

Ακτίνες Υπερυψηλών Ενεργειών.

UHECR

Το φάσμα πάνω από το 1 PeV

- Πυρήνες υψηλής ενέργειας
- Πιθανοί μηχανισμοί
- Το όριο GZK (Greisen, Zatsepin, Kusmin)
- Ακτίνες γ
- Νετρίνα PeV

[The Cosmic-ray Spectrum: from the knee to the ankle](#)

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 Cerenkon 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 Cerenkon 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 $3 \cdot 10^{20} \text{ eV}$.

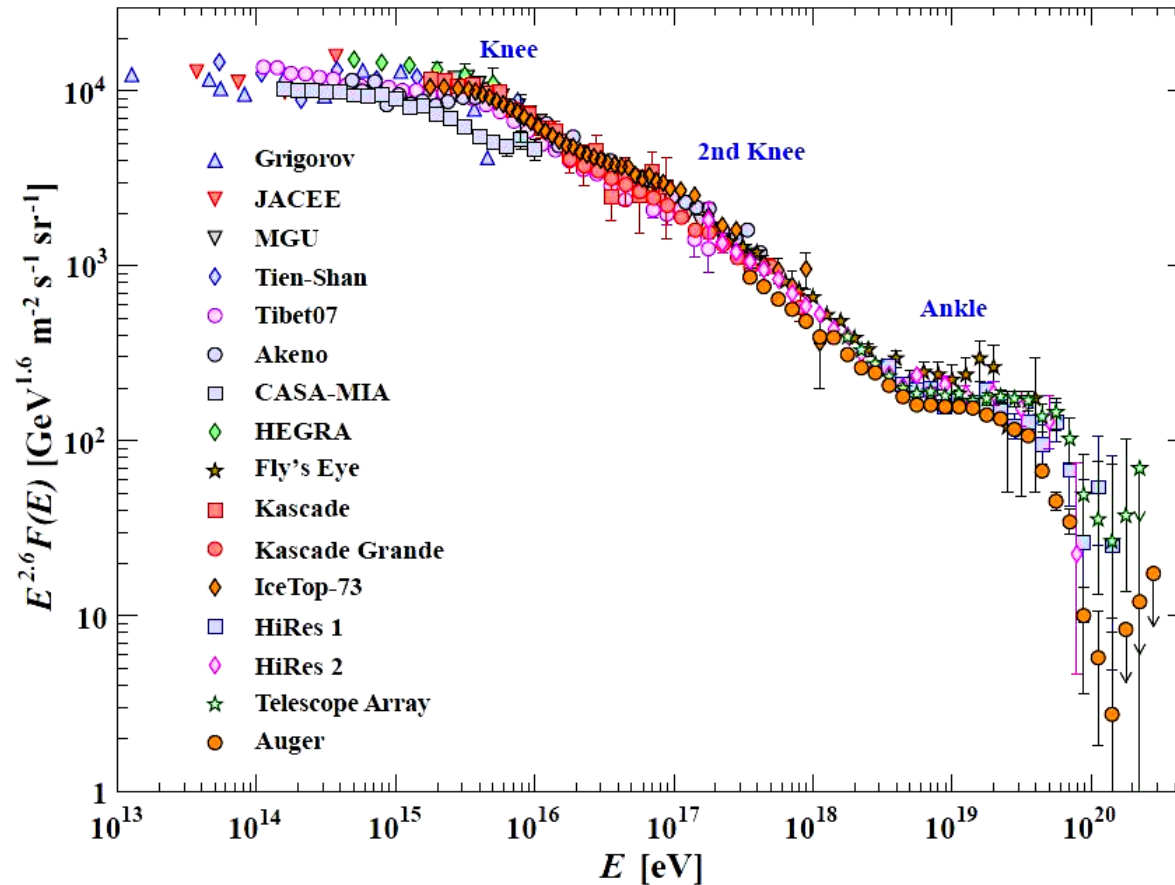
Πειράματα.

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.

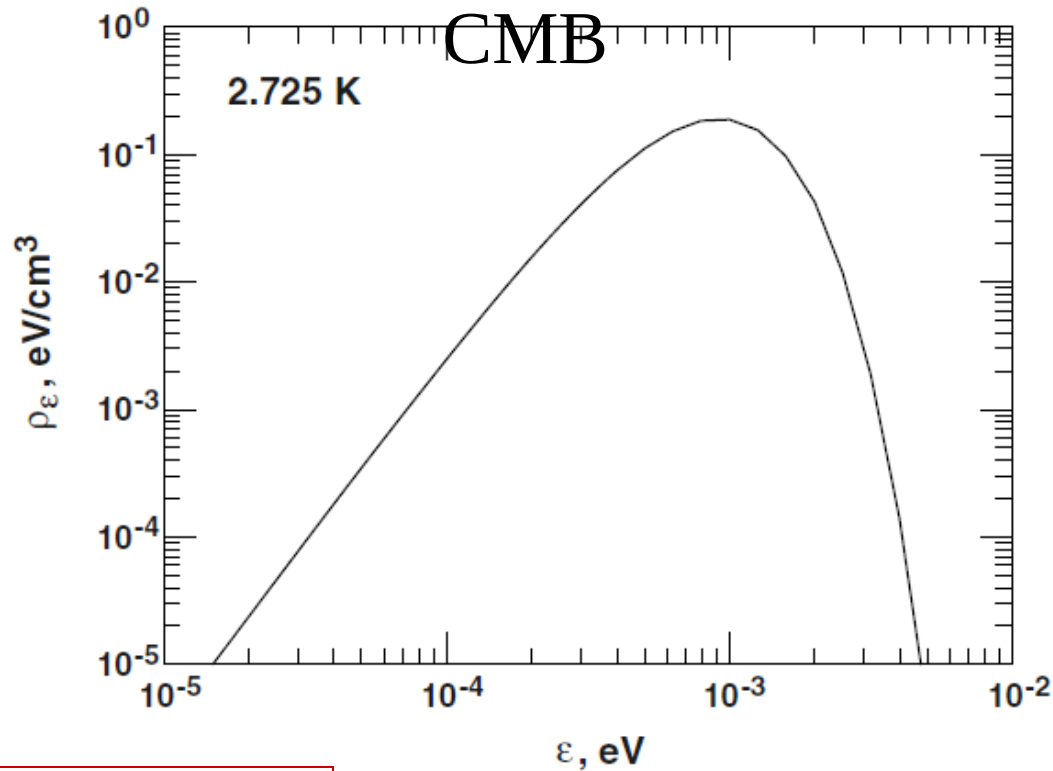
Καταιονισμοί μεγάλης ενέργειας

$\chi E^{2.6}$ για να διακρίνονται οι λεπρομέρειες



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

Κοσμικό Μικροκυματικό Υπόβαθρο



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

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

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

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

$$\rho_E(\varepsilon) = \frac{1.32 \times 10^{13} \varepsilon^4}{\exp(\varepsilon / kT) - 1}$$

Μηχανισμός GZK. Παραγωγή πιονίου.

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

CM

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

Lab

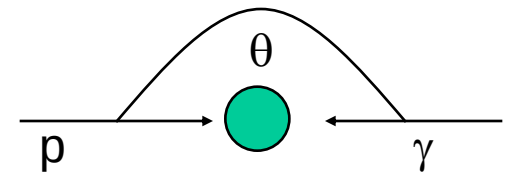
$$s = m_p^2 + 2E_p m_\gamma (1 - \beta_p \cos \theta)$$

Για :

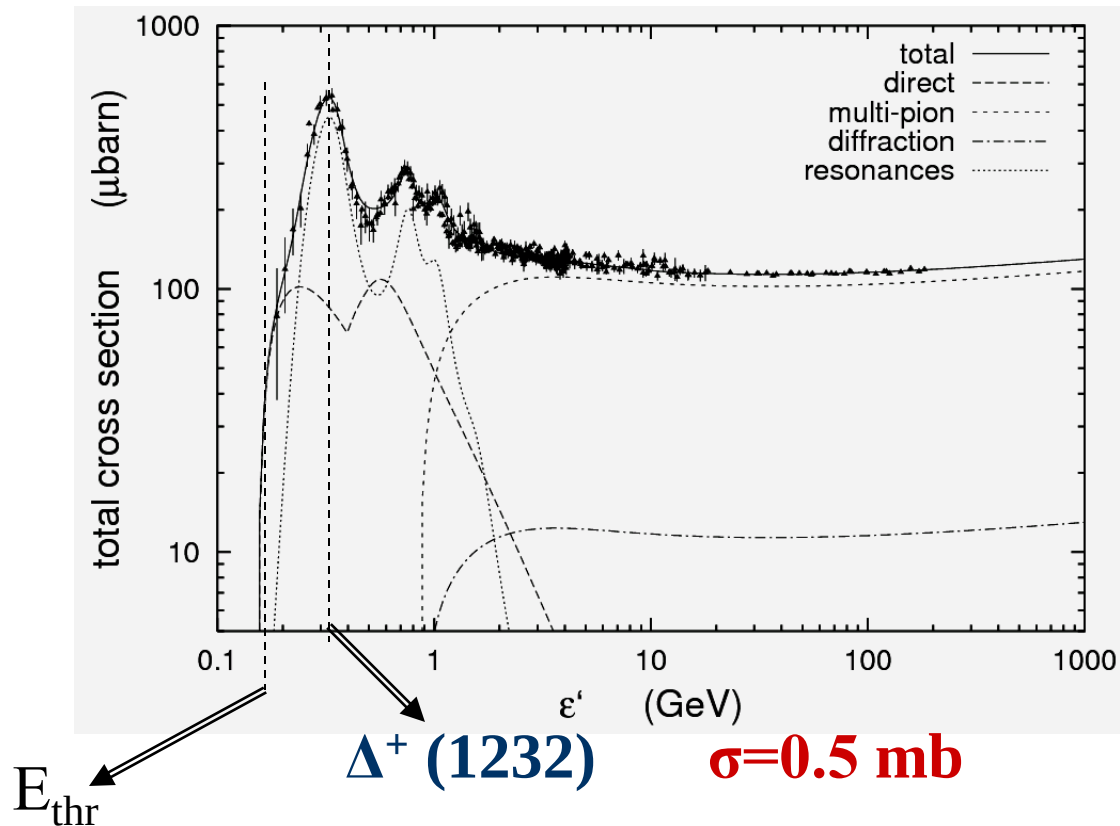
$$\cos \theta = -1, \quad m_\gamma = 6.34 \times 10^{-4} \text{ eV}$$

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

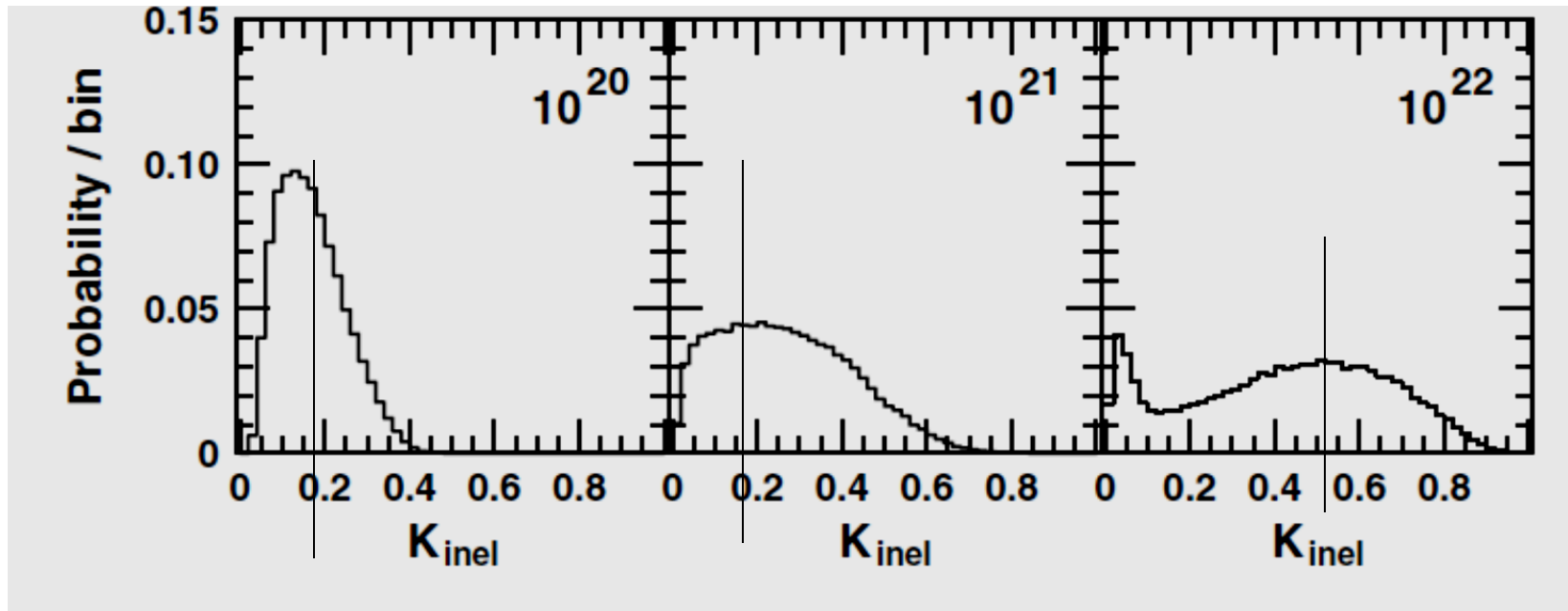
Για μετωπική κρούση,
ενέργεια κατωφλίου.



Φωτοπαραγωγή. (photoproduction)



Ανελαστικότητα

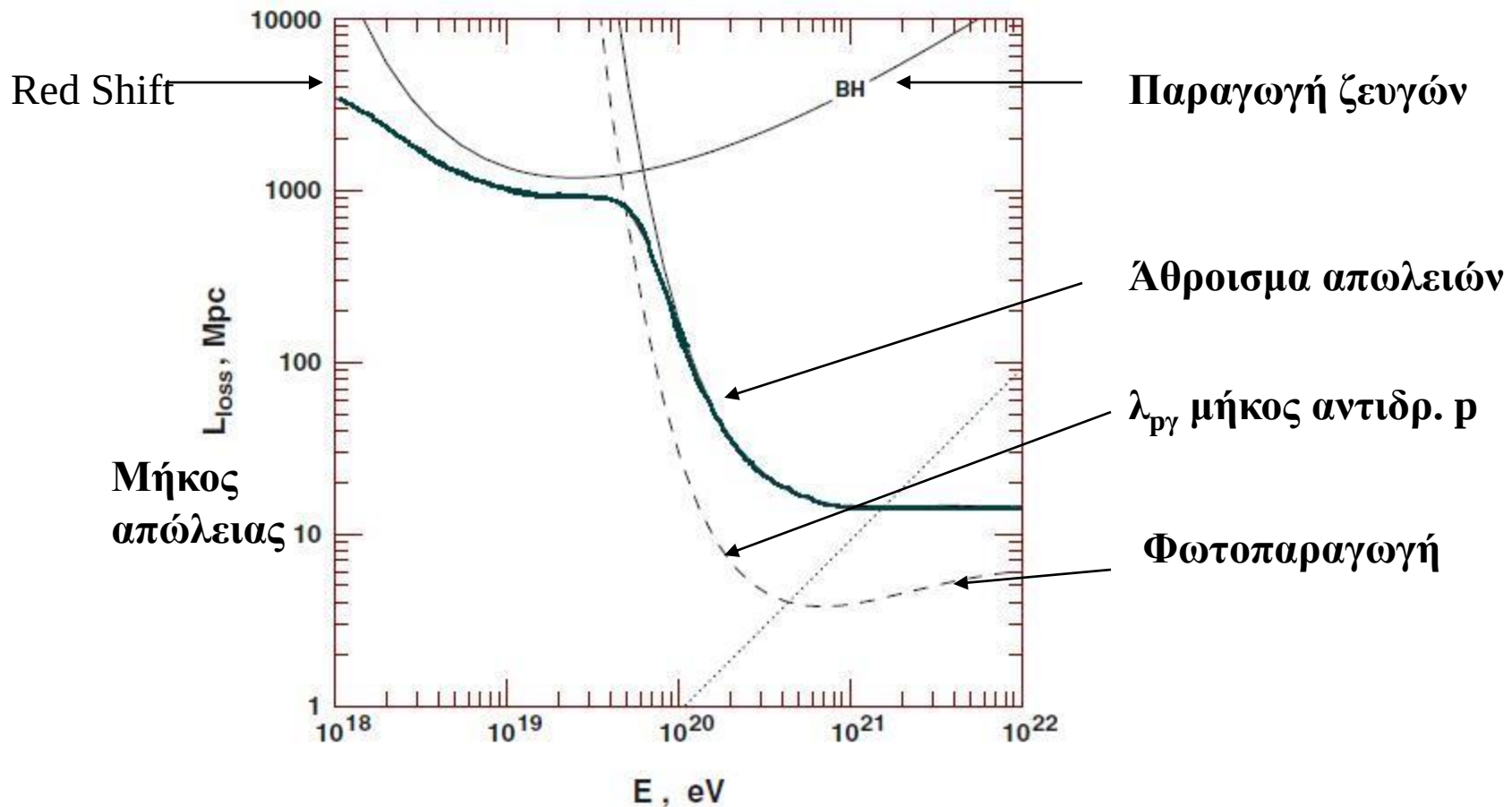


Συντελεστής ανελαστικότητας K_{inel} , για πρωτόνια σε CMB. Η μέση τιμή στα 10^{20} είναι 0.17 στα 10^{21} 0.27 και στα 10^{22} 0.5 και παραμένει σταθερή για υψηλότερες ενέργειες.

Άλλες απώλειες

- Παραγωγή $e^+ e^-$ στο πεδίο του πρωτονίου. $p + \gamma \rightarrow p + e^\pm$
- 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. (Red shift)

Απώλεια ενέργειας πρωτονίων



$$L_{\text{loss}} = \frac{E_p}{dE_p / dx} = \frac{\lambda_{p\gamma}(E_\pi)}{K_{\text{inel}}}$$

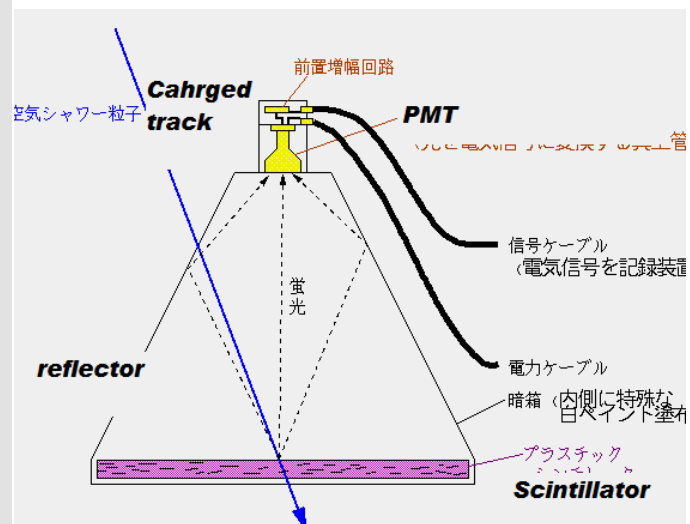
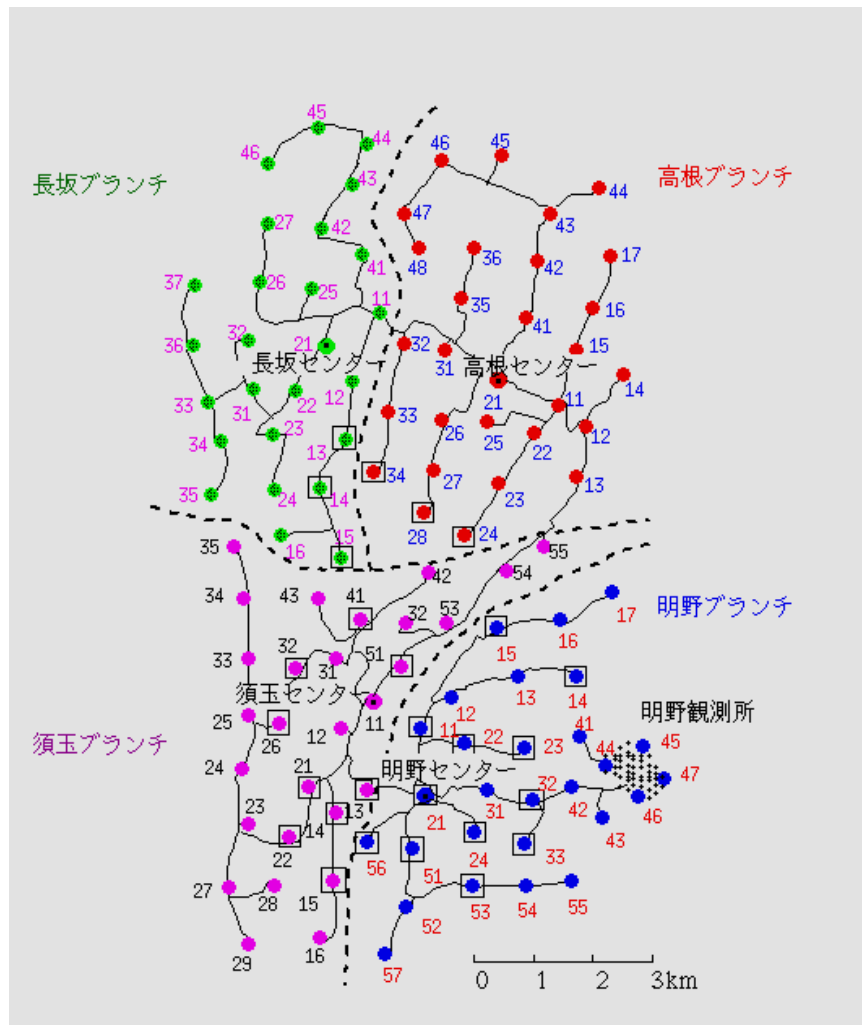
Απώλεια ενέργειας εκφρασμένη σε μήκος απώλειας. Όσο μικρότερο το μήκος τόσο μεγαλύτερη η απώλεια. Μονάδες Mpc.

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 αποστάσεις μεγαλύτερες από 100 Mpc ,φθάνουν με ενέργειες 10^{18} - 10^{19} eV .
5. Η διαδικασία αυτή ερμηνεύει το σχήμα του φάσματος!

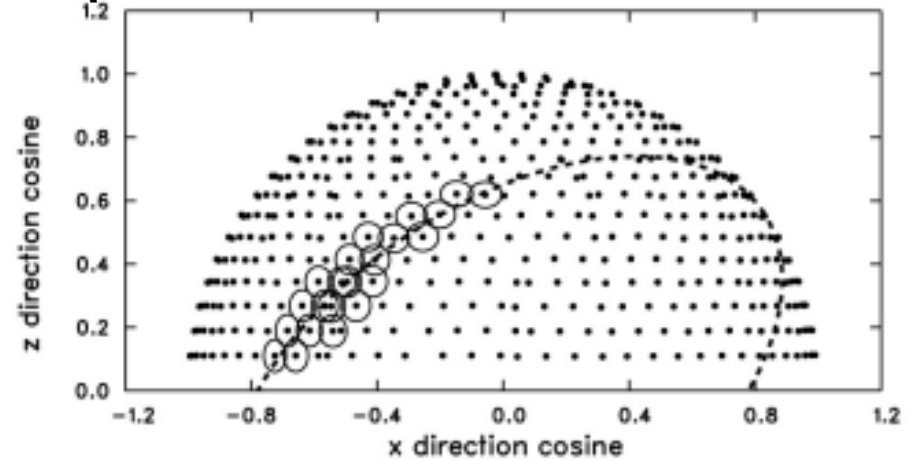
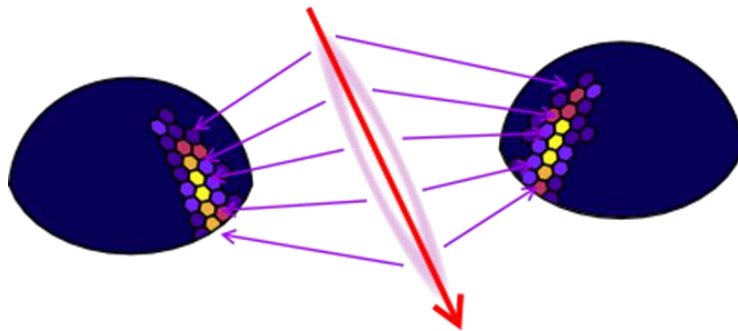
Διατάξεις μέτρησης UHECR

AGASA



Πείραμα HiRes, Στερεοσκοπική παρατήρηση.

Ανακατασκευή στον ανιχνευτή.



22 και 41 ανιχνευτές, ο καθένας (3.7 m^2 256 PMT)
σε βάθος ατμόσφαιρας 870 gr/cm^2

Με στερεοσκοπική παρατήρηση ο κάθε ανιχνευτής ορίζει ένα επίπεδο και η θέση του κατ. προσδιορίζεται από την τομή των δύο επιπέδων. Αν παρατηρηθεί από μια ομάδα ο προσδιορισμός της απόστασης υπολογίζεται από τον χρόνο πού μετρούν διαδοχικοί PMTs

Υπολογισμός φωταύγειας.

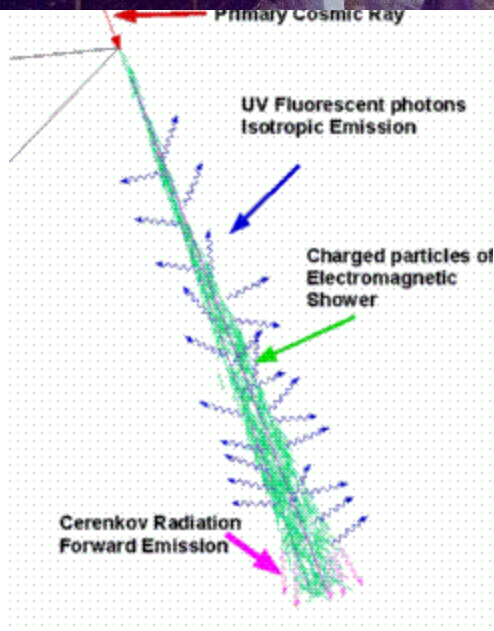
Έστω ο πυρήνας του κατ. έχει μήκος 700m και σχηματίζεται σε απόσταση 20 km από τον ανιχνευτή. Αν περιέχει 10^9 ηλεκτρόνια θα δώσουν $2,8 \cdot 10^{12}$ φωτόνια. Η σφαίρα με ακτίνα 20 km έχει επιφάνεια $5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^2$ άρα 0,056 φωτ/ cm^2 .

Άρα χρειαζόμαστε μεγάλη επιφάνεια συλλογής και καταιονισμό πολύ μεγάλης ενέργειας.

Πείραμα HiRes

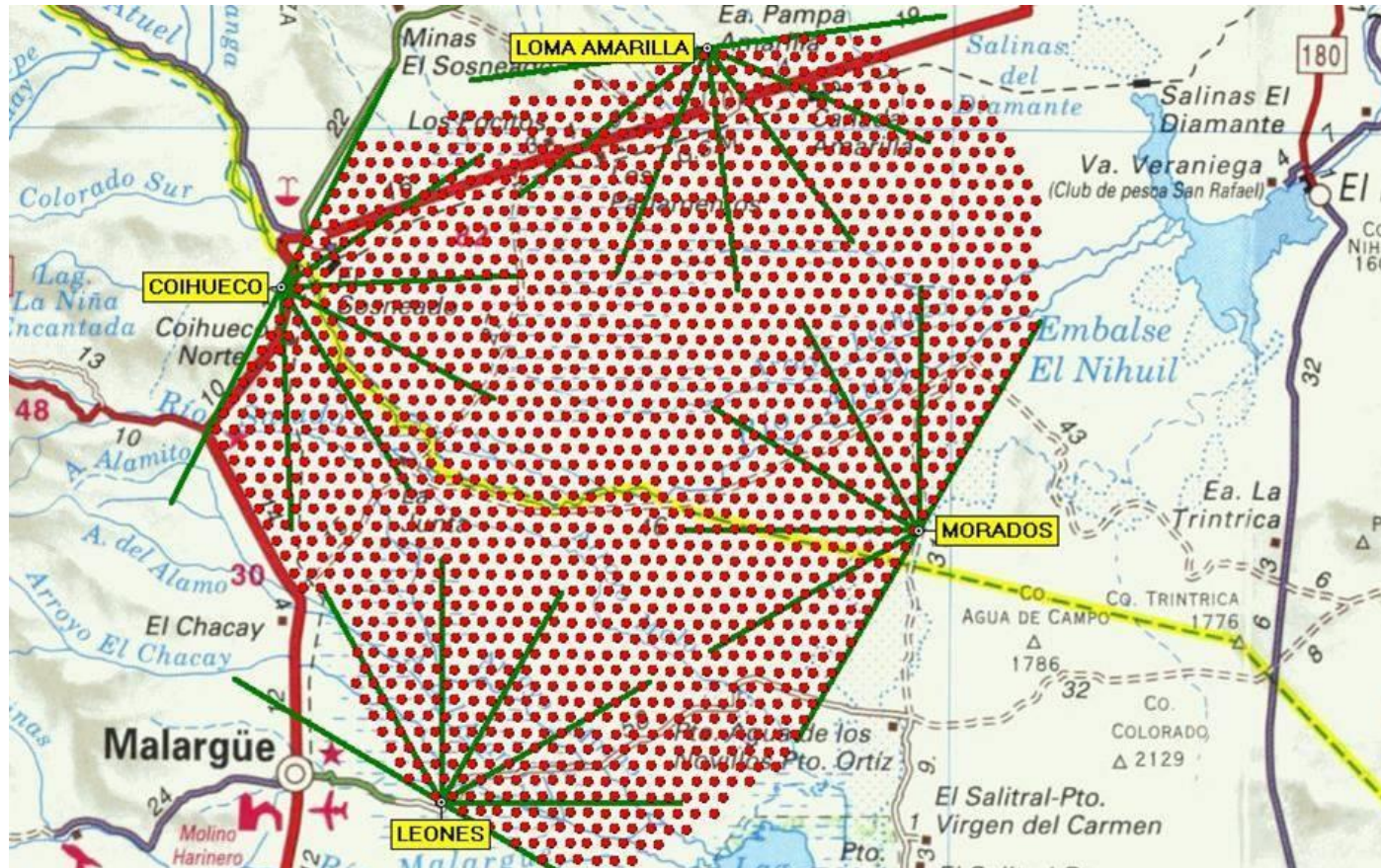


Μετρά την ακτινοβολία που προκαλείται από τον ιονισμό του αέρα. Χρησιμοποιούνται κάτοπτρα με φωτοπολλαπλασιαστές. Τα κάτοπτρα προσανατολίζονται ώστε να καλύπτουν μια μεγάλη περιοχή του ουράνιου θόλου. Ο αριθμός των φωτονίων που συλλέγονται είναι μικρός και μόνον EAS με ενέργεια πάνω από 10^{17} eV μπορούν να ανιχνευθούν.

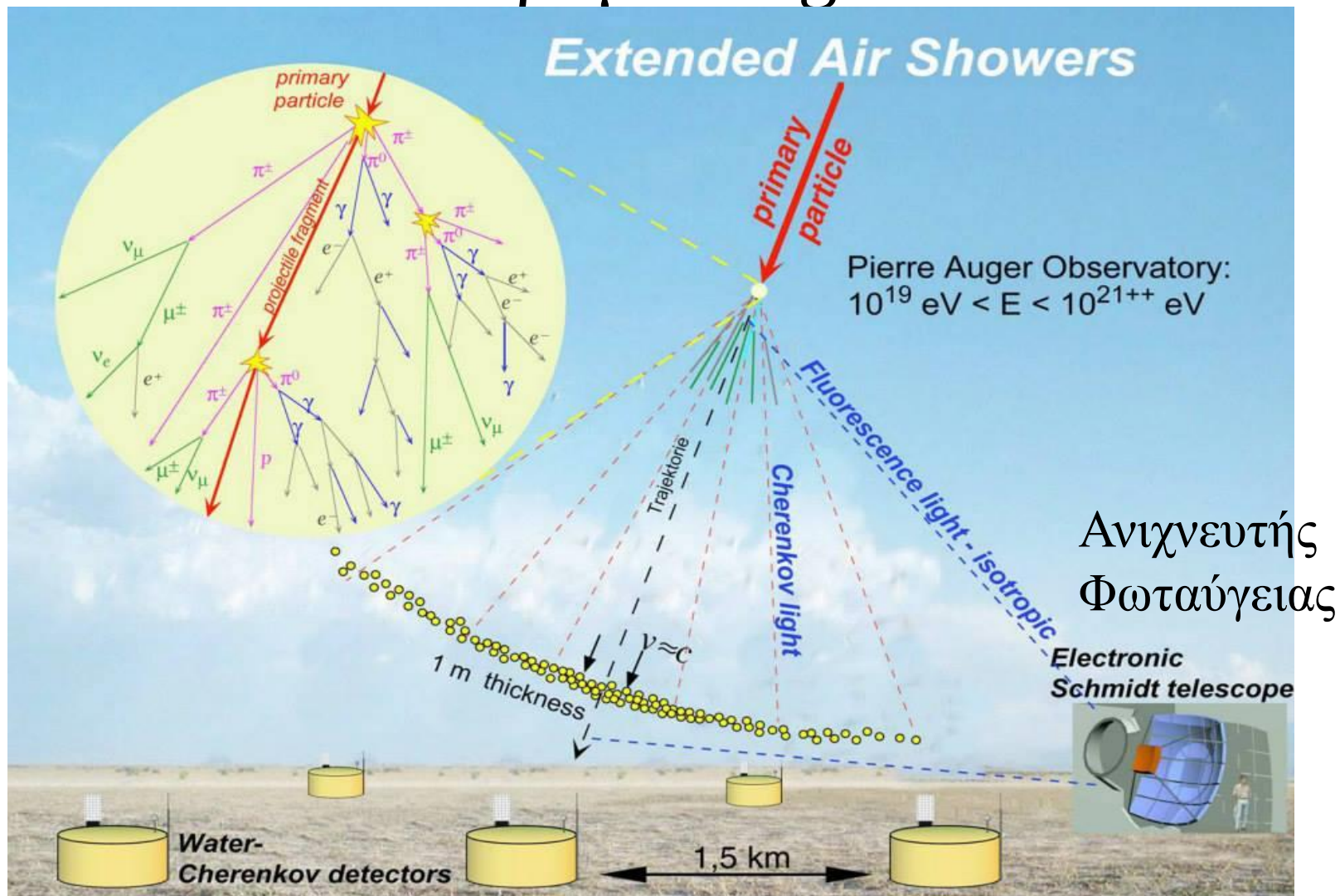


•Φωταύγεια από καταιονισμό.

Πείραμα Auger



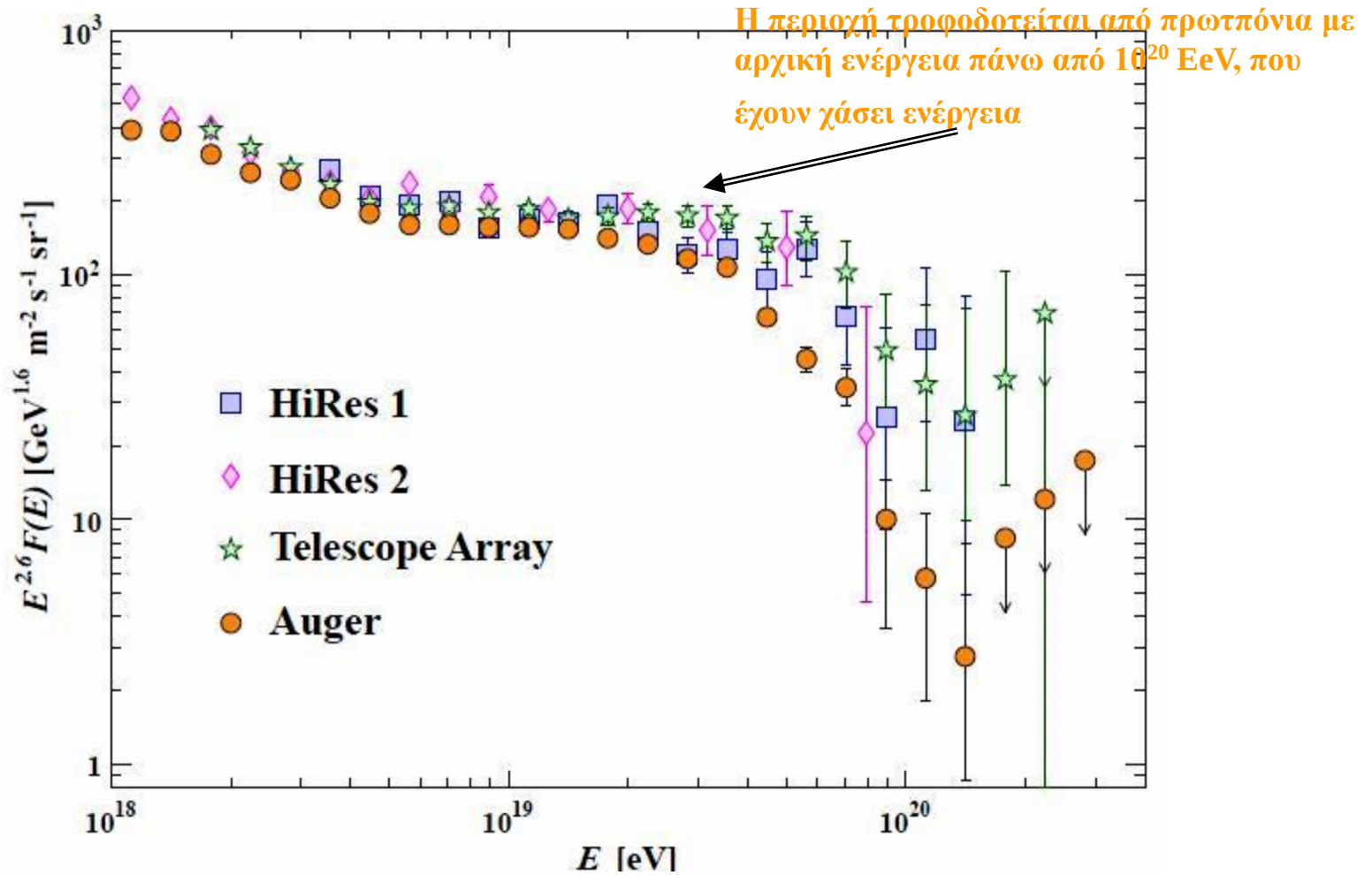
Πείραμα Auger



Ανιχνευτής
Φωταύγειας

Ντεπόζιτα Cerenkov

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.
- Τα αναμενόμενα γεγονότα είναι:
 $\sim 100 \text{ km}^{-2} \text{ y}^{-1}$ above 10^{18} eV, $\sim 1 \text{ km}^{-2} \text{ y}^{-1}$ at 10^{19} eV,
and $\sim 1 \text{ km}^{-2}$ per century at 10^{20} eV.

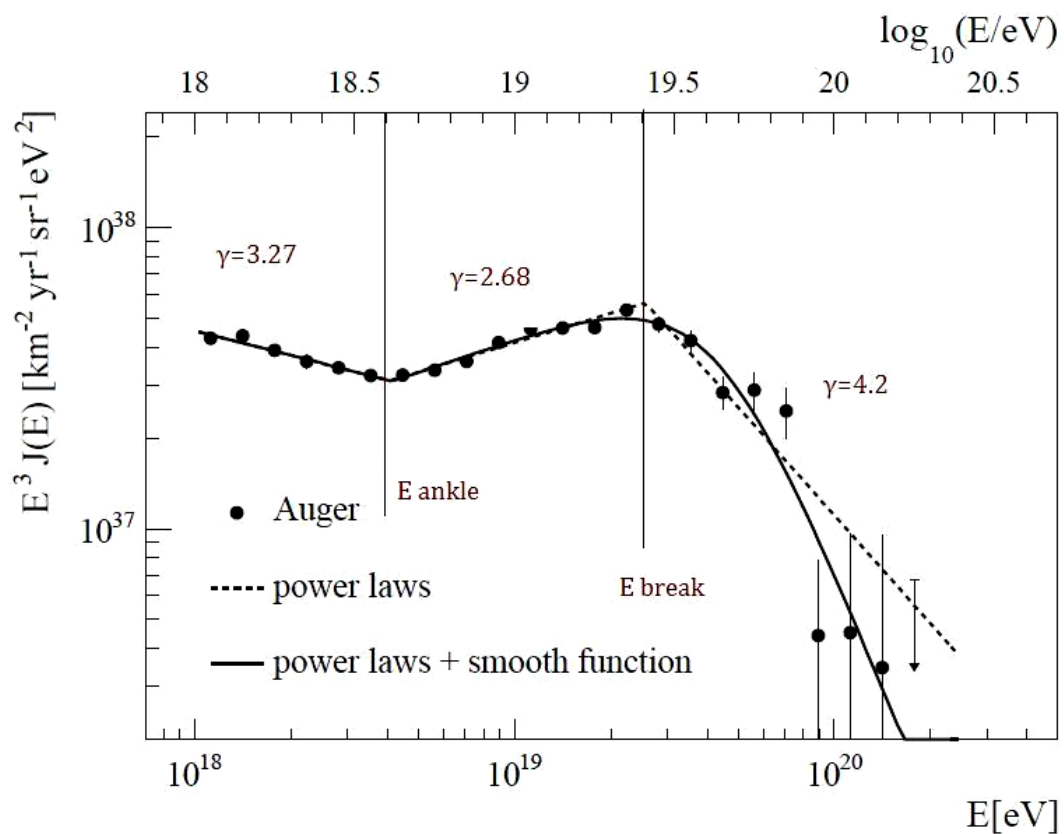
Πειραματικές διαφορές

- 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.

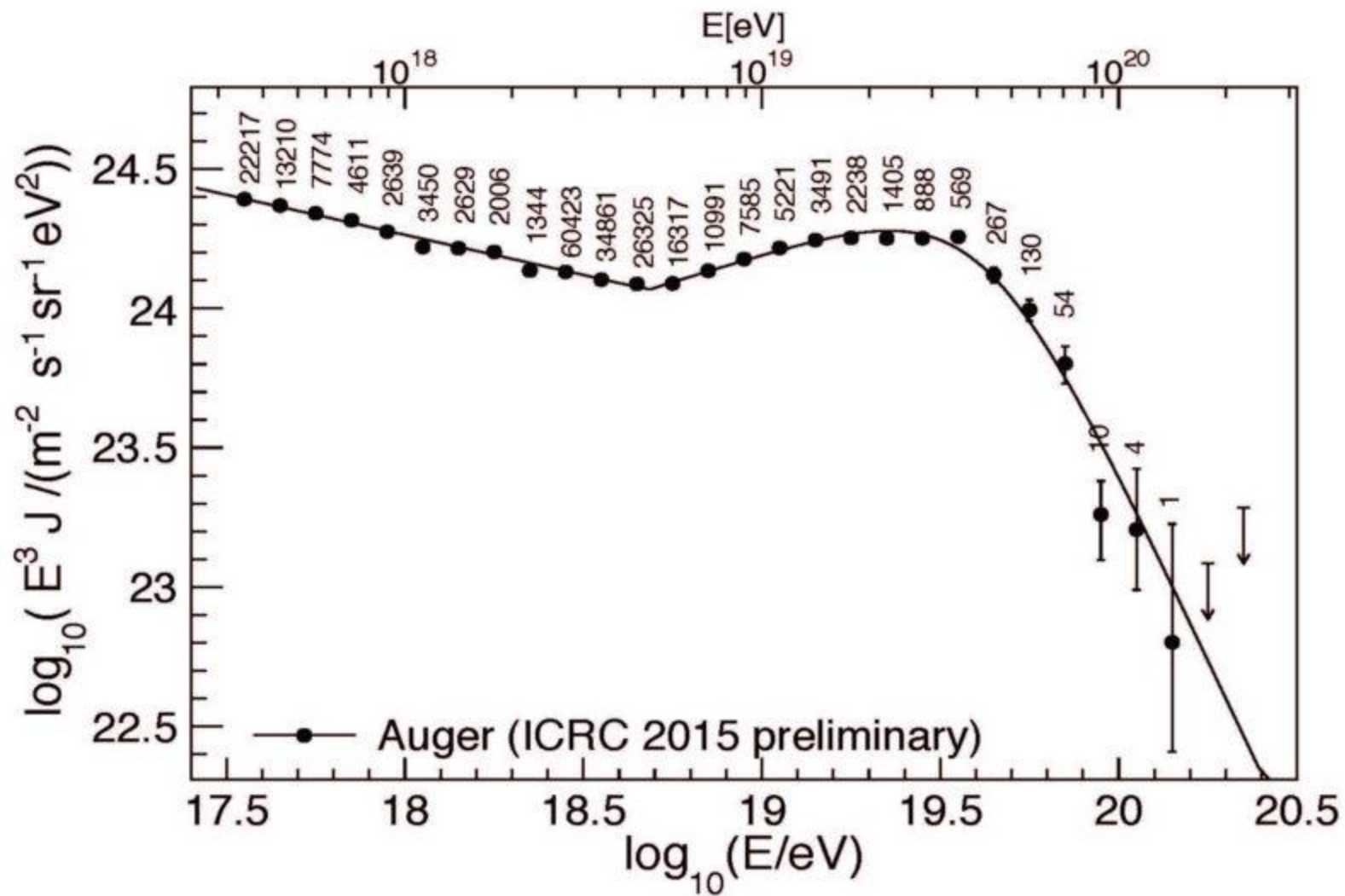
Σύντομη ερμηνεία

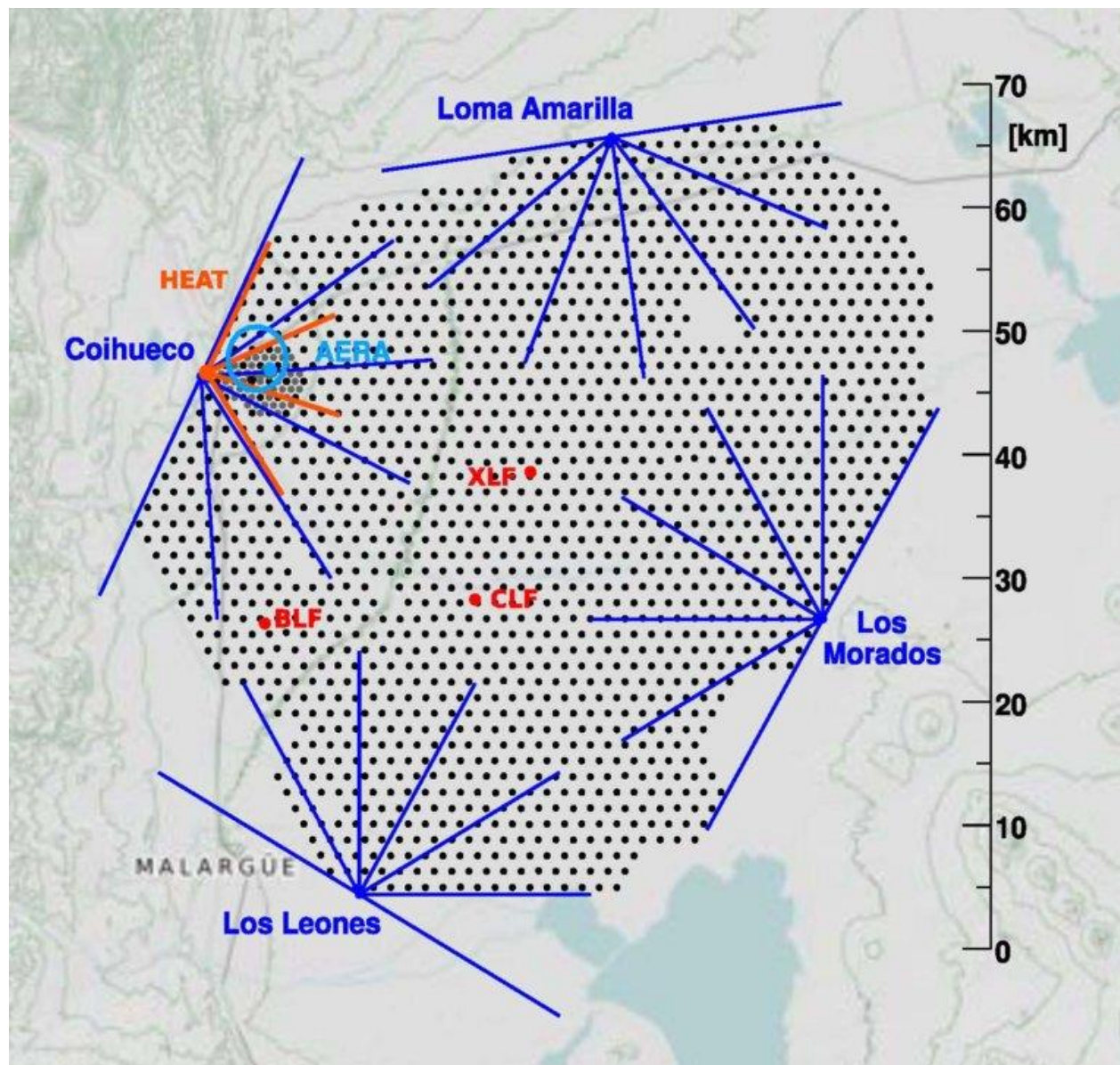
- Το γόνατο σχηματίζεται επειδή οι μηχανές παραγωγής φθάνουν στο όριο τους. Δηλαδή δε μπορούν να παράγουν υψηλότερες ενέργειες από 10^{15} ως 10^{17} eV. Επίσης στην περιοχή αυτήν επικρατούν οι πυρήνες Fe επειδή τα πρωτόνια αυτής της ενέργειας διαφεύγουν από τον Γαλαξία.
- Η περιοχή πάνω από 10^{18} 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	$37.8/16 = 2.4$





Συσχέτιση με πηγές

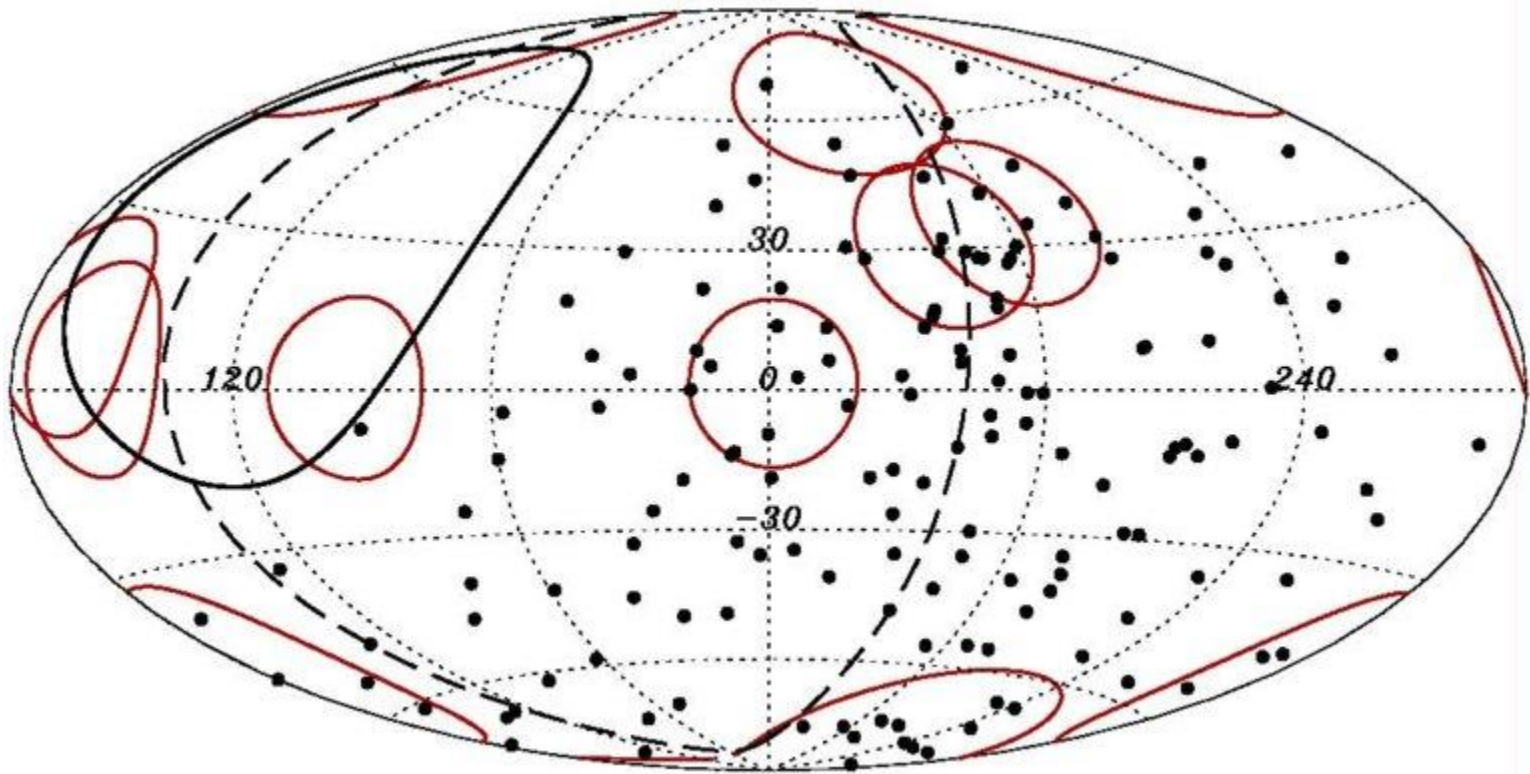
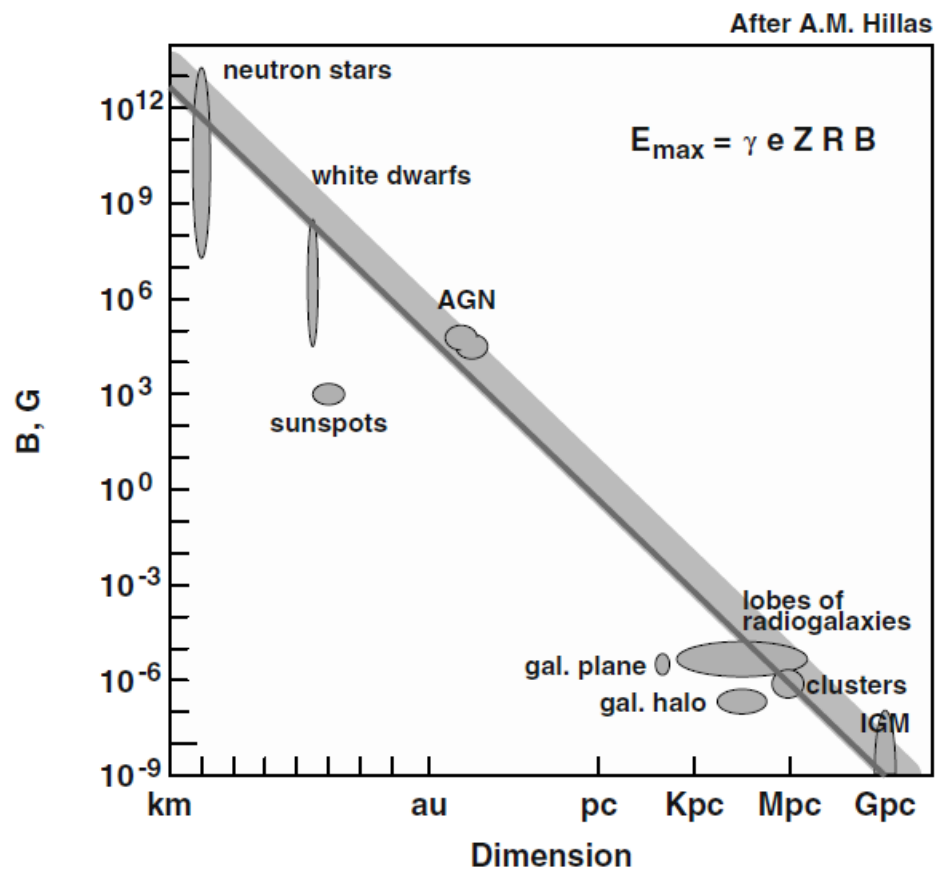
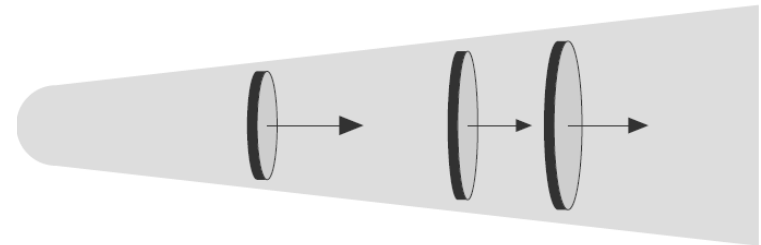
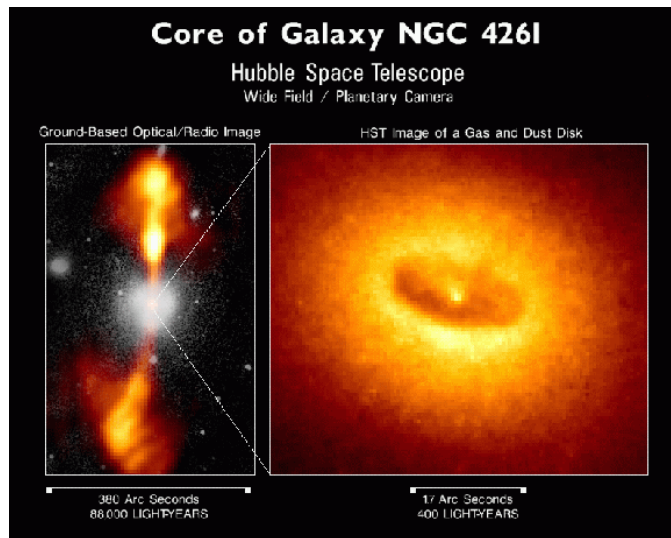
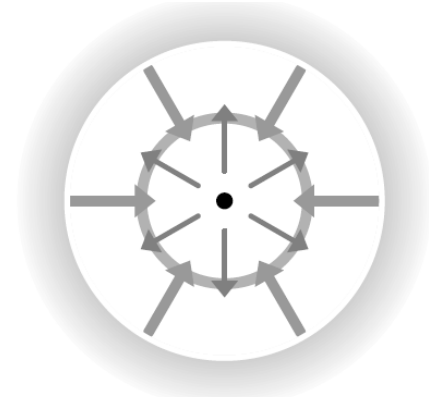
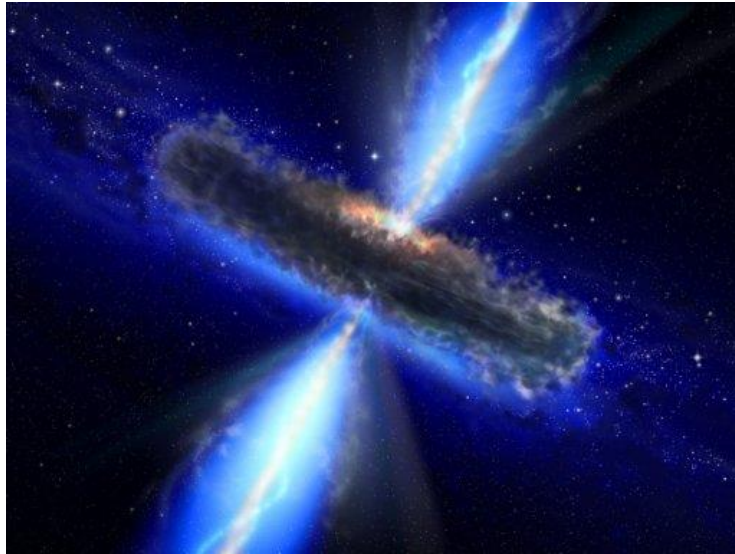


FIGURE 6. Left: Sky map in (equatorial coordinates) of flux, in $\text{km}^{-2} \text{yr}^{-1} \text{sr}^{-1}$ units, smoothed in angular windows of 45° radius, for observed events with energies $E > 8 \text{ EeV}$ (from [48]). Right: The sky map (in Galactic coordinates) shows the events with $E \geq 58 \text{ EeV}$, together with the Swift AGNs brighter than $10^{44} \text{ erg s}^{-1}$ and closer than 130 Mpc , indicated by red circles of 18° radius (from [16]).

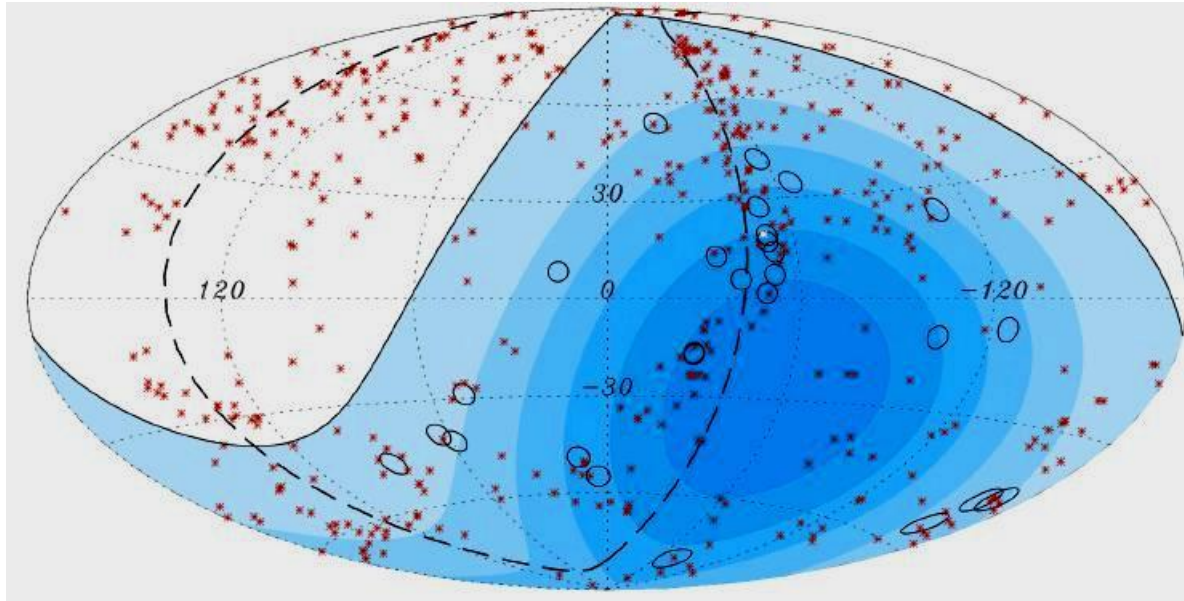
Διάγραμμα Hillas



Ερμηνεία πιθανοί μηχανισμοί.



Συσχέτιση γεγονότων με πηγές.



- Οι κύκλοι αντιστοιχούν σε 27 K.A. με ενέργεια μεγαλύτερη από 57 EeV.
- Ο κύκλος αντιστοιχεί σε γωνιακή ακτίνα 3.1° από τη διεύθυνση της K.A.
- Τα κόκκινα σημάδια αντιστοιχούν σε γνωστά AGN σε απόσταση μικρότερη από 75 Mpc.
- 12 K.A. συμπίπτουν με AGN.
- Μεγαλύτερη πυκνότητα γύρω από τον ραδιογαλαξία Cen. A (Α Κενταύρου)

Για $E=10^{20}$ eV, $B=10^{-9}$ G, $d=20$ Mpc $\rightarrow \theta \sim 10^\circ$
για τυχαία μαγν. πεδία $\rightarrow \theta \sim 2^\circ$

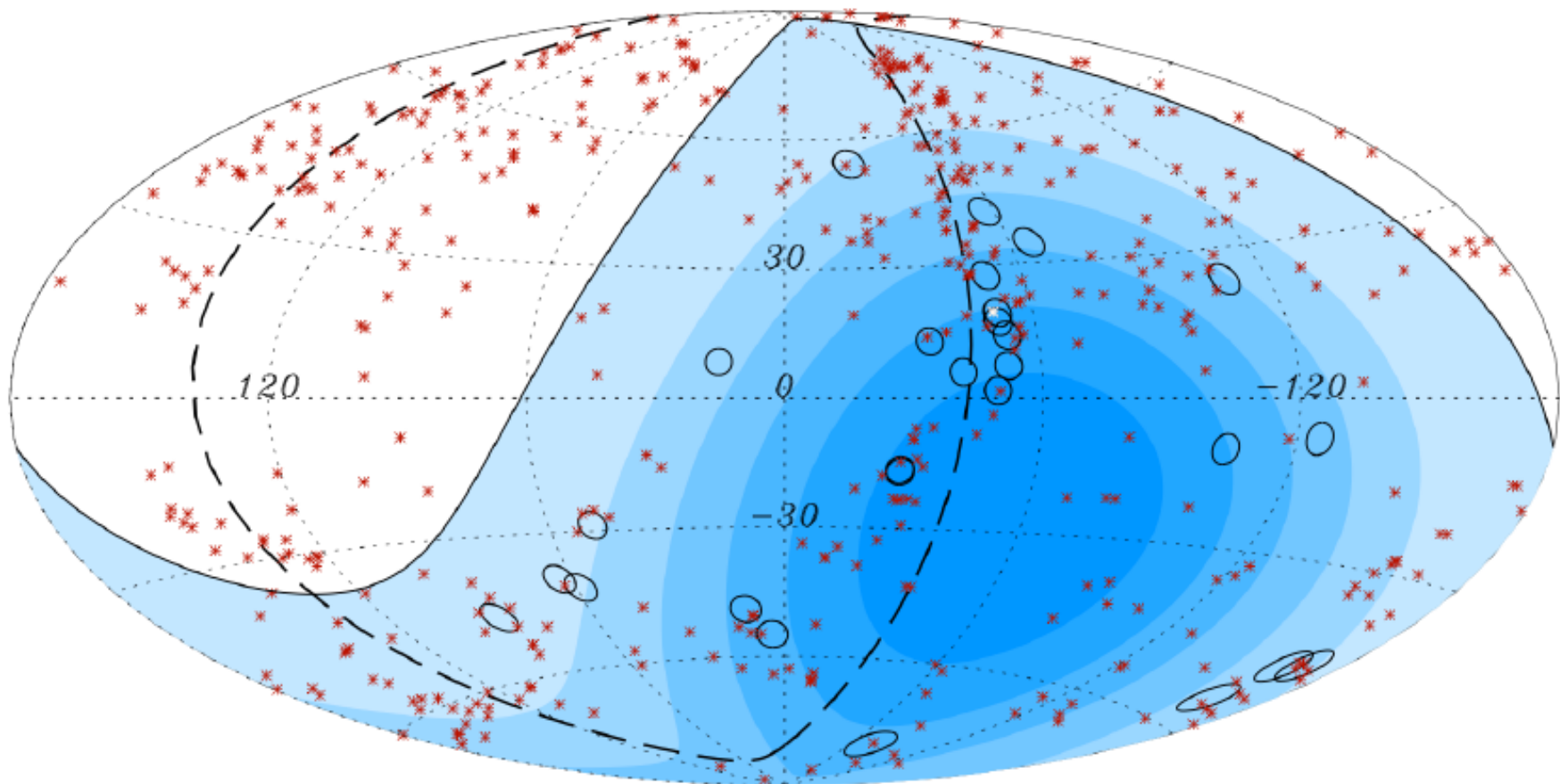
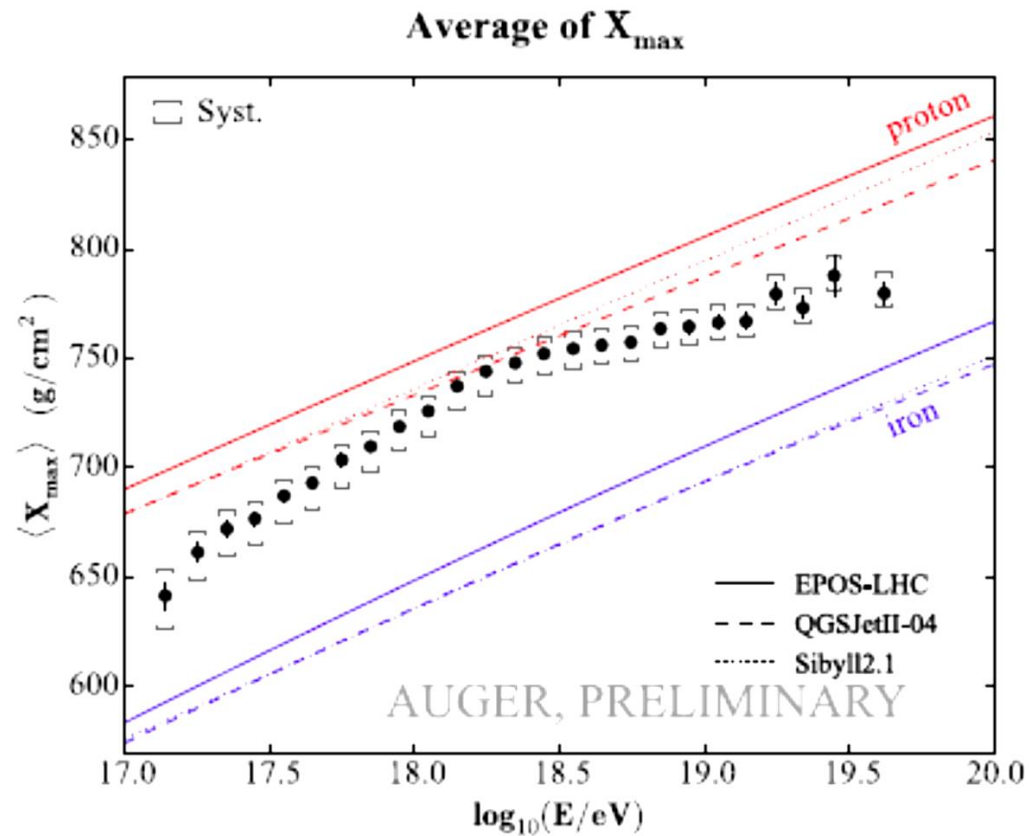


Figure 2: Aitoff projection of the celestial sphere in galactic coordinates with circles of radius 3.1° centered at the arrival directions of the 27 cosmic rays with highest energy detected by the Pierre Auger Observatory. The positions of the 472 AGN (318 in the field of view of the Observatory) with redshift $z \leq 0.018$ ($D < 75$ Mpc) from the 12th edition of the catalog of quasars and active nuclei (12) are indicated by red asterisks. The solid line represents the border of the field of view (zenith angles smaller than 60°). Darker color indicates larger relative exposure. Each colored band has equal integrated exposure. The dashed line is the supergalactic plane. Centaurus A, one of our closest AGN, is marked in white.

ενδείξεις για βαρύτερους πυρήνες



Βοηθητικές

