

Κοσμικά Μιόνια

Ιδιότητες, παραγωγή, μετρήσεις.

Παραγωγή μιονίων

- $\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu} \quad (\approx 100\%)$
 $K^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu} \quad (\approx 63,5\%)$
- Η συνεισφορά των καονίων είναι 5% στις χαμηλές ενέργειες μιονίων , 8% στα 100 GeV και 19% στα 1000 GeV.
- Διάσπαση μιονίου:

$$\mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \nu_e (\bar{\nu}_e) + \bar{\nu}_{\mu} (\nu_{\mu})$$

Παραγωγή μιονίων, πως μοιράζεται η ενέργεια του αρχικού μεσονίου

Για την παραγωγή από $\pi^\pm$ έχουμε:

$$\frac{dn_\nu}{dE_\nu} = \frac{dn_\mu}{dE_\mu} = \frac{1}{(1 - m_\mu^2 / m_\pi^2) P_L}$$

Για την παραγωγή από $K^\pm$ έχουμε:

$$\frac{dn_\nu}{dE_\nu} = \frac{dn_\mu}{dE_\mu} = \frac{1}{(1 - m_\mu^2 / m_K^2) P_L}$$

Η μέση ενέργεια για παραγωγή από Πιόνια και Καόνια:

$$\frac{\langle E_\mu \rangle}{E_\pi} = 0.79$$
$$\frac{\langle E_\nu \rangle}{E_\pi} = 0.21$$

$$\frac{\langle E_\mu \rangle}{E_K} = 0.52$$
$$\frac{\langle E_\nu \rangle}{E_K} = 0.48$$

Προέλευση, Διασπάσεις Μιονίων

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu}(\bar{\nu}_{\mu})$$

$$K^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu}(\bar{\nu}_{\mu}) \approx 63.5\%$$

$$\mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \nu_e(\bar{\nu}_e) + \bar{\nu}_{\mu}(\nu_{\mu})$$

$$\frac{\nu_e + \bar{\nu}_e}{\nu_{\mu} + \bar{\nu}_{\mu}} = \frac{1}{2}$$

Μικρές ενέργειες. Τα μίονια με ενέργεια πάνω από 2.5 GeV δεν προλαβαίνουν να διασπαστούν. Το μήκος διάσπασης³ είναι μεγαλύτερο από το πάχος της ατμόσφαιρας.

Πιθανότητα διάσπασης ή αντίδρασης.

Ένα ασταθές σωματίδιο αντιδρά ή διασπάται ανάλογα με την τιμή του μήκους αντίδρασης λ_I και του μήκους διάσπασης d .

Σαν μέτρο σύγκρισης χρησιμοποιούμε την τιμή της ορμής (ή ενέργειας) για την οποία η τιμή του μήκους διάσπασης d , γίνεται ίση με το μήκος αντίδρασης λ_I .

Την ενέργεια αυτή ονομάζουμε κρίσιμη. Σωματίδια με ενέργεια μικρότερη από αυτήν, έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να διασπαστούν παρά να αντιδράσουν. Ο πίνακας έχει τις τιμές της κρίσιμης ενέργειας για διαφορετικά σωματίδια.

Πίνακας σταθερών διάσπασης, κρίσιμη ενέργεια

Μήκος
Διάσπασης

Table 3.1: Decay constants.

Κρίσιμη
Ενέργεια

Particle	$c\tau_0(\text{cm})$	$\epsilon \text{ (GeV)}$
$\mu^\pm$	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

Ροή μιονίων

Η ροή μιονίων, όπως δίδεται παραμετρικά από τον Gaisser, είναι:

$$\frac{dN_\mu}{dE_\mu d\Omega} \approx \frac{0.14 E_\mu^{-2.7}}{\text{cm}^2 \text{ s sr GeV}} \times \left\{ \frac{1}{1 + \frac{1.1 E_\mu \cos \theta}{115 \text{ GeV}}} + \frac{0.054}{1 + \frac{1.1 E_\mu \cos \theta}{850 \text{ GeV}}} \right\}$$

Ο πρώτος όρος στην παρένθεση, περιγράφει την συνεισφορά των Πιονίων
ενώ ο δεύτερος την συνεισφορά των Καονίων.

Η κρίσιμη ενέργεια για τα Πιόνια είναι 115 GeV για τα Καόνια 850 GeV.

θ είναι η γωνία της τροχιάς με την κατακόρυφο (ζενιθιακή γωνία).

Μετρήσεις μιονίων.

- Ιστορικά αναφέρονται σαν σκληρή συνιστώσα των κοσμικών λόγω της διεισδυτικής ικανότητας τους.
- Αρχικά μέχρι τη δεκαετία του 1970, για τη μελέτη του γεωμαγνητικού πεδίου.
- Στη συνέχεια για τη μελέτη των αδρονικών αντιδράσεων και της παραγωγής των αδρονικών καταιονισμών.
- Για τη μελέτη των αντιδράσεων των νετρίνων.

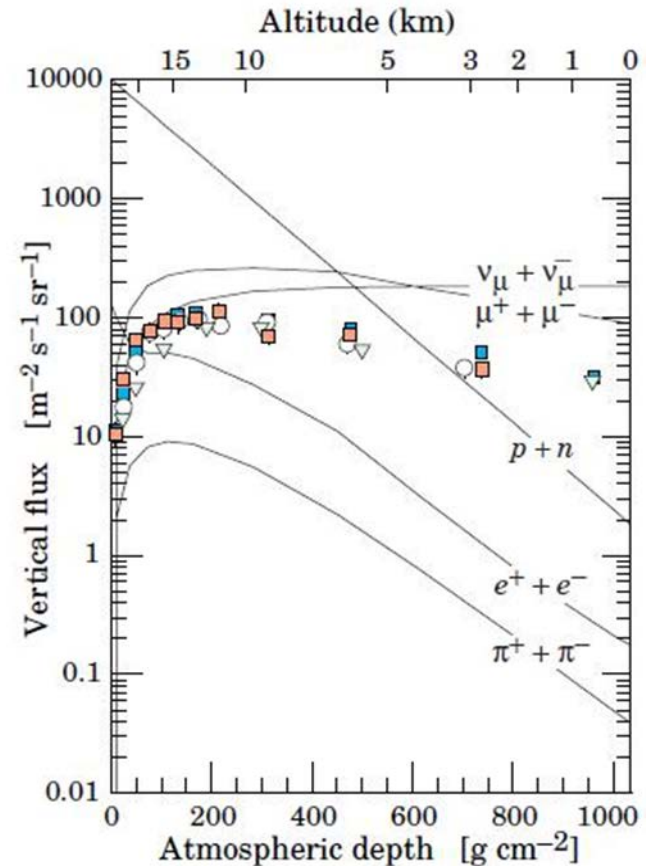
Μετρήσεις ορμής μιονίων

- Μετρήσεις του φάσματος των ορμών, μπορούν να γίνουν με μαγνητικά φασματομέτρα. Όμως τα φασματομέτρα βρίσκονται στην επιφάνεια της γης και έχουν περιορισμένο όγκο.
- Το μιονίο δημιουργεί ένα καθαρό ίχνος στους ανιχνευτές, και λόγω της μικρής απώλειας ενέργειας διασχίζει ολόκληρο τον ανιχνευτή. Σε μεγάλους ανιχνευτές οι τροχιές των κοσμικών μιονίων χρησιμοποιούνται για την ευθυγράμμιση των ανιχνευτών.
- Σε περιόδους που δεν έχουν δέσμη, τα πειράματα καταγράφουν κοσμικά μίονια και υπολογίζουν την ορμή τους από την απόκλιση της τροχιάς στο μαγνητικό πεδίο του ανιχνευτή.
- Τα πειράματα του LEP έκαναν ακριβείς μετρήσεις για το φορτίο, και την ορμή των μιονίων.

Βάθος παραγωγής μιονίων

Ο χρόνος ζωής των πιονίων είναι μικρός όμως ο παράγοντας γ μπορεί να είναι μεγάλος.

Στην ενέργεια 115 GeV για τα πιόνια, 850 GeV για τα καόνια, το μήκος διάσπασης γίνεται ίσο με το «βάθος» της ατμόσφαιρας. Δηλαδή σε ενέργεια μικρότερη από αυτήν, επικρατεί η διάσπαση των πιονίων και το φάσμα των μιονίων, ακολουθεί το φάσμα των πρωτογενών ενώ σε υψηλότερες ενέργειες, γίνεται πιο απότομο κατά μία μονάδα επειδή το μήκος διάσπασης γίνεται υπερβολικά μεγάλο σε σχέση με το ύψος της ατμόσφαιρας και τα πιόνια δεν προλαβαίνουν να διασπαστούν. ($c\tau = 7.8 \text{ m}$ $E_\pi = 1000 \text{ GeV}$ γίνεται 55,7 km).



Λόγος $\mu^+ \mu^-$

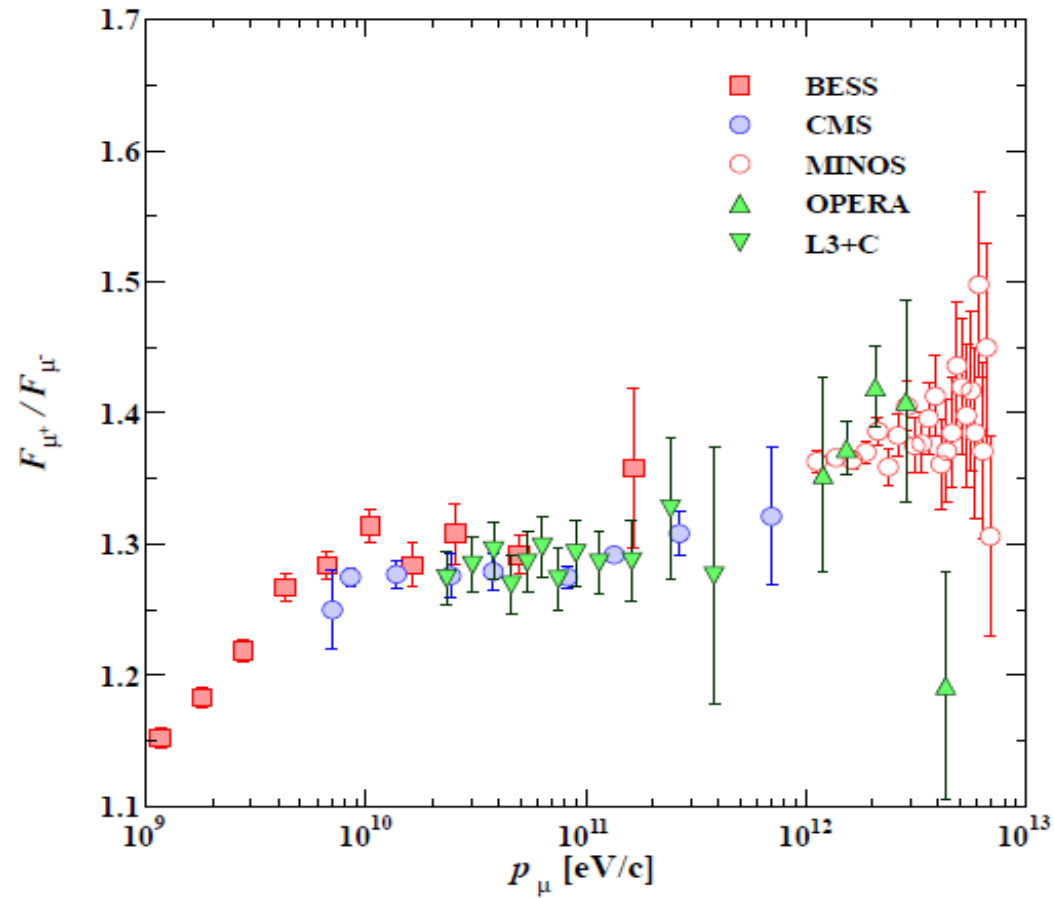
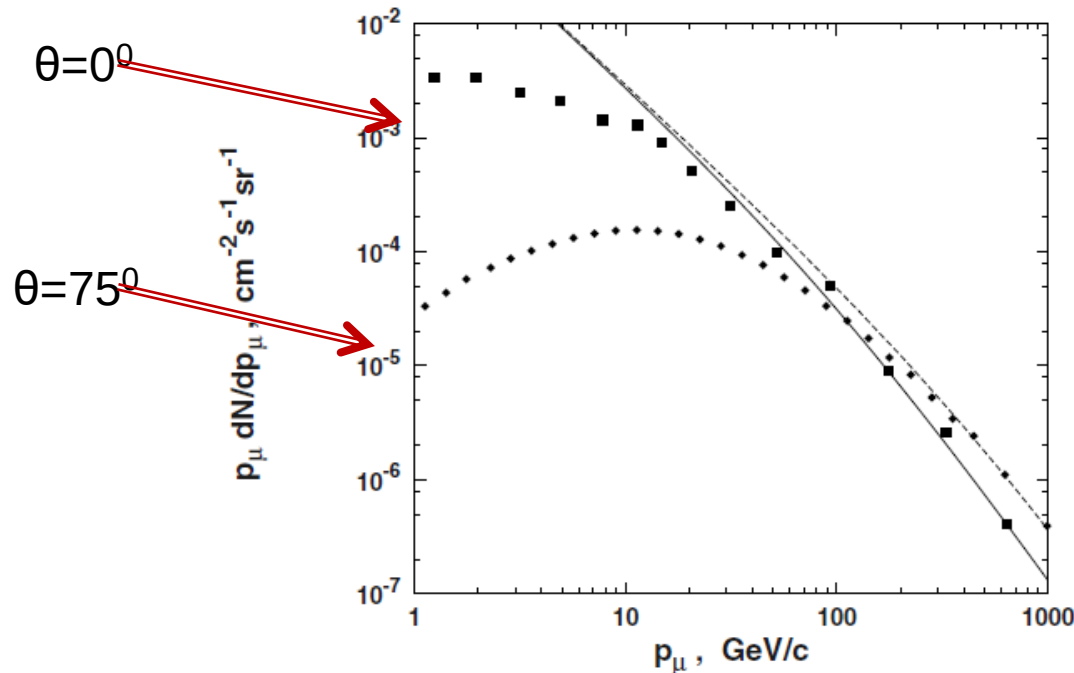


Figure 29.6: Muon charge ratio as a function of the muon momentum from Refs. [53,54,60,65,66].

Λόγος $\mu^+ \mu^-$

- Ο λόγος των θετικών μιονίων προς τα αρνητικά, μ^+/μ^- , είναι περίπου ίσος με 1,25 δηλαδή τα παραγόμενα θετικά μίονια είναι περισσότερα από τα αρνητικά. Αυτό επειδή τα αρχικά σωματίδια είναι πρωτόνια στο μεγαλύτερο ποσοστό (87%). Λόγω διατήρησης του φορτίου στα δευτερογενή το άθροισμα του φορτίου είναι +1. Παράδειγμα η αντίδραση $p+n \rightarrow \pi^+ + \dots$
- Μέχρι το 100 GeV τα μίονια προκαλούνται από την διάσπαση φορτισμένων πιονίων. Για μεγαλύτερες ενέργειες τα πιόνια αντιδρούν αντί να διασπαστούν. Στις μεγαλύτερες ενέργειες τα μίονια παράγονται από την διάσπαση των καονίων.
- Η παραγωγή φορτισμένων πιονίων από πρωτόνια είναι συμμετρική, ενώ για παραγωγή σωματιδίων K η παραγωγή θετικών είναι πολύ μεγαλύτερη από την παραγωγή αρνητικών.
$$\sigma_{pK^+} \gg \sigma_{pK^-} .$$

Ενεργειακό φάσμα.



Βλέπουμε την ροή των μιονίων σαν συνάρτηση της ορμής, όπως τα μετράμε στην επιφάνεια της θάλασσας. Τα τετράγωνα αντιστοιχούν σε κατακόρυφη διαδρομή, ενώ οι ρόμβοι σε γωνία 75 από την κατακόρυφο. Η συμπαγής γραμμές είναι ο υπολογισμός για τις δύο περιπτώσεις (σχέση 1). Παρατηρούμε την απώλεια ενέργειας στις χαμηλές ενέργειες, που οφείλεται στην ατμόσφαιρα. Στις 75° τα μίονια διασχίζουν πολύ μεγαλύτερο πάχος ατμόσφαιρας.

Φάσμα $\times E^{2,7}$

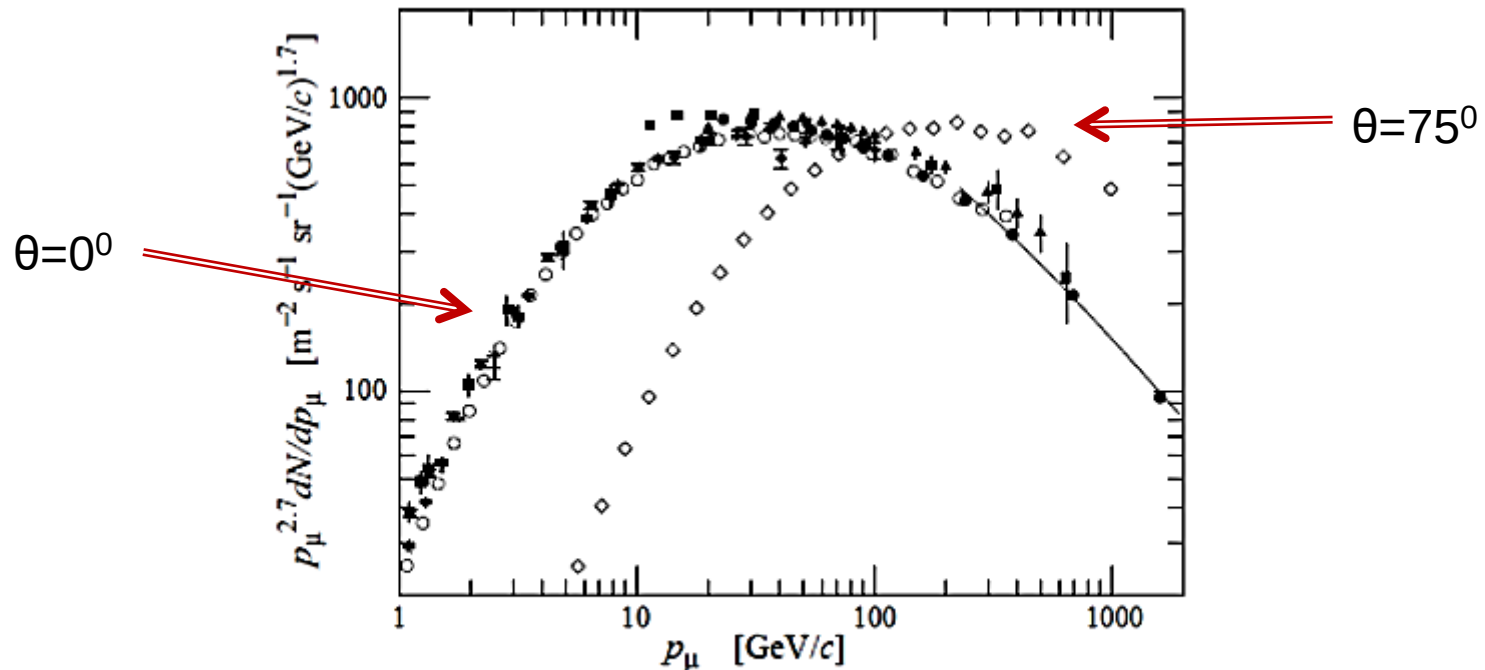


Figure 26.4: Spectrum of muons at $\theta = 0^\circ$ ($\diamond$ [41], $\blacksquare$ [46], $\blacktriangledown$ [47], $\blacktriangle$ [48], $\times$, $+$ [43], $\circ$ [44], and $\bullet$ [45] and $\theta = 75^\circ$ $\diamond$ [49]). The line plots the result from Eq. (26.4) for vertical showers.

Στις μικρές ορμές παρατηρούμε την απορρόφηση στην ατμόσφαιρα, στις μεγάλες ορμές την μείωση της παραγωγής των μιονίων.

Απώλειες Ενέργειας

Η απώλεια ενέργειας , λόγω ιονισμού για τα μίονα, είναι κατά προσέγγιση ίση με:

$$\frac{dE}{dx} \approx - \left(1,8 + 0,08 \ln \left(\frac{E_{\mu}}{\mu} \right) \right) \text{MeV} / \text{g cm}^{-2}$$

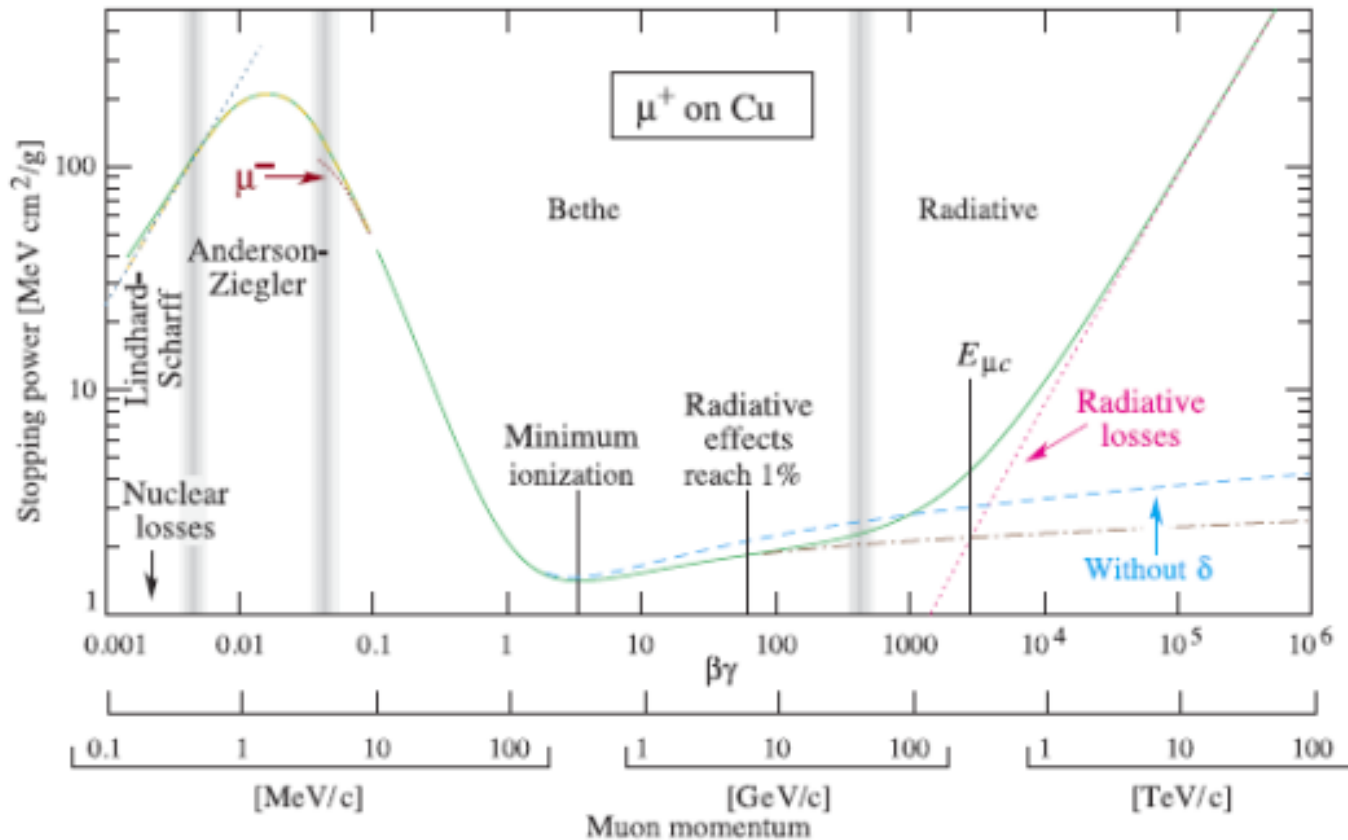
Σε γρήγορους υπολογισμούς χρησιμοποιούμε τον τύπο:

$$\frac{dE}{dx} \approx -1.8 \text{ MeV} / \text{g cm}^{-2}$$

Το x είναι η επιφανειακή πυκνότητα σε g/cm^2 .
Η επιφανειακή πυκνότητα που αντιστοιχεί σε μια κατακόρυφη αέριο στήλη είναι περίπου 1030 g/cm^2

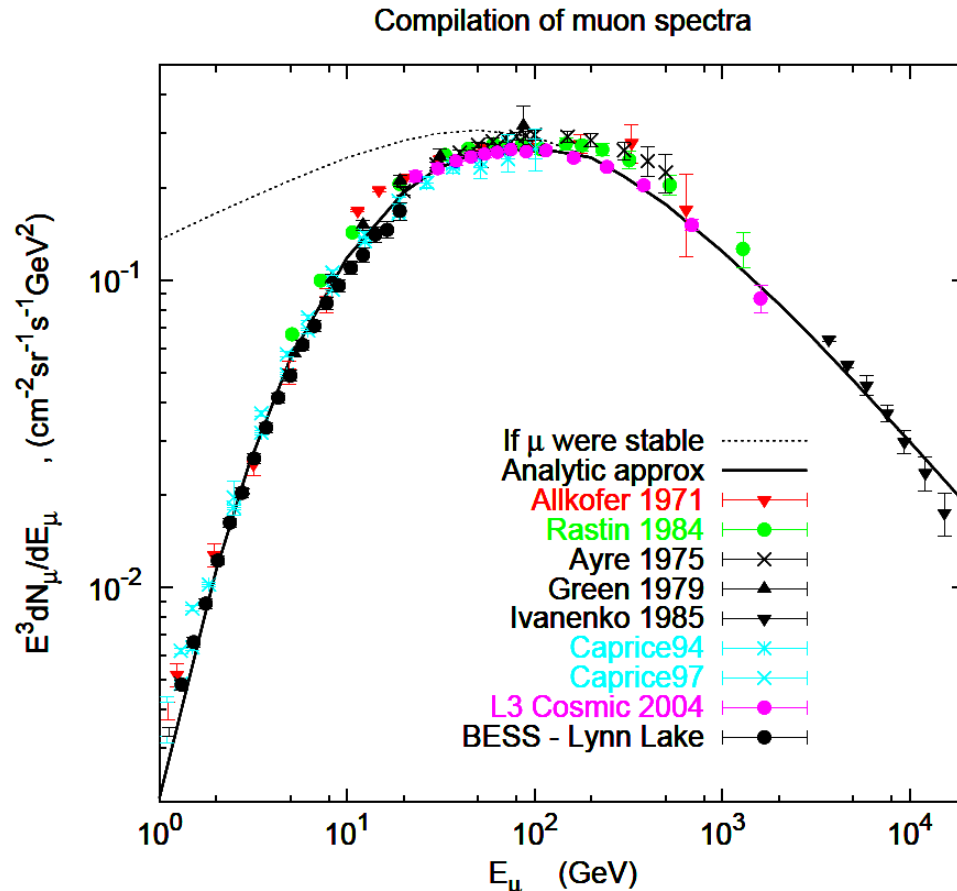
Οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας πέδης, είναι πολύ μικρότερες από τις απώλειες των ηλεκτρονίων , επειδή εξαρτώνται από τον λόγο $(m_e / m_{\mu})^2$ περίπου 40000 φορές μικρότερες.

Απώλεια ενέργειας μιονίων.



Διακρίνονται οι περιοχές ιονισμού, και ακτινοβολίας. Η ενδιάμεση περιοχή (0,5 ως 50 GeV είναι περιοχή ελάχιστου ιονισμού.

Κατακόρυφη Ροή Μιονίων στην επιφάνεια της γης.



Στις χαμηλές ενέργειες η ροή είναι μικρή λόγω απωλειών και διάσπασης των μιονίων . Στην συνέχεια ακολουθεί τη μορφή του φάσματος των πρωτογενών, σε υψηλές ενέργειας η ροή ελαττώνεται διότι τα πιόνια δεν έχουν αρκετή διαδρομή να διασπαστούν. Η συνεχής καμπύλη αντιστοιχεί στους υπολογισμούς παραγωγής, η διακεκομμένη στην παραγωγή χωρίς απώλειες. Το φάσμα έχει πολλαπλασιαστεί με E^3 για να τονιστούν οι διαφορές από το φάσμα των πρωτογενών.

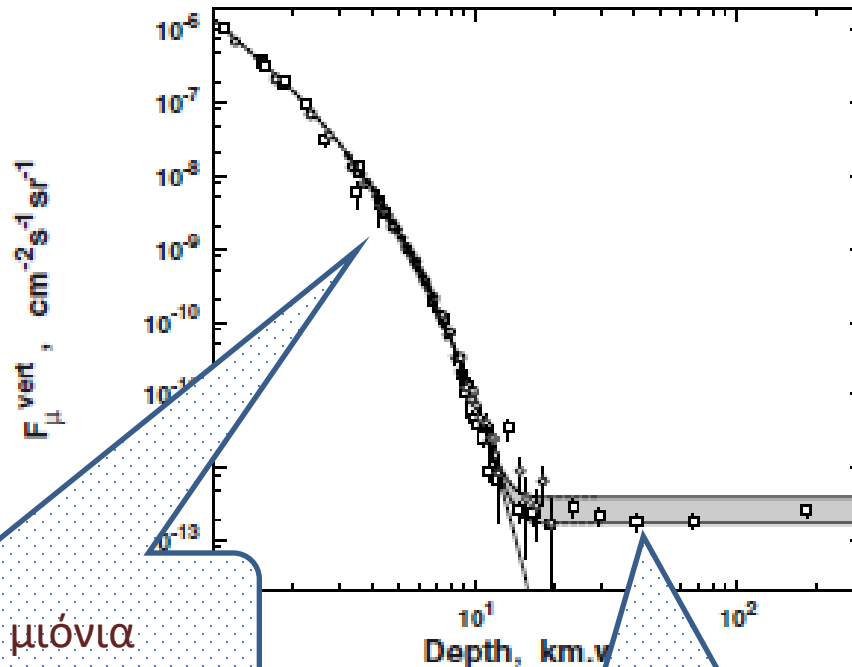
Πειράματα μεγάλου βάθους.

- Η ικανότητα μέτρησης της καμπυλότητας της τροχιάς, περιορίζεται στις υψηλές ορμές λόγω της μικρής απόκλισης.
- Όμως τα μίονια είναι διεισδυτικά και μπορούμε να υπολογίσουμε τις απώλειες ενέργειας όταν διασχίζουν την ύλη.
- Εδώ και δεκαετίες έχουν κατασκευαστεί πειράματα σε μεγάλο βάθος στο έδαφος σε μεγάλο βάθος στη θάλασσα καθώς και στον πάγο της Ανταρκτικής.
- Τα μίονια είναι τα μοναδικά σωματίδια που μετράμε σε μεγάλο βάθος.
- Το ενδιαφέρον έχει μετατοπιστεί στα μίονια που προέρχονται από τις αντιδράσεις των νετρίνων. Χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση νετρίνων.

Μιόνια σε μεγάλο βάθος

Η ροή των μιονίων όπως έχει μετρηθεί και υπολογιστεί σε μεγάλο βάθος εδάφους ή νερού. Το βάθος δίνεται σε ισοδύναμα km νερού για να γίνεται σύγκριση ανάμεσα σε μετρήσεις στο έδαφος και τη θάλασσα.

$$E_0^* = e^{-\frac{X}{\xi}} (E_\mu + \varepsilon) - \varepsilon$$



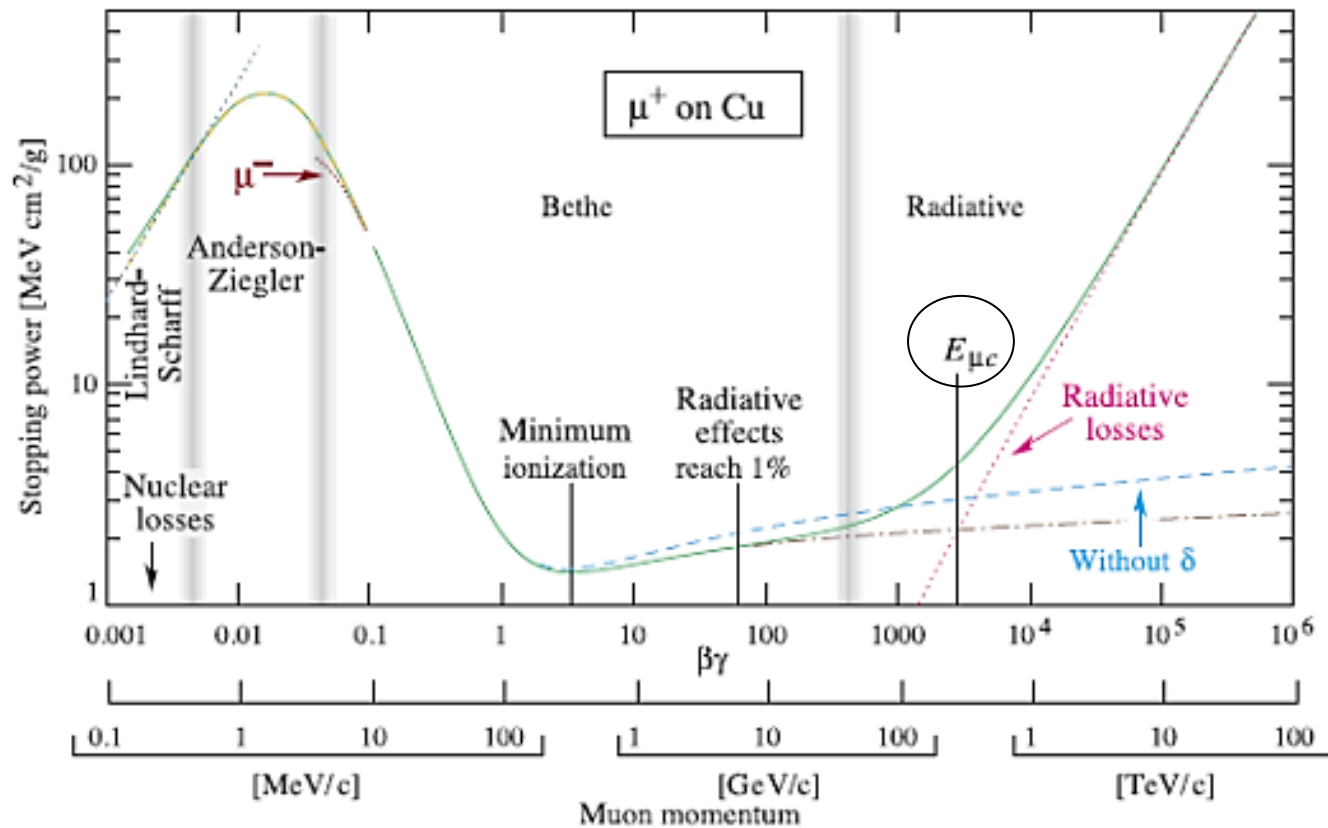
Ατμοσφαιρικά μιόνια

Τα μιόνια αυτά,
παράγονται από νετρίνα

Απώλειες Ενέργειας μιονίων

Απώλειες ιονισμού

Απώλειες ακτινοβολίας



Απώλειες Ενέργειας μιονίων

Στο διάγραμμα βλέπουμε:

Τις απώλειες $-dE/dX$ για θετικά μίονια σε χαλκό, σαν συνάρτηση του $\beta\gamma = p/Mc$ για 9 τάξεις μεγέθους στην Ορμή (12 τάξεις στην Κινητική Ενέργεια).

Οι συνεχείς γραμμές δείχνουν την ολική απώλεια ενέργειας. Οι κατακόρυφες ζώνες αντιστοιχούν στους διάφορους υπολογισμούς.

Η κρίσιμη ενέργεια όπου η απώλεια λόγω ιονισμού γίνονται ίσες με τις απώλειες ακτινοβολίας, είναι περίπου 500 GeV.

Απώλειες ενέργειας για μίονια στο πέρασμα τους από την ύλη σε μεγάλες ενέργειες

➤ Ιονισμός

$$\frac{dE}{dx} \approx - \left(1,8 + 0,08 \ln \left(\frac{E_\mu}{\mu} \right) \right) \text{MeV} / (g \text{ cm}^{-2})$$

➤ Ακτινοβολία πέδησης

$$\mu^\pm \rightarrow \mu^\pm + \gamma$$

$$E_c = 500 \text{ GeV} \text{ λόγω μάζας } (m_e/m_\mu)^2$$

➤ Παραγωγή ζεύγους

$$\mu^\pm \rightarrow \mu^\pm + e^+ + e^-$$

➤ Παραγωγή αδρονίων

$$\mu + \text{nucleus} \rightarrow \mu + \text{hadrons}$$

Μηχανισμοί

Τα μίονια χάνουν ενέργεια λόγω ιονισμού, περίπου $1,8 \text{ MeV} / \text{g/cm}^2$ ενώ σε υψηλότερες ενέργειες,

χάνουν λόγω ακτινοβολίας, με τούς μηχανισμούς της

Ακτινοβολίας πέδης,

Απευθείας δίδυμης γέννησης ($\mu + Z \rightarrow \mu e^+ e^- Z'$)

Δημιουργίας αδρονίων, μέσω φανταστικού φωτονίου

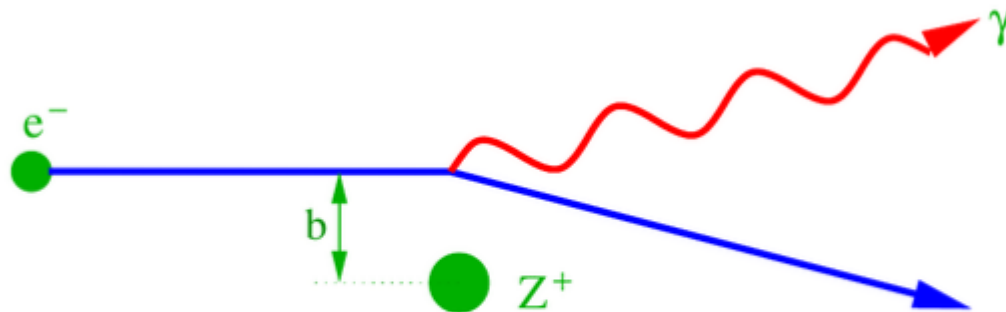
($\mu + \text{nucleon} \rightarrow \mu + \text{hadron}$).

Σημαντικότερος μηχανισμός στις ενέργειες πάνω από 1 TeV , είναι της δίδυμης γέννησης και ακολουθεί η ακτινοβολία πέδης.

Η κρίσιμη ενέργεια (οι απώλειες ιονισμού ίσες με τις απώλειες ακτινοβολίας) είναι περίπου ίση με 500 GeV .

Η κρίσιμη ενέργεια για το ηλεκτρόνιο είναι 80 MeV .

Ακτινοβολία πέδησης, bremsstrahlung

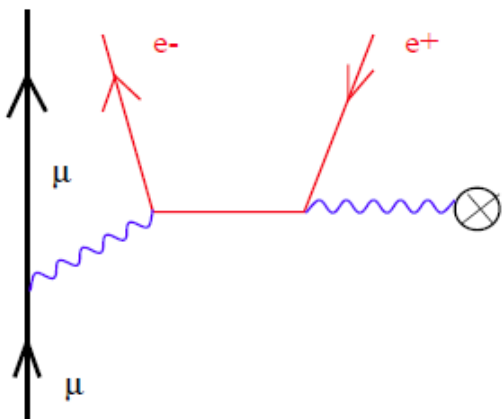


Τα φορτισμένα σωματίδια, επιβραδύνονται στο ηλεκτρικό πεδίο των πυρήνων, και η ενέργεια ακτινοβολείται σαν ακτίνα γ

Απώλειες Ενέργειας

Απ'ευθείας Παραγωγή Ζεύγους

$$\mu + \text{nucleus} \longrightarrow \mu + e^+ + e^- + \text{nucleus}$$



Παραγωγή αδρονίων από Βαθιά
Ανελαστική Σκέδαση μιονίου.

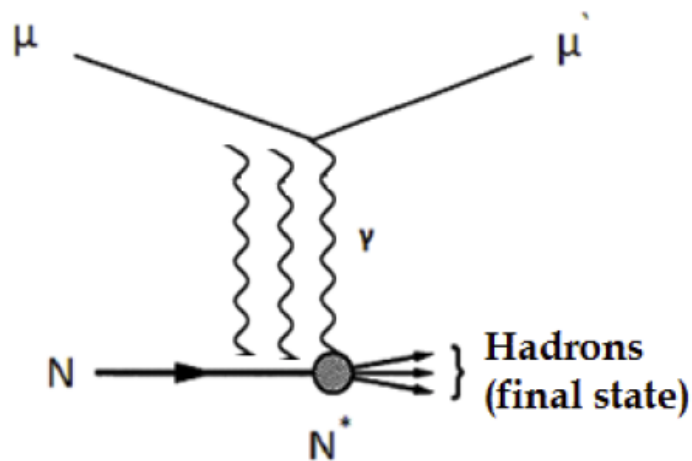


Figure 1. Deep inelastic muon-nucleon scattering

Απώλειες Ενέργειας

$$\frac{dE}{dX} = -a - \frac{E}{\xi} = -a - E \left\{ \frac{1}{\xi_B} + \frac{1}{\xi_{pair}} + \frac{1}{\xi_{hadron}} \right\}$$

Για τυπικό βράχο A=22, Z=11 $\rho=2.65\text{gr/cm}^3$

$\xi = 2,55 \cdot 10^5 \text{ g/cm}^2$

$a = 1,9 \text{ MeV/(g cm}^2\text{)}$

$E_c = 500 \text{ GeV}$

Λόγω των απωλειών, για να φθάσει το μ σε βάθος X χρειάζεται ελάχιστη ενέργεια:

$$E_0^{\min} = E_c (e^{X/\xi} - 1)$$

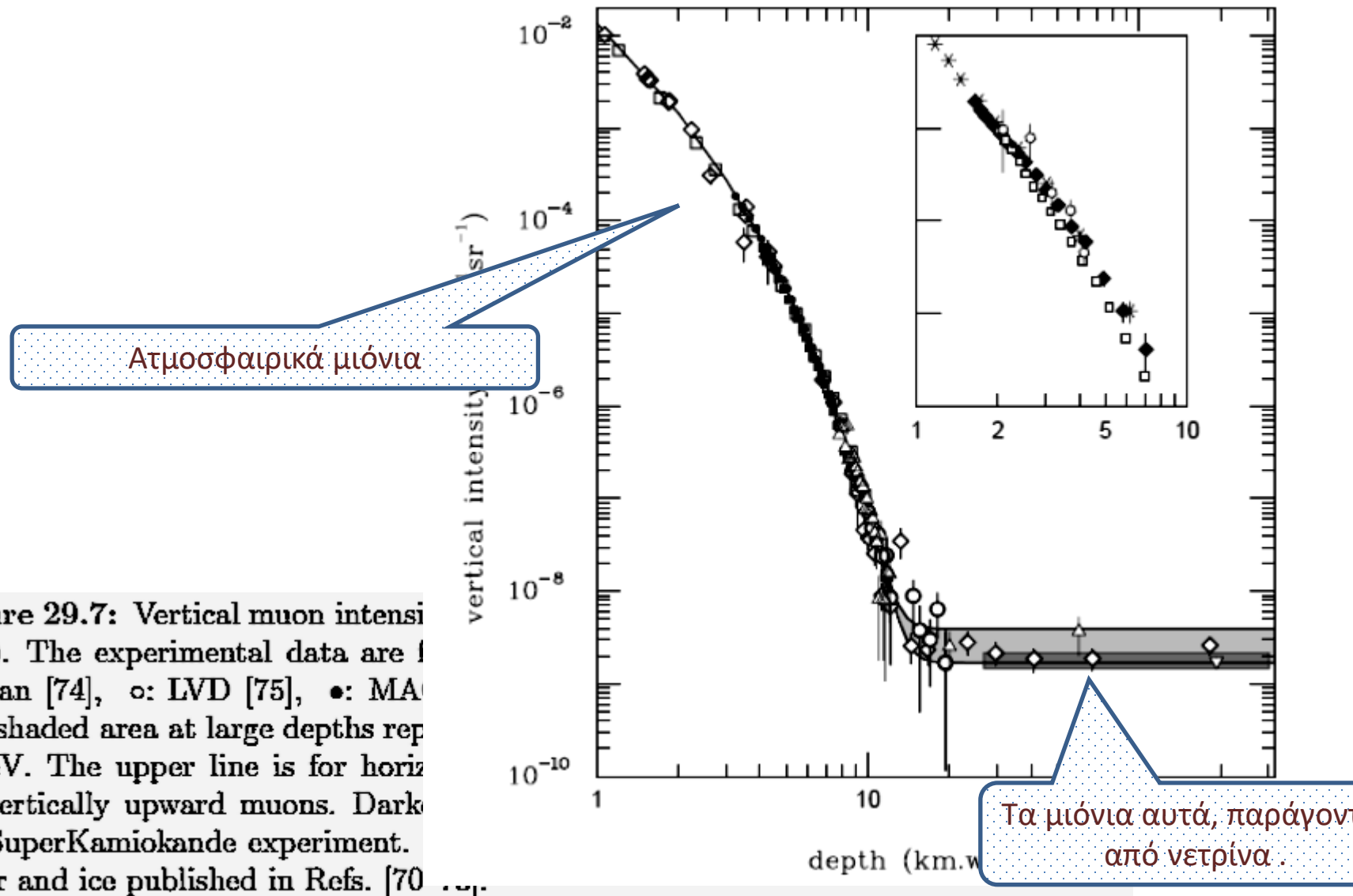
αντίστροφα

$$X = \xi \ln(1 + E / E_c)$$

Ανιχνευτές μεγάλου βάθους.

- Στους ανιχνευτές αυτούς δεν προσδιορίζουμε την ορμή, αλλά υπολογίζουμε την ενέργεια από το βάθος διείσδυσης.
- Οι διαφορετικές ζενιθιακές γωνίες αντιστοιχούν σε διαφορετικά βάθη.
- Στους υπολογισμούς συνήθως θεωρούμε ότι η μέση επιφανειακή πυκνότητα της γης είναι $2,65 \text{ gr/cm}^2$.
- Για μεγαλύτερη ακρίβεια, χρησιμοποιούνται τα γεωλογικά στοιχεία της περιοχής.
- Για να έχουμε σύγκριση με τα πειράματα σε νερό, χρησιμοποιούμε σαν μονάδα το 1k.w.e. (Ισοδύναμο χιλιόμετρο νερού)

Κατακόρυφη (ισοδύναμη) ροή μιονίων .



Ροή μιονίων στη θάλασσα.

Σκοπός των πειραμάτων σε μεγάλο βάθος στη θάλασσα είναι η ανίχνευση μιονίων που προέρχονται από τις αντιδράσεις κοσμικών νετρίνων. Στον οριζόντιο άξονα το βάθος σε χιλιόμετρα. Η ομαλή καμπύλη δείχνει ότι αυτή η ροή οφείλεται σε ατμοσφαιρικά μίονια.

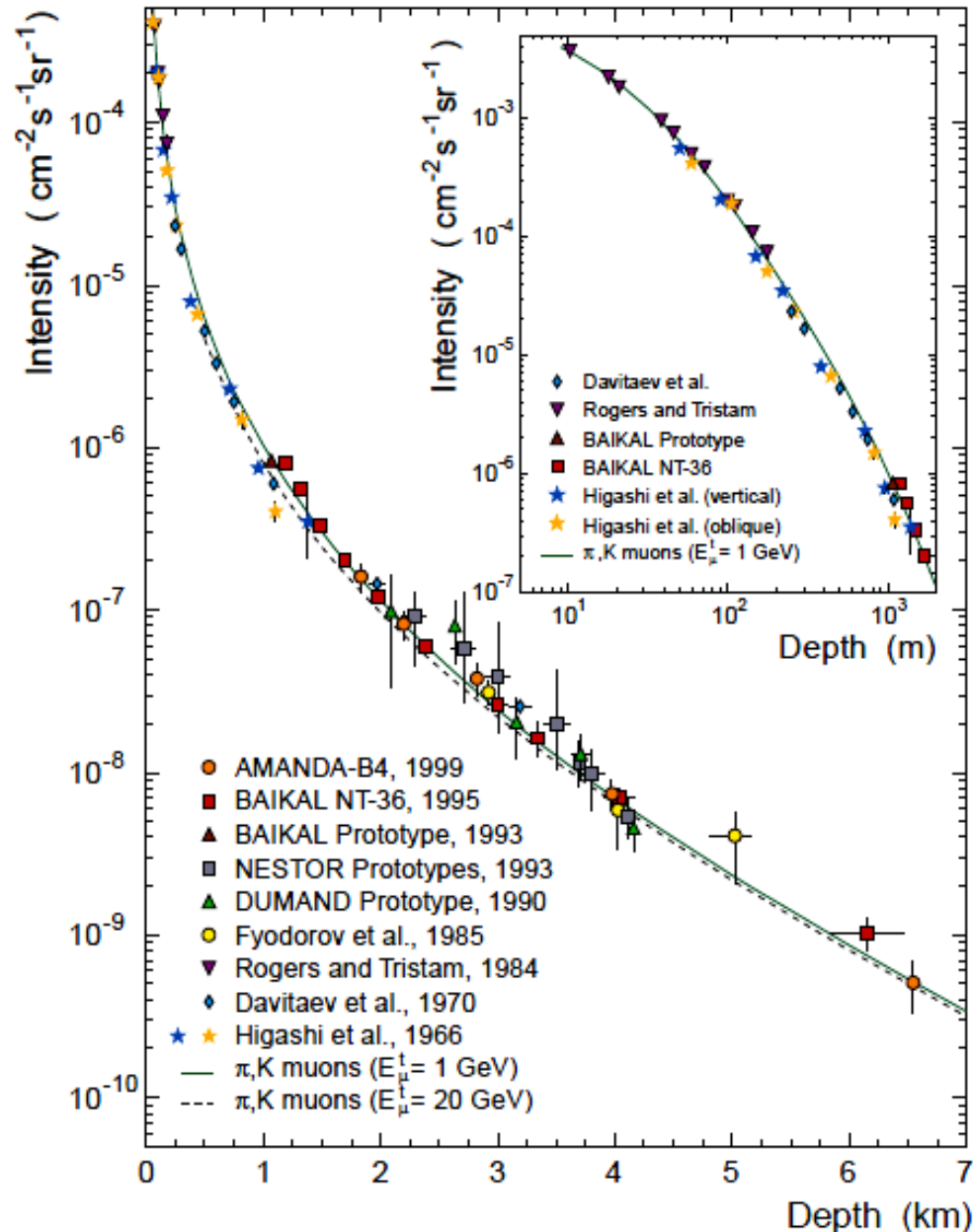
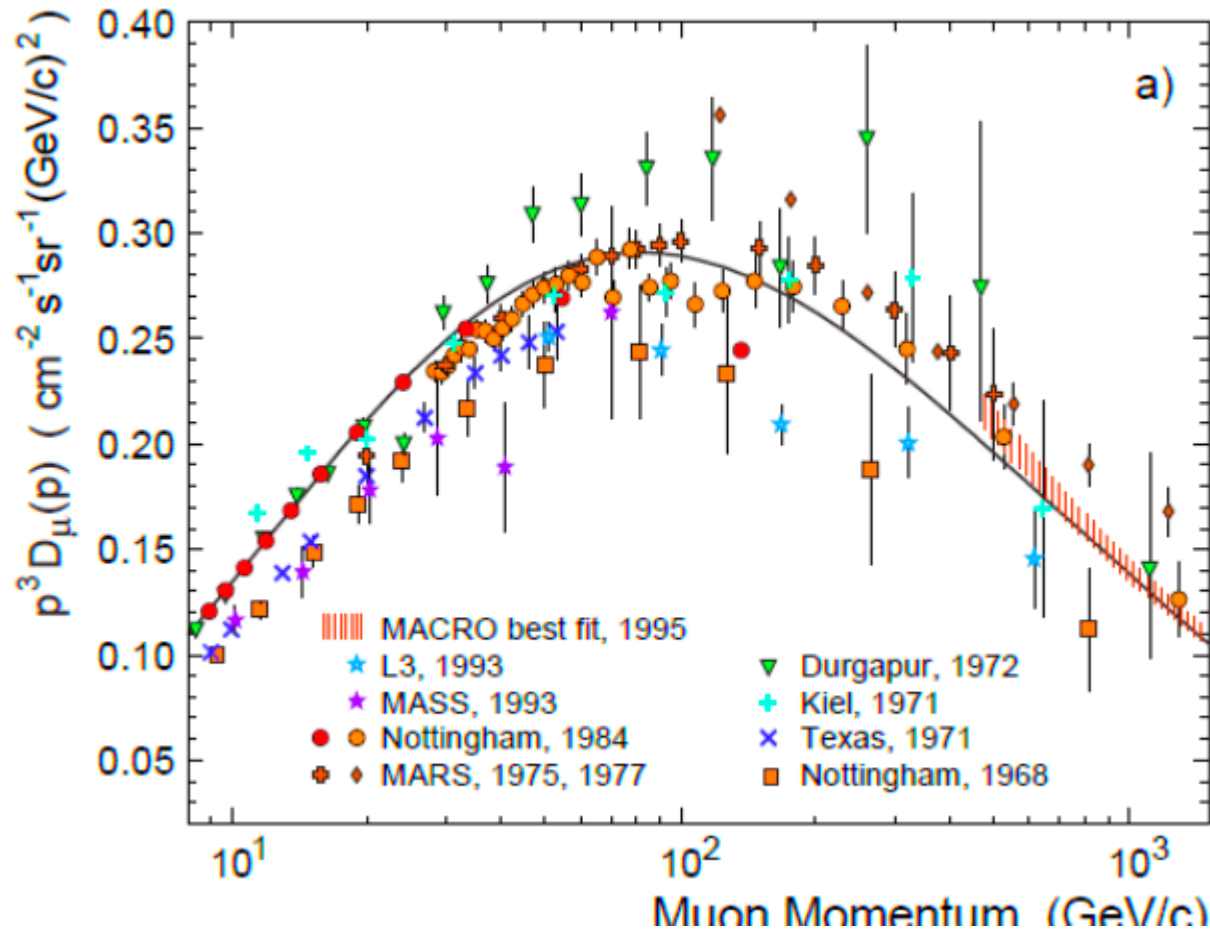


FIG. 15. Muon intensity vs depth in water. The data of underwater experiments are from Refs. [51–59]. The curves are for the calculated π, K -muon DIR.

Κατακόρυφη ροή μιονίων στην επιφάνεια της γης, 10-1000 GeV/c.



Κατακόρυφη ροή μιονίων στην επιφάνεια της γης 10^3 - 10^5 GeV/c.

