

Αντιδράσεις φωτονίων στην
ατμόσφαιρα, δημιουργία
Ηλεκτρομαγνητικών Καταιονισμών

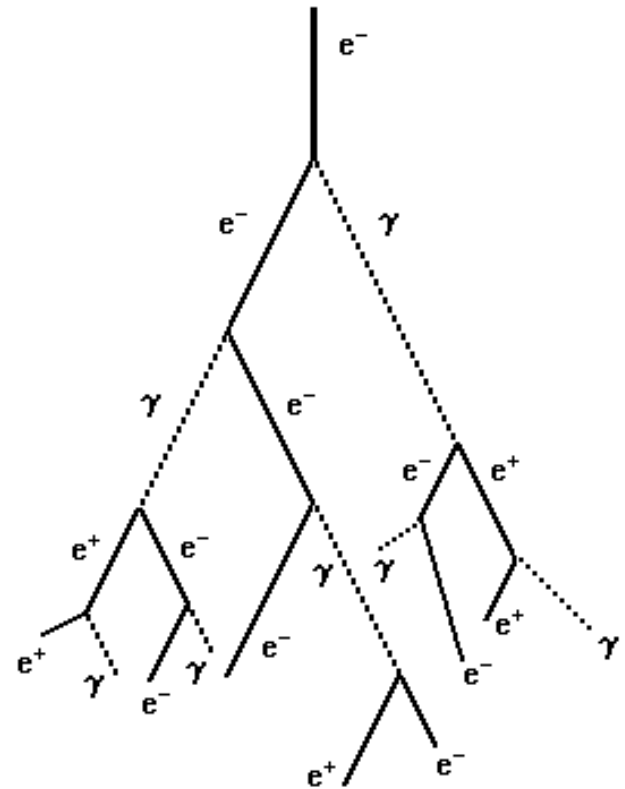
Ακτινοβολία πέδης, παραγωγή ζεύγους

- Οι Η.Μ. καταιονισμοί δημιουργούνται όταν ένα φωτόνιο υψηλής ενέργειας εισέλθει στην ατμόσφαιρα.
- Το φωτόνιο δημιουργεί ένα ζευγάρι ($e^+ e^-$), στη συνέχεια, τα ηλεκτρόνια δημιουργούν φωτόνια, μέσω του μηχανισμού πέδησης.
- Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου η ενέργεια των φωτονίων δεν αρκεί για τη δημιουργία νέων ζευγών.

Ηλεκτρομαγνητικοί Καταιονισμοί.

Ακτινοβολία πέδησης

Δίδυμη Γένεση



Περίληψη:

Η γ μεγάλης ενέργειας
δημιουργεί ζεύγος $e^+ e^-$.

$$\gamma \rightarrow e^+ + e^- -$$

Η μέση ελεύθερη διαδρομή για
παραγωγή ζεύγους είναι:

$$\lambda_{\text{ζεύγος}} = 1 / n \sigma_{\text{ζεύγος}}$$

Η ενεργή διατομή στον
αέρα είναι:

$$\Sigma_{\text{ζεύγος}} = 5.7 r_e^2 = 6 \times 10^{-26} \text{ cm}^2$$

Τα $e^+ e^-$ εκπέμπουν ακτινοβολία
πέδης. Η σχέση των διατομών
είναι:

$$\sigma_{\text{ζεύγος}} = (7/9) \sigma_{\text{πέδης}}$$

Τα $e^+ e^-$ φθάνουν σε Κρίσιμη
ενέργεια όταν οι απώλειες
ακτινοβολίας πέδης γίνουν ίσες
με τις απώλειες ιονισμού.

$$\left(\frac{dE}{dX} \right)_{\text{πέδης}} = \left(\frac{dE}{dX} \right)_{\text{ιονισμός}}$$

Μοντέλο Heitler

- Αν το Μήκος Ακτινοβολίας είναι λ .
- Μετά από ένα μήκος Ακτινοβολίας έχουμε μία αντίδραση του αρχικού.
- Στην αντίδραση παράγονται δύο σωματίδια με ενέργεια $E/2$.
- Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για N μήκη.

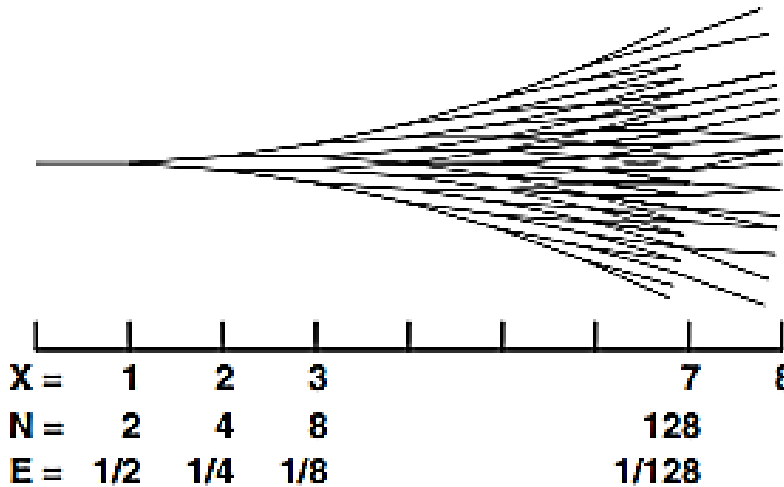


Fig. 8.1. Heitler's toy model of cascade development. In this sketch $E_c = E_0/128$.

$$E_0 \rightarrow 2 E_0/2 \rightarrow 4 E_0/4 \dots \quad X=N\lambda \rightarrow 2^N \text{ σωματίδια}$$

- Στο απλό μοντέλο του Heitler σε κάθε βήμα διπλασιάζεται ο αριθμός των σωματιδίων. Η ενέργεια μοιράζεται εξ'ίσου στα δύο σωματίδια που προκύπτουν μετά από κάθε αντίδραση.

Ο υπολογισμός σταματά όταν $E=E_c$. $N_{\max}=E_0/E_c$ $X_{\max}=\lambda \log_2(E_0/E_c)$

Το μήκος ακτινοβολίας για τον αέρα είναι:

$$\xi_0 = 36.62 \text{ gr/cm}^2 \text{ ή } X_0 = 280 \text{ m (κανονικές συνθήκες)}$$

Ορισμός κρίσιμης ενέργειας.

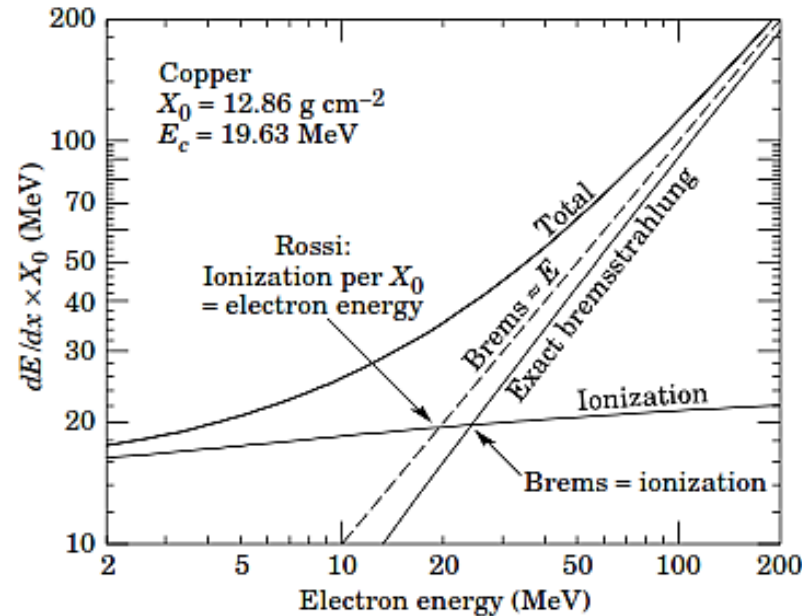


Figure 30.13: Two definitions of the critical energy E_c .

- Κρίσιμη ενέργεια E_c είναι η ενέργεια στην οποία η απώλεια λόγω ακτινοβολία πέδησης είναι ίση με την απώλεια λόγω ιονισμού.
- Όταν η ενέργεια γίνει μικρότερη από την κρίσιμη, τότε τα ηλεκτρόνια χάνουν ενέργεια χωρίς να μπορούν να δημιουργήσουν νέα σωματίδια.

Προσεγγίσεις, μοντέλο A

Στο απλοποιημένο μοντέλο του Heitler, χρησιμοποιούμε τις παρακάτω προσεγγίσεις:

Για ηλεκτρονία και ποζιτρονία αγνοούμε:

τις απώλειες λόγω ιονισμού των μεγάλης ενέργειας
τις σκεδάσεις στους πυρήνες.

Για τα φωτόνια μεγάλης ενέργειας, αγνοούμε"

Τις σκεδάσεις Compton,

Τη φωτοδιάσπαση των πυρήνων

Την ανελαστική σκέδαση και άλλα φαινόμενα υψηλών ενεργειών.

- Το μοντέλο σταματά ουσιαστικά με τον υπολογισμό του μεγίστου του καταιονισμού.
- Αποδίδει ποιοτικά την μορφή των καταιονισμών, ηλεκτρομαγνητικών και αδρονικών.
- Η ελάττωση και τελικά η απορρόφηση των σωματιδίων οφείλεται στις απώλειες που καταλήγουν σε απώλειες ιονισμού.
- Όταν η ενέργεια ενός σωματιδίου γίνει μικρότερη από την E_c μικραίνει η πιθανότητα ακτινοβολίας πέδης σε σχέση με την απώλεια ιονισμού.
- Ο αριθμός των δημιουργούμενων σωματιδίων γίνεται διαρκώς μικρότερος από τα απορροφούμενα.
- Τελικά όλη η ενέργεια του αρχικού σωματιδίου μετατρέπεται σε ιονισμό του μέσου.

Βασικές ιδιότητες Η.Μ. καταιονισμού.

Ο μέγιστος αριθμός σωματιδίων που δημιουργούνται :

$$N_{\max} = E_0 / E_c$$

Το μέγιστο δημιουργείται σε απόσταση (σε μήκη ακτινοβολίας):

$$X_{\max} = \lambda \ln(E_0 / E_c) / \ln 2$$

Εγκάρσιο πλάτος.

Το άνοιγμα του κώνου οφείλεται α) στην εγκάρσια ορμή κατά την παραγωγή: $\langle p_T \rangle \sim m_e$
b) στην σκέδαση των ηλεκτρονίων στα ατομικά ηλεκτρόνια του μέσου. Πολλαπλή σκέδαση. Η μέση γωνία σκέδασης δίνεται:

$$\langle \delta\theta^2 \rangle = \left(\frac{E_s}{E} \right)^2 \delta X$$

Η διεύρυνση υπολογίζεται:

$$R_E = r_1 \frac{E_c}{E}$$

Όπου r_1 η ακτίνα Molier

$$r_1 = \left(\frac{E_s}{E_c} \right) X$$

$E_c = 80 \text{ MeV}$, $E_s = 21 \text{ MeV}$. Ο τύπος ισχύει για χαμηλές ενέργειες στις υψηλότερες η ακτίνα γίνεται στενότερη. Ο τύπος δίνει $r_1 = 9,3 \text{ g/cm}^2$, ενώ ο υπολογισμός MC για ένα φωτόνιο ενέργειας **1000 GeV** δίδει **5,94 g/cm**.

Χρονική εξέλιξη καταιονισμού.

- Η διαδικασία διάδοσης του Η.Μ. καταιονισμού στην ατμόσφαιρα περιγράφεται από την μεταβολή του αριθμού των ακτίνων γάμα και των ηλεκτρονίων, σαν συνάρτηση του χρόνου.
- Ο αριθμός των ακτίνων γ σε ενέργεια W μειώνεται λόγω παραγωγής ζεύγους, συγχρόνως αυξάνεται λόγω προσθήκης ακτίνων που έχουν παραχθεί από ηλεκτρόνια υψηλότερης ενέργειας.
- Ο αριθμός των ηλεκτρονίων ενέργειας E μειώνεται λόγω της ακτινοβολίας πέδης, ενώ αυξάνεται λόγω ηλεκτρονίων που παράχθηκαν από δίδυμη γέννηση που δημιουργήθηκε από γ υψηλότερης ενέργειας.
- Προφανώς οι συναρτήσεις που περιγράφουν την εξέλιξη των δύο πληθυσμών είναι συνεξευγμένες.
- Οι Greissen και Rossi έλυσαν αναλυτικά το πρόβλημα και κατέληξαν σε παραμετρικές σχέσεις που περιγράφουν τη χρονική εξέλιξη του καταιονισμού.
- Η αναλυτική επεξεργασία των τύπων ξεπερνά το σκοπό αυτού του μαθήματος και παραμένουμε στην ποιοτική περιγραφή.

* Με την λέξη ηλεκτρόνια εννοούμε ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια.

Υπολογισμοί

Αναλυτικός υπολογισμός από Greisen και Rossi.

Γρήγορος, παραμετρικός υπολογισμός. Ιδιαίτερα χρήσιμος την εποχή που οι υπολογιστές δεν είχαν αναπτυχθεί.

$$N_e^\gamma = \frac{0.135}{\sqrt{\beta}} \exp[X(1 - \frac{3}{2} \ln s)] (A)$$

$$N_e^\gamma = \frac{0.31}{\sqrt{\beta}} \exp[X(1 - \frac{3}{2} \ln s)] (B)$$

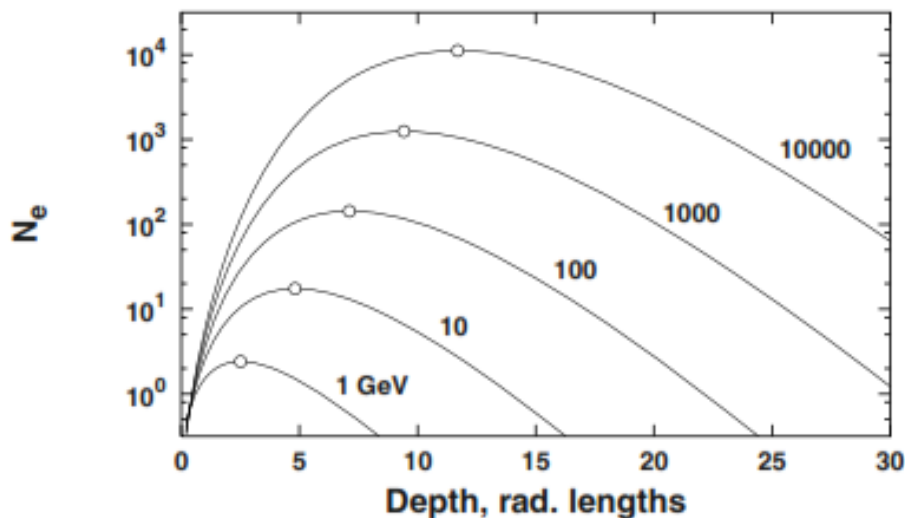
$$s = \frac{3X}{X + 2\beta}$$

$$\beta = \frac{E}{E_c}$$

Υπολογισμός με τη μέθοδο Monte Carlo.

Σε κάθε βήμα $0,5 X_0$ γίνεται υπολογισμός της πιθανότητας για δημιουργία νέων σωματιδίων βάσει της εκθετικής σχέσης και υπολογίζονται οι απώλειες και η γωνία σκέδασης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε σωματίδιο και σταματά όταν η ενέργεια κάτω από την ενέργεια που έχουμε ορίσει.

Παραμετρικός υπολογισμός



$$N_e^r = \frac{0.31}{\sqrt{\beta}} \exp \left[X \left(1 - \frac{3}{2} \ln s \right) \right]$$
$$s = \frac{3X}{X + 2\beta}$$
$$\beta = \frac{E}{E_c}$$

Αριθμός σωματιδίων και μέγιστο καταιονισμό όπως υπολογίζεται από τους τύπους των Rossi και Greisen . Οι καμπύλες χρησιμοποιούνται για γρήγορο υπολογισμό του βάθους του μεγίστου.

Από τις παραπάνω καμπύλες συμπεραίνουμε ότι σχήμα του καταιονισμού είναι ανεξάρτητο του υλικού αν το εκφράσουμε σαν συνάρτηση του μήκους ακτινοβολίας. Επίσης χρησιμοποιώντας την εμπειρική σταθερά s (ηλικία του καταιονισμού) το σχήμα είναι το ίδιο και ανεξάρτητο από την ενέργεια.

Υπολογισμός με Μόντε Κάρλο, διασπορά.

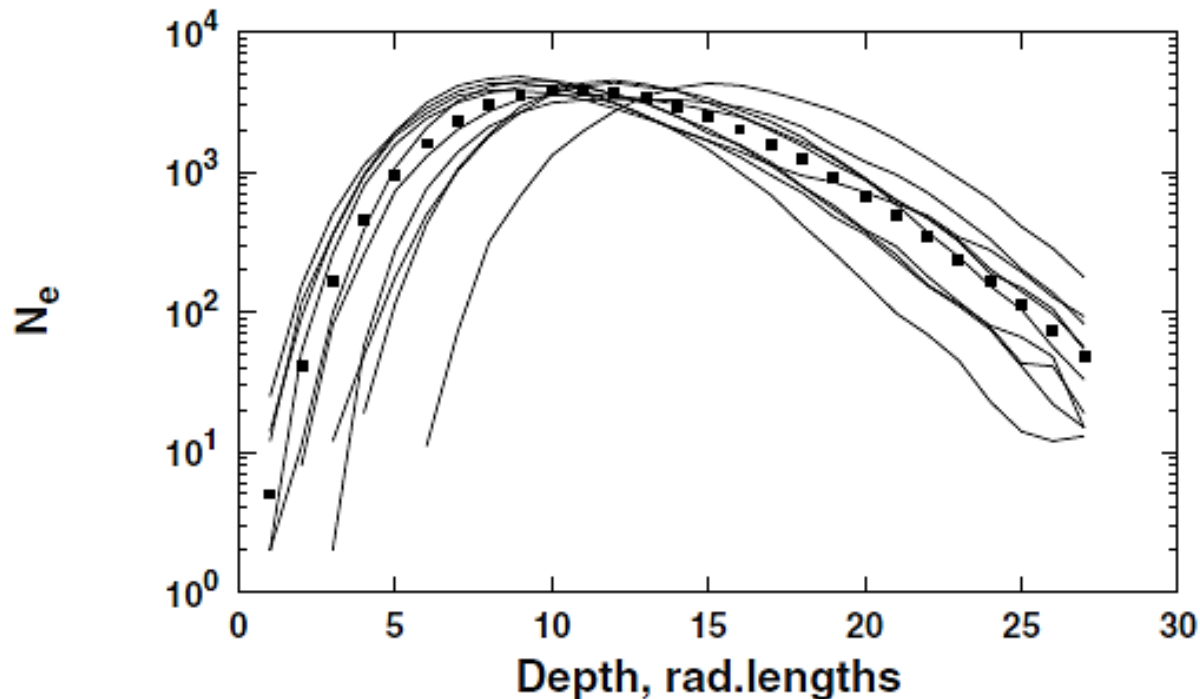
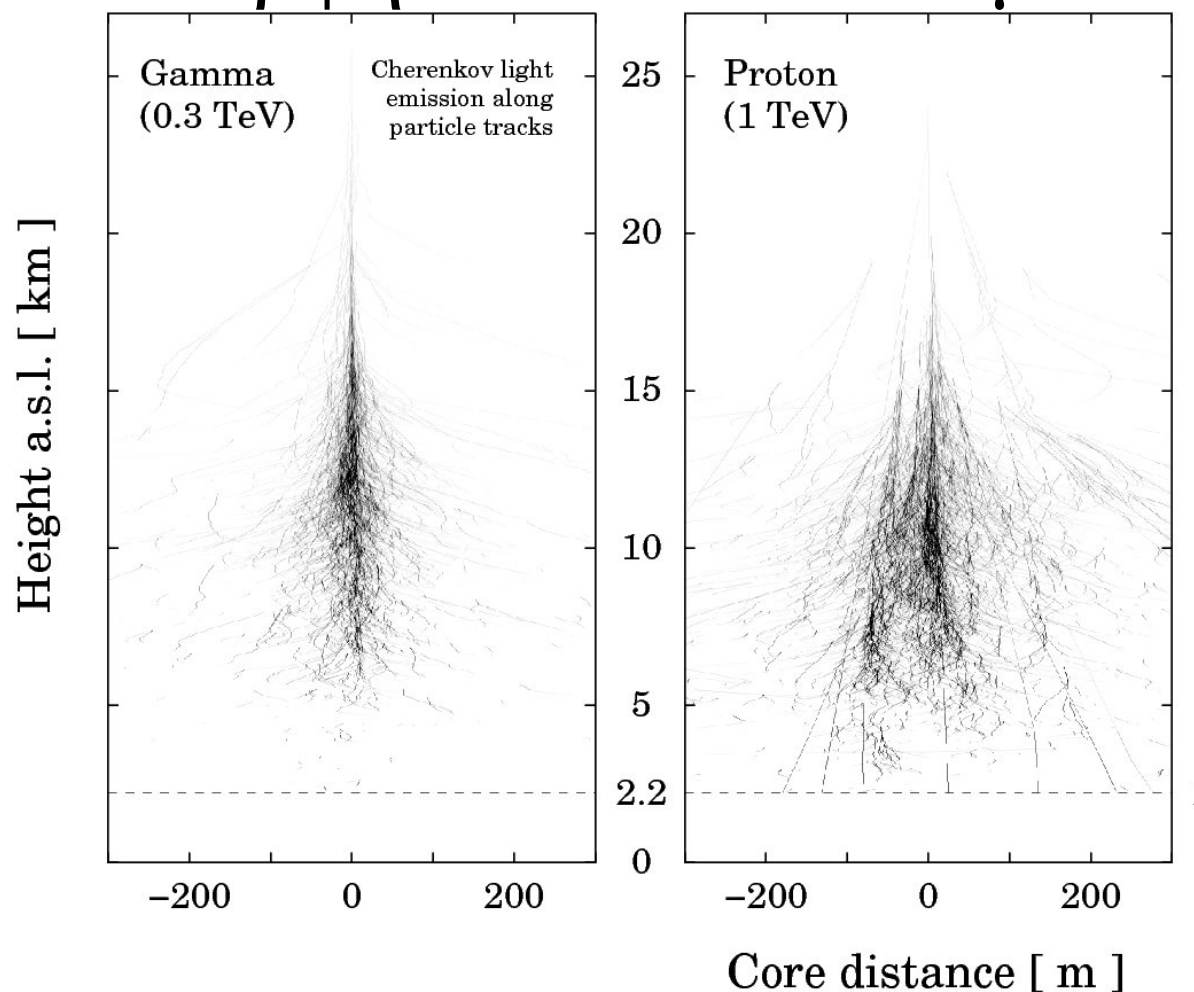


Fig. 8.6. Number of electrons with energy above 1 GeV in a shower from primary photon of energy 10^5 GeV. The lines show the shower profiles for 10 individual

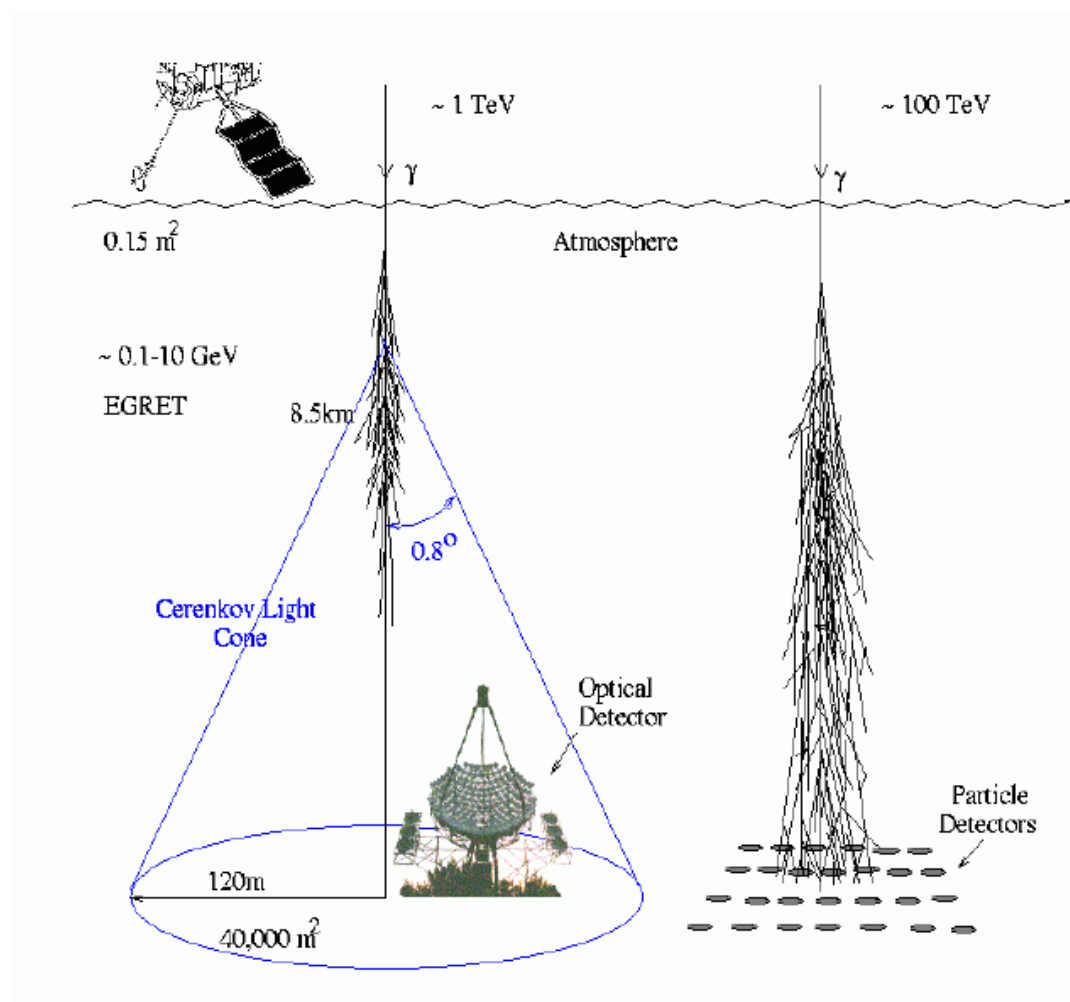
Με τον υπολογισμό Μ.Κ. μπορούμε να υπολογίσουμε την διασπορά στη θέση δημιουργίας, στον αριθμό των σωματιδίων και το άνοιγμα του καταιονισμού.

Μορφή ΗΜ καταιονισμών



Ο Η.Μ. καταιονισμός, χαρακτηρίζεται από το συμμετρικό σχήμα και το μικρό άνοιγμα. Οι Η.Μ. διαδικασίες είναι περιορισμένες και έχουν σταθερό μήκος ακτινοβολίας. Ο αδρονικός καταιονισμός χαρακτηρίζεται από το ασύμμετρο σχήμα, λόγω της διεισδυτικότητας των παραγόμενων σωματιδίων και των μεγάλων στατιστικών διακυμάνσεων του αριθμού των δευτερογενών σωματιδίων. Στην εικόνα δεξιά διακρίνονται δευτερογενείς καταιονισμοί που οφείλονται σε ενεργητικά πιόνια.

Ανιχνευτές Ακτίνων Γάμμα Υψηλής Ενέργειας



Ιστορία.

Δεκατία 1960 Jelly, παρατηρήθηκε η ακτινοβολία Cherenkov σε Κ.Α.
Δεκαετία 1980 μια ένδειξη ότι υπάρχει ακτινοβολία που συσχετίζεται με τον Cyg X3.

Νέο ενδιαφέρον για τις ακτίνες γ, (T. Weeks)

1990 Πιθανό σήμα από Cyg X3 (Whipple). (Μάλλον λάθος ανάλυση)

Ξεκινά η κατασκευή νέων τηλεσκοπίων με μεγάλη διακριτική ικανότητα.

Ακτινοβολία Čerenkov στον αέρα

Το κατώφλι της ακτινοβολίας Čerenkov και η γωνία του κώνου, εξαρτώνται από τον δείκτη διάθλασης του υλικού:

$$\gamma \geq \frac{n(h)}{\sqrt{n(h)^2 - 1}}$$

$$\cos \theta_c = \frac{1}{\beta n(h)}$$

Όμως στην ατόσφαιρα ο δείκτης διάθκλασης εξαρτάται από την πυκνότητα της ατμόσφαιρας που μειώνεται με το ύψος.

Για δημιουργία H.M. κατ. Σε ύψος 10 km:

$$\theta_c = 0.8^\circ$$

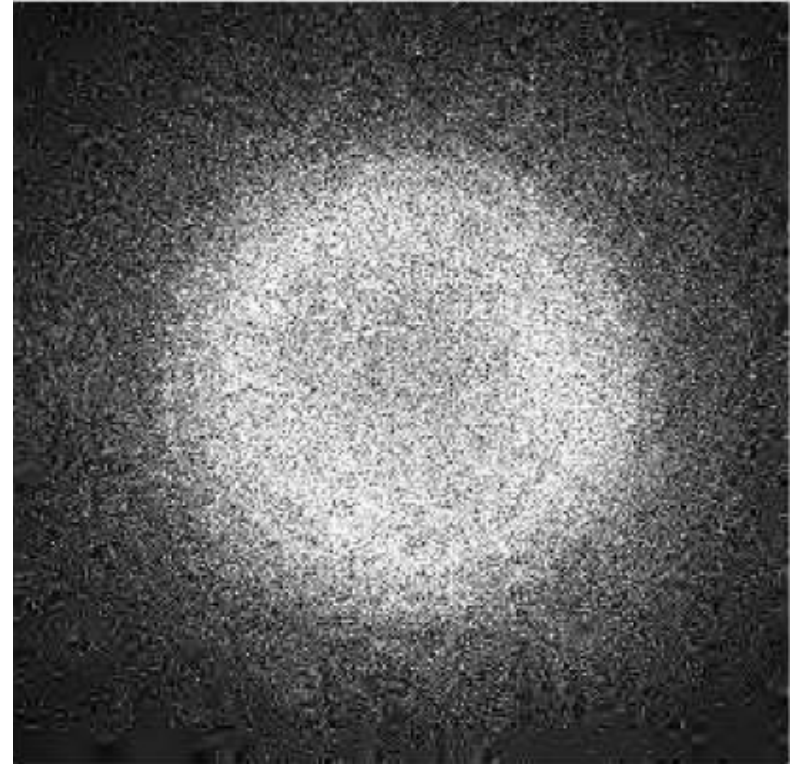
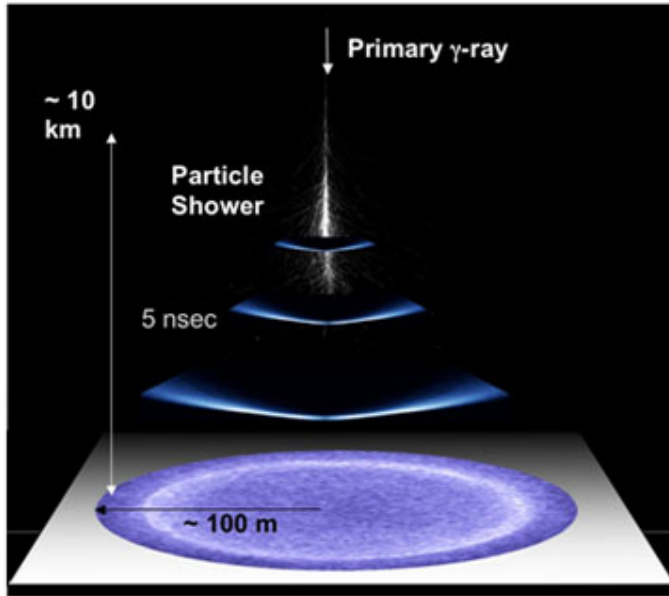
$$\gamma_{th} = 72$$

$$E_{min} \quad E_e = 37 \text{ MeV} \quad E_\mu = 7.6 \text{ GeV}$$

Στην επιφάνεια της γής αντιστοιχεί σε κύκλο ακτίνας $r = 120 \text{ m}$.

Εκτός από τη γωνία Cherenkov, η πολλαπλή σκέδαση στην ατμόσφαιρα, διευρύνει τον καταιονισμό και αντίστοιχα τον κώνο του φωτός.

Μέτωπο Cerenkov



Τα φωτόνια Cerenkov που παράγονται από τα ηλεκτρόνια, σχηματίζουν μέτωπο που κινείται προς το έδαφος. Η διαφορά στη χρονική διασπορά που παρατηρείται, είναι μικρότερη από 10 ns. Οφείλεται στη διαφορά του χρόνου για τη διαδρομή ενός φορτισμένου σωματιδίου και τη διαδρομή του φωτός, καθώς και στη διασπορά των τροχιών του καταιονισμού.

Ο δίσκος των φωτονίων που προβάλλεται στο έδαφος έχει διάμετρο 100-150 m. Οι εικόνες έχουν δημιουργηθεί με προσομοίωση Μόντε Κάρλο.

Ιδιότητες Τηλεσκοπίων Cherenkov

Μεγάλη κατευθυντικότητα του φωτός, μπορεί να εντοπίσει σημειακές πηγές.

Ανιχνεύουν γ πολύ υψηλής ενέργειας.

Μεγάλη επιφάνεια ανιχνευσης, για γεγονότα με μικρή συχνότητα.

Χαμηλό κατώφλι ενέργειας. Με τα νέα μεγάλα κάτοπτρα έχει ελαττωθεί στα 30 GeV

Η ανώτατη ενέργεια που μπορεί να ανιχνευτεί περιορίζεται από την επιφάνεια κάλυψης του ανιχνευτή.

Η διάταξη με πολλά τηλεσκόπια αυξάνει την ανώτατη ενέργεια. $>1 \text{ TeV}$

Διάκριση από αδρονικούς καταιονισμούς

Οι ΗΜ έχουν στενότερο ίχνος

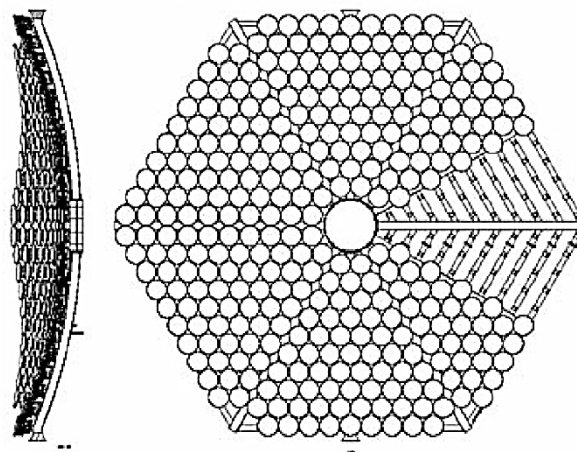
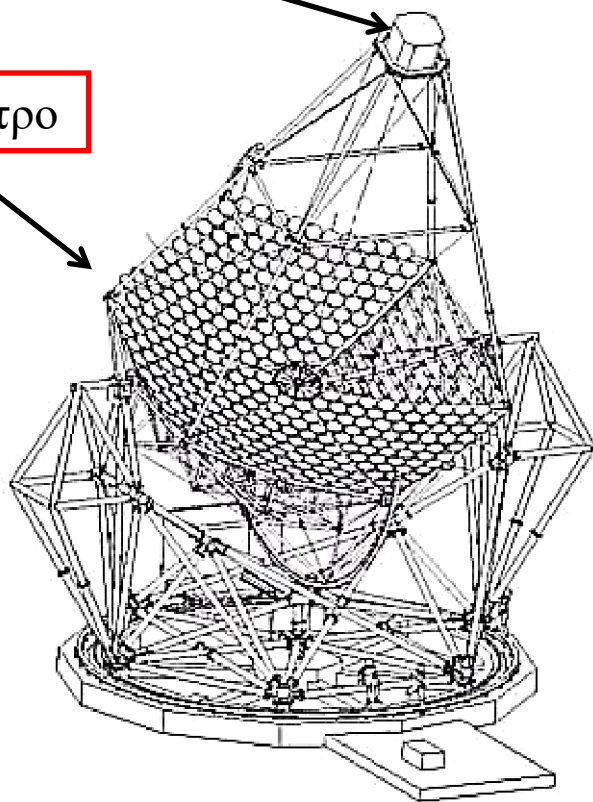
Χρονική διασπορά μικρότερη από 10 ns.

Κατασκευή με πολλά τηλεσκόπια για μεγαλύτερη διακριτότητα. ($<1^\circ$)

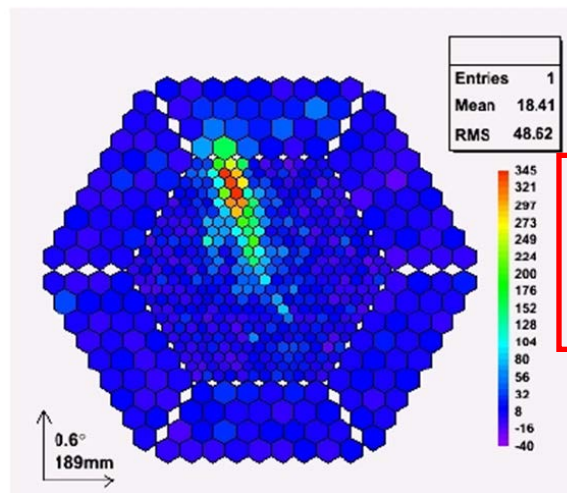
Τηλεσκόπιο Cherenkov

Κάμερα

Κάτοπτρο



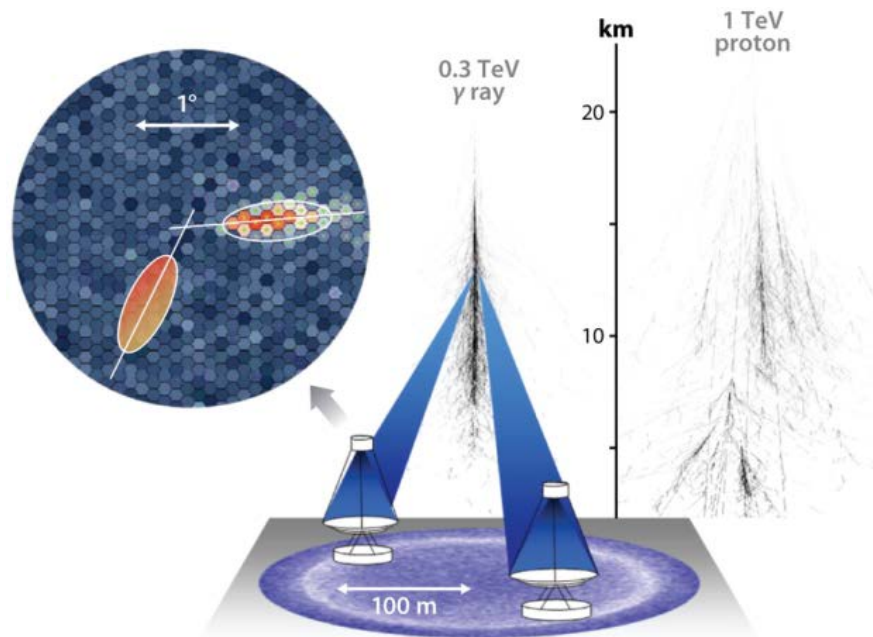
Σύνθετο κάτοπτρο,
κάθε μικρό κάτοπτρο
εστιάζει σε ένα
φωτοπολ/στή



Κάμερα αποτελούμενη από
ξεχωριστούς
φωτοπολλαπλασιαστές.

Συστοιχία Τηλεσκοπίων

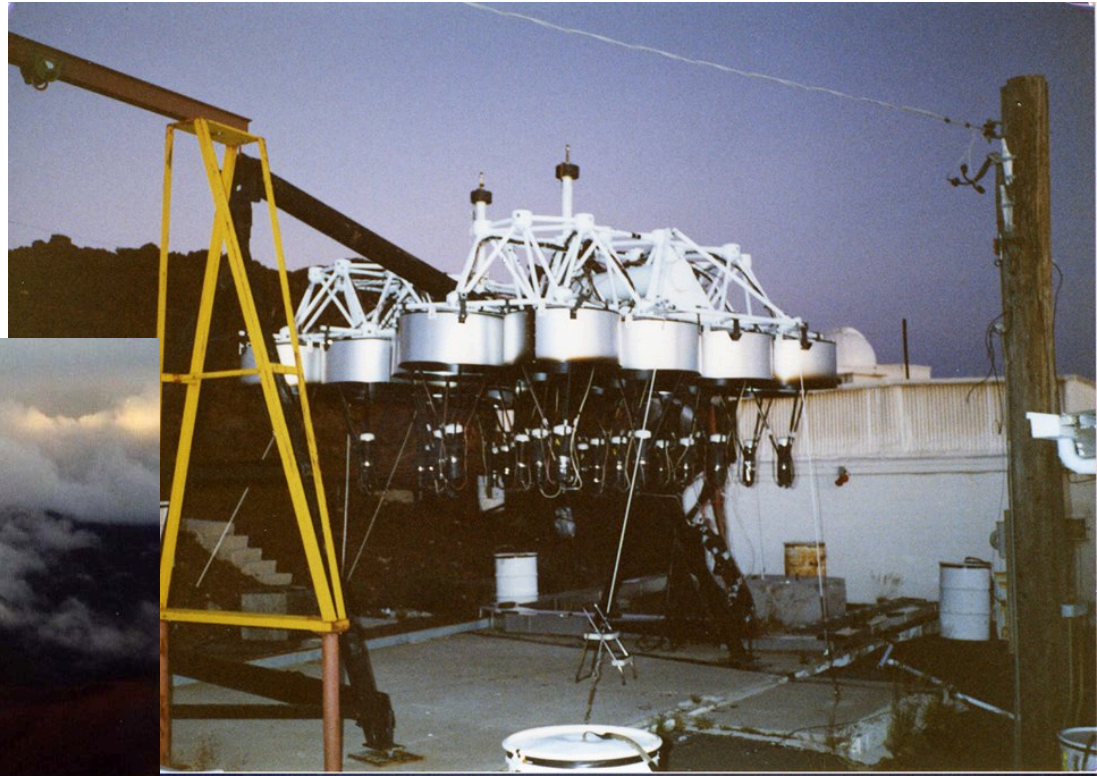
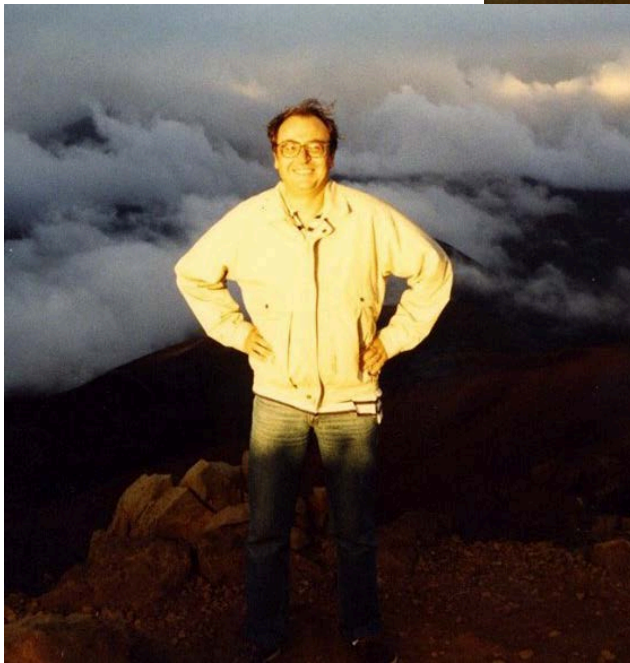
Όταν χρησιμοποιούμε διάταξη πολλών τηλεσκοπίων, στεροσκοπική διάταξη,, μπορούμε να υπολογίσουμε το ύψος που δημιουργήθηκε ο καταιονισμός.



 Hinton JA, Hofmann W. 2009.
Annu. Rev. Astron. Astrophys. 47:523–65

Hawaii-Athens-Wisconsin

Haleakala Observatoty



Whipple, VERITAS

Arizona mount Hopkins



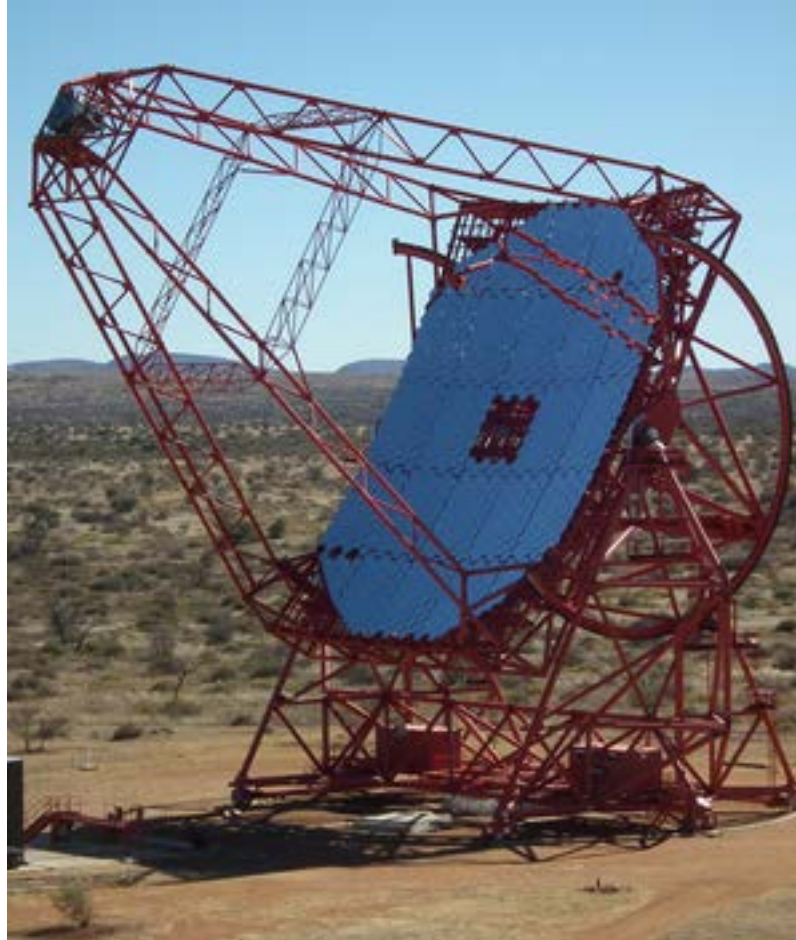
HESS

Namibia



Στερεοσκοπική διάταξη ώστε να βλέπουν τον shower από διαφορετική γωνία και να είναι δυνατή η εκτίμηση του ύψους και της διαμέτρου του.

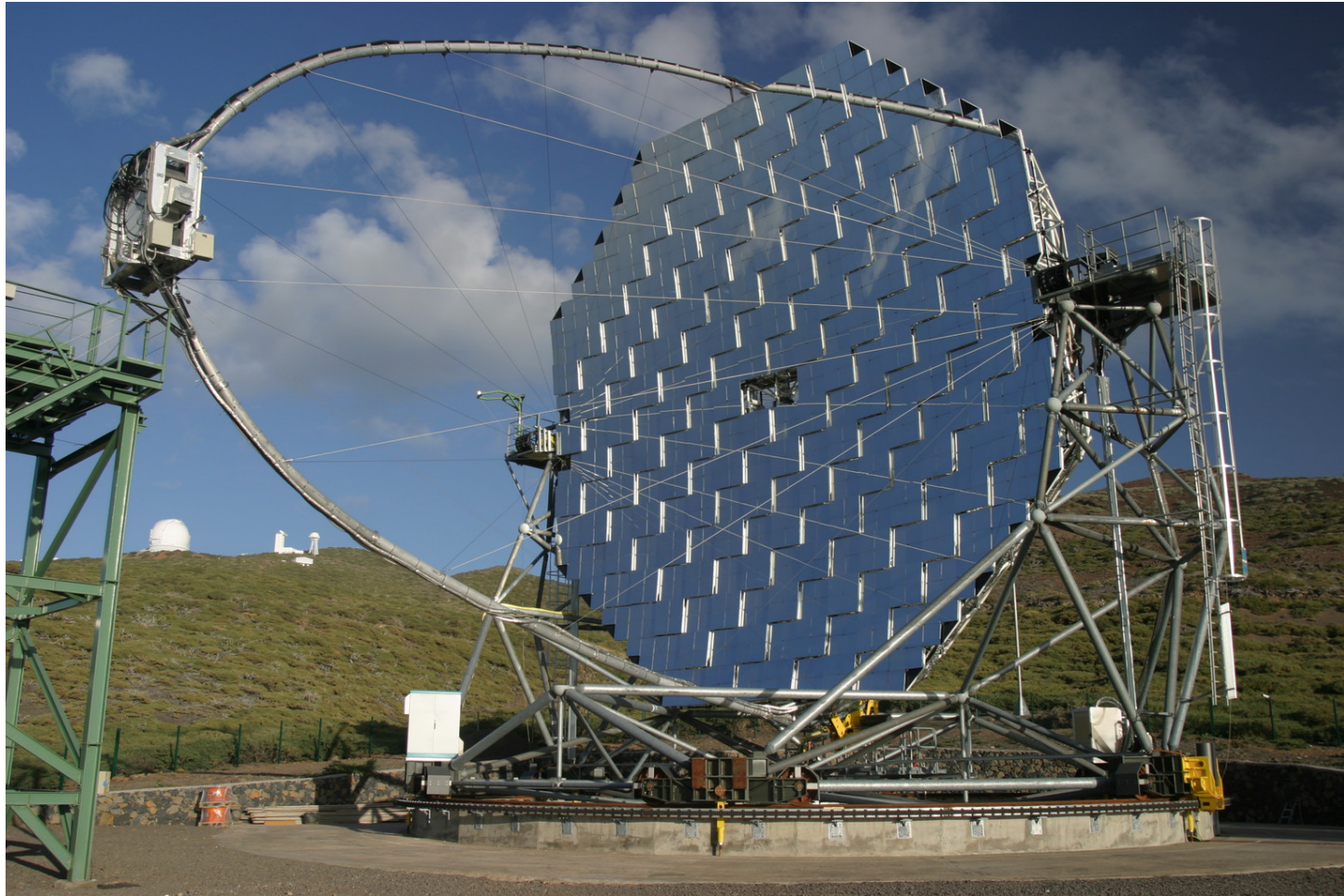
HESS



32.6 m by 24.3 m 600 m²

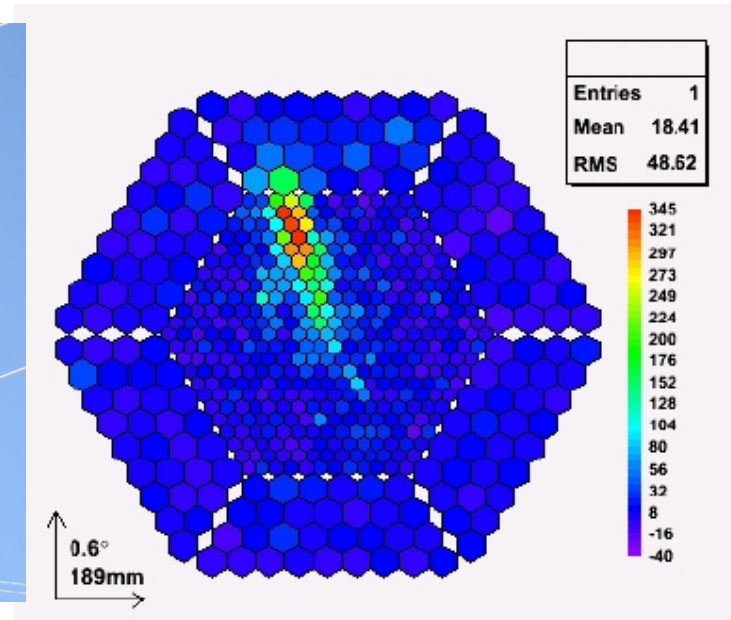
MAGIC

La Palma Kanarie island



Διάμετρος κατόπτρου 17m και επιφάνεια 236 m² η κάμερα αποτελείται από 576 PMT. Ενέργεια κατωφλίου 60 GeV. La Palma Kanarie islands Υψόμετρο 2,2 km.

Κάμερα MAGIC



Ιχνος καταιονισμού στην κάμερα.

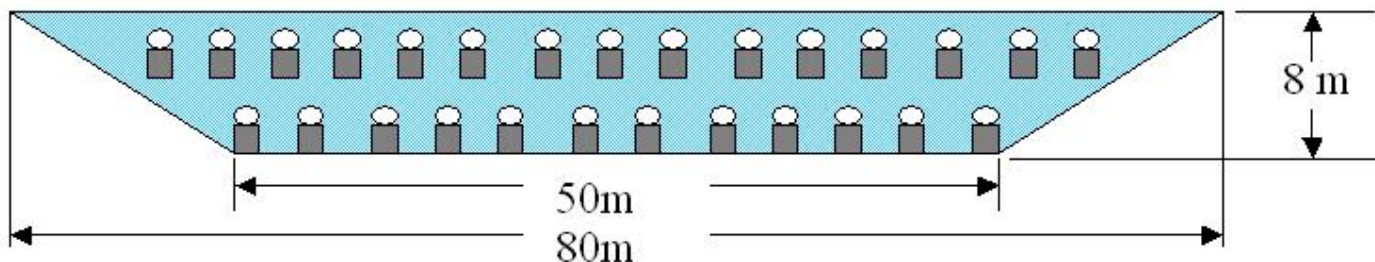
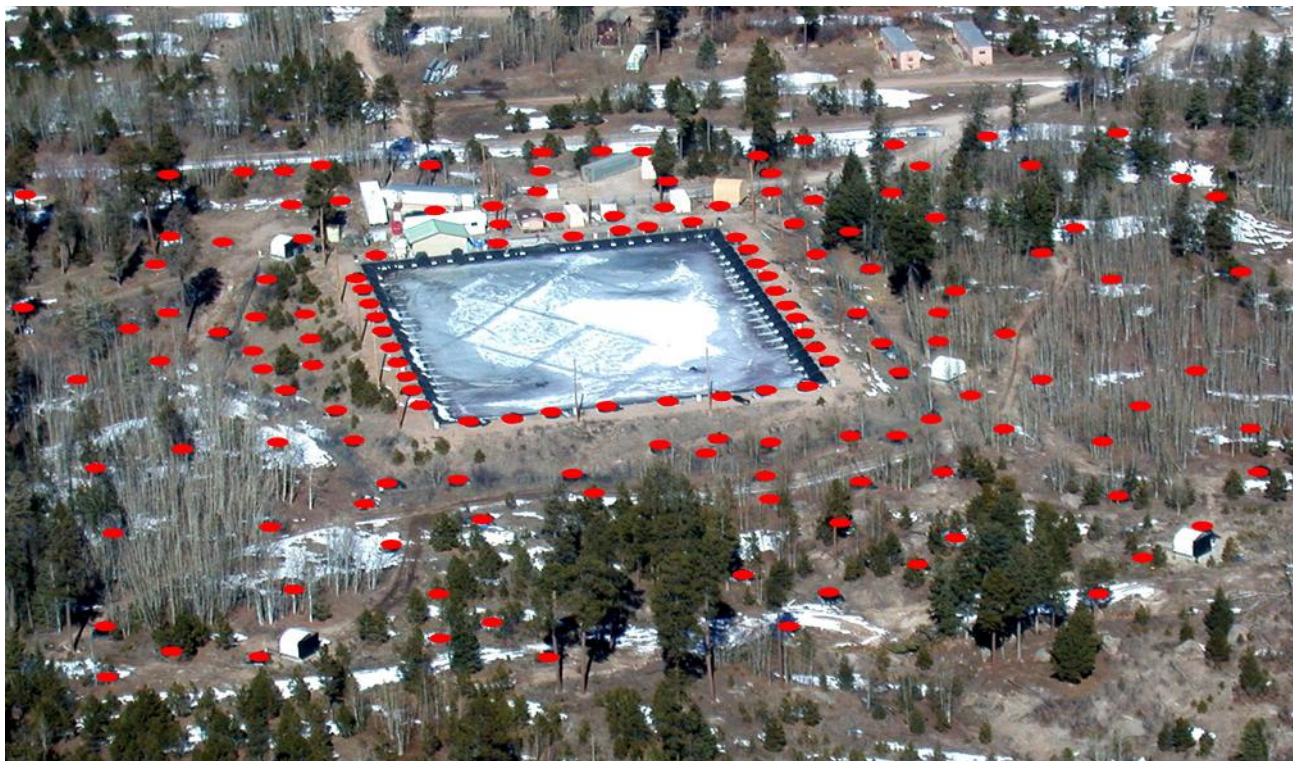
KANGAROO

Australia



4 κάτοπτρα διαμέτρου 10m και επιφάνεια $57,3 \text{ m}^2$, γωνιακό άνοιγμα 4° , σε απόσταση 100 m. Αυστραλία.

MILAGRO



Δεξαμενή νερού, με φωτοπολλαπλασιαστές. Τα ηλεκτρόνια του καταιονισμού παράγουν φως Cerenkov. Ανιχνεύει φωτόνια πολύ μεγάλης ενέργειας.