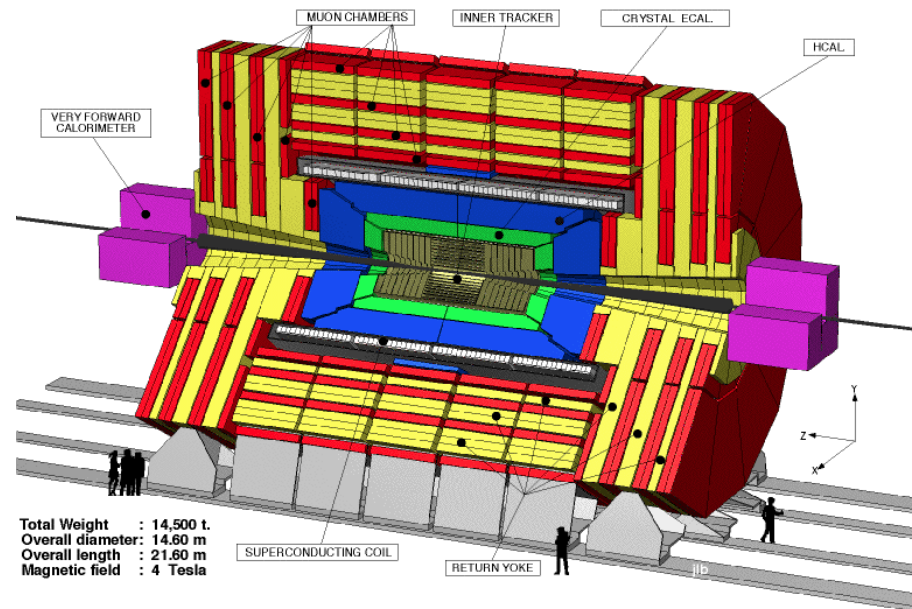
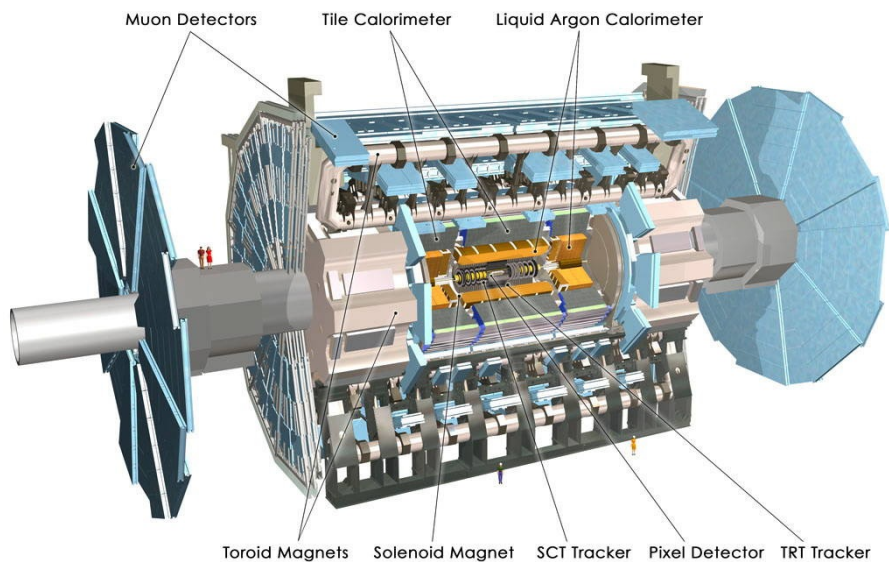


Ηλεκτρομαγνητικά και Αδρονικά καλορίμετρα



Καλορίμετρο

- ❑ Καλορίμετρο στην πυρηνική και σωματιδιακή φυσική, είναι η διάταξη που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση σωματιδίων και την μέτρηση των ιδιοτήτων τους μέσω ολικής απορρόφησής τους μέσα σε κάποιο κομμάτι ύλης που αποτελεί την διάταξη.
- ❑ Τα περισσότερα καλορίμετρα είναι ευαίσθητα για θέση μετρώντας την ενέργεια ανάλογα της θέσης τους.

➤ Αρχές λειτουργίας:

- ✧ Το προσπίπτον σωματίδιο ξεκινά μια καταιγίδα σωματιδίων
 - ✓ Η σύσταση και το μέγεθος της καταιγίδας εξαρτάται από το είδος του σωματιδίου και το υλικό του ανιχνευτή
- ✧ Η ενέργεια εναποτίθεται σε μορφή: θερμότητας, ιονισμού, διέγερσης ατόμων, ακτινοβολία Cherenkov
 - ✓ Διαφορετικά είδη καλοριμέτρων χρησιμοποιούν διαφορετικά είδη από τα παραπάνω σήματα για μέτρηση της ολικής ενέργειας
- ✧ Η διαδικασία είναι καταστρεπτική. Δεν υπάρχει τρόπος ελέγχου των σωματιδίων την στιγμή που εναπόθεσαν την ενέργειά τους.
- ✧ Σημαντικό:
 - Το σήμα είναι ανάλογο της ολικής ενέργειας που εναποτέθηκε
 - Σταθερά αναλογίας καθορίζεται από βαθμονόμηση



Καλορίμετρο σε σωματιδιακή φυσική

- Η τεχνική των καλοριμέτρων είναι διαδεδομένη στη φυσική υψηλών ενεργειών
 - Στόχοι σε πειράματα νετρίνο ή πειράματα για αναζήτηση διάσπασης πρωτονίων ή μελέτης κοσμικής ακτινοβολίας
 - Μετρητές καταιγίδων
 - Ανιχνευτές στερεάς γωνίας 4π σε πειράματα επιταχυντών
- Η τεχνική των καλοριμέτρων χρησιμοποιεί διάφορους μηχανισμούς ανίχνευσης
 - Σπινθηριστές
 - Ιονισμός
 - Ακτινοβολία Cherenkov
 - Κρυογενή φαινόμενα

Μετατροπή της ενέργειας E των προσπίπτοντων σωματιδίων σε απόκριση του ανιχνευτή

$$S \propto E$$



Γιατί χρήση της τεχνικής καλοριμέτρου

- ❑ Μέτρηση φορτισμένων και ουδέτερων σωματιδίων
- ❑ Η απόδοση των καλοριμέτρων βελτιώνεται με την ενέργεια
 - Είναι σταθερή ως προς 4π
 - Σε αντίθεση με ανιχνευτή τροχιών που παρουσιάζουν ανισοτροπία λόγω B-πεδίου
 - Καλορίμετρο: διακριτική ικανότητα: $\frac{\sigma_E}{E} \sim \frac{1}{\sqrt{E}}$ **ATLAS** $\frac{\sigma_E}{E} \approx \frac{0.1}{\sqrt{E}}$
 - Ανιχνευτές αερίων: $\frac{\sigma_p}{p} \sim p$ **ATLAS** $\frac{\sigma_p}{p} \approx 5 \times 10^{-4} p_T$ για $p=100 \text{ GeV}$ $\frac{\sigma_p}{p} \approx 5\%$
- ❑ Γρήγορη πρόσβαση σε πληροφορία ενέργειας ($<100\text{ns}$ δυνατή)
 - Χρήση σε σκανδαλιστή για επιλογή γεγονότων κατά τη διάρκεια λήψης τους
- ❑ Βάθος ανάπτυξης καταιγίδας: $L \sim \ln \frac{E}{E_C}$ E_C : κριτική ενέργεια
 - Τα βάθος ανεξάρτητο σχεδόν της ενέργειας και επομένως μπορεί τα καλορίμετρα να είναι συμπαγή
 - σε αντίθεση με τους ανιχνευτές τροχιών που το μέγεθός τους αυξάνει με το τέτρωγωνο της διάστασής τους για διατήρηση της διακριτικής ικανότητας $\sigma_p/p \approx p/L^2$

Ηλεκτρομαγνητικές καταιγίδες

□ Κύριες διεργασίες σε υψηλές ενέργειες ($E > \text{μερικά MeV}$)

Φωτόνια: Δίδυμη γέννηση

$$\sigma_{\delta.\gamma.} \approx \frac{7}{9} \left(4\alpha r_e^2 Z^2 \ln \frac{183}{Z^{1/3}} \right)$$

$$\Rightarrow \sigma_{\delta.\gamma.} \approx \frac{7}{9} \frac{A}{N_A X_0} \quad \begin{array}{l} [X_0 \text{ μήκος ακτινοβολίας}] \\ [\text{σε cm ή gr/cm}^2] \end{array}$$

Παράγοντας απορρόφησης:

$$\mu = n\sigma = \rho \frac{N_A}{A} \sigma_{\delta.\gamma.} = \frac{7}{9} \frac{\rho}{X_0}$$

$$X_0 = \frac{A}{4\alpha N_A Z^2 r_e^2 \ln \frac{183}{Z^{1/3}}}$$

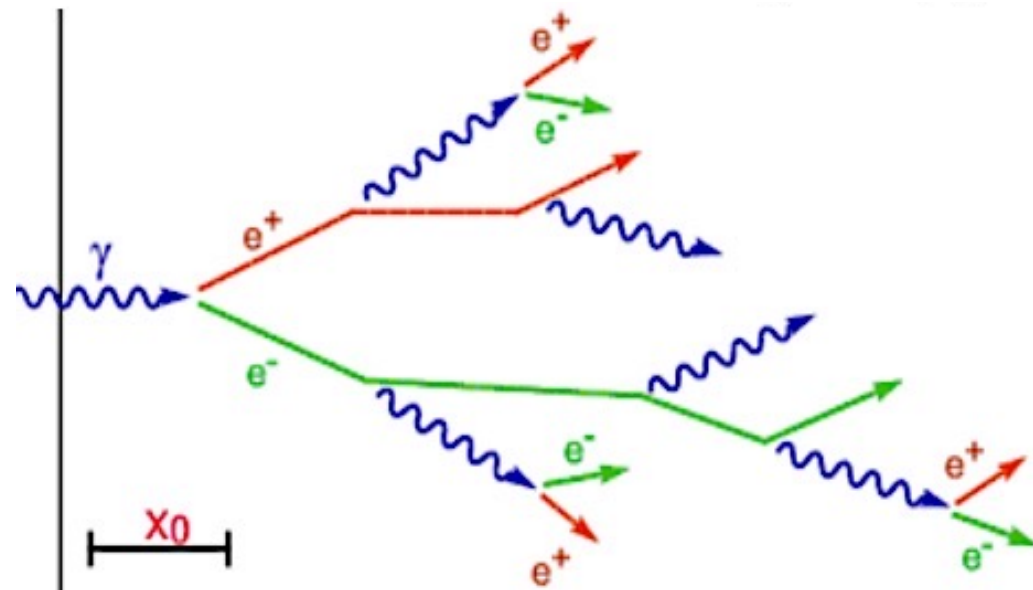
$[X_0 \text{ μήκος ακτινοβολίας σε g/cm}^2]$

Ηλεκτρόνια: Bremsstrahlung

$$\frac{dE}{dx} = 4\alpha N_A \frac{Z^2}{A} r_e^2 E \ln \frac{183}{Z^{1/3}} = \frac{E}{X_0}$$

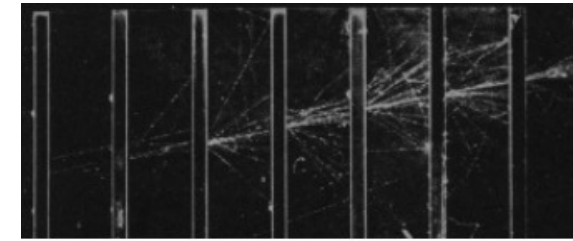
$$\Rightarrow E = E_0 e^{-x/X_0}$$

Μετά από ένα μήκος ακτινοβολίας το ηλεκτρόνιο έχει μόνο το 37% της ενέργειάς του



Μοντέλο καταιγίδας

- ❑ Το απλό μοντέλο ανάπτυξης καταιγίδας οφείλεται στον Heitler και στηρίζεται στο μήκος ακτινοβολίας X_0 .
- ❑ Το e^- χάνει $[1-1/e] = 63\%$ της ενέργειας σε $1/X_0$ (Brem)
- ❑ Η μέση ελεύθερη διαδρομή ενός φωτονίου (δίδυμη γέννεση) είναι $9/7 X_0$
- ❑ Υποθέτουμε ότι:

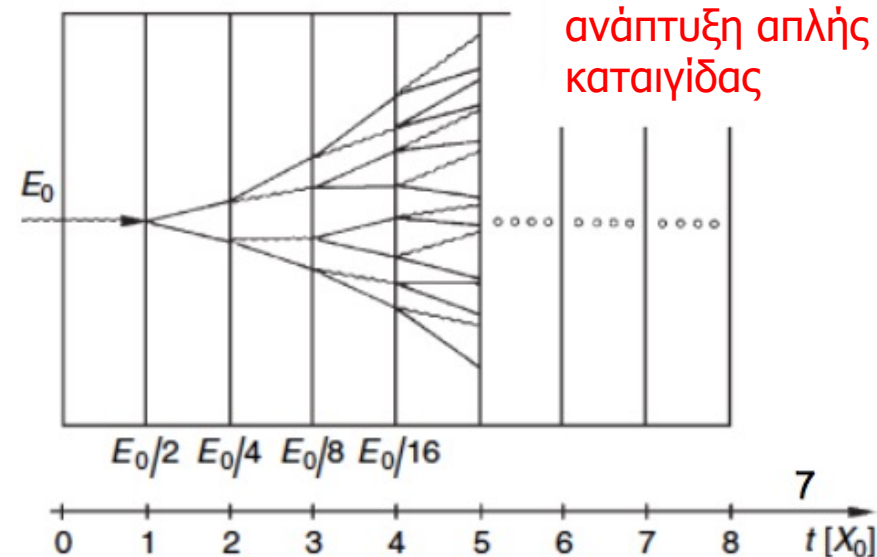


- $E > E_C$: **δεν** υπάρχει απώλεια ενέργειας από ιονισμό/διέγερση
- $E < E_C$: απώλεια ενέργειας μόνο μέσω ιονισμού/διέγερσης

❑ Απλό μοντέλο καταιγίδας:

- ✓ 2^t σωματίδια μετά από $t [X_0]$
- ✓ Το κάθε σωματίδιο έχει $E/2^t$ ενέργεια
- ✓ Το σωματίδιο σταματά αν $E < E_C$
- ✓ Ο αριθμός των σωματιδίων $N = E/E_C$
- ✓ Μέγιστο καταιγίδας σε βάθος

$$t_{\max} \propto \ln(E_0/E_C)$$



Εγκάρσια ανάπτυξη της καταιγίδας

□ Γωνία ανοίγματος της καταιγίδας οφείλεται:

- Bremsstrahlung και δίδυμη γέννηση:

$$\langle \theta^2 \rangle \approx (m/E)^2 = 1/\gamma^2$$

✧ μικρή συνεισφορά εφόσον $m_e/E_C = 0.05$

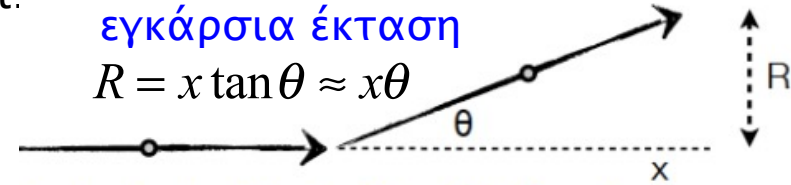
- πολλαπλή σκέδαση Coulomb [Θεωρία Molliere]:

$$\langle \theta \rangle = \frac{21.2 \text{ MeV}}{E_e} \sqrt{\frac{x}{X_0}} \quad \text{Θεωρώντας ότι } \beta=1, c=1 \text{ και } z=1$$

$$E_S = \sqrt{\frac{4\pi}{\alpha}} (m_e c^2) = 21.2 \text{ MeV} \quad \text{ενέργεια κλίμακας}$$

εγκάρσια έκταση

$$R = x \tan \theta \approx x \theta$$



□ Εγκάρσια κατανομή

- Κύρια κατανομή από συνεισφορά ηλεκτρονίων χαμηλής ενέργειας καθώς $\langle \theta \rangle \sim 1/E_e$. ηλεκτρόνια με $E=E_C$
- Υποθέτοντας ότι η κατάλληλη εμβέλεια των ηλεκτρονίων είναι X_0 παίρνουμε ότι $\langle \theta \rangle = 21 \text{ MeV}/E_e$ και η εγκάρσια ανάπτυξη της καταιγίδας θα είναι $R = \langle \theta \rangle X_0$.

- Η **ακτίνα Mollier** δίνεται από: $R_M = \frac{E_S}{E_C} X_0 \approx \frac{21.2 \text{ MeV}}{E_e} X_0$

Μερικές χρήσιμες σχέσεις

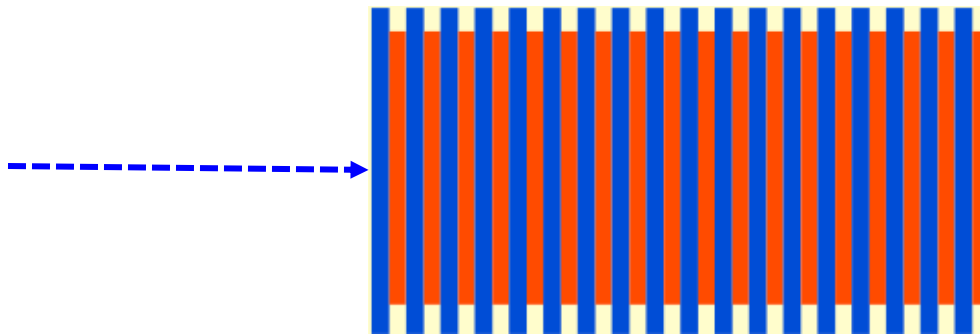
- ❑ Μήκος ακτινοβολίας: $X_0 = \alpha \frac{180 A}{Z^2} \frac{g}{cm^2}$
- ❑ Κριτική Ενέργεια:
(αλα Rossi) $E_c = \frac{550 MeV}{Z}$
- ❑ Βάθος μέγιστου
καταιγίδας $t_{\max} = \ln \frac{E}{E_c} - \begin{cases} 1.0 & \text{ηλεκτρόνια} \\ 0.5 & \text{φωτόνια} \end{cases}$
- ❑ Διαμήκης περιορισμός της καταιγίδας $L[95\%] = t_{\max} + 0.08Z + 9.6[X_0]$
- ❑ Εγκάρσιος περιορισμός της καταιγίδας $R[90\%] = R_M$
 $R[95\%] = 2R_M$

Τύποι καλοριμέτρων

- Υπάρχουν δυο γενικοί τύποι καλοριμέτρων ανάλογα για το τι θέλουμε να μετρήσουμε:

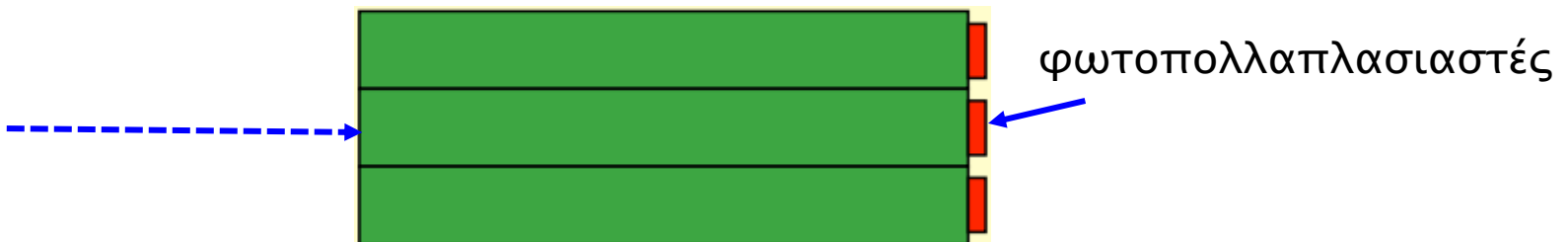
➤ Καλορίμετρα δειγματοληψίας:

- ✧ Στρώματα από παθητικούς απορροφητές όπως Pb, W, Cu, εναλλάσσονται με στρώματα ενεργού υλικού όπως πυρίτιο Si, σπινθηριστή ή υγρό αργό



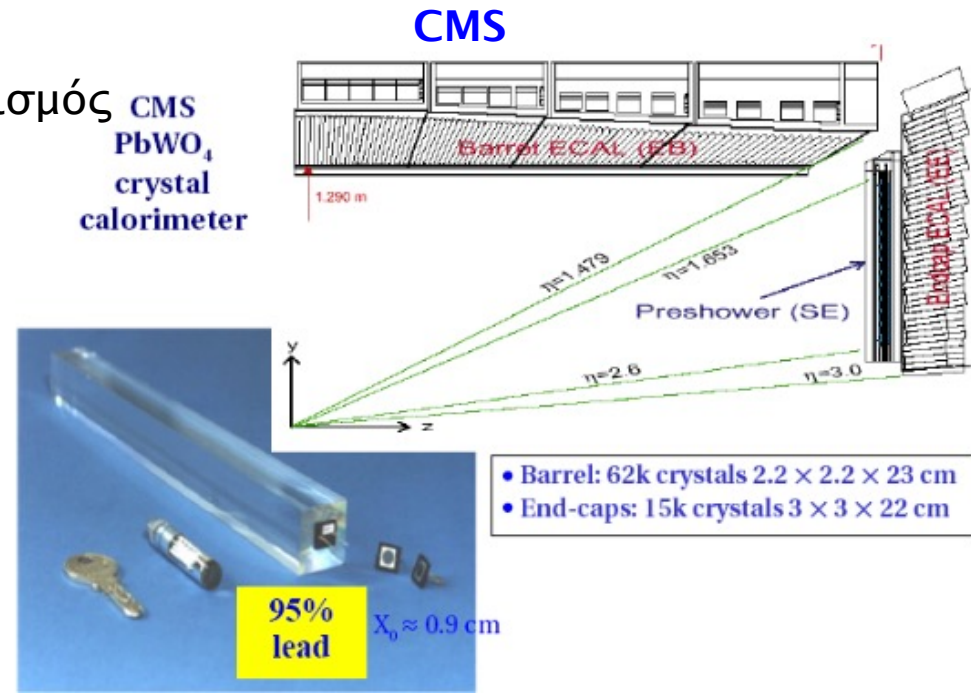
➤ Ομογενή Καλορίμετρα:

- ✧ Ένα και μόνο ενεργό υλικό το οποίο παίζει και το ρόλο του απορροφητή
- ✧ Τέτοια παραδείγματα: υγρό ξένο(Xe), ή υγρό κρυπτό (Kr) ή πυκνοί κρύσταλλοι όπως BGO, PbWO_4 ή κρύσταλλοι με Pb στο πλέγμα τους.



Ομογενή καλορίμετρα

- Ένα μόνο κομμάτι υλικού παίζει το ρόλο τόσο του απορροφητή όσο και του ενεργού υλικού.
 - Κρύσταλλοι με ιδιότητες σπινθηριστή συνήθως πολύ μεγάλο Z
- **Πλεονεκτήματα**
 - Βλέπουν **όλα** τα σωματίδια μέσα στην καταιγίδα ➡ καλύτερη στατιστική ακρίβεια
 - Ίδια απόκριση από όλες τις θέσεις ➡ καλή γραμμικότητα
- **Μειονεκτήματα**
 - Μεγάλο κόστος των κρυστάλλων
 - Δύσκολος ο λεπτομερής καταμερισμός
- **Παραδείγματα**
 - Πειράματα σε επιταχυντές παραγωγής Β-μεσονίων όπου E_γ μικρή
 - CMS ηλεκτρομαγνητικό καλορίμετρο το οποίο έχει βελτιστοποιηθεί για την ανίχνευση του $H^0 \rightarrow \gamma\gamma$



Ομογενή καλορίμετρα - CMS

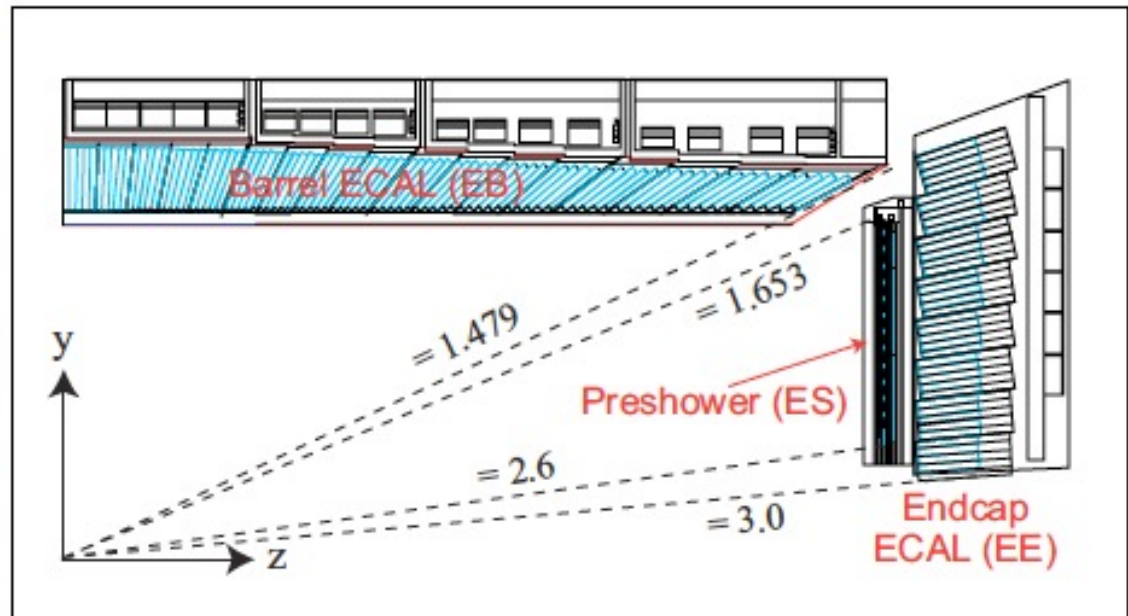


Σπινθηριστής: PbWO_4 [lead Tungstate]

Φωτο-Ανιχνευτής: APDs [Φωτοδίοδοι καταιγίδας]

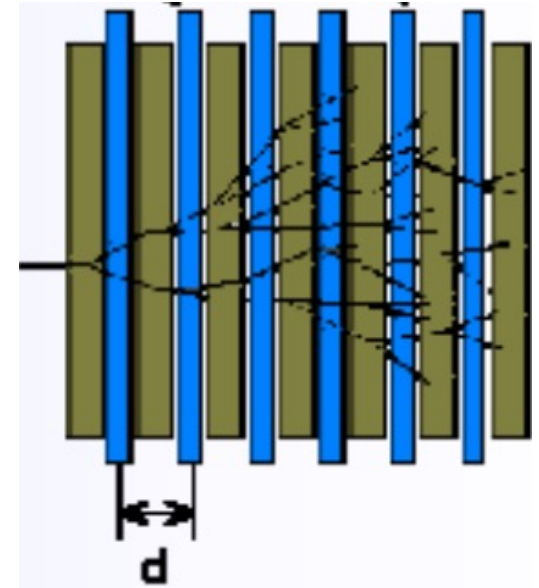
Αριθμός κρυστάλλων: ~ 70000

Αριθμός φωτονίων: ~ 4.5 φωτόνια/MeV



Καλορίμετρο δειγματοληψίας

- Χρήση διαφορετικών υλικών μέσων
 - Απορροφητής μεγάλης πυκνότητας
 - Εναλλάσσεται με ενεργά υλικά για οπτική ανάγνωση
 - Η πλέον συνηθισμένη γεωμετρία αυτή του sandwich
 - Αρκετές φορές χρησιμοποιούνται οπτικές ίνες
- Λόγος δειγματοληψίας $f_{\text{sampling}} = E_{\text{visible}} / E_{\text{deposited}}$



□ Πλεονεκτήματα

- Χαμηλό κόστος, εγκάρσιος και διαμήκης καταμερισμός

□ Μειονεκτήματα

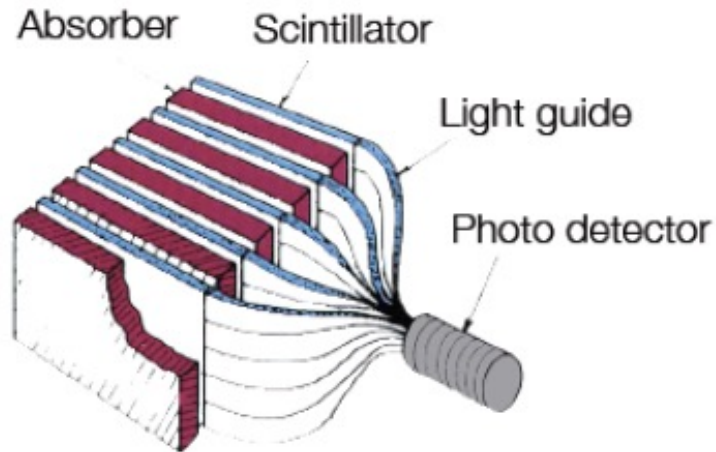
- Μέτρηση μέρους μόνο της ενέργειας της καταιγίδας - χαμηλότερη ακρίβεια

□ Παραδείγματα:

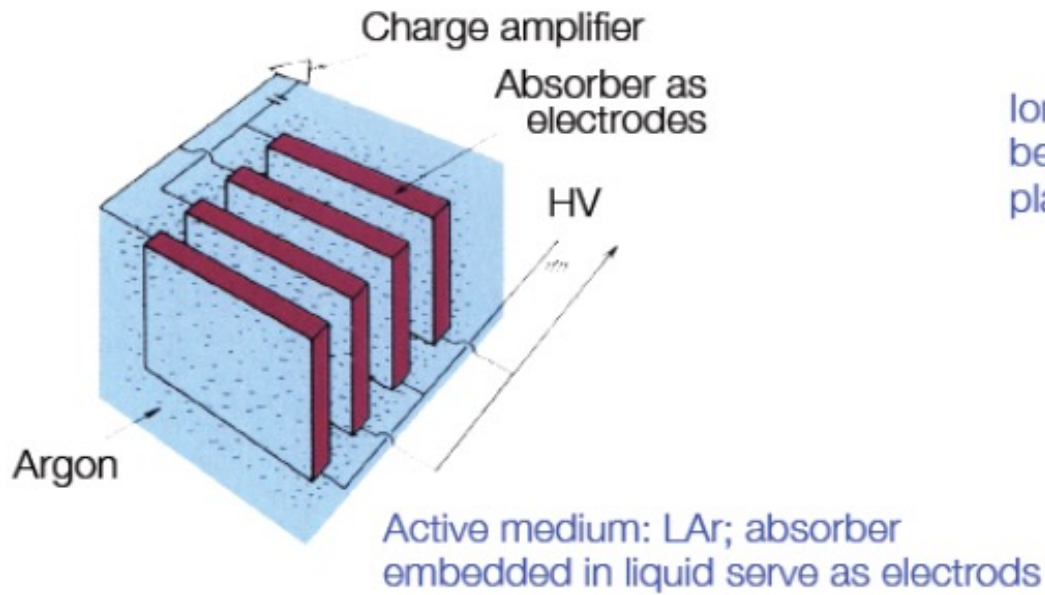
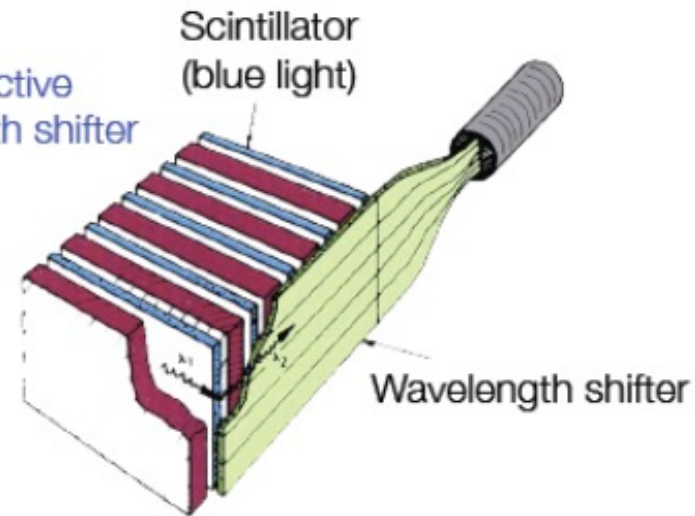
- CDF και ATLAS καλορίμετρο
- Όλα τα αδρονικά καλορίμετρα

Καλορίμετρα δειγματοληψίας – διάφοροι τύποι

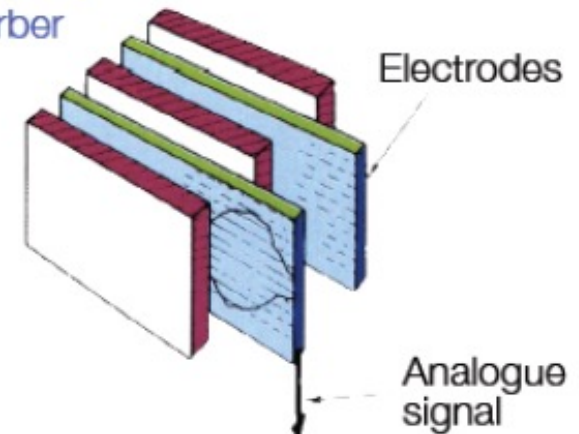
Scintillators as active layer;
signal readout via photo multipliers



Scintillators as active layer; wave length shifter to convert light



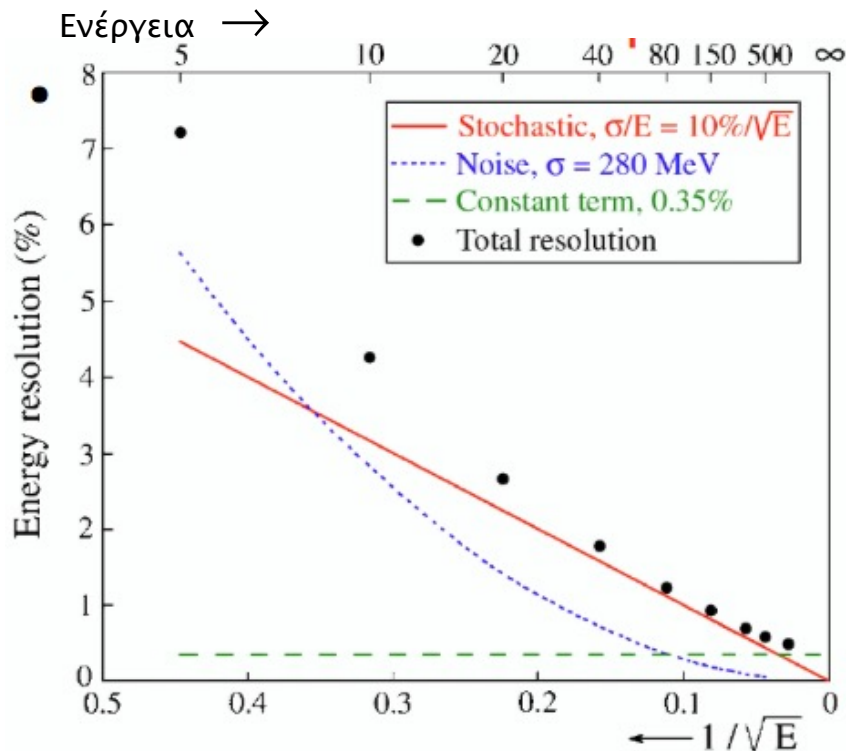
Ionization chambers between absorber plates



Διακυμάνσεις

□ Διαφορετικά φαινόμενα έχουν και διαφορετική εξάρτηση από ενέργεια

- κβαντικά – διακυμάνσεις δειγματοληψίας $\sigma/E \sim E^{-1/2}$
- μη περιορισμός της καταιγίδας $\sigma/E \sim E^{-1/4}$
- ηλεκτρονικός θόρυβος $\sigma/E \sim E^{-1}$
- κατασκευαστικές ανομοιομορφίες $\sigma/E = \text{const}$



$$\sigma_{tot}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2 + \dots$$

Διακριτική ικανότητα ενέργειας

- Αν όλα τα σωματίδια της καταιγίδας είχαν μετρηθεί τότε: $E \sim N$, $\sigma \sim \sqrt{N} \sim \sqrt{E}$
- Ωστόσο πρακτικά:
 - απόλυτη: $\sigma = a\sqrt{E} \oplus bE \oplus c$
 - σχετική: $\sigma/E = a/\sqrt{E} \oplus b \oplus c/E$
- α: Στοχαστικός όρος:
 - ✧ ενδογενείς στατιστικές διακυμάνσεις της καταιγίδας :
 - ✧ διακυμάνσεις δειγματοληψίας
 - ✧ διακυμάνσεις σήματος, π.χ. αριθμός φωτο-στατιστικής
- b: Σταθερός όρος:
 - ✧ ανομοιογένειας τόσο κατασκευαστική όσο και βαθμονόμησης
 - ✧ ατέλειες στην κατασκευή του καλοριμέτρου
 - ✧ μη γραμμική συμπεριφορά στα ηλεκτρονικά ανάγνωσης
 - ✧ διακυμάνσεις στην συγκράτηση της διαμήκους έκτασης της καταιγίδας
 - ✧ διακυμάνσεις στην ενέργεια που χάνεται σε περιοχές που δεν έχουν ηλεκτρονικά για ανάγνωση
- c: Όρος θορύβου
 - ✧ ηλεκτρονικός θόρυβος στα ηλεκτρονικά ανάγνωσης
 - ✧ ραδιο-ενεργότητα, διακύμανση στον αριθμό των extra συγκρούσεων (pileup)

Εγγενής διακριτική ικανότητα ΕΜ καλοριμέτρου

□ Ομογενές καλορίμετρο

- Το σήμα προέρχεται από το άθροισμα όλων των ενεργειών που εναποτέθηκαν πάνω από κάποιο κατώφλι ενέργειας
- Έστω W η ενέργεια που χρειάζεται για να δημιουργηθεί ένα quatum (ένα ζεύγος e^-e^+ ή ένα φωτόνιο που μπορεί να ανιχνευθεί)
- Ο μέσος αριθμός των quanta που θα παραχθούν είναι: $\langle n \rangle = E/W$
- Η εγγενής διακριτική ικανότητα προέρχεται από διακυμάνσεις του n

$$\sigma_E / E = 1 / \sqrt{\langle n \rangle} = 1 / \sqrt{(E/W)}$$

- Για παράδειγμα σε ημιαγωγούς (Ge, Ge(Li), Si(Li))

$W = 2.9\text{eV}$ (για παραγωγή ζεύγους e^- -οπής)

για 1MeV γ θα έχουμε 350000 ηλεκτρόνια και επομένως $1/\sqrt{n} = 0.17\%$
για τον στοχαστικό όρο

- Επιπλέον διακυμάνσεις στο n ελαττώνονται με συσχετίσεις στην παραγωγή διαδοχικών ζευγών e^- -οπής: ονομάζεται παράγοντας Fano, F

$$\sigma_E / E = \sqrt{FW/E}$$

- Για τον ανιχνευτή Ge(Li) $F \sim 0.1$ και ο στοχαστικός όρος δίνει: $\sigma_E / E = 1.7\% / \sqrt{E}$

Διακριτική ικανότητα σε καλορίμετρα δειγματοληψείας

- ❑ Κύρια συνεισφορά διακυμάνσεις δειγματοληψείας, από τις διακυμάνσεις του αριθμού των φορτισμένων σωματιδίων που περνούν τα ενεργά στρώματα.
- ❑ Γραμμική αύξηση με την προσπίπτουσας ενέργειας και το πάχος (t) των στρωμάτων των απορροφητών .

Επομένως: $n_c \propto E/t$

- ❑ Για στατιστικά ανεξάρτητη δειγματοληψία, η συνεισφορά της δειγματοληψίας στο στοχαστικό όρο είναι:

$$\sigma/E \propto 1/\sqrt{n_{ch}} \propto \sqrt{t/E}$$

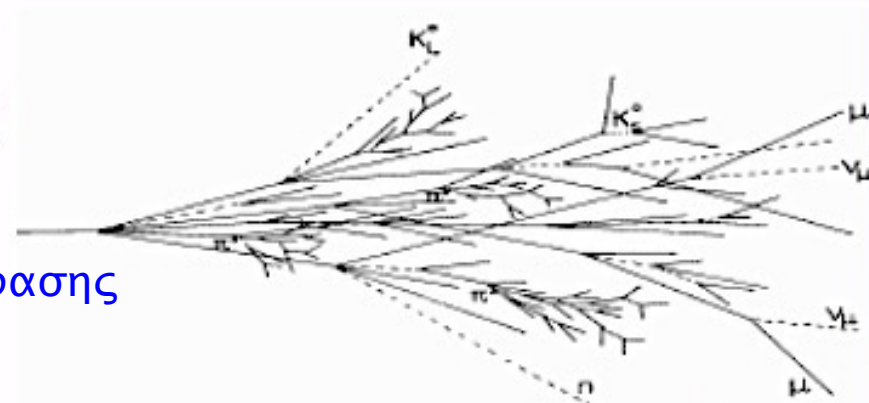
- ❑ Δειγματοληψία τάξης 100 χρειάζεται για ένα EM καλορίμετρο να πλησιάσει την διακριτική ικανότητα ομοιογενούς καλοριμέτρου:

Συνήθως $\sigma_{sampling}/E \sim 10\%/\sqrt{E}$

Αδρονικά καλορίμετρα

Αδρονικά καλορίμετρα – Αδρονικές καταιγίδες

- ❑ Επιπλέον δυσκολία λόγω των **ισχυρών αλληλεπιδράσεων** με το υλικό ανιχνευτή
- ❑ Πολύ σημαντική η μέτρηση της ενέργειας του σωματιδίου με καλορίμετρο:
 - Φορτισμένα αδρόνια – συμπληρωματική μέτρηση της ενέργειάς τους.
 - Ουδέτερα αδρόνια – μοναδικός τρόπος μέτρησης της ενέργειάς τους.
- ❑ Στις πυρηνικές σκεδάσεις δημιουργείται ένας αριθμός δευτερογενών σωματιδίων
 - Εν μέρει υπάρχουν δευτερεύουσες ή τριτογενείς πυρηνικές αντιδράσεις με αποτέλεσμα την δημιουργία αδρονικής καταιγίδας
 - Σωματίδια που διασπώνται ηλεκτρομαγνητικά (π^0 , η^0) προκαλούν ηλεκτρομαγνητικές καταιγίδες
 - Μέρος της ενέργειας απορροφάται σαν πυρηνική ενέργεια συνοχής ή για ανάκρουση των πυρήνων του υλικού μέσου (**μή μετρήσιμη ενέργεια**)
- ❑ Η καταιγίδα παρόμοια της EM αλλά πολύ πιο περίπλοκη
 - Χρειαζόμαστε Monte Carlo εργαλεία
- ❑ Διαφορετική κλίμακα και εμβέλεια **χρήση του μήκους πυρηνικής αλληλεπίδρασης**



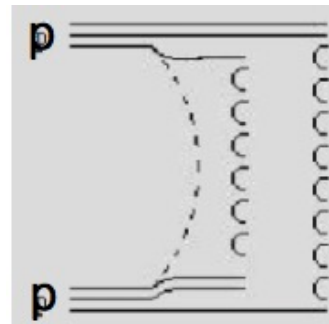
Αδρονικές αλληλεπιδράσεις

1^ο στάδιο: Κύρια σκέδαση

- ✧ Πριν την πρώτη αλληλεπίδραση: τα π's κινούνται 25–50% πιο μακριά από τα p (1/3 του μεγέθους)
- ✧ Ένα π^+ χάνει 100–300 MeV λόγω ιονισμού (ανάλογα με το Z του υλικού)

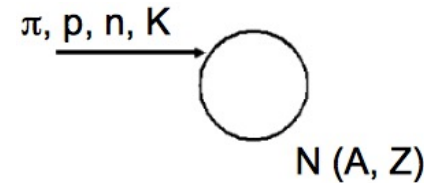
Πολλαπλασιασμός σωματιδίων

- ✧ Μέση ενέργεια για παραγωγή ενός πιονίου 0.7 (1.3) GeV σε χαλκό (Pb)



$q\bar{q}$ ζεύγη

Τα νουκλεόνια χωρίζονται σε δι-quarks και δημιουργούνται strings
Αδروνοποίηση τους προσθέτοντας ζεύγη $q\bar{q}$
Θρυμματισμός του υπόλοιπου πυρήνα



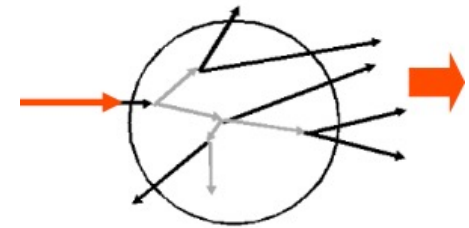
σκέδαση σωματιδίου-πυρήνα σύμφωνα με ενεργό διατομή

- Πολλαπλότητα των σωματιδίων αυξάνει με την ενέργεια και τύπο σωματιδίων
- 1/3 π^0 διασπώνται σε γγ που παράγονται σε διεργασίες: $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n / \pi^+ n \rightarrow \pi^0 p$
- Επίδραση του 1^{ου} σωματιδίου που ξεκινά την καταιγίδα:
 - ✧ Λιγότερα π^0 από p λόγω διατήρησης του βαρυονικού αριθμού

Αδρονικές καταιγίδες

□ Ενδοπυρηνικές καταιγίδες

- ✧ Γρήγορα κινούμενα αδρόνια που διαπερνούν τον πυρήνα ελευθερώνουν πρωτόνια και νετρόνια ανάλογα με τον αριθμό τους μέσα στον πυρήνα.
- ✧ Μερικά από αυτά τα n και p μπορούν να διαφύγουν από τον πυρήνα.
- ✧ Για τον $^{208}\text{Pb}_{82}$ ~1.5 φορά περισσότερα n απο p



□ Τα εμπλεκόμενα νουκλεόνια στην καταιγίδα μεταφέρουν ενέργεια στον πυρήνα που μεταβαίνει σε διεγερμένη κατάσταση

□ Πυρηνική αποδιέγερση

- ✧ Εξάτμιση νουκλεονίων με ενέργεια $\sim 10\text{MeV}$ και α -σωματιδίων
- ✧ +σχάση για κάποιους πυρήνες υλικών
- ✧ Ο αριθμός των νουκλεονίων που ελευθερώνονται εξαρτάται από την ενέργεια συνοχής (7.9 MeV σε Pb, 8.8 MeV στο Fe)
- ✧ Κυρίως νετρόνια ελευθερώνονται κατά την εξαέρωση ενώ τα πρωτόνια εγκλωβίζονται από το φράγμα Coulomb (12 MeV για Pb και μόνο 5MeV στο Fe)

Αδρονικές καταιγίδες

□ Αδρονικές αλληλεπιδράσεις

➤ **ελαστική** $p + \text{Nucleus} \rightarrow p + \text{Nucleus}$

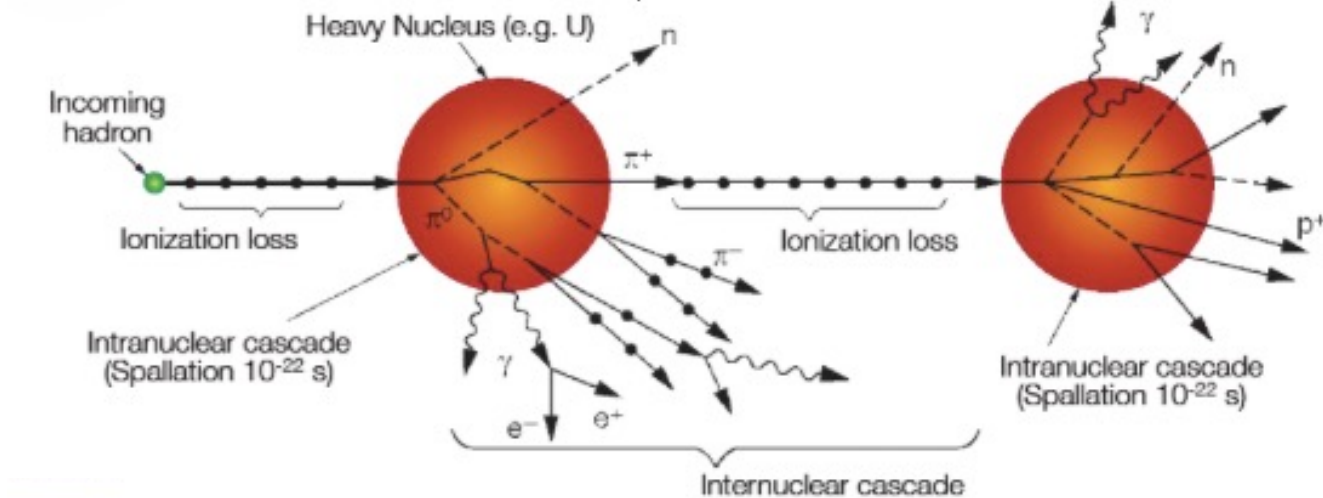
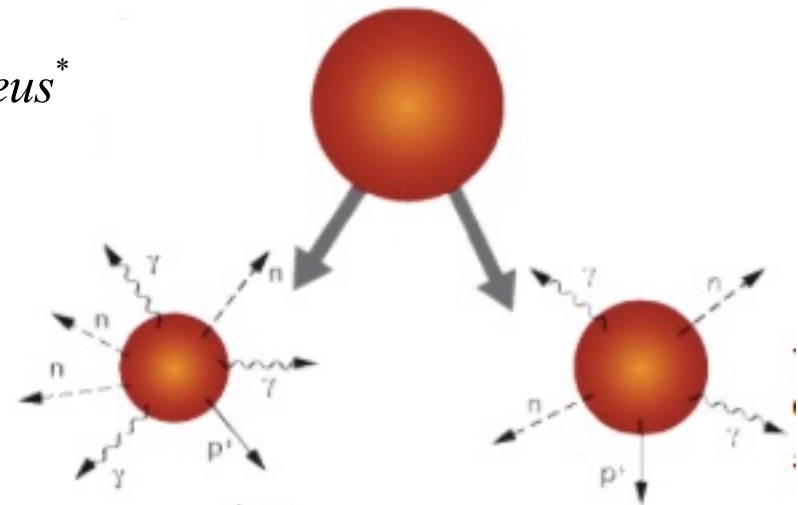
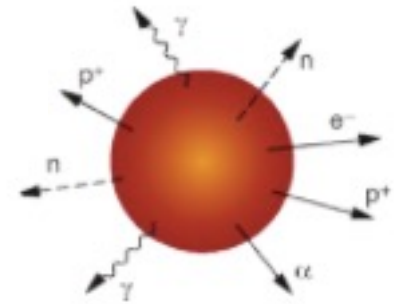
➤ **ανελαστική**

$$p + \text{Nucleus} \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0 + \dots + \text{Nucleus}^*$$

$$\text{Nucleus}^* \rightarrow \text{NucleusA} + n, p, \alpha, \dots$$

$$\rightarrow \text{NucleusB} + 5p, n, \pi, \dots$$

$$\rightarrow \Sigma \chi \alpha \sigma \eta$$



Σύγκριση EM - αδρονικής καταίγιδας

- Αδρονικό vs ηλεκτρομαγνητικό μήκος αλληλεπίδρασης

$$\left. \begin{array}{l} X_0 \sim \frac{A}{Z^2} \\ \lambda_{N.I.} \sim A^{1/3} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{\lambda_{N.I.}}{X_0} \sim A^{4/3} \Rightarrow \lambda_{N.I.} \gg X_0$$

- Τυπικές διαστάσεις μιας αδρονικής καταίγιδας:

✧ Διαμήκης έκταση [95% περιεκτικότητα]:

6–9 $\lambda_{N.I.}$ ενώ για EM 15–20 X_0

✧ Εγκάρσια έκταση [95% περιεκτικότητα]:

1 $\lambda_{N.I.}$ ενώ για EM $2R_M$

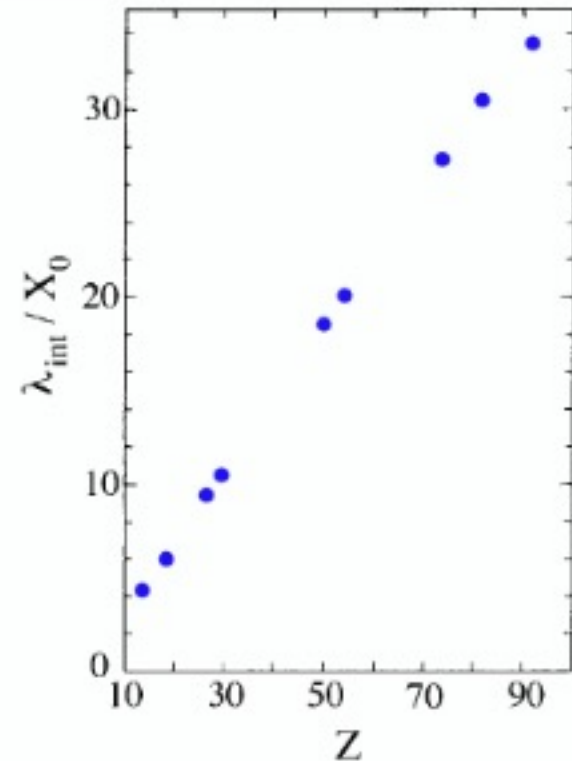
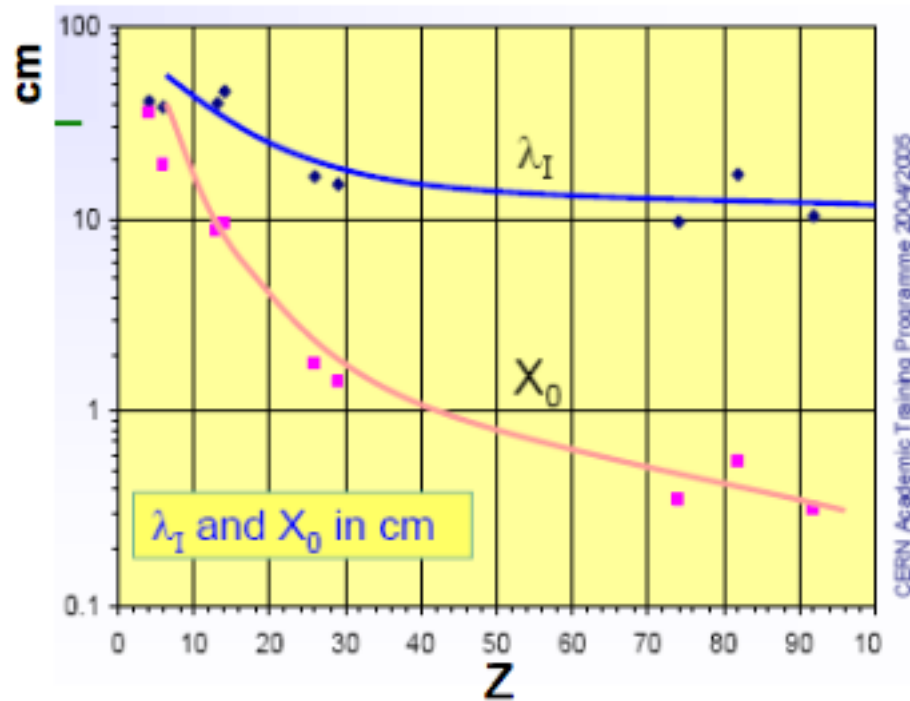
- Αδρονικό καλορίμετρο πολύ μεγαλύτερο του ηλεκτρομαγνητικού

	$\lambda_{N.I.}(\text{cm})$	$X_0(\text{cm})$
Σπινθηριστής	79.4	42.2
LAr	83.7	14.0
Fe	16.8	1.76
Pb	17.1	0.56
U	10.5	0.32
C	38.1	18.8

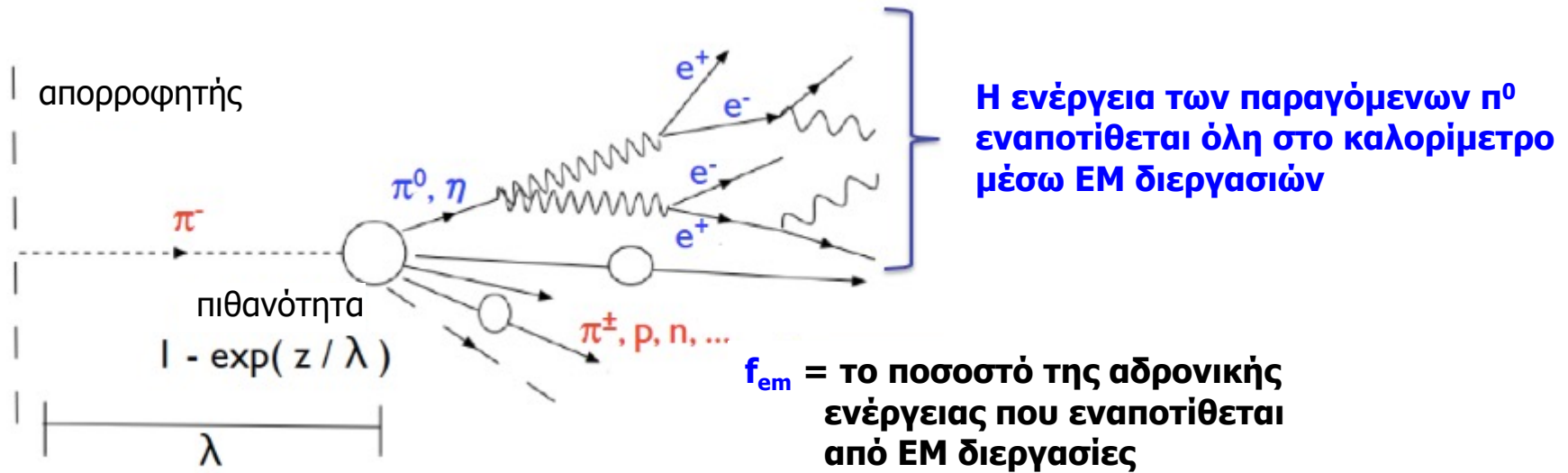
Αδρονική και EM καταιγίδα – Εξάρτηση από το υλικό

$\lambda_{N.I.}(gr \cdot cm^{-2}) \sim A^{1/3}$ μέση ελεύθερη διαδρομή ανάμεσα σε δυο συγκρούσεις

Οι αδρονικές καταιγίδες είναι πολύ πιο μεγάλες από τις EM



Αδρονική καταίγιδα

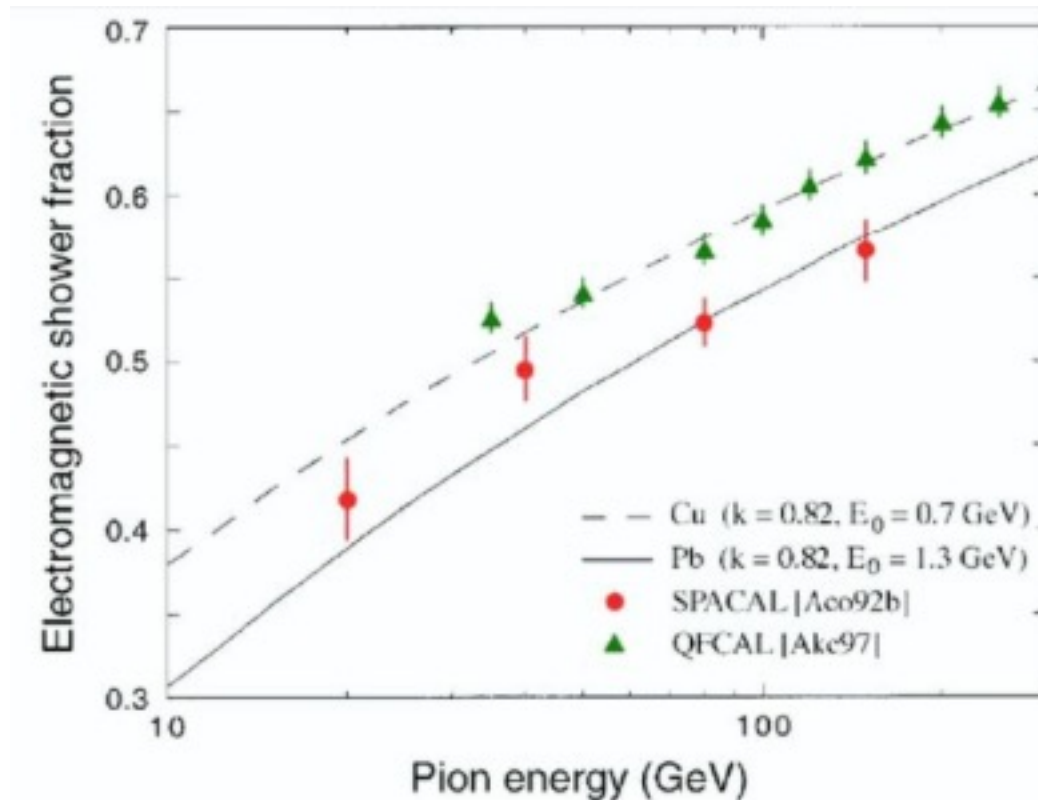


Ηλεκτρομαγνητική: ιονισμός, διέγερση,
φωτοηλεκτρικό, σκέδαση (γ)

Αδρονική: ιονισμός (π^\pm, ρ)
μη μετρούμενη ενέργεια όπως ενέργεια
δέσμιας κατάστασης, ανάδραση

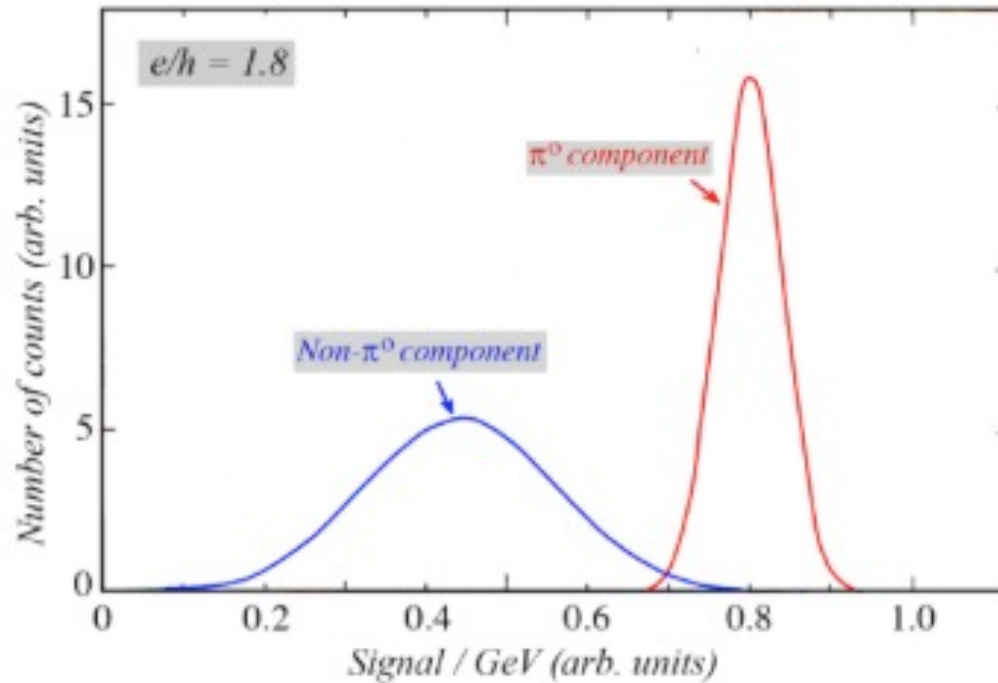
Ποσοστό ηλεκτρομαγνητικών διεργασιών

f_{em} πλησιάζει την 1 καθώς η ενέργεια του αδρονίου αυξάνει



Το EM ποσοστό στις αδρονικές καταιγίδες

- Η ρίζα των προβλημάτων της μη επανόρθωσης της ενέργειας



η μετατροπή των π^\pm παράγει την ηλεκτρομαγνητική συνιστώσα της αδρονικής καταιγίδας (π^0)

e: απόκριση στο EM τμήμα της καταιγίδας

h: απόκριση στο αδρονικό τμήμα της καταιγίδας

Η ολική απόκριση στην ενέργεια ενός π^\pm που δημιουργήσε την καταιγίδα είναι:

$$\pi = ef_{em} + h(1 - f_{em})$$

$$\Rightarrow \frac{e}{\pi} = \frac{e}{ef_{em} + h(1 - f_{em})}$$

$$\Rightarrow \frac{e}{\pi} = \frac{e}{h} \frac{1}{1 + f_{em}(e/h - 1)}$$

τα καλορίμετρα μπορεί να είναι:

υπερ-επανορθωτικά: αν $e/h < 1$

υπο-επανορθωτικά: αν $e/h > 1$

επανορθωτικά: αν $e/h = 1$

Οι δυο λόγοι e/h και e/π

e/h : δεν μπορεί να μετρηθεί απευθείας – δίνει το ποσοστό της μη επανόρθωσης της ενέργειας

e/π : ο λόγος των αποκρίσεων του καλοριμέτρου σε καταιγίδες που προκαλούνται από ηλεκτρόνια και καταιγίδες που προκαλούνται από πιόνια

$$\Rightarrow \frac{e}{\pi} = \frac{e}{h} \frac{1}{1 + f_{em}(e/h - 1)}$$

e/h : είναι ανεξάρτητο της ενέργειας

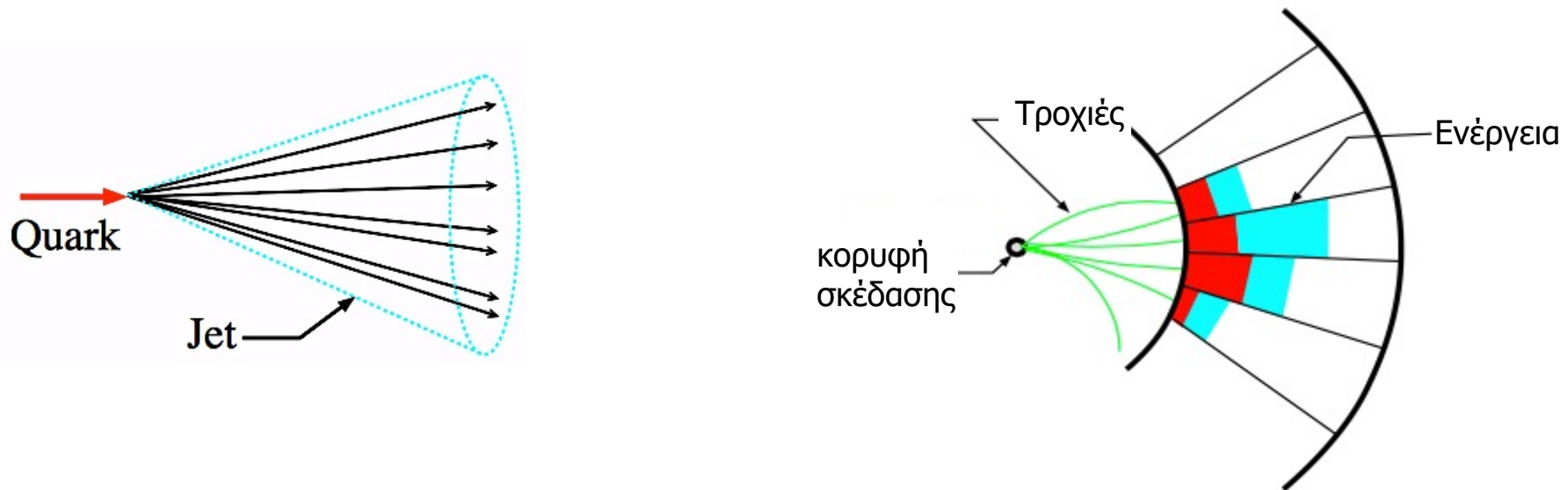
e/π : εξαρτάται από την ενέργεια μέσω της εξάρτησης της $f_{em}(E)$ επομένως εμφανίζεται μη γραμμικότητα εξαιτίας αυτού.

Προσεγγίσεις για εξασφάλιση επανόρθωσης ενέργειας είναι:

$e/h \rightarrow 1$: σωστή επιλογή υλικών ανιχνευτή

$f_{em} \rightarrow 1$: η επιλογή του ορίου της υψηλής ενέργειας

Σχηματισμός πιδάκων (jets) στο καλορίμετρο



Jet είναι ένας συγκεντρωμένος πίδακας σωματιδίων (αδρονίων) υψηλής ενέργειας

Τα quarks θρυμματίζονται σε πάρα πολλά σωματίδια και δημιουργούν τα jets, εναποθέτοντας ενέργεια τόσο στο ηλεκτρομαγνητικό όσο και στο αδρονικό καλορίμετρο

Το σχήμα των jets είναι πολύ πιο στενό σε υψηλές E_T

