

# Extensive Air Showers, Πειράματα

# Δημιουργία αδρονικών καταιονισμών.

Οι αδρονικοί καταιονισμοί δημιουργούνται από αντίδραση πρωτονίων ή πυρήνων υψηλής ενέργειας με τους πυρήνες της ατμόσφαιρας. Τα δευτερογενή που παράγονται, έχουν ακόμη μεγάλη ενέργεια ώστε να αντιδράσουν ξανά και να δώσουν νέα δευτερογενή. Τα δευτερογενή είναι κυρίως η τριάδα  $\pi^+$ ,  $\pi^-$  και  $\pi^0$ .

Στην πρώτη αντίδραση περίπου το 50% της ενέργειας παραμένει στο leading particle, ενώ το υπόλοιπο στη δημιουργία δευτερογενών (inelasticity, ανελαστικότητα). Ο αριθμός των δευτερογενών σε μία αντίδραση εξαρτάται από την ενέργεια του αρχικού, και μπορεί να φθάσει τις δεκάδες σωματίδια.

Τα  $\pi^0$  έχουν πολύ μικρό χρόνο ζωής  $\tau=8.4 \times 10^{-17} \text{ s}$  και διασπώνται σε δύο γάμα. Η διαδρομή διάσπασης για το  $\pi^0$  είναι πολύ μικρή,  $l_d = \gamma * 2.51 \times 10^{-7} \text{ cm}$ .

Τα φορτισμένα πόνια υψηλής ενέργειας, διανύουν σημαντική απόσταση πριν διασπαστούν και συνήθως αντιδρούν πριν τη διάσπαση, διότι έχουν χρόνο ζωής  $\tau=2,6 \times 10^{-8} \text{ s}$ , διαδρομή διάσπασης  $l_d = \gamma \times 780 \text{ cm}$ .

Τα προϊόντα αντίδρασης των  $\pi^+$ ,  $\pi^-$  είναι πάλι η τριάδα των πιονίων.

Το μήκος αντίδρασης των πιονίων είναι  $\lambda_{\text{int}} = 120 \text{ gr/cm}^2$ . Έτσι είναι πιθανόν να διανύσουν μεγάλη απόσταση πριν αντιδράσουν και οι δευτερογενείς καταιονισμοί δίνουν ακανόνιστο σχήμα στον καταιονισμό.

# Αδρονικοί καταιονισμοί.

$\pi^+, \pi^-, \pi^0$

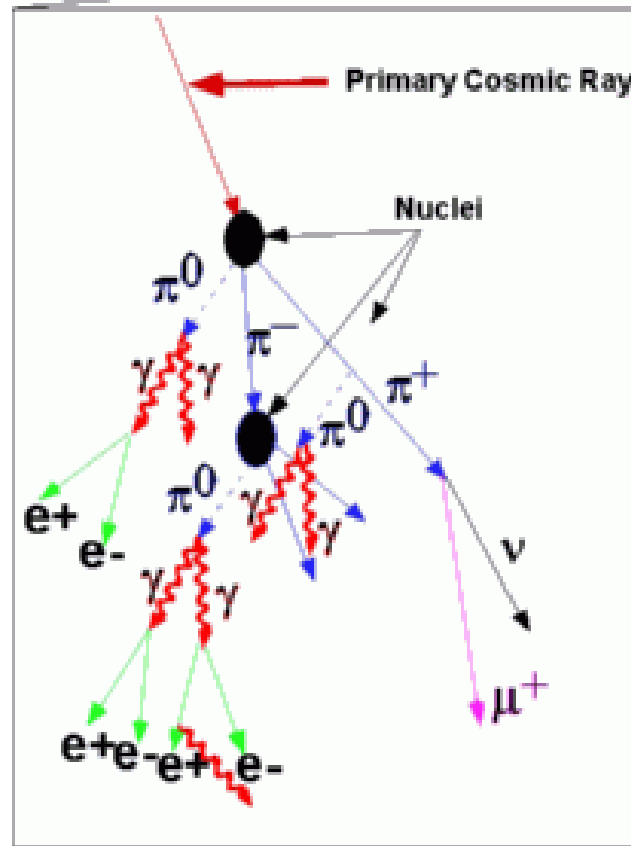
$\pi^0$

$\tau = 8.4 \times 10^{-17} \text{ s}, \quad l_d = \gamma * 2.51 \times 10^{-7} \text{ cm}$

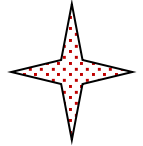
$\pi^\pm$

$\tau = 2.6 \times 10^{-8} \text{ s}, \quad l_d = \gamma \times 780 \text{ cm}$

Λόγω της μεγάλης απόστασης μέχρι την επόμενη αντίδραση των  $\pi^\pm$ , ( $\lambda_\pi = 120 \text{ g/cm}^2$ ) το σχήμα του καταιονισμού είναι ασύμμετρο.



# Αδρονικές αλληλεπιδράσεις στην ατμόσφαιρα



Κατά μέσον όρο 50% της ενέργειας του αρχικού παίρνει το leading particle.

$$p \rightarrow p + \dots$$

Η πολλαπλότητα των δευτερογενών εξαρτάται από την ενέργεια του αρχικού.

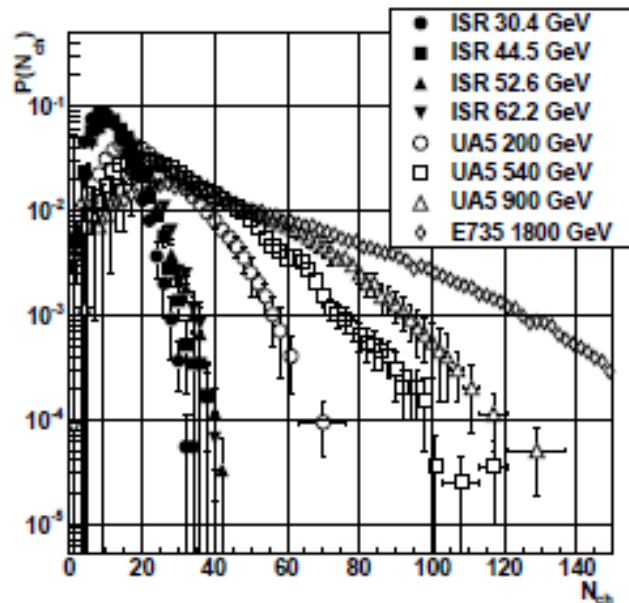
Λόγω της ώθησης Lorentz τα δευτερογενή συγκεντρώνονται σε ένα στενό κώνο.

Τα πολυπληθέστερα είναι τα πόνια λόγω της μικρής μάζας.

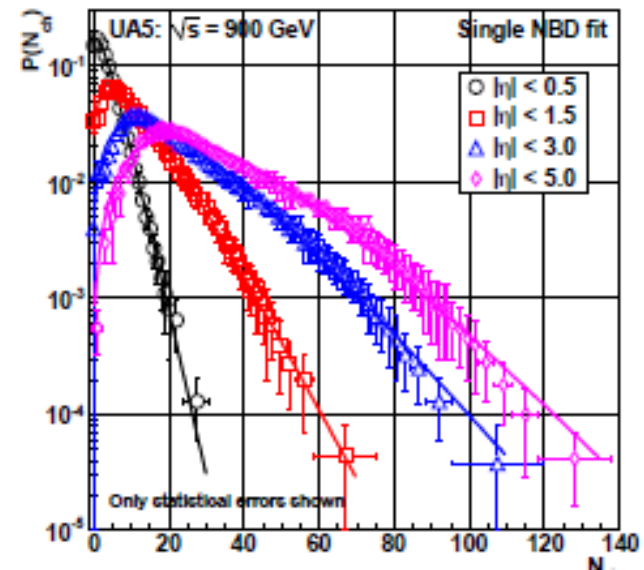
Τα δευτερογενή είτε συνεχίζουν την πορεία τους είτε διασπώνται.

Δημιουργία καταιονισμών.

# Πολλαπλότητα δευτερογενών.

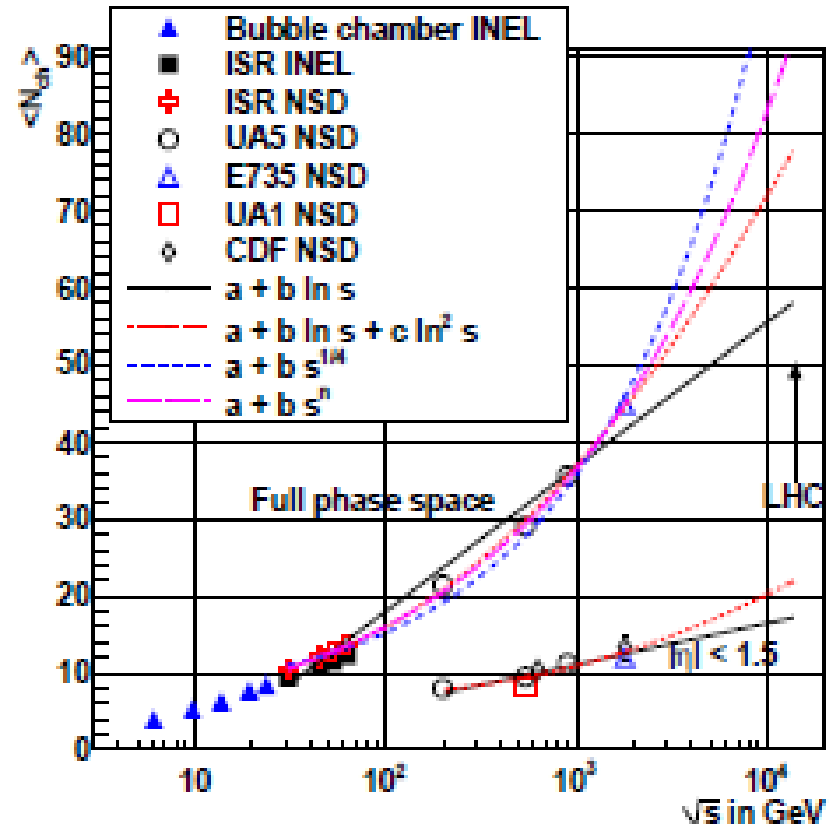
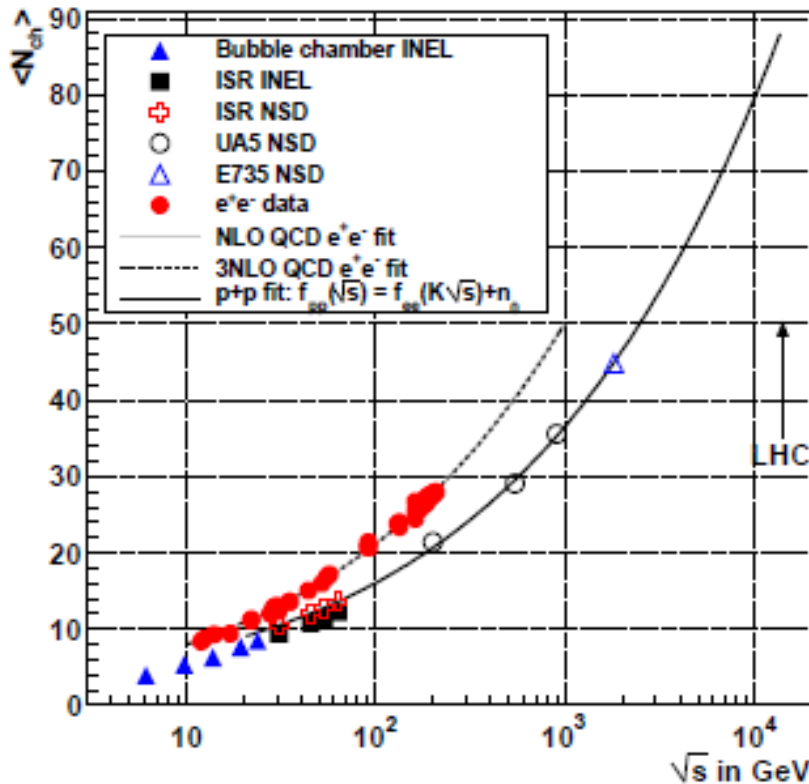


Αριθμός φορτισμένων για  
διαφορετικές ενέργειες CM



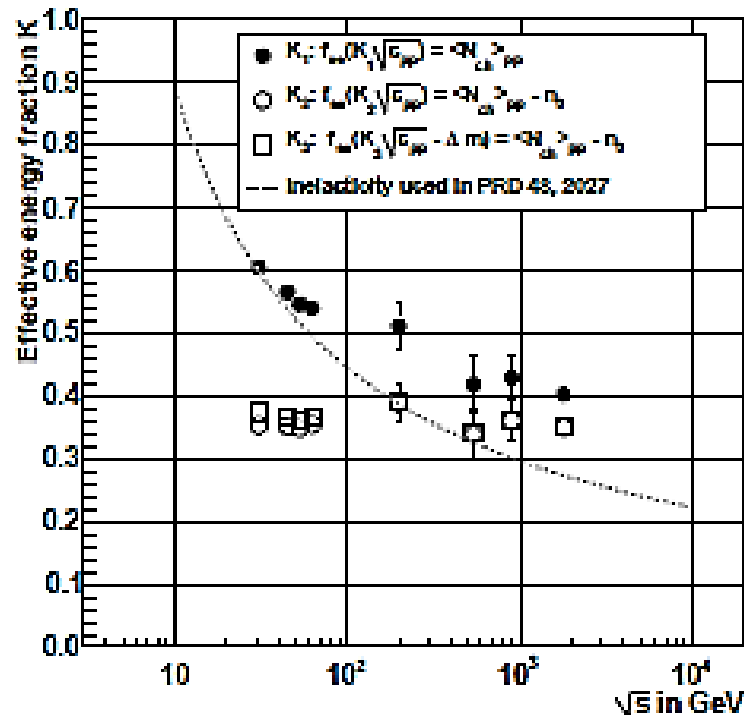
Η πολλαπλότητα ελαττώνεται  
σημαντικά για μικρές τιμές του  $\eta$   
Μικρή τιμή του  $\eta$  έχουν τα  
σωματίδια κοντά στη δέσμη.

# Μέση πολλαπλότητα σαν συνάρτηση της Εν. CM



Η πολλαπλότητα εξαρτάται από την ενέργεια στο Κ.Μ.  $\sqrt{s} = \sqrt{2m_p E_B}$   
 Στις εικόνες διάφορες παραμετροποιήσεις.

# Ανελαστικότητα K (inelasticity)



Η Ανελαστικότητα περιγράφει το ποσοστό ενέργειας της δέσμης που πηγαίνει στα «θραύσματα» (fragmentation). Η υπόλοιπη πηγαίνει στο leading particle. Σε γρήγορους υπολογισμούς χρησιμοποιούμε  $K=0,5$ .

# Απλό μοντέλο

Ξεκινάμε με την υπόθεση ότι

α) τα σωματίδια τα οποία κυριαρχούν στον αδρονικό καταιονισμό είναι τα  $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $\pi^0$ .

β) Η ενέργεια μοιράζεται εξ ίσου στα τρία αυτά σωματίδια.

γ) μετά από κάθε μήκος αντίδρασης η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Τα φορτισμένα  $\pi^+$ ,  $\pi^-$  παίρνουν τα  $2/3$  της ενέργειας σε κάθε βήμα.

δ) Το  $\pi^0$  διασπάται σε 2  $\gamma$  τα οποία δημιουργούν ηλεκτρομαγνητικούς καταιονισμούς.

Μετά από  $n$  αντιδράσεις, η ενέργεια που έχει πάει στην αδρονική και σε ηλεκτρομαγνητική συνιστώσα είναι:

$$E_{\text{had}} = \left(\frac{2}{3}\right)^n E_0 \qquad E_{\text{em}} = \left[1 - \left(\frac{2}{3}\right)^n\right] E_0.$$

Όσο ελαττώνεται η ενέργεια των σωματιδίων, δεν μπορούν να παράγουν νέα, ενώ αυξάνεται ο αριθμός των σωματιδίων που χάνουν ενέργεια και τελικά απορροφώνται στην ατμόσφαιρα. Πολύ λίγα σωματίδια επιβιώνουν και φθάνουν στην επιφάνεια της γης, κυρίως μίονια. Αν όμως η ενέργεια του αρχικού σωματιδίου είναι πολύ μεγάλη, ένας μεγάλος αριθμός σωματιδίων παράγεται κοντά στην επιφάνεια της γης και ,μπορεί να ανιχνευτεί.

# Διάγραμμα Heitler-Matthews

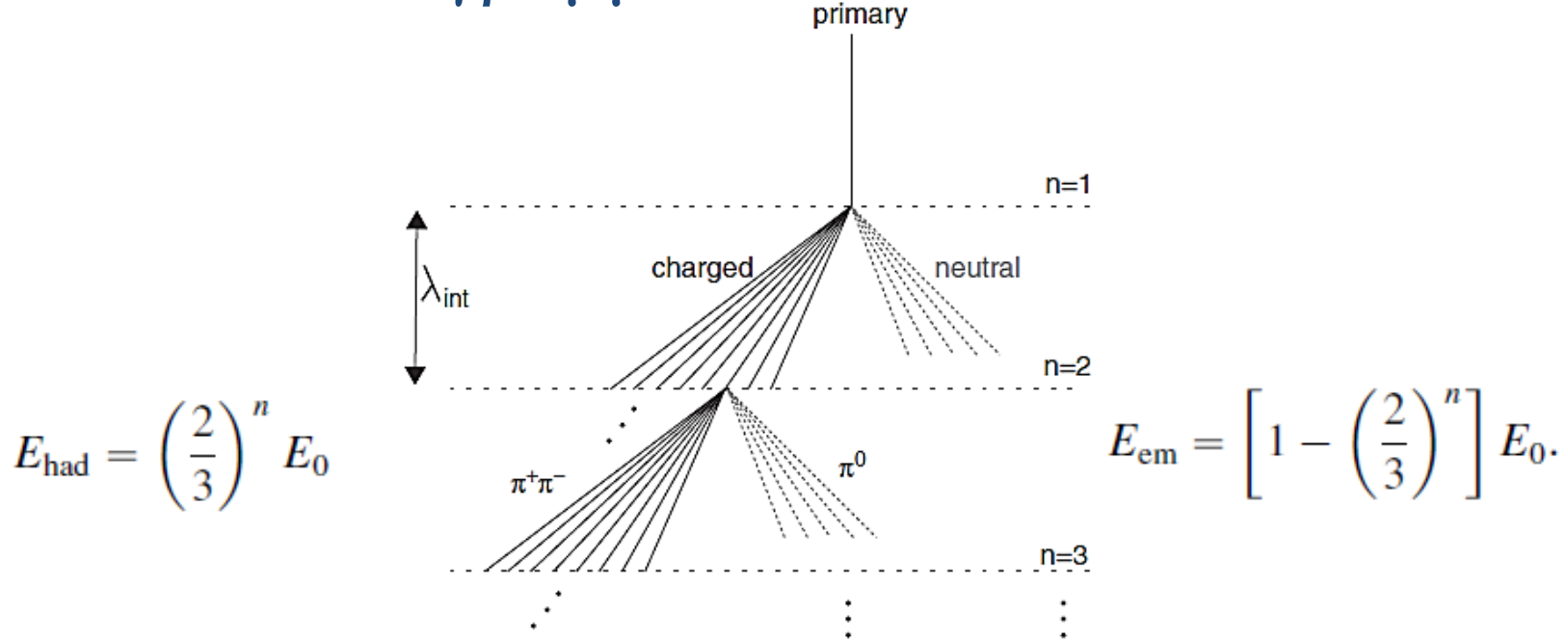


Figure 16.2 The Heitler–Matthews diagram showing the structure of the pionic cascade in a proton-induced air shower (from [509]).

Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι κάποια ελάχιστη ενέργεια. Τα σωματίδια μικρής ενέργειας δεν μπορούν να παράγουν δευτερογενή και τελικά απορροφώνται. Επίσης τα σωματίδια χάνουν ενέργεια κατά το πέρασμά τους από την ατμόσφαιρα. Στο απλό μοντέλο δεν γίνεται υπολογισμός για τις απώλειες ενέργειας.

# Απλό μοντέλο

Χρησιμοποιώντας το απλό μοντέλο του Heitler, μπορούμε να υπολογίσουμε τον μέγιστο αριθμό πιονίων και μιονίων και ηλεκτρονίων.

Αριθμός μιονίων

$$N_{\mu} = (E_0/\varepsilon_{\pi})^{\beta},$$

$$\beta = \ln(\frac{2}{3}\langle m \rangle) / \ln \langle m \rangle = 0.85$$

Αριθμός ηλεκτρονίων στο μέγιστο της κατανομής.

$$N_e^{max} = \frac{1}{2} \frac{\langle m \rangle}{3} \frac{(1 - K_{el})E_0}{\varepsilon_0}.$$

Η θέση του η κατανομή έχει τον μέγιστο αριθμό σωματιδίων υπολογίζεται :

$$X_{max} = X_0 \ln \left[ \frac{2(1 - K_{el})E_0}{(\langle m \rangle/3)\varepsilon_0} \right] + \lambda_N(E_0)$$

Όταν η ενέργεια των δευτερογενών ελαττωθεί πολύ, οι απώλειες ενέργειας γίνονται σημαντικές και τα σωματίδια απορροφώνται στην ατμόσφαιρα. Έτσι δημιουργείται το χαρακτηριστικό σχήμα της κατανομής. Προφανώς το μοντέλο λειτουργεί για τις μέσες τιμές λόγω της μεγάλης στατιστικής.

# Απλό μοντέλο, επεξηγήσεις

$\langle m \rangle$  μέση πολλαπλότητα δευτερογενών που παράγονται από την αντίδραση ενός αδρονίου με έναν πυρήνα. Εξαρτάται από την ενέργεια.

$K_{el}$  ποσοστό ενέργειας που πηγαίνει στο Leading particle. Περίπου ίσο με 0,5.

$\beta$  το ποσοστό των δευτερογενών που πηγαίνουν σε φορτισμένα πιόνια.

$E_\pi = 20 \text{ GeV}$ . Εμπειρική σταθερά για να περιγράψει τη διάσπαση του πιονίου.

Λόγω του μεγάλου αριθμού δευτερογενών ηλεκτρονίων, το μέγιστο του καταιονισμού δίδεται από το μέγιστο των ηλεκτρονίων όπως στον Η.Μ. αλλά για ένα κλάσμα της ενέργειας του αρχικού σωματιδίου.

# Αριθμός μιονίων

$$\frac{\pi^0}{\pi^\pm} = \frac{1}{2} \quad \pi^0 \rightarrow 2\gamma$$

$$1\text{GeV } \gamma \rightarrow 10e^\pm \quad E > E_c \approx 80 \text{ MeV}$$

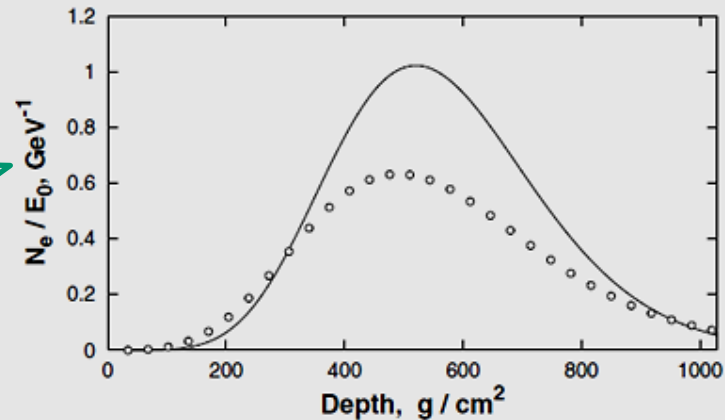
$$\Rightarrow \frac{N_e}{N_\mu} \approx 10$$

Στην επιφάνεια του εδάφους μετράμε ουσιαστικά τα ηλεκτρόνια.

Τα μίονια έχουν μικρές απώλειες στην ατμόσφαιρα και μεταφέρουν την πληροφορία για το ανοιγμα του καταιονισμού. Όμως για να τα ξεχωρίσουμε από τα ηλεκτρόνια, πρέπει να παρεμβάλουμε σημαντική ποσότητα υλικού ώστε να απορροφηθούν τα ηλεκτρόνια. Στο πείραμα KASCADE έχουν τοποθετηθεί σπινθηριστές στο έδαφος σε βάθος 2.5 μ για την ανίχνευση μιονίων.

# Υπολογισμοί

Ολικός αριθμός  
 $H\ell/E_0$ .



Προφίλ καταιονισμών που δημιουργήθηκαν από Πρωτόνιο (σημεία) και Φωτόνιο (γραμμή) ίδιας ενέργειας  $10^4$  GeV. Το βάθος του μεγίστου είναι αντίστοιχα 506 και 520  $\text{g/cm}^2$ . (περίπου 10 km).

Στον αδρονικό καταιονισμό έχουμε μεγάλο αριθμό από ηλεκτρόνια. Με ένα γρήγορο υπολογισμό αποδεικνύεται ότι ο αριθμός των ηλεκτρονίων είναι 10 φορές των μιονίων.

# Διακυμάνσεις στο σχήμα

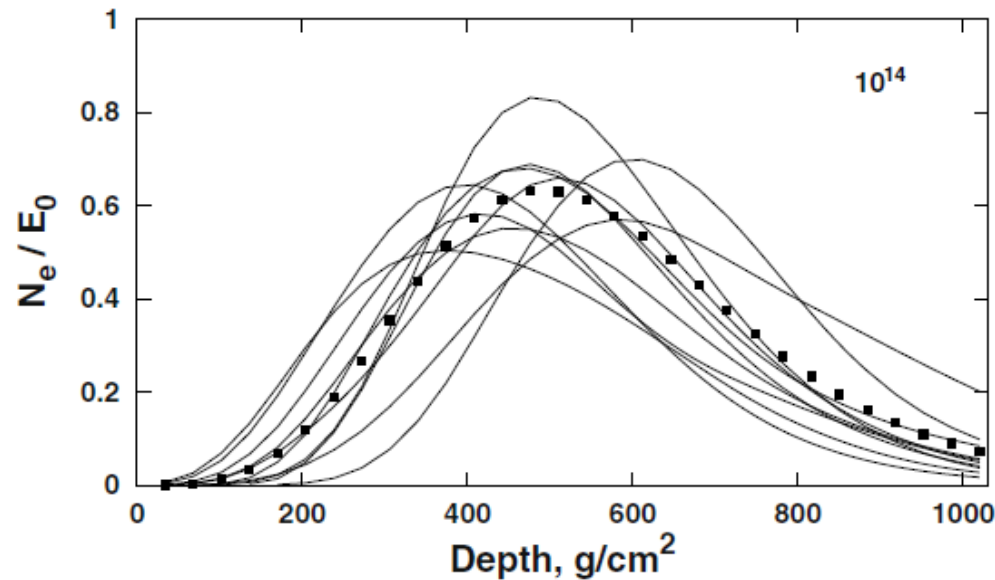


Fig. 8.9. Shower profiles of ten individual showers (lines) are compared to the average shower profile of  $10^5$  GeV vertical proton shower.

Προφίλ από καταιονισμούς που παράχθηκαν σε διαφορετικά βάθη της ατμόσφαιρας, με μέθοδο Μόντε Κάρλο. Το βάθος της πρώτης αντίδρασης επηρεάζει το σχήμα του καταιονισμού και τις απώλειες ενέργειας.

# Καταιονισμοί από πυρήνες.

- Για πυρήνα με μαζικό αριθμό  $A$  και ενέργεια  $E_0$ , η ενέργεια μοιράζεται στα νουκλεόνια,  $E_0 / A$ .
- Ο καταιονισμός προκύπτει από το άθροισμα των καταιονισμών.
- Το γωνιακό άνοιγμα είναι μικρότερο επειδή αντιστοιχεί σε μικρότερη ενέργεια.
- Το ξεκίνημα του καταιονισμού γίνεται σε μικτότερο βάθος λόγω της μεγαλύτερης ενεργού διατομής.
- Οι Καταιονισμοί που δημιουργούνται από βαρείς πυρήνες, είναι πλουσιότεροι σε μίονια σε σχέση με αυτούς που ξεκινούν από πρωτόνια.
- Αν μπορέσουμε να διακρίνουμε τα μίονια, μπορούμε να ξεχωρίσουμε τους καταιονισμούς που προέρχονται από βαρείς πυρήνες.

# Προγράμμα Προσομίωσης

## CORSIKA (Cosmic Ray Simulation for Kascade)

- Πρόγραμμα λεπτομερούς προσομίωσης Αδρονικών και Ηλεκτρομαγνητικών καταιονισμών.
- Κάθε  $\frac{1}{2} \lambda_{\text{INT}}$  ελέγχει την πιθανότητα για αντίδραση στην ατμόσφαιρα, και αν δημιουργηθεί αντίδραση παρακολουθεί τα θυγατρικά σωματίδια και ελέγχει τις αντιδράσεις τους. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ικανοποιηθούν οι συνθήκες τερματισμού.
- Χρησιμοποιεί τα δεδομένα για ενεργές διατομές, λόγους παραγωγής, απώλειες ενέργειας κλπ από τα πειραματικά αποτελέσματα των πειραμάτων στοιχειωδών σωματιδίων, καθώς και τα προγράμματα θεωρητικών υπολογισμών.
- Σαν αποτελέσματα, δίνει το είδος, τη θέση και την ορμή των δευτερογενών, σαν συνάρτηση του ύψους, την ακτινοβολία Cherenkov ή τη φωταύγεια που θα ανιχνεύσει ένα πείραμα.

<https://www.ikp.kit.edu/corsika/>

- Τα σχετικιστικά φορτισμένα σωματίδια στην ατμόσφαιρα εκπέμπουν φως Cerenkov. Μπορούμε να ανιχνεύσουμε το φως. Η διαδικασία ακολουθήθηκε αρχικά για ΗΜ καταιονισμούς. Μειονέκτημα ο μικρός χρόνος παρατήρησης.
- Ανίχνευση μιονίων. Τα μίονια μετρώνται με ανιχνευτές σπινθηρισμού. Για να απορροφηθούν τα ηλεκτρόνια, σκεπάζονται με απορροφητή, η τοποθετούνται κάτω από το έδαφος.
- Ανιχνευτές Cerenkov, δεξαμενές νερού στην επιφάνεια, μετρούν το φως από όλα τα φορτισμένα.

- Συνήθως κατασκευάζονται σε μεγάλο υψόμετρο, για να βρίσκονται κοντά στο μέγιστο του καταιονισμού.
- Οι διατάξεις αυτές μετρούν ενέργειες πάνω από 100 TeV.

# Πειράματα

*Τυπικό πείραμα για EAS . KASCADE-GRANDE*

Επιφάνεια περίπου  $10^4 \text{ m}^2$  κάλυψη 1%

- Ανιχνευτές σπινθηρισμού στην επιφάνεια. (φορτισμένα σωματίδια)´.
- Κάτοπτρα ακτινοβολίας Cerenkov
- Ανιχνευτές σπινθηρισμού σε βάθος 2,5 m. (GeV μίονια)

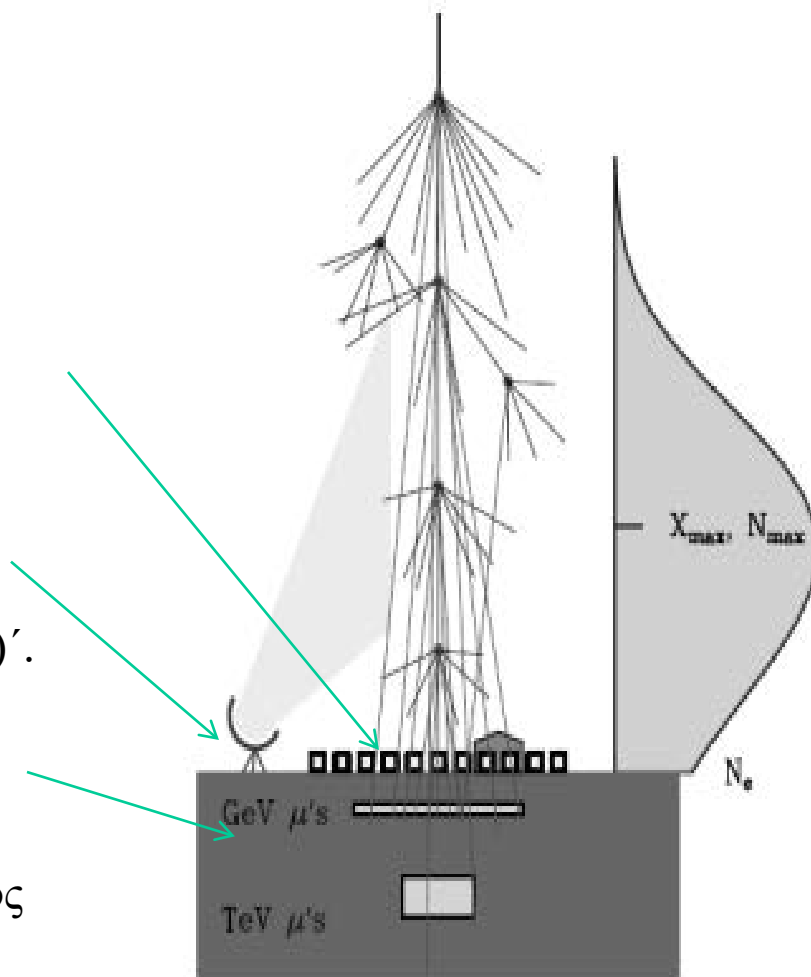
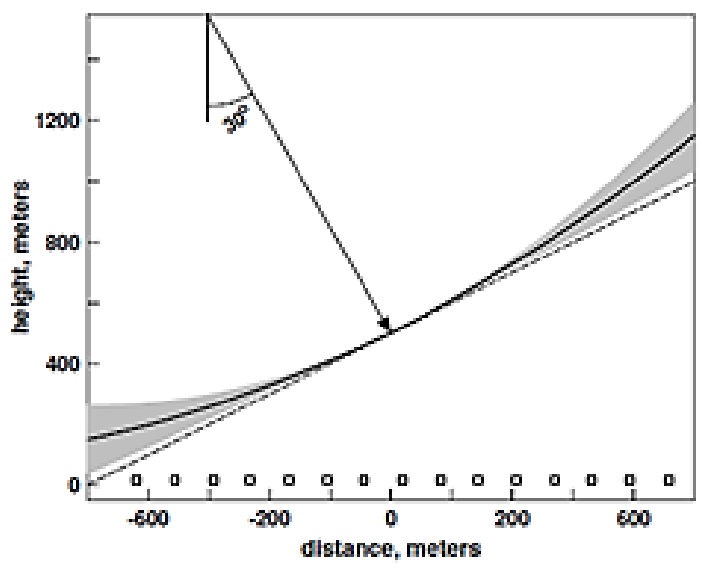


Fig. 8.12. Cartoon of shower development and detection.

# Πως γίνεται η ανίχνευση



Τα σωματίδια ταξιδεύουν με ταχύτητα σχεδόν ίση με την ταχύτητα του φωτός. Σχηματίζουν μέτωπο με πάχος μερικών μέτρων. Μετρώντας τον χρόνο άφιξης προσδιορίζουμε τη διεύθυνση του αρχικού σωματιδίου.

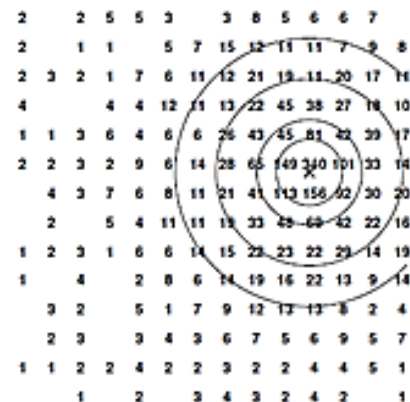


Fig. 8.13. Map of an air shower in a 196 detector array on a 15 m grid. The densities from (8.18) fluctuate with a Gaussian distribution with  $\sigma = \sqrt{\rho}$ . Because of that some detectors do not trigger.

Από την πυκνότητα των ανιχνευτών που έχουν σήμα και το υψος του σήματος, μπορούμε να υπολογίσουμε την ενέργεια του καταιονισμού.

# Μετρήσεις

- Σε ένα πείραμα μετράμε το ύψος του παλμού σε κάθε σπινθηριστή, και τον χρόνο που δημιουργείται.
- Οι σπινθηριστές με τον μικρότερο χρόνο προσδιορίζουν την διεύθυνση του EAS. Θεωρώντας ότι το μέτωπο έχει μορφή επίπεδου κύματος, μπορούμε να υπολογίσουμε την κλίση της τροχιάς.
- Από το ύψος των παλμών υπολογίζουμε τον αριθμό των φορτισμένων σωματιδίων που φθάνουν στον ανιχνευτή.
- Η εκτίμηση της ενέργειας είναι πολύπλοκη διαδικασία, χρειάζεται να υπολογιστεί η θέση του μεγίστου και η θέση της πρώτης αντίδρασης.

# Υπολογισμός Ενέργειας

Γνωρίζοντας τον αριθμό των ηλεκτρονίων και τη θέση του μεγίστου θεωρητικά μπορούμε να υπολογίσουμε την ενέργεια του αρχικού. Στην πράξη υπάρχουν πειραματικές δυσκολίες και ο υπολογισμός είναι πολύπλοκος.

Για να υπολογίσουμε την ενέργεια χρειαζόμαστε:

- Τον ολικό αριθμό ηλεκτρονίων, μιονίων.
- Την ακτίνα του καταιονισμού στο μέγιστο.

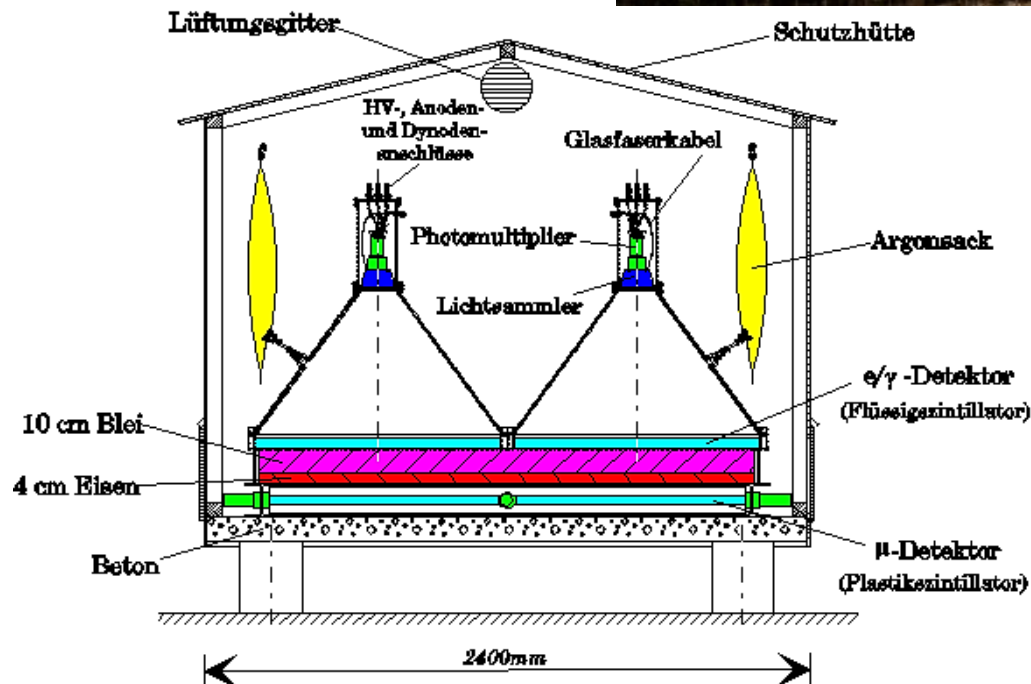
Όμως:

- Η διασπορά του αριθμού είναι μεγάλη λόγω της διειδυτικότητας των αδρονίων.
- Το ύψος του μεγίστου πρέπει να προσιοριστεί και μεταβάλλεται επειδή το σημείο δημιουργίας έχει μεγάλη διασπορά.

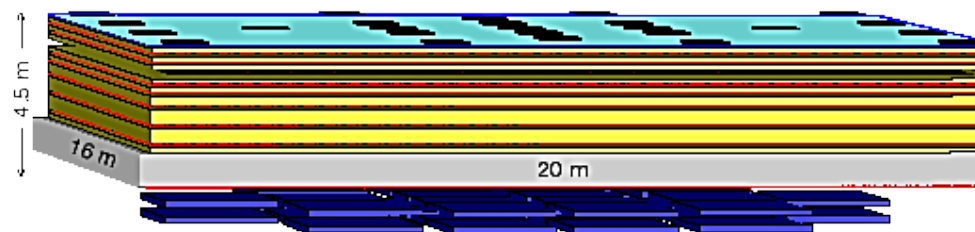
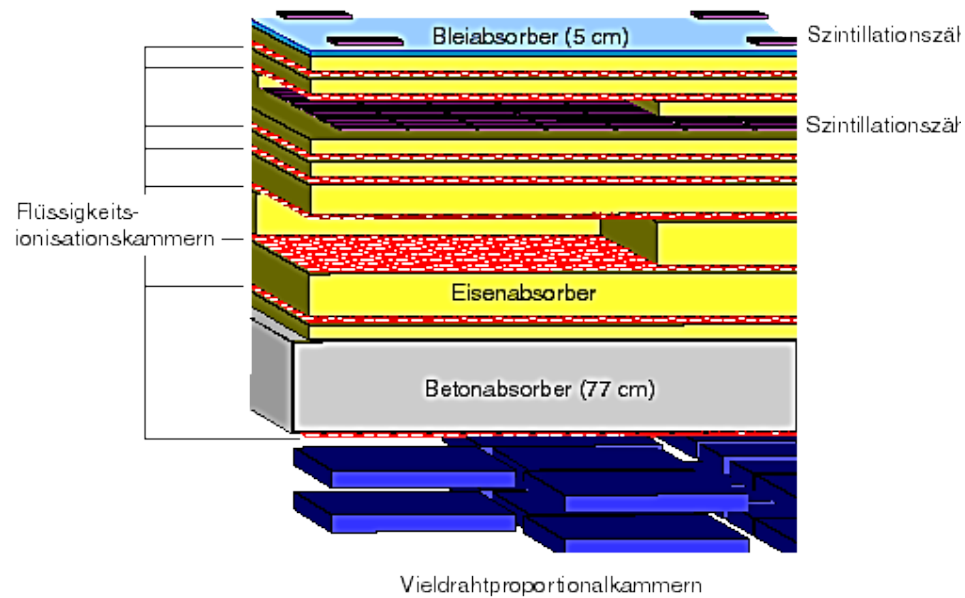
# Υπολογισμός Ενέργειας

- Κλασικά για τον υπολογισμό της ενέργειας χρησιμοποιείται ο τύπος Greissen που χρησιμοποιεί την πυκνότητα σωματιδίων σαν συνάρτηση της απόστασης από τον άξονα και αφήνει την «ηλικία» σαν ελεύθερη παράμετρο.
- Στα σύγχρονα πειράματα γίνονται δοκιμές με υπολογισμούς MC και υπολογίζουμε την ενέργεια για την οποία συμπίπτει η παραγόμενη κατανομή

# KASCADE Array



# Αδρονικό καλορίμετρο



# Πειράματα.

Αναφέρουμε μόνο τα πιο σημαντικά πειράματα.

**Volacano Ranch:** (New Mexico) (1959) ένα από τα πρώτα πειράματα με 33 ανιχνευτές σε μέση απόσταση 880 m. Συνολική κάλυψη  $8 \text{ km}^2$  . Συνεισέφερε στη μελέτη του σχήματος και τον υπολογισμό της ενέργειας των καταιονισμών. Μέτρησε το πρώτο σωματίδιο με ενέργεια  $10^{20} \text{ eV}$  (1962)

**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  $10 \text{ km}^2$  . Εκτός από τους σπινθηριστές χρησιμοποιεί και PMT για να ανιχνεύει το φως Cerenkon που παράγεται και να υπολογίζει το μέγεθος του καταιονισμού. Έχει ανανεωθεί με προσθήκη μετρητών φωταύγειας.

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

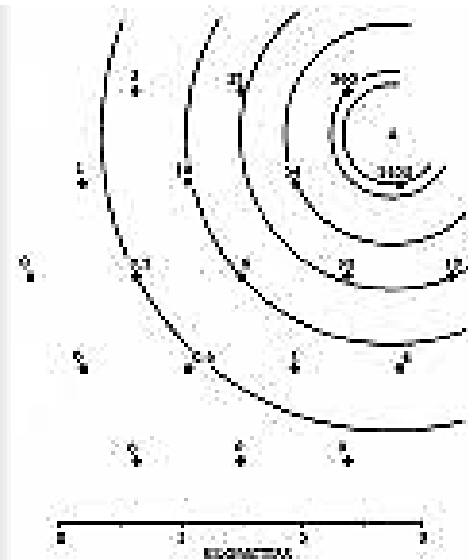
**Fly's Eye.** (Utah) μετρούσε τη φωταύγεια που προκαλεί ο ιονισμός του αέρα όταν σχηματίζεται καταιονισμός. Αποτελούνταν από 67 κάτοπτρα με 14 PMT το καθένα. Στη συνέχεια εγκαταστάθηκε και δεύτερος ανιχνευτής σε απόσταση  $3,3 \text{ km}^2$  που επιβλέπει τον ίδιο όγκο στην ατμόσφαιρα ώστε με την στεροσκοπική 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  $1^\circ$ . Το 2 αποτελείται από 42 κάτοπτρα και οι δύο διατάξεις καλύπτουν  $360^\circ$  στον ορίζοντα.

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

# Volcano Ranch, Linsley

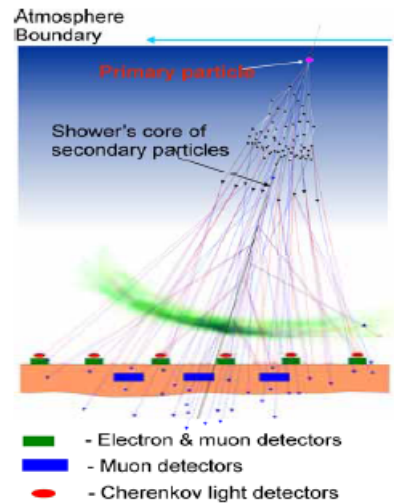


# Haverah, Watson

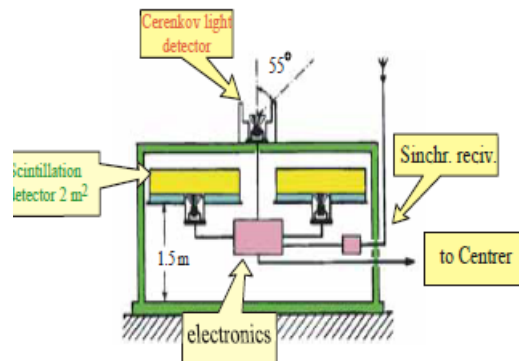


# Yakutsk EAS Array

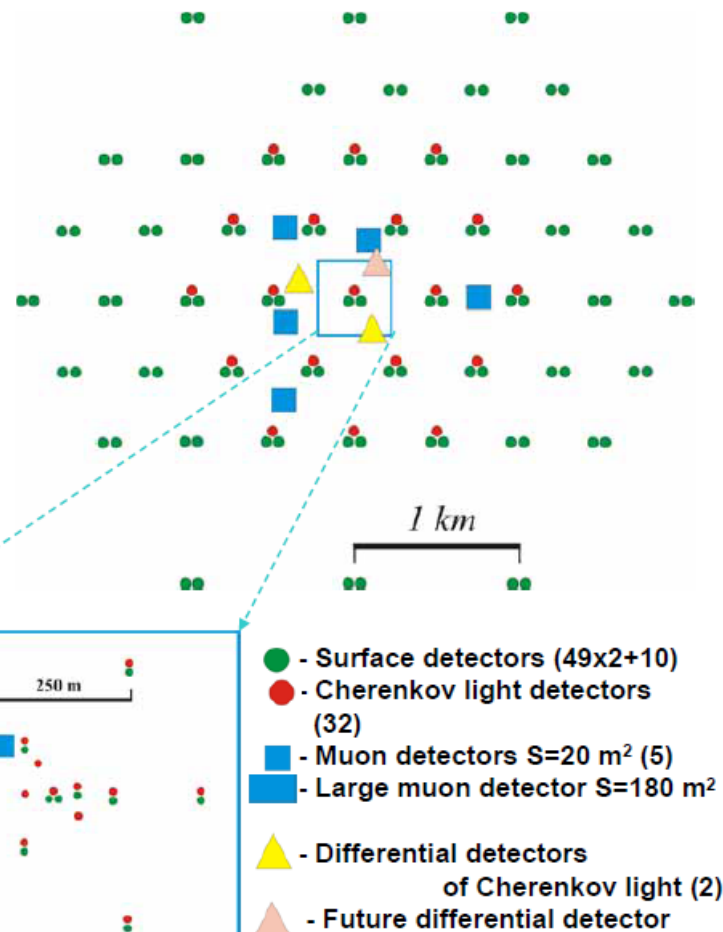
## Extensive Air Shower (EAS)



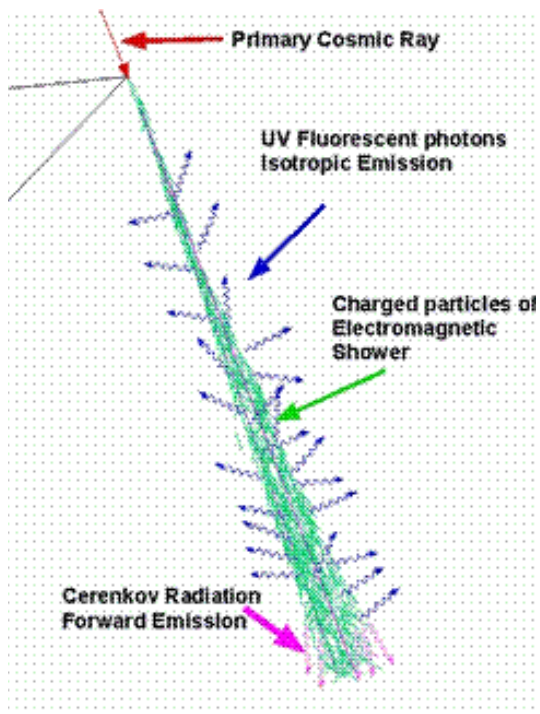
## Single array station



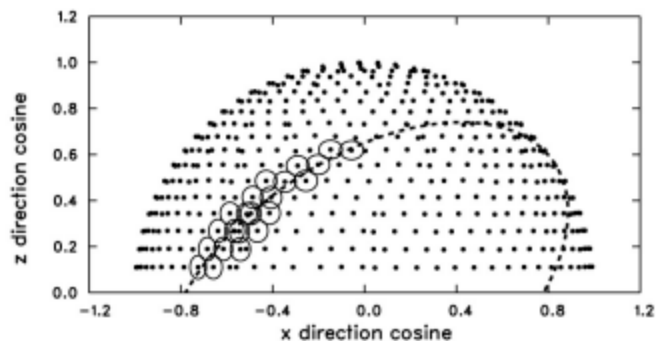
## Yakutsk EAS Array (area S=12 km<sup>2</sup>)



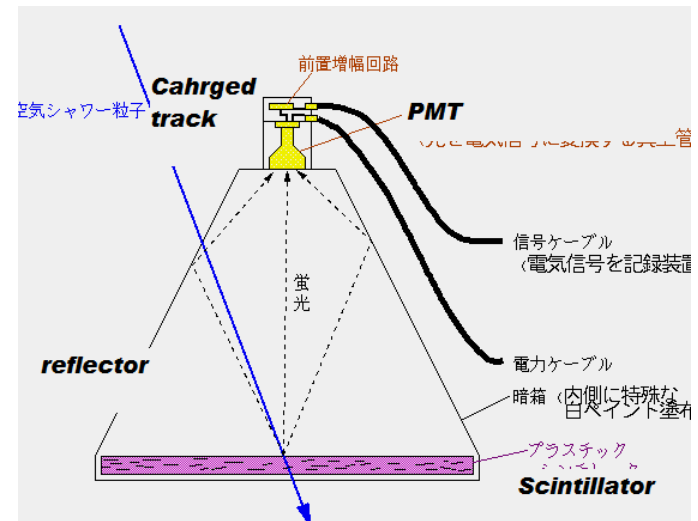
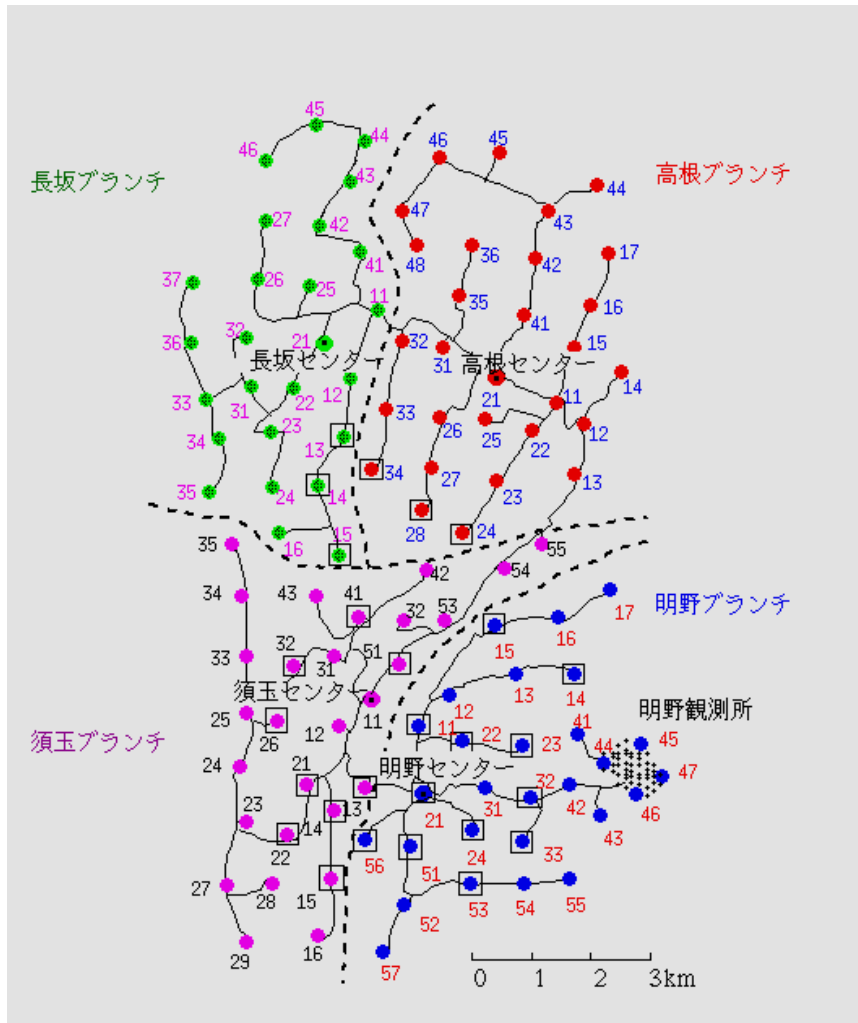
# Πείραμα HiRes



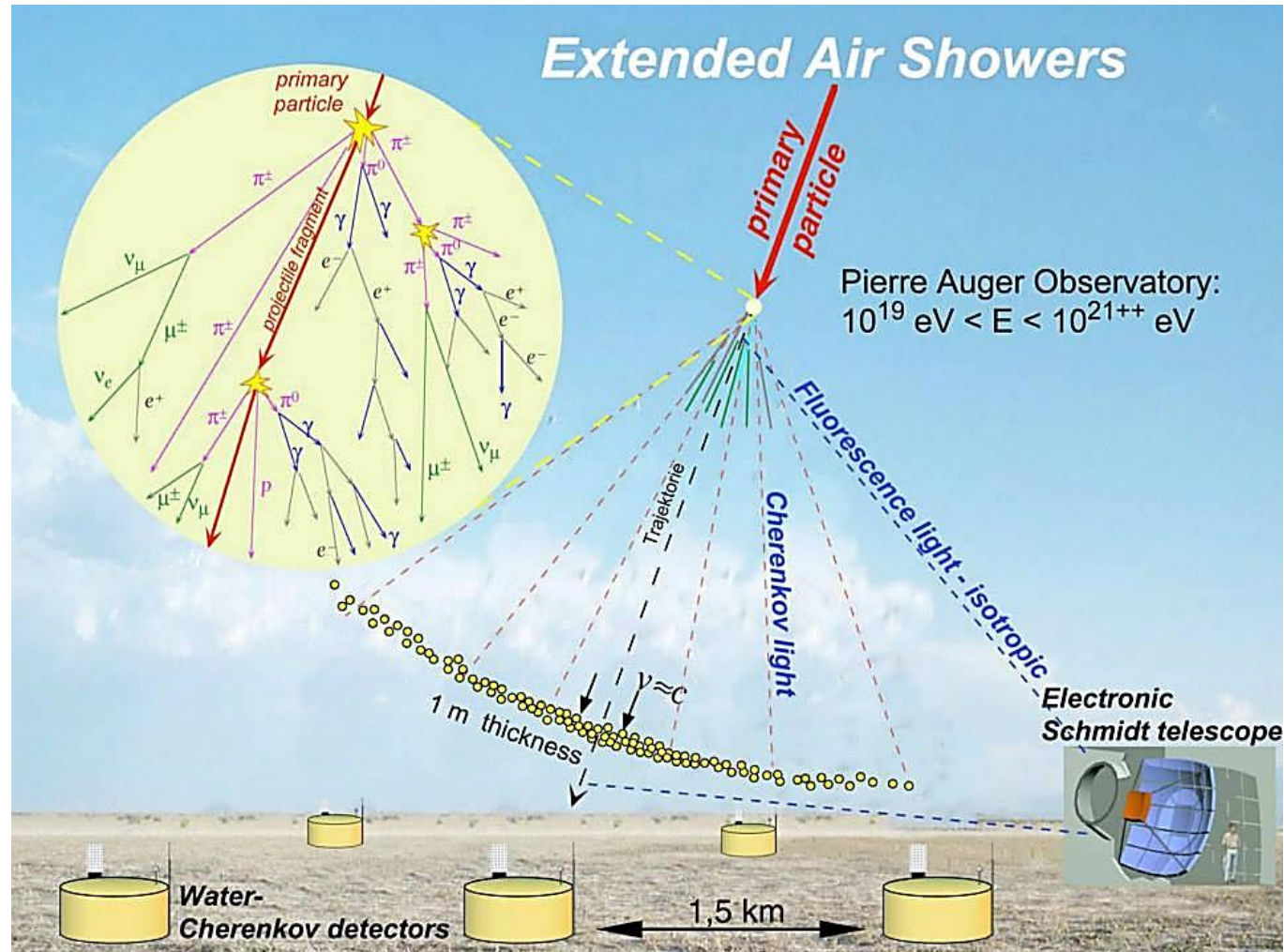
- Φωταύγεια από καταιονισμό.
- Πείραμα HiRes.
- Ανακατασκευή στον ανιχνευτή.



# AGASA



# Πείραμα Auger



# Πείραμα Auger

