c is the critical energy. (From B. Rossi and K. Greisen (1941). *Rev. Mod. Phys.*, **13**, 240.)

- 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

Profondità e massimo dello sciame EM

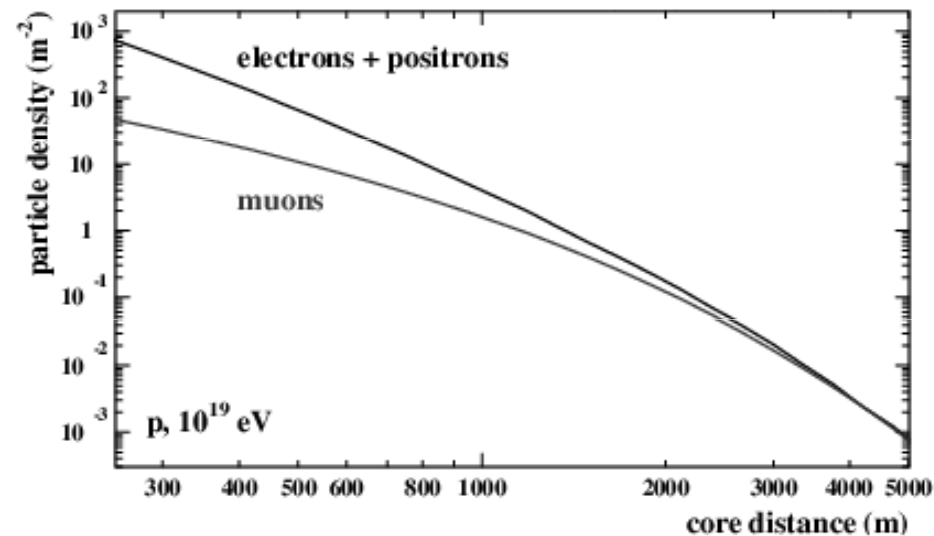
- Il numero di particelle prodotte dopo nR : $N=2^n$
- Energia media di ciascuna particella alla profondità nR in atmosfera: $E_{nR}=E_0/2^n$
- Lo sviluppo si arresta quando l'energia media di una particella uguaglia l'energia critica E_c
- Per un certo valore di n^* , si verifica la condizione:
$$E_{n^*R}=E_0/2^{n^*}=E_c \quad (\text{massimo dello sciame})$$
- Il numero di particelle al massimo: $N_{\max}=2^{n^*}=E_0/E_c$
- La profondità (in $g\text{ cm}^{-2}$) del massimo:
$$D=n^*R = n^* \ln 2 \xi_0 = \xi_0 \ln(E_0/E_c)$$
- (La lunghezza di radiazione in aria: $\xi_0 = 37\text{ gcm}^{-2}$)

- Il numero di particella al massimo dipende linearmente da E_0
- Solo una frazione ($\sim 1/3$) di E_0 viene convertita nello sciame EM; dalla misura (effettuata a *campionamento* con un rivelatore di sciame estesi) del numero di particella si può risalire tramite MC ad E_0 . In genere: $E_0 = (1.1 \div 1.6) N_{\max} \text{ (GeV)}$.
- La profondità D del massimo dello sciame dipende in maniera logaritmica dall'energia del primario $D \propto \xi_0 \ln(E_0/E_c)$
- Il n. di particelle non alla posizione del massimo D è una funzione più complicata dell'energia (\rightarrow MC).



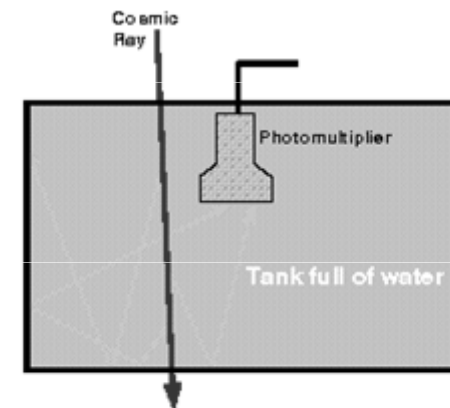
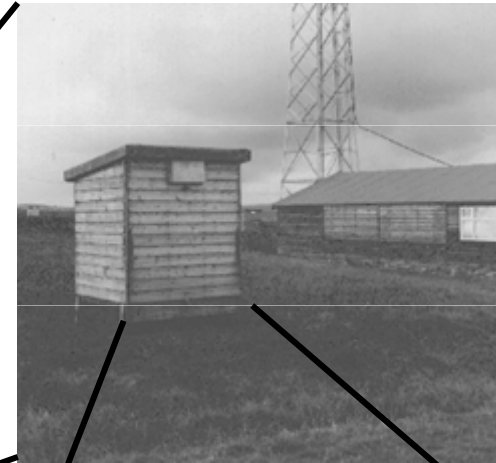
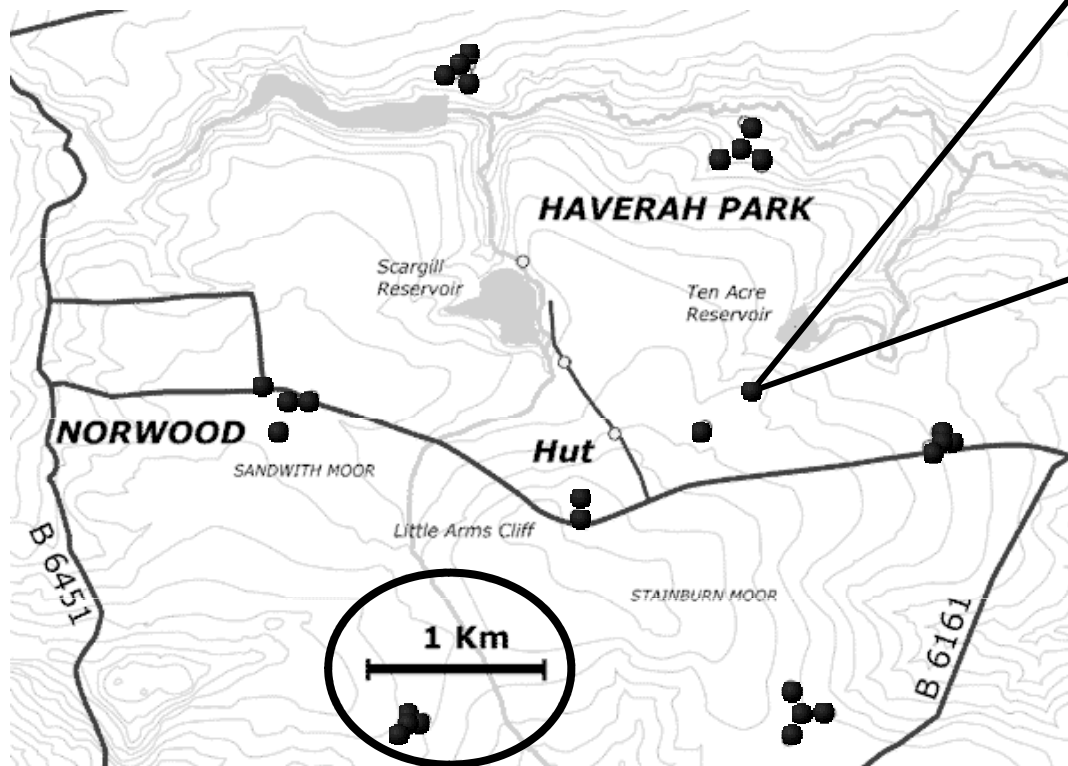
Distribuzione laterale dello sciame EM

- La maggior parte delle particelle che arrivano al suolo sono e^+, e^- . La frazione tra numero di μ e di e e' circa 1/100.
- I Muoni rivelati provengono prevalentemente dalla sommita' dell'atmosfera. Il loro numero aumenta all'aumentare del numero di massa del primario (meno energia per nucleone \rightarrow maggiore probabilita' dei pioni di decadere invece di interagire con altri nuclei dell'atmosfera.)



5.3 Rivelatori di Sciami

- Apparatii sperimentali (Extensive Air Shower Arrays, EAS) che misurano sciame estesi sono in genere situati in alta quota.
- Misurano lo sciame “campionandolo” su una vasta superficie



- Il rivelatore di sciame KASKADE (Karlsruhe) in Germania
- Ciascuna casetta contiene un rivelatore
- Distanza media: 13 m. L'edificio centrale contiene l'elettronica necessaria per l'esperimento
- Ottimizzato per lo studio dei RC nella regione del ginocchio. Non necessita di essere molto grande.



e/μ



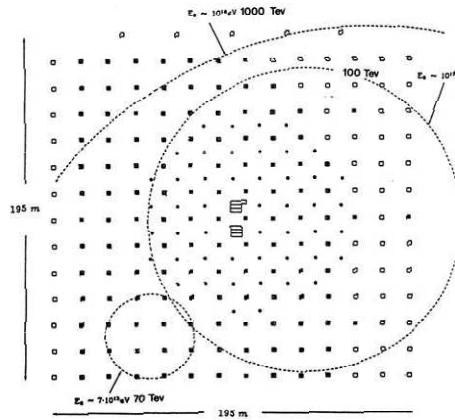


Figure 3: Effective circle (density $> 1 \text{ e/m}^2$) for electrons reaching the ground in an air shower at zenith. The energy quoted is the initial cosmic-ray energy (high-energy proton) [2].

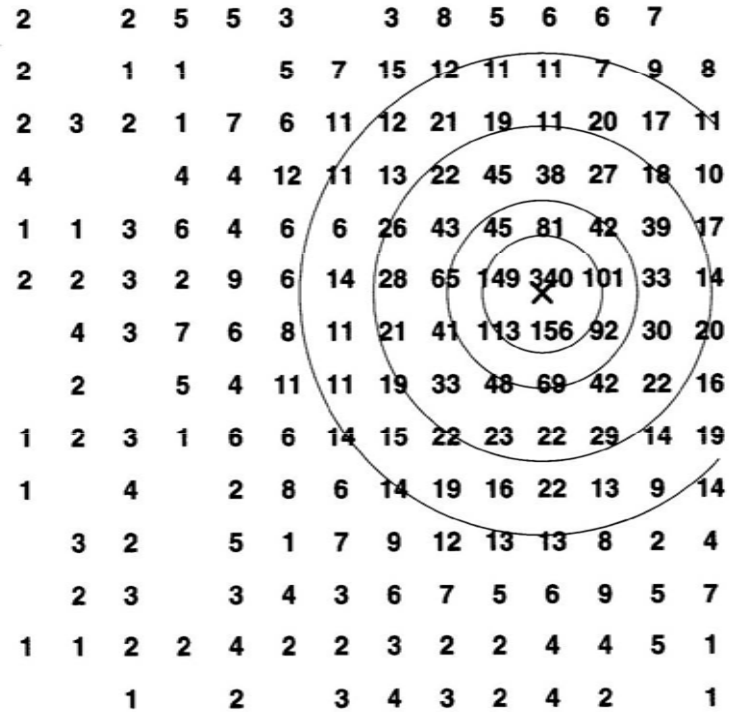


Fig. 8.13. Map of an air shower in a 196 detector array on a 15 m grid. The densities from (8.18) fluctuate with a Gaussian distribution with $\sigma = \sqrt{\rho}$. Because of that some detectors do not trigger.

Distribuzione laterale (un esempio)

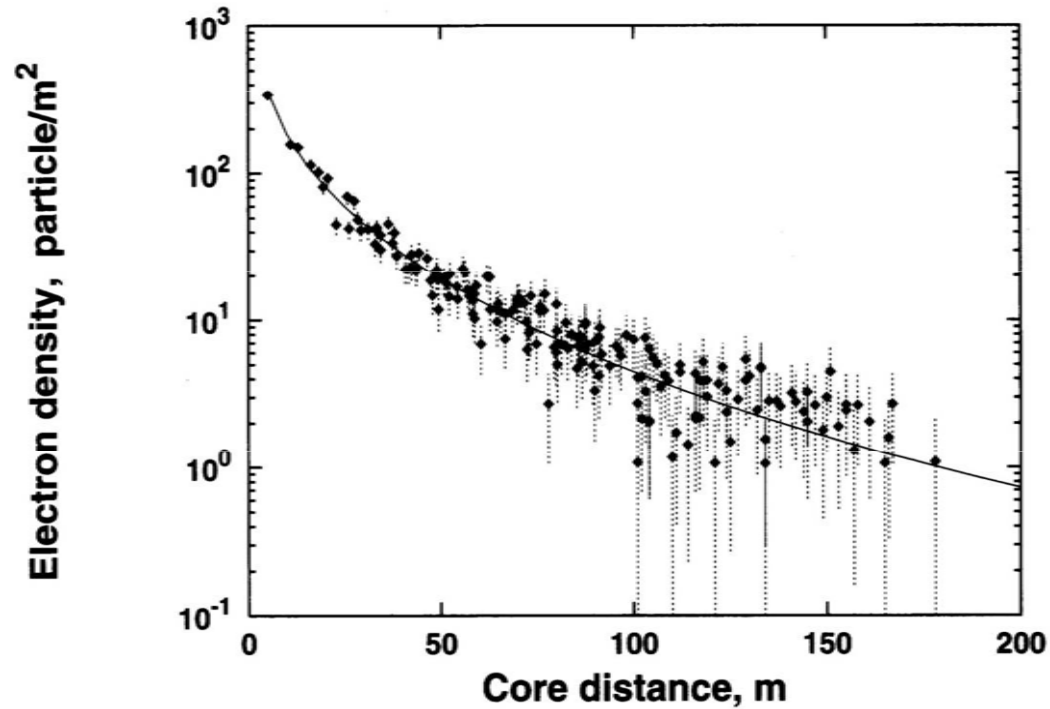
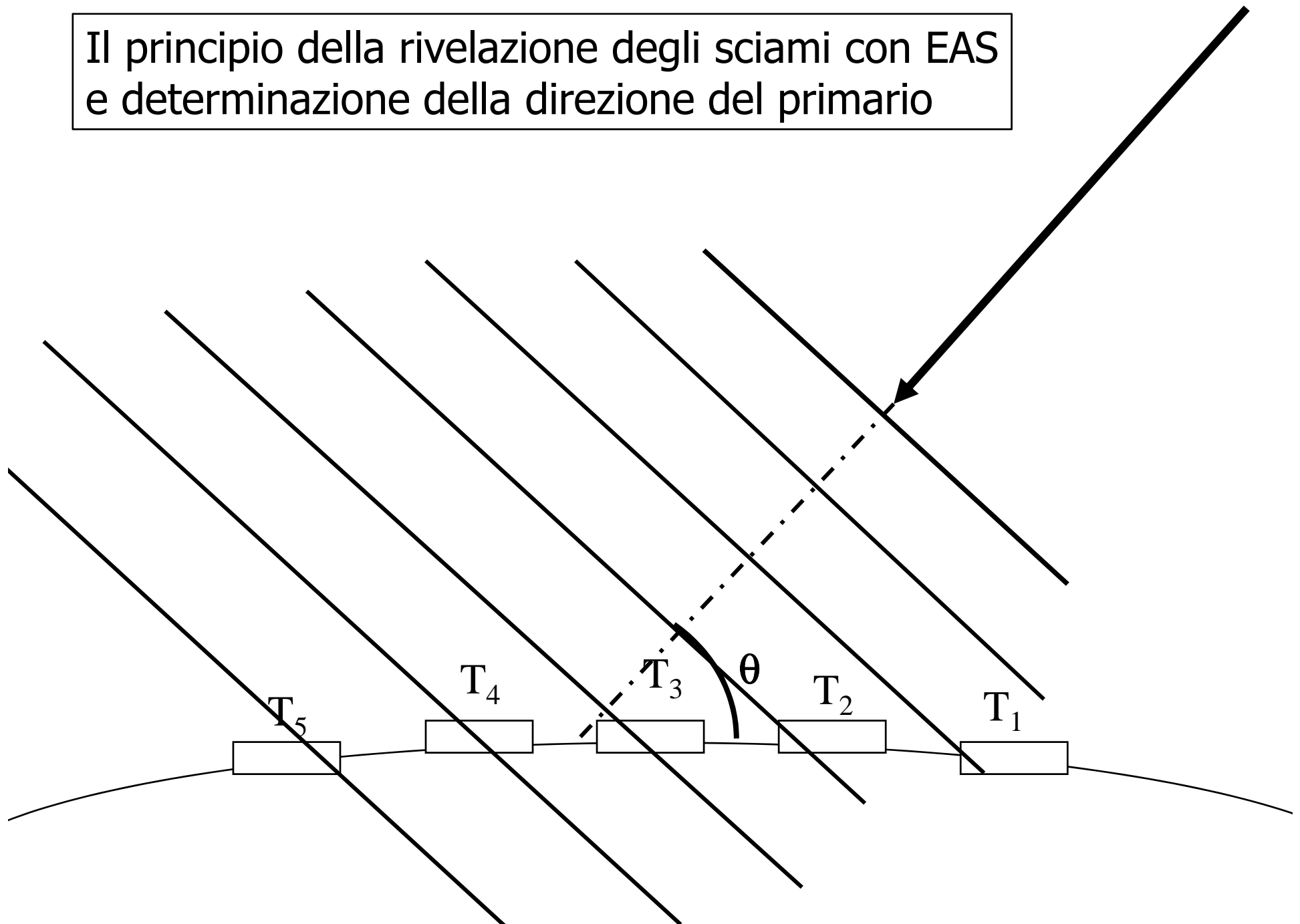


Fig. 8.15. The density distribution for the shower mapped in Fig. 8.13. The line shows the average charged particle lateral distribution.

LA FISICA DELLO SCIAME ESTESO

- La distanza media tra i contatori determina la *energia minima* dello sciame rivelabile.
- Il numero dei contatori, la *precisione* della misura
- L'area totale coperta, determina la *massima energia* misurabile.
- Ciascun contatore (*casetta*) misura in modo proporzionale la perdita di energia delle particelle che lo attraversa; da qui, si risale al numero di particelle incidenti
- Dalle misure della densità di particelle in ciascuna casetta dell'array, si risale alla distribuzione laterale $D(r)$.
- Dalla misura di $D(r)$ si risale all'energia del primario, e *dalla frequenza del numero di conteggi* si risale al flusso.
- La direzione dello sciame può essere determinata dalla *misura dei tempi di ritardo temporale* nell'arrivo dello sciame su diverse cassette (le particelle dello sciame sono \perp al suo asse)

Il principio della rivelazione degli sciami con EAS e determinazione della direzione del primario



5.4 La misura del flusso RC con EAS

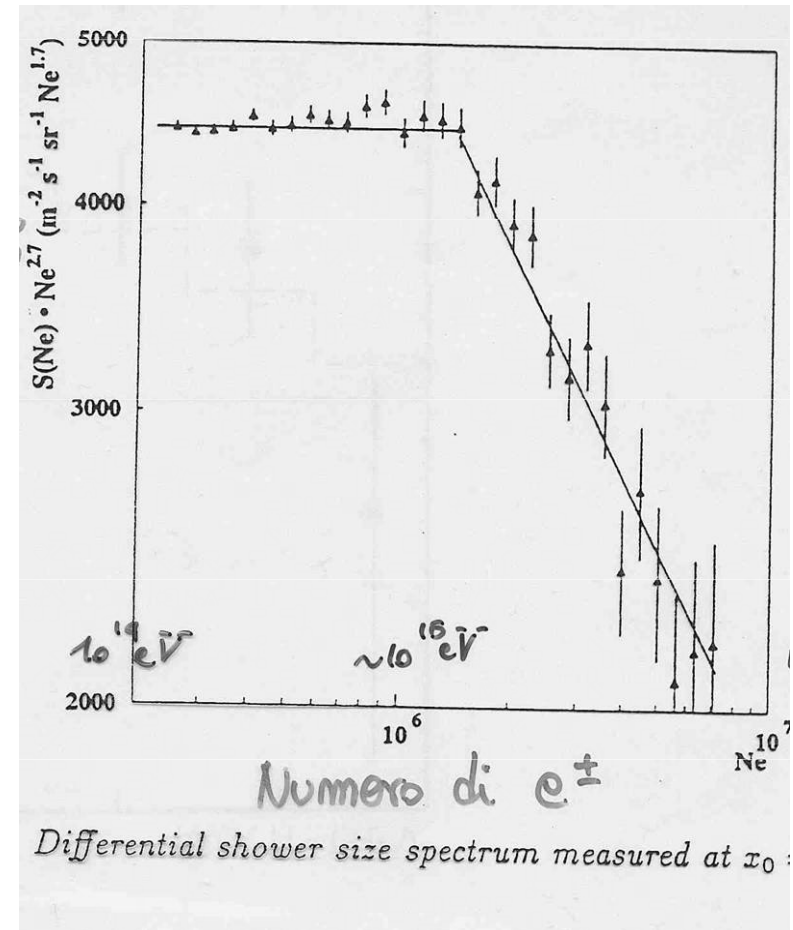
- Gli EAS sono diversi, ed errori sistematici del 20% sono tipici per la misura dell'energia del primario
- Lo spettro energetico misurato nell'intervallo $10^{16} < E_0 < 10^{19}$ eV è dato dalla funzione:

$$\Phi(E) = K \cdot E^{-3.1} \quad cm^{-2} s^{-1} sr^{-1} GeV^{-1}$$

- La regione tra $10^{14} < E_0 < 10^{15}$ eV è detta ***Ginocchio***, a causa del cambiamento di pendenza.
- I RC sono completamente isotropi.
- I RC si arricchiscono di nuclei pesanti nella regione oltre il ginocchio, sino ad energie $E_0 < 10^{19}$.

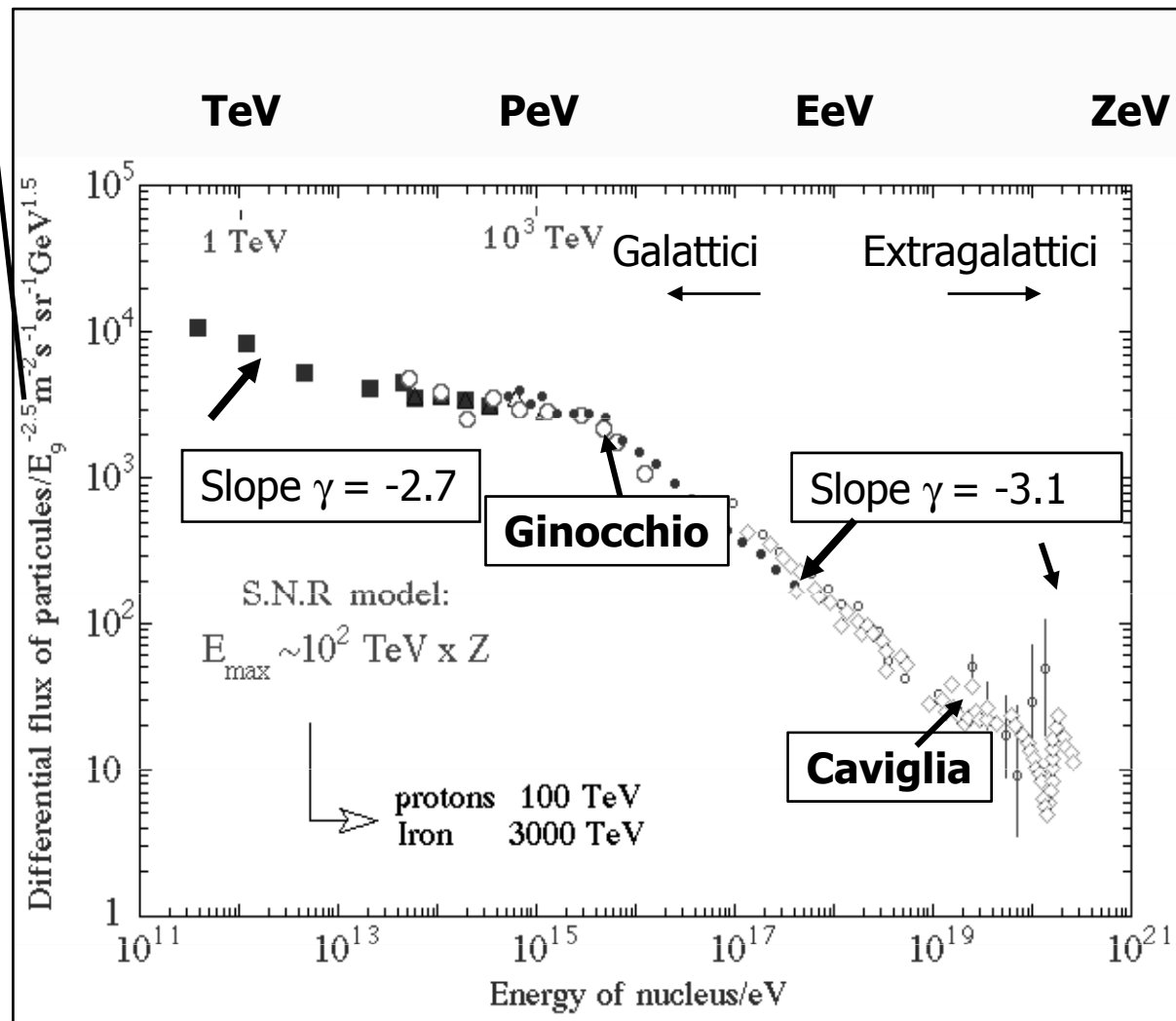
Esempio: EAS-TOP

- In figura, un esempio della misura del flusso di primari a Campo Imperatore (EAS-TOP, $x_0=810 \text{ g cm}^{-2}$)
- Si nota un cambiamento nella frequenza di conteggi, quando il numero di particelle rivelate è $Ne > 1.5 \cdot 10^6$.
- PROBLEMA: Il cambiamento di pendenza è dovuto a *variazioni delle interazioni tra RC e nuclei*, oppure ad effetti di *propagazione* o *produzione* dei RC?

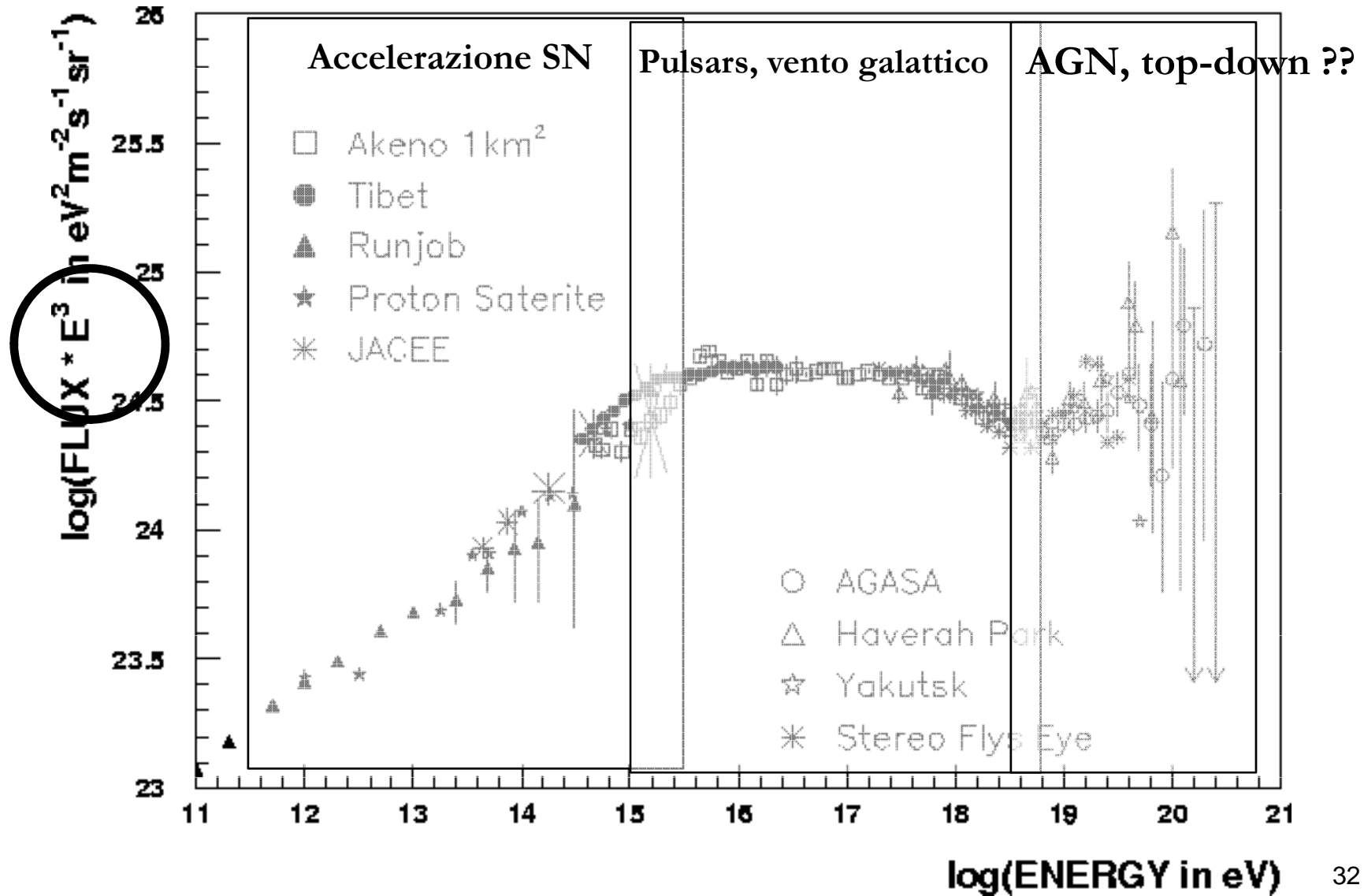


Ancora lo spettro dei RC, ma...

L'asse y viene moltiplicato per $E^{2.5}$, in modo da rendere "più piatta" la figura, ed accentuare il *cambiamento di pendenza!*



Dati e sorgenti ipotizzate



I dati sperimentali

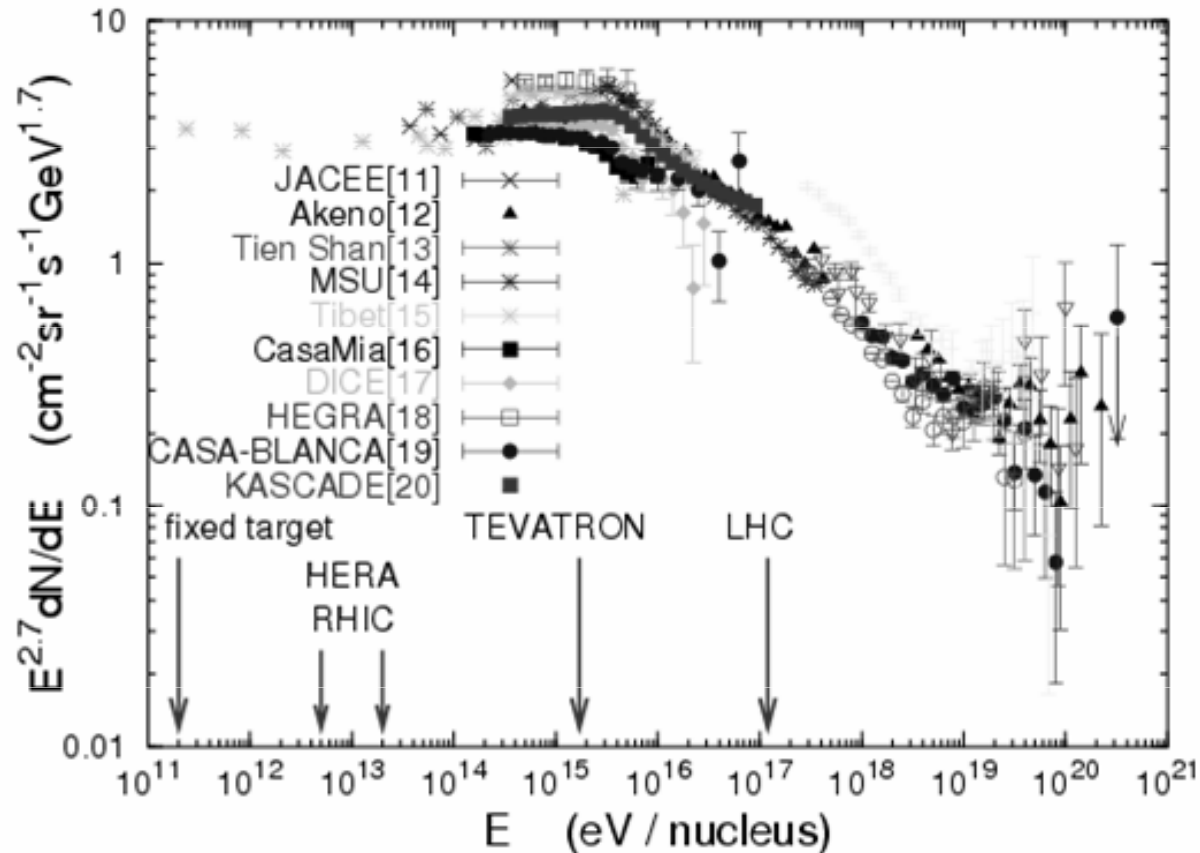
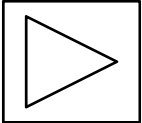
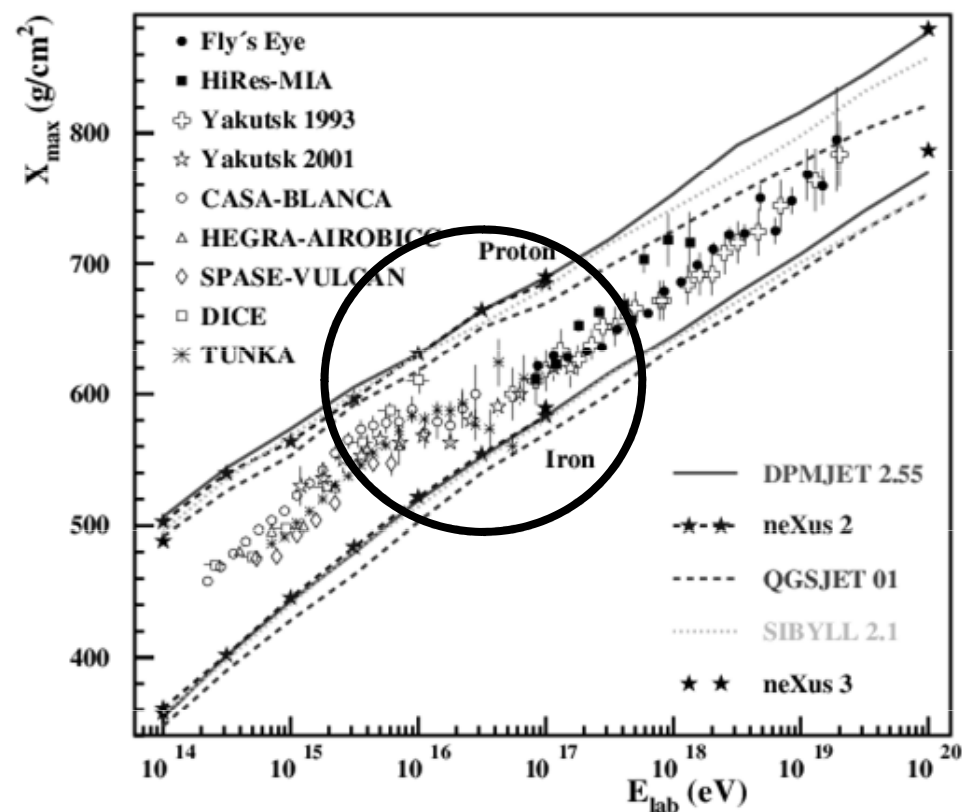


FIGURE 1. Summary of measurements of the high energy cosmic-ray spectrum. Data below 100 TeV are from a satellite detector [10]. Data in the knee region are from Refs. [11–20]. References for data above 10^{17} eV are given in Fig. 4.

Composizione chimica dei RC nella regione degli EAS

- Il modello del *leaky box* prevede un arricchimento di elementi pesanti nei RC sino al ginocchio.
- (Ti ricordi *perché?*)
- Gli EAS possono misurare $\langle A \rangle$ con difficoltà. 
- Le misure possono essere poi confrontate con *modelli estremi* (solo p o Fe) via MC



5.5 Un modello di Accelerazione dei RC con $E > 100 \text{ TeV}$

- L'energia massima fornita ai RC dalle SN $\sim 100 \cdot Z \text{ TeV}$
- Il *ginocchio* è indice di qualcosa che varia: interazioni, propagazione, sorgenti...
- Consideriamo un modello a cui a variare è la sorgente: **PULSAR**
- Una Pulsar è una giovane *stella di neutroni (NS)* rapidamente ruotante rispetto ad un asse.
- Una NS ha un'altissima densità (quella dei nuclei), massa pari a $\sim 1.4 M_{\odot}$ (massa sole), e raggio $R_{NS} \sim 10 \text{ km}$
- Supponendo un campo magnetico della stella prima del collasso pari a $B \sim B_{\odot} \sim 10^{-2} \text{ T}$, per la legge di Gauss:

$$B_{NS} = B \left(\frac{R}{R_{NS}} \right)^2 \cong 10^{-2} T \cdot 10^{10} \cong 10^8 T$$

- La velocità di rotazione delle pulsar è nota sperimentalmente, e può essere facilmente stimata:

$$\frac{GM^2}{R^2} = M\omega_{NS}^2 R \longrightarrow \omega_{NS} \approx 10^3 - 10^4 \text{ s}^{-1}$$

- La Pulsar fornisce energia tramite induzione EM.

$$\nabla \times \boldsymbol{\varepsilon} = -\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t} \longrightarrow \frac{\boldsymbol{\varepsilon}}{L} = \frac{B\omega_o}{c}$$

- L'energia massima fornita ad una particella di carica Ze :

($\boldsymbol{\varepsilon}$ = campo elettrico indotto su una regione lineare L)

$$E_{Max} = \int Ze \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \cdot dx = Ze \cdot B\omega_o L \cdot L / c$$

- PULSAR: Massima energia acquisita dalla particella accelerata nel caso di p ($Z=1$), $B=10^8 \text{ T}$, $\omega=10^3 \text{ s}^{-1}$, $R=10 \text{ km}$

$$\begin{aligned} E_{Max} &= Ze \cdot B\omega_o L^2 / c = \\ &= 1.6 \times 10^{-19} (C) \cdot 10^8 (T) \cdot 10^3 (s^{-1}) \cdot [10^4 (m)]^2 \\ &= 1.6 (J) = 10^{19} eV \end{aligned}$$

- L'accelerazione di particelle può avvenire anche in altri ambienti astrofisici, purchè ci sia campo magnetico B che vari su una regione lineare L sufficientemente grande.
- Indipendentemente dalla sorgente, l'energia massima fornita ad una particella di carica Ze :

$$\begin{aligned}
 E_{Max} &= \int Ze \cdot \varepsilon \cdot dx = Ze \cdot B \omega_o L \cdot L / c = Ze \beta_o BL \\
 &= 4.8 \cdot 10^{-10} (ues) \cdot 310^{21} (kpc / cm) \cdot 10^6 (G / \mu G) [Z \beta_o B (\mu G) L (kpc)] = \\
 &= 1.5 \times 10^{18} [Z \beta_o B (\mu G) L (kpc)]
 \end{aligned}$$

5.6 Potenza richiesta per i RC di energia $> 1000 \text{ TeV}$

- Possono poche Pulsar nella Galassia alimentare i RC di energia compresa tra $10^{15} < E_o < 10^{19} \text{ eV}$?

$$P(> E_o) = \frac{\rho_{CR}(> E_o) \cdot V_G}{\tau_F(> E_o)}$$

- Potenza richiesta per un flusso stazionario:

- Stima del tempo di permanenza per $E_o > 10^{14} \text{ eV}$

$$\tau_F(> 100 \text{ TeV}) = \tau_F(> 100 \text{ GeV}) \cdot \left(\frac{100 \text{ GeV}}{100 \text{ TeV}} \right)^{+0.6} \approx 10^5 \text{ y}$$

- La densità di energia:

$$\rho_{cr}(> 100 \text{ TeV}) \cong 10^{-4} \text{ eV/cm}^3$$

- Da cui possiamo stimare:

$$P(> 100 \text{ TeV}) = \frac{\rho_{cr}(> 100 \text{ TeV}) \cdot V_G}{\tau_F(> 100 \text{ TeV})} \cong 2 \cdot 10^{38} \text{ erg/s}$$

- Una sorgente di tale “potenza” può alimentare tutto il flusso di RC galattici nell’intervallo $10^{14} < E_o < 10^{19}$. ***E’ plausibile?***

Luminosità osservata in r-X

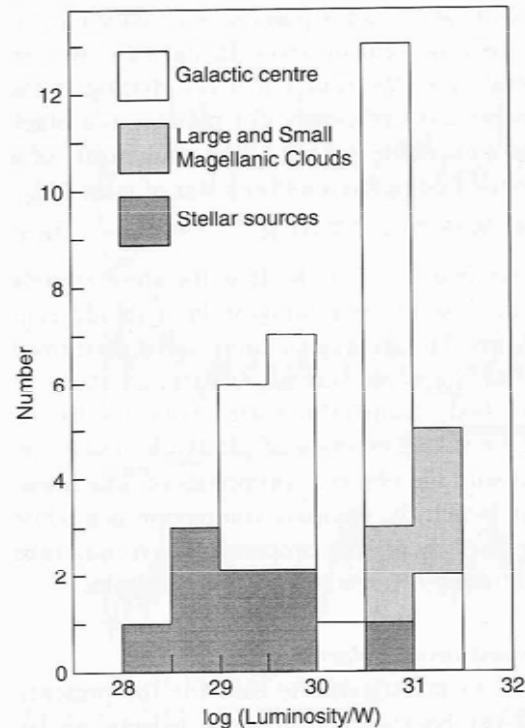
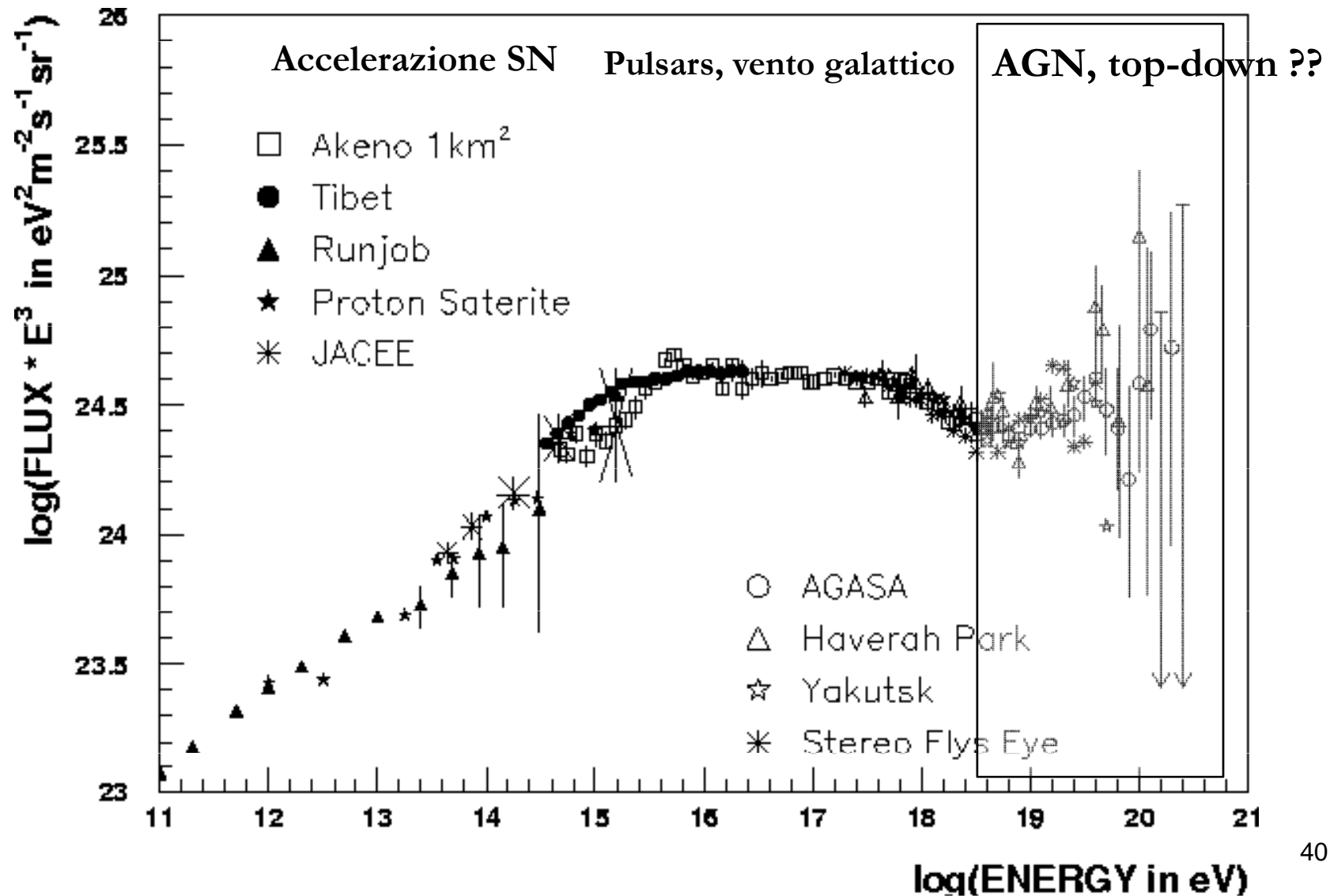


Figure 16.2. A histogram of the X-ray luminosities of bright X-ray sources in the 1–10 keV energy band in our Galaxy and the Magellanic Clouds. The Eddington limiting luminosity for a $1M_{\odot}$ object is 1.3×10^{31} W. (After B. Margon and J.P. Ostriker (1973). *Astrophys. J.*, **186**, 91.)

- Le sorgenti binarie di r-X hanno una potenza rivelata dell'ordine di 10^{38} erg/s
- E' plausibile che (poche) sorgenti così potenti possano fornire la stessa quantità di energia sotto forma di RC di $E > 1000$ TeV
- Attenzione: le pulsar hanno una vita media stimata di circa 10^7 anni.

5.7 I RC di Energia Estrema $>10^{18}$ Ev (Extragalattici?)



Confinamento dei RC $E > 10^{19}$ eV (richiamo)

- Confinamento dovuto al campo magnetico Galattico.

Il raggio di curvatura di un nucleo di carica (Ze) in B :

$$mv^2/r = pv/r = ZevB/c$$

$$r = E/(ZeB)$$

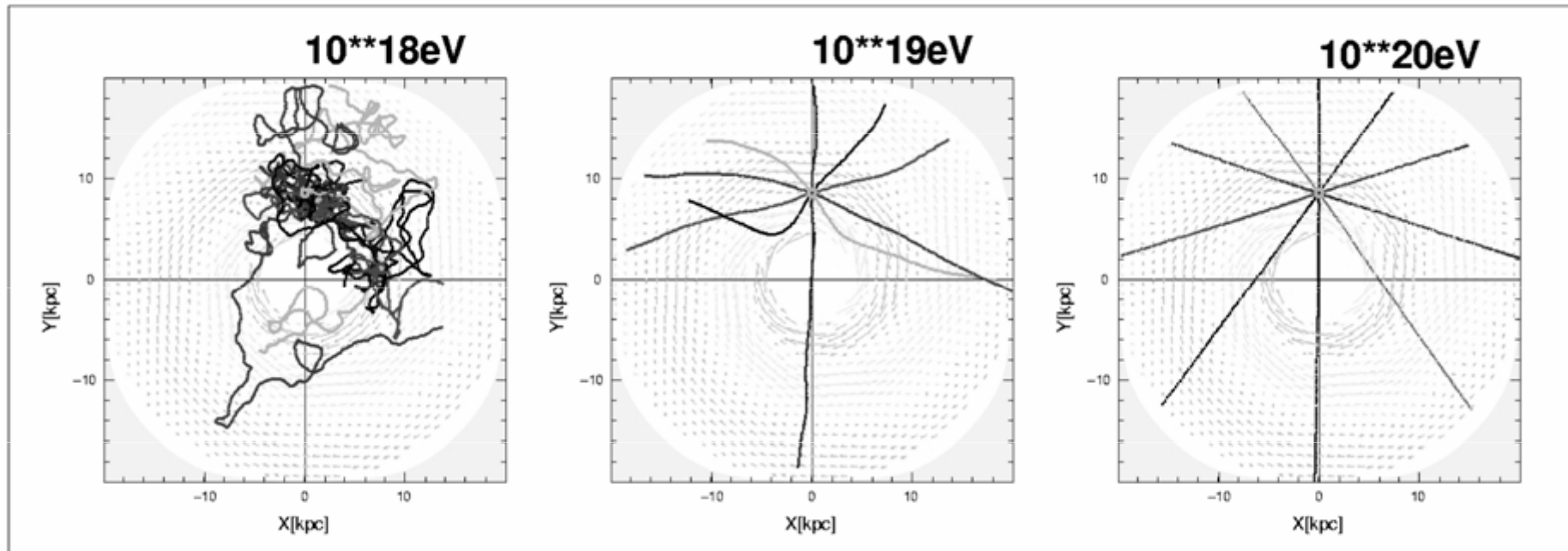
$$r(kpc) \cong \frac{E(EeV)}{ZB(\mu G)}$$

- Per un protone di $E \sim 10^{19}$ eV, $r \sim 3.3$ kpc
(corrisponde a $\sim 10 \cdot$ spessore galattico)

- Un Fe potrebbe restare confinato a 10^{19} eV

$$r = 10(EeV)/26 \cdot 3(\mu G) \approx 100 \text{ pc}$$

Confinamento 2 (richiamo)

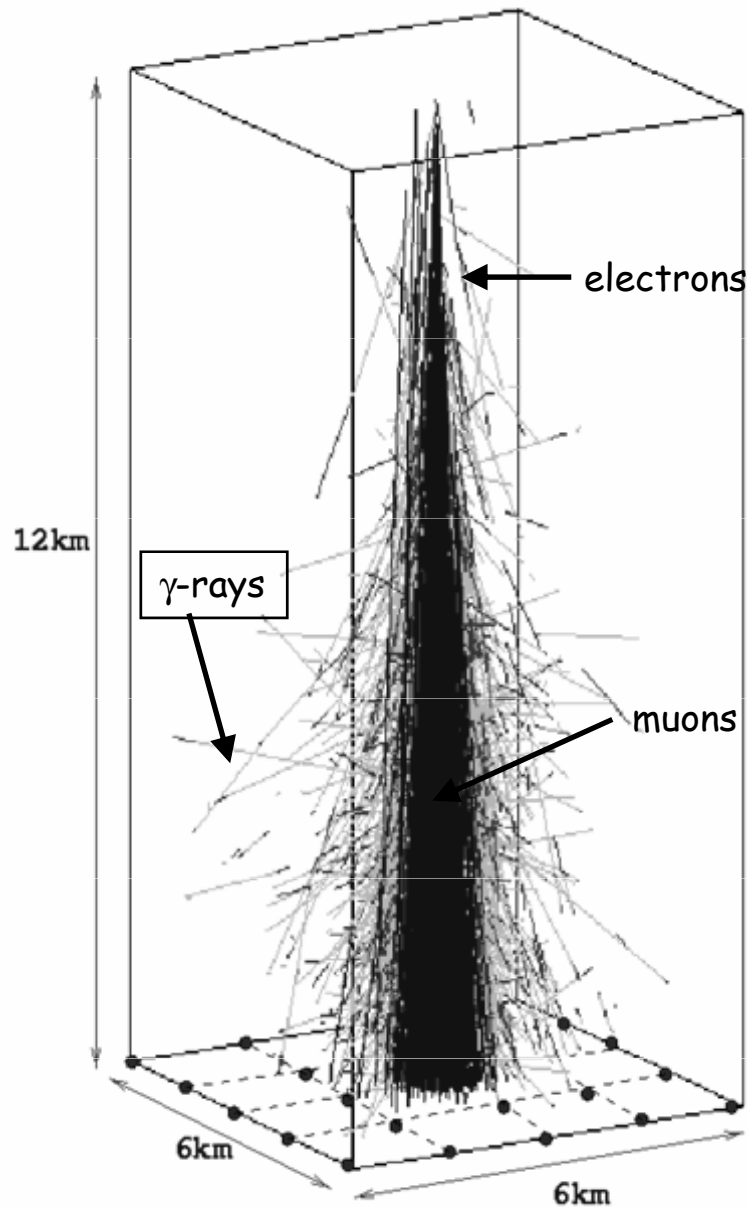


- $\sim 10^{18} \text{ eV}$: RC ben confinati nella galassia
- $\gtrsim 10^{19} \text{ eV}$: sorgenti extragalattiche
- $\sim 10^{20} \text{ eV}$ la deviazione nella galassia è inferiore ad 1°

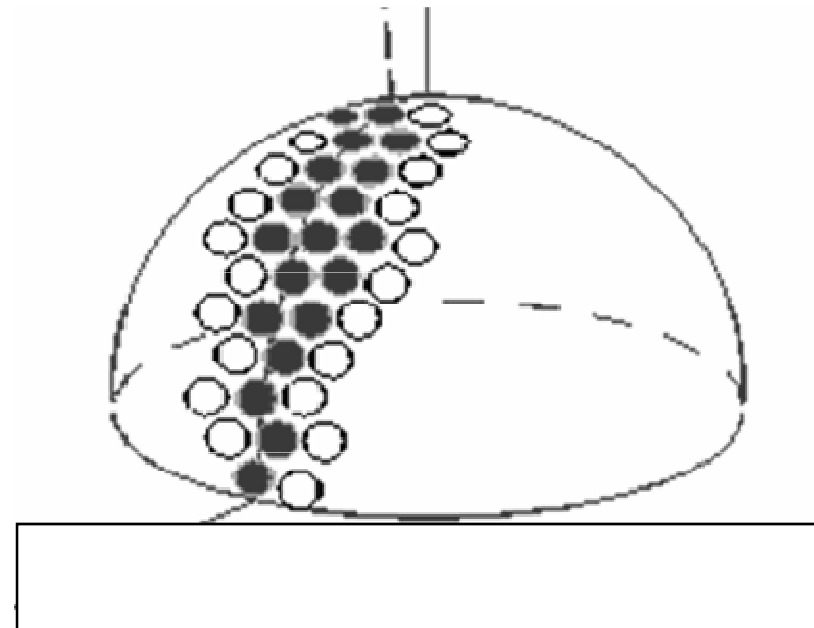
5.8 Altri metodi di Rivelazione

- Le particelle cariche dello sciame EM che giungono al suolo possono essere rivelate da rivelatori di sciame estesi (§5.3)
- Gli sciame di particelle producono anche luce nell'atmosfera per effetto Cerenkov (gli elettroni con $E > 20 \div 30$ MeV).
- La luce Cerenkov può venire rivelata (telescopi Cerenkov) nelle notti senza luna da appositi rivelatori al suolo.
- Gli sciame EM inducono anche l'eccitazione dell'azoto atmosferico, che riemette irraggiando luce. Questa fluorescenza può essere rivelata al suolo (Rivelatori fluorescenza).
- La componente di muoni può essere rivelata da rivelatori "underground".

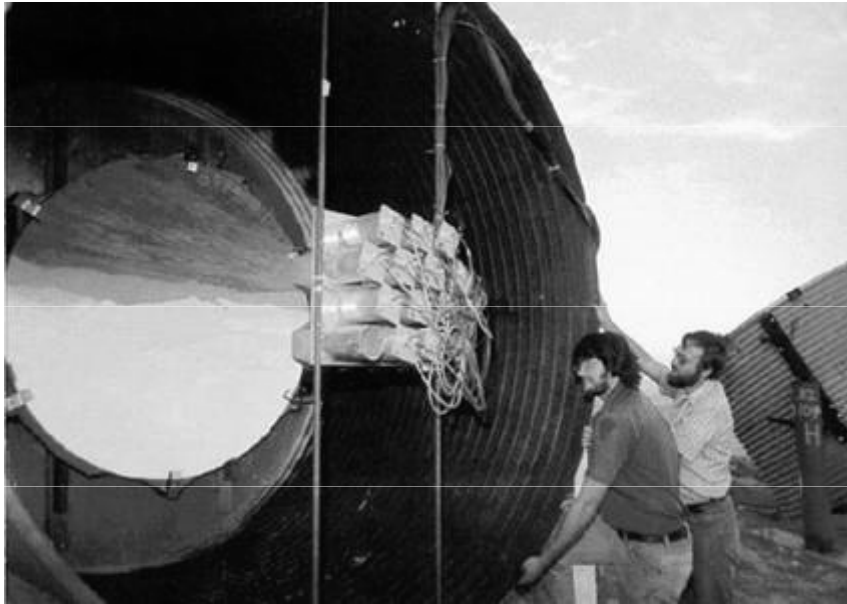
Rivelatori di sciami di alta energia



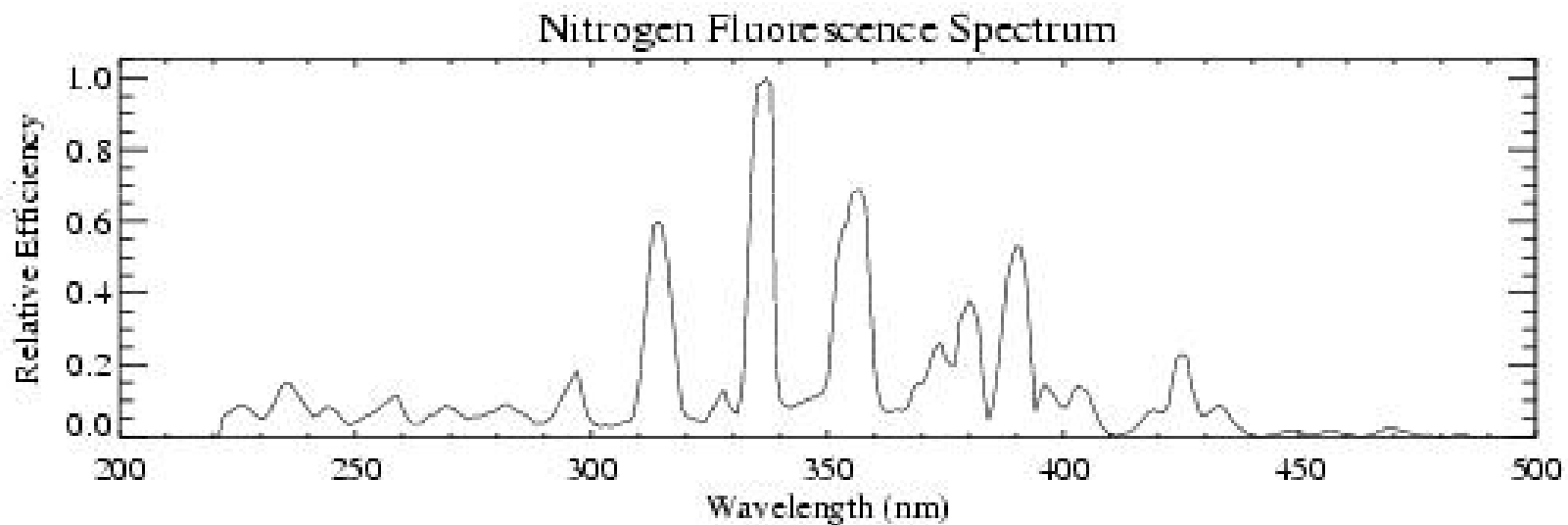
- Rivelatori di radiazione Cerenkov e fluorescenza in atmosfera (HiRes)
- Rivelatori al suolo (array) di vario genere (AGASA)
- Miste (AUGER)



Il rivelatore Fly's Eye (USA)

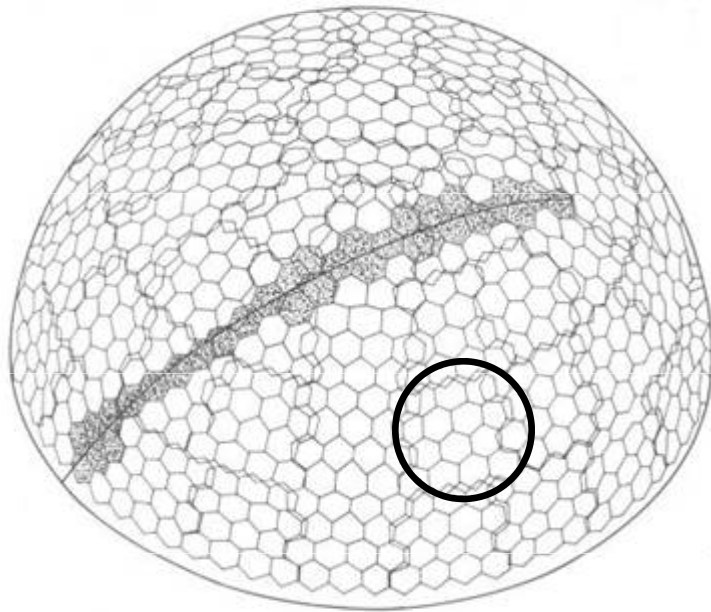


- Utah, 160 km da Slat Lake City
- Specchi con fotomoltiplicatori rivelano la fluorescenza (visibile e UV) di N_2 indotta dalla cascata
- Si può quindi studiare lo sviluppo dello sciame e risalire alla energia del primario

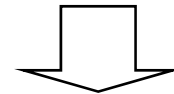


Il rivelatore Fly's Eye - 2

- 67 specchi con PM osservano la volta celeste
- È possibile ricostruire il profilo della cascata



- Si misura così energia (sviluppo shower) e direzione del primario

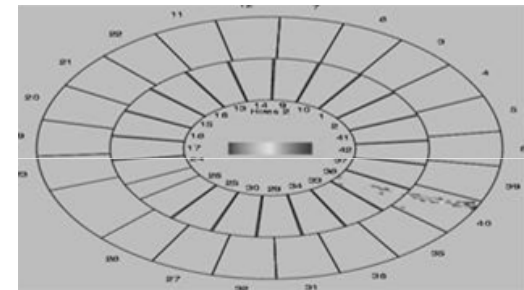
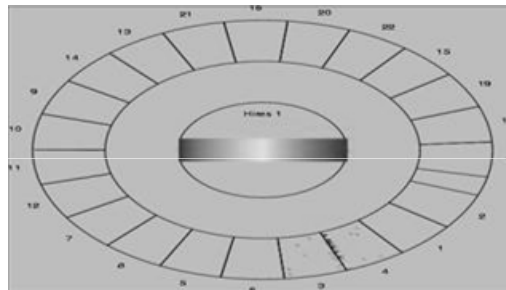
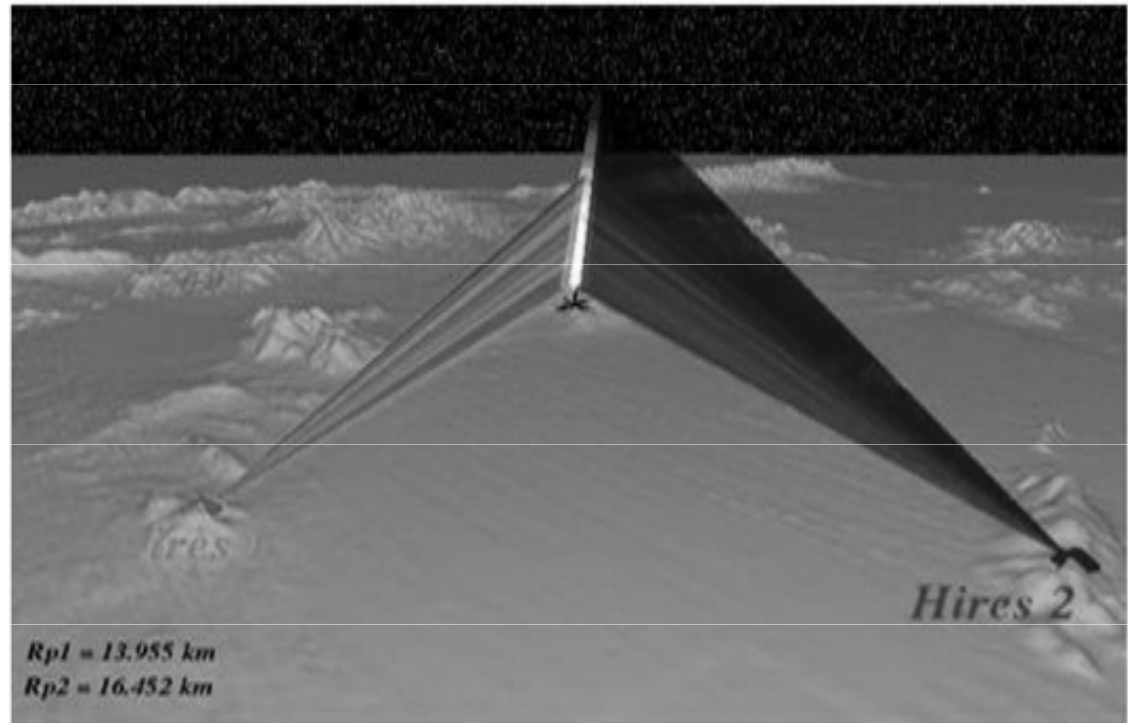


- FE2: visione stereoscopica

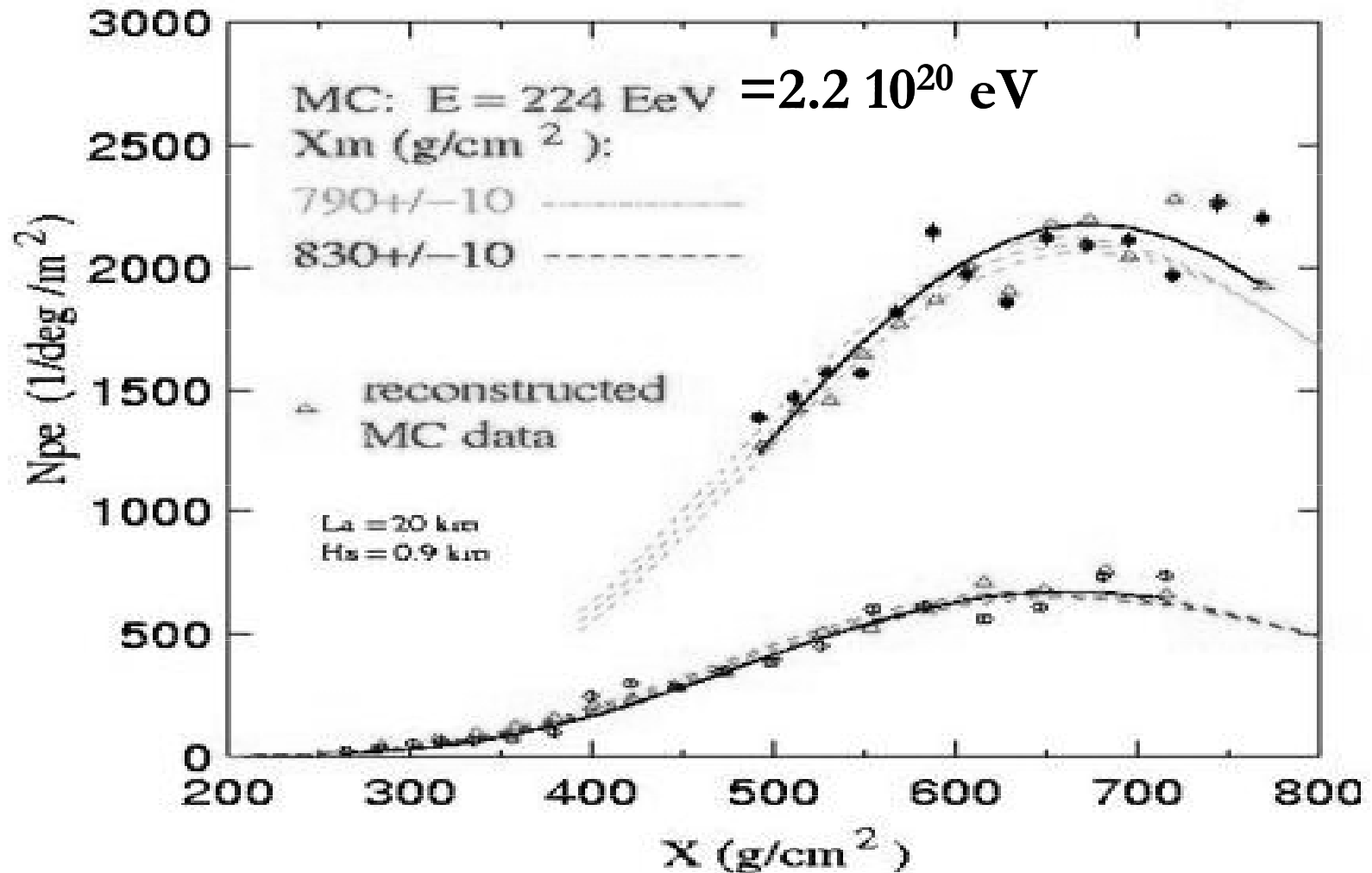
Fly's eye \rightarrow HiRes

- *Stereo* HiRes: due insiemi di rivelatori per ricostruire in 3D lo sviluppo dello sciame
 - Migliore risoluzione angolare, studio correlazioni a piccoli angoli
 - Migliore comprensione della composizione chimica dei primari

Stereo Event E ~ 50 EeV

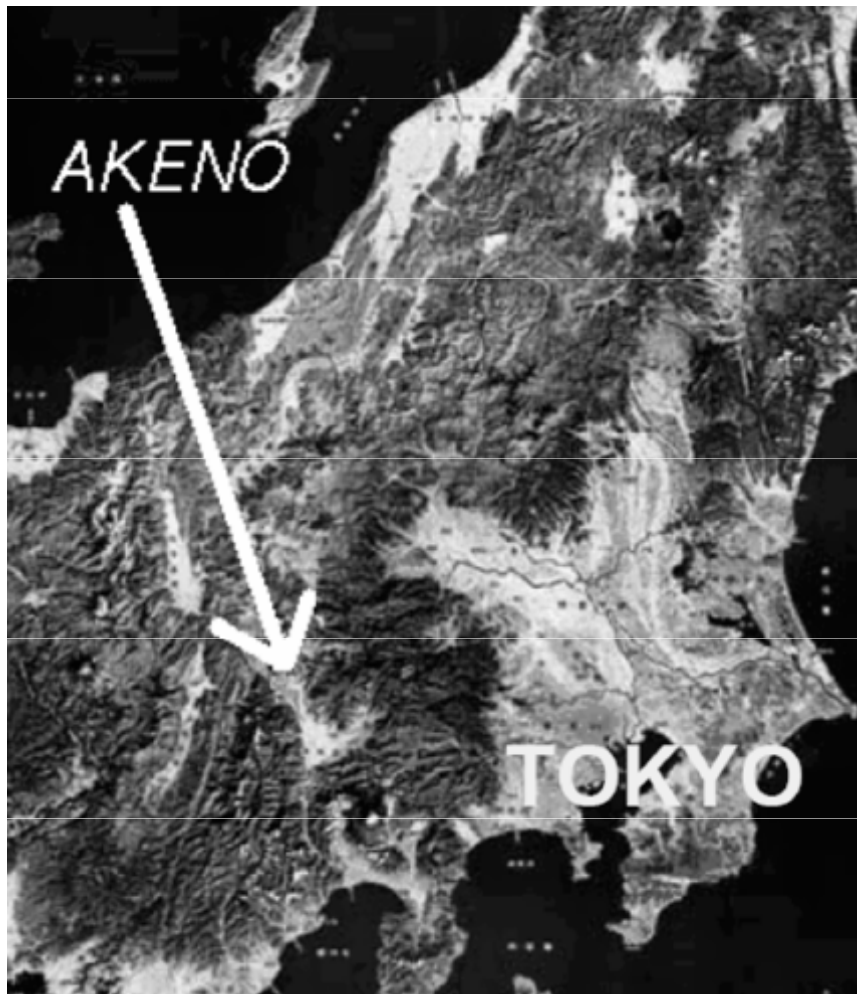


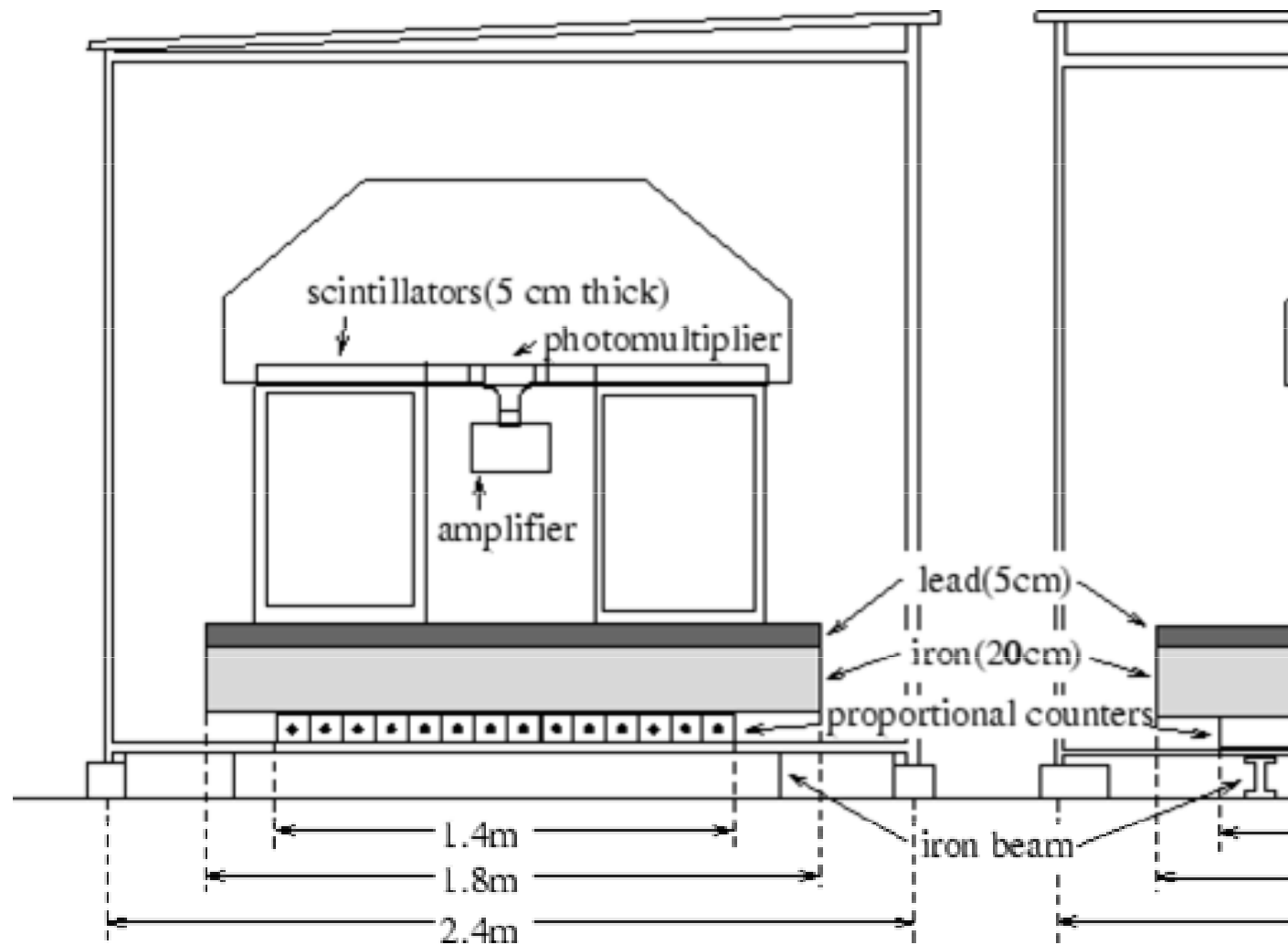
	Rp (km)	E (EeV)	X _{max} (g/cm ²)	
HR1:	17.8	232.3	769	solid
HR2:	26.8	214.1	794	open



Agasa (Giappone)

- 100 km², 111 rivelatori a scintillazione, 27 per muoni, separazione ~ 1 km – $5 \cdot 10^{16}$ m²s sr per $E > 10^{19}$ eV, $\theta < 45^\circ$

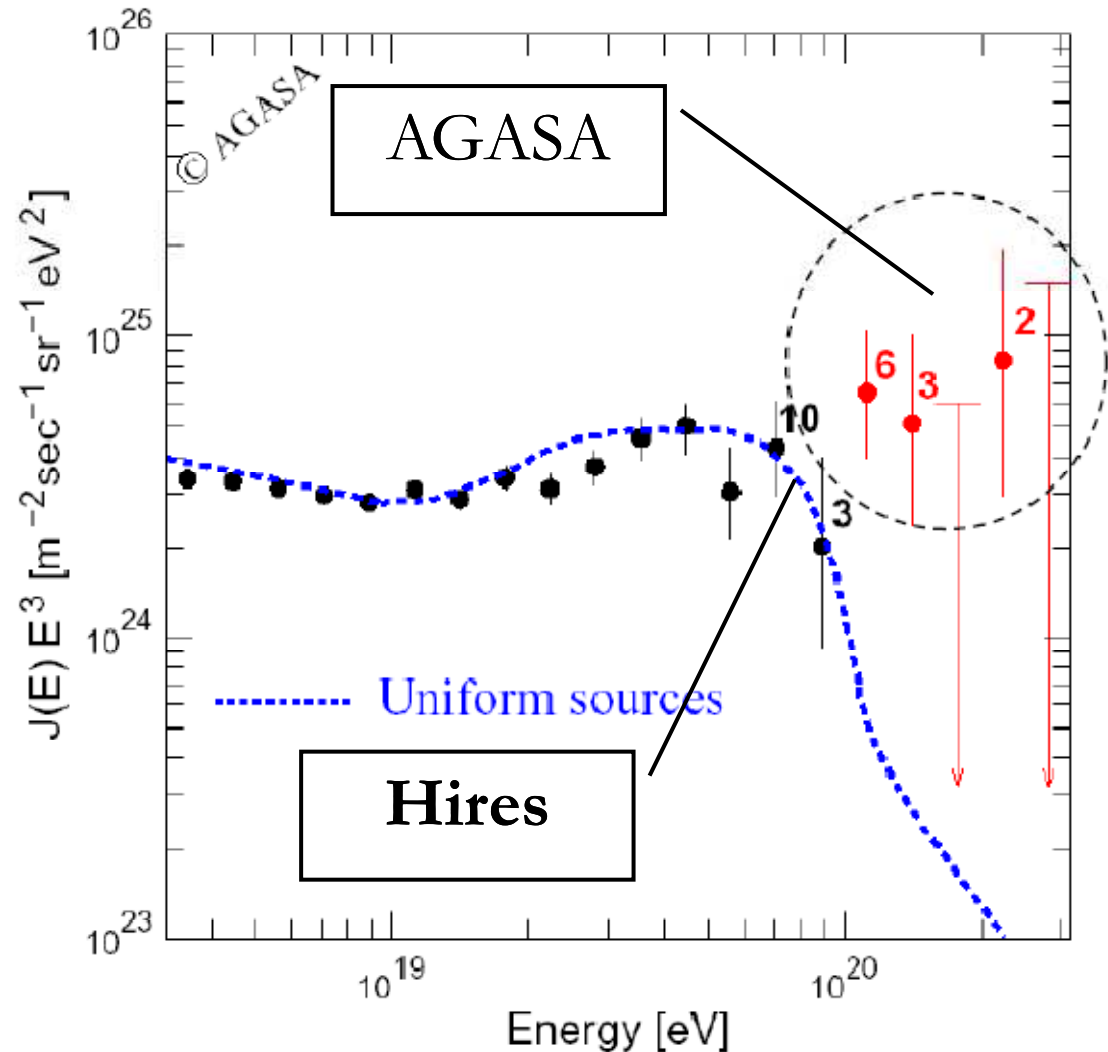




5.8 Risultati sperimentali per $E > 10^{19}$ eV

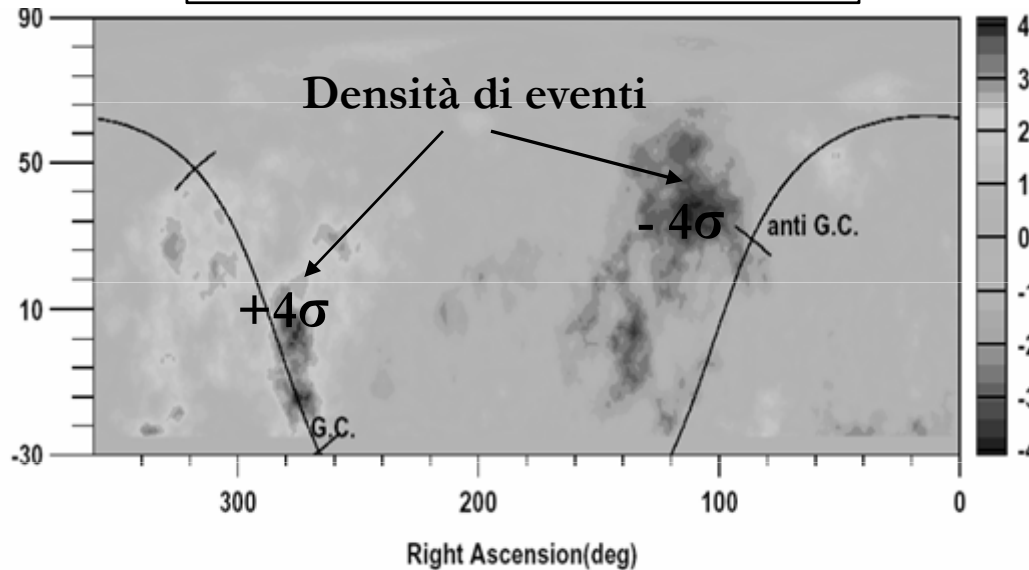
AGASA:

- Linea BLU: spettro atteso per distribuzione uniforme di sorgenti e cut-off di GZK.
- AGASA: osservati 11 eventi con $E > 10^{20}$ eV
- Eventi attesi: 1.9 eventi, assumendo cutoff GZK (vedi §5.9)

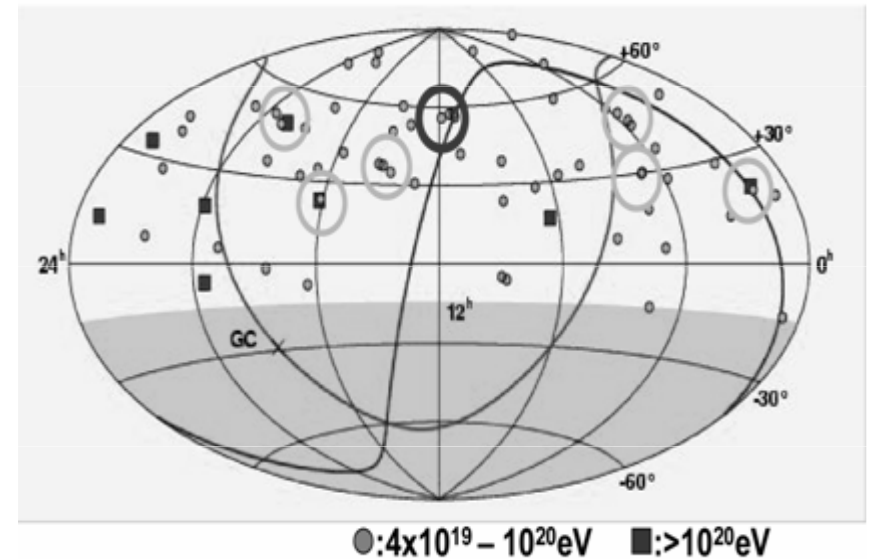


Risultati di Agasa - Anisotropia

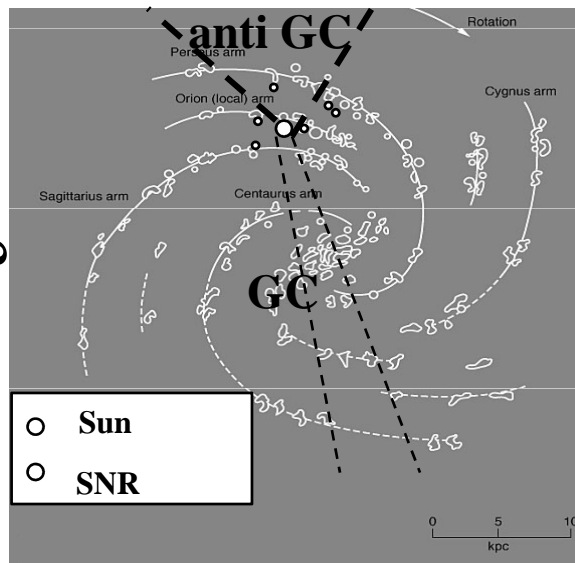
$8 \times 10^{17} < E < 8 \times 10^{18} \text{ eV}$



$E > 4 \times 10^{19} \text{ eV}$



Sorgente galattica?



Piccola scala: in finestre $< 2.5^\circ$:
 \rightarrow 6 doppietti ed 1 tripletto

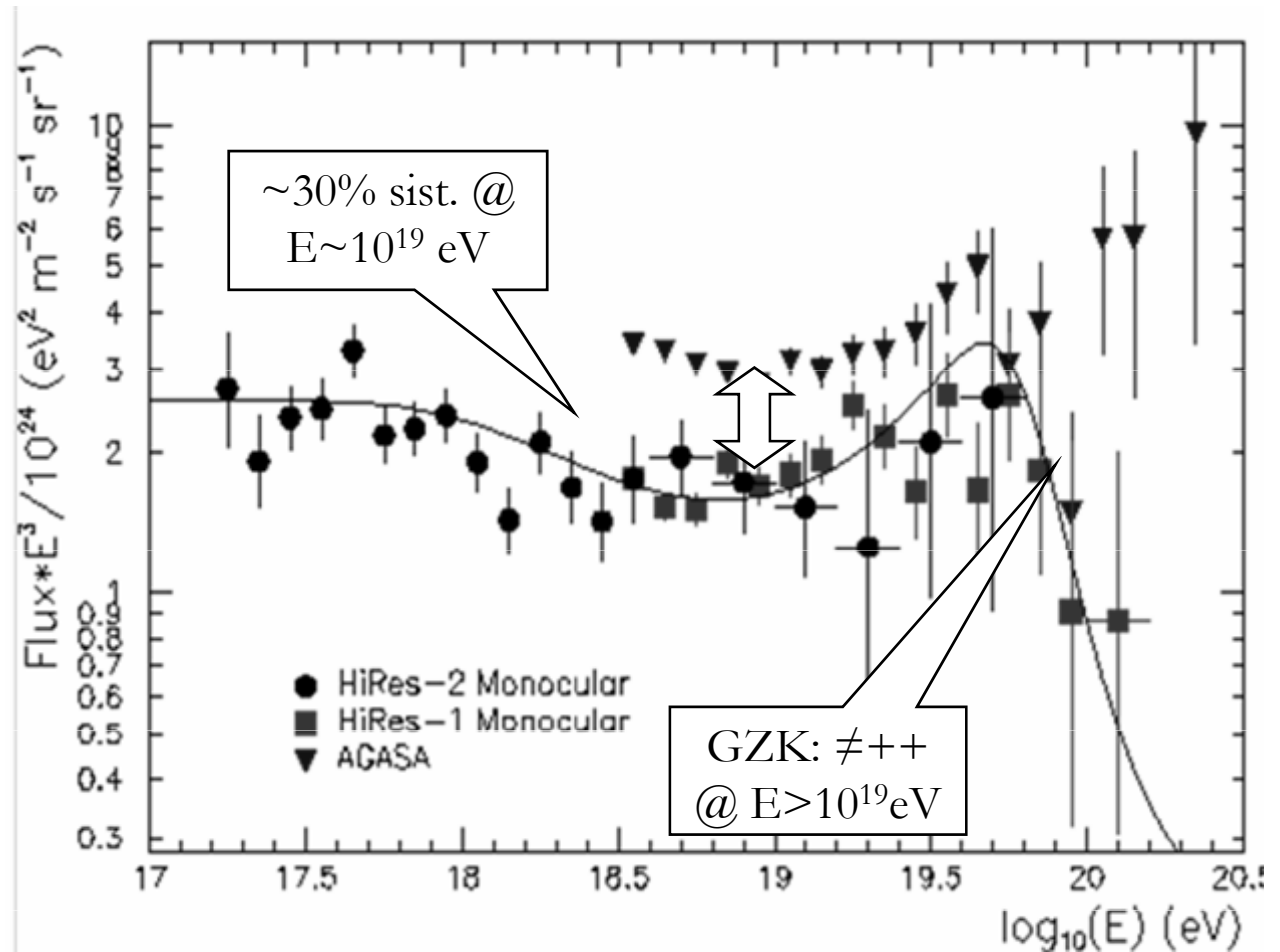
Sono sorgenti?

AGASA calcola

$P_{\text{random_distribution}} < 0.1\%$ 52

“Conflitto” AGASA-HiRes

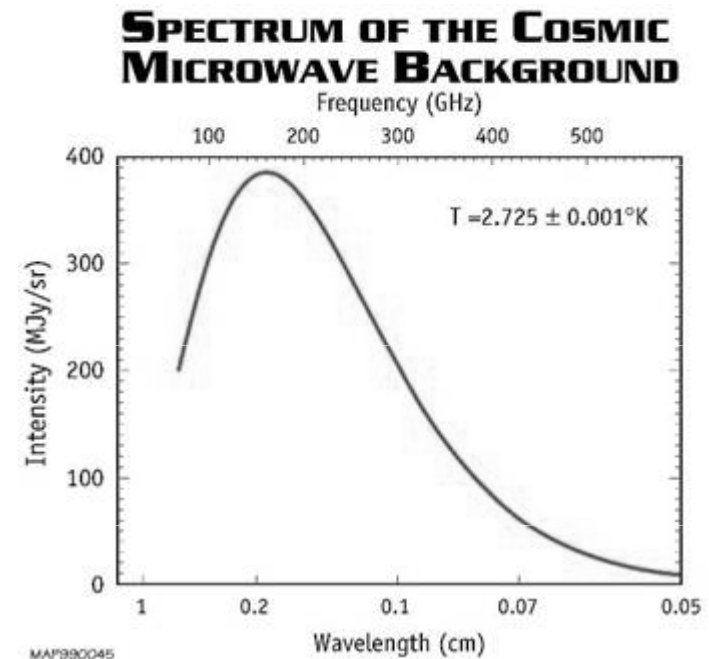
- Confronto tra dati Agasa-Hires: differenza *sistematica* del 20-30% per $E < 10^{20}$ eV
- Pur correggendo per questa differenza, a $E > 10^{20}$ eV, i risultati differiscono per $\sim 2 \sigma$
- PROBLEMA: Poca statistica!



■ Quale è la natura e la ragione del “conflitto” tra i due esperimenti?

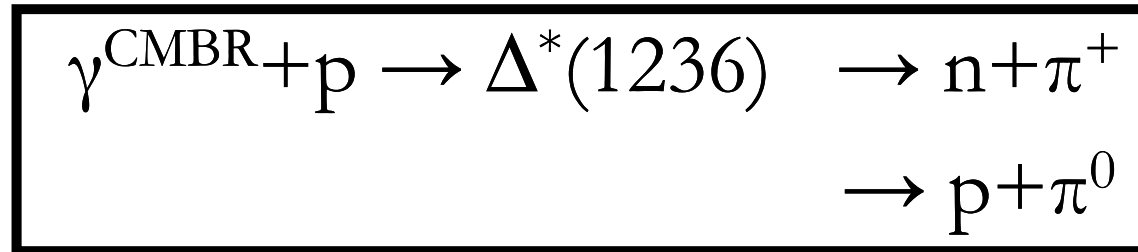
5.9 Volume di confinamento dei RC di origine extragalattico: il Cut-off di Greisen (GZK)

- L' universo è permeato dalla Radiazione Cosmica di Fondo a 3° K (CMBR) \rightarrow 160.2 GHz
- CMBR: fotoni di energia
 $E_{\gamma}^{\text{CMBR}} = h\nu = 2\pi \times 6 \cdot 10^{-22} \text{ MeV} \cdot \text{s} \times 160.2 \cdot 10^9 \text{ Hz} = 6 \cdot 10^{-4} \text{ eV}$
- La densità dei fotoni di fondo è $\sim 400/\text{cm}^3$
- Il fondo di radiazione pone un limite sulla distanza massima da cui i RC possono provenire.



G_{reisen} Z_{atsepin} K_{uzmin} cutoff
Soglia per reazioni di fotoproduzione

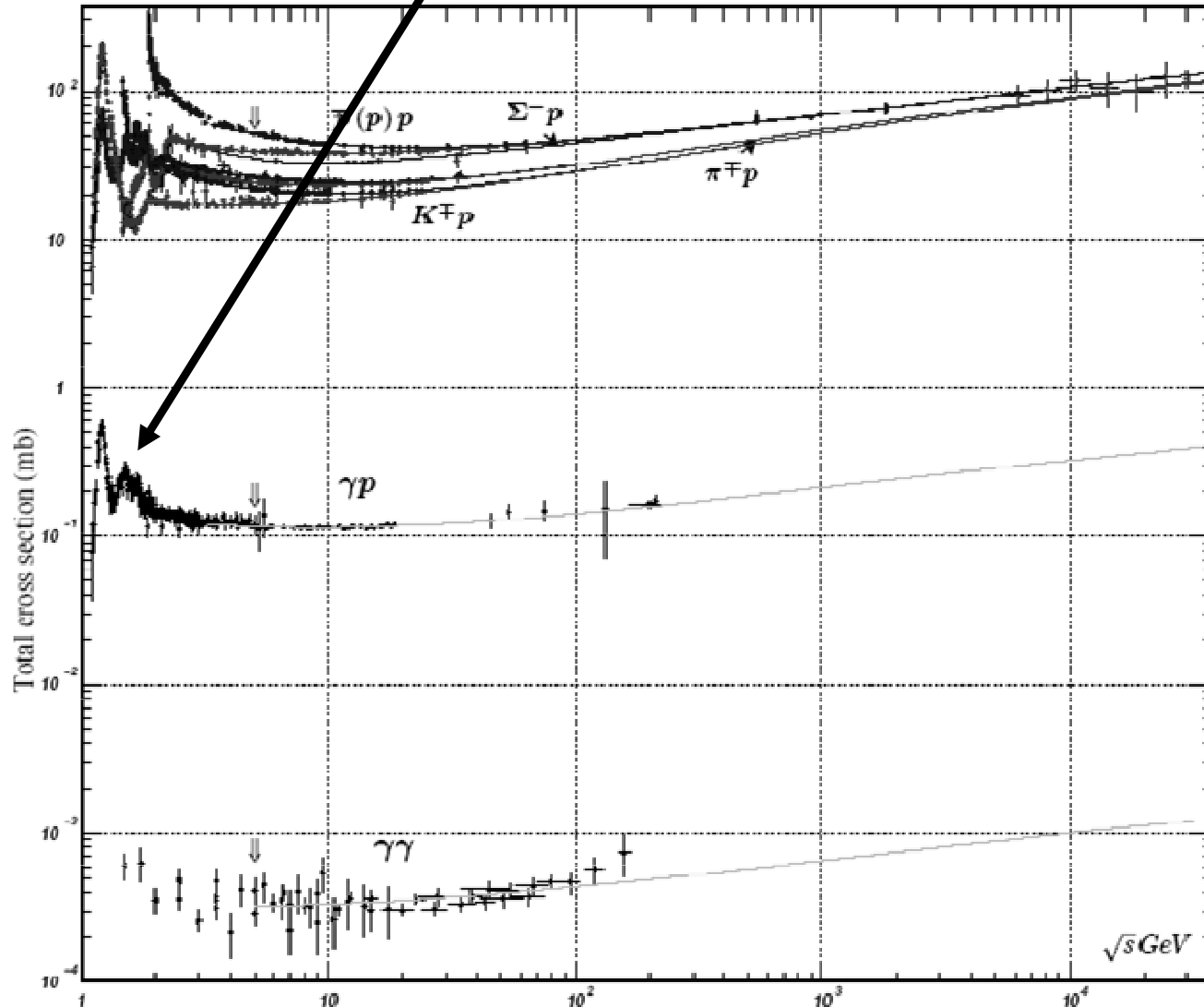
- **Fotoproduzione:** Protoni di alta energia possono interagire con fotoni, producendo un pione:



- È necessario essere sopra la soglia di fotoproduzione nel sistema del CM: $E_0^{\text{FP}} \approx 300 \text{ MeV}$
- Il processo ha una sezione d'urto in risonanza

$$\sigma_0^{\text{P}} \approx 250 \mu\text{b}$$

Sezione d'urto per la Δ



Soglia per la fotoproduzione (FP)

SdR Laboratorio	SdR protone in quiete	
$p^\mu = (\gamma m_p \vec{v}_p c, \gamma m_p c^2)$	$\vec{p}'^\mu = (0, m_p c^2)$	Protone
$k^\mu = \left(\frac{E_\gamma^{CMBR}}{c} c \hat{k}, E_\gamma^{CMBR} \right)$	$\vec{k}'^\mu = (E_0^{FP} c \hat{k}' / c, E_0^{FP})$	Fotone

- Vogliamo determinare il valore di γ tale che si abbia un valore $E_0^{PF} > 300 \text{ MeV}$

- La trasformazione di Lorentz tra i due SdR:

$$\left[x_0 = \gamma \left(x_0' + \frac{V}{c} x_1' \right) \right]$$

$$\begin{aligned} E_0^{FP} &= \gamma \left(E_\gamma^{CMBR} + \frac{v_p}{c} E_\gamma^{CMBR} \right) = \\ &= \gamma E_\gamma^{CMBR} (1 + v_p / c) \approx 2\gamma E_\gamma^{CMBR} \end{aligned}$$

E_0^{FP} = Soglia fotoproduzione
(~300 MeV)

E_γ^{CMBR} = Energia fotone = $h\nu$

γ = boost Lorentz del protone

- Dalla relazione, si ricava il valore di γ necessario per la fotoproduzione nel sistema di riferimento del laboratorio

$$\gamma = \frac{E_0^{FP}}{2E_\gamma^{CMBR}} \approx \frac{300 \text{ MeV}}{2 \cdot 4.7 \cdot 10^{-4} \text{ eV}} \approx 3 \cdot 10^{11}$$

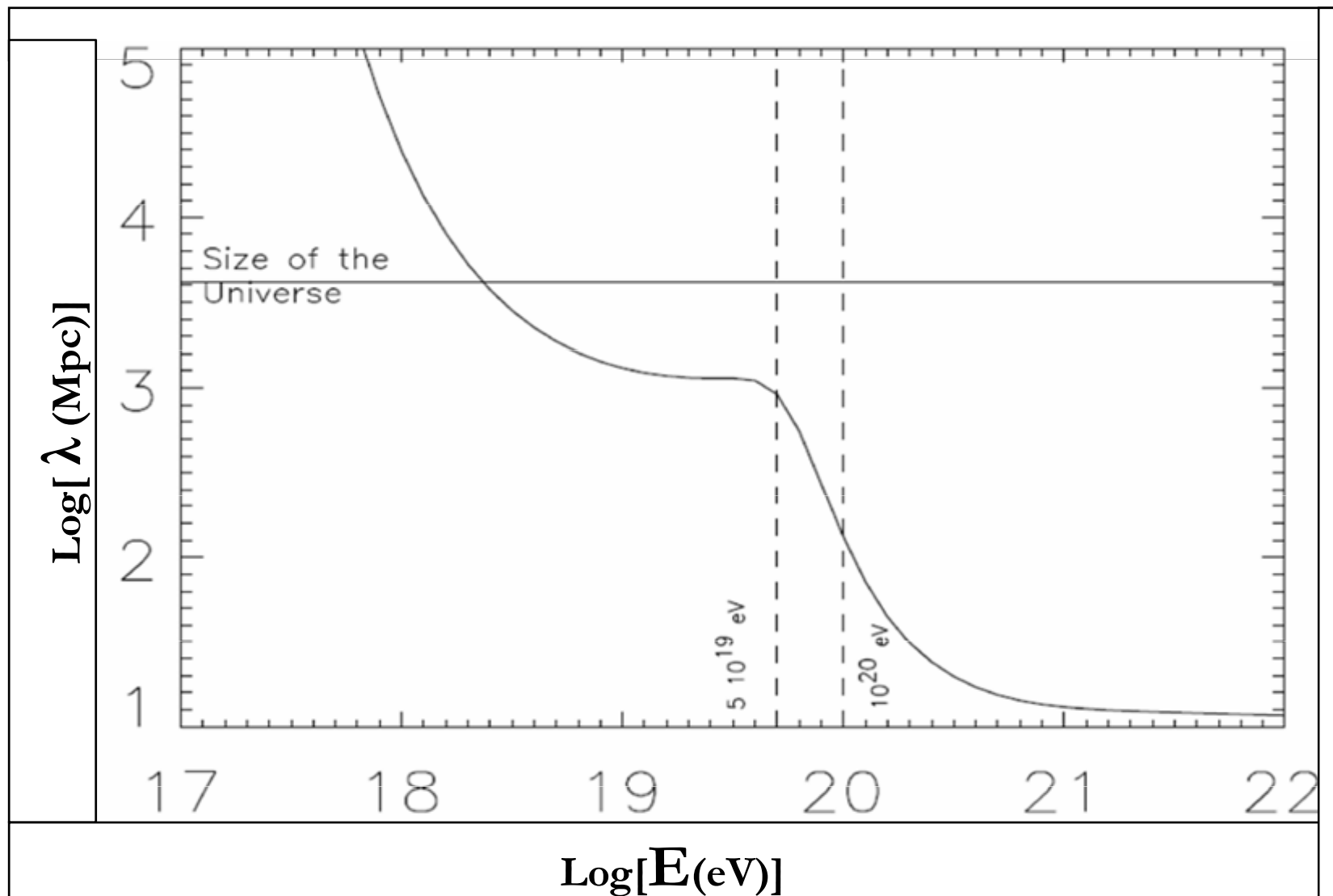
- L'energia di soglia per i protoni per produrre π è quindi

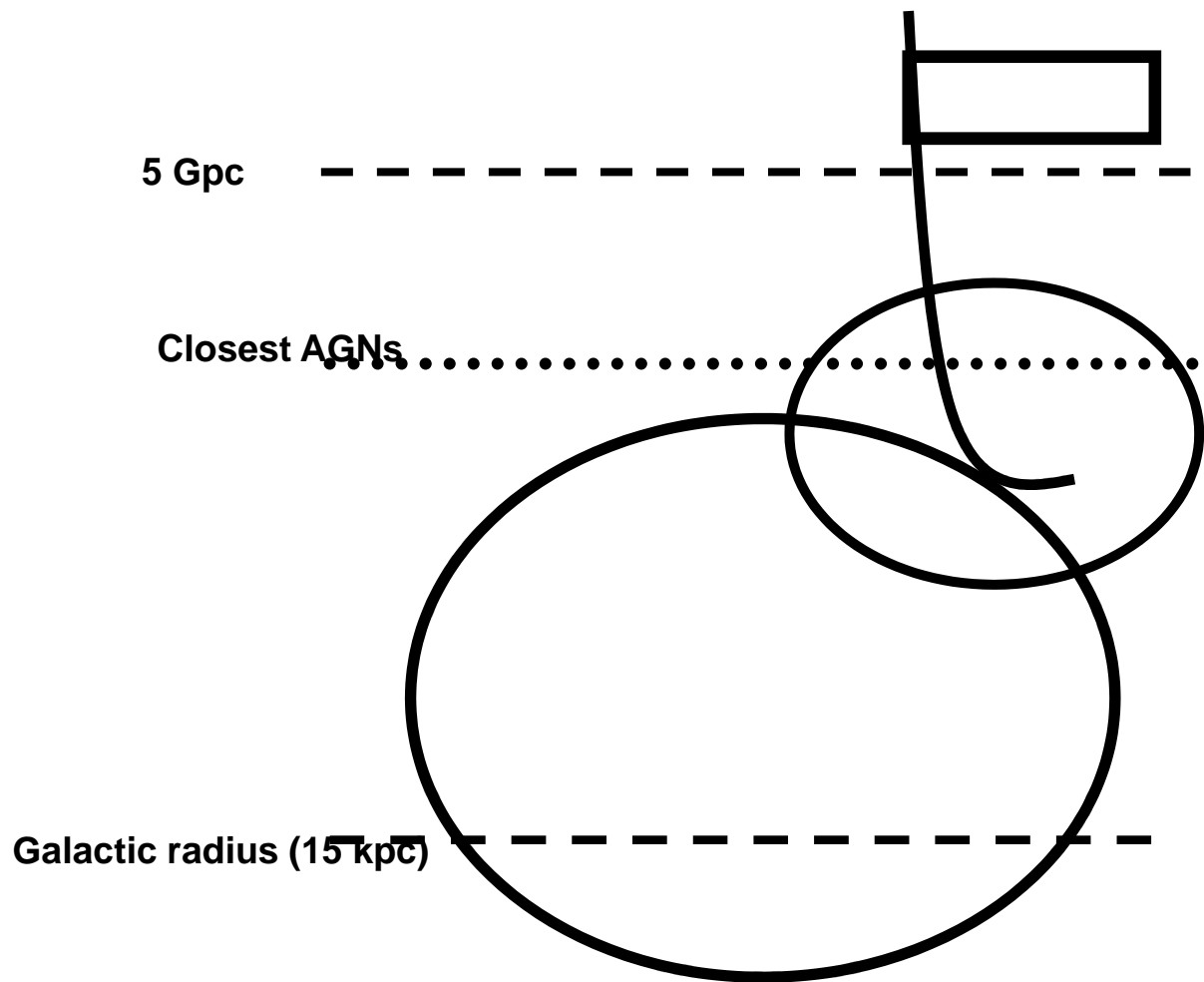
$$E_0^{GZK} = \gamma(m_p c^2) \approx 3 \cdot 10^{20} \text{ eV}$$

- Se l'energia del protone supera E_0^{GZK} , si innesca la FP.
- In ogni processo, il p perde circa 1/10 della sua energia
- Nota la densità numerica della CMBR ($n_\gamma = 400 \text{ cm}^{-3}$), si stima il cammino libero medio del p:

$$\lambda = (\sigma_{p\gamma} n_\gamma)^{-1} = 10^{25} \text{ cm} = 3 \text{ Mpc}$$

- Si può dunque stimare che i p NON possano giungere da distanze superiori a $10 \times 3 \text{ Mpc} = 30 \text{ Mp}$
- Figura: Risultato di calcoli dettagliati.





L'Universo NON è
trasparente ai
protoni di
altissima energia

L'Universo NON è
trasparente ai
fotoni di alta
energia

Ricerca delle sorgenti

- Nella reazione di fotoproduzione (responsabile del cutoff di GZK) sono prodotti π^\pm , π^0 che decadono:

$$\pi^+ \rightarrow \nu_\mu \mu^+ \rightarrow \nu_\mu \nu_\mu \nu_e e^+$$

$$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$$

- Neutrini e fotoni di altissima energia possono quindi essere studiati per confermare il meccanismo GZK, e per localizzare le sorgenti di RC a $E > 10^{19}$ eV

- Il RC di più alta energia osservato: $\gtrsim 3.2 \cdot 10^{20}$ eV (?)

- Se le sorgenti **non possono** essere troppo lontane (<30 Mpc), possiamo cercare di localizzarle tramite:

→ Studi di anisotropia con esperimenti di RC

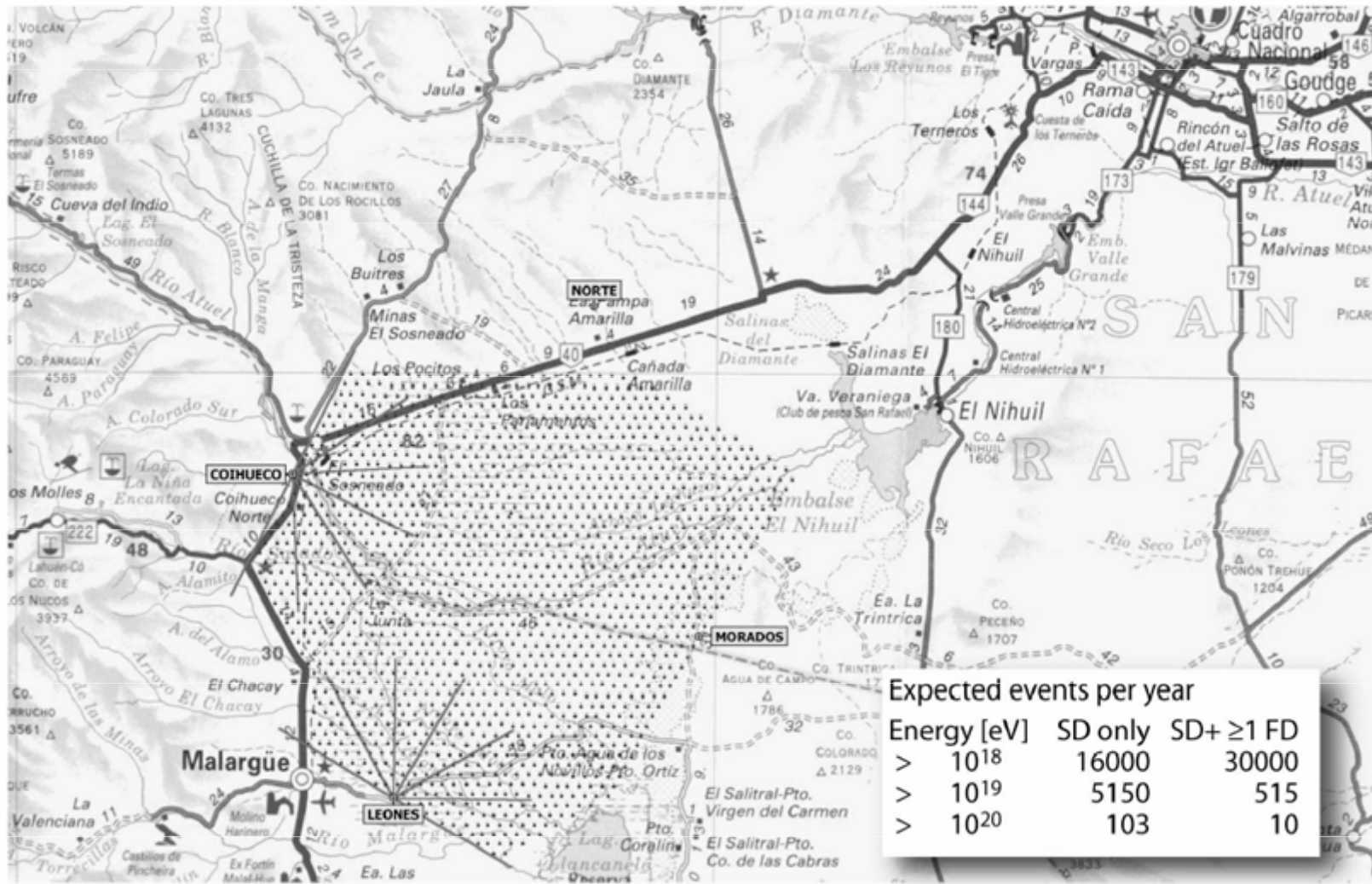
→ Confronto con altre misure astronomiche

→ Rivelazione gamma e neutrini di fotoproduzione

5.10 L'esperimento Auger

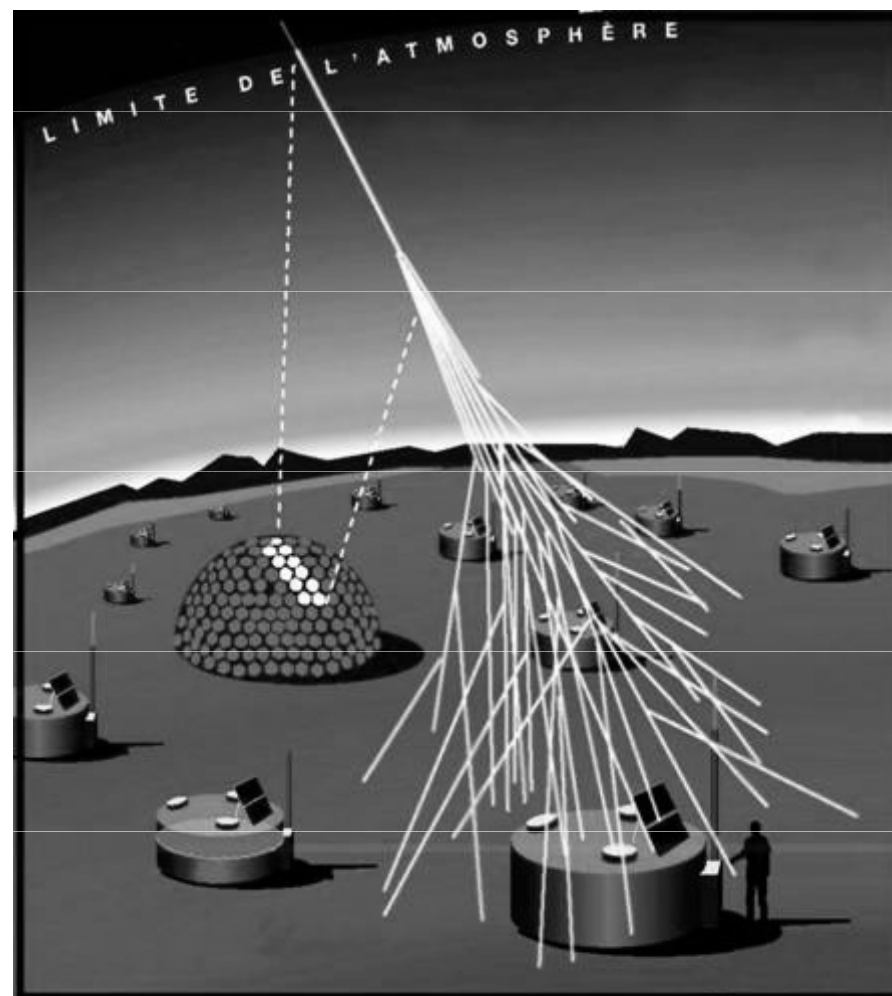
- L'esperimento AUGER è finalizzato a risolvere il problema della bassa statistica di eventi per energie sopra il cutoff GZK, utilizzando ENTRAMBE le tecniche sperimentali di AGASA (EAS) e HiRes (Fluorescenza)
- Due rivelatori simili sono proposti: uno nell'emisfero Australe (Argentina), uno nel Boreale (Texas ?)
- Per avere statistica sufficiente, i rivelatori sono distribuiti su un'area pari a 3000 km^2
- Le differenti tecniche sperimentali permettono una buona risoluzione angolare, sensibilità alla specie del RC che origina la cascata (p o nuclei pesanti), e la possibilità di effettuare calibrazioni energetiche incrociate

1600 water Cherenkov detectors with 1.5 km spacing on 3000 km²
 4 stations with 24 fluorescence telescopes



AUGER: Un rivelatore ibrido

- **Rivelatore di sciame:** 1600 taniche cilindriche (ciascuna di 10 m^2 ed alte 1.5 m) riempite di acqua, per rivelare gli sciame al suolo tramite la luce Cerenkov emessa dagli elettroni nell'acqua
- Il rivelatore di sciame misura la distribuzione laterale e temporale dello sciame
- Distanza tra taniche: 1.5 km
- Area di forma esagonale, di $60 \times 60 \text{ km}^2$
- Rivelatori di fluorescenza: 6 telescopi con ciascuno 4 “occhi” per determinare il profilo longitudinale dello sciame e l'altezza del suo massimo.

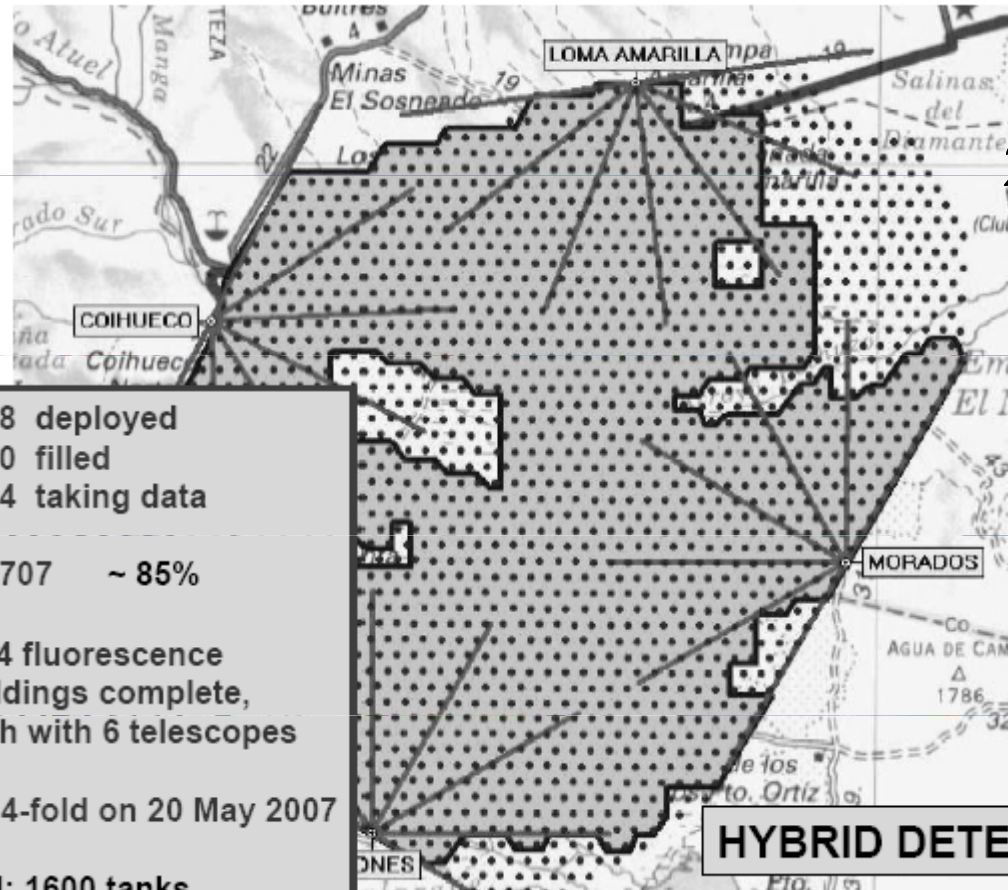




The Surface Detector Array



Constr



2007

1438 deployed
 1400 filled
 1364 taking data

090707 ~ 85%

All 4 fluorescence buildings complete, each with 6 telescopes

1st 4-fold on 20 May 2007

AIM: 1600 tanks

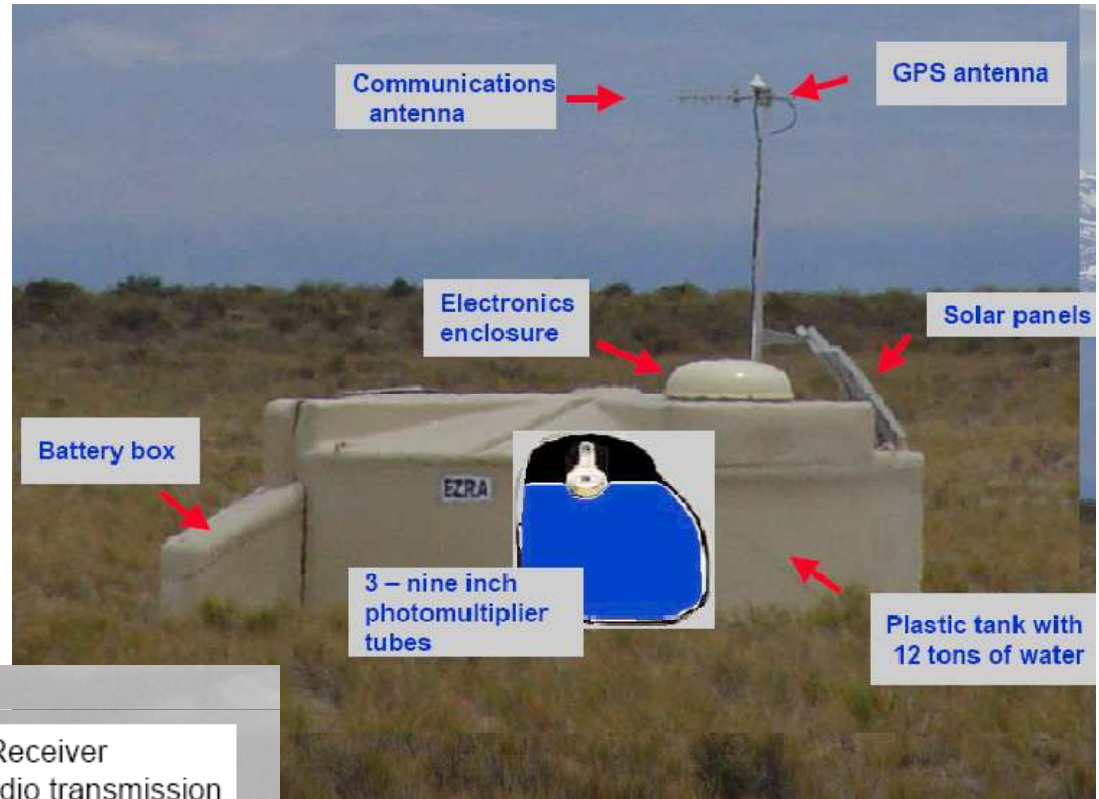
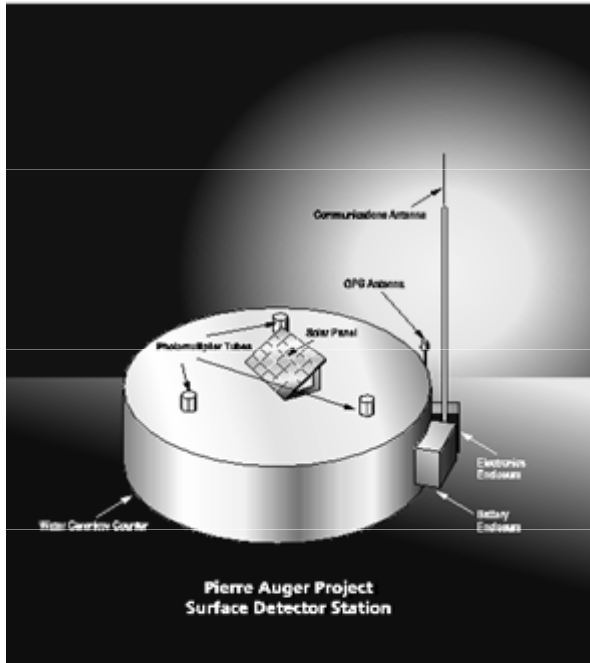
HYBRID DETECTOR

~1000 surface detector stations deployed and sending triggers

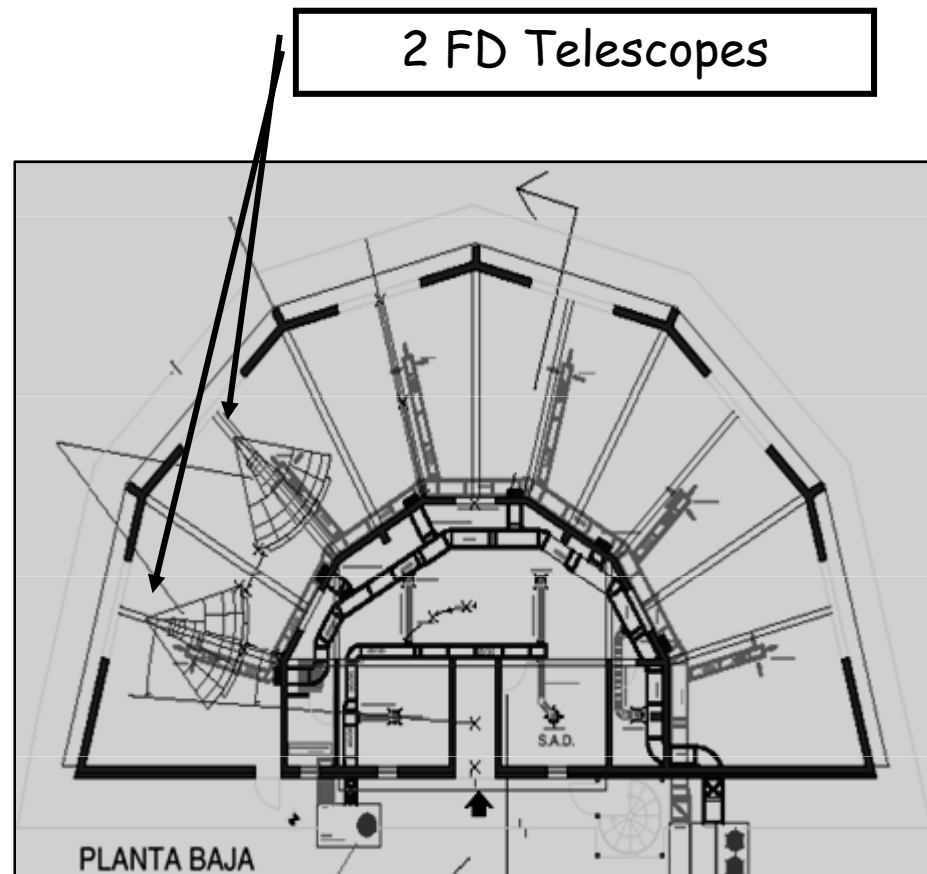
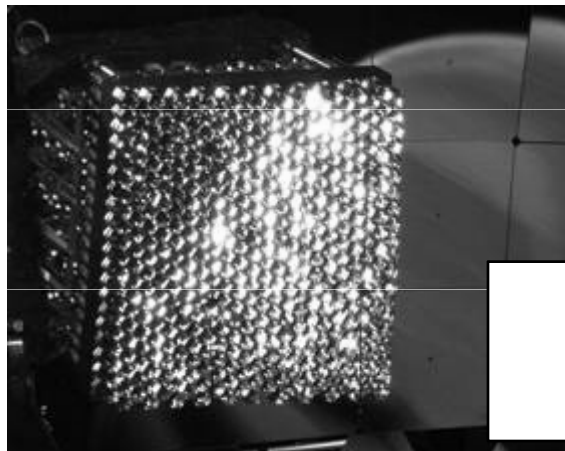
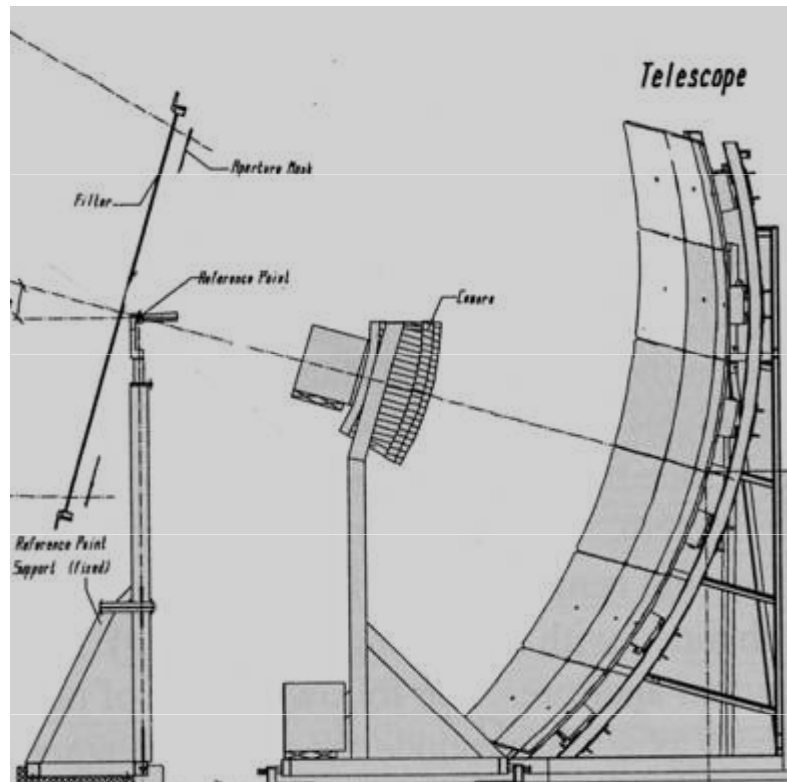
Three fluorescence buildings complete each with 6 telescopes

3

Uno dei rivelatori Čerenkov di AUGER

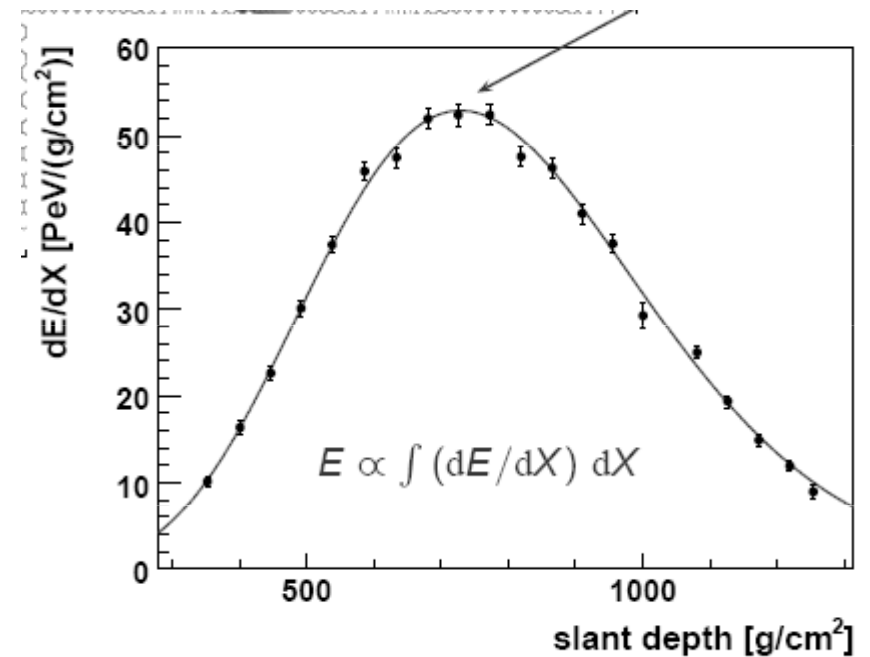
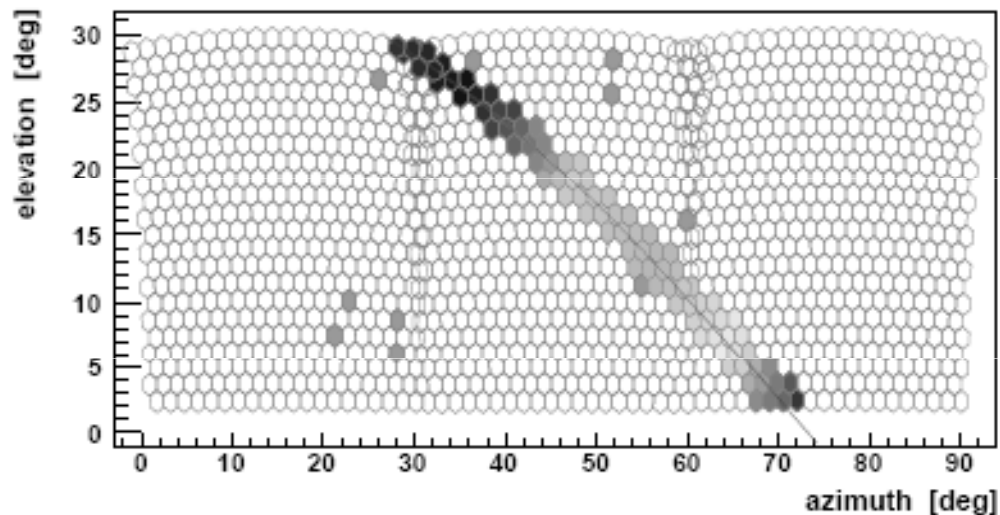
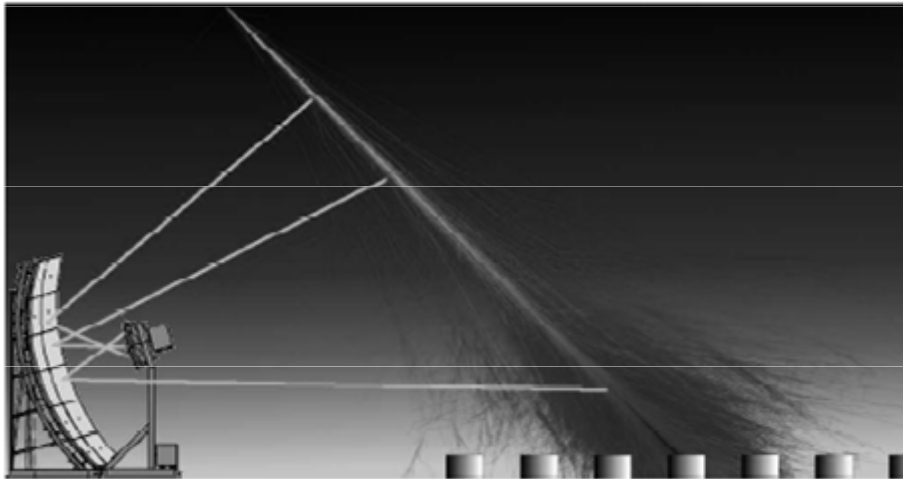


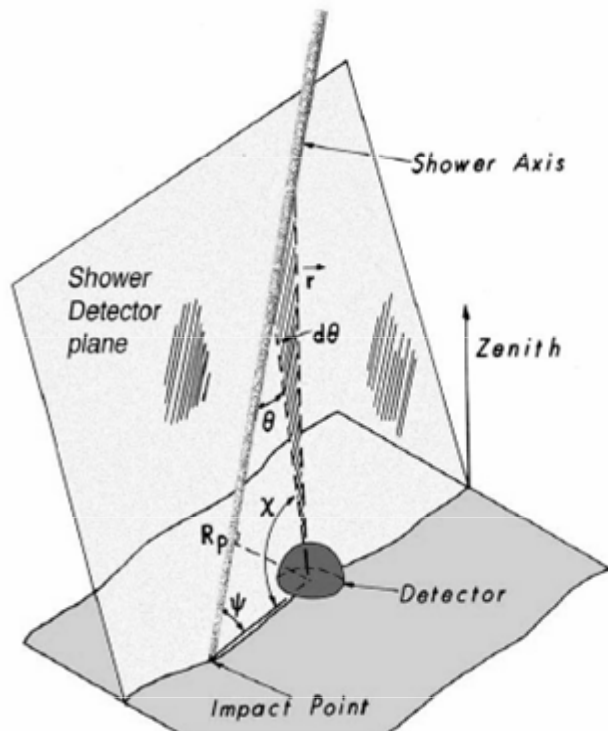
Rivelatori a Fluorescenza



440 photomultipliers upon a spherical cup of 1.741 m ray

Rivelatori di fluorescenza: il profilo longitudinale dello sciame

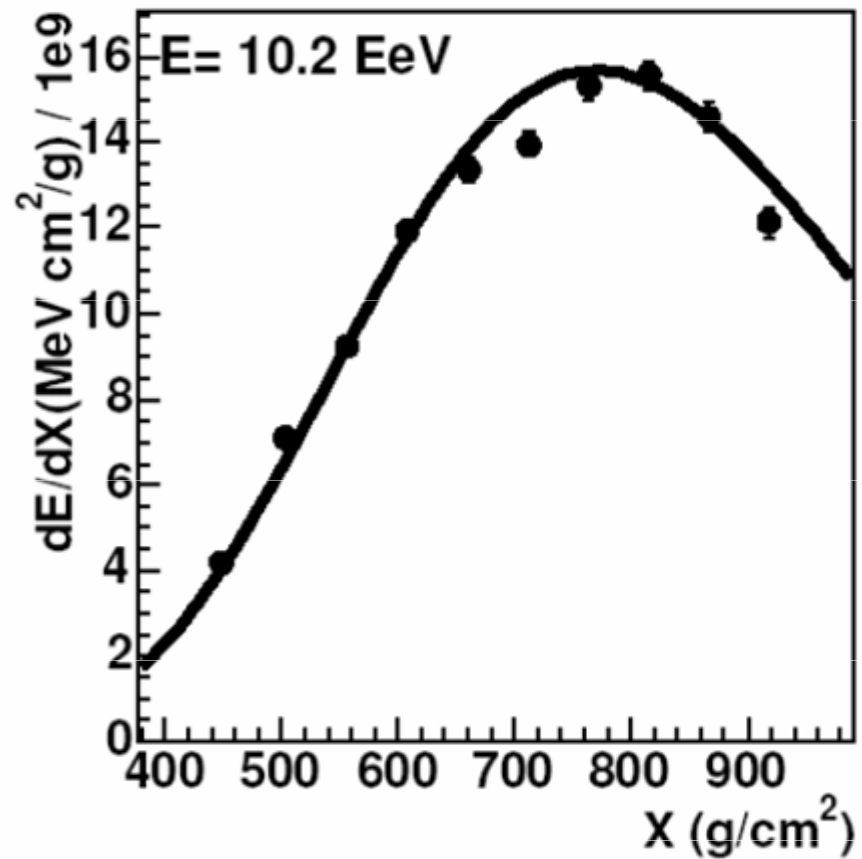
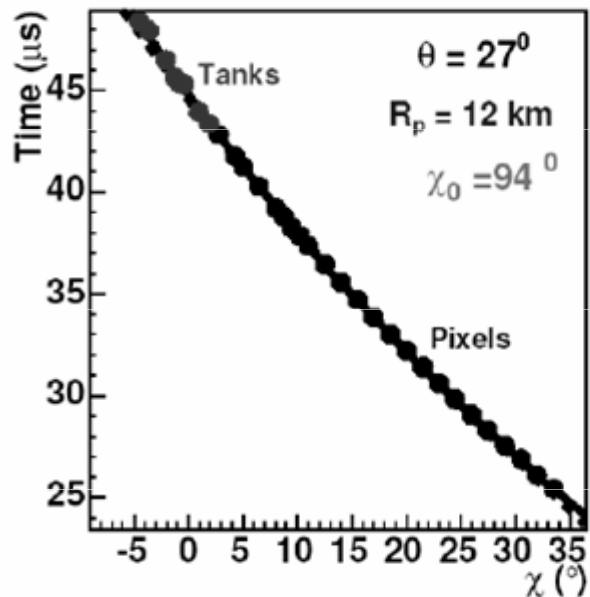




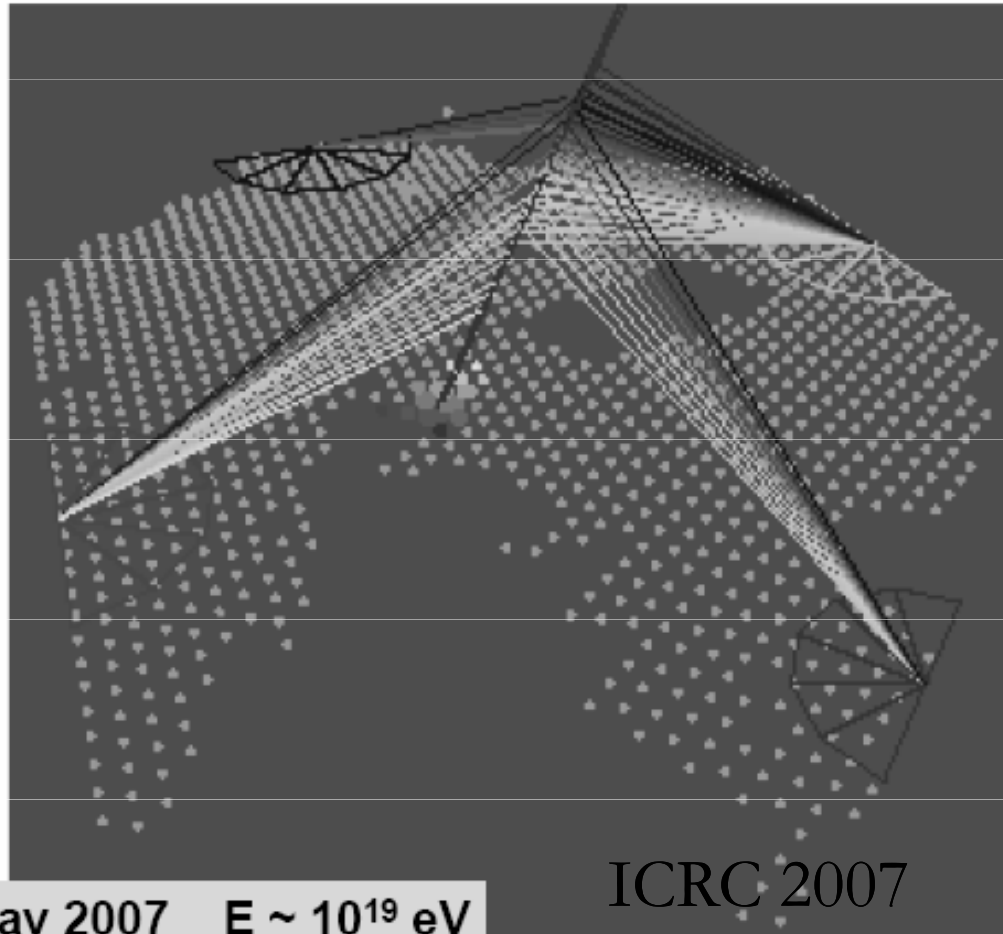
Hybrid Event (FD view)

A hybrid event – 1021302

Zenith angle $\sim 30^\circ$, Energy ~ 10 EeV



from Fly's Eye 1985

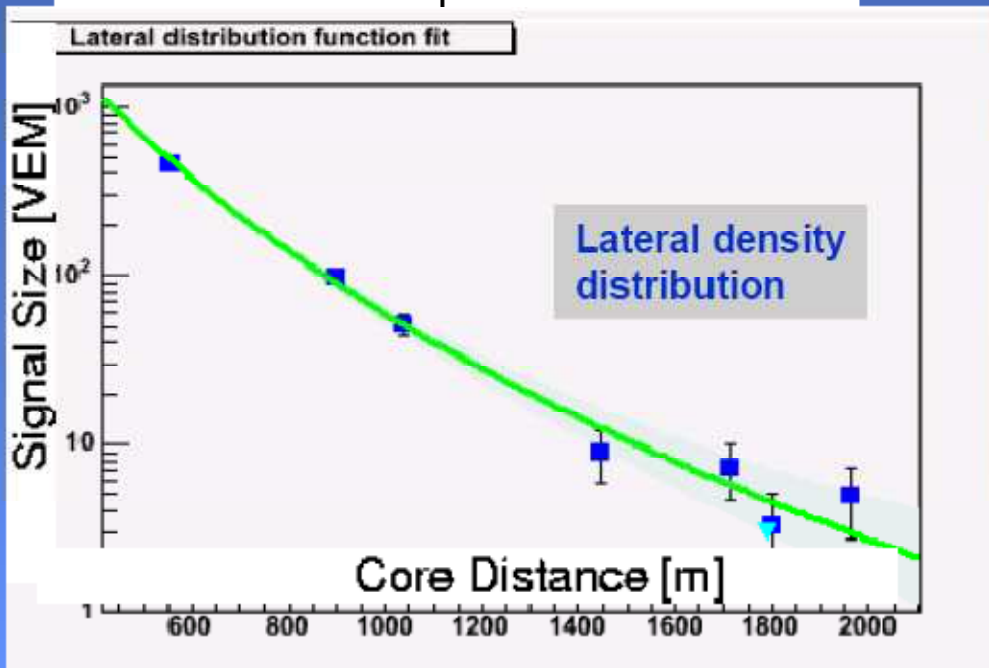
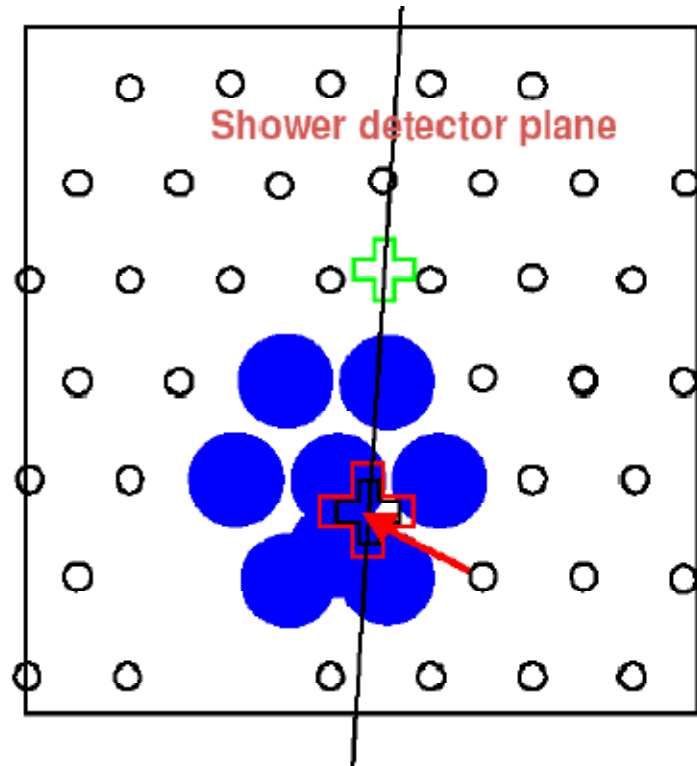
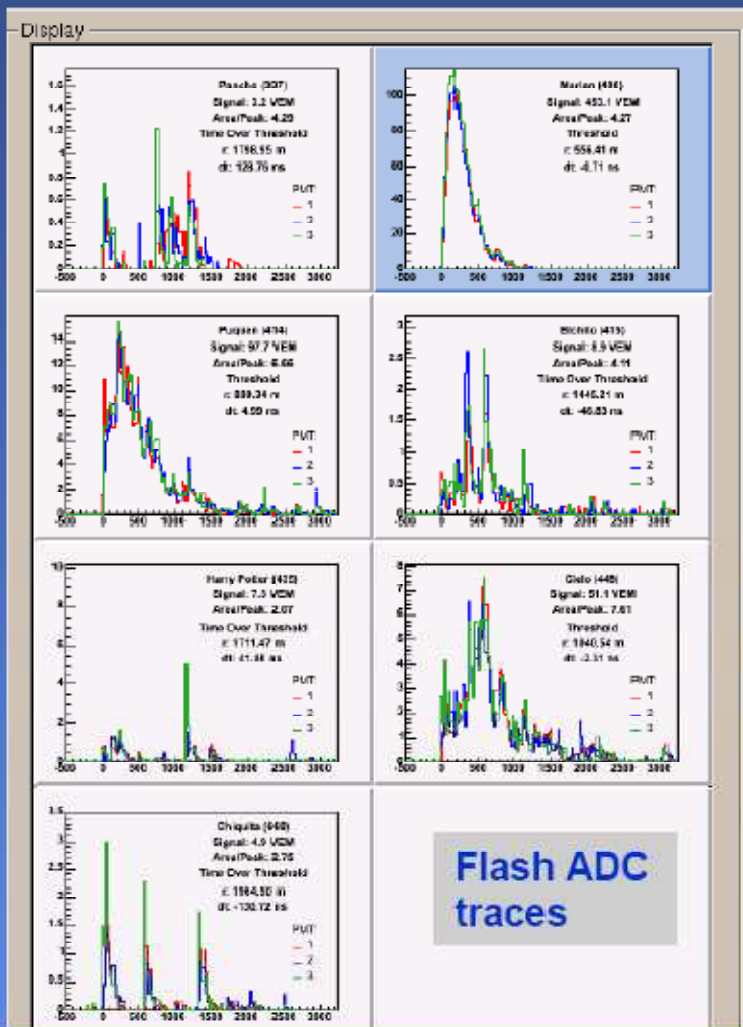


7

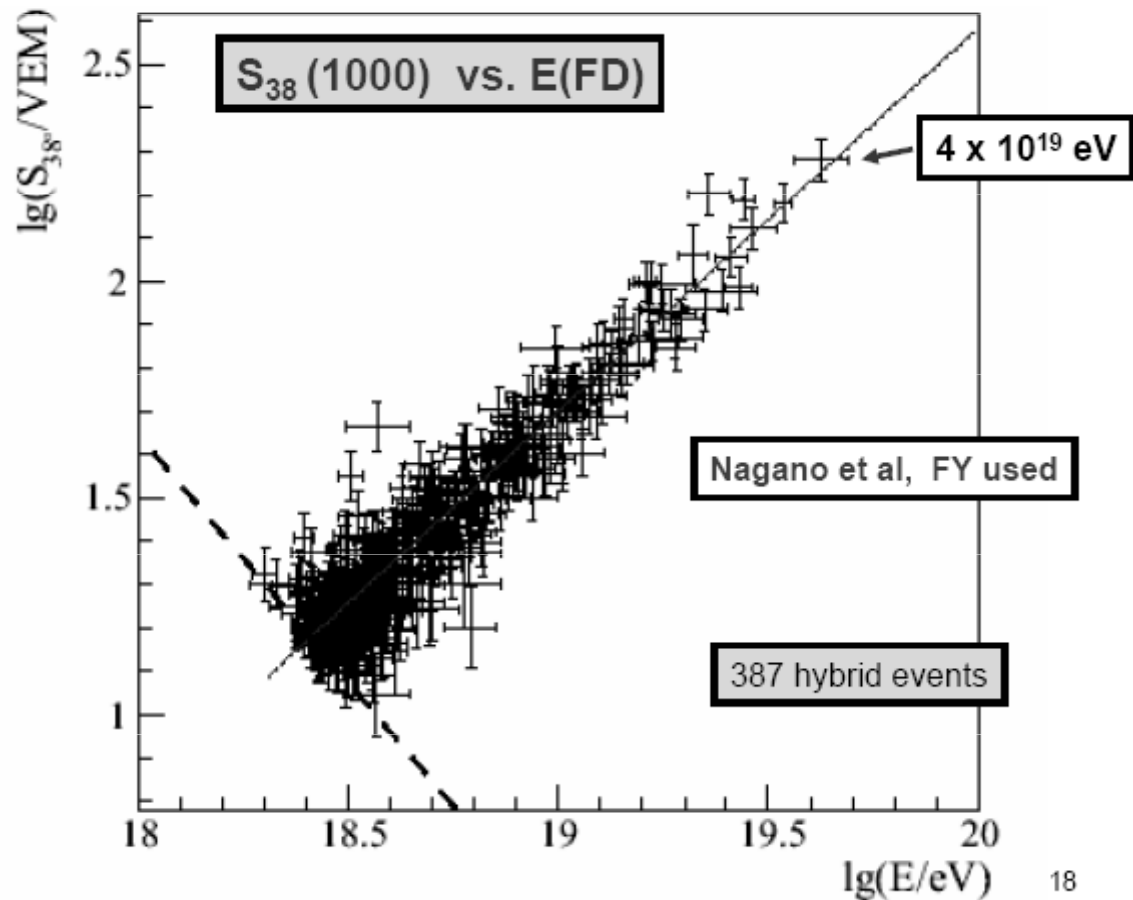
■ <http://www.auger.org/>

Hybrid Event (SD view)

A hybrid event – 1021302
 Zenith angle ~ 30°, Energy ~ 10 EeV

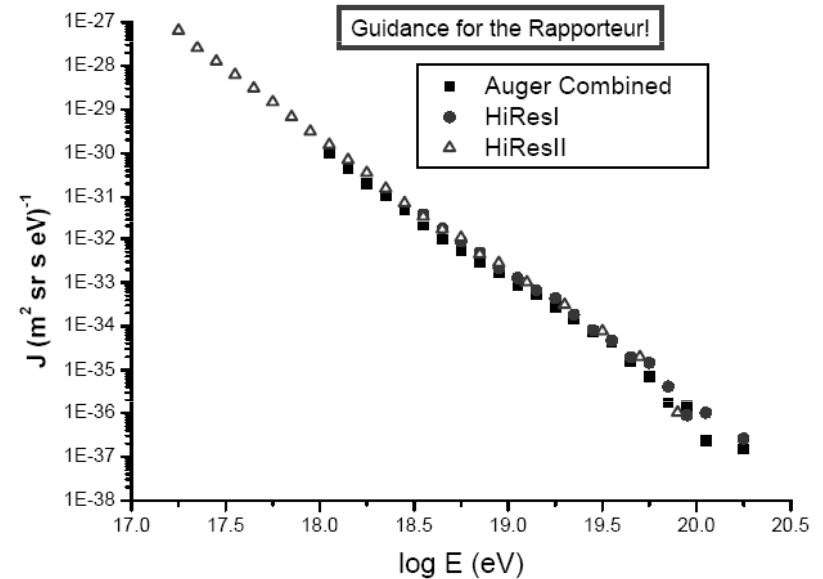
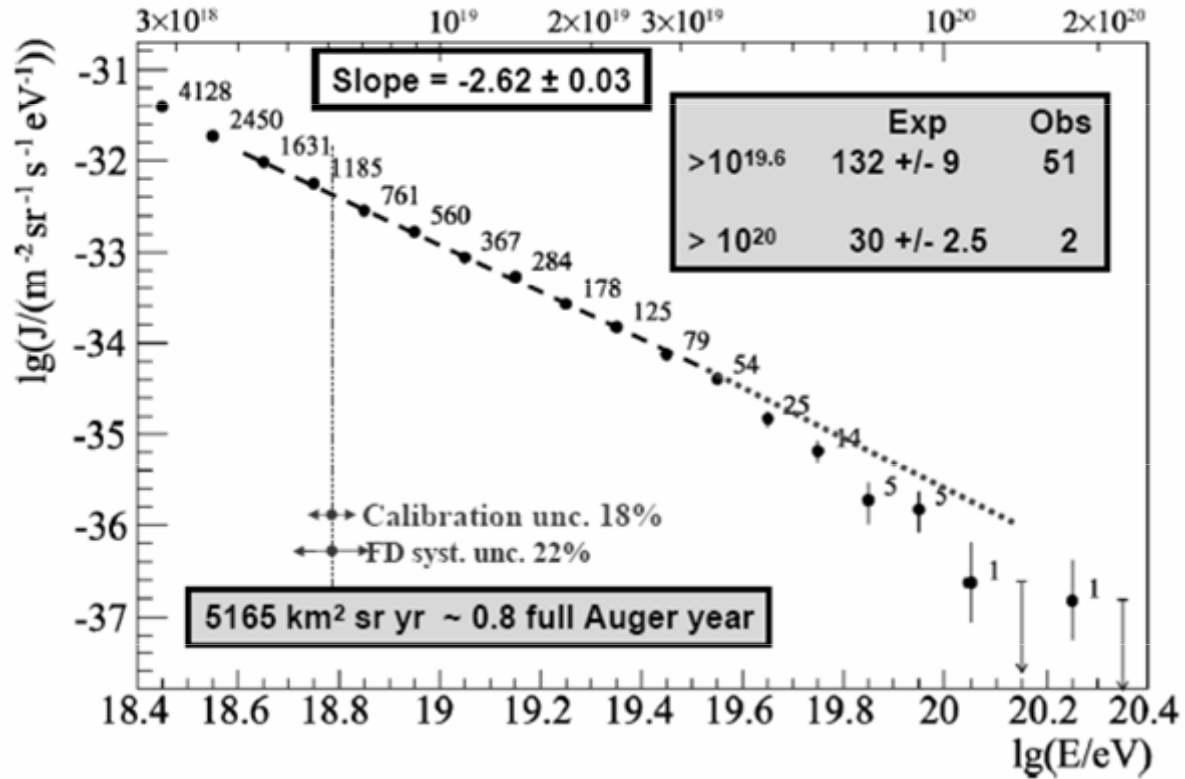


- L'energia del RC viene misurata con entrambe le tecniche sperimentali
- Vi è correlazione tra le due misure



ICRC 2007

Risultati preliminari: spettro energetico (2007)

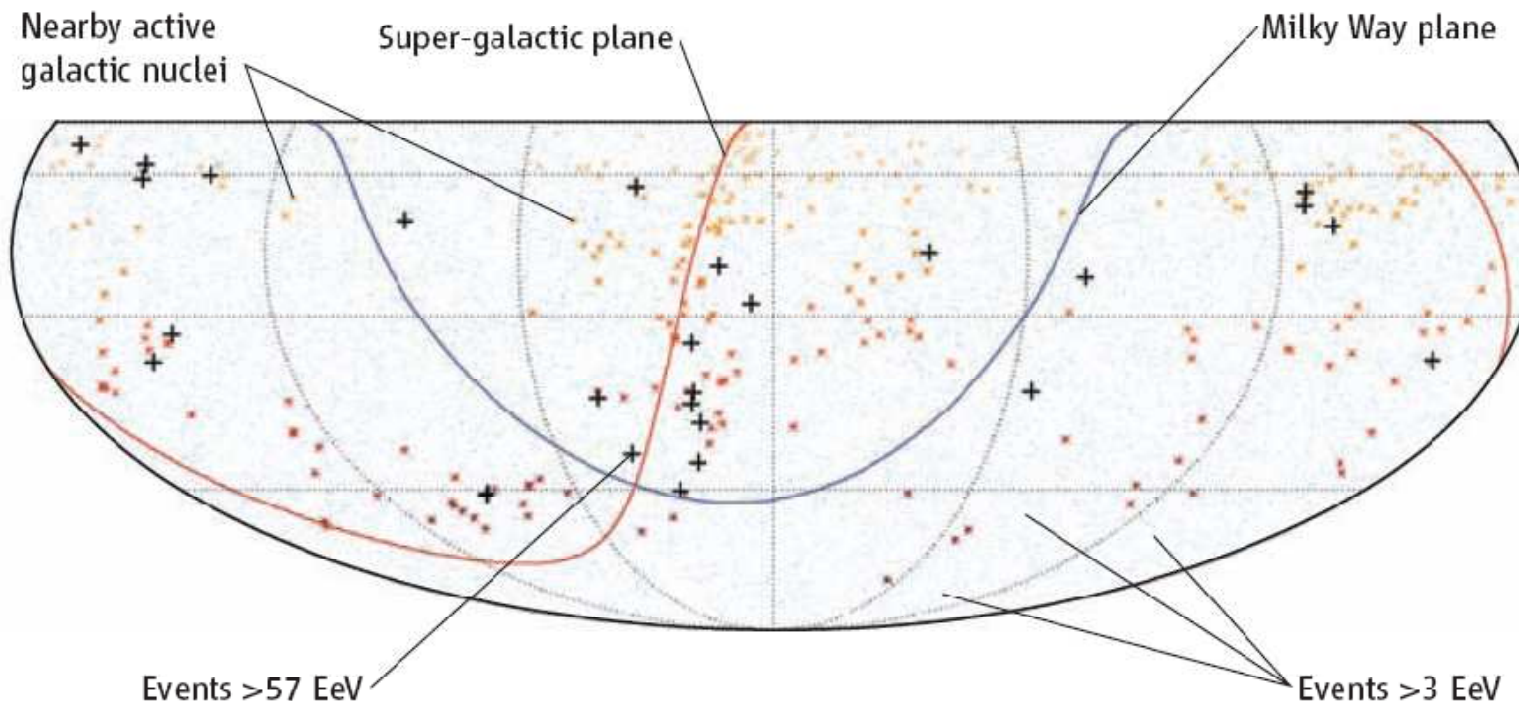


ICRC 2007

Correlation of the Highest-Energy Cosmic Rays with Nearby Extragalactic Objects

www.sciencemag.org on November 9, 2007

The Pierre Auger Collaboration*



Sky map (2) showing cosmic rays detected by the Pierre Auger Observatory. Low-energy cosmic rays appear to originate from evenly distributed sources (blue dots), but the origins of the highest-energy events (crosses) correlate with the distribution of local matter as represented by nearby active galactic nuclei (red stars). Thus, active galactic nuclei are a likely source of these rare high-energy cosmic rays.

BREAKING NEWS 2009: AUGER trova una correlazione molto meno accentuata tra provenienza dei UHERC AGM

- I primi dati di Auger sono in accordo con il cut-off GZK: la diminuzione del flusso di RC sopra 6×10^{19} eV è dovuta all'interazione dei p con la radiazione cosmica di fondo
- La distribuzione di arrivo dei RC più energetici sembra correlata con la distribuzione degli AGN sino a 100 Mpc.

5.11 Meccanismi di accelerazione

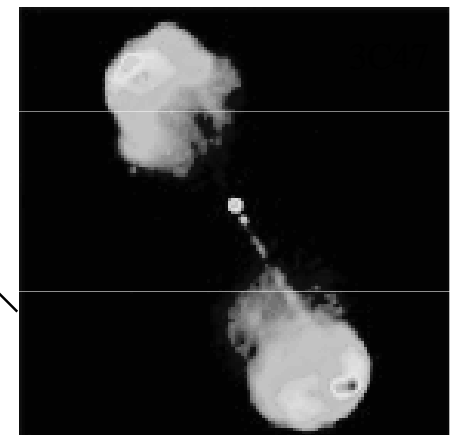
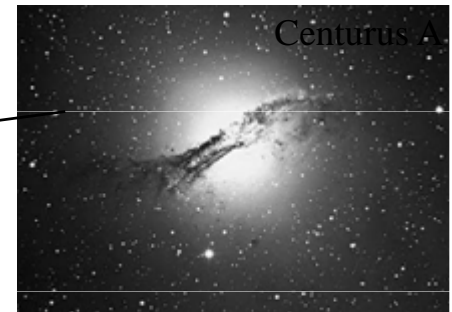
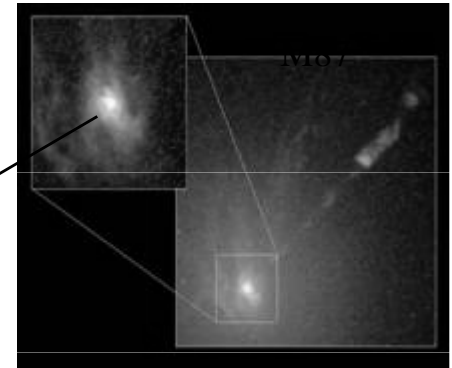
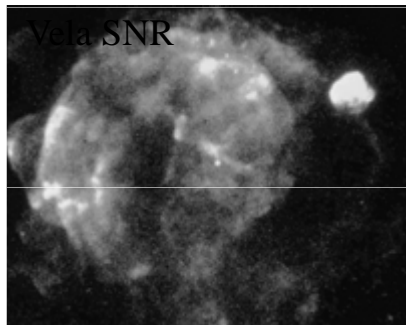
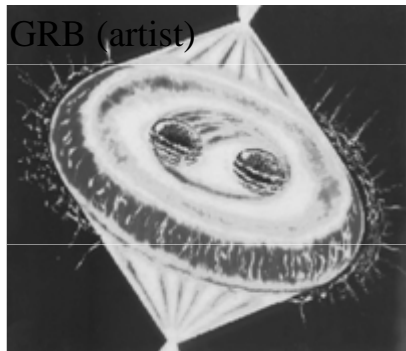
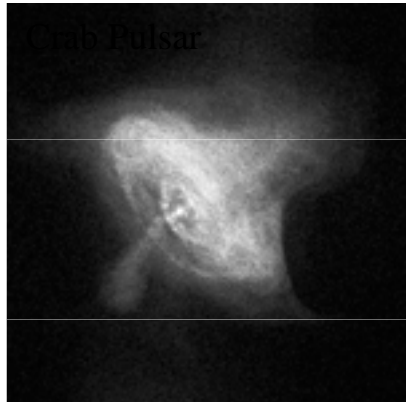
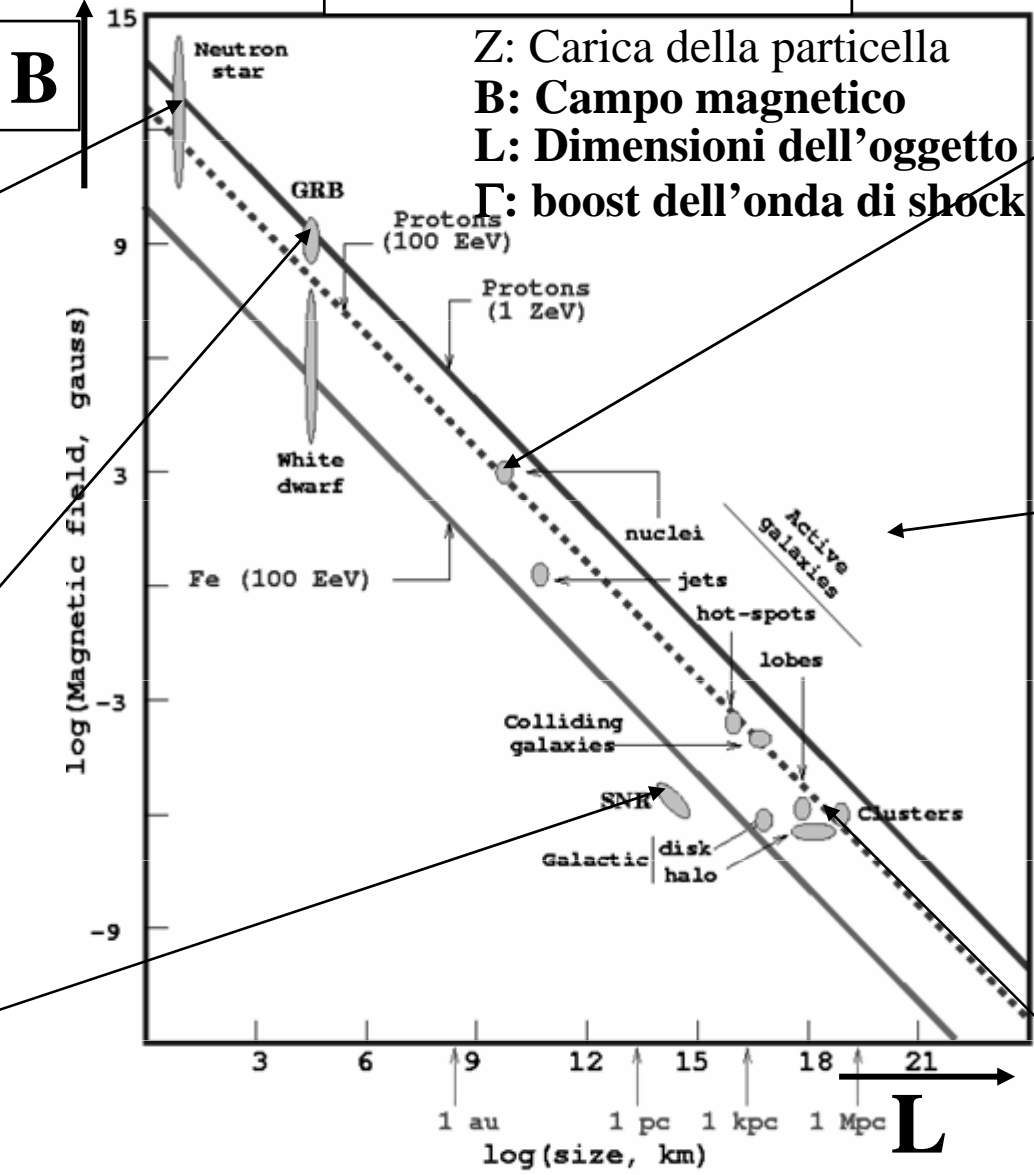
$$E \sim Z B L \Gamma$$

Z: Carica della particella

B: Campo magnetico

L: Dimensioni dell'oggetto

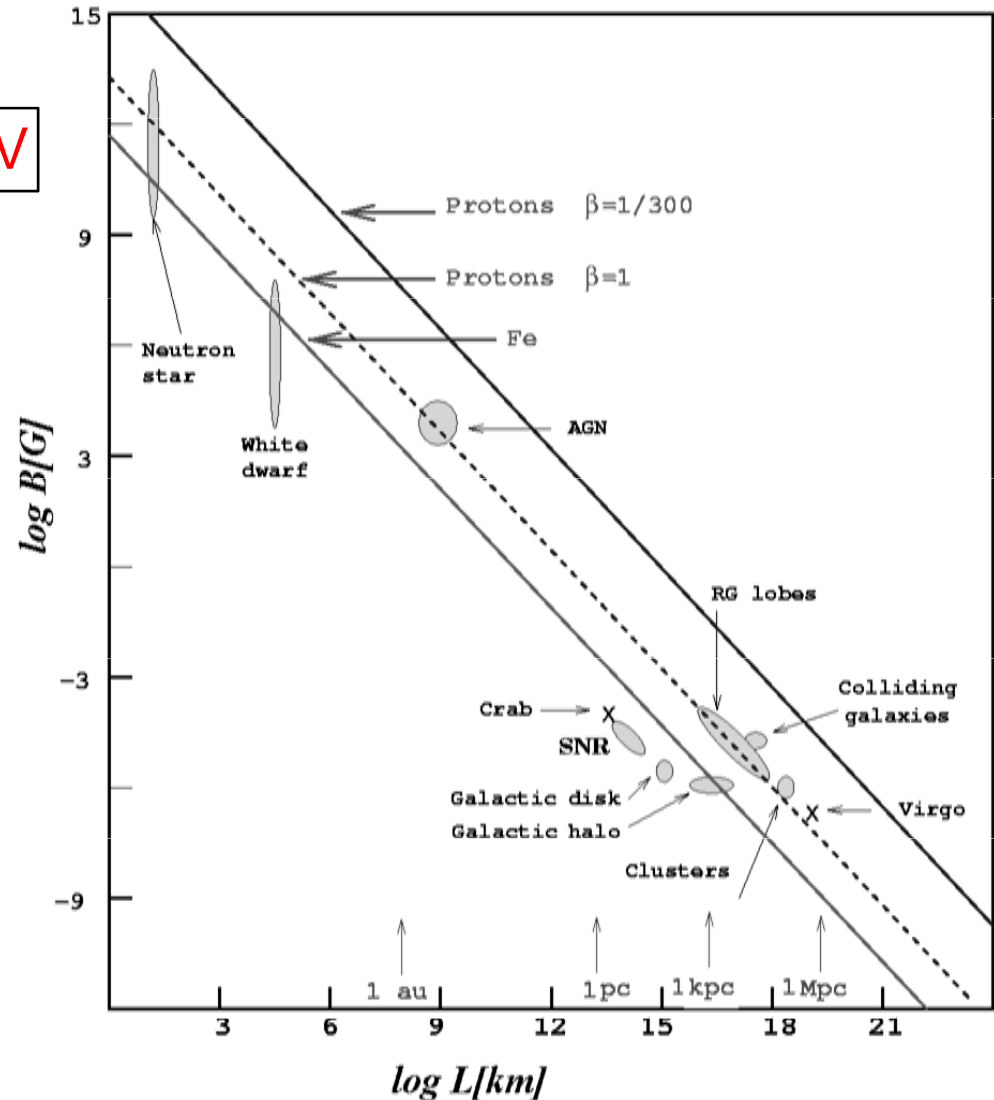
Γ : boost dell'onda di shock



“Hillas Plot”

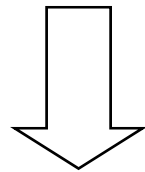
$$E_{\max} \approx \beta_{\text{shock}} Z \cdot B[\mu\text{G}] \cdot L[\text{kpc}] \cdot 10^{18} \text{ eV}$$

- Fissata la massima energia (in fig. 10^{20} eV), i meccanismi astrofisici candidati devono avere campi magnetici intensi o grandi regioni di accelerazione.

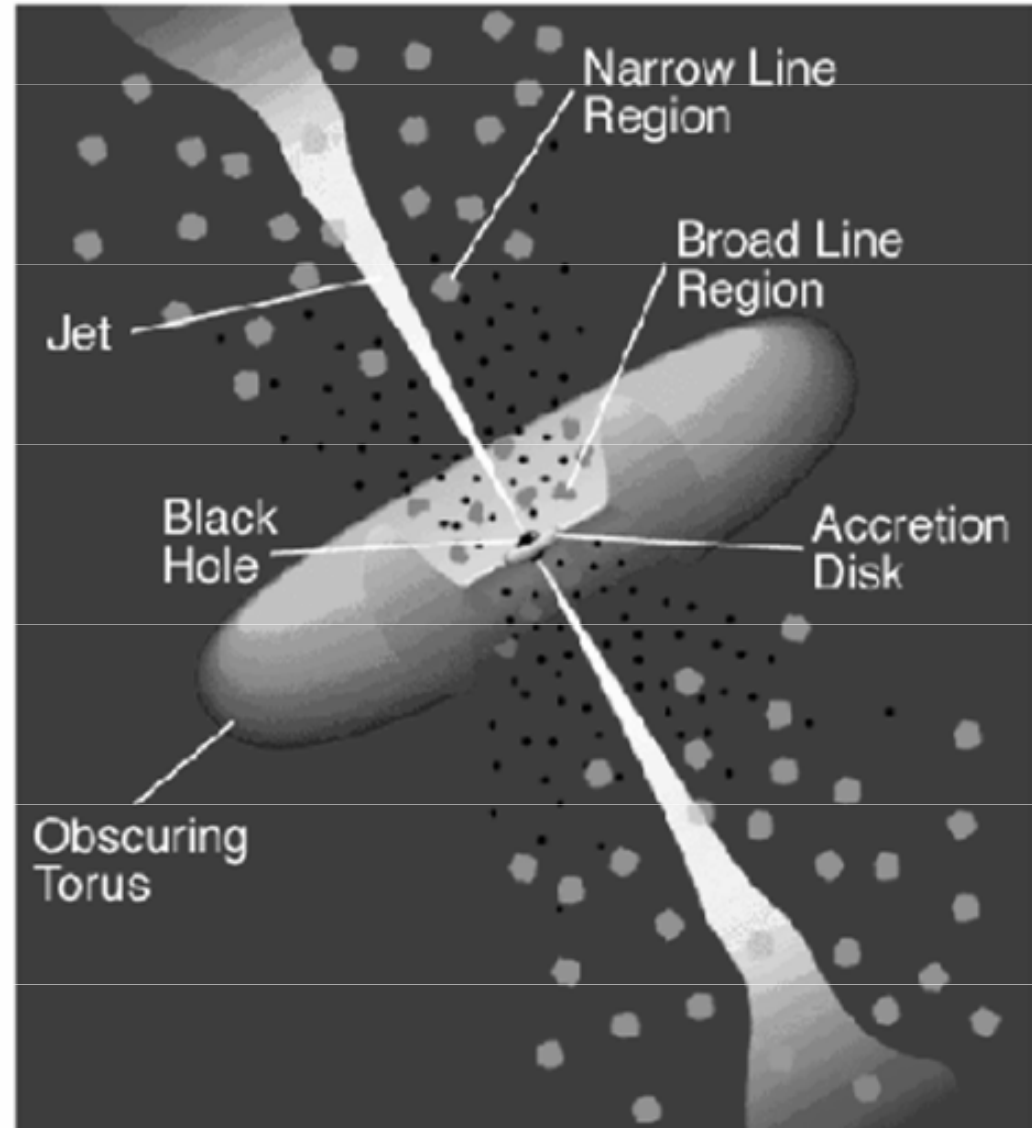


AGNs

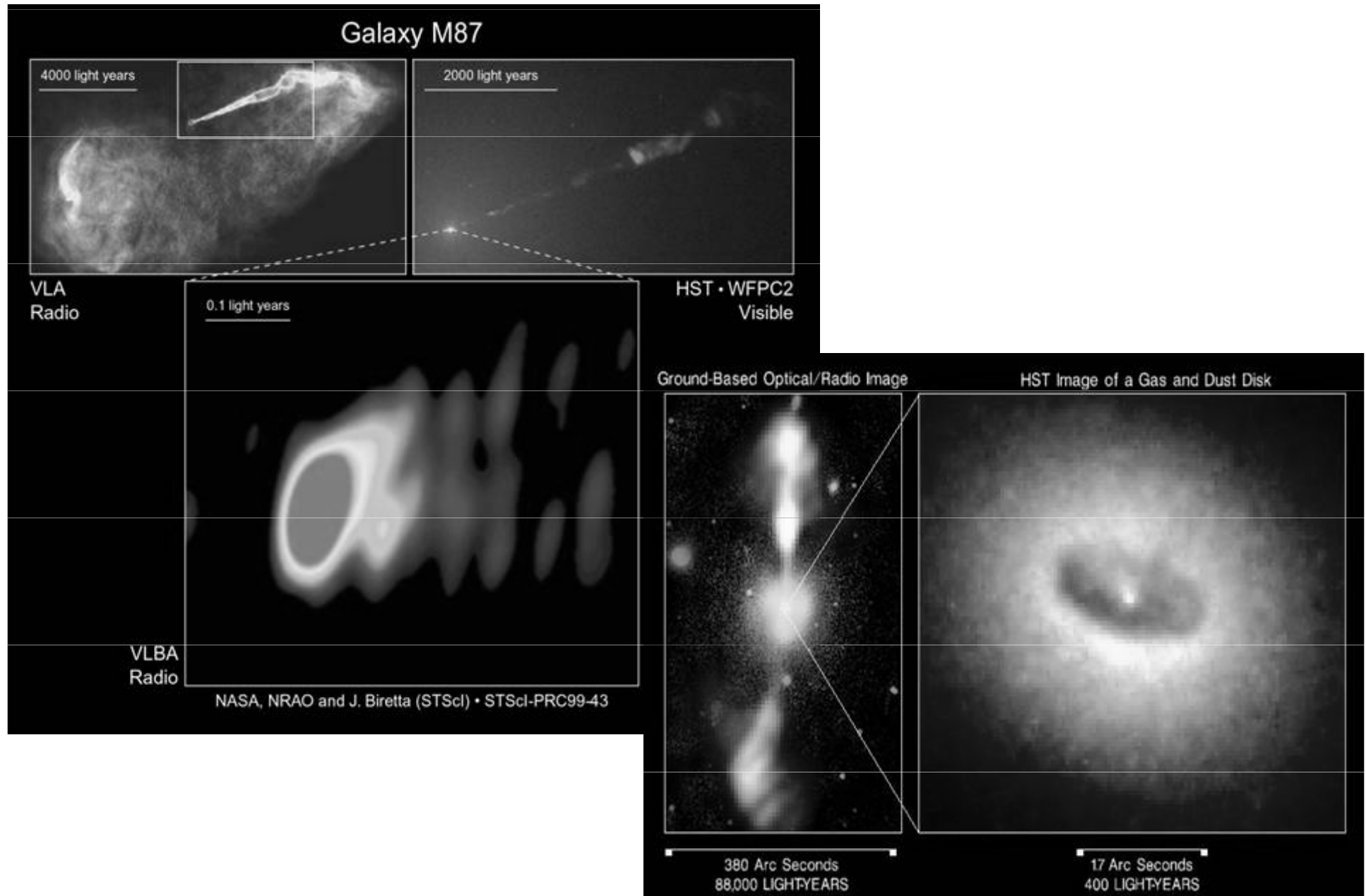
- Galassie attive:
 - Buco nero al centro (?)
 - Disco di accrescimento del buco nero
 - Getti ultrarelativistici



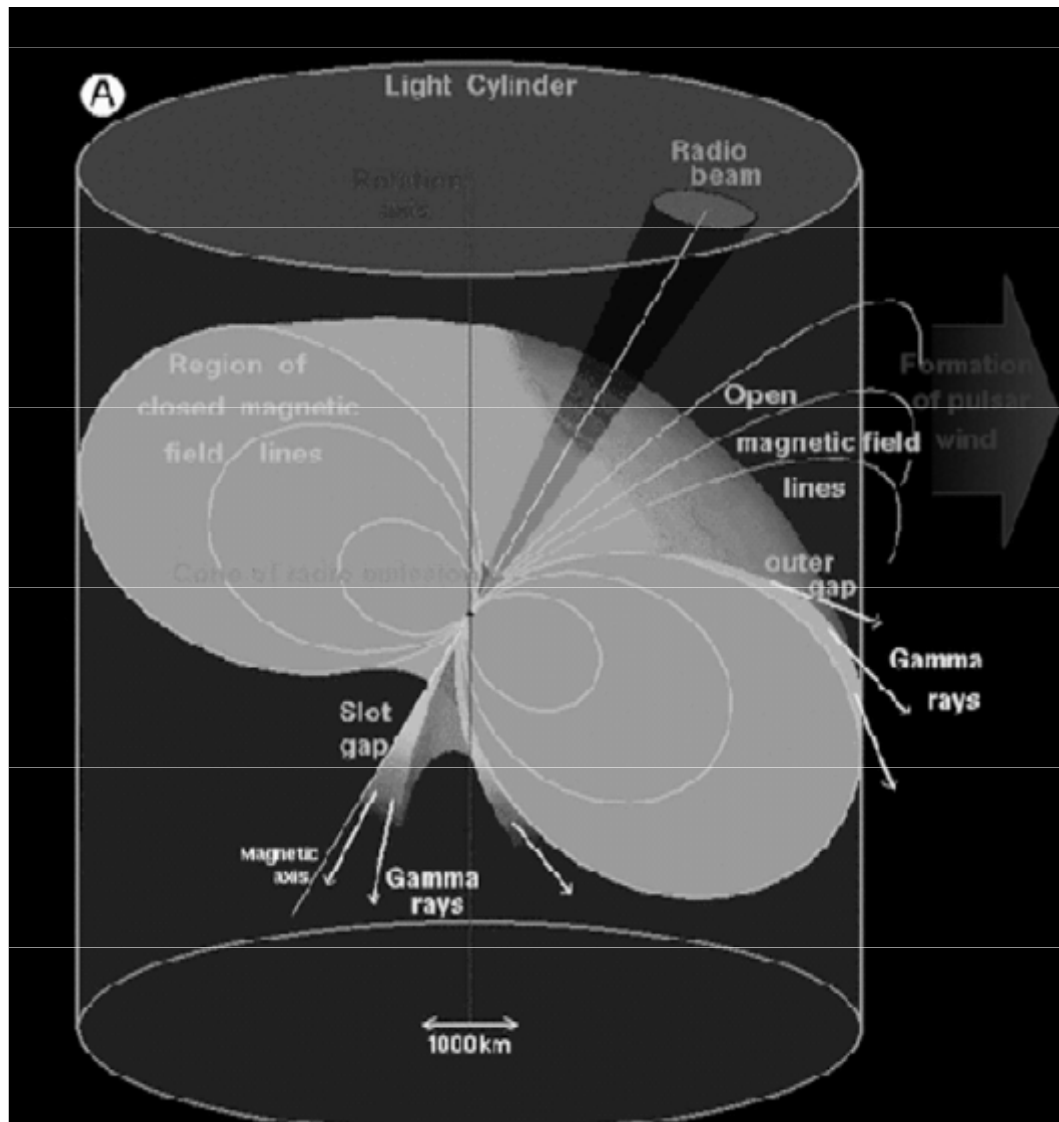
Accelerazione da shock ultrarelativistico



AGNs

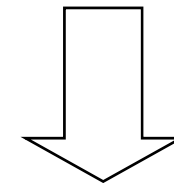


Stelle di neutroni



- Stelle di neutroni con intensi campi magnetici superficiali rotanti

- Ad una certa distanza B non è più chiuso perchè non può essere in rotazione con $v > c$



- Formazione di vento relativistico ($\Gamma \gg 10^7 - 10^{10}$), e accelerazione forse fino a 10^{20} eV

Modelli top-down

- Durante e dopo l'inflazione, \exists particelle con $m \sim m_{\text{inflatone}}, 10^{13}-10^{14} \text{ GeV}$
- Possono essere rimaste intrappolate in difetti topologici, o impossibilitate a decadere per l'esistenza di qualche simmetria discreta

- Simmetrie discrete $\rightarrow X$ accumulate nell'alone galattico (materia oscura?)
 \rightarrow no GZK, anisotropia galattica (più flusso da centro galattico)
- Intrappolamento \rightarrow distanze cosmologiche \rightarrow problema GZK e...
 - Decadimento

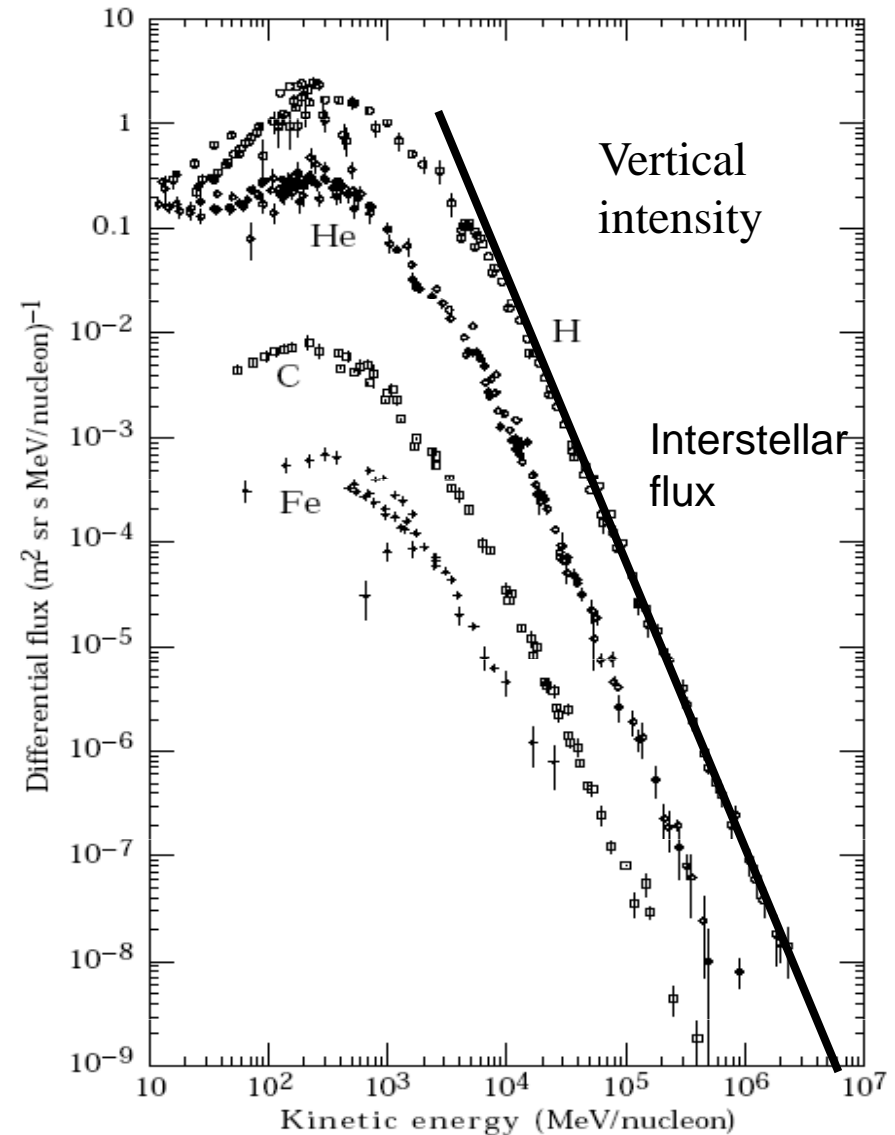
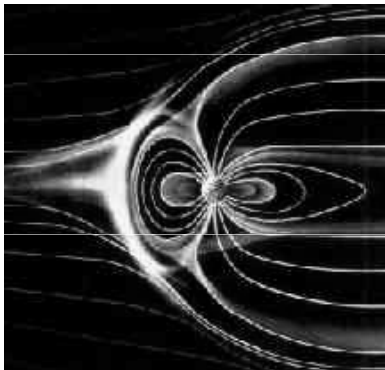
$$X \rightarrow qq \rightarrow \text{jets}$$

Il processo di adronizzazione produce una piccola percentuale di nucleoni, il resto pioni ($\rightarrow \nu, \gamma, e$)

Considerando la propagazione, fotoni dovrebbero dominare a energie superiori a 10^{20} eV

APPENDICE: La regione di bassa energia

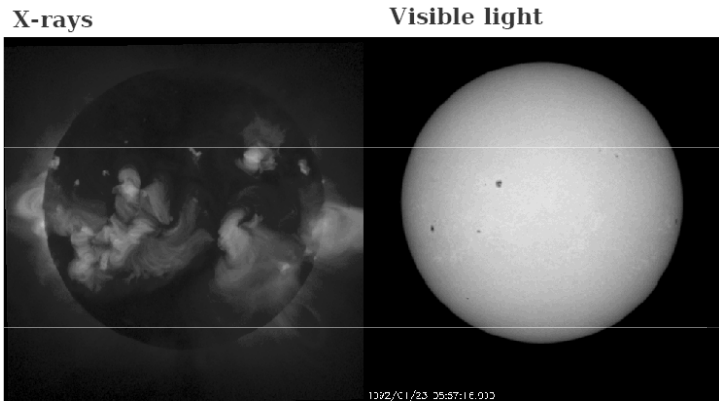
- Nella regione di bassa energia i RC sono affetti da modulazioni temporali dovute al **vento solare**
- Per $E < 1$ GeV/nucleone: attenuazione del flusso per tutte le particelle, in funzione delle fasi del ciclo solare (**flusso di RC minimo quando l'attività è massima**).
- Vento solare = flusso di materiale dalla corona solare con velocità ~ 450 km/s
- Il campo magnetico solare ($\sim 5 \cdot 10^{-5}$ G) è “congelato” nel materiale ionizzato ed è trasportato fuori dalla superficie solare



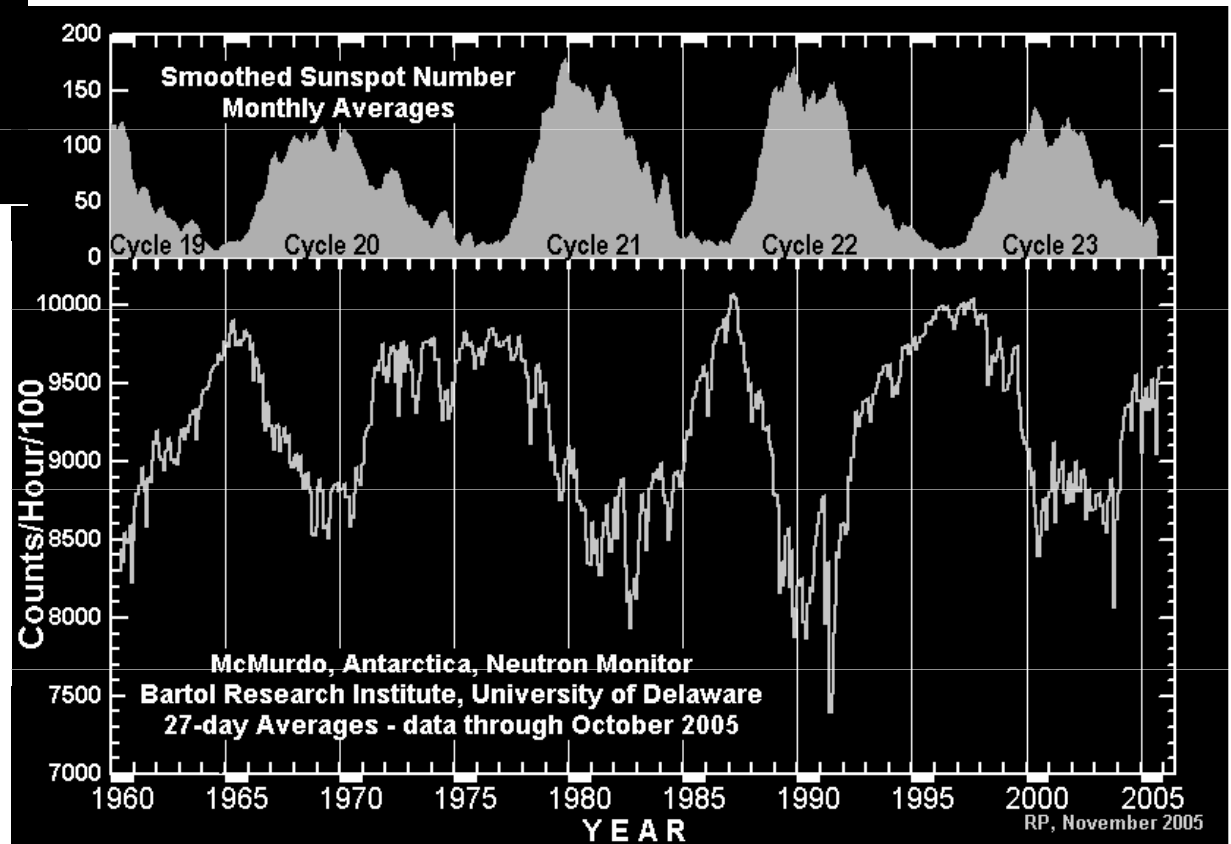
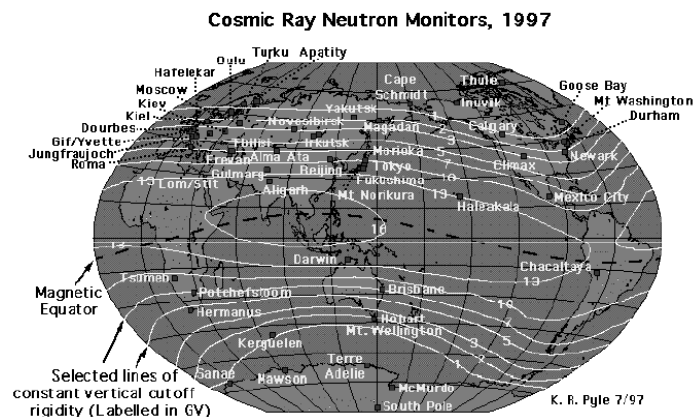
Spettro di bassa energia: modulazioni Solari

Neutron monitors: esperimenti al suolo, che contano I neutroni nei RC secondari prodotti dalla spallazione di nuclei durante l'interazione dei RC coi nuclei atmosferici. Questa misura (che dipende dal flusso di RC di bassa energia) mostra una correlazione col ciclo di 11 anni del Sole.

<http://neutronm.bartol.udel.edu/>



Il numero di "Sun spots" è proporzionale all'attività del Sole.



Sommario - 1

- Le tecniche sperimentali per la misura dello spettro energetico dei RC sopra 10-100 TeV usano Extensive Air Shower arrays
- Lo spettro dei RC tra $10^{14} < E_0 < 10^{15}$ eV presenta un cambiamento di pendenza, ed è per questo detta regione del *Ginocchio*
- I RC si arricchiscono di nuclei pesanti nella regione oltre il ginocchio, sino ad energie $E_0 < 10^{19}$
- Il modello di Fermi delle Supernovae NON riesce a spiegare i RC tra $10^{15} < E_0 < 10^{19}$ eV \rightarrow pulsar (?)
- Poche pulsar (1-2) nella Galassia possono giustificare l'energetica dei RC tra $10^{15} < E_0 < 10^{19}$ eV
- Sono però osservati dei RC di energia superiore a 10^{19} eV

Sommario - 2

- Per $E > 10^{19}$ eV, i RC non sono confinati nella galassia
- A partire da $\sim 10^{20}$ eV lo scattering dei RC su fotoni della CMBR sopprime il flusso di protoni a queste energie
- Di conseguenza questi RC (se p) non possono provenire da troppo lontano ($D_{\max} \sim 30$ Mpc)
- Primi dati sperimentali di AUGER:
 - Presenza del cutoff \rightarrow SI
 - Localizzazione di sorgenti discrete \rightarrow AGN “vicine”
- Modelli teorici non consolidati (esclusi ??)
 - Accelerazione oggetti cosmologici (AGN...) \rightarrow cutoff
 - Prodotti di decadimento part. Supermassive \rightarrow no cutoff

Possibili approfondimenti

- Caratteristiche di alcuni rivelatori di sciame estesi (Kaskade,...)
- Misure dirette dei RC nella regione del ginocchio
- Modelli teorici per il ginocchio
- La composizione chimica nella regione del ginocchio
- Hillas plot: approfondimento
- Osservazioni di γ dal piano galattico dopo EGRET
- I GRB: modelli teorici ed osservazioni sperimentali
- Gli esperimenti di misure di fluorescenza
- Il progetto AUGER
- Progetti futuri (EUSO,...)
- Emissione di RC da AGN
-