

Ακτίνες Υπερυψηλών Ενεργειών.

UHECR

- Πυρήνες υψηλής ενέργειας
- Πιθανοί μηχανισμοί
- Το όριο GZK
- Ακτίνες γ
- Νετρίνα PeV

Πειράματα.

Αναφέρουμε μόνο τα πιο σημαντικά πειράματα.

Volacano Ranch: (New Mexico) ένα από τα πρώτα πειράματα με 33 ανιχνευτές σε μέση απόσταση 880 m. Συνολική κάλυψη 8 km^2 . Συνεισέφερε στη μελέτη του σχήματος και τον υπολογισμό της ενέργειας των καταιονισμών. Μέτρησε το πρώτο σωματίδιο με ενέργεια 10^{20} eV

Haverah Park : Οι ανιχνευτές του αποτελούνταν από ντεπόζιτα γεμάτα νερό και ο PMT μετρούσε το φώς Cerenkov που παράγονταν στο ντεπόζιτο. Εκτός από τα μίονια μετρούσε την ολική ενέργεια που αποτίθετο στον ανιχνευτή.

Yakutsk (Σιβηρία). Αποτελούνταν από σπινθηριστές και μετρητές μιονίων με συνολική επιφάνεια 10 km^2 . Εκτός από τους σπινθηριστές χρησιμοποιεί και PMT για να ανιχνεύει το φως Cerenkov που παράγεται και να υπολογίζει το μέγεθος του καταιονισμού.

AGASA: (Ιαπωνία). Ήταν ο μεγαλύτερος σε επιφάνεια ανιχνευτής κάλυπτε 100 km^2 . Αποτελούνταν από 111 ανιχνευτές εκ των οποίων 27 ανιχνευτές μιονίων. Είχε πολύ καλή γωνιακή διακριτικότητα 3° στα 10^{19} και 1.5° στα 10^{20} EeV .

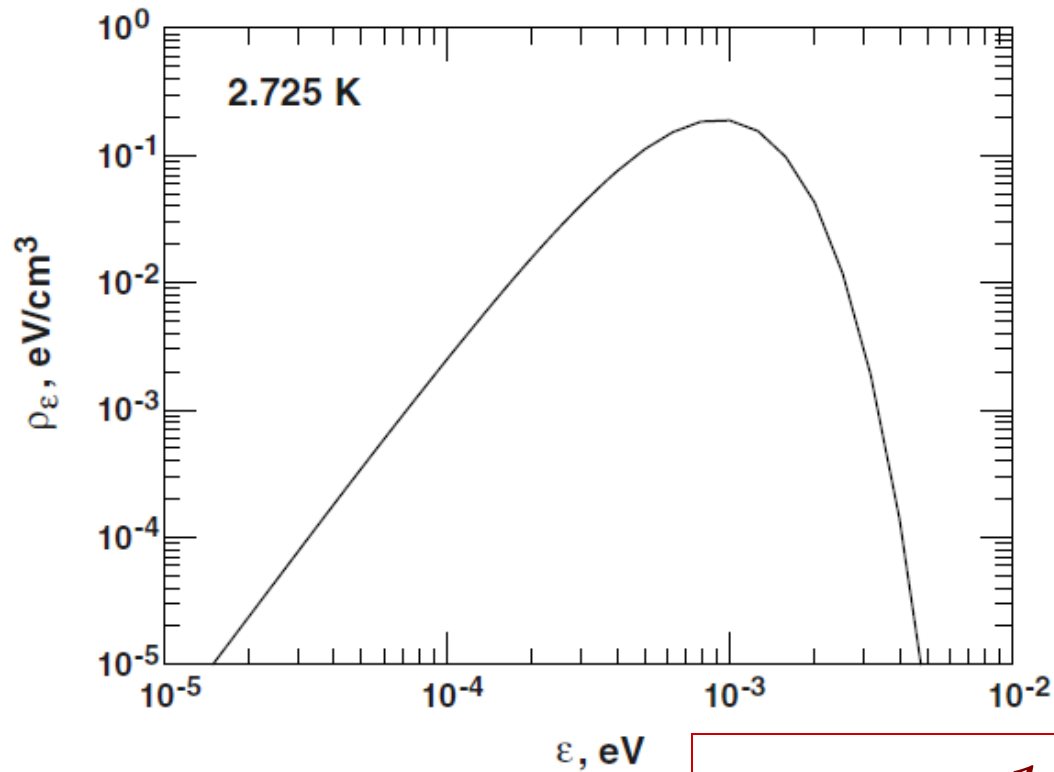
Fly's Eye. (Utah) μετρούσε τη φωταύγεια που προκαλεί ο ιονισμός του αέρα όταν σχηματίζεται καταιονισμός. Αποτελούνταν από 67 κάτοπτρα με 14 PMT το καθένα. Στη συνέχεια εγκαταστάθηκε και δεύτερος ανιχνευτής σε απόσταση $3,3 \text{ km}^2$ που επιβλέπει τον ίδιο όγκο στην ατμόσφαιρα ώστε με την στεροσκοπική εικόνα προσδιορίζει το ύψος και τις διαστάσεις του κατ. Μέτρησε το σωματίδιο με την υψηλότερη ενέργεια $3 \cdot 10^{20} \text{ eV}$.

Πειράματα.

HiRes 1 & 2: Το πείραμα αποτελεί συνέχεια του Fly's Eye, βρίσκεται στην ίδια περιοχή και αποτελείται από 22 κάτοπτρα. Κάθε κάτοπτρο έχει επιφάνεια $3,7 \text{ m}^2$ και εφοδιάζεται από 256 PMT. Η διακριτική ικανότητα του είναι 1° . Το 2 αποτελείται από 42 κάτοπτρα και οι δύο διατάξεις καλύπτουν 360° στον ορίζοντα.

Auger: Είναι ο μεγαλύτερος ανιχνευτής, επιφάνειας 3000 km^2 . Αποτελείται από 1600 ανιχνευτές Cerenkov. Επίσης περιφεριακά καλύπτεται από 4 σταθμούς φωταύγειας με κάτοπτρα 11 m^2 και 440 PMT. Μπορεί και συλλέγει γεγονότα από μικρές ενέργειες. Σε πολλά γεγονότα έχει όψεις σε δύο ή τρεις σταθμούς φωταύγειας.

Κοσμικό Μικροκυματικό Υπόβαθρο CMB



$$T = 2.3 \text{ K}$$

$$n = 411 \text{ cm}^{-3}$$

$$\rho_E = 0.26 \text{ eV cm}^{-3}$$

$$E_{\text{av}} = 6.34 \times 10^{-4} \text{ eV}$$

$$\rho_E(\square) = \frac{1.32 \times 10^{13} \square}{\exp(\square / kT) - 1}$$

Παραγωγή πιονίου.

$$p + \gamma \rightarrow \pi^0 + \dots$$

CM

$$\sqrt{s} = m_p + m_{\pi^0}$$

Lab

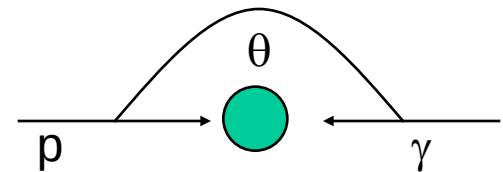
$$s = m_p^2 + 2E_\gamma(1 - \beta_p \cos \theta)$$

Για :

$$\cos \theta = -1, \quad \Delta = 6.34 \times 10^{-4} \text{ eV}$$

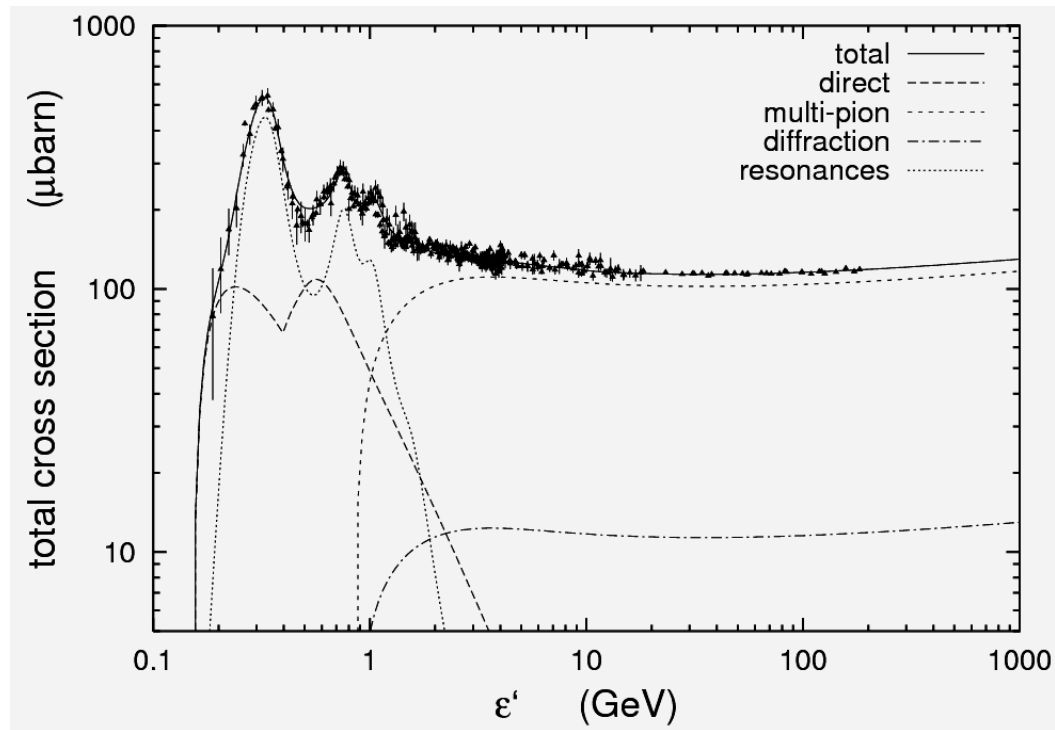
$$\Rightarrow E_p = \frac{m_{\pi^0}^2}{4\Delta} (2m_p + m_{\pi^0}) \approx 10^{20} \text{ eV}$$

Για μετωπική κρούση,
ενέργεια κατωφλίου.



Φωτοπαραγωγή. (photoproduction)

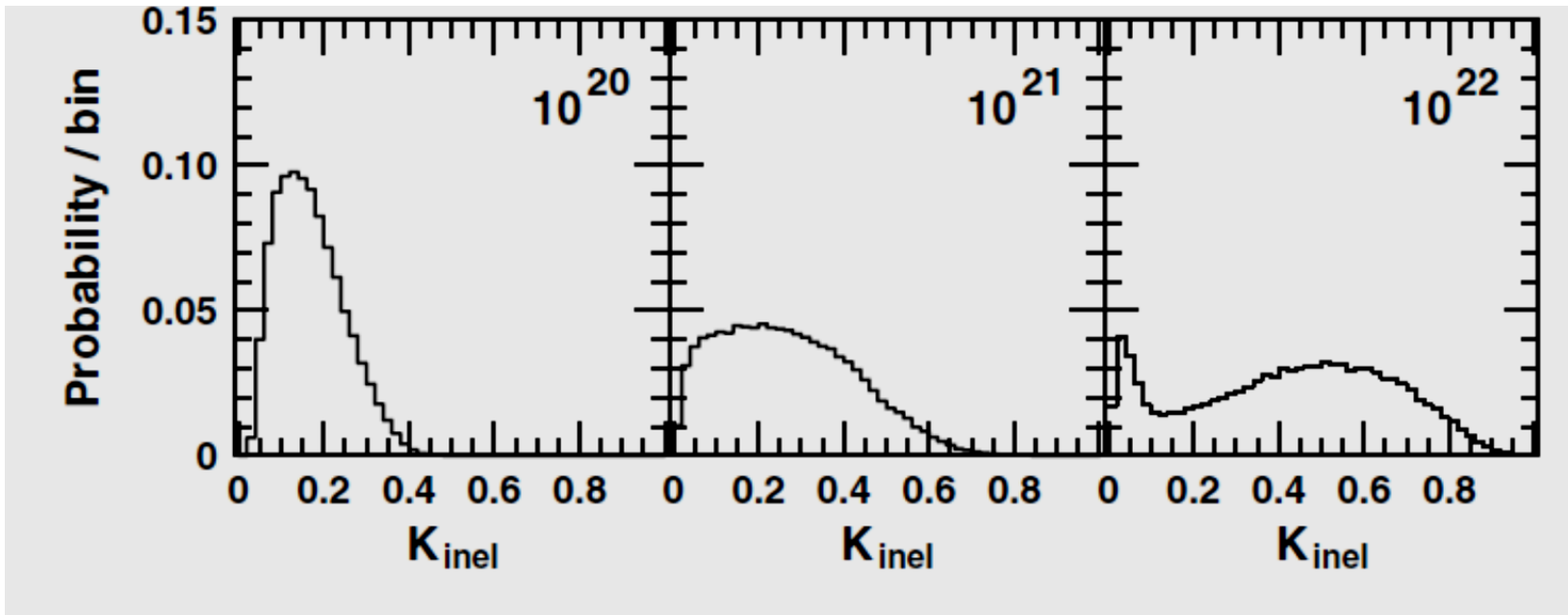
$$\gamma + p \rightarrow p + \pi^0$$



$\Delta^+ (1232)$

$\sigma = 0.5 \text{ mb}$

Ανελαστικότητα

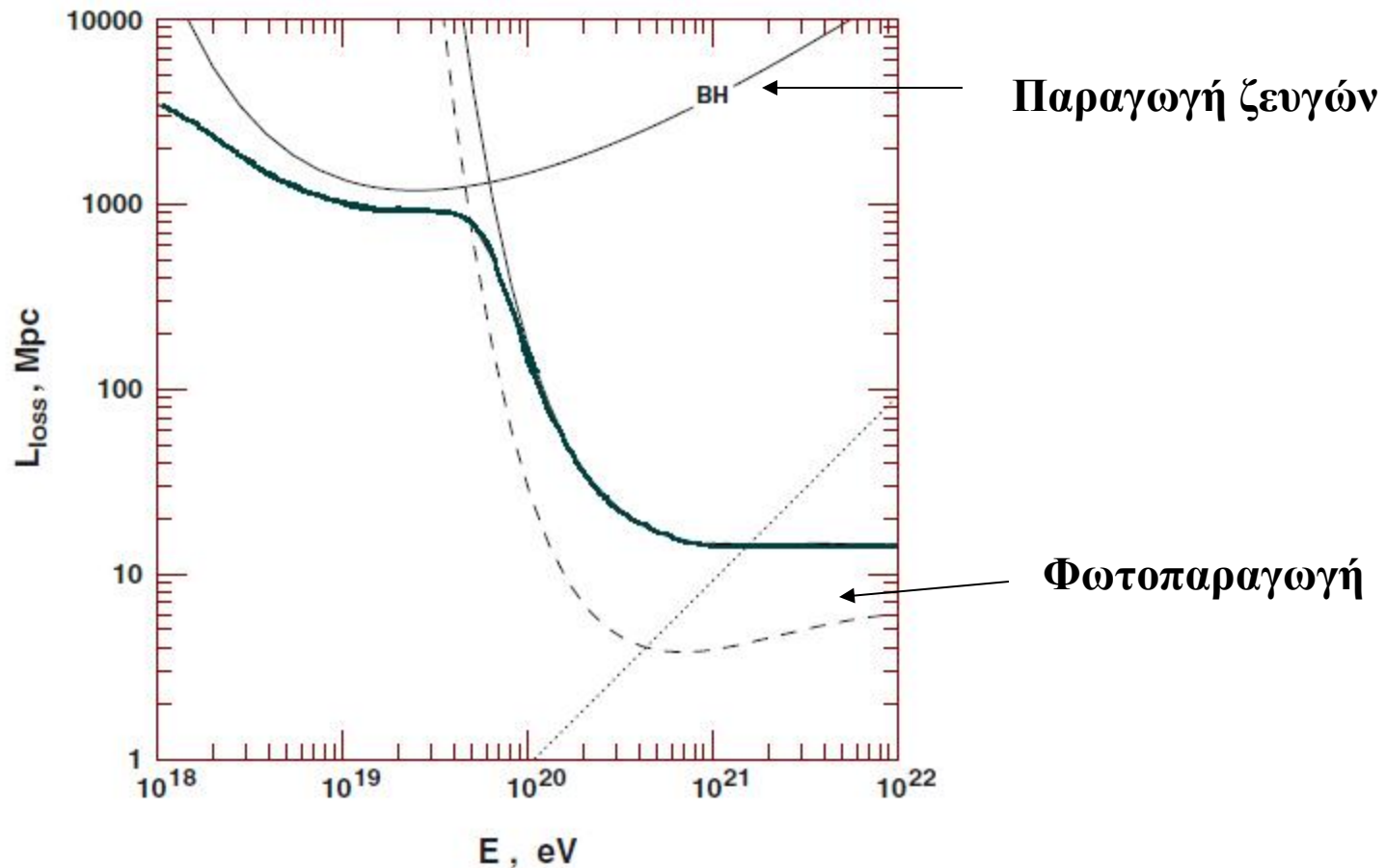


Συντελεστής ανελαστικότητας K_{inel} , για πρωτόνια σε CMB. Η μέση τιμή στα 10^{20} είναι 0.17 στα 10^{21} 0.27 και στα 10^{22} 0.5 και παραμένει σταθερή για υψηλότερες ενέργειες.

Άλλες απώλειες

- Παραγωγή $e^+ e^-$ στο πεδίο του πρωτονίου.
- Για μετωπικές $E_{\text{thr}} = 4 \times 10^{17} \text{ eV}$
- Βαρείς πυρήνες
- Φωτοδιάσπαση. Συντονισμός του πυρήνα, ελευθερώνονται ένα ή δύο νουκλεόνια.
- Συμβαίνει για φωτόνια με ενέργεια από 10-30 MeV στο σύστημα του πυρήνα.
- Αδιαβατική απώλεια λόγω διαστολής το σύμπαντος.

Απώλεια ενέργειας πρωτονίων



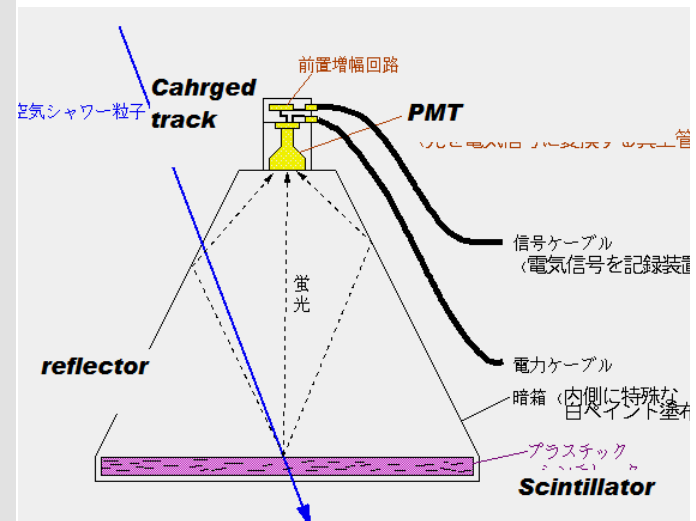
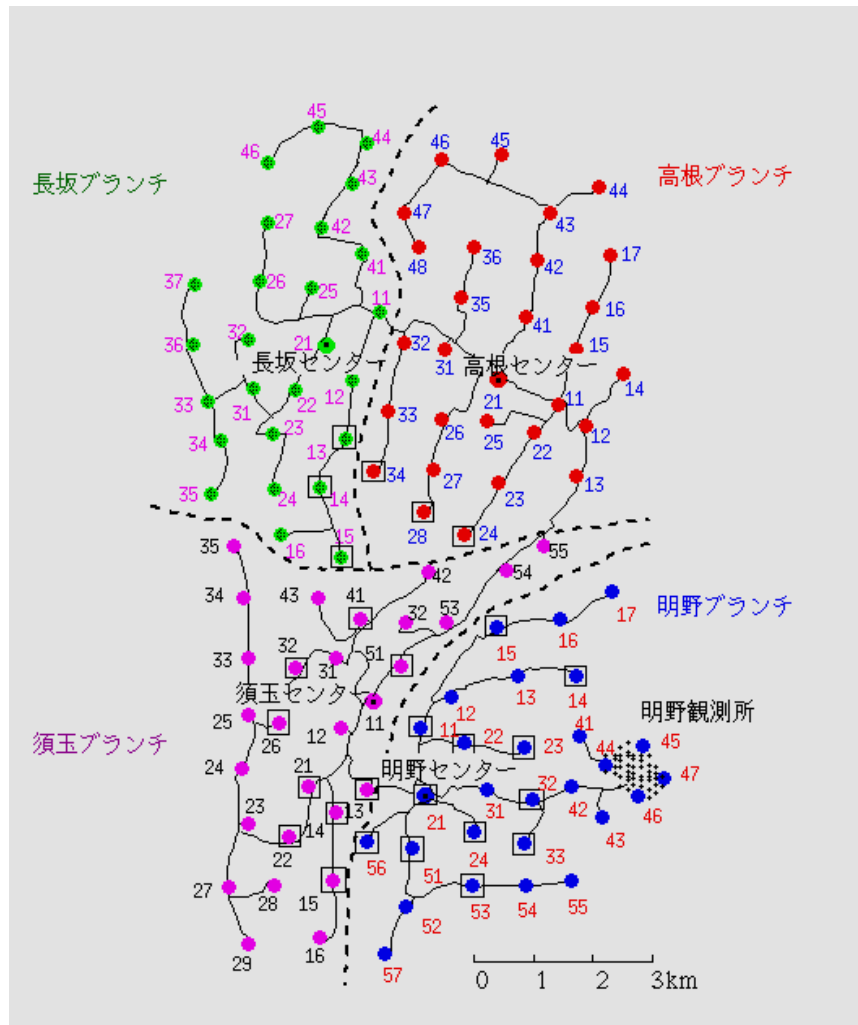
Απώλεια ενέργειας εκφρασμένη σε μήκος απώλειας. Όσο μικρότερο το μήκος τόσο μεγαλύτερη η απώλεια. Μονάδες Mpc.

Συμπέρασμα.

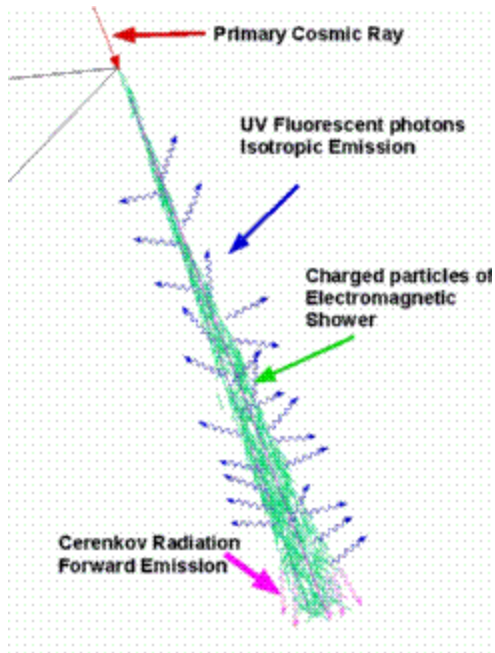
1. Η απώλεια ενέργειας εξαρτάται από την αρχική ενέργεια και την απόσταση της πηγής.
2. Τα σωματίδια με ενέργεια πάνω από 10^{20} έχουν μεγαλύτερες απώλειες λόγω φωτοπαραγωγής. Τα δευτερογενώς παραγόμενα συνεχίζουν με μικρότερες απώλειες.
3. Τελικά σωματίδια που έχουν παραχθεί με ενέργεια 10^{21} eV φθάνουν με μειωμένη ενέργεια. Αν η απόσταση της πηγής είναι μικρότερη από 100 Mpc τότε ένα μικρό ποσοστό θα φθάσει με ενέργειας πάνω από 10^{20} eV
4. Για μεγαλύτερες αποστάσεις φθάνουν με ενέργειες 10^{18} - 10^{19} eV .
5. Η διαδικασία αυτή ερμηνεύει το σχήμα του φάσματος!

Διατάξεις μέτρησης UHECR

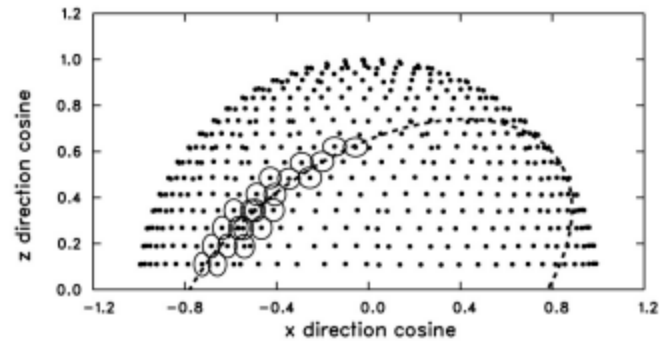
AGASA



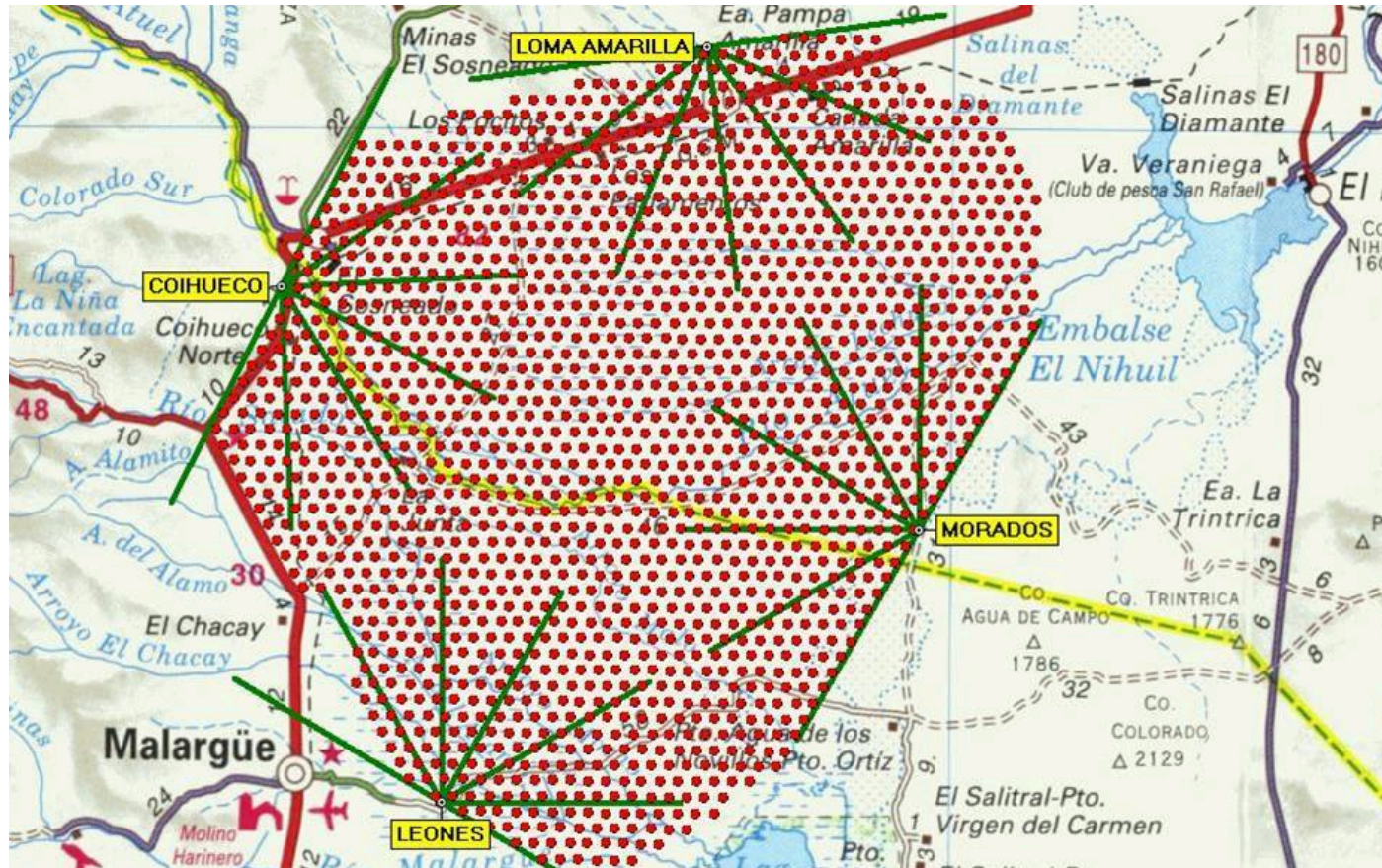
Πείραμα HiRes



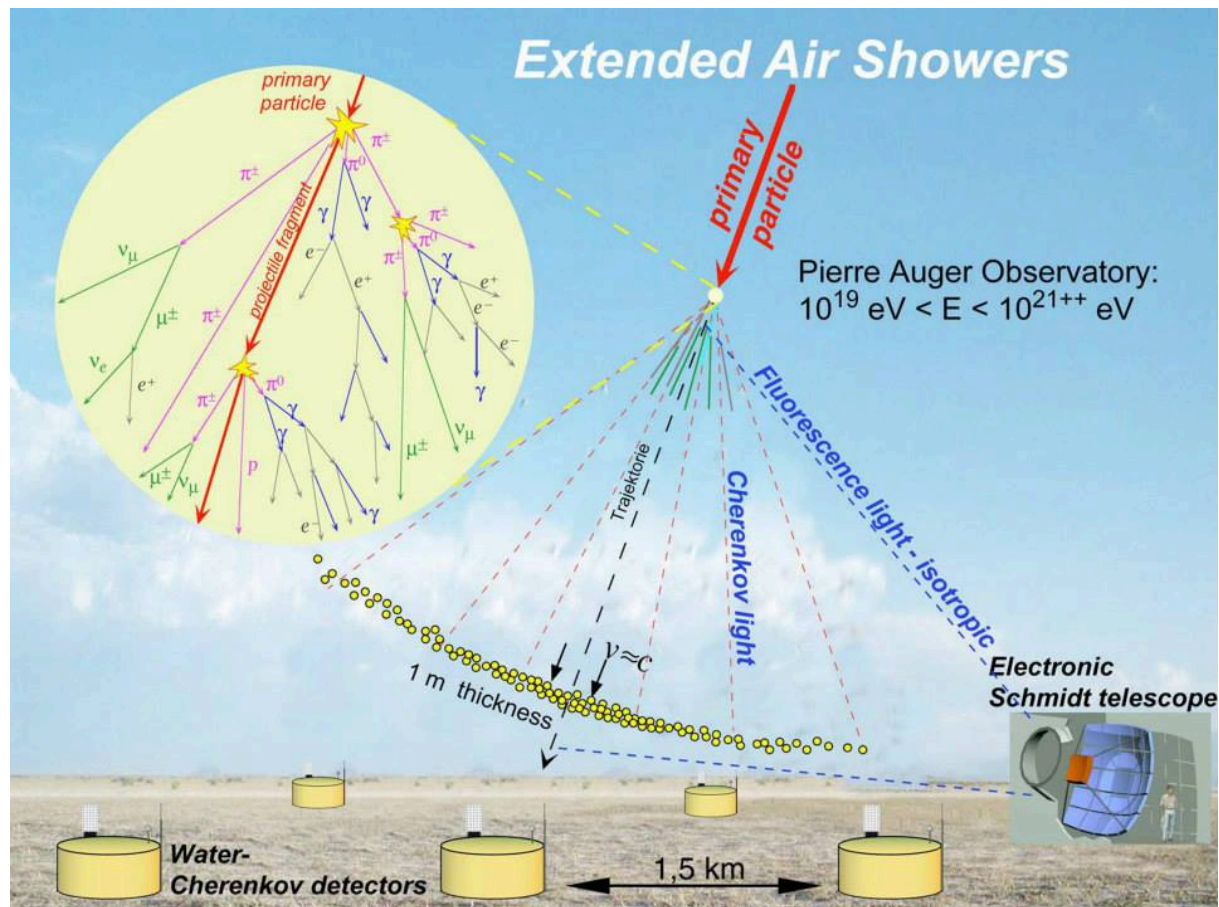
- Φωταύγεια από καταιονισμό.
- Πείραμα HiRes.
- Ανακατασκευή στον ανιχνευτή.



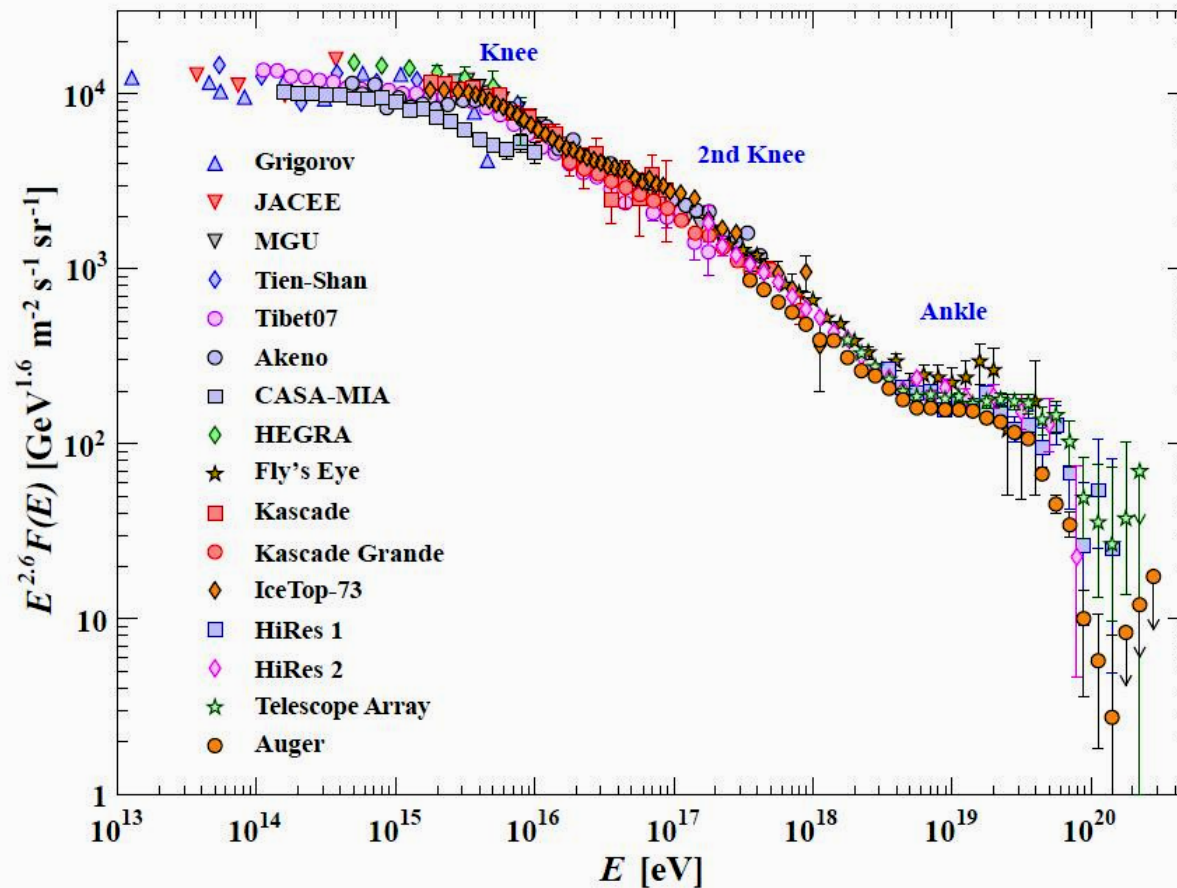
Πείραμα Auger



Πείραμα Auger

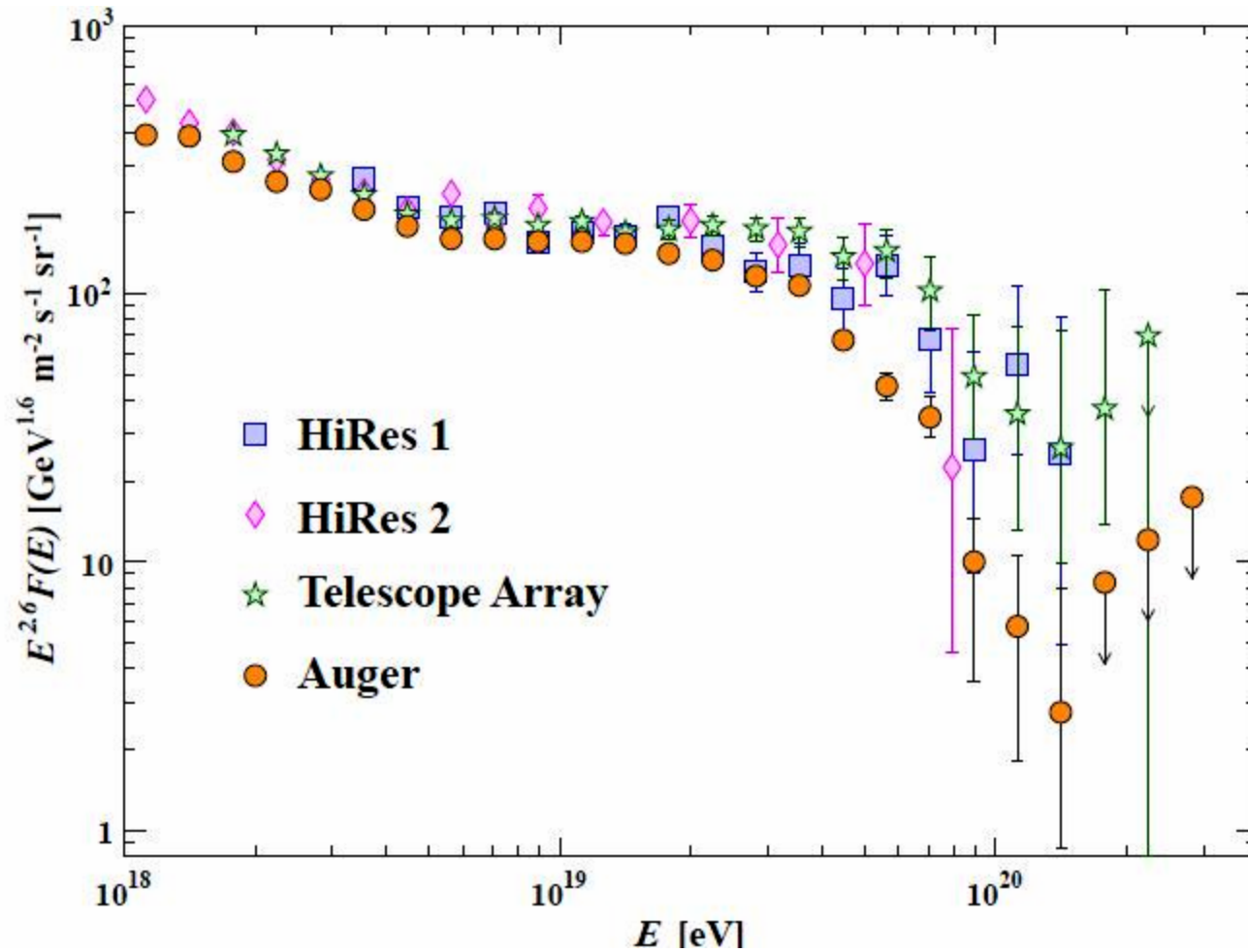


Καταιονισμοί μεγάλης ενέργειας



Τα σωματίδια έχουν μετρηθεί από διατάξεις ανιχνευτών. Δεν γίνεται διάκριση του είδους των πυρήνων. (PDG 2014) Με την αύξηση της στατιστικής εμφανίστηκε δεύτερο «γόνατο».

Γεγονότα μέγιστης ενέργειας



Το τέλος του φάσματος

- Ο αριθμός των γεγονότων έχει πολλαπλασιαστεί με $E^{2,6}$ για να φανούν οι μεταβολές της κλίσης.
- Στην αρχή φαίνεται η κλίση με εκθέτη $-2,7$ ενώ μετά το «γόνατο» η κλίση αυξάνεται με εκθέτη $-3,5$.
- Για την περιοχή από $10^{18,5}$ ως 10^{20} eV «ταρσός», ο εκθέτης επανέρχεται στο $-2,7$ ενώ στη συνέχεια πέφτει στο $-4,5$.
- Τα γεγονότα πάνω από 10^{20} eV είναι πολύ λίγα και έχουν ληφθεί από τα πειράματα AGASA , Hires και Auger. Στο πιο πρόσφατο διάγραμμα έχει προστεθεί και το Telescope Array.

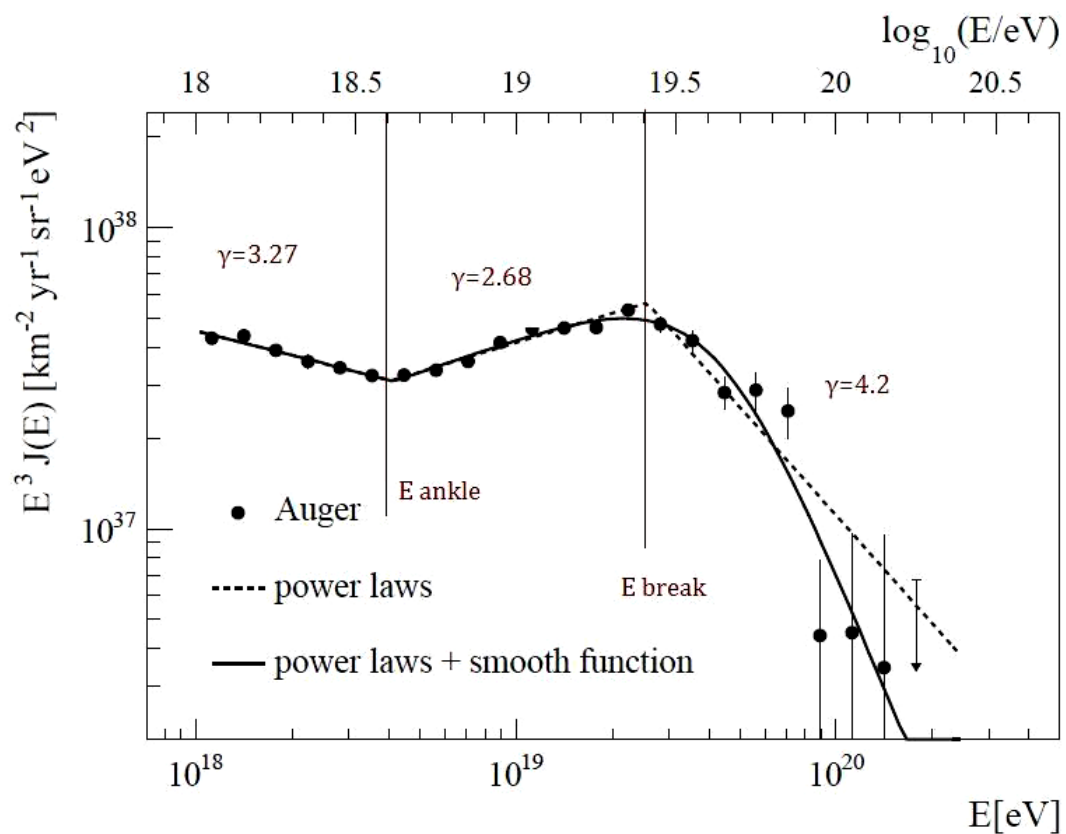
Πειραματικές διαφορές

- Ο προσδιορισμός της ενέργειας είναι δύσκολος και η κανονικοποίηση διαφέρει στα πειράματα.
- Το πείραμα AGASA έδινε τις υψηλότερες τιμές. Μετά από υπολογισμό με νέες μεθόδους η ενέργεια κατέβηκε κατά 10-15%.
- Τα δύο πειράματα Hires και Auger δίνουν συμβατά αποτελέσματα. Η ενέργεια όπως υπολογίζεται από το Auger γενικά είναι χαμηλότερη από το HiRes.

Σύντομη ερμηνεία

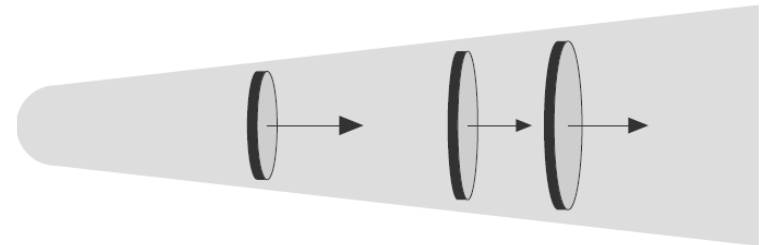
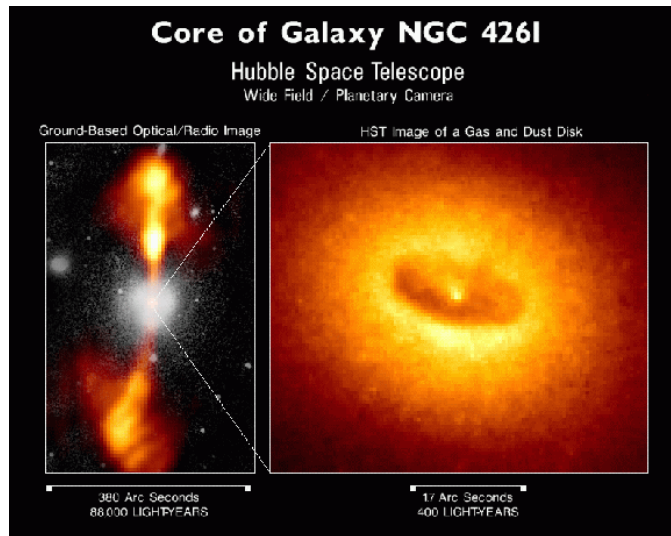
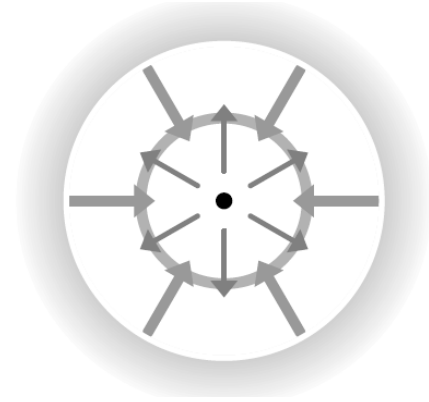
- Το γόνατο σχηματίζεται επειδή οι μηχανές παραγωγής φθάνουν στο όριο τους. Δηλαδή δε μπορούν να παράγουν υψηλότερες ενέργειες από 10^{15} ως 10^{17} eV. Επίσης στην περιοχή αυτήν επικρατούν οι πυρήνες Fe επειδή τα πρωτόνια αυτής της ενέργειας διαφεύγουν από τον Γαλαξία.
- Η περιοχή πάνω από 10^{18} eV η προέλευση θεωρείται εξωγαλαξιακή. Ο ταρσός σχηματίζεται επειδή τροφοδοτείται από γαλαξιακές και εξωγαλαξιακές πηγές.
- Τα δεδομένα από Auger και HiRes δείχνουν την αποκοπή GZK στα 19,5 eV.

Καμπύλη Auger

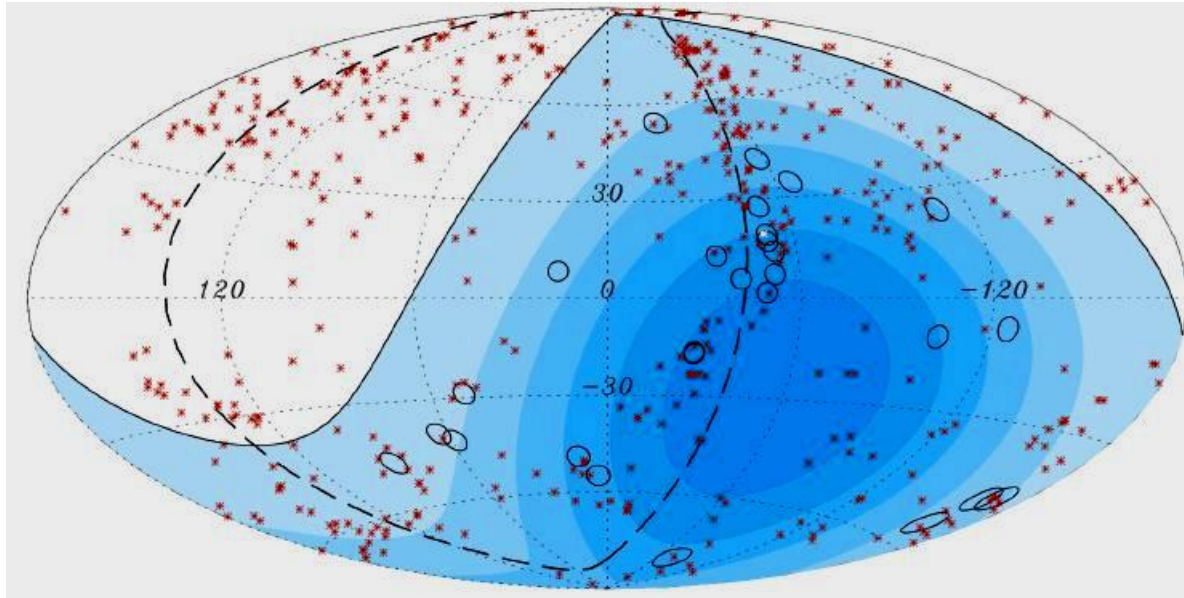


parameter	broken power laws
$\gamma_1(E < E_{\text{ankle}})$	3.27 ± 0.02
$\lg(E_{\text{ankle}}/\text{eV})$	18.61 ± 0.01
$\gamma_2(E > E_{\text{ankle}})$	2.68 ± 0.01
$\lg(E_{\text{break}}/\text{eV})$	19.41 ± 0.02
$\gamma_3(E > E_{\text{break}})$	4.2 ± 0.1
$\lg(E_{1/2}/\text{eV})$	
$\lg(W_c/\text{eV})$	
χ^2/ndof	$37.8/16 = 2.4$

Ερμηνεία πιθανοί μηχανισμοί.



Συσχέτιση γεγονότων με πηγές.



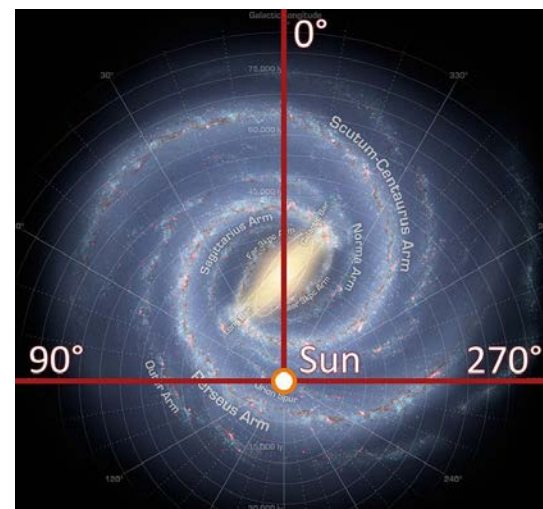
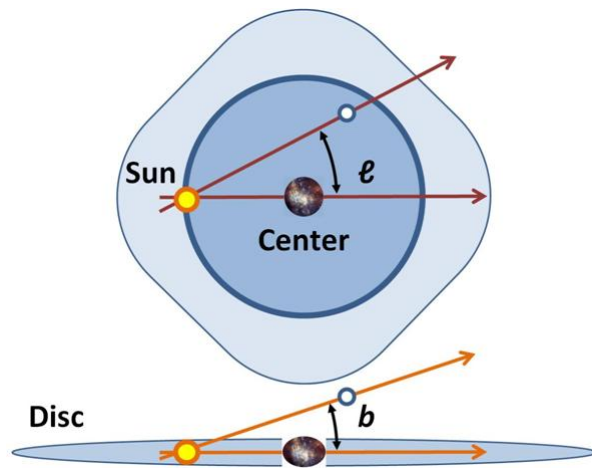
- Οι κύκλοι αντιστοιχούν σε 27 Κ.Α. με ενέργεια μεγαλύτερη από 57 EeV.
- Ο κύκλος αντιστοιχεί σε γωνιακή ακτίνα 3.1° από τη διεύθυνση της Κ.Α.
- Τα κόκκινα σημάδια αντιστοιχούν σε γνωστά AGN σε απόσταση μικρότερη από 75 Mpc.
- 12 Κ.Α. συμπίπτουν με AGN.

Πηγές ακτίνων γ UHECR

Νετρίνα UHE πιθανές πηγές.

Πείραμα ICE CUBE

Βοηθητικές



Νετρίνα Υψηλής Ενέργειας

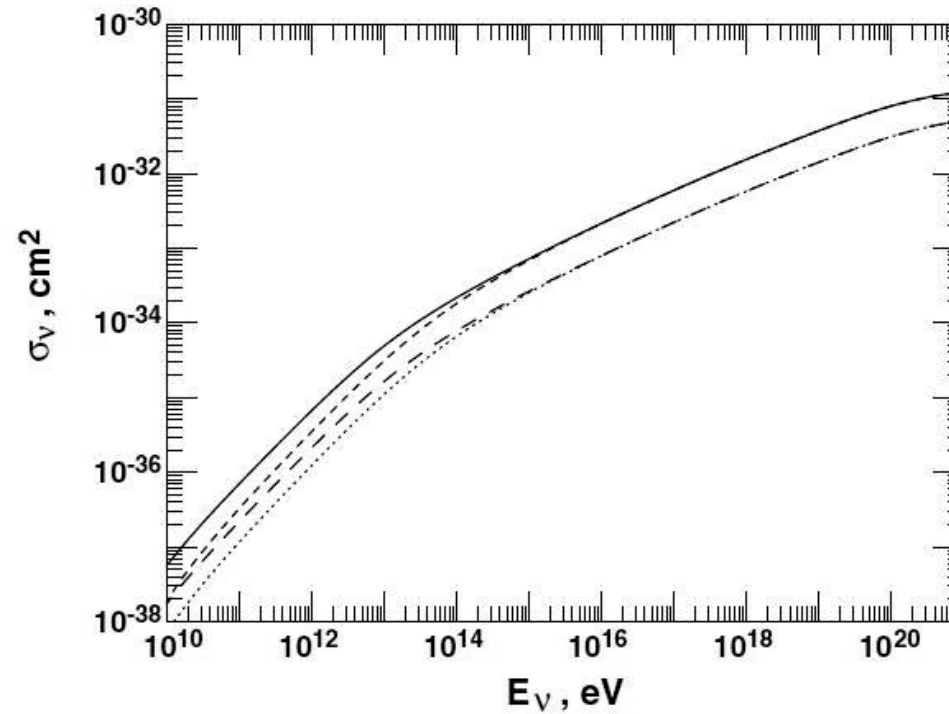
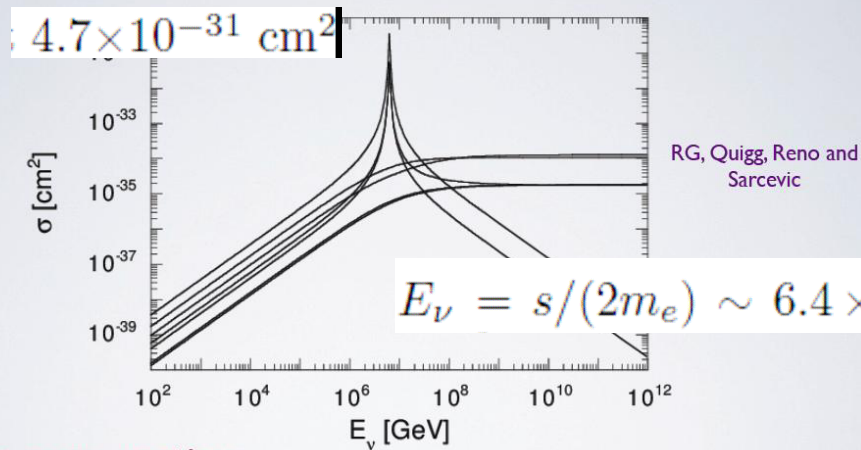


Fig. 10.2. Cross-sections for deep inelastic neutrino scattering. Neutrino CC cross-section is plotted with a solid line, the antineutrino with short dashes. The NC cross-section for neutrinos are plotted with long dashes, and for antineutrinos with a dotted line.

Συντονισμός Glashow

Neutrino Cross-sections at the Glashow Resonance



$$E_\nu = s/(2m_e) \sim 6.4 \times 10^6 \text{ GeV}$$

The cross-sections

$\bar{\nu}_e e \rightarrow \text{hadrons}$, $\bar{\nu}_e e \rightarrow \bar{\nu}_e e$, $\bar{\nu}_e e \rightarrow \bar{\nu}_\mu \mu$, $\bar{\nu}_e e \rightarrow \bar{\nu}_\tau \tau$ are resonant

$$p + p \rightarrow p(n) + m\pi^0 + 2m\pi^\pm .$$

π^0	π^+				π^-				p
$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$				$\frac{1}{6}$				$\frac{1}{2}$
$\gamma \ \gamma$	e^+	ν_e	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	e^-	$\bar{\nu}_e$	$\bar{\nu}_\mu$	ν_μ	

Διαδικασίες για εξωγαλαξιακές πηγές

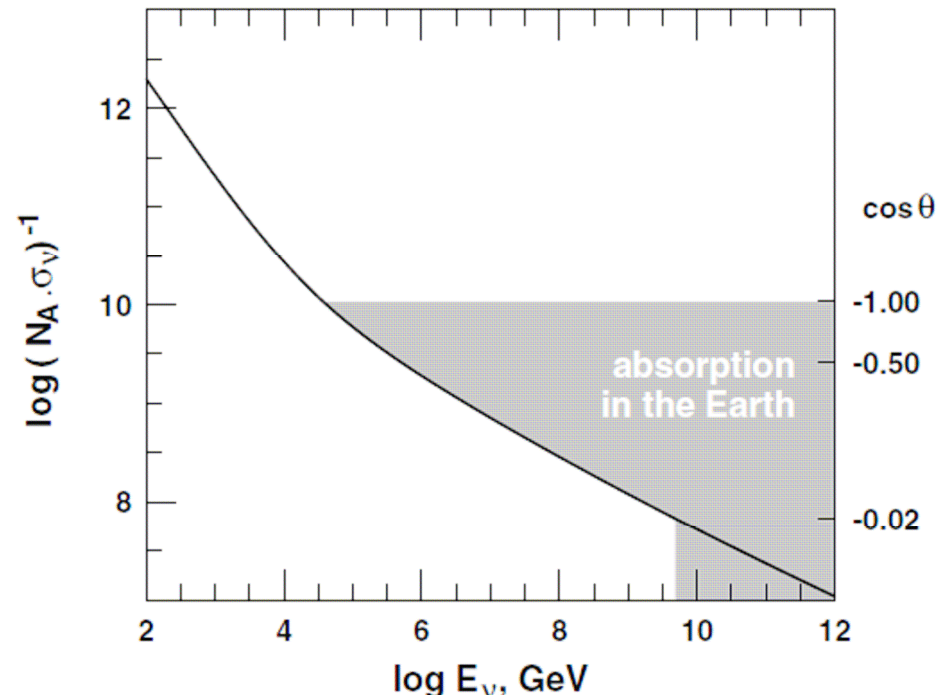
$$p + \gamma \rightarrow \pi^{\pm} + \dots$$

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

$$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}_e$$

Τα $\nu_e : \nu_{\mu}$ παράγονται περίπου 1:4.

Μετά από την ταλάντωση $\nu_e : \nu_{\mu} : \nu_{\tau}$ γίνεται 1:1:1



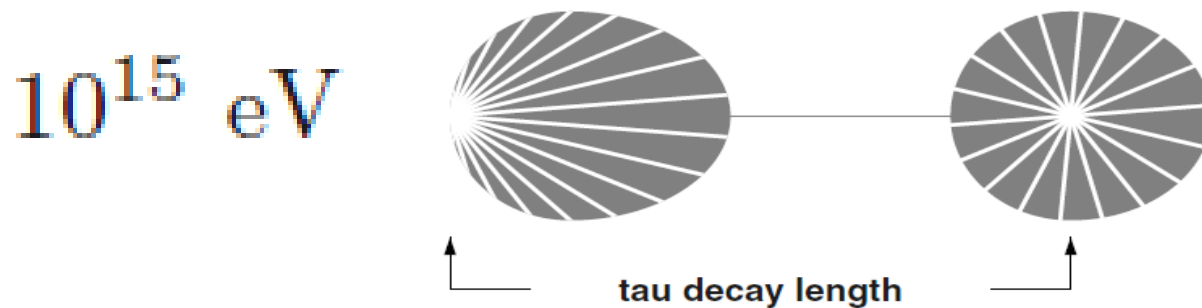
Όταν η ενέργεια γίνει μεγαλύτερη από $5 \cdot 10^4 \text{ GeV}$ η γη δεν είναι πιά διαφανής στα νετρίνα. Για μεγαλύτερη από $5 \cdot 10^9$ όλο το Νότιο ημισφαίριο γίνεται αδιαφανές.

- Για πειράματα σ' αυτές τις ενέργειες ανιχνεύουμε τα κατερχόμενα νετρίνα.
- Ανίχνευση καταιονισμών που δημιουργούνται από νε, όπου όλη η ενέργεια πηγαίνει στον καταιονισμό.
- Ανίχνευση καταιονισμών που δημιουργούνται από ουδέτερα ρεύματα, όπου μεγάλο μέρος της ενέργειας που δεν πηγαίνει στο νετρίνο καταλήγει στον καταιονισμό.
- Ανίχνευση μιονίων που παράγονται στον ανιχνευτή.

Ανίχνευση ν_τ

$$\nu_\tau N \rightarrow \tau X \qquad \tau \rightarrow \nu_\tau + X$$

Το 'τ' διασπάται μετά από περίπου 50 m
δημιουργώντας έναν ακόμη καταιονισμό.



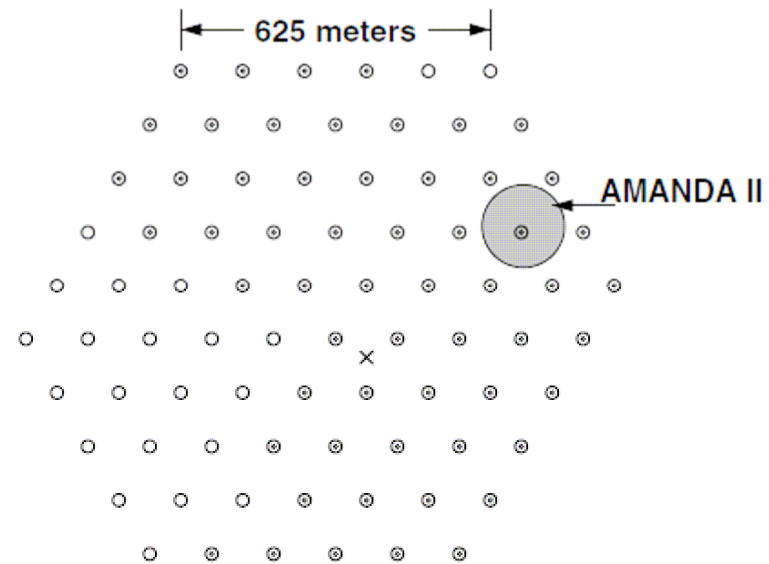
Ice Cube

2004-2010

5,160 OM

86 strings

1450-2450m





ICECUBE

SOUTH POLE NEUTRINO OBSERVATORY

50 m

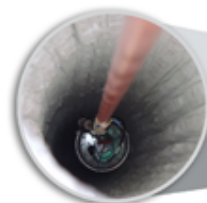
Ice Top



IceCube Laboratory
Data is collected here and sent by satellite to the data warehouse at UW-Madison

1450 m

86 strings of DOMs,
set 125 meters apart



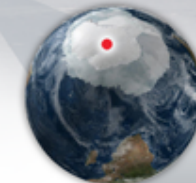
Digital Optical Module (DOM)
5,160 DOMs
deployed in the ice

2450 m

IceCube
detector

DeepCore

Antarctic bedrock

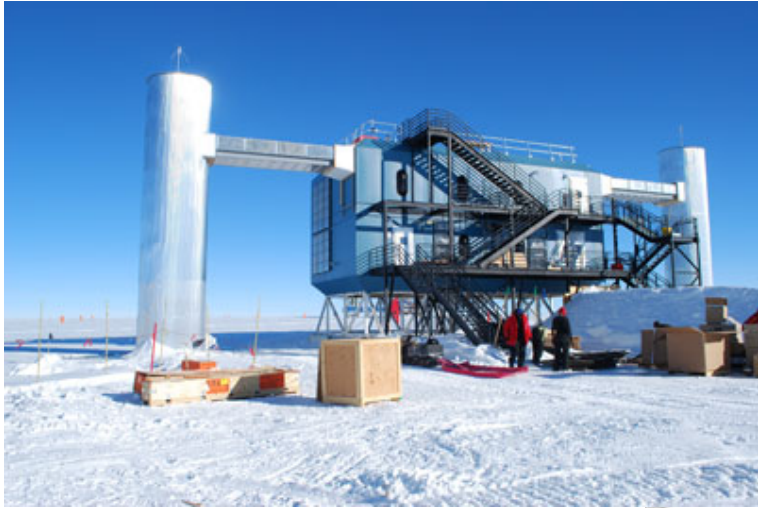


Amundsen-Scott South Pole Station, Antarctica
A National Science Foundation-managed research facility

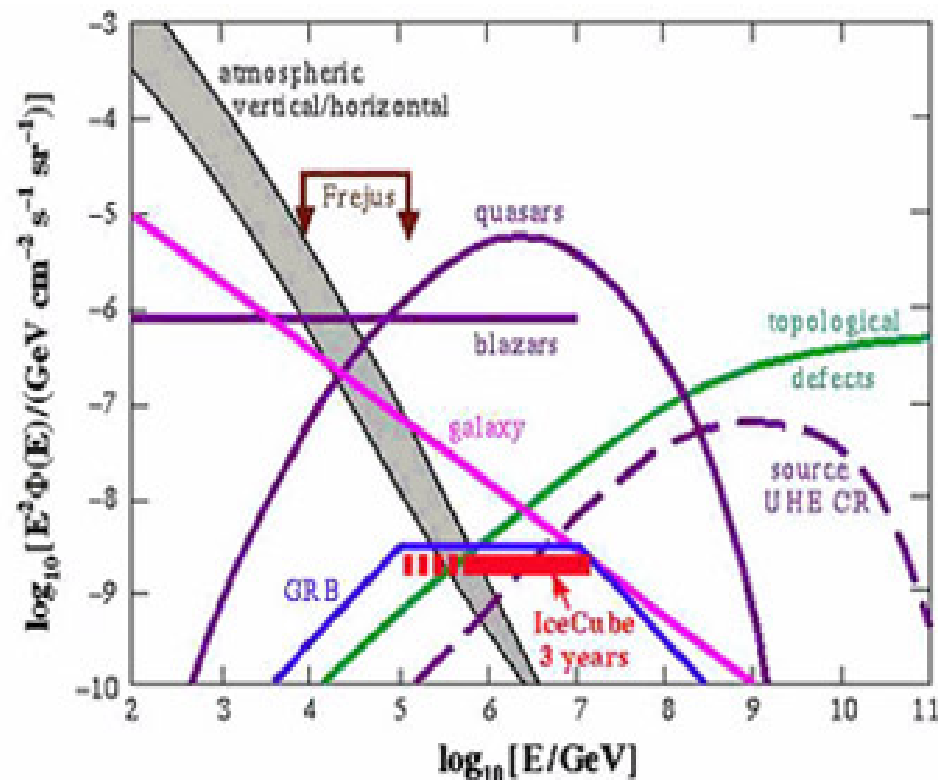
60 DOMs
on each
string

DOMs
are 17
meters
apart

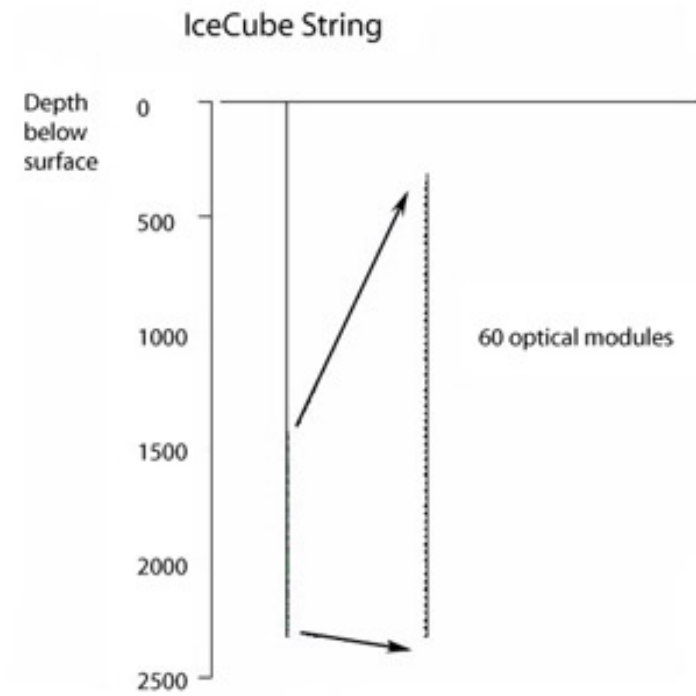




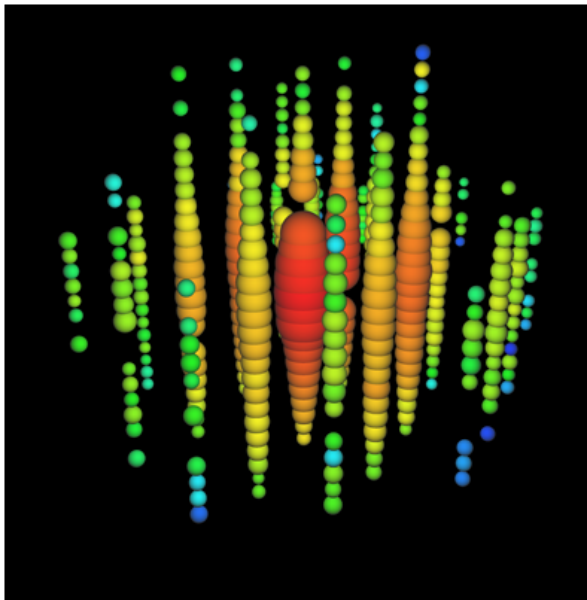
Ροή νετρίνων



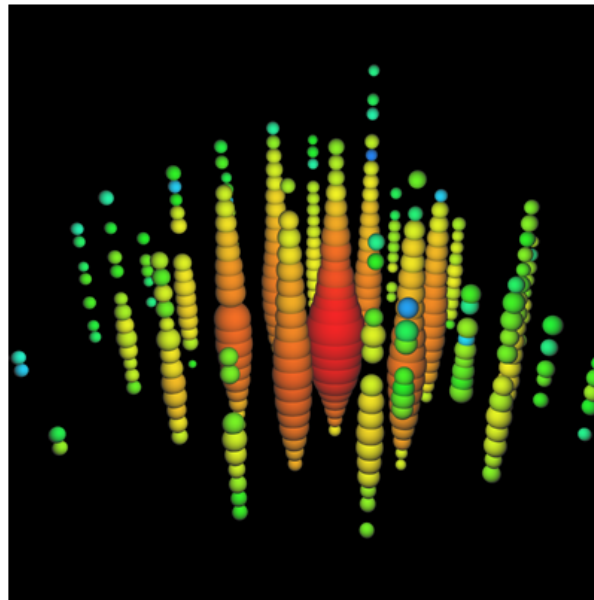
Diffuse Neutrino Flux vs. Energy for various models of sources contributing to the diffuse background. The horizontal line in red indicates IceCube sensitivity after three years.



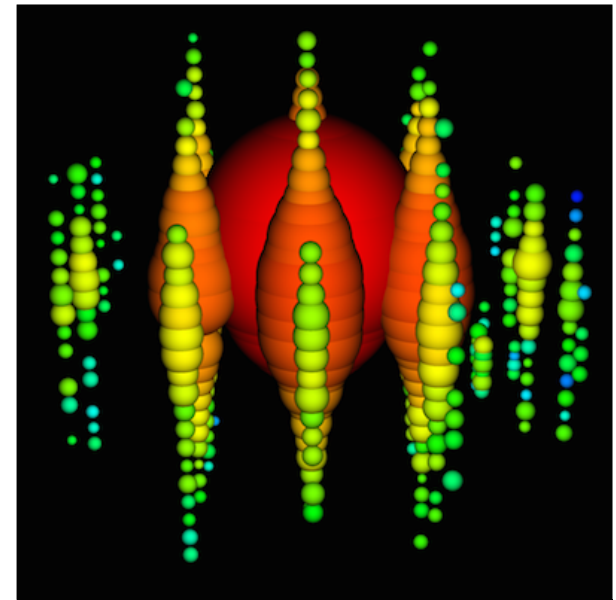
Γεγονότα Υπερυψηλής Ενέργειας



Berty 1



Ernie 1.1



Big Bird 2.2 PeV

Askaryan effect.

Ραδιοκυματική Ακτινοβολία που εκπέμπεται από τη διέλευση φορτισμένων σωματιδίων με ασύμμετρη κατανομή μέσα από πυκνό διηλεκτρικό όπως ο πάγος.

Εκπομπή Cerenkov σε ραδιοκύματα.

Ο πολικός πάγος συμπεριφέρεται σαν ένα πολύ καλό διηλεκτρικό. Το μήκος εξασθένησης για το φθαμει το 1km

Πειράματα RICE ARIANNA

ANITA



- Μέτρησε 16 γεγονότα με ενέργεια $1,5 * 10^{19}$
- Οι κατ. μεγάλης ενέργειας εκπέμπουν ακτινοβολία σύγχροτρον λόγω της κάμψης των φορτισμένων τροχιών από το μαγνητικό πεδίο της γης.
- Η μέτρηση έγινε χρησιμοποιώντας κεραίες μεγάλης ευαισθησίας.