

Ακτίνες Υπερυψηλών Ενεργειών.

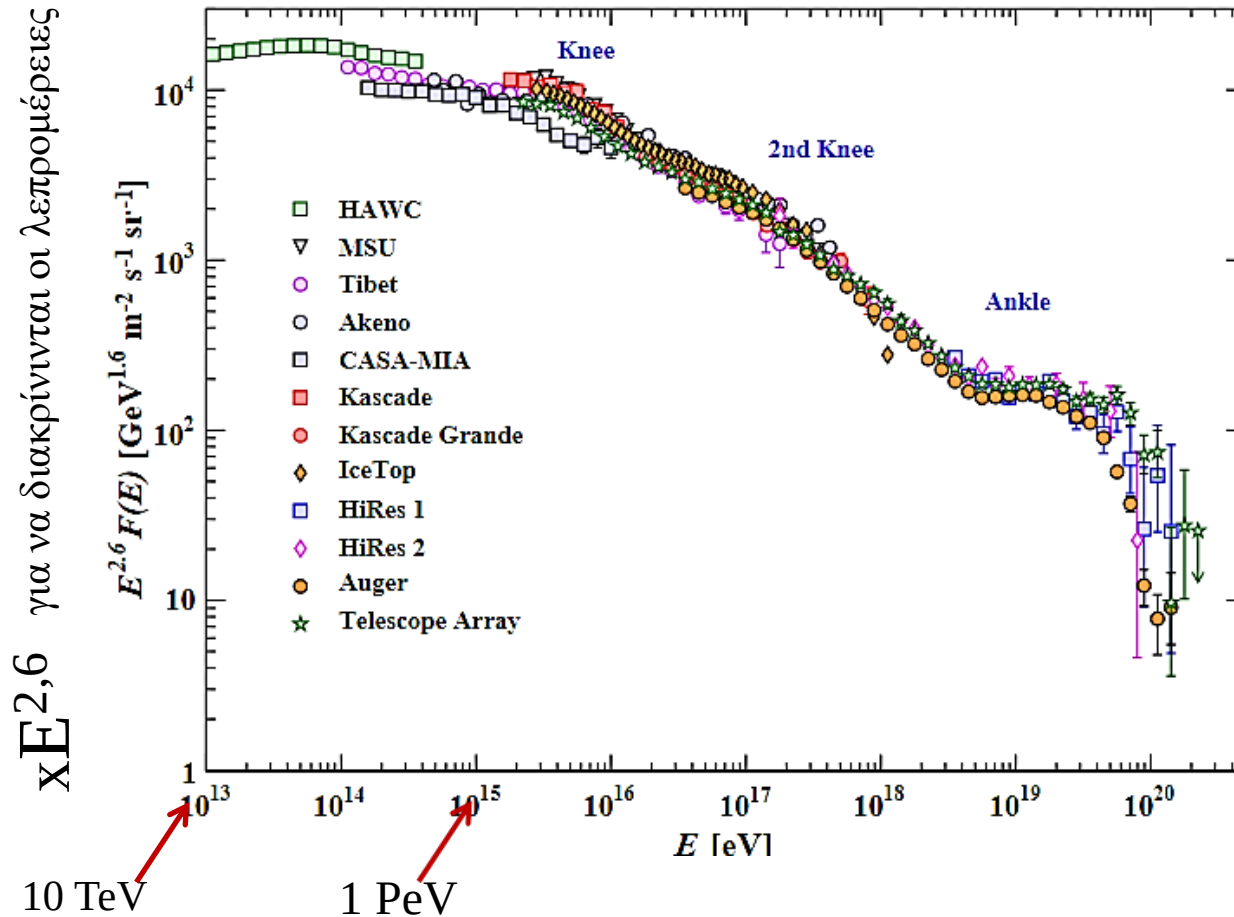
UHECR

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](#)

Καταιονισμοί μεγάλης ενέργειας



Τα σωματίδια έχουν μετρηθεί από διατάξεις ανιχνευτών. Δεν γίνεται διάκριση του είδους των πυρήνων. (PDG 2019). Με την αύξηση της στατιστικής εμφανίστηκε δεύτερο «γόνατο».

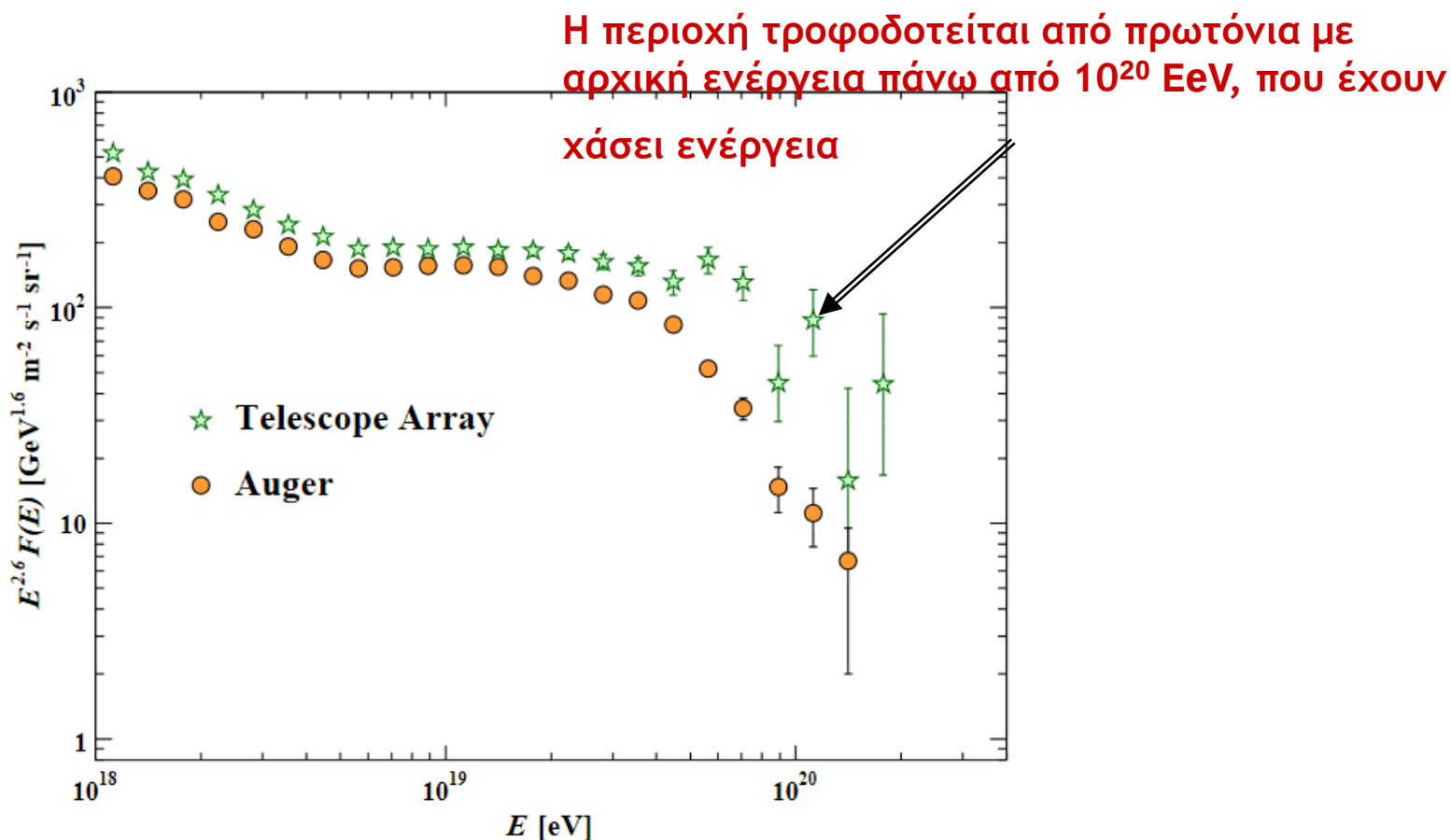
Το λεγόμενο γόνατο σχηματίζεται στα 3 PeV ($3 \cdot 10^6$ GeV) .

- a) Οι μηχανισμοί επιτάχυνσης στα SNR έχουν φθάσει στα όρια της ενέργειας τους, (διαστάσεις, μαγνητικό πεδίο). Στο όριο φθάνουν πρώτα τα πρωτόνια, ακολουθούν οι βαρύτεροι πυρήνες. Επειδή ο μηχανισμός στηρίζεται στο μαγνητικό πεδίο, η επιτάχυνση εξαρτάται από την ακαμψία που είναι ενέργεια / μονάδα φορτίου.
- b) Οι πυρήνες H λόγω της μεγάλης ταχύτητας έχουν μικρότερο χρόνο παραμονής στον γαλαξία.
- c) Στις υψηλές ενέργειες οι μετρήσεις γίνονται με την ανίχνευση καταιονισμών και δεν μπορούμε να διακρίνουμε το είδος του πυρήνα. Σε αυτήν την περιοχή ενεργειών, επικρατούν οι πυρήνες Fe όχι H. Λόγω του ατομικού αριθμού εμφανίζονται υψηλότερα στην ενεργειακή κλίμακα.

Δεύτερο «γόνατο» στα 10^{17} eV

- a) Με την αύξηση της στατιστικής εμφανίστηκε δεύτερο γόνατο. Μάλλον οφείλεται στην ίδια αιτία, όταν η ακαμψία των πυρήνων Σιδήρου φθάσει στα όρια του μηχανισμού.
- b) Σύμφωνα με τον Gaisser, οι καταιονισμοί από βαρύτερους πυρήνες περιέχουν περισσότερα μίονια. Υπάρχουν σχετικές ενδείξεις στο πείραμα KASKADE.
- c) Άλλη υπόθεση: άγνωστη πηγή ακτίνων UHE στον γαλαξία

Γεγονότα μέγιστης ενέργειας



Οι υψηλότερες ενέργειες που μετρήθηκαν. Είναι καθαρή
η απότομη μεταβολή της κλίσης.

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,
 - $\sim 1 \text{ km}^{-2} \text{ y}^{-1}$ above 10^{19} eV,
 - $\sim 1 \text{ km}^{-2}$ per century above 10^{20} eV.

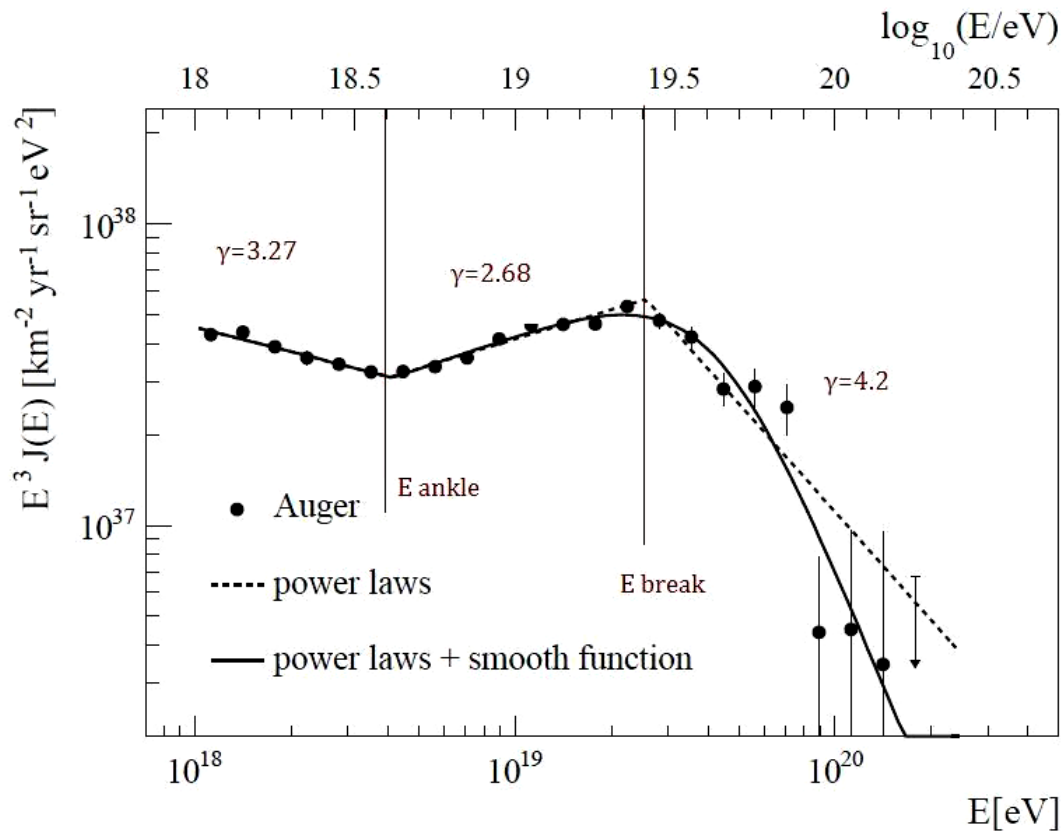
Εξωγαλαξιακές πηγές, Αποκοπή GZK

- Στην περιοχή πάνω από 10^{18} eV η προέλευση των ακτίνων 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.

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.

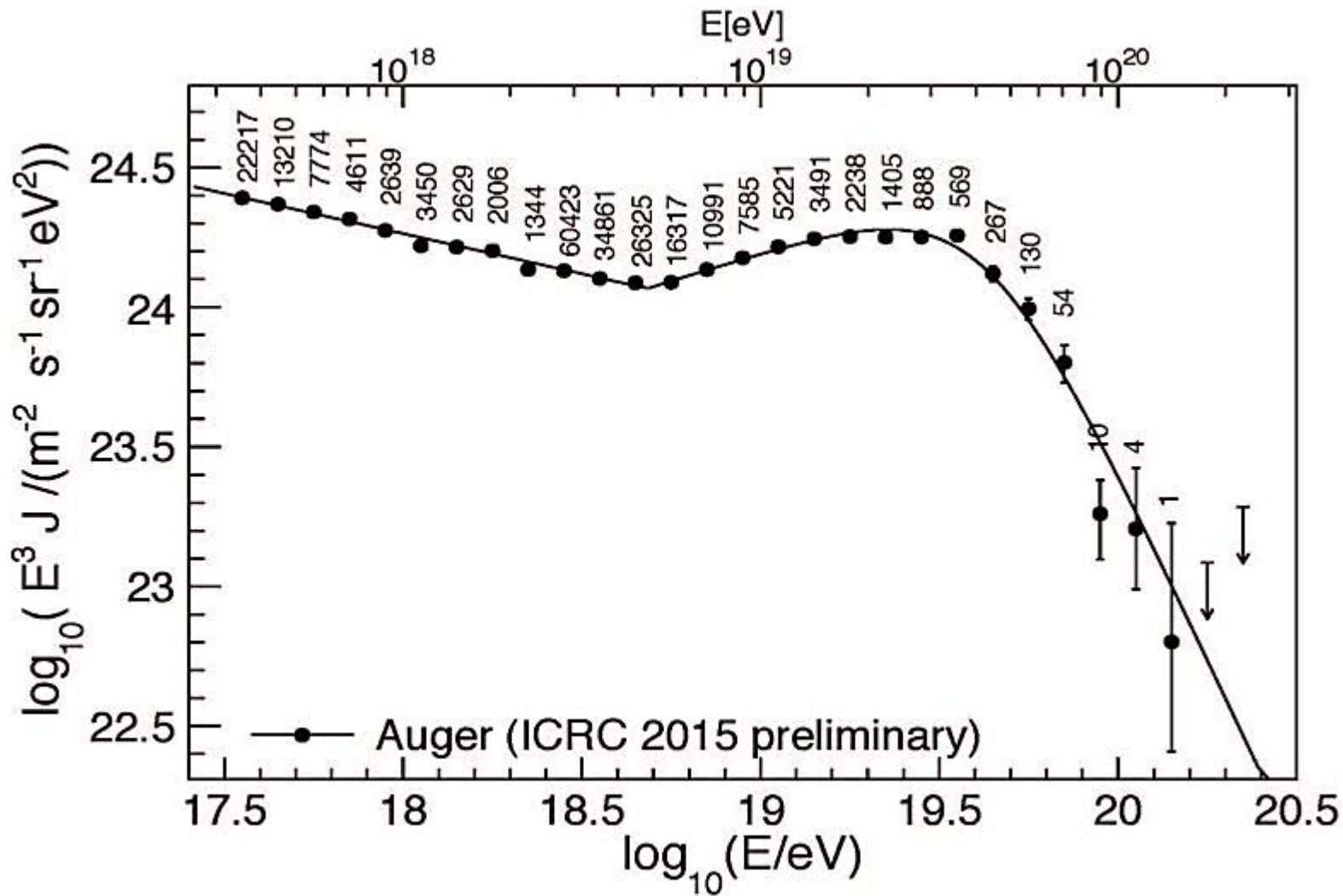
Καμπύλη Auger



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
$\lg(E_{\frac{1}{2}}/\text{eV})$	
$\lg(W_c/\text{eV})$	
χ^2/ndof	$37.8/16 = 2.4$

(2007)

Τα δεδομένα έχουν πολλαπλασιαστεί με E^3 για να φαίνονται οι διαφορές.

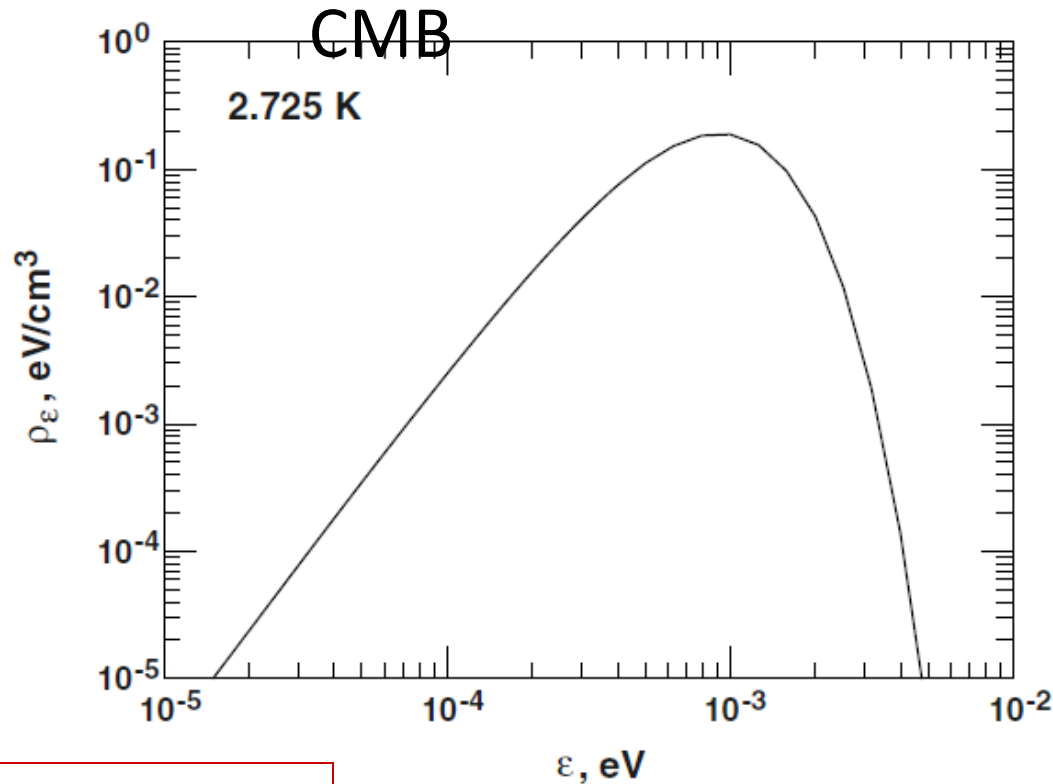


(Auger, $\Delta\epsilon\delta\omicron\mu\epsilon\nu\alpha$ 2015)

Επιτάχυνση κοσμικών ακτίνων σε εξωγαλαξιακές πηγές

Απώλειες ενέργειας στον διαγαλαξιακό
χώρο.

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. Φωτο -Παραγωγή .

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

Υπολογισμός για μετωπική κρούση, ενέργεια κατωφλίου.

CM

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

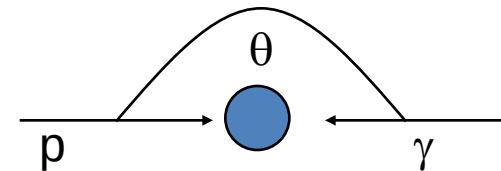
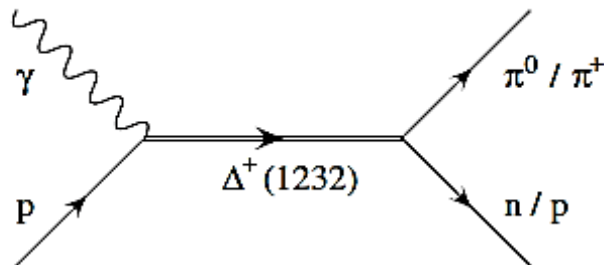
Lab

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

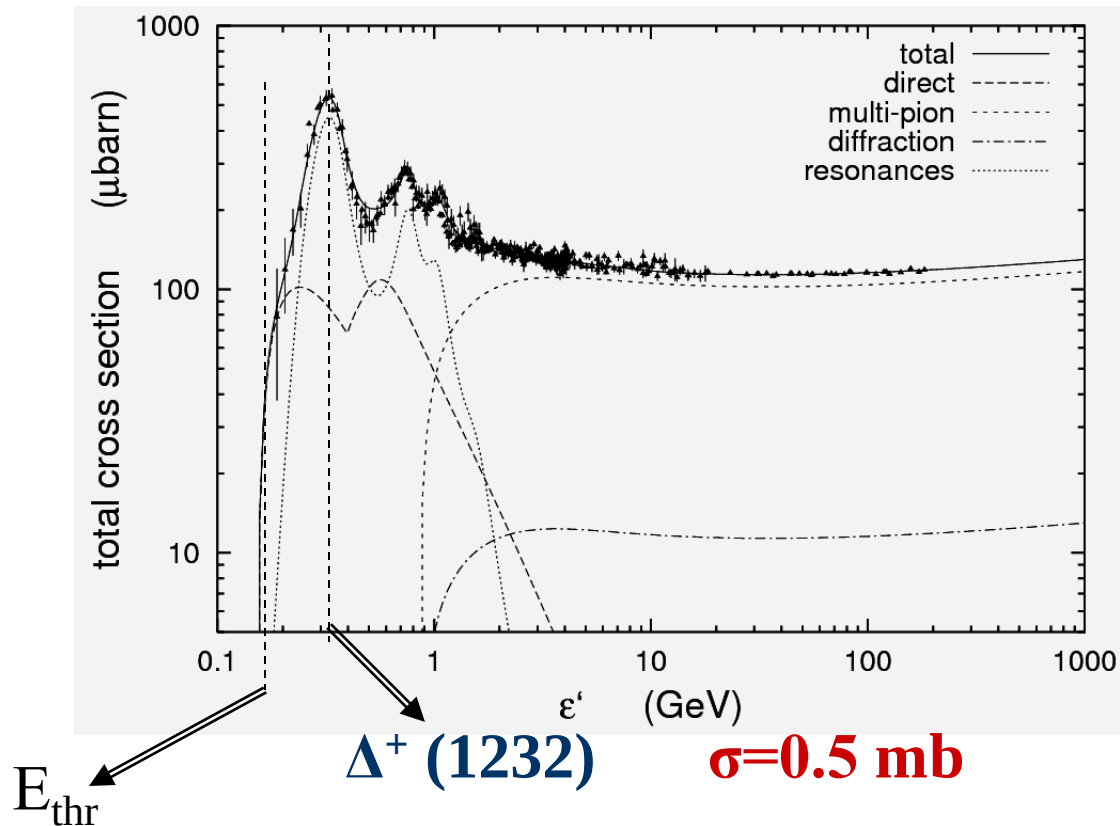
Για :

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

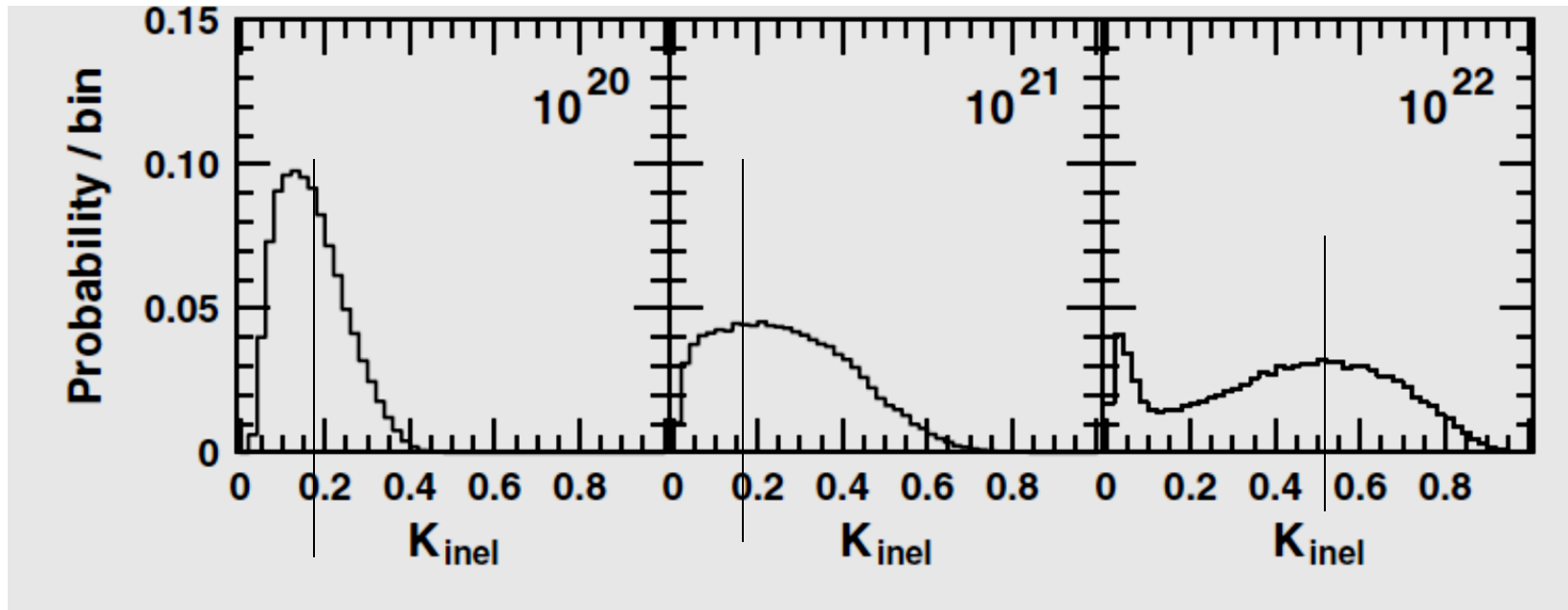
$$\Rightarrow E_p = \frac{m_{\pi^0}^2}{4E_\gamma} (2m_p + m_{\pi^0}) \approx 10^{20} \text{ eV}$$



Φωτοπαραγωγή. (photoproduction)



Ανελαστικότητα

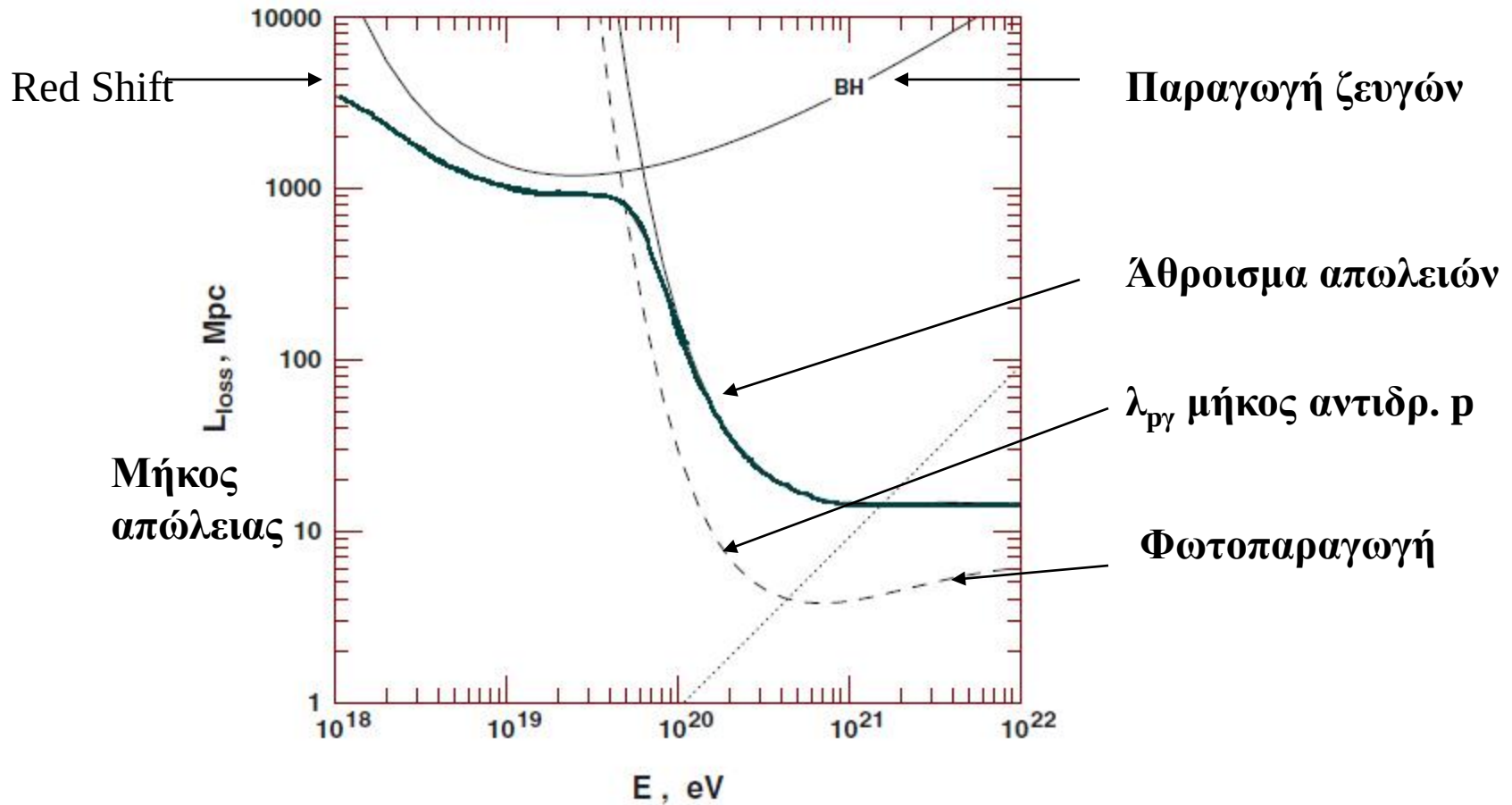


Συντελεστής ανελαστικότητας K_{inel} , για πρωτόνια σε CMB. Η μέση τιμή στα 10^{20} είναι 0.17 στα 10^{21} 0.27 και στα 10^{22} 0.5 και παραμένει σταθερή για υψηλότερες ενέργειες.

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 όταν διασχίζουν τον διαγαλαξιακό χώρο.



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

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!

Ανιχνευτικές Διατάξεις μέτρησης καταιονισμών UHECR

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 .

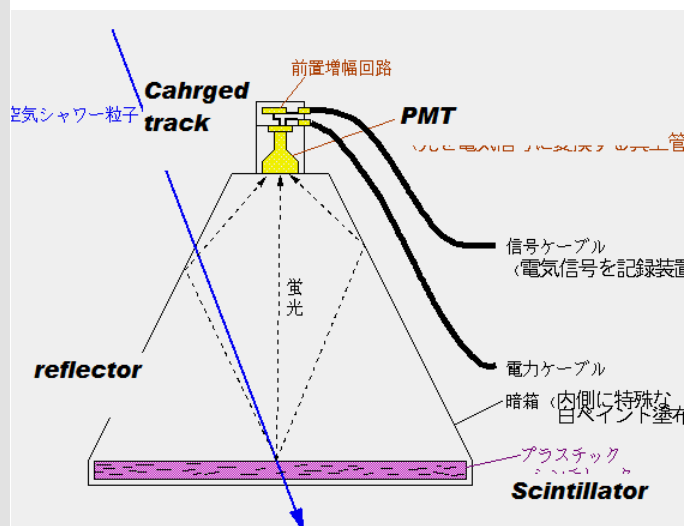
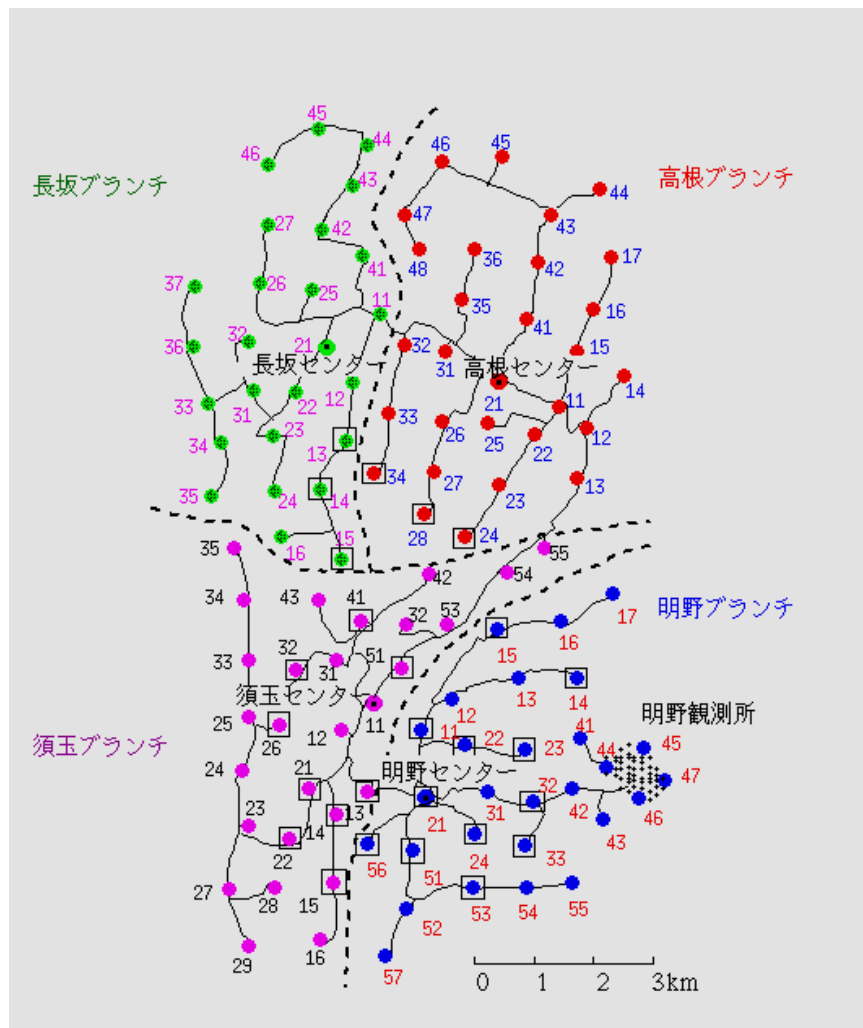
Fly's Eye. (Utah) μετρούσε τη φωταύγεια που προκαλεί ο ιονισμός του αέρα όταν σχηματίζεται καταιονισμός. Αποτελούνταν από 67 κάτοπτρα με 14 PMT το καθένα. Στη συνέχεια εγκαταστάθηκε και δεύτερος ανιχνευτής σε απόσταση $3,3 \text{ km}^2$ που επιβλέπει τον ίδιο όγκο στην ατμόσφαιρα ώστε με την στεροσκοπική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

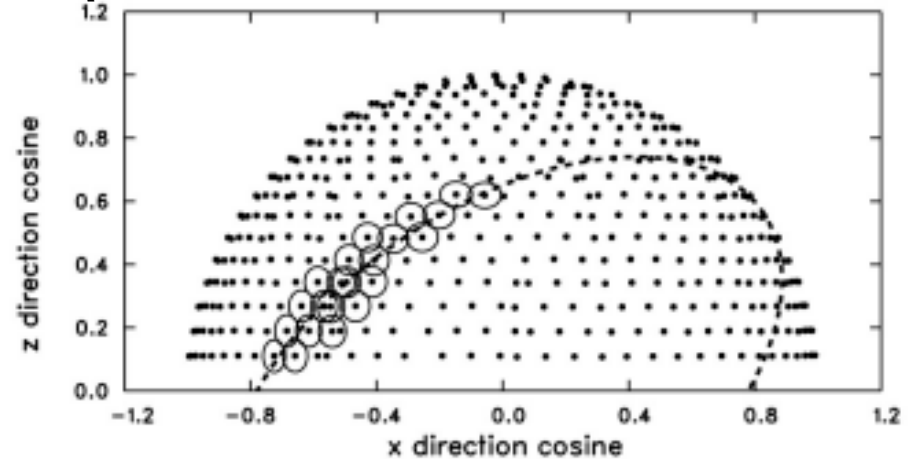
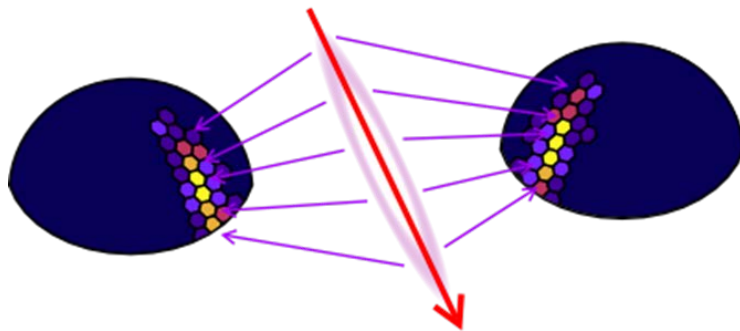
Auger: Είναι ο μεγαλύτερος ανιχνευτής, επιφάνειας 3000 km^2 . Αποτελείται από 1600 ανιχνευτές Cerenkov. Επίσης περιφεριακά καλύπτεται από 4 σταθμούς φωταύγειας με κάτοπτρα 11 m^2 και 440 PMT. Μπορεί και συλλέγει γεγονότα από μικρές ενέργειες. Σε πολλά γεγονότα έχει όψεις σε δύο ή τρεις σταθμούς φωταύγειας.

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 μόνον από μια ομάδα ο προσδιορισμός της απόστασης υπολογίζεται από τον χρόνο πού μετρούν διαδοχικοί PMTs

Υπολογισμός φωταύγειας.

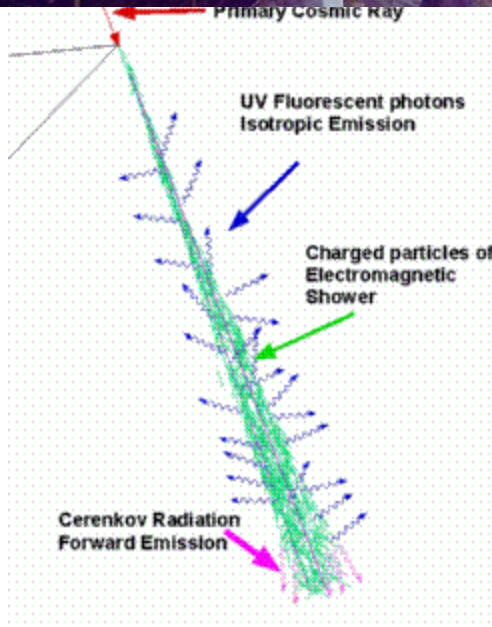
Έστω ο πυρήνας του κατ. έχει μήκος 700m και σχηματίζεται σε απόσταση 20 km από τον ανιχνευτή. Αν περιέχει 10^9 ηλεκτρόνια θα δώσουν $2,8 \cdot 10^{12}$ φωτόνια. Η σφαίρα με ακτίνα 20 km έχει επιφάνεια $5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^2$ άρα 0,056 φωτ/ cm^2 .

Άρα χρειαζόμαστε μεγάλη επιφάνεια συλλογής και καταιονισμό πολύ μεγάλης ενέργειας.

Πείραμα HiRes

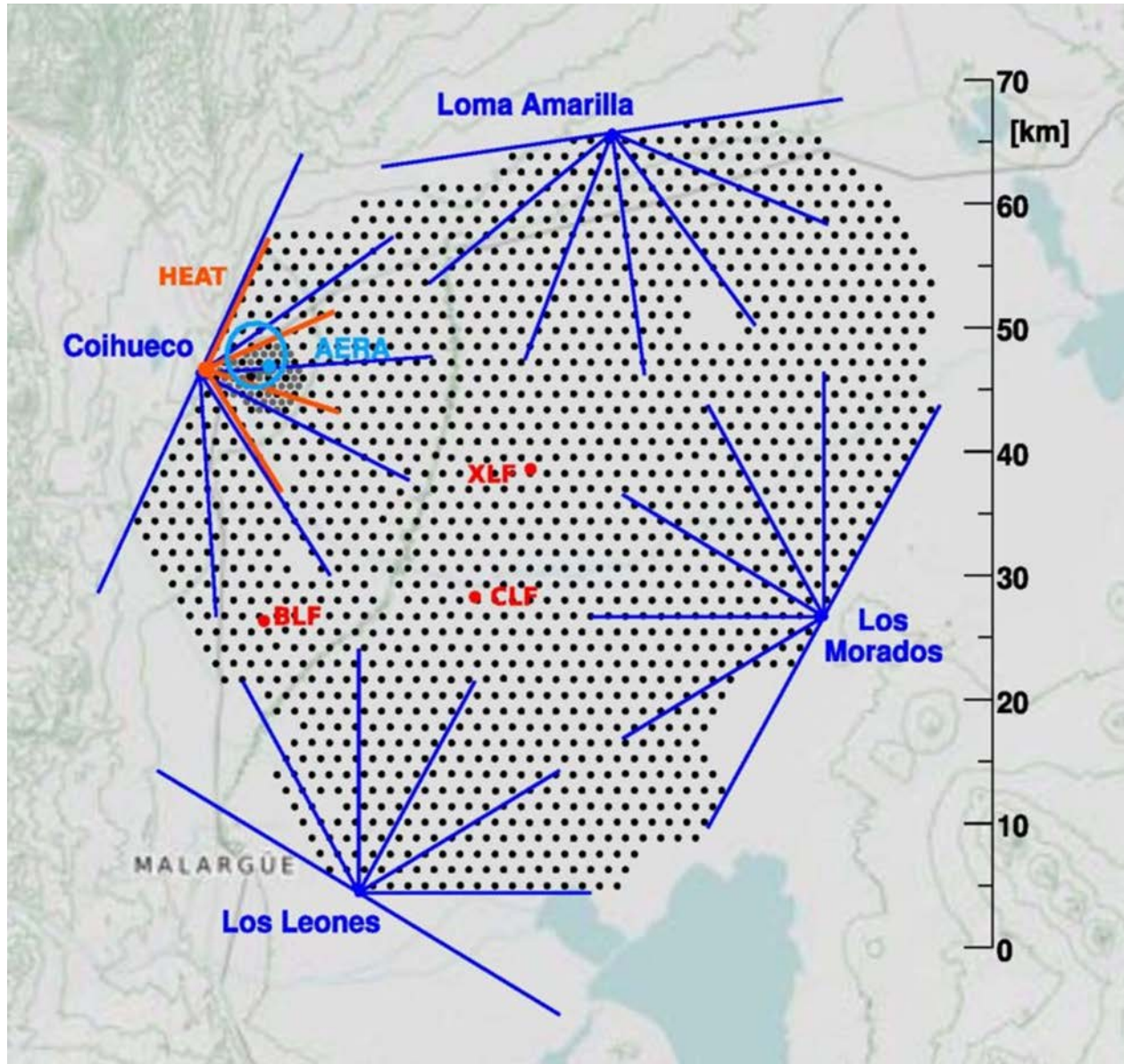


Μετρά την ακτινοβολία που προκαλείται από τον ιονισμό του αέρα. Χρησιμοποιούνται κάτοπτρα με φωτοπολλαπλασιαστές. Τα κάτοπτρα προσανατολίζονται ώστε να καλύπτουν μια μεγάλη περιοχή του ουράνιου θόλου. Ο αριθμός των φωτονίων που συλλέγονται είναι μικρός και μόνον EAS με ενέργεια πάνω από 10^{17} eV μπορούν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



•Φωταύγεια από καταιονισμό.

Πείραμα Auger



Πείραμα Auger

Επιφάνεια : 3000 km^2 υψόμετρο 1700 m 870 gr/cm^2

Τα σημεία αντιστοιχούν στους ανιχνευτές Cerenkov (δεξαμενές νερού).
 1600 wcd (ντεπόζιτα 12 τόνοι νερού Cerenkov $3 \text{ PMT } 9''$)

Περιμετρικά, τέσσερις σταθμοί μέτρησης φωταύγειας, οι ακτίνες δείχνουν την διεύθυνση των κατόπτρων.

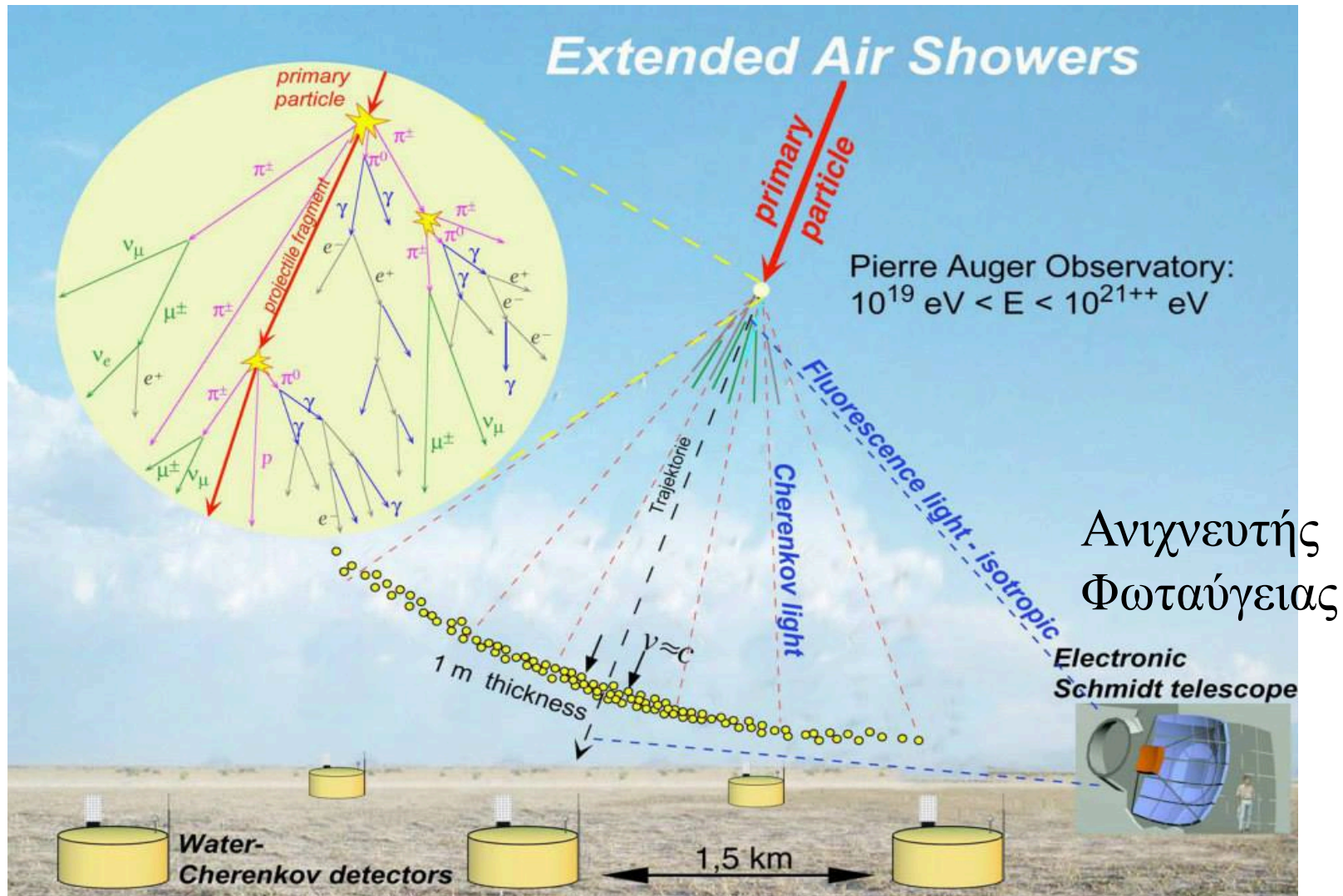
24 ανιχνευτές φωταύγειας. Επιφάνεια 11 m^2 440 PMT

3 ανιχνευτές φωταύγειας μεγάλης γωνίας απόκλισης

Επίσης ανιχνευτές ραδιοκυμάτων, 153 δίπολα $30\text{-}80 \text{ Mhz}$

Ρυθμός γεγονότων κε ενέργεια πάνω 10^{20} eV . γεγονότα $/1000 \text{ km}^2 \text{ sr century}$.

Πείραμα Auger



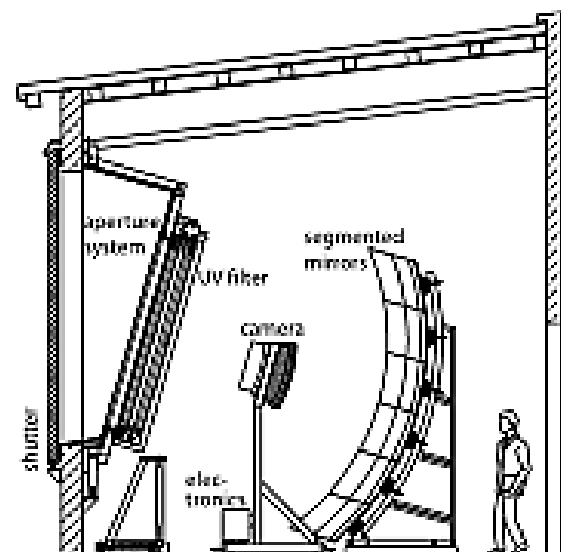
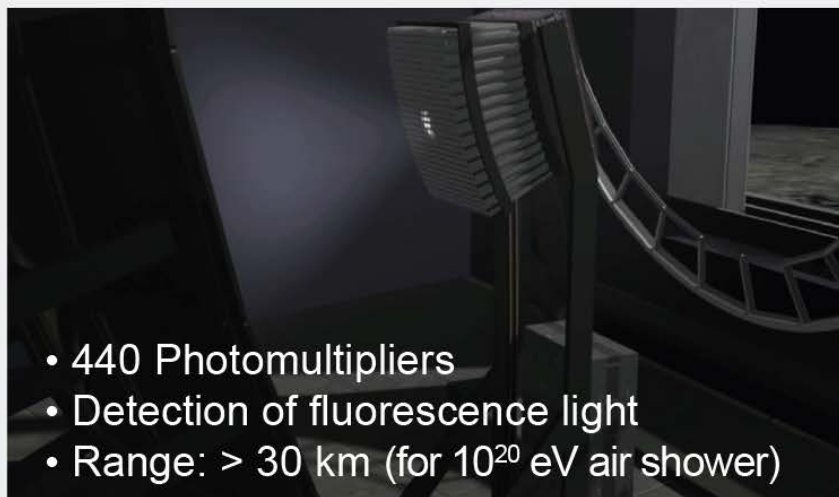
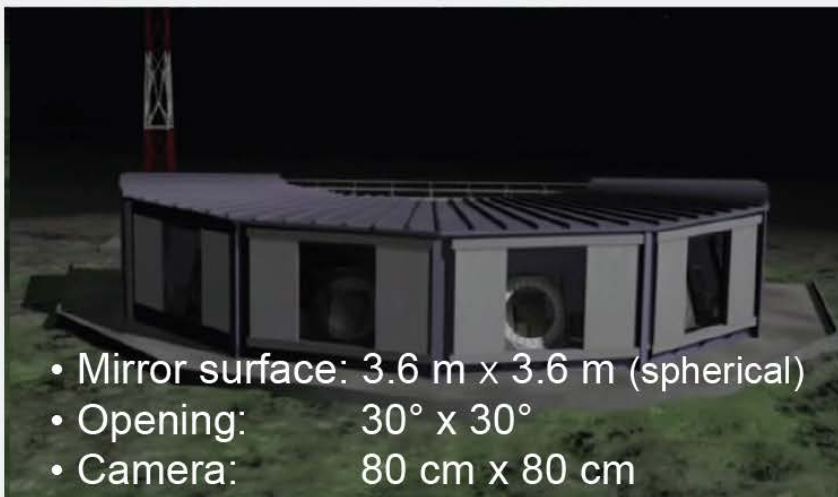
Ανιχνευτής
Φωταύγειας

Ντεπόζιτα Cerenkov

Fluorescence Detector

27 fluorescence telescopes
(in 4 different places)

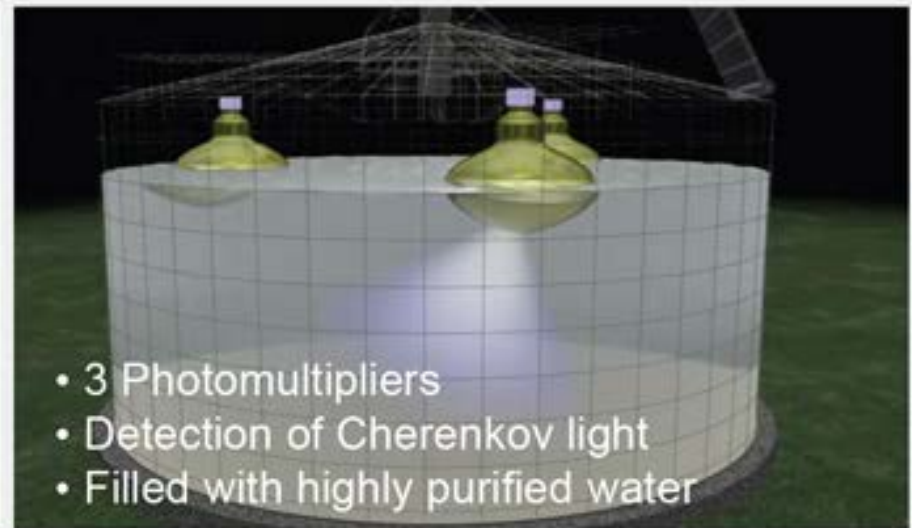
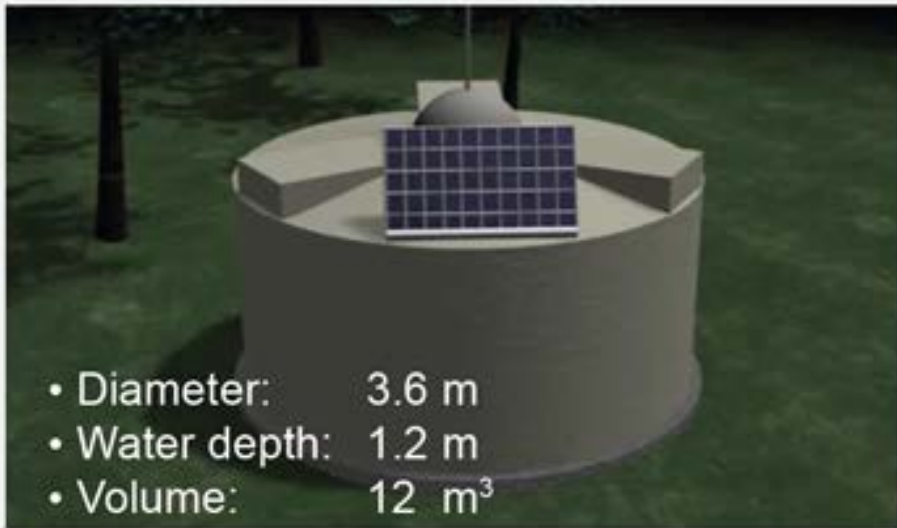
Auger, Ανιχνευτής Φωταύγειας



Auger, Ανιχνευτής Cerenkov, Δεξαμενή νερού.

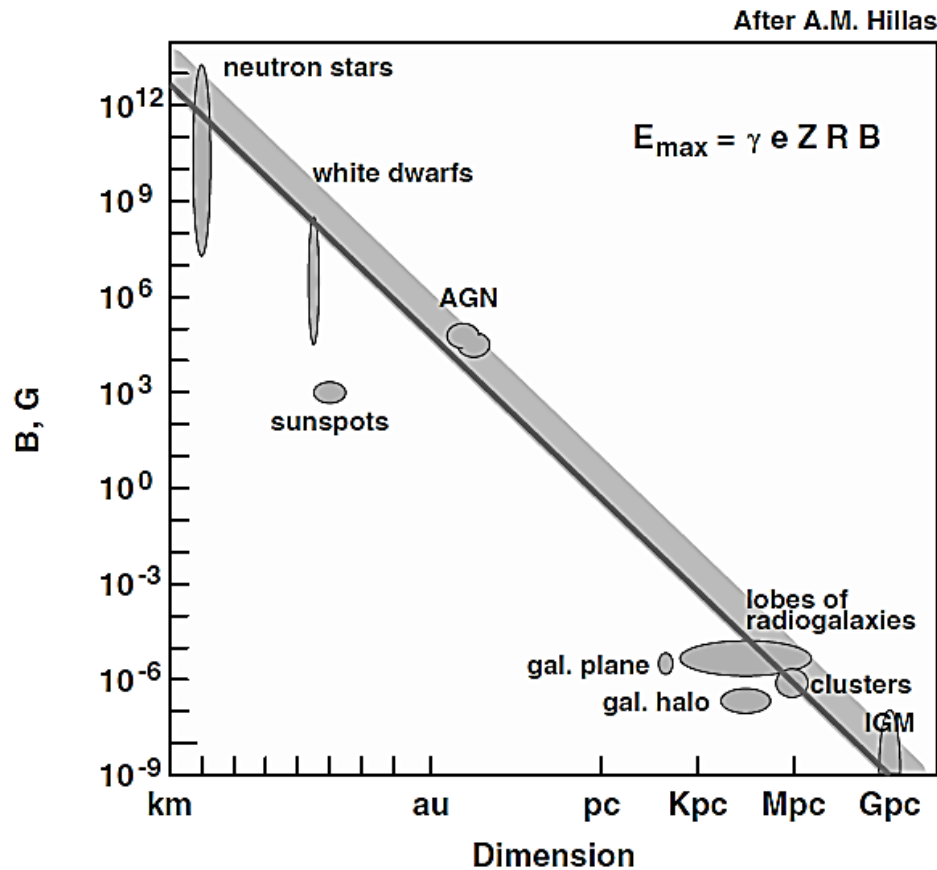
Surface Detector

1,660 surface detector stations
(1,500 m apart from each other)



Surface detector (SD) station, or 'tank', of the Pierre Auger Observatory

Διάγραμμα Hillas



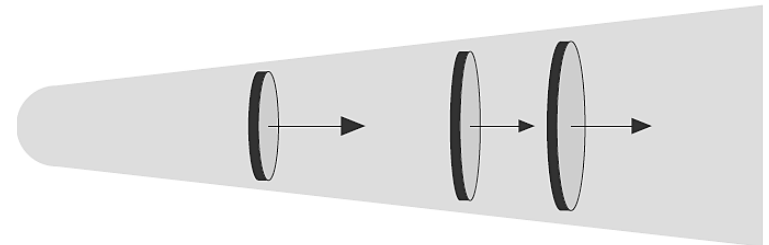
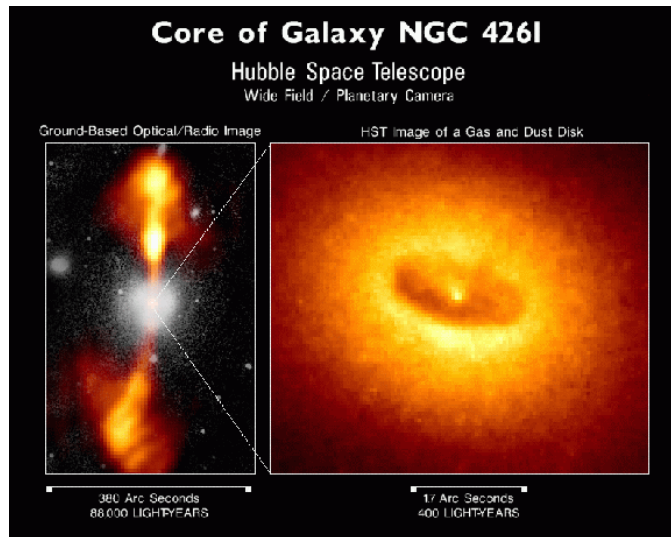
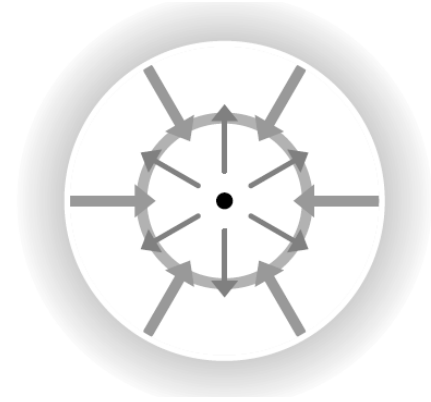
Προκειμένου να επιταχυνθούν οι πυρήνες πρέπει να συγκρατηθούν από το μαγνητικό πεδίο παραμένουν στην περιοχή της πηγής. Η τελική ενέργεια που θα αποκτήσουν, εξαρτάται από την ακτίνα της πηγής R και τον ένταση του μαγνητικού πεδίου B . Στο διάγραμμα B, R τοποθετούνται τα αντικείμενα που επιταχύνουν πυρήνες

Πιθανές πηγές ακτίνων UHE

Η διαγώνια γραμμή
αντιστοιχεί στα 10^{20} eV.
Τα αντικείμενα πάνω από
την γραμμή είναι πιθανές
πηγές ακτίνων UHE με
 $E > 10^{20}$ eV.

Σαν πιθανές πηγές διακρίνουμε:
Αστέρες νετρονίων $B > 10^{13}$ G.
AGN (Ενεργοί πυρήνες γαλαξιών).
Ραδιογαλαξίες
Σμήνη γαλαξιών
Gamma Ray Bursts
Γαλαξίες σε σύγκρουση.
Pulsars
Εξωτικά σωματίδια.

Ερμηνεία πιθανοί μηχανισμοί.



Συσχέτιση ακτίνων με πηγές

Αστρονομία UHECR

Στόχος των πειραμάτων αυτών είναι να προσδιοριστούν οι εξωγαλαξιακές πηγές των ακτίνων.

Λόγω των μαγνητικών πεδίων υπάρχει σημαντική απόκλιση στις τροχιές ακόμη και για τις υψηλότερες ενέργειες.

Για πρωτόνιο με $E=10^{20}$ eV, διαγαλαξιακό πεδίο $B=10^{-9}$ G, απόσταση πηγής $d=20$ Mpc προκύπτει $\rightarrow \theta \sim 10^0$
για τυχαία μαγν. πεδία προκύπτει μέση τιμή $\rightarrow \theta \sim 2^0$

Αποτελέσματα πειράματος Auger

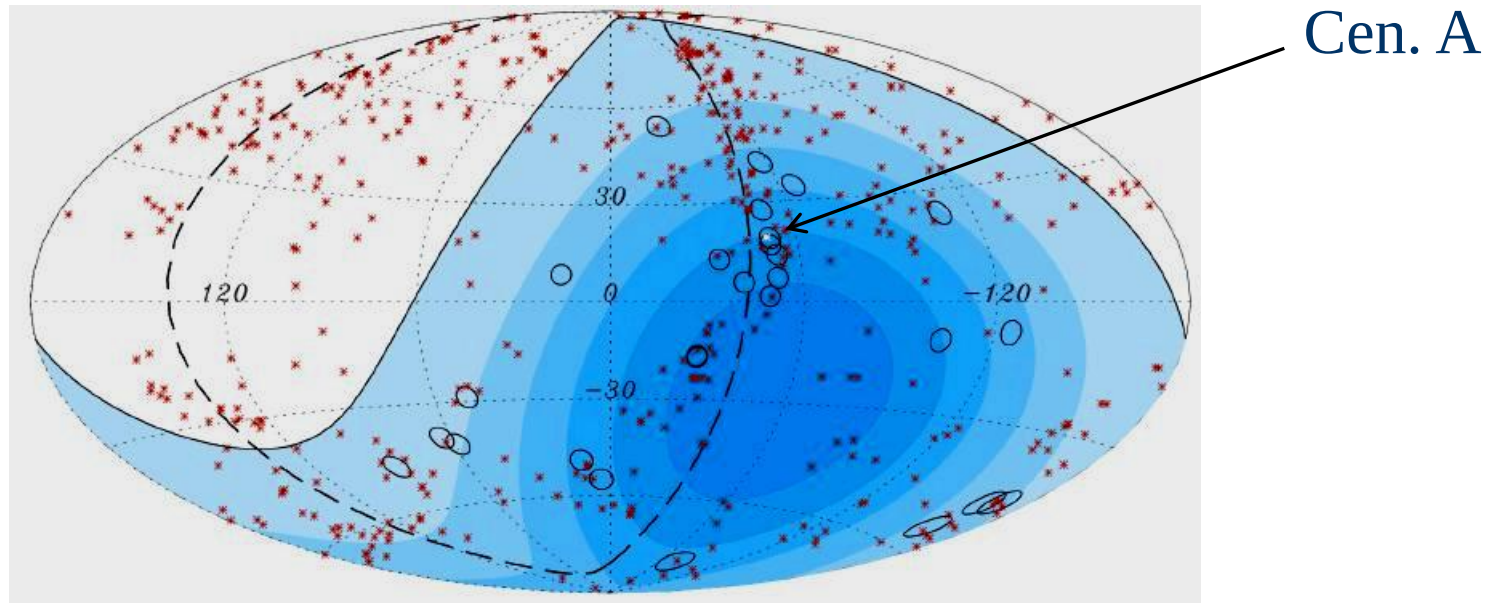
Το πείραμα Auger με την μεγάλη στατιστική, απέδειξε ότι οι διευθύνσεις για ενέργειες E^{18} eV είναι κατανομημένες ισότροπα. Προφανώς λόγω μαγνητικού πεδίου του γαλαξία έχει χαθεί η αρχική διεύθυνση.

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν όμως τα γεγονότα με ενέργεια μεγαλύτερη από $5.7 \cdot 10^{19}$ eV.

Στο επόμενο διάγραμμα βλέπουμε την προβολή του ουράνιου θόλου σε γαλαξιακές συντεταγμένες. Η γαλαξια περιοχή αντιστοιχεί στο οπτικό πεδίο του ανιχνευτή, Η διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί Υπεργαλαξιακό Επίπεδο SGP, δηλαδή το επίπεδο του τοπικού σμήνους γαλαξιών. Οι κόκκινες τελείες οι θέσεις AGN σε απόσταση μικρότερη από 75 Mps.

Παρατηρήθηκε συγκέντρωση κατά μήκος του SGP, κυρίως κοντά στο Cen. Α όπου βρίσκεται ένα από τα πλησιέστερα AGN .

Συσχέτιση γεγονότων με πηγές. 2007



- 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.
- Μεγαλύτερη πυκνότητα γύρω από τον ραδιογαλαξία Cen. A (Α Κενταύρου)
- Η γραμμή ----- αντιστοιχεί στο υπεργαλαξιακό επίπεδο.

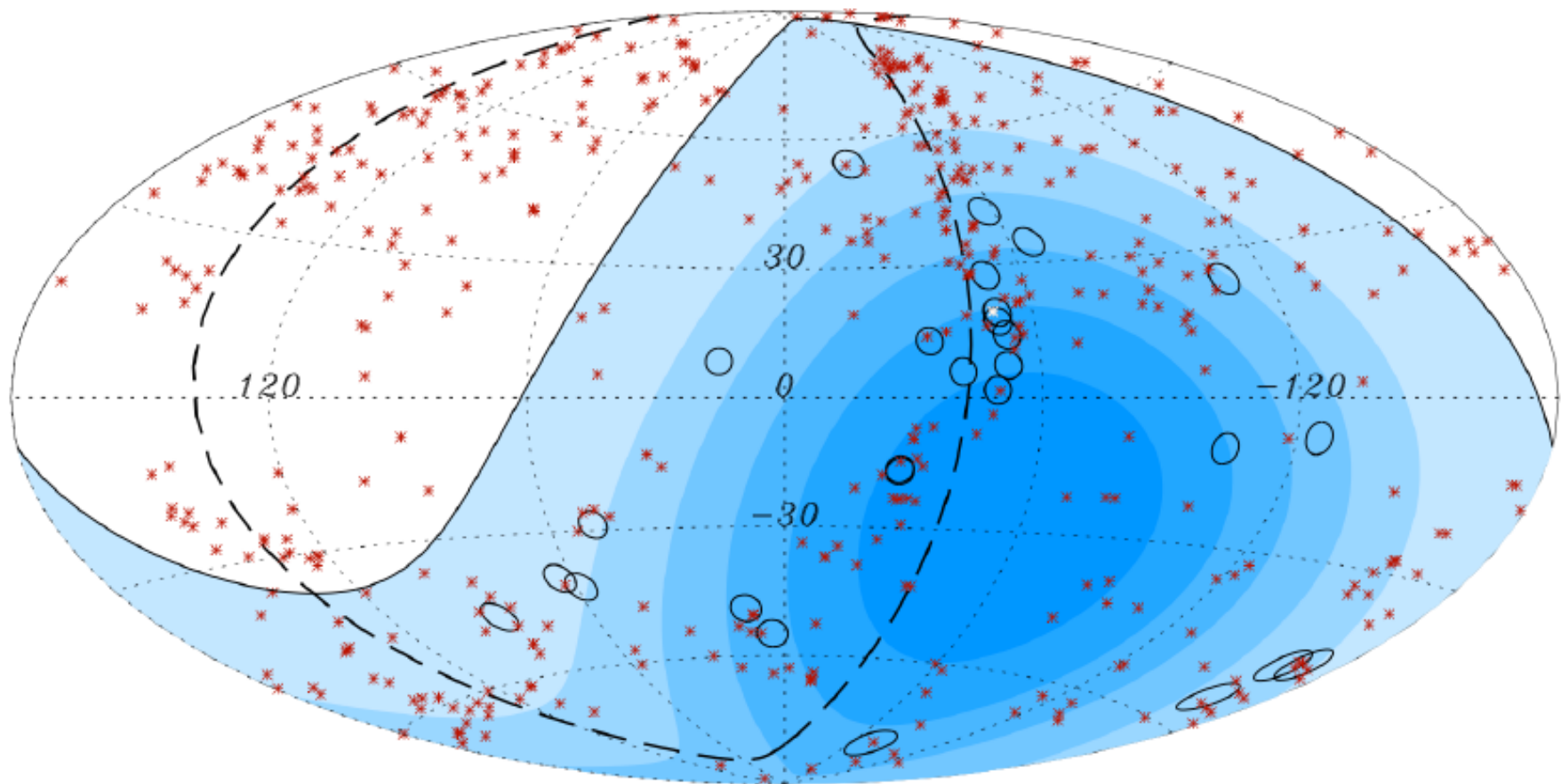
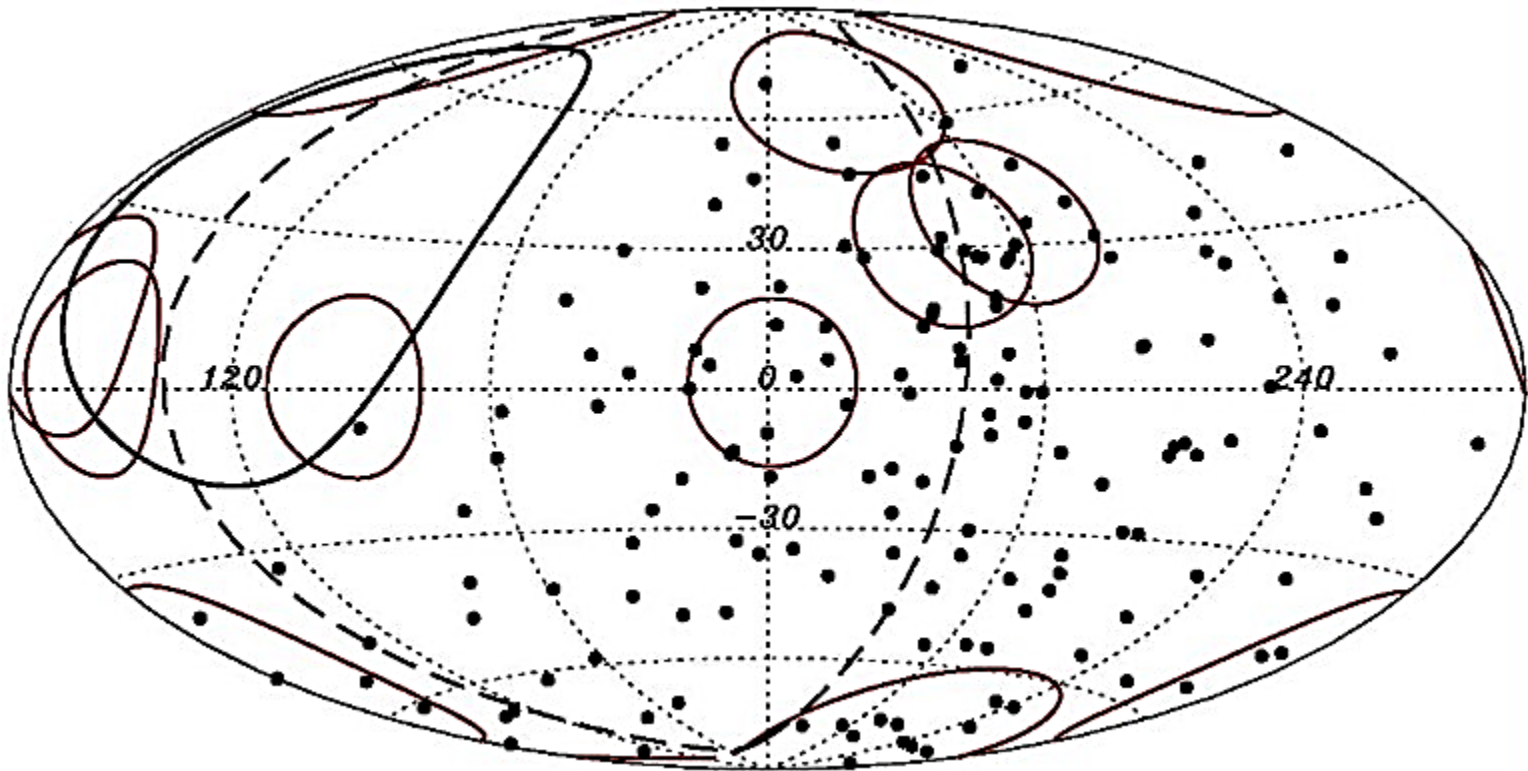


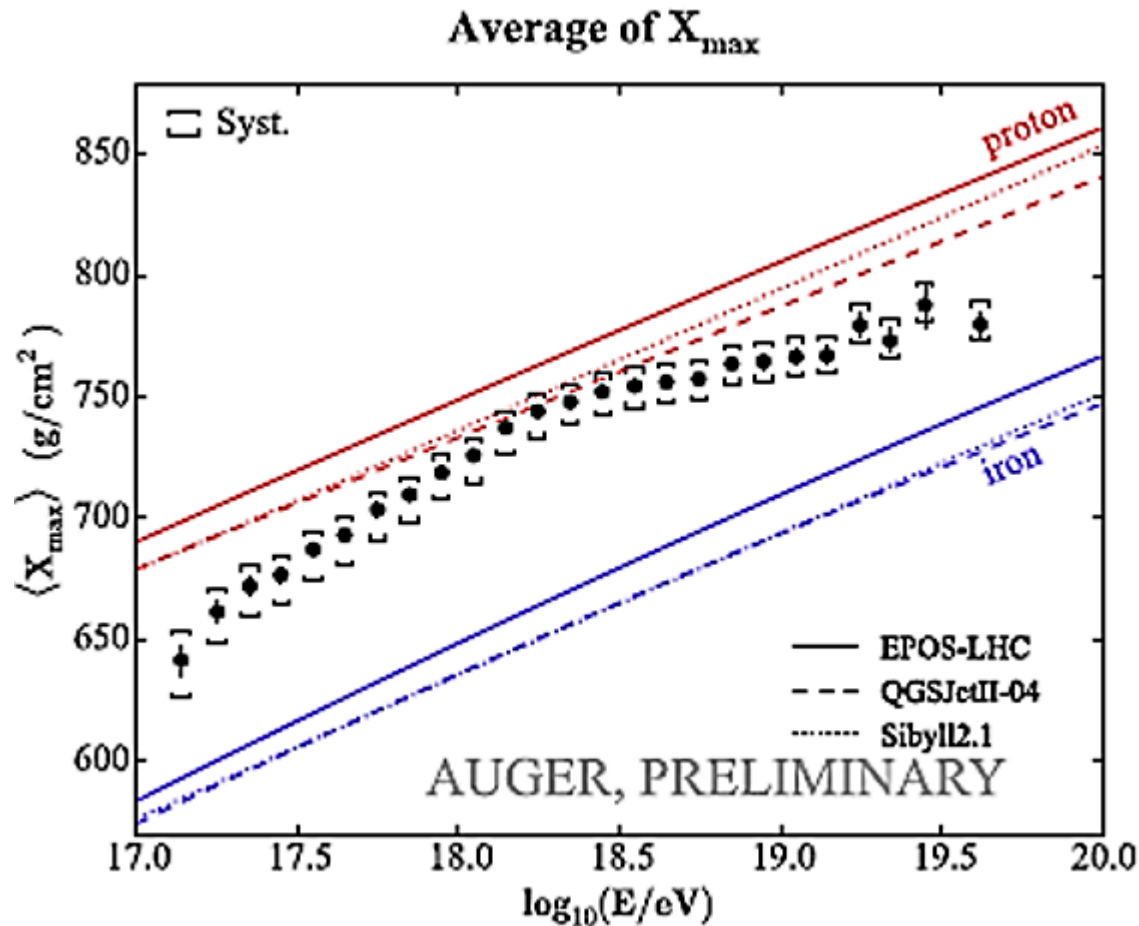
Figure 2: Aitoff projection of the celestial sphere in galactic coordinates with circles of radius 3.1° centered at the arrival directions of the 27 cosmic rays with highest energy detected by the Pierre Auger Observatory. The positions of the 472 AGN (318 in the field of view of the Observatory) with 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.

Συσχέτιση με πηγές 2016



Διάγραμμα σε γαλαξιακές συντεταγμένες, τα σημεία αντιστοιχούν σε ακτίνες με ενέργεια $E > 58 \text{ EeV}$. Οι κύκλοι έχουν κέντρο τα ισχυρότερα AGN (ακτινοβολία $> 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$) και ακτίνα 18° . Διακρίνεται η περιοχή γύρω από το Cen A με 15 γεγονότα στον κύκλο των 18° .

Ενδείξεις για βαρύτερους πυρήνες



Οι πυρήνες Σιδήρου αντιδρούν ψηλότερα στην ατμόσφαιρα, από τους πυρήνες Υδρογόνου. Υπολογίζοντας το ύψος όπου έγινε η αντίδραση, υποθέτουν ότι στις υψηλότερες ενέργειες, αυξάνεται ο αριθμός των πυρήνων Σιδήρου.

Γαλαξιακό μήκος l και πλάτος b .

