

Καταιονισμοί.

Οι καταιονισμοί δημιουργούνται από τις αντιδράσεις κοσμικών ακτίνων μεγάλης ενέργειας στην ατμόσφαιρα. Ήδη από την δεκαετία του '20 είχαν παρατηρηθεί καταιονισμοί και οι παρατηρήσεις αυτές οδήγησαν στην ανάπτυξη της θεωρίας των καταιονισμών (Rossi 1929). Το 1930 ο Auger ανακάλυψε τους εκτενείς κοσμικούς καταιονισμούς (Extensive Air Showers).

Στις ακτίνες με υψηλή ενέργεια ο μοναδικός τρόπος παρατήρησης είναι η ανίχνευση των καταιονισμών. Η Επιφάνεια που καλύπτει ένας καταιονισμός με ενέργεια 10^6 GeV είναι της τάξης των 10^4 m².

Οι ανιχνευτές αποτελούνται από πολλούς ανιχνευτές καταμετρημένους σε μεγάλη επιφάνεια. Η κάλυψη της επιφάνειας είναι συνήθως 1%.

Από το πείραμα παίρνουμε πληροφορίες για την έκταση τη διεύθυνση την πυκνότητα σωματιδίων. Ο υπολογισμός για την ενέργεια και το είδος του αρχικού σωματιδίου γίνεται συγκρίνοντας με τα αποτελέσματα εξομοίωσης Monte Carlo. Επι πλέον η σύγκριση γίνεται σε στατιστικό δείγμα λόγω των μεγάλων διακυμάνσεων που παρουσιάζουν οι καταιονισμοί στο σχήμα τους.

Ηλεκτρομαγνητικοί καταιονισμοί.

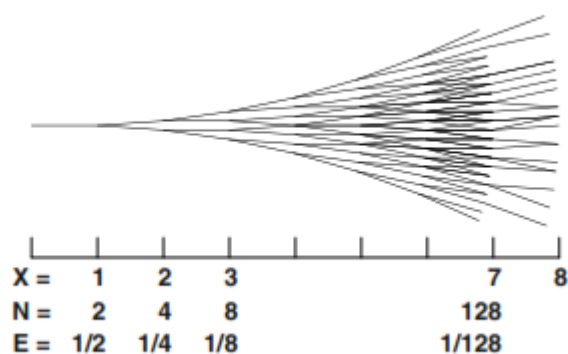


Fig. 8.1. Heitler's toy model of cascade development. In this sketch $E_c = E_0/128$.

Το βασικό μοντέλο για τους κοσμικούς καταιονισμούς όπως προτάθηκε από τον Heitler, είναι:

Το αρχικό σωματίδιο, ενέργειας E_0 μετά από ένα μήκος διάσπασης, διασπάται σε δύο σωματίδια με ενέργεια $E_0/2$. Μετά από το επόμενο μήκος διάσπασης κάθε σωματίδιο διασπάται σε δύο με ενέργεια $E_0/4$. Μετά από μήκος $X=N\lambda$ έχουν παραχθεί 2^N σωματίδια. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι που η ενέργεια των σωματιδίων γίνει ίση με την κρίσιμη ενέργεια E_c , κάτω από την οποία δεν μπορούν να παραχθούν άλλα σωματίδια.

Ολικός αριθμός σωματιδίων που παράγονται είναι ίσος με $N_{\max}=E_0/E_c$. Το βάθος που ο αριθμός σωματιδίων γίνεται μέγιστος είναι :

$$X_{\max}=\lambda \log_2(E_0/E_c)$$

Παρ όλη την απλότητα, περιγράφει τους κοσμικούς καταιονισμούς μέχρι το μέγιστο. Ο αριθμός των σωματιδίων στο μέγιστο είναι ανάλογος της ενέργειας του

αρχικού σωματιδίου και μέγιστο δημιουργείται σε βάθος που είναι ανάλογο του λογαρίθμου της ενέργειας του αρχικού.

Ο αριθμός σωματιδίων με ενέργεια $>E$ είναι αυτά που έχουν δημιουργηθεί μέχρι το βάθος E

$$N(> E) = \int 2^t dt = \int \exp(t \ln 2) dt = \frac{E_0 / E}{\ln 2}$$

Η διαφορική κατανομή είναι:

$$\frac{dN}{dE} \propto \frac{dE}{E^2}$$

Το μήκος του καταιονισμού υπολογίζεται

$$L = \frac{2}{3} \int 2^t dt \approx \frac{2}{3} (\ln 2) \frac{E_0}{E} \approx \frac{E_0}{E}$$

Οι ηλεκτρομαγνητικοί καταιονισμός ξεκινούν από ένα φωτόνιο που διασπάται σε ζεύγος $e^+ e^-$ ή από ένα ηλεκτρόνιο, ποζιτρόνιο με εκπομπή φωτονίου πέδης. Παράλληλα με τις διαδικασίες δίδυμης γέννησης και ακτινοβολίας πέδης υπάρχει και η απώλεια λόγω ιονισμού η οποία είναι μικρή σε σχέση με τις άλλες. Οι δύο διαδικασίες επαναλαμβάνονται μέχρι που η ενέργεια των προϊόντων φθάσει στη κρίσιμη ενέργεια. Κρίσιμη ενέργεια E_C είναι η ενέργεια στην οποία οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας είναι ίσες με τις απώλειες λόγω ιονισμού. Από το σημείο αυτό τα ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια και ακτίνες γάμα, χάνουν ενέργεια και τελικά απορροφούνται στην ατμόσφαιρα. Στο πρώτο αυτό μοντέλο δεν υπολογίζεται η απώλεια ενέργειας λόγω ιονισμού. όμως σε γενικές γραμμές περιγράφει την συμπεριφορά των καταιονισμών.

Το άλλο πρόβλημα είναι το διαμήκες προφίλ του καταιονισμού. Τα παραγόμενα γ και $e^+ e^-$ εκπέμπονται σε έναν κώνο γύρω από την διεύθυνση του αρχικού και επιπλέον υφίστανται πολλαπλή σκέδαση Coulomb.

Τα παραπάνω περιγράφονται με τη λεγόμενη ακτίνα Mollier $r_1 = \left(\frac{E_s}{E_c} \right) X$,

όπου $E_s = 21 \text{ MeV}$. Ο τύπος δίνει την ακτίνα σε g/cm^2 , στα διάφορα υλικά εξαρτάται από την πυκνότητα τους ενώ στην ατμόσφαιρα η πυκνότητα δεν είναι σταθερή και είναι μεγαλύτερη όταν η πυκνότητα μικραίνει.

Το πρόβλημα λύθηκε αναλυτικά από τους (Rossi, Kamata, Nishimura).

Ο τύπος ισχύει για χαμηλές ενέργειες στις υψηλότερες γίνεται στενότερη. Ο τύπος δίνει $r_1 = 9,3 \text{ g/cm}^2$, ενώ ο υπολογισμός MC για ένα φωτόνιο ενέργειας **1000 GeV** δίνει **5,94 g/cm²**.

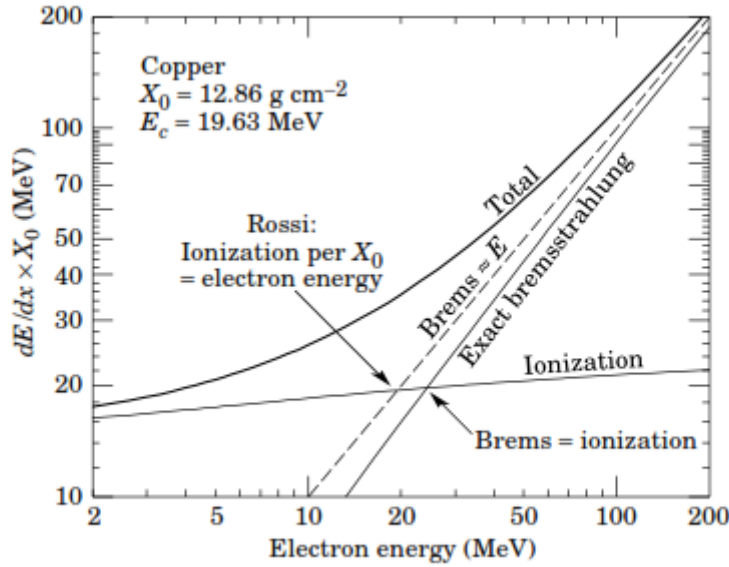


Figure 30.13: Two definitions of the critical energy E_c .

$$\sigma = \frac{7}{9} (A/X_0 N_A) .$$

Το μήκος ακτινοβολίας για τον αέρα είναι:

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

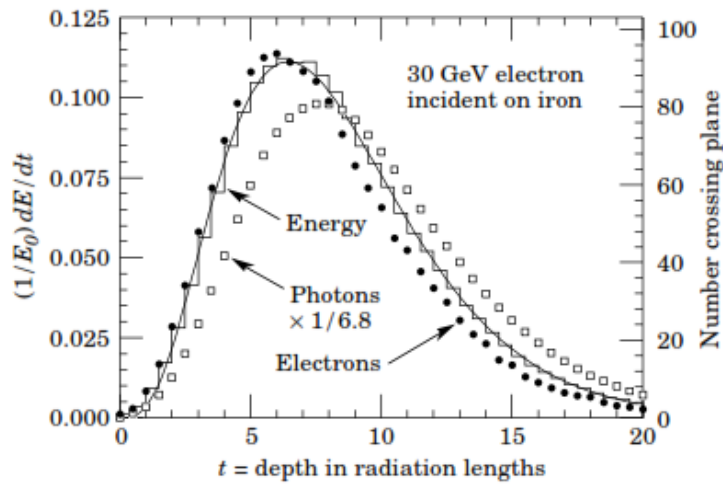


Figure 30.20: An EGS4 simulation of a 30 GeV electron-induced cascade in iron. The histogram shows fractional energy deposition per radiation length, and the curve is a gamma-function fit to the distribution. Circles indicate the number of electrons with total energy greater than 1.5 MeV crossing planes at $X_0/2$ intervals (scale on right) and the squares the number of photons with $E \geq 1.5 \text{ MeV}$ crossing the planes (scaled down to have same area as the electron distribution).

Εικόνα 11. Προσομοίωση με τον κώδικα EGS ενός καταιονισμού που δημιουργείται

από ηλεκτρόνιο 30 GeV. Δείχνει την απόθεση ενέργειας ανά μήκος ακτινοβολίας καθώς και τον αριθμό ηλεκτρονίων και φωτονίων σε κάθε βήμα.

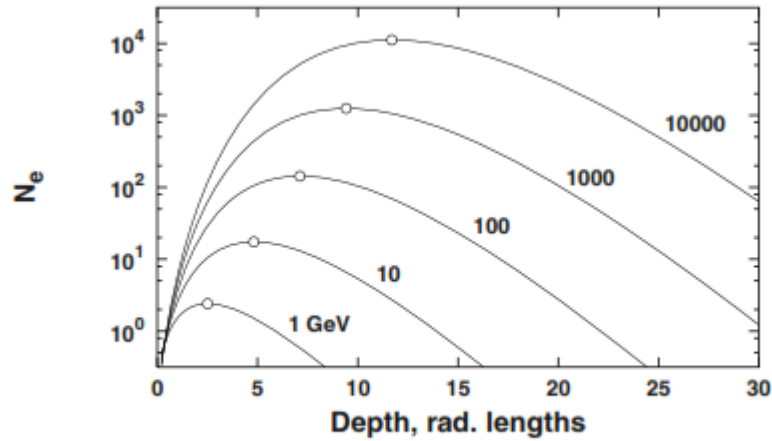


Fig. 8.2. Shower profiles for electrons in Appr. B in showers of primary photons of different energy calculated with (8.6). The primary energy is indicated by the respective profiles. The depth of shower maximum is indicated with circles.

Εικόνα 2 Αριθμός σωματιδίων και μέγιστο καταιονισμού όπως υπολογίζεται από τους τύπους των Rossi και Greisen.

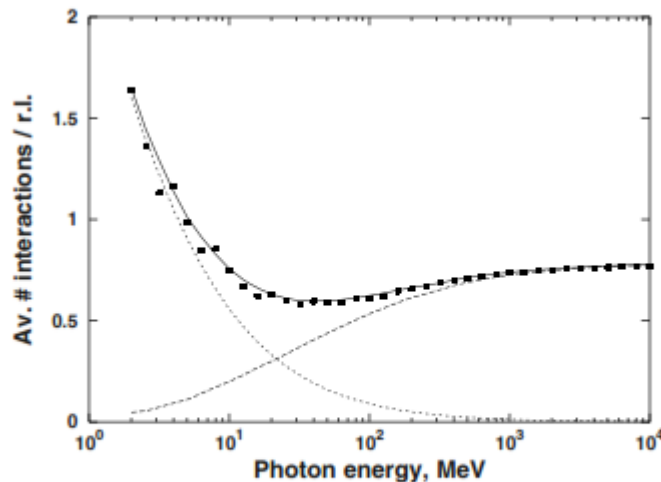


Fig. 8.4. The dashed line shows the pair-production cross-section, the dotted line the Compton cross-section and the solid line the sum of the two. The points show the cross-section realization in the Messel scheme.

Λίγα λόγια για τη μέθοδο Monte-Carlo.

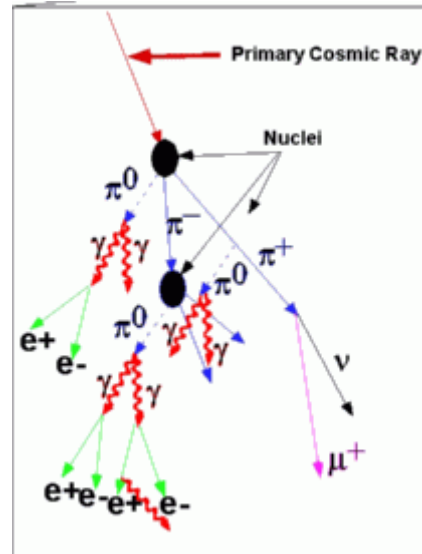
με τις προϋποθέσεις ότι υπάρχουν μόνο οι μηχανισμοί πέδησης και δίδυμης γένεσης, οι απώλειες ιονισμού είναι σταθερές (περιοχή screening). οι διατομές των παραπάνω θεωρούνται σταθερές.

Υπολογίζει το σχήμα της κατανομής, και τον αριθμό των δευτερογενών. Επίσης υπολογίζει τη στατιστική διακύμανση των μεγεθών που δεν μπορεί να γίνει αναλυτικά.

Αδρονικοί καταιονισμοί.

Οι αδρονικοί καταιονισμοί δημιουργούνται από αδρόνια υψηλής ενέργειας. Τα αδρόνια που φθάνουν στην ατμόσφαιρα είναι κυρίως πρωτόνια.

Τα αδρόνια αντιδρούν όταν εισέλθουν στην ατμόσφαιρα και παράγονται δευτερογενή σωματίδια. Ο μέσος αριθμός των δευτερογενών εξαρτάται από την ενέργεια του αρχικού αλλά παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις. Τα παραγόμενα είναι κυρίως π^+ , π^- και π^0 . Τα π^0 έχουν πολύ μικρό χρόνο ζωής $\tau=8.4 \times 10^{-17} \text{ s}$ και διασπώνται σε δύο γάμμα. Η διαδρομή διάσπασης 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, $\tau=2,6 \times 10^{-8}$, $l_d = \gamma \times 780 \text{ cm}$. Τα προϊόντα διάσπασης είναι πάλι πόνια. Κατά μέσον όρο τα 2/3 των δευτ είναι φορτισμένα και το 1/3 ουδέτερα πόνια. Τα φορτισμένα πόνια χαμηλής ενέργειας έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να διασπαστούν σε μόνια και νετρίνα. Τα μόνια αποτελούν κύρια συστατικά των καταιονισμός στην επιφάνεια της γης.



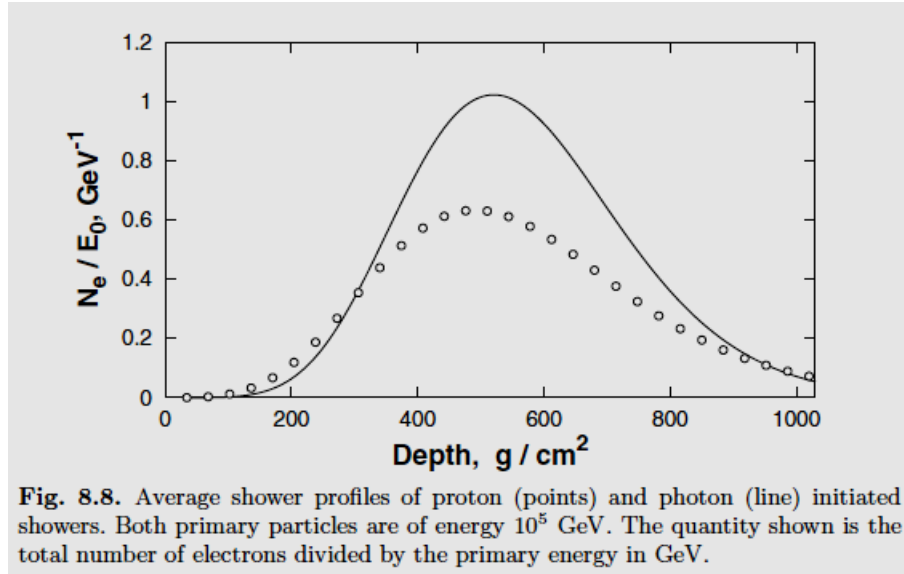
Οι αδρονικοί καταιονισμοί διαφέρουν από τους ηλεκτρομαγνητικούς πρώτον στο αριθμό των δευτερογενών. Ένα πρωτόνιο με ενέργεια 10^5 GeV δίνει $\langle m \rangle = 20$ δευτερογενή.

Λόγω του μεγάλου μήκους αντίδρασης των πρωτονίων, υπάρχει μεγάλη διακύμανση στο σημείο αντίδρασης του πρωτεύοντος, δηλαδή στο βάθος της ατμόσφαιρας που αντιδρούν. Το μήκος αντίδρασης των πονίων (120 g/cm^2) είναι μεγαλύτερο από το μήκος ακτινοβολίας των ηλεκτρομαγνητικών αντιδράσεων. Έτσι πολλά δευτερογενή πόνια διανύουν μεγάλη απόσταση πριν αντιδράσουν. Λόγω των διακυμάνσεων αυτών, το προφίλ των αδρονικών καταιονισμών είναι ακανόνιστο. Το ένα τρίτο από τα παραγόμενα πόνια αποτελείται από π^0 τα οποία διασπώνται σε 2γ οι οποίες δίνουν Η.Μ. καταιονισμούς. Δηλαδή ένα μεγάλο μέρος της ενέργειας πηγαίνει στη δημιουργία ηλεκτρομαγνητικών καταιονισμών. Τα πόνια υψηλής ενέργειας αντιδρούν πριν διασπαστούν, ενώ τα μικρής ενέργειας διασπώνται σε μόνια και νετρίνα.

Το χαρακτηριστικό στην παρατήρηση των αδρονικών καταιονισμών είναι η παρουσία των μιονίων. προφανώς υπάρχουν αδρόνια και μεσόνια αλλά ο αριθμός τους είναι μικρότερος από των ηλεκτρονίων και μιονίων.

Η πολλαπλότητα των παραγόμενων δευτερογενών είναι μεγαλύτερη από των ηλεκτρομαγνητικών με αποτέλεσμα η διάδοσή τους να μη διαφέρει σημαντικά από εκείνη των ηλεκτρομαγνητικών.

Στην εικόνα βλέπουμε το προφίλ ενός αδρονικού και ενός ηλεκτρομαγνητικού που ξεκίνησαν από σωματίδιο της ίδιας ενέργειας. Το βάθος του μεγίστου είναι αντίστοιχα 506 και 520 g/cm^2 (περίπου 10 km)



Αντίστοιχα το απλό μοντέλο του Heitler μπορεί να εφαρμοστεί και στην περίπτωση των μιονίων. Για παράδειγμα το 50% της ενέργειας πηγαίνει σε πιόνια από τα οποία το 1/3 είναι ουδέτερα και δίνουν Η.Μ. κατ. Χρησιμοποιώντας τον τύπο του Η. υπολογίζουμε για το X_{max} :

$$X_{max} = X_0 \ln \left[\frac{2(1 - K_{el})E_0}{(\langle m \rangle / 3)\epsilon_0} \right] + \lambda_N(E_0)$$

Ο αριθμός των ηλεκτρονίων στο μέγιστο γίνεται:

$$N_e^{max} = \frac{1}{2} \frac{\langle m \rangle}{3} \frac{(1 - K_{el})E_0}{\epsilon_0}$$

the neutral pion energy. With a reasonable choice of values for $K_{el} = 0.5$, $\langle m \rangle = 12$ and $\lambda_N = 80$ g/cm², the depth of maximum of a 10^5 GeV proton initiated shower is estimated at about 500 g/cm² and the size at maximum at about 8×10^4 electrons. Since all parameters in Eqs. (8.10) and (8.11) are energy

Μια άλλη παραμετροποίηση μας δίνει τον αριθμό των παραγόμενων πιονίων και μιονίων:

$$\ln N_\mu = \ln N_\pi = n_c 2\langle m \rangle / 3 = \beta \ln(E_0 / \epsilon_\pi) ,$$

$$N_\mu = (E_0 / \epsilon_\pi)^\beta ,$$

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

Στις ακτίνες που αποτελούνται από πυρήνες ισχύει η ίδια διαδικασία αλλά ο αριθμός των προϊόντων πολλαπλασιάζεται με το ατομικό βάρος του πυρήνα. Γενικά θεωρούμε ότι ένας πυρήνας με ενέργεια E_0 συμπεριφέρεται σαν N νουκλεόνια με ενέργεια E_0/N . Επίσης λόγω της μεγαλύτερης ενεργής διατομής, μικρότερο μήκος αντίδρασης, παράγονται σε μεγάλο ύψος στην ατμόσφαιρα. Το μέγιστο σχηματίζεται σε μεγαλύτερο ύψος και για αυτό πρέπει να παρουσιάζουν μικρότερο ίχνος στο επίπεδο ανίχνευσης. Άλλα χαρακτηριστικά είναι η μικρότερη στατιστική διακύμανση και η μεγαλύτερη πυκνότητα μιονίων. Γίνεται προσπάθεια να αξιοποιηθούν τα χαρακτηριστικά αυτά για τον πειραματικό προσδιορισμό των πυρήνων που δημιουργούν τους καταιονισμούς.

Πειράματα για ανίχνευση εκτεταμένων καταιονισμών.

Στην εικόνα βλέπουμε το υποθετικό πείραμα για την ανίχνευση EAS. Το πείραμα καλύπτει μια μεγάλη έκταση περίπου 10^4 m^2 . Αν θέλουμε να ανιχνεύσουμε καταιονισμούς με ενέργεια $10^{14} - 10^{15}$ το πείραμα γίνεται σε μεγάλο υψόμετρο. Για

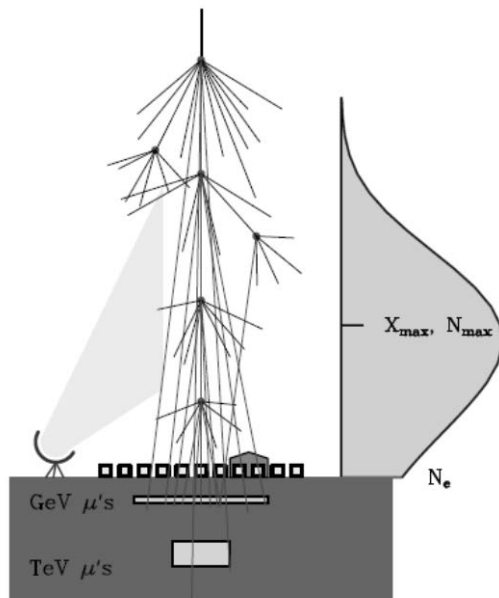


Fig. 8.12. Cartoon of shower development and detection.

Εικόνα 3 τυπικό πείραμα για EAS . CORSICA-GRANDE

EAS μεγαλύτερης ενέργειας το πείραμα γίνεται στην επιφάνεια της θάλασσας ώστε ο EAS να έχει απόσταση να αναπτυχθεί.

Παρατηρούμε ότι στην επιφάνεια είναι διασκορπισμένοι ανιχνευτές σπινθηρισμού για την ανίχνευση φορτισμένων σωματιδίων. Η ενεργός επιφάνεια είναι περίπου 1% της συνολικής.

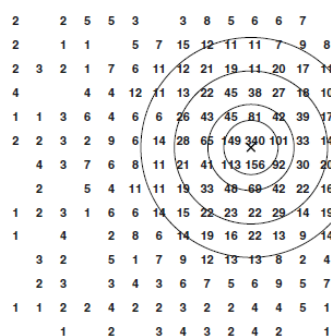


Fig. 8.13. Map of an air shower in a 196 detector array on a 15 m grid. The densities from (8.18) fluctuate with a Gaussian distribution with $\sigma = \sqrt{\rho}$. Because of that some detectors do not trigger.

Εικόνα 4 Κατανομή χτυπημάτων στον ανιχνευτή μιονίων

Επίσης στην ίδια περιοχή έχουμε εγκαταστήσει κάτοπτρα για την ανίχνευση της ακτινοβολίας Cherekov.

Σε μικρό βάθος στο έδαφος, κάτω από 2,5 μέτρα τσιμέντου, έχουμε τοποθετήσει σπινθηριστές για την ανίχνευση των μιονίων. Επίσης σε ένα μέρος της

διάταξης έχουμε τοποθετήσει ένα καλορίμετρο για τη μέτρηση της ενέργειας των αδρονίων.

Τα περισσότερα πειράματα χρησιμοποιούν αυτές τις τεχνικές για να μετρήσουν τους EAS.

Συμβολικά στο σχήμα έχουμε σχεδιάσει και έναν ανιχνευτή σε μεγάλο βάθος για την μέτρηση μιονίων ενέργειας μεγαλύτερης από 1 TeV. Για τις μετρήσεις αυτές το βάθος πρέπει να είναι 4 – 4,5 km ισοδύναμο βάθος νερού., ή περίπου 1500 – 2000 μέτρα βράχου. Τα πειράματα αυτά γίνονται σε στοές ορυχείων σε μεγάλο βάθος.

Τι πληροφορίες παίρνουμε από το πείραμα.

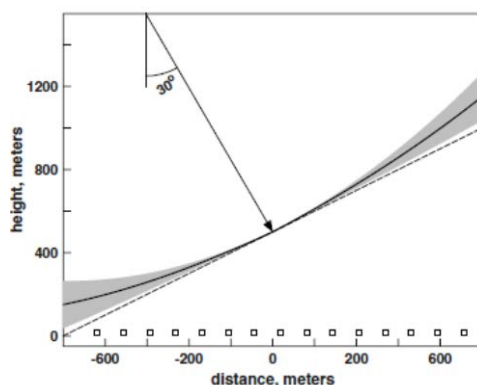
Ο σπινθηριστής δίνει σήμα όταν περάσει ένα φορτισμένο σωματίο. Όταν ένας μεγάλος αριθμός έχει σήμα συγχρόνως, τότε δημιουργείται η σκανδάλη για το πείραμα. Τα φορτισμένα σωματίδια που φθάνουν στο έδαφος είναι στο μεγαλύτερο ποσοστό ηλεκτρόνια - ποζιτρόνια που έχουν δημιουργηθεί από δευτερεύοντες ηλεκτρομαγνητικούς καταιονισμούς. Τα μίονια που προέρχονται από την διάσπαση των πονίων είναι περίπου το 1/10 των ηλεκτρονίων.

Επίσης στο κέντρο του καταιονισμού σε στενό κώνο φθάνουν τα αδρόνια τα οποία είναι κυρίως πόνια.

Τα φορτισμένα σωματίδια κινούνται με ταχύτητα πολύ κοντά στην ταχύτητα του φωτός

Και έτσι ταξιδεύουν σχεδόν ταυτόχρονα με μορφή δίσκου πάχους μερικών μέτρων.

Από το σχ φαίνεται ότι ο πρώτος σπινθηριστής που θα χτυπηθεί είναι προς τη διεύθυνση του K . Έτσι από τον χρόνο που χτυπιέται κάθε σπινθηριστής, μπορούμε να υπολογίσουμε την διεύθυνση του αρχικής ακτίνας.



Εικόνα 5. Μέτωπο Καταιονισμού

Από το ύψος του παλμού μπορούμε να υπολογίσουμε τον αριθμό των σωματιδίων σε κάθε σπινθηριστή. Στη κατανομή των χτυπημένων σπινθηριστών υπολογίζουμε ισουψείς καμπύλες που αντιστοιχούν στην πυκνότητα των φορτισμένων σωματιδίων και μπορούμε να υπολογίσουμε τη θέση του κέντρου του καταιονισμού. Όπως έχουμε αναφέρει ο αριθμός των σωματιδίων είναι ανάλογος με την ενέργεια του αρχικού, αλλά ο αριθμός που ανιχνεύουμε εξαρτάται από το ύψος στο οποίο δημιουργήθηκε ο K . Η Ενέργεια μπορεί να εκτιμηθεί από τους παραμετρικούς τύπους των ... Στα σύγχρονα πειράματα γίνονται δοκιμές και

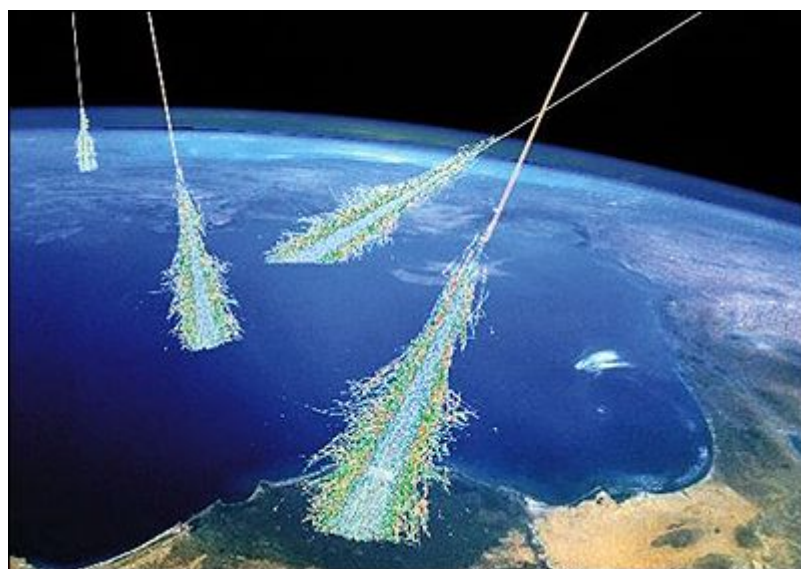
υπολογίζουμε την ενέργεια για την οποία συμπίπτει η παραγόμενη κατανομή. Η ίδια ανάλυση γίνεται και για τα μίονια μικρής ενέργειας. Επειδή τα μίονια διανύουν μεγάλη απόσταση μπορούμε να εκτιμήσουμε το ύψος παραγωγής από τον λόγο ηλεκτρονίων προς μίονια.

Επίσης σε πείραμα που έχει κάλυψη από ανιχνευτές Cherenkov, μπορούμε να υπολογίσουμε τον αριθμό των ηλεκτρονίων από το φως που εκπέμπουν και από εκεί την ενέργεια του αρχικού. Το φως ακολουθεί την κατά πλάτος κατανομή των δευτερογενών και σχηματίζει έναν κύκλο διαμέτρου 150-200 m. Η πυκνότητα του φωτός γύρω από τον πυρήνα εξαρτάται από το ύψος σχηματισμού στην ατμόσφαιρα. Κάνοντας εξομοίωση του σχήματος με MC μπορούμε να εκτιμήσουμε το σημείο σχηματισμού με ακρίβεια 10-20 g/cm². Στα σύγχρονα πειράματα οι ανιχνευτές Cherenkov χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με σπινθηριστές.

Μια άλλη διάταξη, χρησιμοποιεί κάτοπτρα, για να ανιχνεύσει το φως που παράγεται από τον ιονισμό των ατόμων του αζώτου (Fly's eye, HiRes. Ένα φορτισμένο σωματίο παράγει 4 φωτόνια /m . Επειδή το φως αυτό είναι λίγο, μόνο K πολύ μεγάλης ενέργειας $E > 10^{17}$ eV μπορούν να ανιχνευθούν. Το πρώτο πείραμα το είδους ήταν το Fly's eye με μία διάταξη που κάλυπτε τον ουράνιο θόλο, Στο HiRes χρησιμοποιήθηκαν 2 διατάξεις σε μεγάλη απόσταση έτσι ώστε στην κοινή περιοχή ανίχνευσης, να υπάρχουν δύο όψεις υπό γωνία και να μπορεί να υπολογιστεί το ύψος του K.

Στην περίπτωση που υπάρχει μόνον μια όψη, η απόσταση υπολογίζεται από τον χρόνο πτήσης ανάμεσα σε δύο ανιχνευτές. Η γωνιακή απόσταση ανάμεσα σε δύο ανιχνευτές είναι περίπου 2⁰.

Η ενέργεια του σωματιδίου υπολογίζεται από το συνολικό φως που συλλέγεται από τους PMT . Προφανώς πρέπει να γίνει διόρθωση για την απορρόφηση του φωτός στην ατμόσφαιρα.



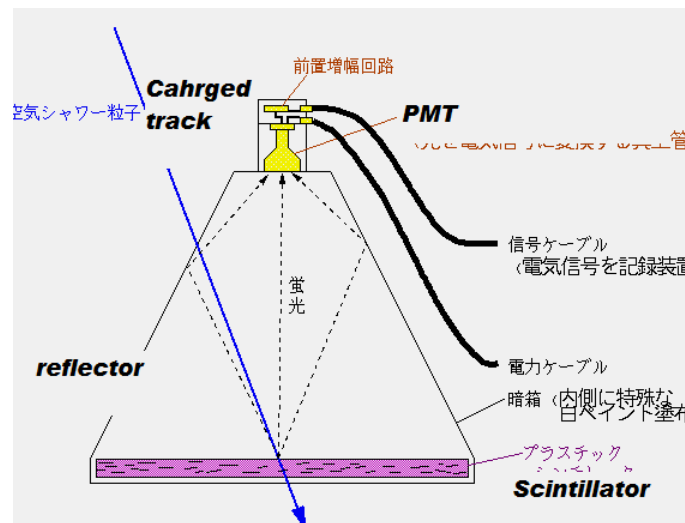
Εικόνα 6 αναπαράσταση EAS

Λίγα λόγια για τους ανιχνευτές σωματιδίων.

Ανίχνευση μιονίων.

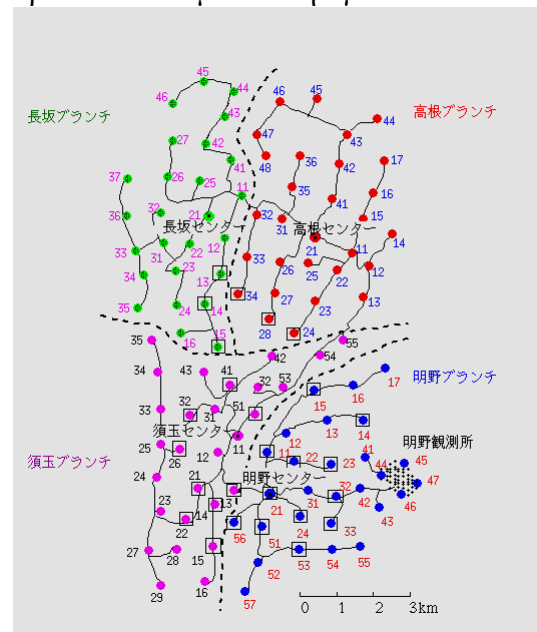
Στους ανιχνευτές κοσμικών ακτινοβολιών στην επιφάνεια του εδάφους χρησιμοποιούνε πλαστικούς σπινθηριστές με μεγάλες διαστάσεις. Οι πλαστικοί σπινθηριστές έχουν την ιδιότητα να παράγουν ένα φωτεινό παλμό όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο τους διασχίζει. (Για περισσότερες πληροφορίες διαβάστε το κείμενο που έχω γράψει στο φυλλάδιο του εργαστηρίου).

Γενικά τα κοσμικά σωματίδια έχουν υψηλές ταχύτητες και ο σπινθηριστής δεν δίνει πληροφορίες για την ενέργεια τους.



Εικόνα 7 Μονάδα σπινθηριστή, AGASA

Στους ανιχνευτές καταιονισμών χρησιμοποιούμε μεγάλο αριθμό διασπαρμένων σπινθηριστών. Από τον αριθμό των χτυπημένων σπινθηριστών υπολογίζουμε τον αριθμό των φορτισμένων σωματιδίων και από την χρονική ακολουθία τον προσανατολισμό και την γωνία του καταιονισμού.



Εικόνα 8 Πείραμα AGASA

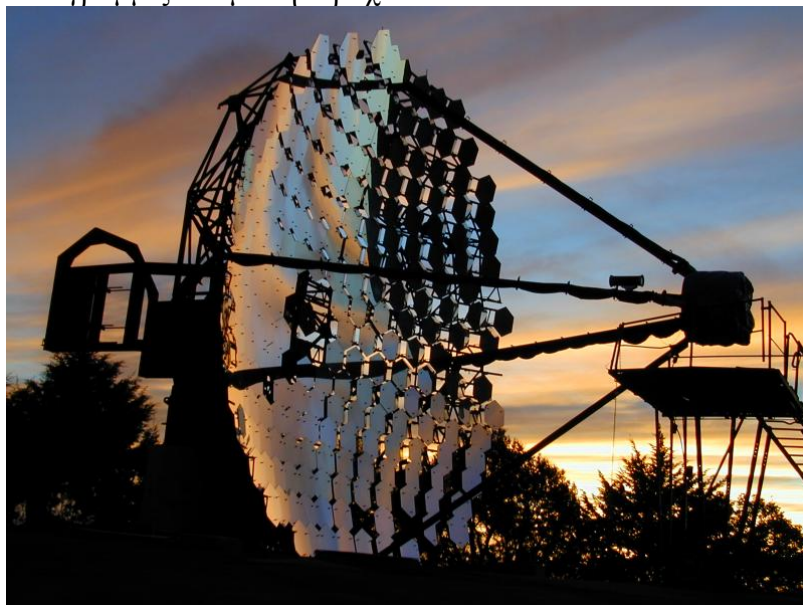
Τα σωματίδια που φθάνουν στην επιφάνεια της γης δεν είναι μόνον μίονια αλλά και ηλεκτρόνια ή πρωτόνια. Ο απλούστερος τρόπος για να καταμετρήσουμε μόνον τα μίονια, είναι να τοποθετήσουμε τους ανιχνευτές μέσα στο έδαφος. Το έδαφος έχει επιφανειακή πυκνότητα $2,5 \text{ g/cm}^2$ και μήκος ακτινοβολίας $10,7 \text{ cm}$, μήκος αντίδρασης 100 cm . Βάθος εδάφους 4 m είναι ισοδύναμο με το κατακόρυφο ύψος της ατμόσφαιρας. Επειδή η σύσταση του εδάφους διαφέρει χρησιμοποιούμε τον τυπικό βράχο (standard rock) που αντιστοιχεί στα ποιο δεδομένα υλικά του εδάφους. Ένα μικρό πάχος σκυροδέματος είναι αρκετό για να αποκόψει τα ηλεκτρόνια και τα άλλα σωματίδια.

Ανιχνευτές ακτινοβολίας Cerenkov.

Η ακτινοβολία Cerenkov είναι φως που εκπέμπεται από ένα υλικό όταν διασχίζεται από σχετικιστικό φορτισμένο σωματίδιο. (βλέπε σχετική διαφάνεια).

Το φαινόμενο το αξιοποιούμε για να ανιχνεύσουμε σωματίδια με μεγάλες ταχύτητες, ή να ταυτοποιήσουμε τα σωματίδια ή να διαχωρίσουμε σωματίδια με μεγάλη ταχύτητα.

Στα πειράματα κοσμικών που παρατηρούν καταιονισμούς χρησιμοποιούμε κάτοπτρο που εστιάζει το φως σε φωτοπολλαπλασιαστή. Η γωνία που εκπέμπεται το φως στην ατμόσφαιρα είναι μικρή ($\theta < 1.4^\circ$) άρα για να δούμε το φως πρέπει το κάτοπτρο να ευθυγραμμίζεται με την τροχιά.



Εικόνα 9 Whipple

Για τον εντοπισμό σημειακών πηγών μια διάταξη κατόπτρων προσανατολίζεται ώστε να δείχνει σε ένα σημείο στον ουρανό. Η διάταξη τοποθετείται σε μηχανισμό παρακολούθησης του ουρανού και προσανατολίζεται στην πιθανή πηγή. Η παρουσία καταιονισμού καταγράφεται όταν ένας αριθμός PMT δώσει ταυτόχρονο σήμα.

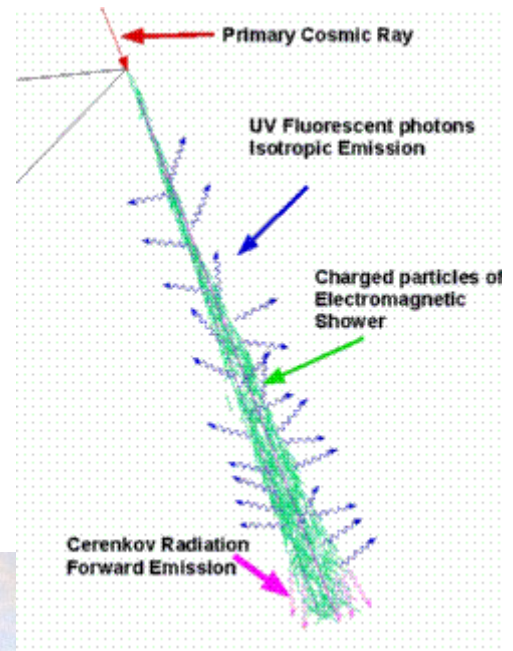
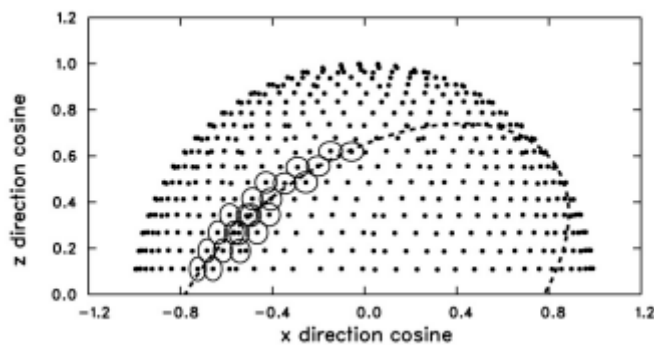
Επίσης συχνά χρησιμοποιούνται δοχεία με νερό, όπου το φορτισμένο σωματίδιο παράγει ακτινοβολία Cerenkov. Η ακτινοβολία ανιχνεύεται από φωτοπολλαπλασιαστή.

Στα πειράματα νετρίνων που γίνονται σε μεγάλο βάθος στη γη χρησιμοποιούμε μια μεγάλη δεξαμενή νερού και τα παραγόμενα ηλεκτρόνια ή μίονια ανιχνεύονται από το φως cerenkon που εκπέμπουν.

Στα πειράματα που γίνονται σε μεγάλο βάθος στη θάλασσα τα μίονια που παράγονται από τα νετρίνα εντοπίζονται από το φως cer που εκπέμπουν.

Ανιχνευτές ατμοσφαιρικής φωταύγειας.

Είναι δυνατόν να ανιχνευτούν κατ. μεγάλης ενέργειας παρατηρώντας την ακτινοβολία που προκαλείται από τον ιονισμό του αέρα. Χρησιμοποιούνται κάτοπτρα με φωτοπολλαπλασιαστή αλλά τα κάτοπτρα προσανατολίζονται παράλληλα 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.



Εικόνα 10 Flies Eye, Hi-Res, ατμοσφαιρικός ιονισμός, τροχιά στον ουράνιο θόλο, κάτοπτρο με λυχνίες.

B. Rossi, “High Energy Particles” 1960.

T. Stanev , “High Energy Cosmic Rays” , Springer , 2009.

<http://www.cosmic-ray.org/news/sbf/sld014.htm>

<http://www-akeno.icrr.u-tokyo.ac.jp/AGASA/>

<http://www.auger.org/>

<https://en.wikipedia.org/wiki/Super-Kamiokande>

<http://icecube.wisc.edu/>

Ηλεκτρομαγνητικοί Καταιονισμοί.

Ακτινοβολία πέδησης

Δίδυμη Γένεση

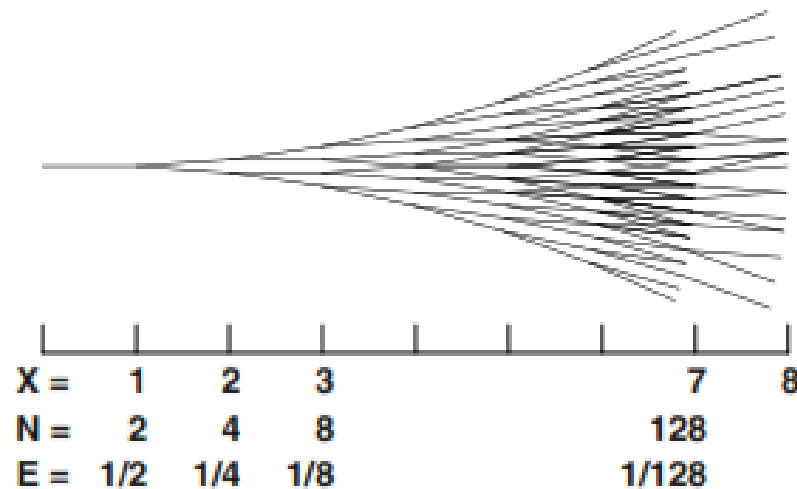


Fig. 8.1. Heitler's toy model of cascade development. In this sketch $E_c = E_0/128$.

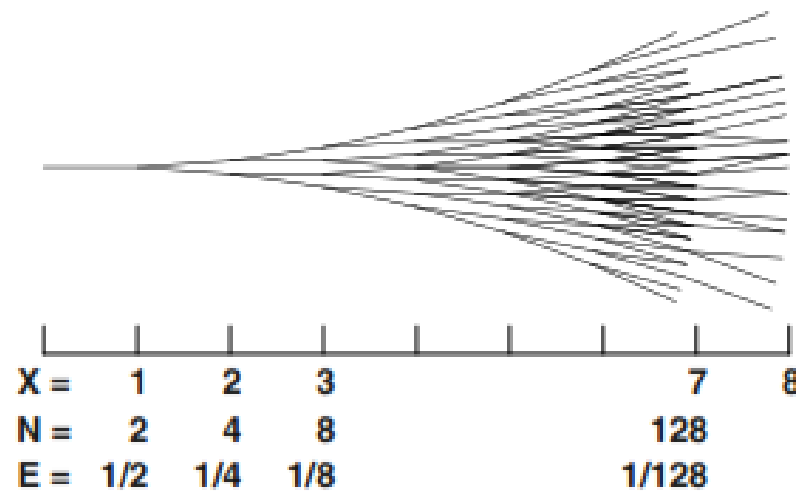
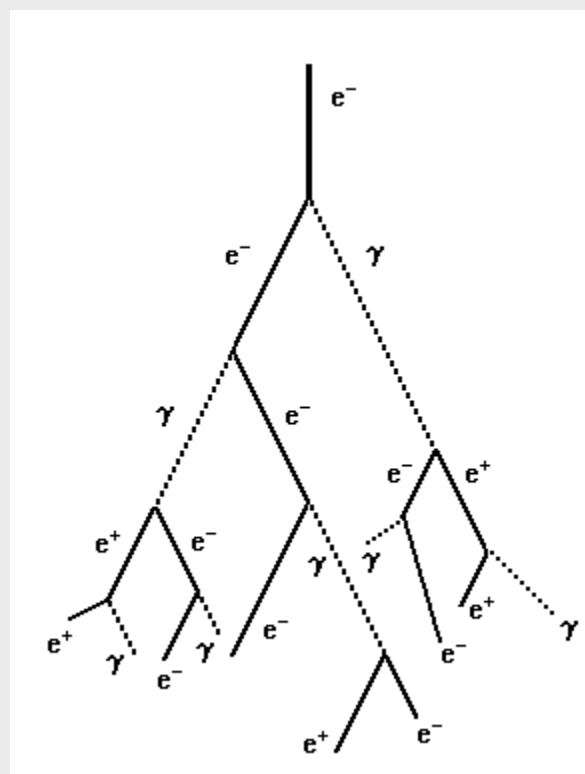


Fig. 8.1. Heitler's toy model of cascade development. In this sketch $E_c = E_0/128$.

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

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



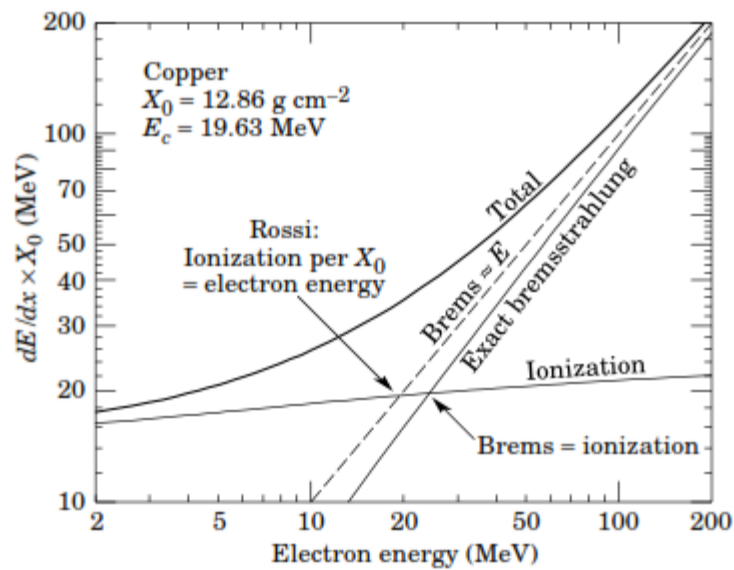


Figure 30.13: Two definitions of the critical energy E_c .

ορισμός κρίσιμης ενέργειας.

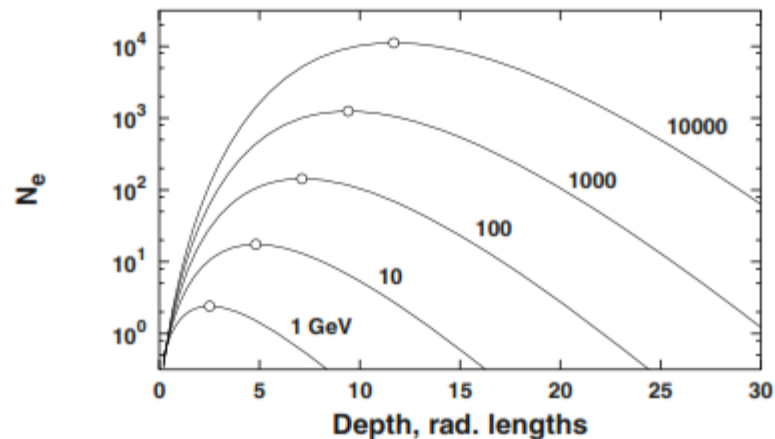


Fig. 8.2. Shower profiles for electrons in Appr. B in showers of primary photons of different energy calculated with (8.6). The primary energy is indicated by the respective profiles. The depth of shower maximum is indicated with circles.

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

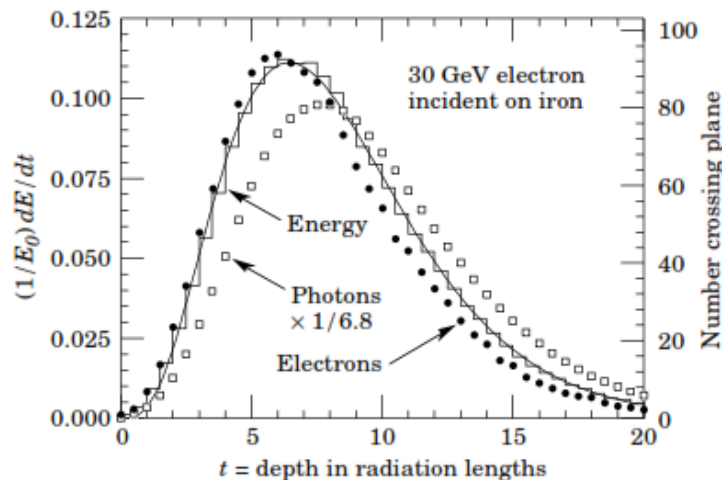


Figure 30.20: An EGS4 simulation of a 30 GeV electron-induced cascade in iron. The histogram shows fractional energy deposition per radiation length, and the curve is a gamma-function fit to the distribution. Circles indicate the number of electrons with total energy greater than 1.5 MeV crossing planes at $X_0/2$ intervals (scale on right) and the squares the number of photons with $E \geq 1.5$ MeV crossing the planes (scaled down to have same area as the electron distribution).

Προσομοίωση με τον κώδικα EGS ενός καταιονισμού που δημιουργείται από ηλεκτρόνιο 30 GeV. Δείχνει την απόθεση ενέργειας ανά μήκος ακτινοβολίας καθώς και τον αριθμό ηλεκτρονίων και φωτονίων σε κάθε βήμα

Ακτίνα Molier

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

$$E_s = 21 \text{ MeV}$$

Ο τύπος δίδει την ακτίνα σε g/cm², στα διάφορα υλικά εξαρτάται από την πυκνότητα τους ενώ στην ατμόσφαιρα η πυκνότητα δεν είναι σταθερή και είναι μεγαλύτερη όταν η πυκνότητα μικραίνει.

Ο τύπος ισχύει για χαμηλές ενέργειες στις υψηλότερες 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/cm²**

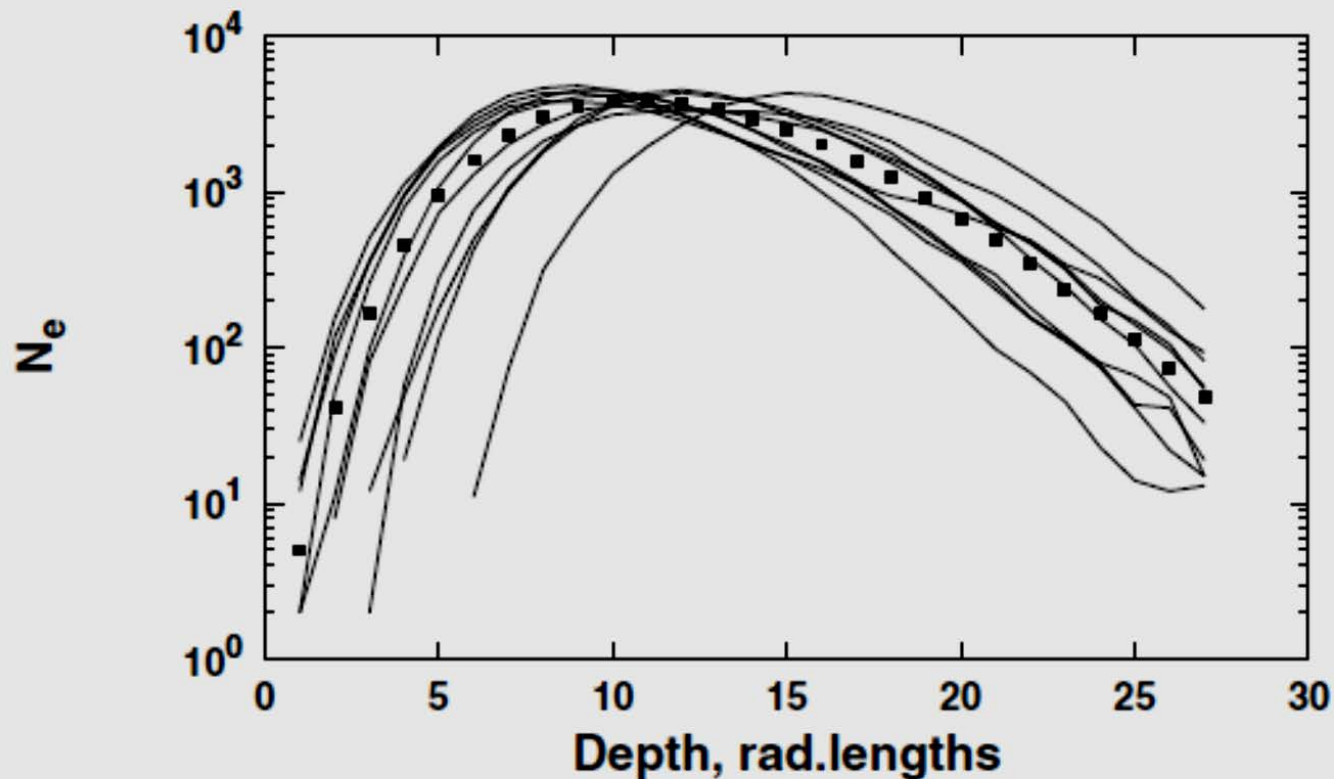


Fig. 8.6. Number of electrons with energy above 1 GeV in a shower from primary photon of energy 10^5 GeV. The lines show the shower profiles for 10 individual showers and the squares show the average profile from 100 showers.

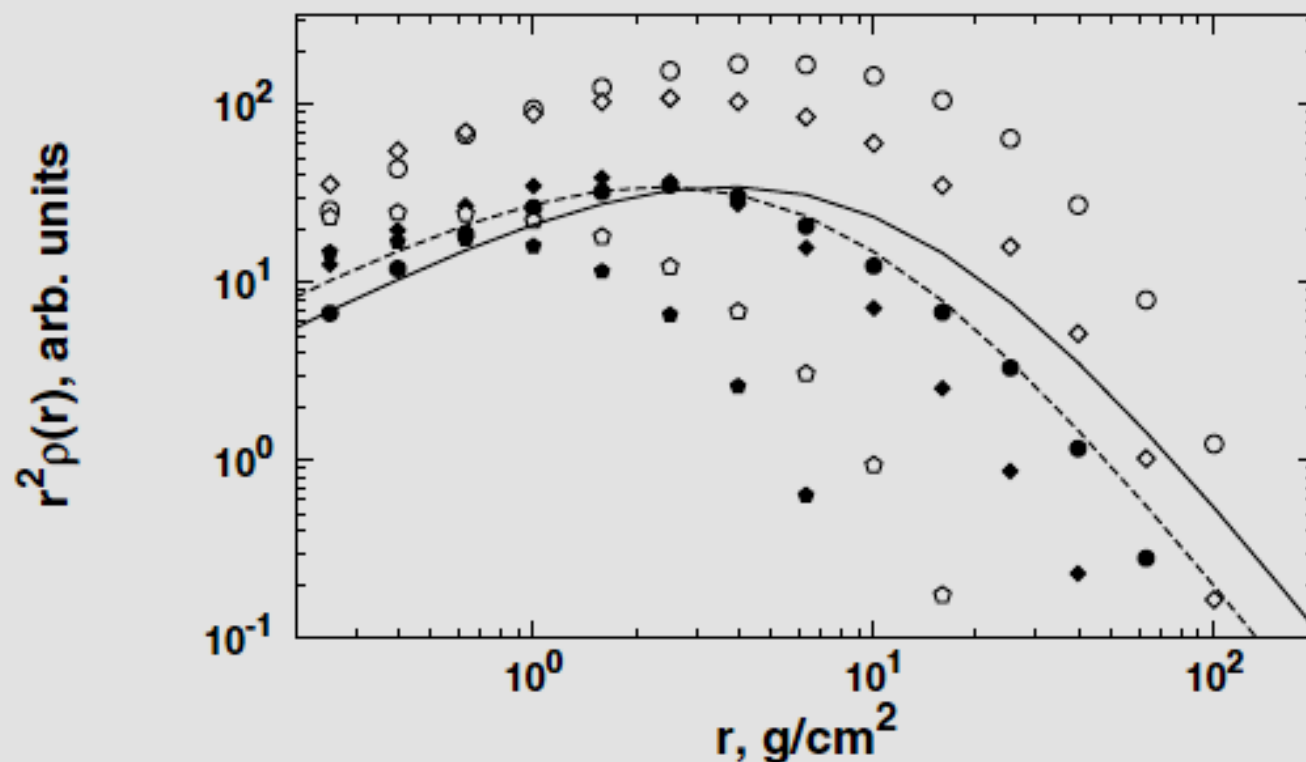


Fig. 8.7. Lateral distribution of electrons and photons of energy above 1.5 (circles), 10 (diamonds), and 100 (pentagons) MeV in the maximum of photon-initiated shower of energy 1,000 GeV. The electron points are filled. The solid line shows the NKG formula with r_1 of 9.3 g/cm^2 and the dashed line is for the fitted characteristic distance of 5.94 g/cm^2 .

Hadronic and e.m. showers

- Electromagnetic showers develop more regularly, with less fluctuations.
- In the 300 GeV shower one can see jets of secondaries.
- At higher energies they are more strongly forward boosted.
- The difference in structure can be used for particle identification.

