

I Raggi Cosmici

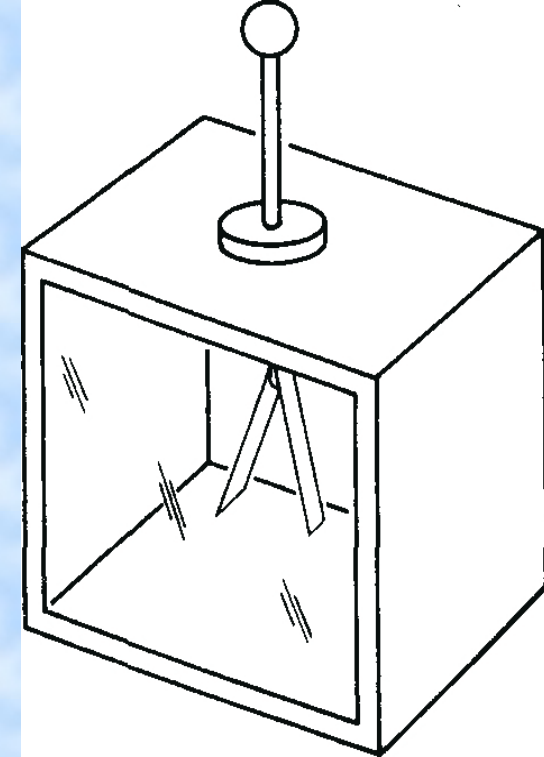
presentazione di

Fabio Manniti

Primi studi: 1900

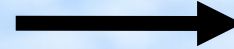
Durante lo studio della conducibilità dei gas con gli elettroscopi, si è scoperto che, per quanto essi si isolassero, tendevano a scaricarsi a causa di un gas ionizzato.

Ipotesi di Wilson: La ionizzazione era dovuta a sorgenti esterne all'atmosfera



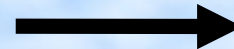
L'origine extraterrestre di questa radiazione fu provata da Hess primo fra tutti nel 1912 su un pallone aerostatico.

• **Primi 600 m: la ionizzazione diminuiva**



Radiazione emanata dalla crosta terrestre

• **Oltre i 600 m: la ionizzazione aumentava**



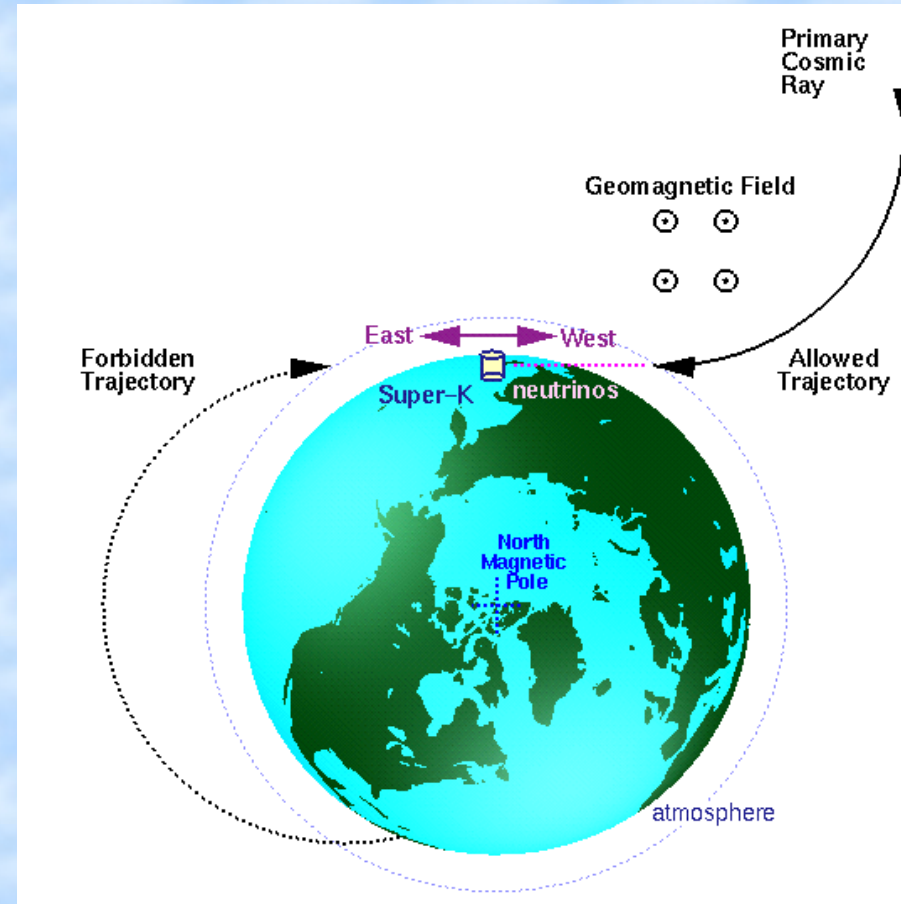
Avvicinamento a una sorgente cosmica



Osservando gli effetti geomagnetici, Clay capì che i RC erano formati da particelle cariche, infatti egli ha notato una variazione di intensità dei RC con la latitudine. Avvicinandosi all'equatore, diminuisce l'intensità dei RC.

Bruno Rossi dimostra l'effetto East-West per i raggi cosmici: I RC, se formato da particelle cariche, devono avere energie diverse se queste provengono da Est o da Ovest.

Poiché le particelle sono per lo più positive, molte più particelle si muovono da Ovest verso Est (Compton, Johnson e Alvarez).



Spettro

La componente primaria (quelli che giungono sulla sommità dell'atmosfera) dei raggi cosmici è formata da:

- 86% protoni
- 13% particelle α
- 2% elettroni

Lo spettro si estende per 13 ordini di grandezza in energia e 32 ordini di grandezza in flusso.

Lo spettro è fittato da una legge di potenza e presenta due cambi di pendenza: “ginocchio” e “caviglia”

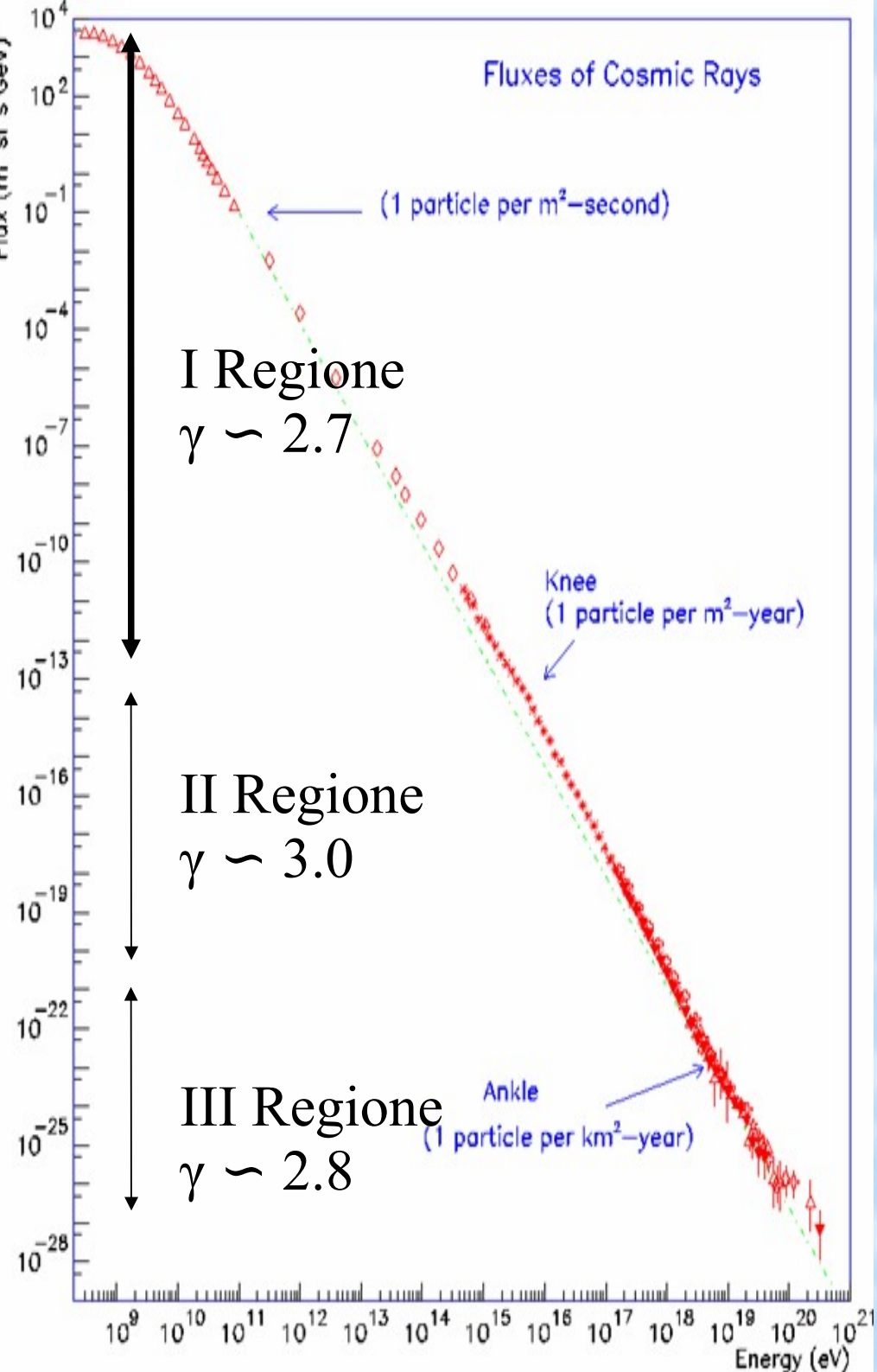
$$\Phi(E) = k \cdot E^{-\gamma} (cm^{-3} s^{-1} sr^{-1} GeV^{-1})$$

La componente secondaria, invece, è formata da

- Positroni, antiprotoni
- Fotoni, neutrini
- Pioni e muoni

È una legge empirica i cui valori di k e γ vengono determinati dall'andamento della curva

Il fatto che lo spettro si estende a energie così elevate ci indica che almeno una parte deve avere origini extragalattiche perché il campo magnetico interstellare nella nostra galassia non contiene simili particelle.



Effetti geomagnetici

Il campo geomagnetico agisce sui primari carichi come uno spettrometro capace di selezionare i RC in base alla loro carica ed energia.

Consideriamo una particella con carica $z|e|$, velocità v e momento $p=mv$ che viaggia lungo un cammino equatoriale di raggio r e momento di dipolo M .

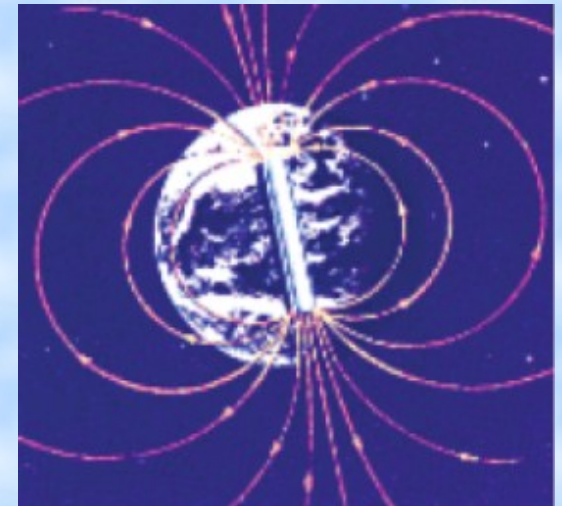
$$z|e||\vec{B} \times \vec{v}| = \frac{mv^2}{r}$$

con

$$\vec{B} = \left(\frac{\mu_0}{4\pi}\right) \frac{M}{r^3}$$

da cui

$$r_S = \left[\left(\frac{\mu_0}{4\pi}\right) \frac{Mz|e|}{p} \right]^{1/2}$$



Il momento del protone che ha unità di Stormer intorno alla Terra è:

$$pc/z = 59.6 \text{ GeV}$$

Protoni con momento minore, non raggiungono la Terra

L'equazione del moto è della forma

con

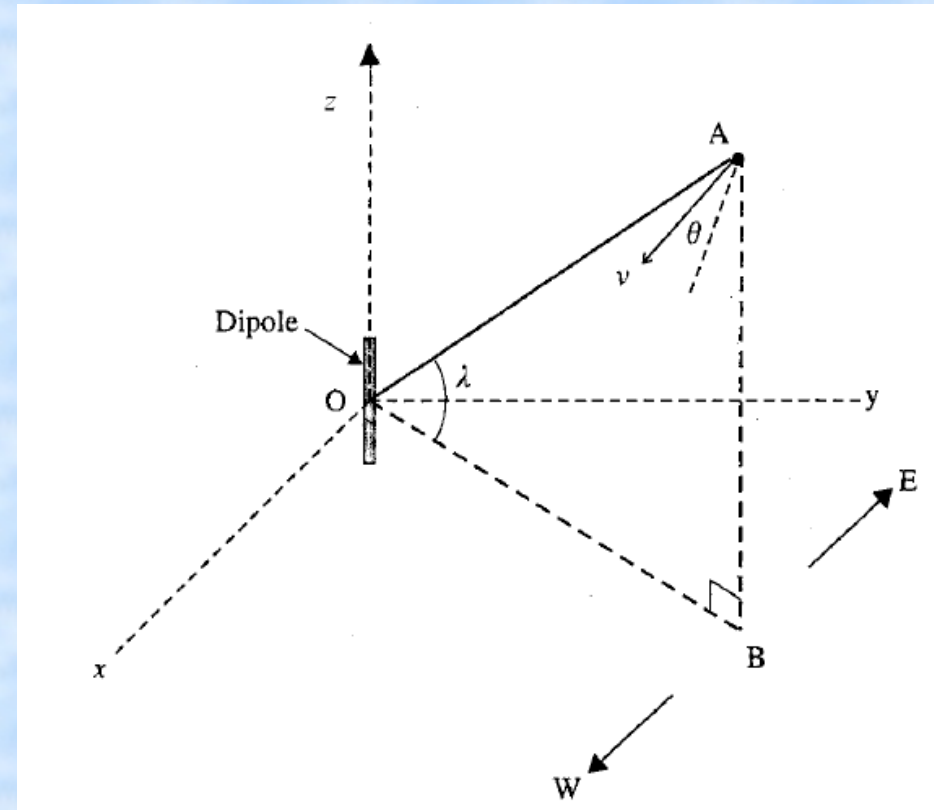
- b – parametro d'impatto con l'asse del dipolo
- r – distanza dal centro del dipolo in unità di Stormer
- λ - latitudine geomagnetica
- θ - angolo tra la velocità ed il piano meridiano che si muove con la particella

Si può osservare facilmente che il valore critico di b per i momenti permessi si ha per $b > 2$ da cui deriva la seguente equazione per il cut-off:

$$r = \frac{\cos^2 \lambda}{1 + \sqrt{1 - \sin \theta \cos^3 \lambda}}$$

Da cui si vede che per le particelle che vengono da Est ($\sin \theta = 1$): $pc = 59.6 \text{ GeV}$
da Ovest ($\sin \theta = -1$): $pc = 10.2 \text{ GeV}$

$$b = r \cdot \sin \theta \cos \lambda + \frac{\cos^2 \lambda}{r}$$



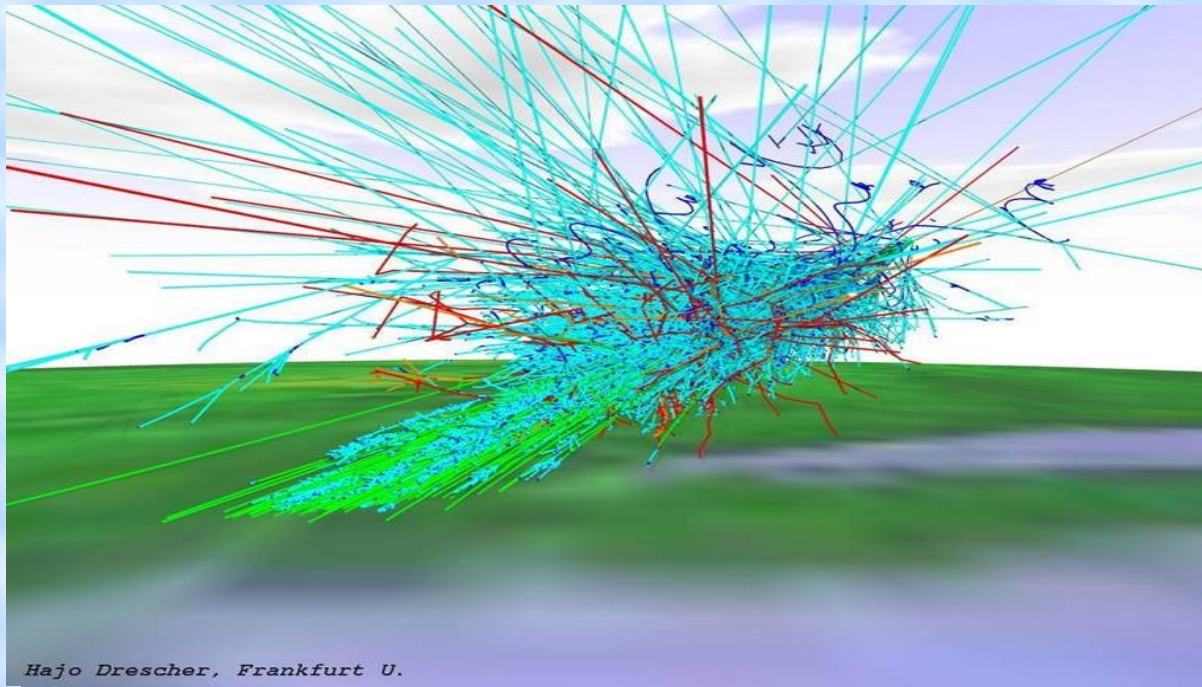
Sciami di Raggi Cosmici

L'interazione di raggi primari e secondari genera con l'atmosfera i cosiddetti **sciami** di particelle dai quali figurano varie componenti:

Componente
elettromagnetica

Componente
muonica

Componente
adronica



Sciame atmosferico

Uno sciame atmosferico è dominato dai seguenti processi

Perdite di energie per ionizzazione (le particelle perdono energia a causa delle collisioni con gli elettroni atomici)

$$-\frac{dE}{dx} = \left(\frac{4\pi N_A z^2 e^4}{m_e v^2} \right) \left(\frac{Z}{A} \right) \left[\ln \left(\frac{2m_e v^2 \gamma^2}{I} \right) - \beta^2 \right]$$

Perdite di energie per radiazione (Gli elettroni subiscono la diffusione coulombiana dal nucleo atomico con emissione di fotoni)

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{E}{X_0}$$

dove X_0 è lunghezza di radiazione definita come

$$-\frac{1}{X_0} = 4\alpha \left(\frac{Z}{A} \right) (Z + 1) r_e^2 N_0 \ln \left(\frac{183}{Z^{1/3}} \right)$$

Conversione di coppie e^+ , e^- (fotone che, se ha energia sufficientemente alta ($>2mc^2$) si può convertire in una coppia e^+ , e^- nel campo coulombiano del nucleo)

Interazioni nucleari (Protoni, nuclei e mesoni interagiscono con i nuclei dell'atmosfera producendo altri mesoni o nucleoni o spallazione di nuclei)

Sciame elettromagnetico

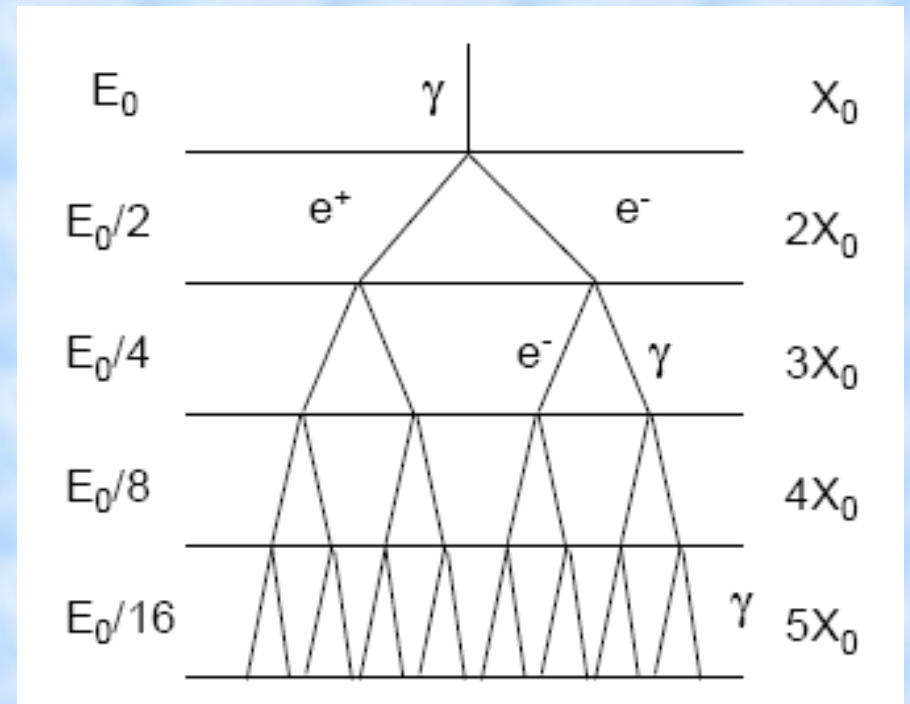
Data una particella iniziale di energia E_0 dopo una certa distanza X , la particella decade in due due particelle di ognuna di energia pari a $E_n = E_0 / 2^n$ dove n è il numero del passo.

Quando $E_n < E_c$ (Energia critica) il processo dominante è la ionizzazione. A questo punto si ha il massimo dello sciame

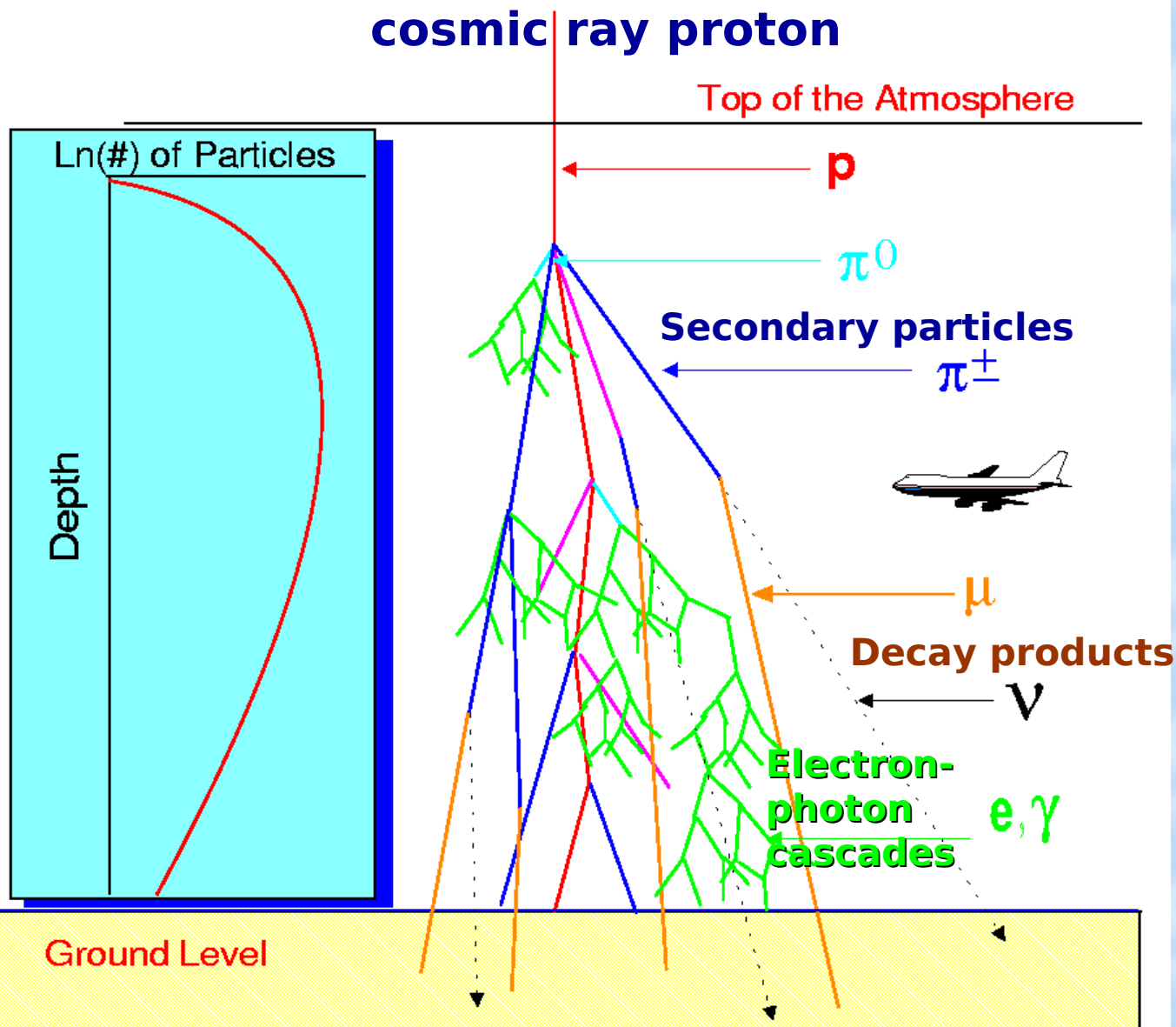
In aria $E_c = 80 \text{ MeV}$

Il numero di particelle è $N_{max} = 2^n = E_0 / E_c$ e il numero di lunghezze di radiazione è $E_0 / 2^n = E_c$.

La lunghezza totale di traccia, delle particelle cariche, in lunghezze di radiazione è $L = (2/3) \int 2^n dn \approx (2/3 \ln 2) E_0 / E_c \approx E_0 / E_c$



Componenti 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 (e sotto terra) ci sono prevalentemente muoni.

Studio sperimentale dei RC

Per lo studio dei RC di alta energia occorre:

- Una grande Superficie (S)
- Una grande accettazione in angolo solido (Ω)
- Un grande tempo di esposizione (T)

La grandezza $S \times \Omega \times T$ [m^2 -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 km^2 -sr-year

Rivelazione dello sciame

Per rivelare l'arrivo sull'atmosfera terrestre di un primario capace di produrre un EAS ($E > 10 \text{ PeV}$) si usano sistemi di molti rivelatori sparsi su vaste superfici. Il sistema di rivelatori deve consentire di determinare la grandezza e la struttura dello sciame e, dal confronto dei tempi di arrivo dello sciame ai vari rivelatori, di risalire alla direzione di provenienza del primario.

Esistono diversi tipi di rivelatori in uno stesso apparato

Array di rivelatori per la componente elettromagnetica

Calorimetri adronici a serbatoio

Contatori schermati per la componente muonica (sotto il suolo)

Rivelatori ottici per osservare lo sviluppo dello sciame, tramite l'emissione di luce durante lo sviluppo (luce Cherenkov)

Un esempio: KASCADE (Germania)

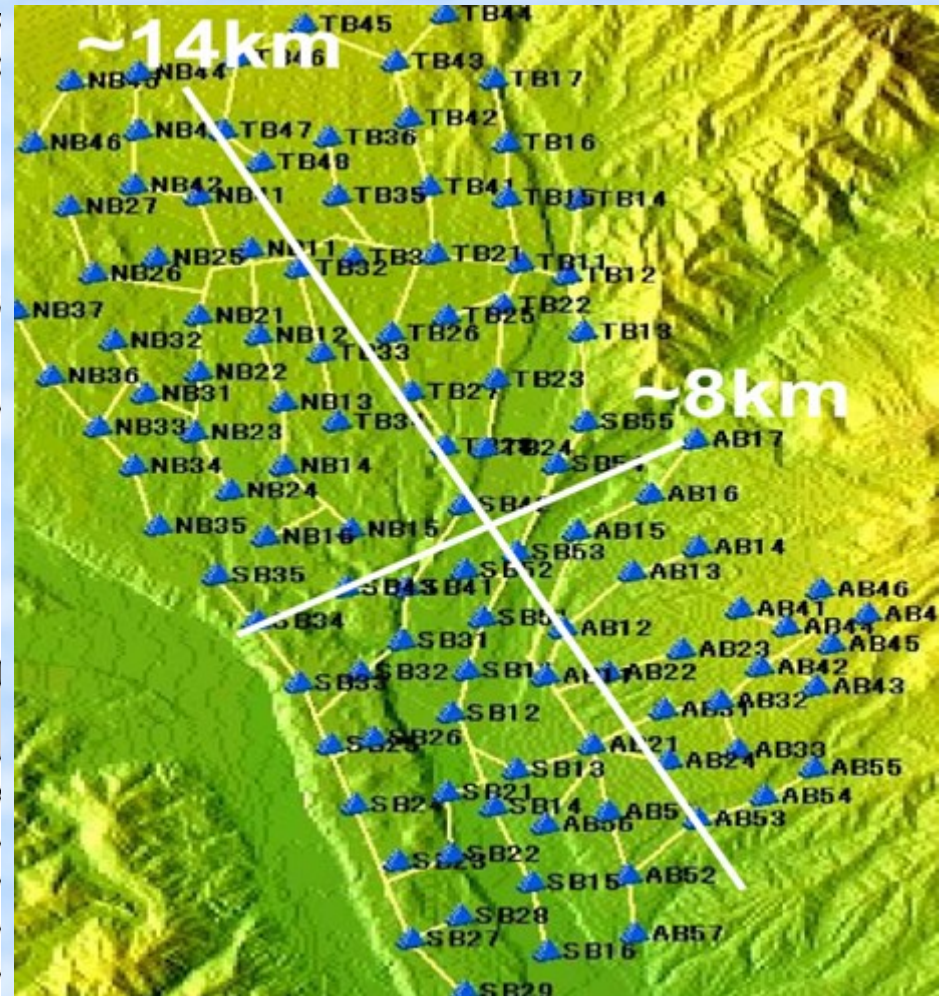
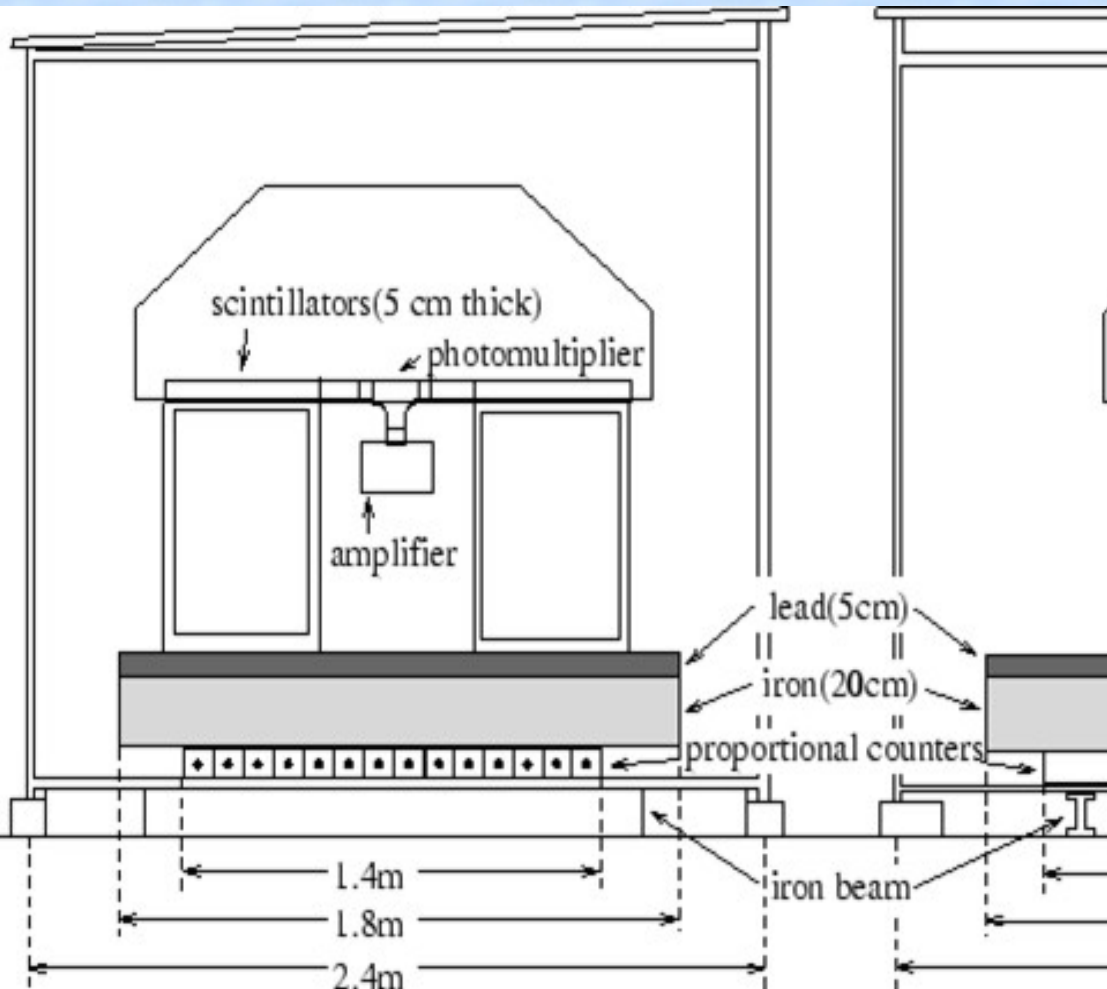


Ciascun contatore (a una distanza media di 13 m) contiene un rivelatore e misura la perdita di energia delle particelle che lo attraversa da cui si risale al numero di particelle incidenti. Ottimizzato per lo studio dei RC nella zona del ginocchio (quindi non necessita di essere troppo grande).

- La distanza media tra i contatori determina l'*energia minima* dello sciame rivelabile mentre il numero dei contatori, la *precisione* della misura
- L'area totale coperta, determina la *massima energia* misurabile.
- Dalle misure della densità di particelle in ciascuna casetta dell'array, si risale alla distribuzione laterale $D(r)$ dalla quale, a sua volta, 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 del ritardo temporale* nell'arrivo dello sciame su diverse casette (le particelle dello sciame sono perpendicolari al suo asse)

Esperimento: Agasa (Giappone)

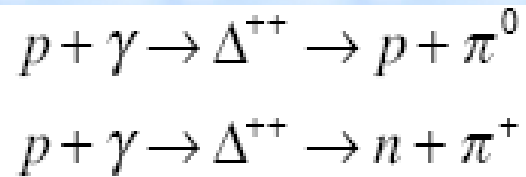
100 km², 111 rivelatori a scintillazione, 27 per muoni, separazione ~ 1 km – $5 \cdot 10^{16} \text{ m}^2 \text{-sr-s}$ per $E > 10^{19} \text{ eV}$, $\theta < 45^\circ$



GZK cut-off

Nelle slides precedenti abbiamo visto come questi esperimenti si occupano di RC con energie al di sopra dei 10^{19} eV.

Graisen, Zatsepin e Kuzmin hanno mostrato che, a simili energie, l'universo diventa opaco a causa degli urti tra protoni con fotoni della radiazione cosmica di fondo ($E_{\gamma\text{CMBR}} = 6 \cdot 10^{-4}$ eV) producendo pioni alla risonanza Δ^{++} .



Siano:

M , p e E rispettivamente massa, momento e energia del protone
 q e qc rispettivamente momento e energia del fotone di fondo cosmico.

L'energia nel centro di massa:

$$\begin{aligned} s &= E_{cms}^2 = (E + q)^2 - (p + q)^2 \\ &= M^2 + 2q(E - |p|\cos\theta) \end{aligned}$$

Dove θ è l'angolo tra le direzioni del protone e del fotone

Il valore di s trovato prima, deve essere maggiore o uguale al quadrato della somma delle masse protone pione:

$$M^2 + 2q(E - p\cos\theta) > M^2m_\pi^2 + 2Mm_\pi$$

Per trovare l'energia di soglia del protone, si considerino le seguenti approssimazioni:

$$E \approx p \text{ (protone relativistico)}$$

$$1 - \cos\theta = 2 \text{ (urto centrale)}$$

$$E_{th} = m_\pi \frac{M + m_\pi \sqrt{2}}{2q}$$

Fotoni CMB:

$$T = 2.74 \text{ K} \rightarrow qc = kT = 2.35 \cdot 10^{-4} \text{ eV}$$

$$E_{th} = 4.3 \cdot 10^{20} \text{ eV.}$$

Quindi protoni con energie al di sopra di E_{th} devono necessariamente provenire da altre galassie.

Il fatto che AGASA non mostra dati al di sopra di tale cut-off ci dice che tutti i RC sono prodotti all'interno della nostra galassia.

Esperimento: Auger (Argentina)

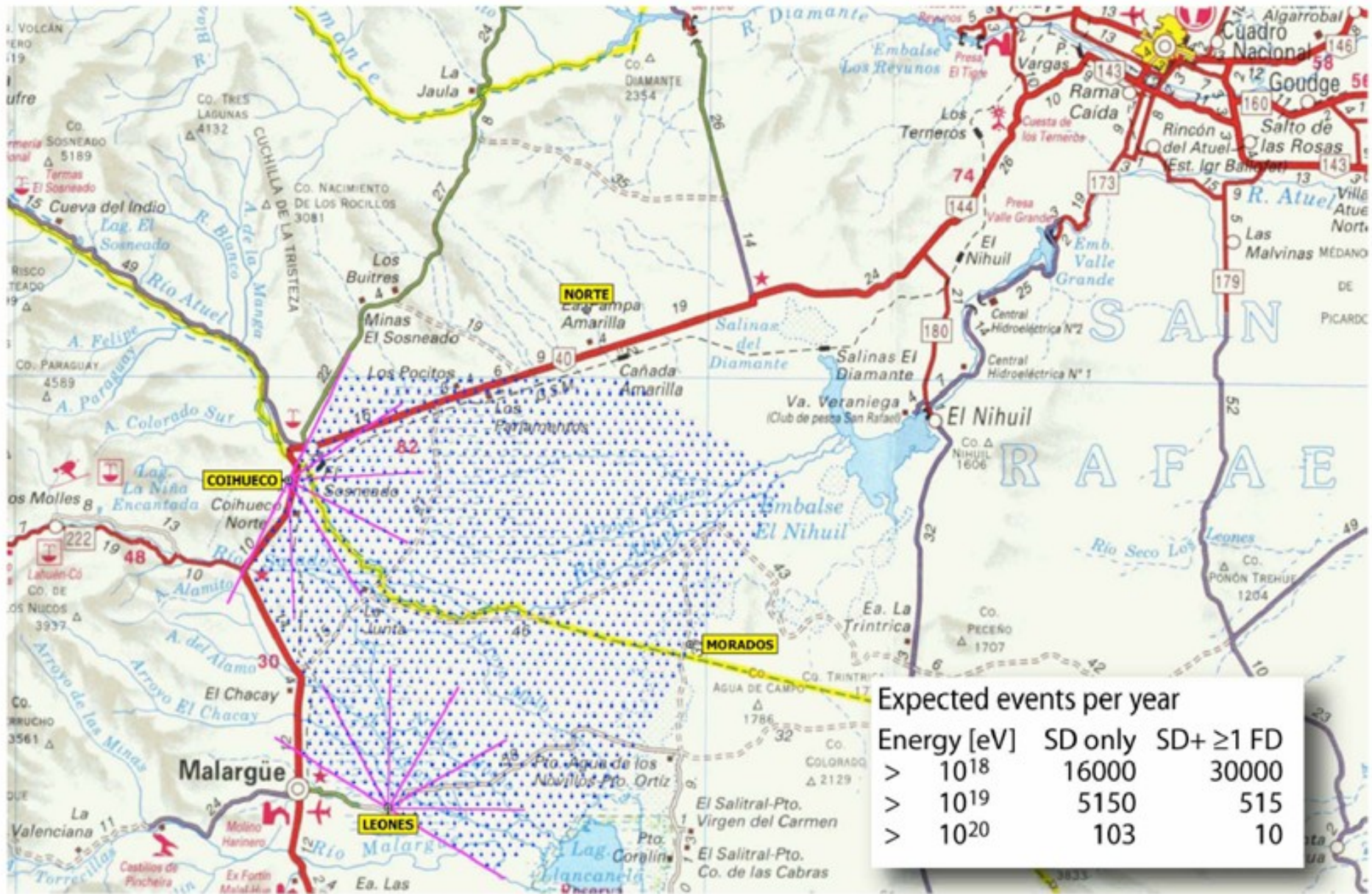
L'esperimento AUGER è stato costruito per lo studio dei RC di alta energia sopra il cut-off GZK e utilizza le tecniche sia di AGASA (EAS) sia di HiRes (Fluorescenza).

Consiste in due rivelatori simili disposti uno nell'emisfero Australe (Argentina) e uno in quello Boreale (Texas) distribuiti su un'area pari a 3000 km².

24 telescopi elettronici sistemati attorno questa superficie di array registrano la fluorescenza ultravioletta.

Il sistema ibrido ha il vantaggio di vedere simultaneamente il profilo dello sciame e la distribuzione laterale con una notevole sensibilità nel riconoscere la natura del primario.

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



Expected events per year

Energy [eV]	SD only	SD+ ≥ 1 FD
$> 10^{18}$	16000	30000
$> 10^{19}$	5150	515
$> 10^{20}$	103	10

L'esperimento consiste in 1600 taniche cilindriche piene d'acqua nella quale gli elettroni emettono luce Cherenkov

Il rivelatore di sciame misura la distribuzione laterale e temporale dello sciame

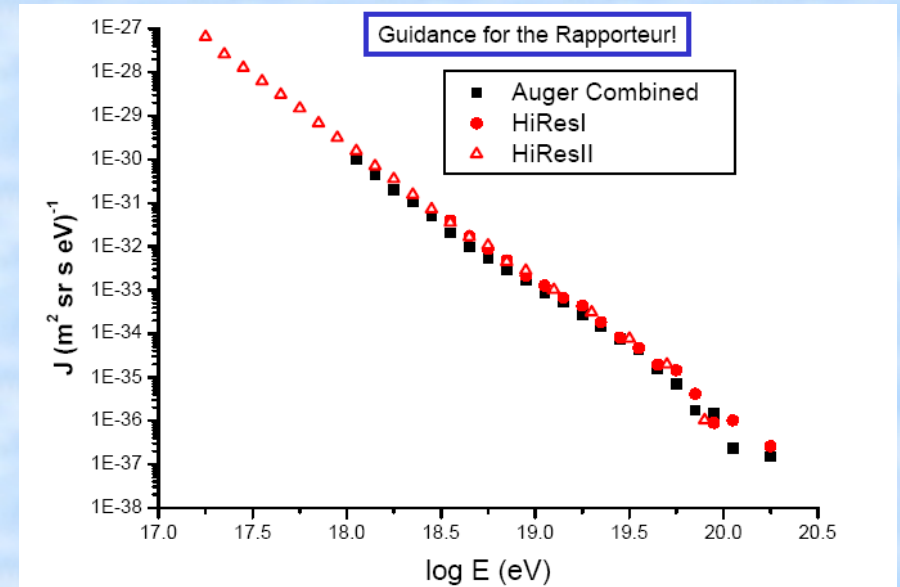
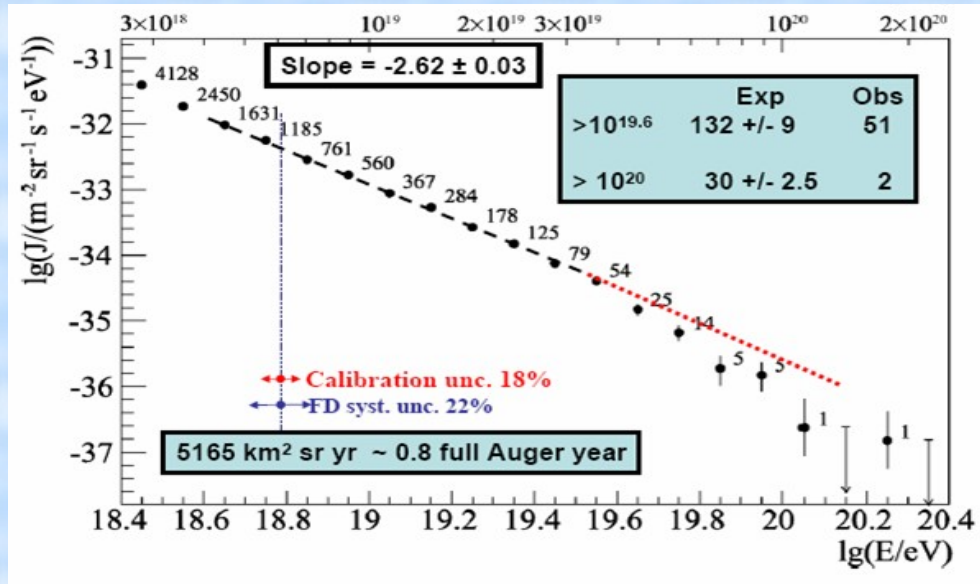
Distanza tra taniche: 1.5 km

Area di forma esagonale, di 60 x 60 km².

La fluorescenza, invece, è rivelata da 6 telescopi che determinano il profilo longitudinale dello sciame e l'altezza del suo massimo.



Risultati sperimentali



I primi dati di Auger sono in accordo con il cut-off GZK: la diminuzione del flusso di RC sopra $6 \times 10^{19} \text{ eV}$ è dovuta all'interazione dei p con la radiazione cosmica di fondo

La distribuzione di arrivo dei RC più energetici è in accordo con la distribuzione degli AGN sino a 100 Mpc (correlazione non osservata da HiRes).

Misure in profondità

Per studiare la radiazione cosmica penetrante di alta energia occorre operare sotto grandi spessori di roccia. In genere, le tecniche utilizzate sono le stesse di quelle in uso per gli esperimenti al suolo ma la profondità sotto roccia definisce l'intervallo di energia a cui un esperimento è sensibile: maggiore è la profondità e maggiore è la soglia energetica delle varie componenti.

Alcuni problemi degli esperimenti sotto roccia possono essere superati con misurazioni sotto grandi profondità di acqua (liquida o ghiacciata)

Neutrini

Rispetto alle altre particelle, il neutrino ha una sezione d'urto molto piccola pertanto ha una probabilità d'interazione molto più bassa quindi possono provenire da una moltitudine di sorgenti.

Vantaggi:

- Maggiore possibilità di determinare origini
(viaggiano in linea retta)
- Non risentono del cut-off GZK

$$\sigma_{\nu} = 0.62 \cdot 10^{-38} E_{\nu} \left(\frac{cm^2}{GeV} \right)$$

$$\sigma_{\bar{\nu}} = 0.30 \cdot 10^{-38} E_{\bar{\nu}} \left(\frac{cm^2}{GeV} \right)$$

Svantaggi:

- Richiedono apparati di misurazione più sofisticati

Neutrino:

Atmosferico

Componente più abbondante dei RC sulla Terra

$$\Phi(E=1 \text{ GeV}) \approx 1 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

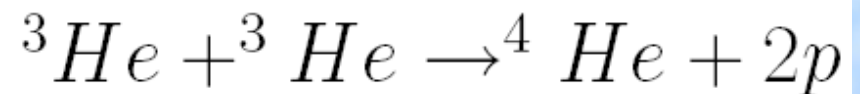
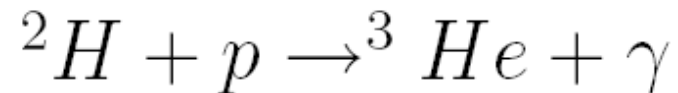
Vengono da decadimenti di π , K , μ

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu}(\bar{\nu}_{\mu})$$

$$\mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \nu_e(\bar{\nu}_e) + \bar{\nu}_{\mu}(\nu_{\mu})$$

Solare

Provengono da reazioni protone-protone e danno inizio alla catena di reazioni pp:

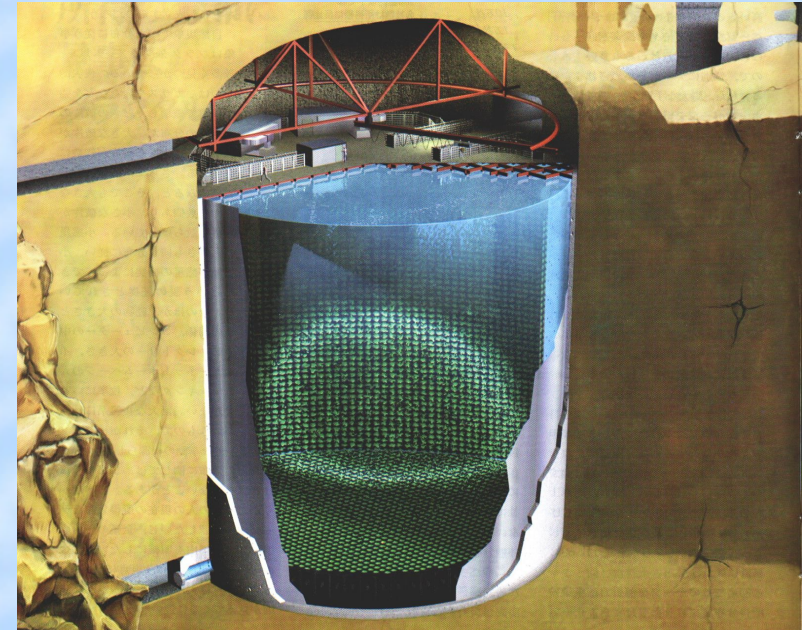


SuperKamiokande (Giappone)

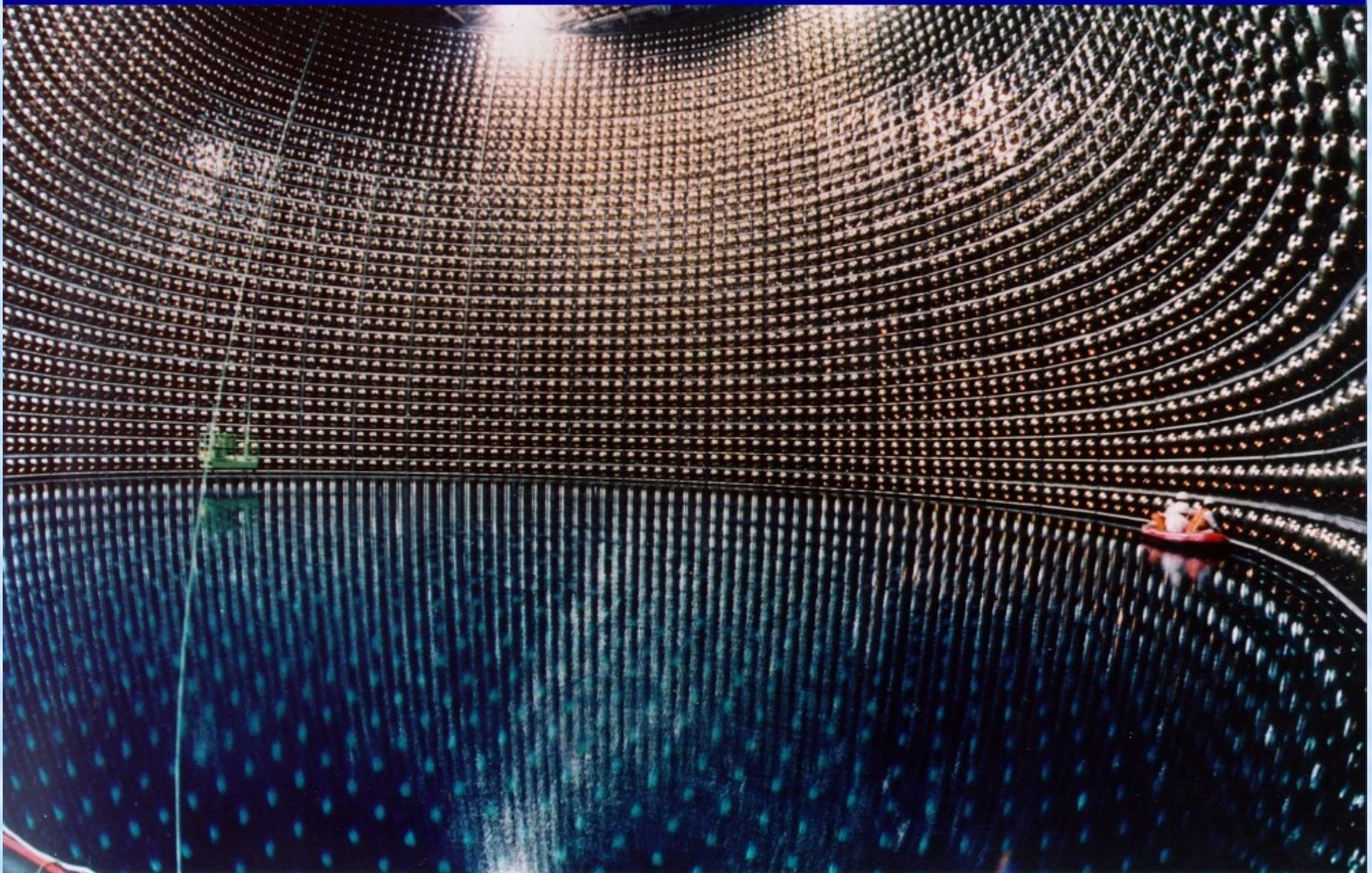
Rivelatore Cherenkov costituito da una grande cisterna cilindrica con:
50.000 t di acqua purificata
1000 m di profondità
13000 fotomoltiplicatori (PMT)

Scopo: misurazione del flusso dei neutrini solari con energia > 5 MeV tramite gli eventi di reazione.

Interessante è il numero di eventi da neutrino non di origine atmosferica, in particolare con l'evento ravvicinato dell'esplosione della supernova SN1987A nella Grande nube di Magellano.



SuperKamiokande (foto)

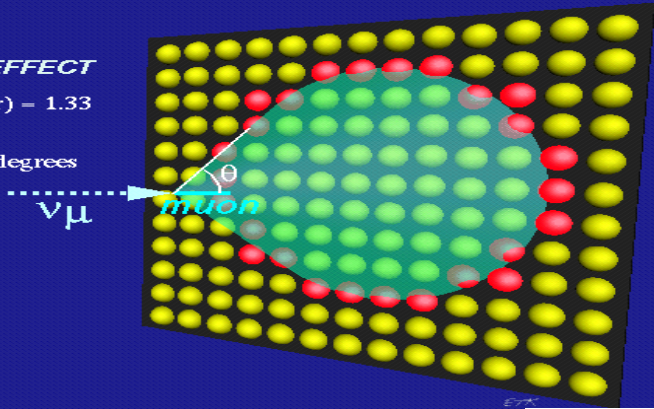


CHERENKOV EFFECT

$\beta = v/c$ $n(\text{water}) = 1.33$

$\cos \theta = 1/\beta n$

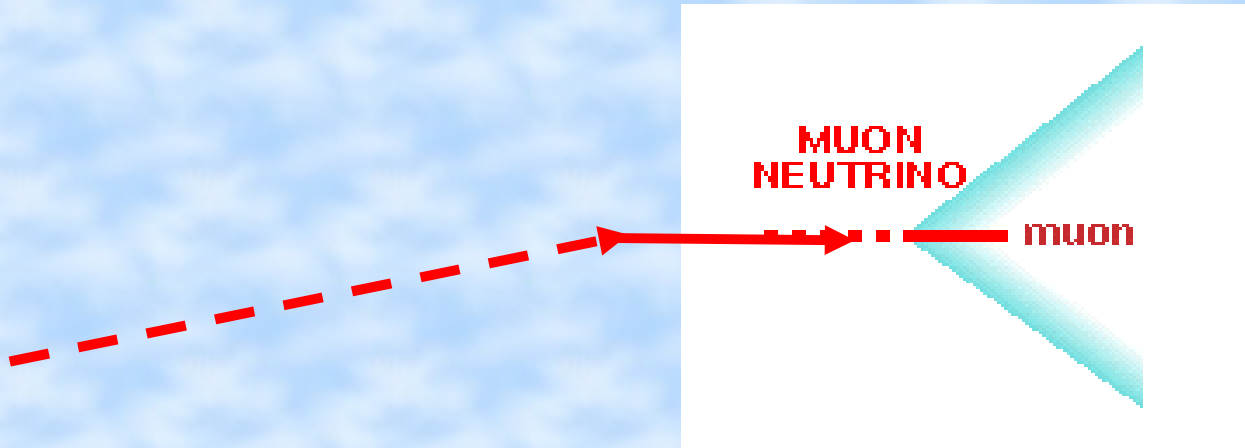
$\beta = 1$ $\theta = 42 \text{ degrees}$



Determinare il neutrino dalla luce Cerenkov

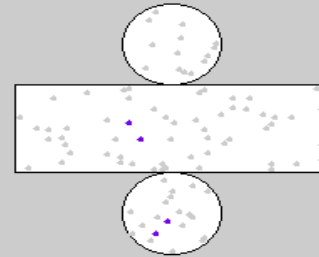
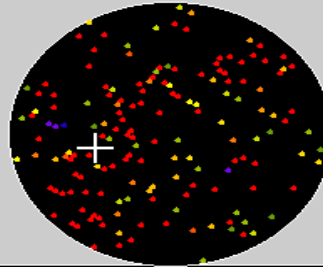
Particle ID in a Cerenkov Detector:

	From side	Ring	
short track, no multiple scattering			Sharp Ring
electrons: short track, mult. scat., brems.			Fuzzy Ring
muons: long track, slows down			Sharp Outer Ring with Fuzzy Inner Region
neutral pions: 2 electron-like tracks			Two Fuzzy Rings

ν_{μ} 

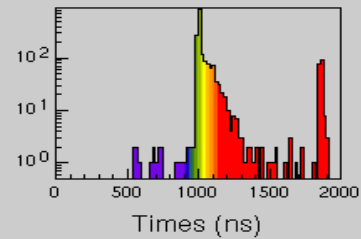
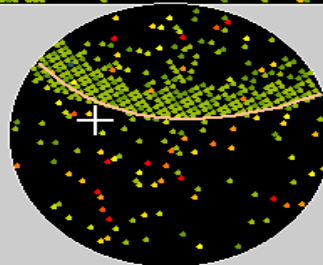
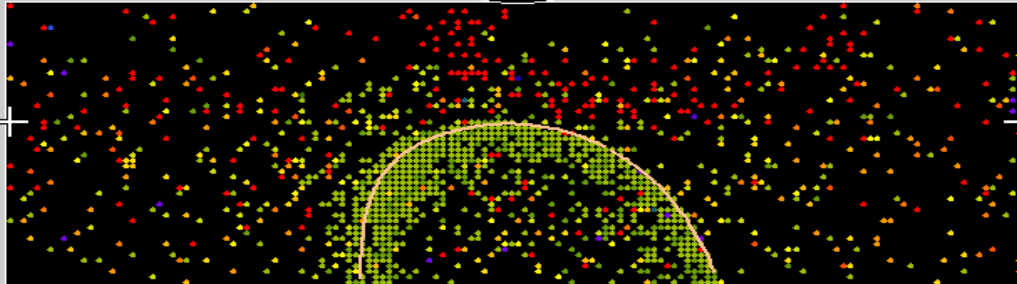
Super-Kamiokande

Run 4234 Event 367257
97-06-16:23:32:58
Inner: 1904 hits, 5179 pE
Outer: 5 hits, 6 pE (in-time)
Trigger ID: 0x07
D wall: 885.0 cm
FC mu-like, $p = 766.0$ MeV/c

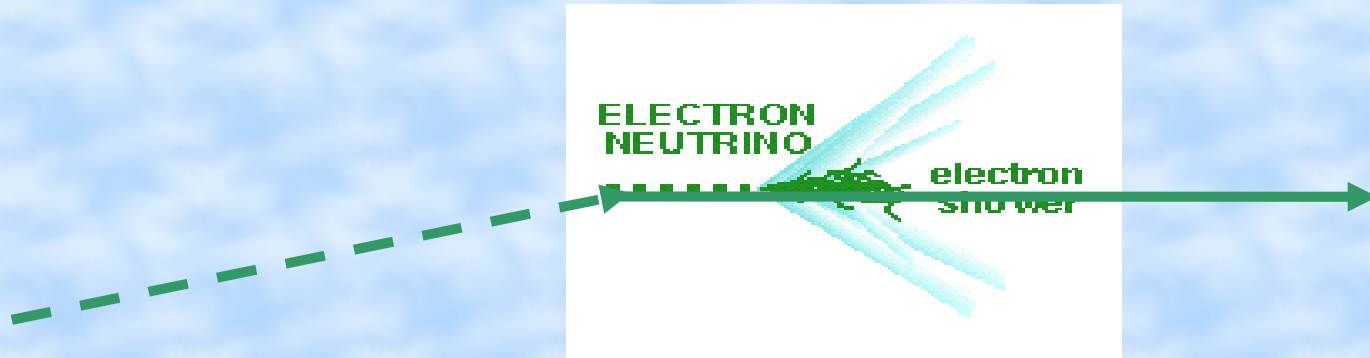


Resid(ns)

- > 137
- 120- 137
- 102- 120
- 85- 102
- 68- 85
- 51- 68
- 34- 51
- 17- 34
- 0- 17
- -17- 0
- -34- -17
- -51- -34
- -68- -51
- -85- -68
- -102- -85
- <-102

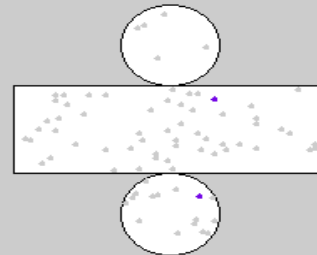
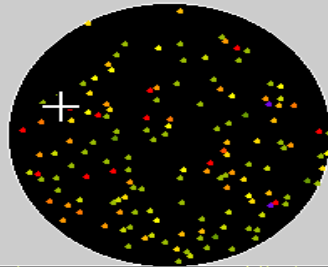


ν_e



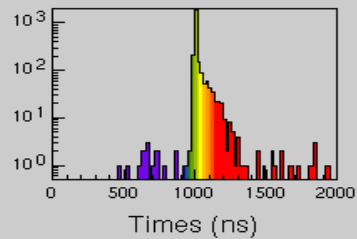
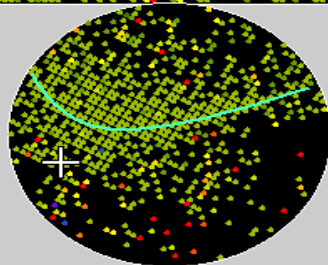
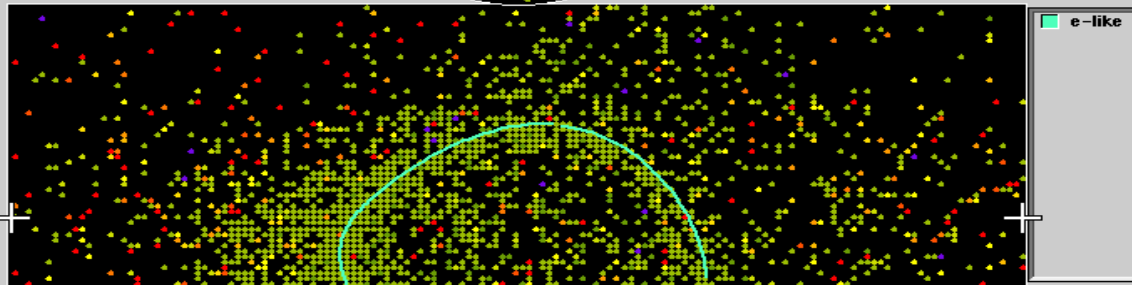
Super-Kamiokande

Run 4268 Event 7899421
97-06-23:03:15:57
Inner: 2652 hits, 5741 pE
outer: 3 hits, 2 pE (in-time)
Trigger ID: 0x07
D wall: 506.0 cm
FC e-like, p = 621.9 MeV/c



Resid(ns)

- > 137
- 120- 137
- 102- 120
- 85- 102
- 68- 85
- 51- 68
- 34- 51
- 17- 34
- 0- 17
- -17- 0
- -34- -17
- -51- -34
- -68- -51
- -85- -68
- -102- -85
- <-102

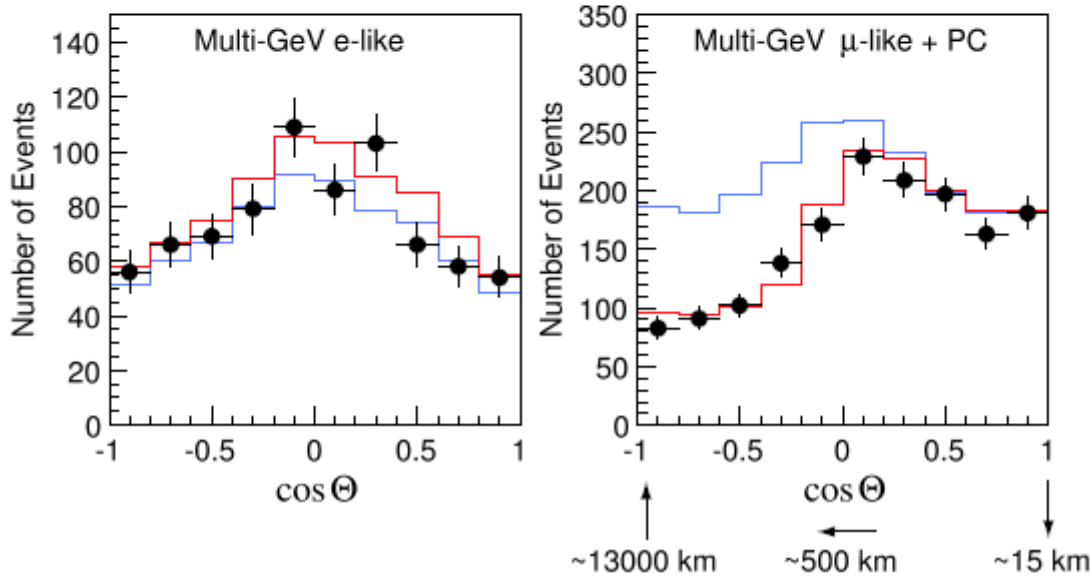
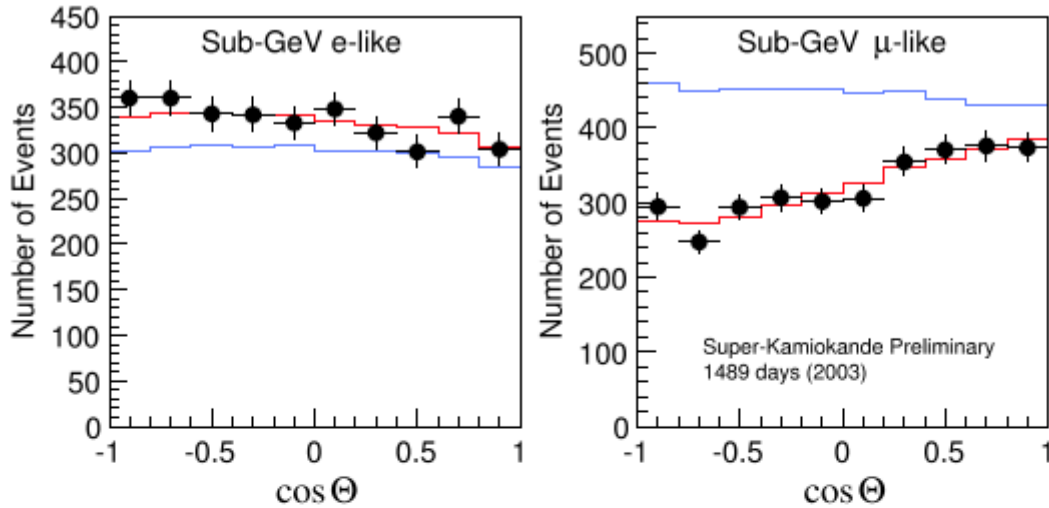


LOONEY TUNES



"That's all Folks!"

Risultati



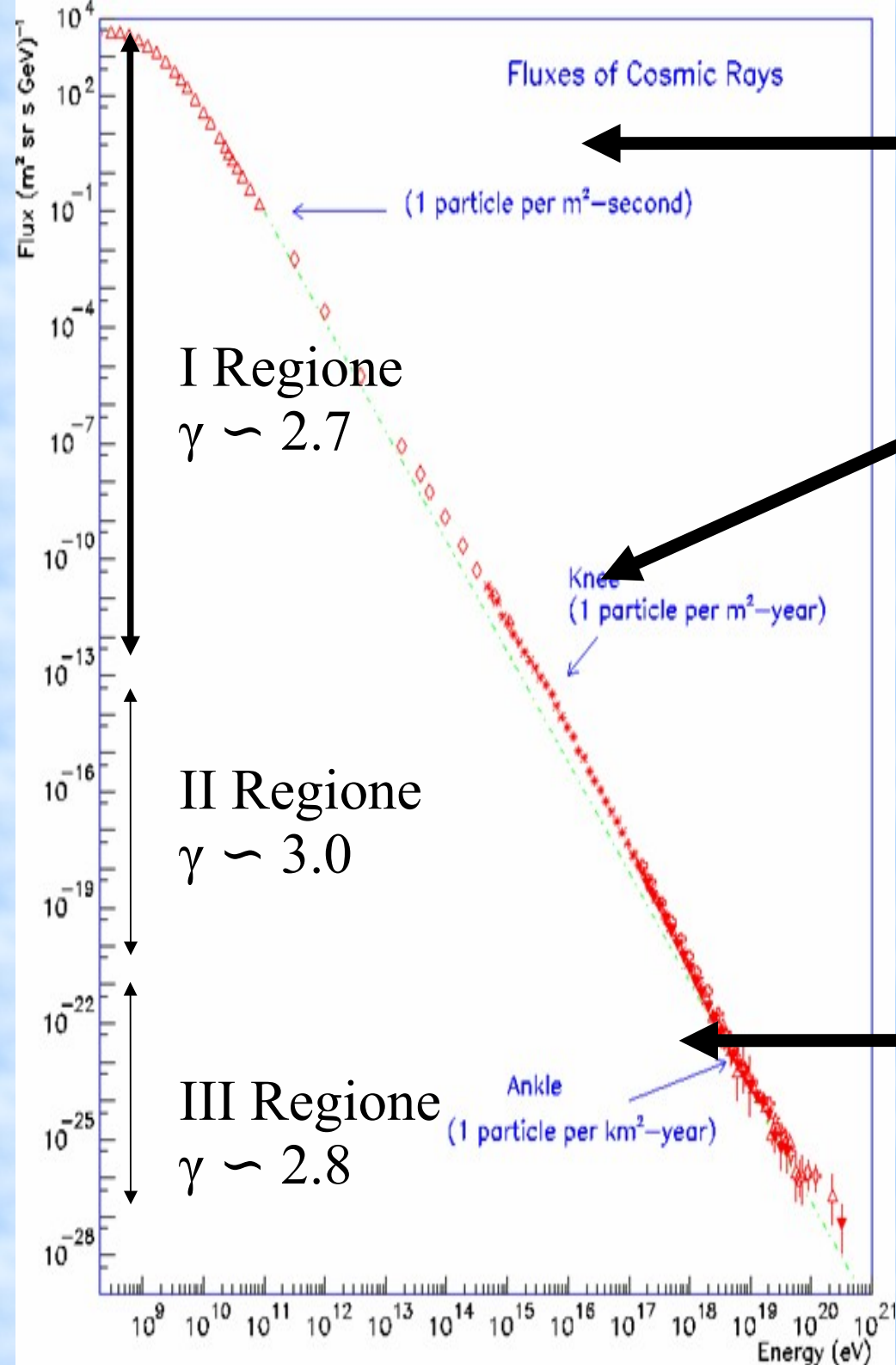
ν_e : quasi in accordo con
aspettative teoriche (MC)

ν_μ : piuttosto discorde dai
valori aspettati (MC)

Distribuzione all'angolo Zenit per
eventi di neutrini e e μ contenuti
nell'atmosfera misurati con SK. Le
linee mostrano il miglior fit con
(rosso) e senza (blu) oscillazioni. Il
miglior fit è

$$\Delta m^2 = 2.0 \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \text{ e}$$

$$\sin^2 2\theta = 1.00.$$



Sono dominanti i contributi dal Sole

La maggiore pendenza è imputabile alla maggiore possibilità dei primari di alta energia di sfuggire ai deboli campi magnetici galattici.

Si può calcolare il flusso, integrando a partire da 1 GeV per eliminare il contributo solare:

$$\Phi(E > 1 \text{ GeV}) = \int \Phi(E) dE = (k/\gamma - 1) E^{-\gamma+1}$$

Piccolo flesso probabilmente connesso alle perdite dei UHECR per produzione di coppie e^+e^- ($\sim 10^{19}$ eV) e ad un contributo di CR extragalattici a $E > 10^{19}$ eV.