Αντιδράσεις των κοσμικών ακτίνων στην ατμόσφαιρα, Καταιονισμοί.

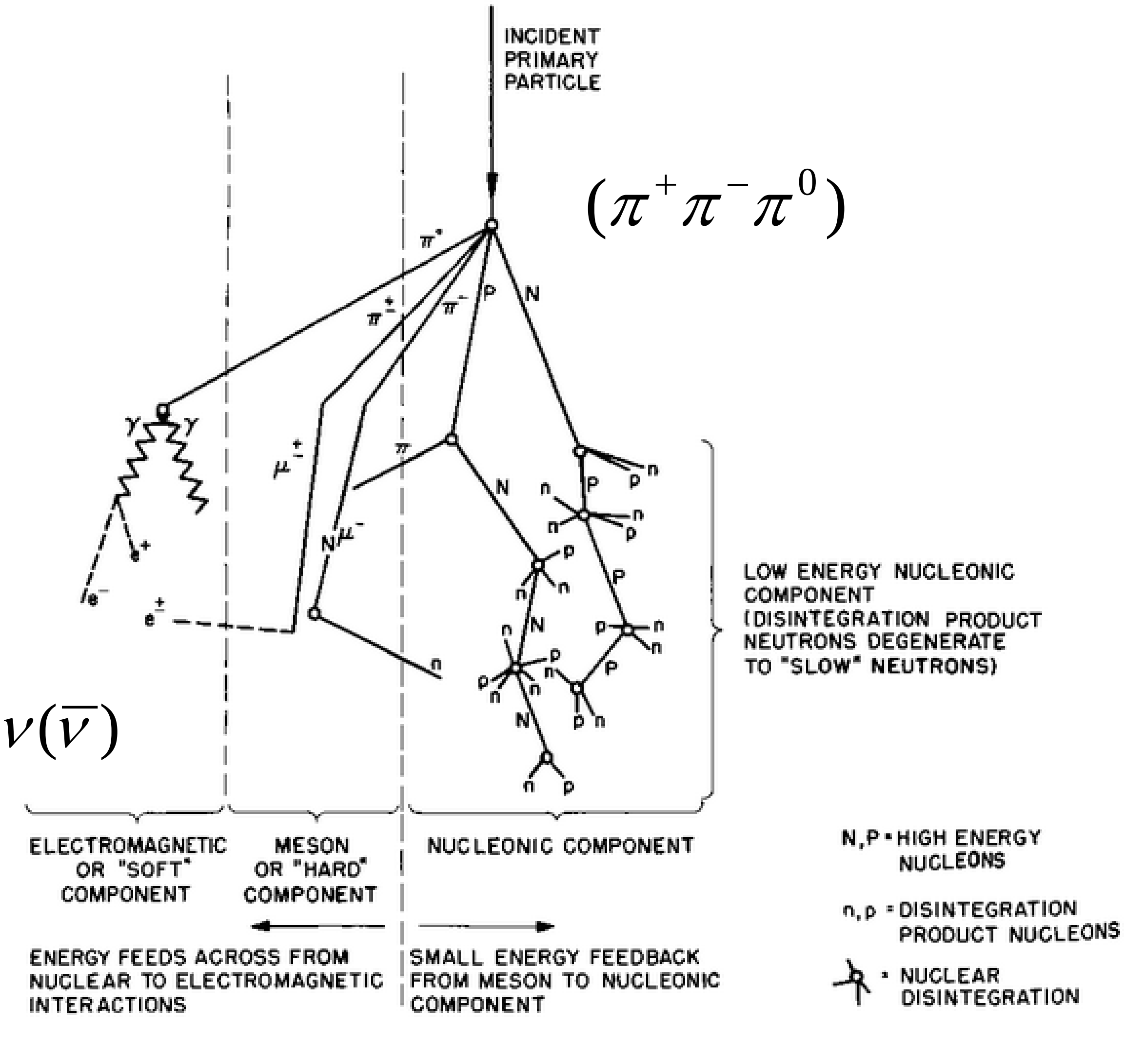
Αντιδράσεις. Ιδιότητες της ατμόσφαιρας. Παραγωγή πρωτονίων, πιονίων. Ορισμοί

Αντιδράσεις των κοσμικών ακτίνων στην ατμόσφαιρα, Καταιονισμοί.

$(\pi^+\pi^-\pi^0)$

$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$

$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu(\overline{\nu})$



Δευτερογενή στην επιφάνεια της γης.

Από τα δευτερογενή που φθάνουν στη γη, ο μεγάλος αριθμός είναι ηλεκτρόνια και αντίνες γ μικρής ενέργειας, 1- 10 MeV και

μικρότερος αριθμός από μιόνια και αδρόνια με ενέργειες από 0,1 –10 GeV.

Λόγοι

γ : ηλ : μιονια : αδρόνια

$10^3 : 10^2 : 10 : 1$1.

Τα μικρής ενέργειας πρωτόνια αντιδρούν με τους πυρήνες και ελευθερώνουν νετρόνια.

Αδρονικές αλληλεπιδράσεις στην ατμόσφαιρα

Κατά μέσον όρο 50% της ενέργειας του αρχικού παίρνει το leading particle. $p \rightarrow p + \ldots$

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 πιόνια λόγω της μικρής μάζας.

Τα δευτερογενή είτε συνεχίζουν την πορεία τους είτε διασπώνται.

Δημιουργία καταιονισμών.

Αναλυτική προσέγγιση δημιουργίας αδρονικών καταιωνισμών

Οι εξισώσεις μεταφοράς υπολογίστηκαν αρχικά από τους Rossi και Greisen to 1941 για Η.Μ. καταιονισμούς.

Μας δίνουν μια ποιοτική περιγραφή των καταιονισμών, παλαιότερα χρησιμοποιούνταν για αναλυτική λύση των εξισώσεων μεταφοράς.

Ορισμοί

Μήκος αντίδρασης λ_{int} είναι το πάχος του υλικού που όταν το περνά μια δέσμη σωματιδίων το ποσοστό των σωματιδίων που δεν έχουν αντιδράσει είναι 1/e.

$$\frac{dN}{N} = -\frac{dx}{\lambda_{\text{int}}} \quad \rightarrow \quad N = N_0 e^{-\frac{x}{\lambda_{\text{int}}}}$$

Μήκος διάσπασης για σωματίδιο με χρόνο ζωής τ_0

$$\frac{dN}{N} = -\frac{dt}{\tau_0} \quad \rightarrow \quad N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau_0}}$$

ορίζουμε μήκος διάσπασης $d=\gamma(\tau_0\, c)$

Βάθος ατμόσφαιρας

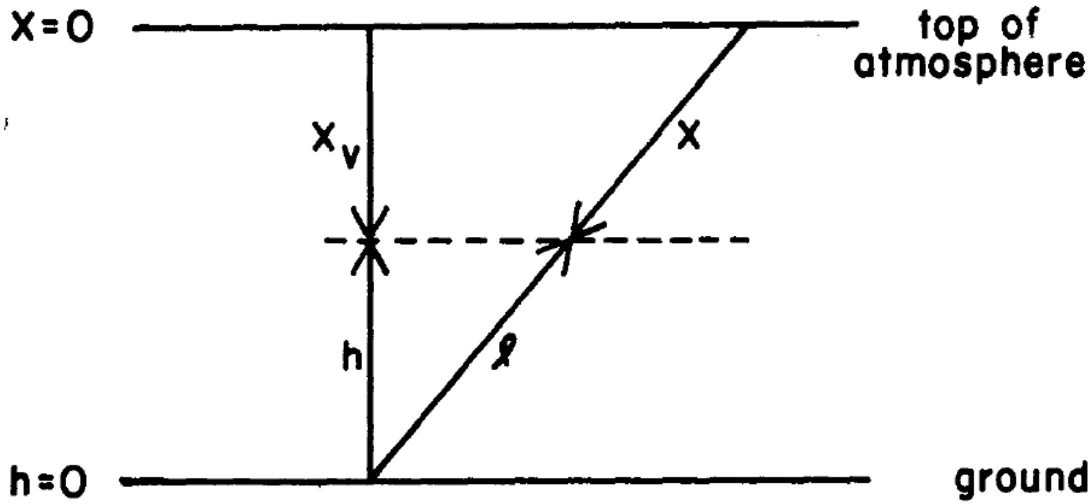


Figure 3.1: Definition of variables to describe the atmosphere.

$$X_V = X_0 e^{-h/h_0}$$

$$X_0 = 1030\, g/cm^2$$

Λόγω μεταβολής θερμοκρασίας

$$h_0 = 8.4\, km$$

$$h_0 = 6.4\, km$$

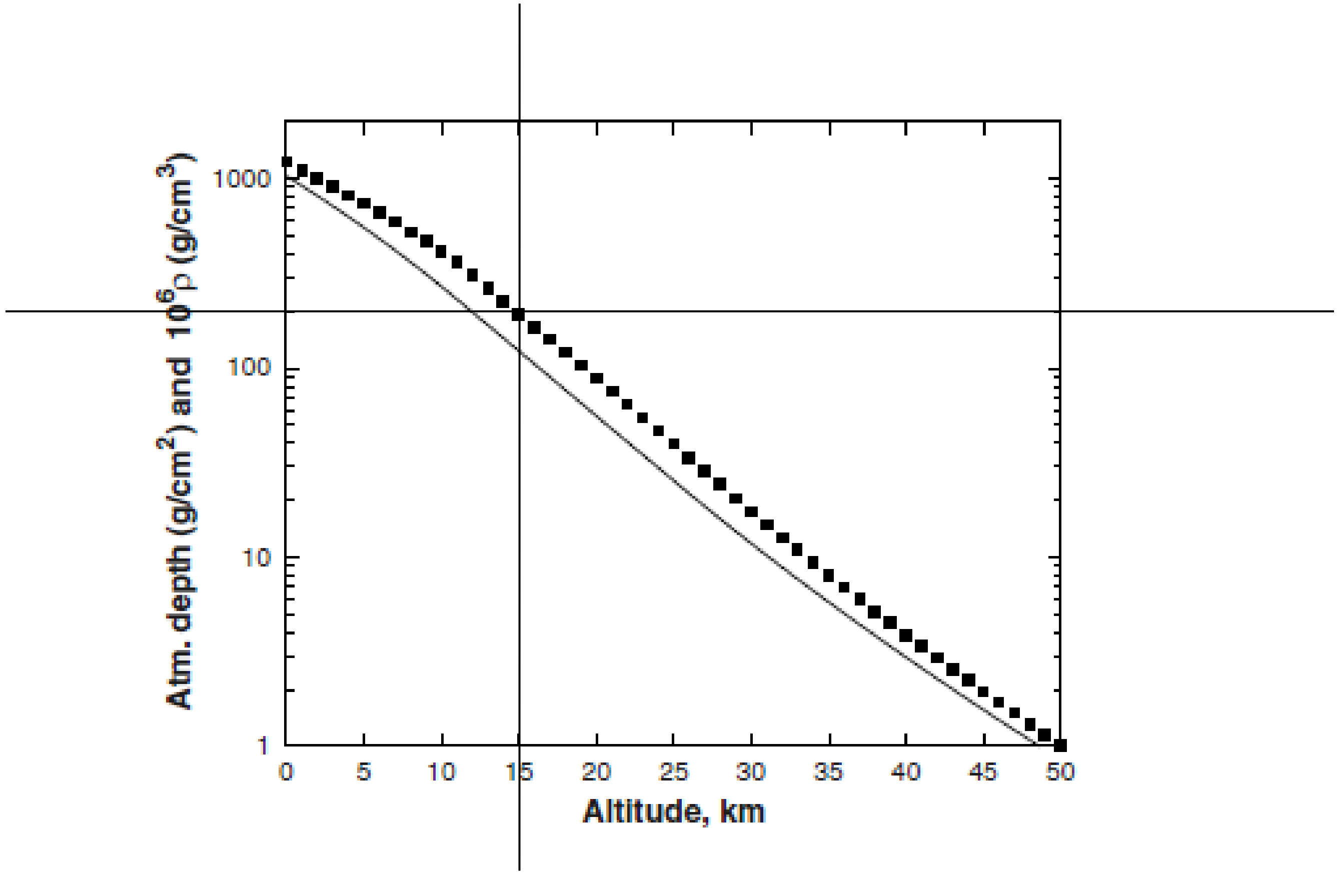
$$\rho = -\frac{dX_V}{dh}$$

$$h_V = l\cos\theta + \frac{1}{2}\frac{l^2}{R_0}\sin^2\theta$$

Λόγω καμπυλότητας της γής

X_{90} = 36000 g/cm^2

Ατμόσφαιρα



Η σχέση ύψους και ατμοσφαιρικού βάθους όπως υπολογίζεται με ακριβέστερους τύπους

Πυκνότητα Ατμόσφαιρας

Ως γνωστόν η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας δεν είναι σταθερή. Στην τροπόσφαιρα η θερμοκρασία ελαττώνεται με το ύψος. Σε μεγαλύτερα ύψη η θερμοκρασία παραμένει σταθερή. Βέβαια η θερμοκρασία παρουσιάζει ημερησία και ετήσια μεταβολή.
Κατά μέσον όρο η τροπόσφαιρα φθάνει στα 11 km
Για τον υπολογισμό της επιφανειακής πυκνότητας, εφαρμόζουμε τον τύπο $X=X_0e^{-h/h_0}$ με διαφορετικές τιμές του h_0.
Το h_0 μέχρι το ύψος 12 km, είναι ίσο με 8,4 km, και για ύψος μεγαλύτερο από 12 km , 6,4 km.

Ατμοσφαιρικό βάθος, μήκος αντίδρασης

Το συνολικό κατακόρυφο βάθος που διανύει το σωματίδιο δίνεται από το ολοκλήρωμα :

$$X_V = \int_h^\infty \rho(h')dh'$$

$$X_V = \int_h^\infty \rho(h_V)dl$$

$$\boxed{\sigma_N^{air} \cong 300mb \quad A = 14,5}$$

Η πιθανότητα ένα νουκλεόνιο να αντιδράσει αφού διανύσει βάθος dX είναι

$$\frac{dX}{\lambda_N(E)}$$

όπου λ_N είναι το μήκος αντίδρασης του σωματιδίου στον αέρα.

$$\lambda_N = \frac{\rho}{\rho_N \sigma_N^{air}} = \frac{Am_p}{\sigma_N^{air}}$$

$$\boxed{\lambda_N = 80\ g/cm^2}$$

Ατμοσφαιρικό βάθος, μήκος αντίδρασης

Το $\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{N}}^{\mathbf{air}}$ είναι η ενεργός διατομή για την αντίδραση των πρωτονίων στην ατμόσφαιρα. Είναι γνωστή από τα πειράματα σε επιταχυντές και για ενέργεια 1000 GeV, είναι περίπου ίση με **300 mb**. Ο μέσος ατομικός αριθμός της ατμόσφαιρας είναι περίπου 14,5 και αυτό μας δίνει μήκος αντίδρασης $\boldsymbol{\lambda}_{\mathbf{N}}\mathbf{=80\ g/cm^2}$. (ρ είναι η πυκνότητα του υλικού (gr/cm^3) και ρ_N η αριθμητική πυκνότητα των νουκλεονίων. Ο λόγος τους, είναι η μάζα του πυρήνα την οποία αντικαθιστούμε με Am_p δηλαδή ατομικός αριθμός επί μάζα πρωτονίου.

Εξίσωση παραγωγής νουκλεονίων (Greisen)

Ελάττωση λόγω αντίδρασης

Νέα νουκλεόνια που παράχθηκαν από την αντίδραση.

$$\frac{\mathrm{d}N(E,X)}{\mathrm{d}X} = -\frac{N(E,X)}{\lambda_N(E)} + \int_E^\infty \frac{N(E',X)}{\lambda_N(E')} F_{NN}(E,E') \frac{\mathrm{d}E'}{E}.$$

N(E,X) είναι η ροή σωματιδίων ενέργειας E στο βάθος X

Η αρχική συνθήκη, είναι το διαφορικό φάσμα νουκλεονίων, στην κορυφή της ατμόσφαιρας.

$$N(E,0) = N_0(E) = \frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}E} \approx 1.8\, E^{-2.7} \frac{\text{nucleons}}{\text{cm}^2\,\text{sr}\,\text{s}\,\text{GeV}/A}$$

Εξίσωση παραγωγής νουκλεονίων

- Υπολογισμός για νουκλεόνια τα οποία είναι σταθερά, δηλαδή δεν διασπώνται και ελαττώνονται μόνον όταν αντιδράσουν.
- N(E,X) είναι η ροή νουκλεονίων ενέργειας Ε σε βάθος Χ.
- N(E΄X) είναι η ροή νουκλεονίων με E΄>E , και τα οποία αντιδρούν και δίνουν νέα νουκλεόνια.
- Ο πρώτος όρος δηλώνει την μείωση του αριθμού λόγω αντίδρασης, λ_N το μήκος αντίδρασης για το νουκλεόνιο στην ατμόσφαιρα.
- Ο δεύτερος όρος δηλώνει την παραγωγή από νουκλεόνιο ενέργειας **Ε΄,** δευτερογενούς νουκλεονίου ενέργειας **Ε**, και ολοκληρώνεται για E΄>E.
- Στον παρονομαστή το μήκος αντίδρασης.
- Ο παράγοντας $\mathbf{F_{NN}}$ λέγεται inclusive cross-section και δίνει την <u>πιθανότητα </u>να παραχθεί ένα σωματίδιο με ενέργεια **Ε,** από ένα σωματίδιο με ενέργεια **Ε΄.**

Εξίσωση παραγωγής νουκλεονίων

- Οι Greisen και Rossi για να μπορέσουν να βρουν εκθετικές λύσεις στις διαφορικές εξισώσεις έκαναν τις προσεγγίσεις:
- Θεώρησαν αμελητέες τις απώλειες λόγω ιονισμού.
- Θεώρησαν το μήκος αντίδρασης ανεξάρτητο από την ενέργεια.

Εξίσωση παραγωγής νουκλεονίων.

Οι συναρτήσεις $F_{NN}(E,E')$, είναι αδιάστατες και ονομάζονται inclusive ενεργές διατομές. Η διατομή για την παραγωγή ενός είδους σωματιδίου.

$$\frac{1}{\Lambda_N} = \frac{1}{\lambda_N}\left[1 - \int_0^1 (x_L)^{\gamma-1} F_{NN}(x_L)\,dx_L\right]$$

υπολογίζουμε μήκος απορρόφησης Λ_N

$$N(E,X) = g(0)\,e^{-X/\Lambda} E^{-(\gamma+1)}$$

γ+1=2,7 ο φασματικός δείκτης

$$\frac{1}{\Lambda_N} = \frac{1}{\lambda_N}\left[1 - Z_{NN}\right]$$

$$F_j(E,X) = F_j(E,0)\exp\left(-\frac{X}{\Lambda_j}\right)$$

Εξίσωση παραγωγής νουκλεονίων.

Το $X_L = E/E'$,είναι το κλάσμα της ορμής του μητρικού που παίρνει το δευτερογενές. Ο Greisen έκαμε την υπόθεση της κλιμάκωσης πριν από τον Feynman. Δηλαδή αν η ενέργεια στο Κ.Μ. γίνει πολύ μεγαλύτερη από τις μάζες των σωματιδίων, η ανελαστική διατομή αν εκφραστεί σαν συνάρτηση του X_L ,γίνεται σταθερή και η κατανομή των ορμών κατά μήκος και εγκάρσια της δέσμης, γίνεται ανεξάρτητη από την ορμή της δέσμης.

Οι ολικές διατομές έχουν μετρηθεί πειραματικά. Σε πρώτη προσέγγιση θεωρούνται σταθερές (10-100 GeV), αλλά μπορούμε να χρησιμοποιήσουν την κλιμάκωση με την σχέση $\ln(\sqrt{s})$ (Feynman).

Διάσπαση πιονίων, μήκος διάσπασης

$$\Delta\Pi = -\Pi\frac{\Delta\ell}{\gamma\, c\, \tau_\pi} = -\Pi\frac{\Delta X}{\rho\,\gamma\, c\, \tau_\pi} \equiv -\frac{\Pi}{d_\pi}\Delta X,$$

- Η μεταβολή του αριθμού των πιονίων ΔΠ μετά από απόσταση Δl.
- τ_π είναι ο μέσος χρόνος ζωής του πιονίου στο σύστημα ηρεμίας, $c\tau_\pi$ είναι το μέσο μήκος διάσπασης του πιονίου και πολλαπλασιασμένο με το γ το μήκος διάσπασης στο σύστημα εργαστηρίου.
- Πολλαπλασιάζουμε με την πυκνότητα του αέρα και το μετατρέπουμε σε επιφανειακή πυκνότητα για να είναι συγκρίσιμο με το μήκος αντίδρασης.

Εξίσωση Παραγωγής πιονίων

Τα πιόνια ελαττώνονται λόγω αντίδρασης και λόγω διάσπασης.

Παράγονται νέα πιόνια από την αντίδραση των πρωτονίων ή πιονίων.

$$\frac{\mathrm{d}N_i(E,X)}{\mathrm{d}X} = -\left(\frac{1}{\lambda_i} + \frac{1}{d_i}\right) N_i(E,X) + \sum_j \int \frac{F_{ji}(E_i, E_j)}{E_i} \frac{N_j(E_j)}{\lambda_j} \, \mathrm{d}E_j,$$

$$\begin{aligned}\frac{\mathrm{d}\Pi}{\mathrm{d}X} = -\left(\frac{1}{\lambda_\pi} + \frac{1}{d_\pi}\right)\Pi \; &+ \int_0^1 \frac{\Pi(E/x_L)\, F_{\pi\pi}(E_\pi, E_\pi/x_L)}{\lambda_\pi(E/x_L)} \frac{\mathrm{d}x_L}{x_L^2} \\ &+ \int_0^1 \frac{N(E/x_L)\, F_{N\pi}(E_\pi, E_\pi/x_L)}{\lambda_N(E/x_L)} \frac{\mathrm{d}x_L}{x_L^2}.\end{aligned} \tag{3.18}$$

Εξίσωση Παραγωγής πιονίων

Ο όρος $1/\lambda_i$ δίνει την ελάττωση του αριθμού των πιονίων λόγω αντίδρασης.

Ο όρος $1/d_i$ δίνει την ελάττωση του αριθμού λόγω διάσπασης. Το d_i είναι το μήκος διάσπασης εκφρασμένο σε μονάδες επιφανειακής πυκνότητας.

Στη δεύτερη σχέση ο πρώτος όρος περιγράφει την παραγωγή νέων πιονίων από πιόνια, ενώ ο δεύτερος την παραγωγή από πρωτόνια.

Η μεταβλητή στο ολοκλήρωμα έχει αλλάξει και χρησιμοποιείται η μεταβλητή x_L που είναι το κλάσμα της Ενέργειας Ε που παίρνει το σωματίδιο, που παράγεται από σωματίδιο δέσμης ενέργειας Ε΄ δηλ $0<x_L=E/E'<1$.

Πίνακας σταθερών διάσπασης

Μήκος Διάσπασης

Κρίσιμη Ενέργεια

Table 3.1: Decay constants.

Particle	$c\tau_0$(cm)	ϵ (GeV)
$\mu^{\pm}$	6.59×10^4	1.0
$\pi^{\pm}$	780	115
π^0	2.5×10^{-6}	3.5×10^{10}
$K^{\pm}$	371	850
K_S	2.68	1.2×10^5
K_L	1554	205
$D^{\pm}$	0.028	4.3×10^7
D^0	0.013	9.2×10^7
n	2.69×10^{13}	–

$E>E_C$ Επικρατεί η αντίδραση.

$E<E_C$ επικρατεί η διάσπαση

- Ένα ασταθές σωματίδιο αντιδρά ή διασπάται ανάλογα με την τιμή του λ και του d.
- Σαν μέτρο σύγκρισης χρησιμοποιούμε την τιμή της ενέργειας για την οποία η τιμή του d_i (μήκος διάσπασης), γίνεται ίσο με το μήκος αντίδρασης λ_i . Η ενέργεια αυτή **E_c** ονομάζεται **κρίσιμη**.
- Ο πίνακας παρουσιάζει τις τιμές της κρίσιμης ενάργειας για διαφορετικά σωματίδια.

Ανάπτυξη πιονίων.

$$\frac{\mathrm{d}\Pi}{\mathrm{d}X} = -\left(\frac{1}{\lambda_\pi} + \frac{1}{d_\pi}\right)\Pi + \int_0^1 \frac{\Pi(E/x_L)\, F_{\pi\pi}(E_\pi, E_\pi/x_L)}{\lambda_\pi(E/x_L)} \frac{\mathrm{d}x_L}{x_L^2} + \int_0^1 \frac{N(E/x_L)\, F_{N\pi}(E_\pi, E_\pi/x_L)}{\lambda_N(E/x_L)} \frac{\mathrm{d}x_L}{x_L^2}. \tag{3.18}$$

Παραγωγή $\pi^{\pm}$ από $\pi^{\pm}$

Παραγωγή $\pi^{\pm}$ από p, n

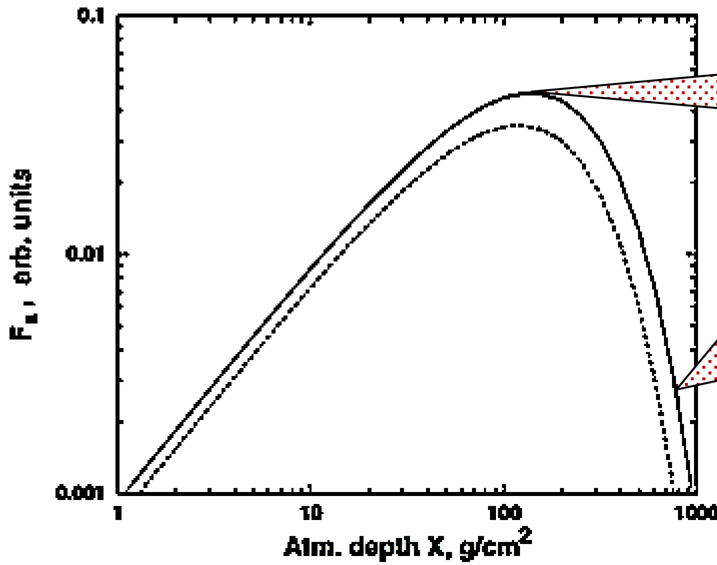
$E \gg E_c$

$$\Pi(E,X) = F_N(E,0)\frac{Z_{N\pi}}{(1-Z_{NN})}\frac{\Lambda_\pi}{\Lambda_\pi - \Lambda_N}\left[\exp(-X/\Lambda_\pi) - \exp(-X/\Lambda_N)\right].$$

Για $E < E_c$

$$\Pi(E,X) \simeq F_N(E,0)\frac{Z_{N\pi}}{\lambda_N}\frac{XE}{\epsilon_\pi}\exp(-X/\Lambda_N)$$

Καμπύλη παραγωγής πιονίων



Η παραγωγή δευτερογενών πιονίων μεγιστοποιείται σε ορισμένο βάθος ατμόσφαιρας

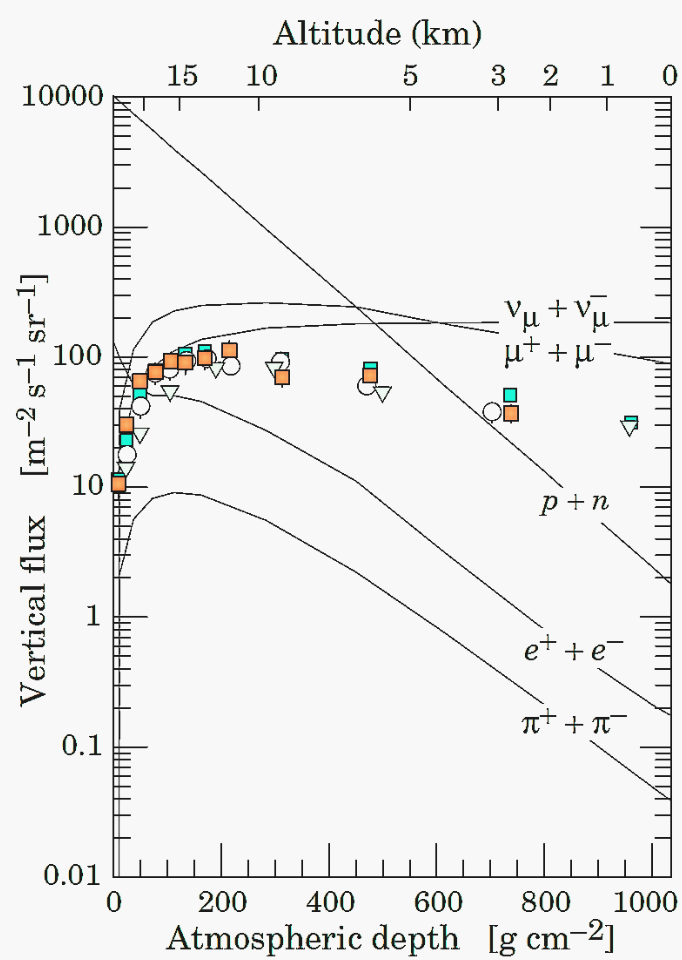
Η παραγωγή σταματά γιατί έχει μειωθεί η ενέργεια των σωματιδίων και δεν μπορούν να παράγουν νέα.

Fig. 6.3. Pion flux in the atmosphere calculated with (6.8) and (6.9) neglecting decay, solid line, and with decay, dashes. The normalization of the two curves is arbitrary, only the shape is correct.

Υπολογισμός παραγωγής πιονίων με τον τύπο του Greisen

Ο τύπος αυτός δίνει για τα πιόνια βάθος μέγιστης παραγωγής $125\ g/cm^2$ που αντιστοιχεί σε υψος 15 km .

Κατακόρυφη ροή κοσμικών ακτίνων στην ατμόσφαιρα.



Ύψος σε km

Ατμοσφαιρικό βάθος

gure 29.4: Vertical fluxes of cosmic rays in the atmosphere with $E > 1$ GeV imated from the nucleon flux of Eq. (29.2). The points show measurements of gative muons with $E_\mu > 1$ GeV [41–45].

$\pi^{\pm}$ (u$\bar{d}$, d$\bar{u}$)

Mass m = 139.57018 ± 0.00035 MeV

Mean life $\tau = (2.6033 \pm 0.0005) \times 10^{-8}$ s

$c\tau = 7.8045$ m

$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ (99.98770±0.00004) %

π^0 $(u\bar{u} - d\bar{d})/\sqrt{2}$

Mass m = 134.9766 ± 0.0006 MeV

Mean life $\tau = (8.52 \pm 0.18) \times 10^{-17}$ s

$c\tau = 25.5$ nm

$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ (98.823±0.034) %

$\pi^0 \rightarrow e^+ e^- \gamma$ (1.174±0.035) %

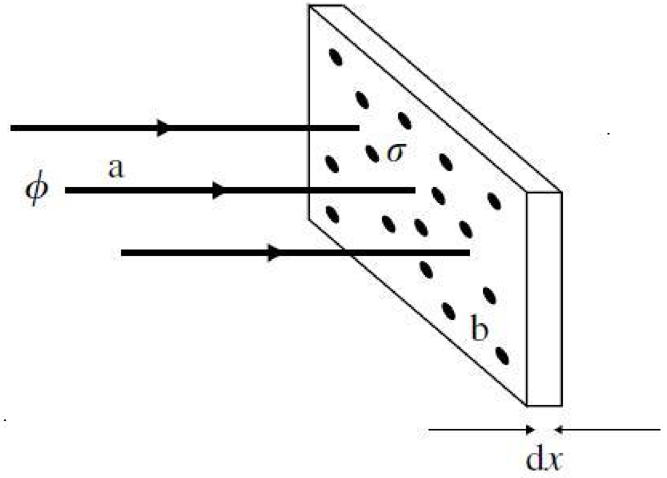
Μήκη εξασθένησης στην ατμόσφαιρα (g/cm^2)

Λ_N	Λ_π	Λ_K
Νουκλεόνια	**Πιόνια**	**Καόνια**
120	**160**	**180**

Αντιδράσεις πρωτονίων.

Ορισμοί

- Ενεργός διατομή.
  - Όταν έχουμε μια δέσμη σωματιδίων (a) που πέφτει σε ένα στόχο (b) που αποτελείται από διακεκριμένα σωματίδια , η ενεργός διατομή είναι η ισοδύναμη επιφάνεια που περιγράφει την πιθανότητα σκέδασης στα σωματίδια του στόχου. Μετριέται σε cm^2. Συνήθως χρησιμοποιούμε το barn, **1 b =10^{-24} cm $^{-2}$** και τις υποδιαιρέσεις του **mb** και **μb** ή **nb.**



Αν η πυκνότητα της δέσμης είναι n_i και η ταχύτητα v, ο αριθμός των σωματιδίων που διασχίζουν τον στόχο είναι $\varphi_i = n_\alpha v$.

Η πυκνότητα των σκεδαστών θα είναι $n_b dx$ και η επιφάνεια που καλύπτουν $\sigma\, n_b dx$.

Ο αριθμός των σκεδάσεων ανα μονάδα επιφάνειας και χρόνου θα είναι $\varphi_i\, \sigma\, n_b dx$.

Ο ρυθμός ανά σωμάτιο στόχου θα είναι $W=\varphi_\iota\, \sigma$

Μέση ελεύθερη διαδρομή.

Η ελάττωση του αριθμού των σωματιδίων της δέσμης μετά από απόσταση dx είναι:

$$dN = -\sigma\rho_N\, dx$$

Μετά από μήκος x :

$$N(x) = N(0)e^{-\sigma\rho_N x}$$

$$\lambda = \frac{1}{\sigma\rho_N} \quad \textit{μήκος αντίδρασης}$$

Μέση ελεύθερη διαδρομή για αντίδραση.

ρ_N είναι η πυκνότητα των στόχων, δηλαδή των νουκλεονίων.

Για να το εκφράσουμε σε μονάδες επιφανειακής πυκνότητας, (g/cm^2) πρέπει να υπολογίσουμε τον αριθμό των νουκλεονίων ανά μονάδα μάζας.

$$\lambda = \frac{A}{N_A\rho\sigma}$$

Όπου A ο ατομικός αριθμός του υλικού, N_A αριθμός Avogadro, ρ η πυκνότητα του υλικού σε g.cm^3 .

Μήκος αντίδρασης.

- Το μέσο μήκος διαδρομής μέσα σε υλικό, που χρειάζεται, ώστε στη δέσμη να απομείνει ποσοστό 1/e (0,386) των αρχικών. Ο ορισμός αναφέρεται σε δέσμη σωματιδίων υψηλής ενέργειας (σχετικιστικά). Για την παραγωγή δευτερογενών θα χρησιμοποιήσουμε μόνο την ανελαστική διατομή.

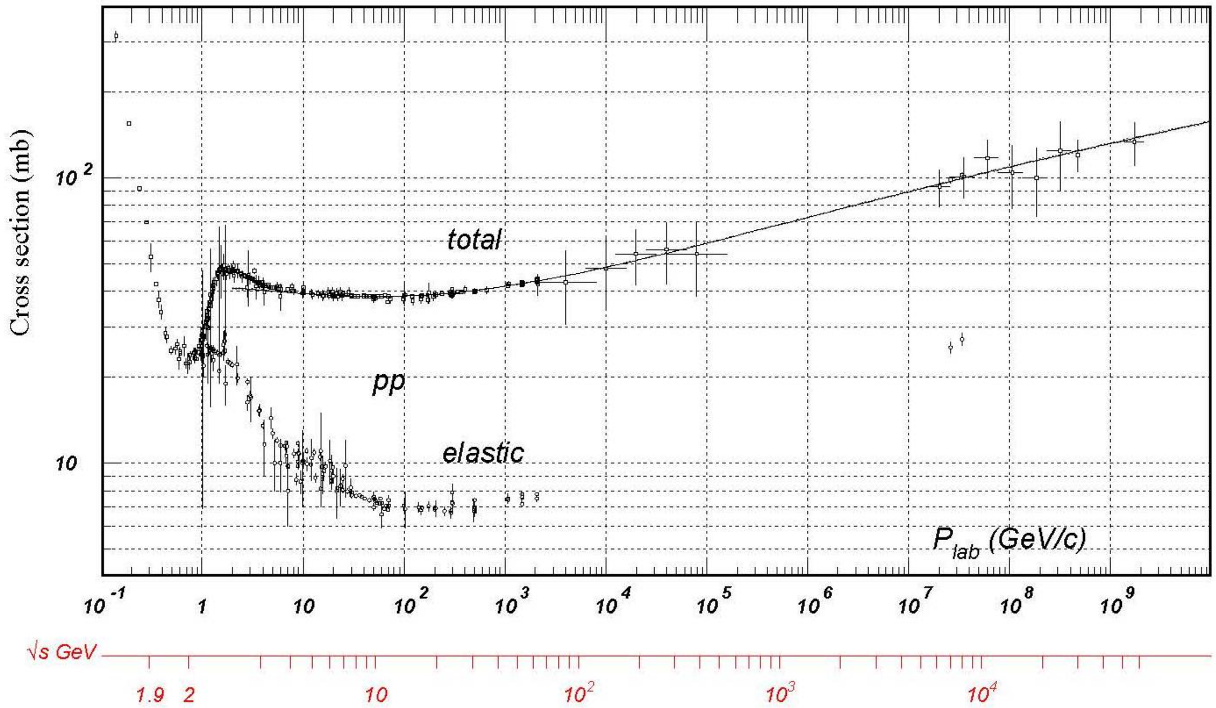
- $$\lambda_N = \frac{\rho}{\rho_N \sigma_N^{air}} = \frac{Am_p}{\sigma_N^{air}}$$

- Το ρ είναι η πυκνότητα του αέρα και ρ_N η αριθμητική πυκνότητα των πυρήνων. Α είναι το μέσο ατομικό βάρος της ατμόσφαιρας.
- Το σ_N^{air} είναι η ενεργός διατομή για την αντίδραση των πρωτονίων στην ατμόσφαιρα. Είναι γνωστή από τα πειράματα σε επιταχυντές. Για ενέργεια 1**000 GeV είναι περίπου ίση με 300 mb**. Ο μέσος ατομικός αριθμός της ατμόσφαιρας είναι περίπου 14,5 και αυτό μας δίνει μήκος αντίδρασης **λ_N=80 g/cm^2.**

Ελαστική, Ανελαστική Σκέδαση

- Ελαστική, Ανελαστική Σκέδαση.
  - **Ελαστική** ονομάζεται όταν το σωματίδιο της δέσμης αλλάζει διεύθυνση χωρίς να δημιουργηθούν νεα σωματίδια .
  - **Ανελαστική** όταν στην τελική κατάσταση δημιουργούνται νέα σωματίδια.
  - Στους υπολογισμούς χρησιμοποιούμε την ανελαστική σκέδαση, γιατί μας ενδιαφέρει η **παραγωγή δευτερογενών** σωματιδίων.

Ολική Διατομή pp, σαν συνάρτηση της ενέργειας δέσμης.



Στις χαμηλές ενέργειας αυξάνεται η διατομή, λόγω της παρουσίας συντονισμών. Στις υψηλές ενέργειες, αυξάνεται αργά σύμφωνα με τον $\log(\sqrt{s}\,)$ όπου $\sqrt{s}$ η ενέργεια στο Κ.Μ.

Μοντέλο

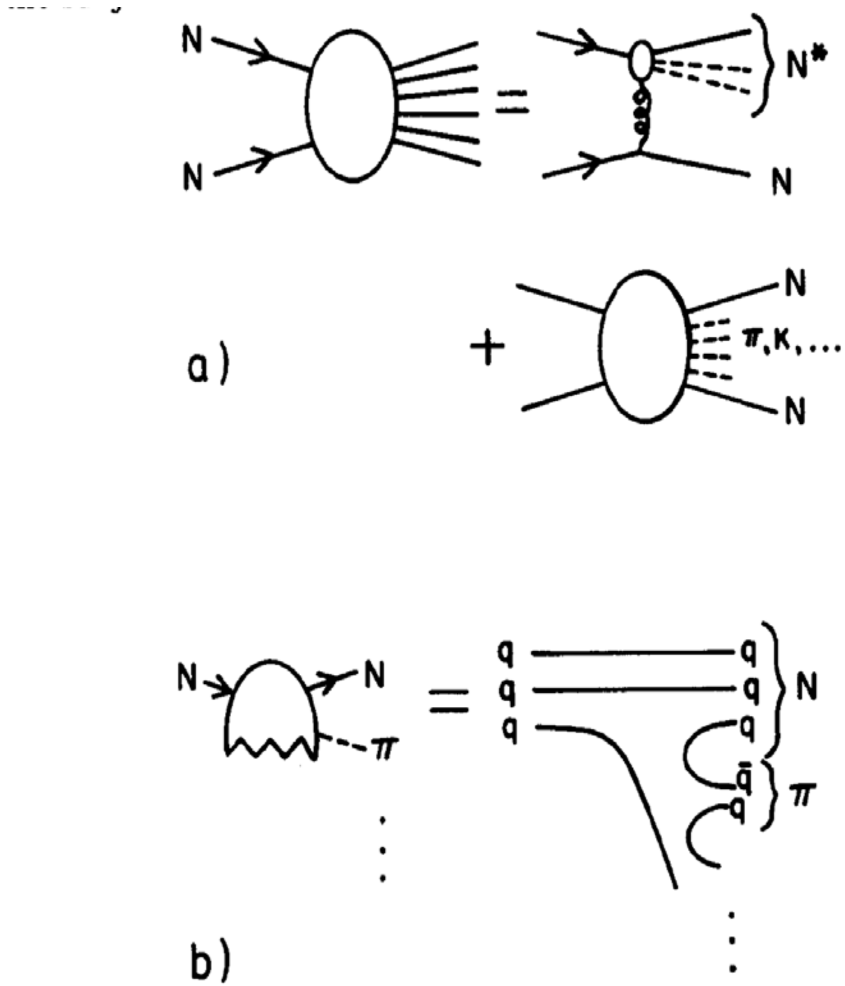


Figure 5.1: (a) Isobar-pionization picture of a nucleon–nucleon collision. (b) Fragmentation of a projectile nucleon.

Μέσος Χρόνος Ζωής Πιονίων.

π^+, π^- , π^0

π^0

τ=8.4x10^{-17} s , l_d=γ*2.51x10^{-7} cm

$\pi^\pm$

τ=2,6 x 10^{-8} s , l_d=γ x 780 cm

Μέσος χρόνος ζωής

Μέσος χρόνος ζωής ενός σωματιδίου τ_0 , δίνεται τη σχέση :

$$\frac{dN}{N} = -\frac{dt}{\tau_0} \quad \rightarrow \quad N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau_0}}$$

όπου το τ_0 μετριέται στο σύστημαηρεμίας.
Αν το σωματίδιο είναι ρελατιβιστικό, ο μέσος χρόνος ζωής γίνεται $\gamma\tau_0$ όπου γ ο παράγοντας Lorentz.

Μέσο μήκος διάσπασης.

Στην περίπτωση αυτή η ταχύτητα του σωματιδίου υ~c και ονομάζουμε μέσο μήκος διάσπασης, το **$c\tau_0$** (σύστημα ηρεμίας) και αντίστοιχα το **$d=\gamma c\tau_0$** (σύστημα εργαστηρίου).

Το μήκος αυτό το πολλαπλασιάζουμε με την αντίστοιχη πυκνότητα της ατμόσφαιρας και το μετατρέπουμε σε ατμοσφαιρικό βάθος με **μονάδες επιφανειακής πυκνότητας**, για να είναι συγκρίσιμο με το μήκος αντίδρασης.

Μήκος εξασθένησης.

Είναι πρακτικό για τους υπολογισμούς να εκφράσουμε τη μεταβολή αυτή με ένα μήκος εξασθένησης **(Attenuation length)** $\mathbf{\Lambda_\pi}$ και αντίστοιχα για τα υπόλοιπα σωματίδια.

$$\boxed{\frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{\lambda_i} + \frac{1}{d}}$$

Ένα ασταθές σωματίδιο αντιδρά ή διασπάται ανάλογα με την τιμή του λ και του d.

Σαν μέτρο σύγκρισης χρησιμοποιούμε την τιμή της ενέργειας για την οποία η τιμή του d_i (μήκος διάσπασης), γίνεται ίσο με το μήκος αντίδρασης λ_i . Η ενέργεια αυτή $\mathbf{E_c}$ ονομάζεται **κρίσιμη**.

Μήκη εξασθένησης στην ατμόσφαιρα (g/cm^2)

Λ_N	Λ_π	Λ_K
Νουκλεόνια	**Πιόνια**	**Καόνια**
120	**160**	**180**

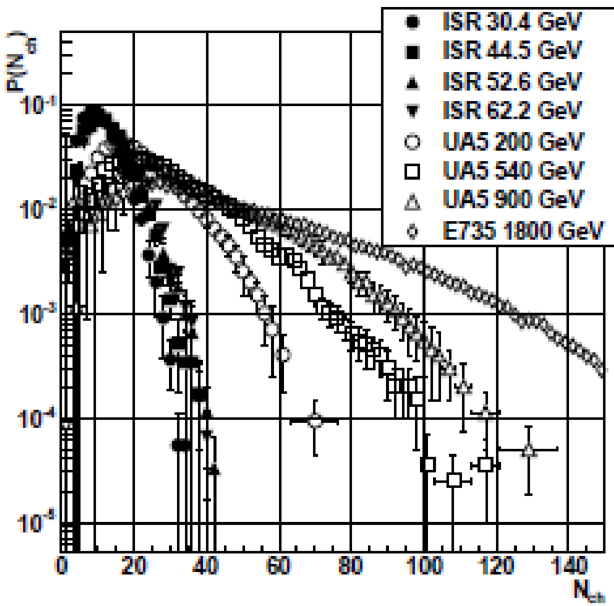
Table 3.1: Decay constants.

Particle	$c\tau_0$(cm)	ϵ (GeV)
$\mu^\pm$	6.59×10^4	1.0
$\pi^\pm$	780	115
π^0	2.5×10^{-6}	3.5×10^{10}
$K^\pm$	371	850
K_S	2.68	1.2×10^5
K_L	1554	205
$D^\pm$	0.028	4.3×10^7
D^0	0.013	9.2×10^7
n	2.69×10^{13}	–

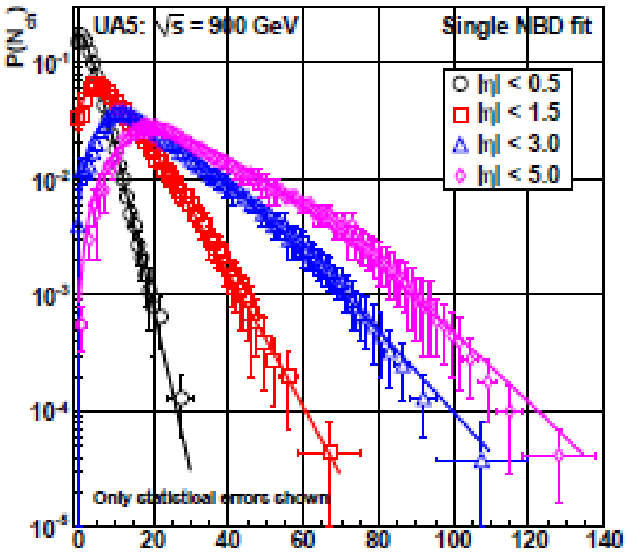
Πολλαπλότητα δευτερογενών.

- Η πρώτη εικόνα που περιγράφει την αντίδραση στην ατμόσφαιρα, είναι εντελώς σχηματική.
- Οι πολλαπλότητες των δευτερογενών είναι πολύ μεγαλύτερες, και ο αριθμός τους παρουσιάζει μεγάλη διασπορά.
- Για καλύτερη κατανόηση προσθέτω μερικές διαφάνειες από μετρήσεις σε επιταχυντές. Οι ενέργειες αναφέρονται σε σύστημα Κ.Μ. και για να κάνετε τη σύγκριση πρέπει να τις μετατρέψετε σε ενέργειες δέσμης.
- Οι διαφάνειες είναι από τις «βοηθητικές» παρουσιάσεις ανεβασμένες στο e-class.

Πολλαπλότητα δευτερογενών.



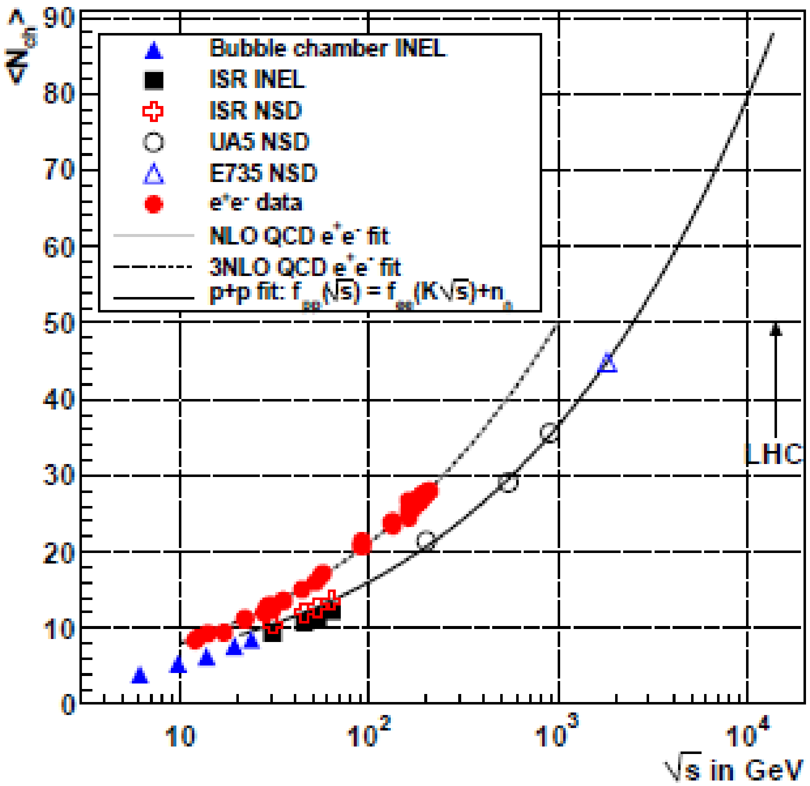
Αριθμός φορτισμένων για διαφορετικές ενέργειες CM

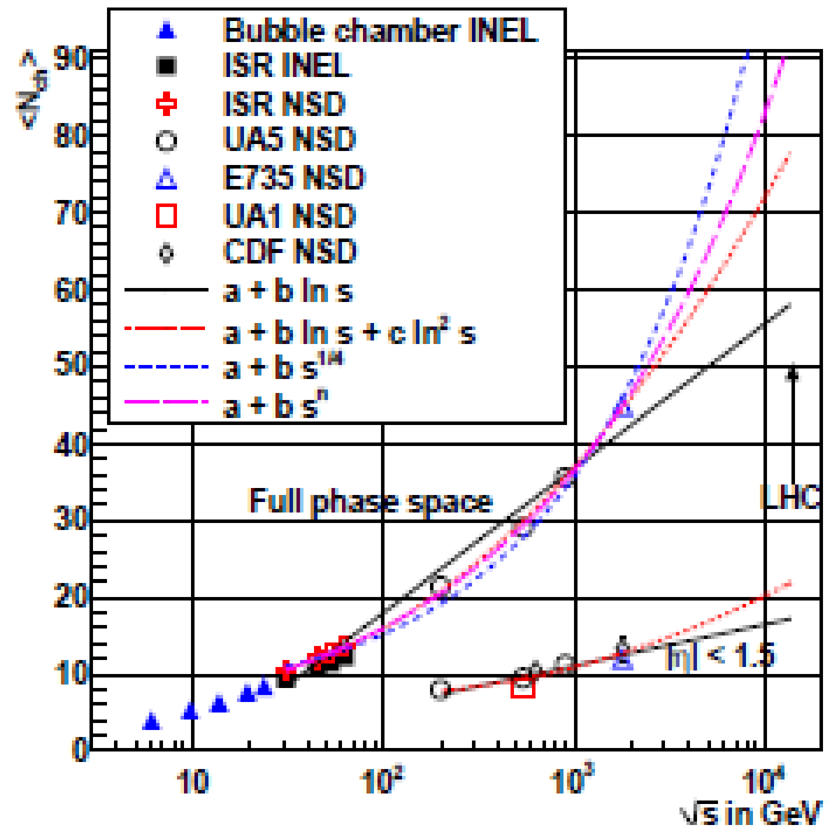


Η πολλαπλότητα ελαττώνεται σημαντικά για μικρές τιμές του η

Μικρή τιμή του η έχουν τα σωματίδια κοντά στη δέσμη.

Μέση πολλαπλότητα σαν συνάρτηση της Εν. CM

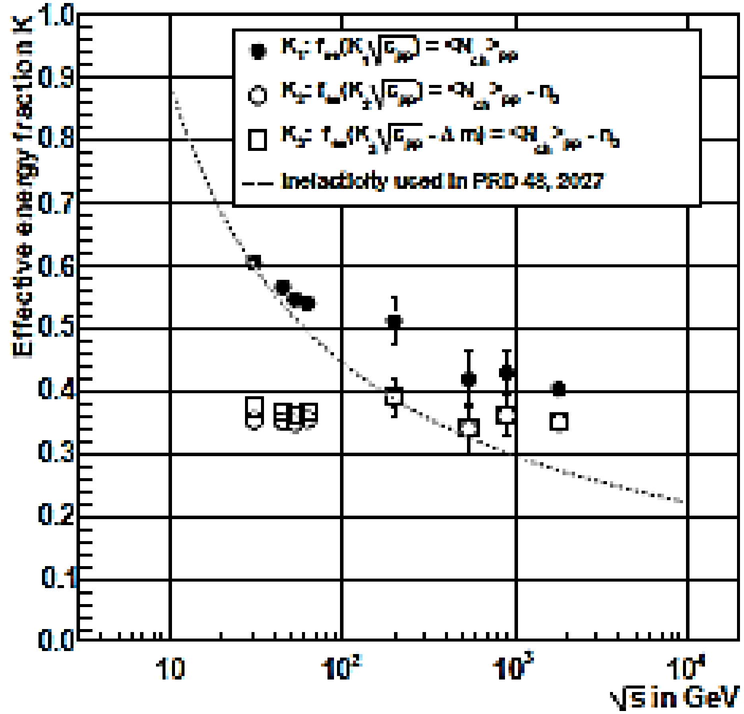




Η πολλαπλότητα εξαρτάται από την ενέργεια στο Κ.Μ. $\sqrt{s} = \sqrt{2m_p E_B}$

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.