

Τα μίονια στην κοσμική ακτινοβολία.....	1
Παραγωγή.	1
Ενεργειακό Φάσμα.	2
Φορτίο.....	3
Απώλειες Ενέργειας.....	4
Μίονια σε μεγάλο βάθος.....	5

Τα μίονια στην κοσμική ακτινοβολία.

Παραγωγή.

Όταν τα πρωτόνια υψηλής ενέργειας φθάνουν στην ατμόσφαιρα αντιδρούν και στο μεγαλύτερο ποσοστό παράγουν πόνια (π^+ , π^- , π^0), σε μικρότερο ποσοστό K^+ , K^- . Τα φορτισμένα μεσόνια στη συνέχεια διασπώνται:

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu, (\approx 100\%)$$

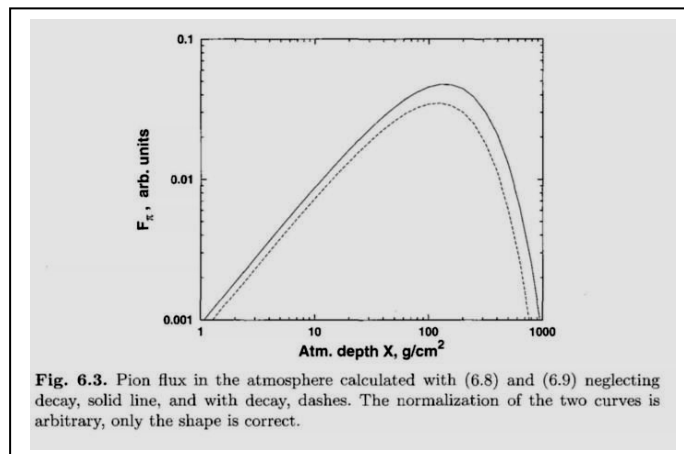
$$K^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu, (\approx 63,5\%)$$

Η συνεισφορά των καονίων είναι 5% στις χαμηλές ενέργειες μιονίων, 8% στα 100 GeV και 19% στα 1000 GeV.

Ο χρόνος ζωής του φορτισμένου πιονίου είναι μικρός $2,6 \times 10^{-8}$ s γι' αυτό τα μίονια παράγονται στα πρώτα μέτρα μετά την αντίδραση του αρχικού πρωτονίου. Τα μίονια διασπώνται σε ηλεκτρόνια και νετρίνα με χρόνο ζωής 2.196×10^{-6} s :

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

Το μίονιο έχει σχετικά μεγάλο χρόνο ζωής, έχει μικρή πιθανότητα να αντιδράσει και μικρές απώλειες ενέργειας. Έτσι μπορεί να διασχίσει την ατμόσφαιρα και είναι το πολυπληθέστερο κοσμικό σωματίδιο στην επιφάνεια της γης.



Εικόνα 1 Στη διπλανή εικόνα παρατηρούμε ότι η μέγιστη παραγωγή πιονίων συμβαίνει σε βάθος 100 g/cm², που αντιστοιχεί σε ύψος 15 km.

Αντίστοιχα με την εξέλιξη του αριθμού των πιονίων ο Gaisser υπολογίζει και τις εξισώσεις παραγωγής μιονίων. Όπως αναφέραμε παραπάνω, τα μίονια παράγονται κυρίως από τη διάσπαση των φορτισμένων πονίων και καονίων.

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

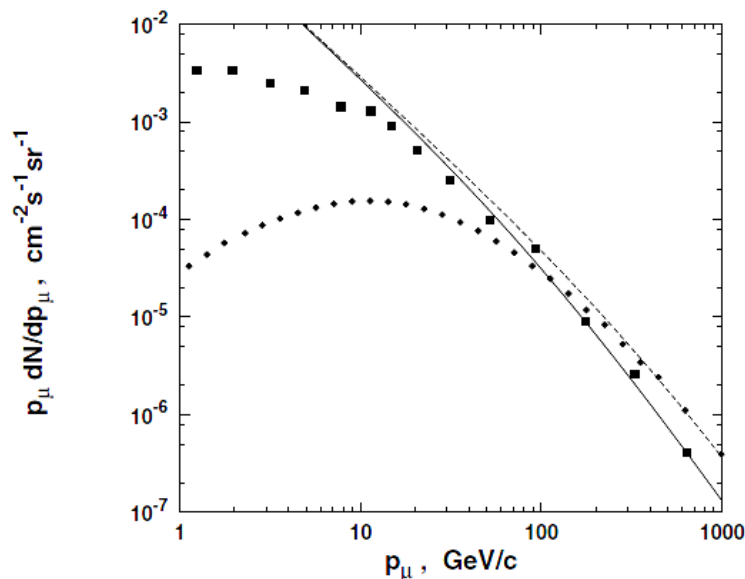
Ο πρώτος όρος περιγράφει την συνεισφορά των πιονίων ενώ ο δεύτερος την συνεισφορά των καονίων. Ο τύπος δεν υπολογίζει τις απώλειες στην ατμόσφαιρα και προσεγγίζει τα δεδομένα στις υψηλές ενέργειες. Στην ενέργεια 115 GeV για τα πιόνια, 850 GeV για τα καόνια, το μήκος διάσπασης γίνεται ίσο με το «βάθος» της ατμόσφαιρας. Δηλαδή σε ενέργεια μικρότερη από αυτήν επικρατεί η διάσπαση των πιονίων και το φάσμα 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).

Ενεργειακό Φάσμα.

Στην εικόνα () βλέπουμε το ενεργειακό φάσμα των μιονίων στην επιφάνεια της θάλασσας. Στις χαμηλές ενέργειες κάτω από 10 GeV, ένα μέρος χάνεται λόγω απώλειας ενέργειας (dE/dX) και διάσπασης. Στις μεγαλύτερες ενέργειες το ποσοστό αυτό είναι πολύ μικρό.

Ένα μίονιο με ενέργεια 1 GeV έχει διαδρομή διάσπασης περίπου 6 km ενώ με ενέργεια 10 GeV γύρω στα 60 km άρα δεν προλαβαίνει να διασπαστεί μέσα στην ατμόσφαιρα.

Επίσης η απώλεια ενέργειας για ένα φορτισμένο σωματίδιο που διασχίζει την ατμόσφαιρα είναι περίπου 2GeV με συνέπεια ένα μίονιο μικρής ενέργειας, που δημιουργήθηκε ψηλά στην ατμόσφαιρα, δεν μπορεί να φθάσει στη γη.



Εικόνα 2 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. Παρατηρούμε την απώλεια ενέργειας στις χαμηλές ενέργειες, που οφείλεται στην ατμόσφαιρα. Στη δεύτερη περίπτωση διασχίζει πολύ μεγαλύτερο πάχος ατμόσφαιρας.

Η απώλεια ενέργειας στην ατμόσφαιρα είναι κατά προσέγγιση ίση με:

$$\frac{dE}{dx} \approx - \left(1,8 + 0,08 \ln \left(\frac{E_\mu}{\mu} \right) \right)$$

προσεγγιστικά χρησιμοποιούμε τον τύπο:

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

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 . (Μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία).

Η απώλεια ενέργειας λόγω της διαδρομής στην ατμόσφαιρα φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα (). Μετρήσεις με τα μαύρα σημεία αντιστοιχούν σε κατακόρυφα ($\theta=0^\circ$) μόνια ενώ τα ανοικτά σημεία σε γωνία $\theta=75^\circ$. Φαίνεται η απορρόφηση των μυνίων χαμηλής ορμής.

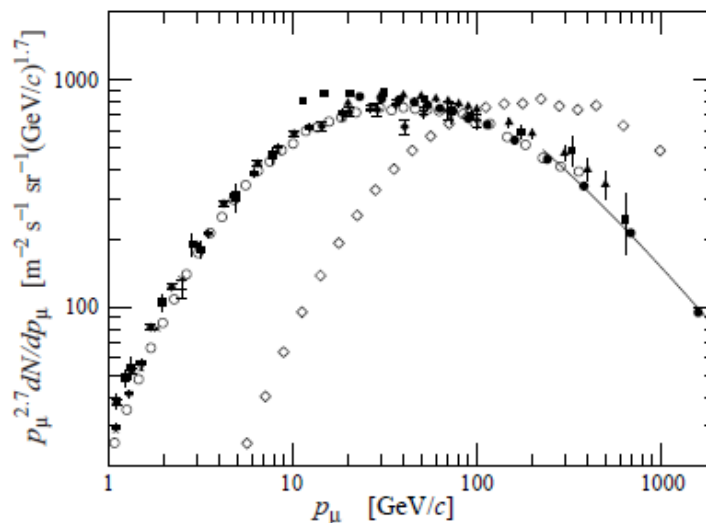


Figure 26.4: Spectrum of muons at $\theta = 0^\circ$ ($\blacklozenge$ [41], $\blacksquare$ [46], $\blacktriangledown$ [47], $\blacktriangle$ [48], $\times$, $+$ [43], $\circ$ [44], and $\bullet$ [45] and $\theta = 75^\circ$ $\diamond$ [49]). The line plots the result from Eq. (26.4) for vertical showers.

Εικόνα 3 Φάσμα μυνίων σε γωνία $\theta=0^\circ$ και $\theta=75^\circ$

:

Η παραγωγή μυνίων εξαρτάται από τη διάσπαση των πιονίων, καονίων. Όμως ένα σημαντικό ποσοστό θα αλληλεπιδράσει στην ατμόσφαιρα πριν διασπαστεί. Η πιθανότητα διάσπασης ελαττώνεται, λόγω του παράγοντα Lorentz, όσο αυξάνεται η ενέργεια. Η πιθανότητα αλληλεπίδρασης είναι περίπου σταθερή (το μήκος αντίδρασης είναι περίπου 120 gr/cm^2).

Φορτίο.

Ο λόγος των θετικών μυνίων προς τα αρνητικά, μ^+/μ^- , είναι περίπου ίσος με 1,25 δηλαδή τα παραγόμενα θετικά μόνια 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 $p+n \rightarrow \pi^+ + \dots$. Στις υψηλότερες ενέργειες αυξάνει λόγω της συνεισφοράς των K_L .

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

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

Συνεισφορά από K_L : $K_L \rightarrow \pi^{\pm} e^{\pm} \nu_e (\bar{\nu}_e)$ 38.7%

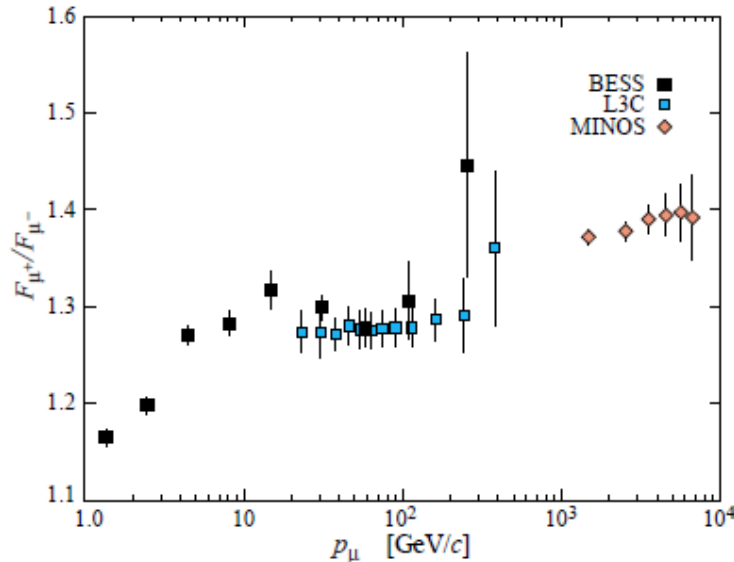


Figure 26.5: Muon charge ratio as a function of the muon momentum from Refs. [44,45,51].

Εικόνα 4 Λόγος θετικών προς αρνητικά μίονια.

Ο λόγος θετικών προς αρνητικά μίονια αντιστοιχεί στο λόγο π^- και K^- προς π^+ και K^+ θετικά κατά την παραγωγή καθώς και το μικρό ποσοστό νετρονίων στο αρχικό φάσμα. Η αύξηση του λόγου σε ορμή πάνω από 1 TeV οφείλεται στην παραγωγή ($p \rightarrow \Lambda + K^+$)

Τα μίονια πολύ υψηλής ενέργειας προέρχονται από την διάσπαση των φορτισμένων πιονίων κατά την πρώτη αντίδραση του πρωτεύοντος. Μεταφέρουν σημαντικό κομμάτι της ενέργειας του πρωτεύοντος και η μορφή του φάσματος είναι ίδια με την μορφή του φάσματος των πρωτευόντων.

Απώλειες Ενέργειας

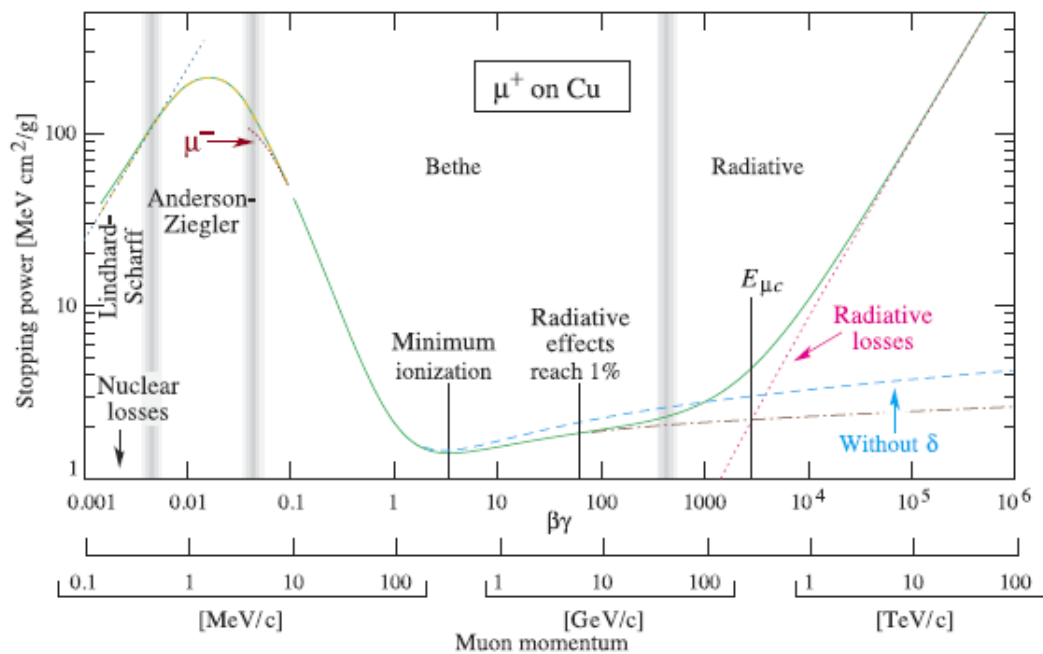
Τα μίονια χάνουν ενέργεια στην ατμόσφαιρα, λόγω ιονισμού, περίπου 1,8 MeV / g/cm² ενώ σε υψηλότερες ενέργειες χάνουν λόγω ακτινοβολίας, με τους μηχανισμούς της ακτινοβολίας πέδης, απευθείας δίδυμης γέννησης και δημιουργίας αδρονίων μέσω φανταστικού φωτονίου. Στις πολύ υψηλές ενέργειες, σημαντικότερος μηχανισμός 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.

Συγκρίνοντας την ακτινοβολία του μιονίου με του ηλεκτρονίου, είναι μικρότερη κατά τον λόγο του τετραγώνου των μαζών (m_e^2/m_{μ}^2) δηλαδή περίπου 1/4000 μικρότερη.

Στην ατμόσφαιρα βασικός μηχανισμός είναι η απώλεια λόγω ιονισμού.

Ένα μόνιο με ενέργεια 1 GeV που παράγεται σε ύψους 15km, θα διασπαστεί πριν φθάσει στην επιφάνεια της θάλασσας. Στο φάσμα των μιονίων υπάρχουν όμως μόνια μικρής ενέργειας που έχουν παραχθεί σε μικρότερα ύψη. Ένα μόνιο με ενέργεια 6 GeV έχει μήκος διάσπασης 24 km και μπορεί να φθάσει στην επιφάνεια της θάλασσας.

Τα μόνια επειδή δεν αλληλεπιδρούν ισχυρά και έχουν μικρές απώλειες ενέργειας, μπορούν να διεισδύσουν σε μεγάλο βάθος στο έδαφος ή το νερό. Μια κατηγορία πειραμάτων, μελετά τη ροή των μιονίων σε ορυχεία ή με υποθαλάσσιους ανιχνευτές.



Εικόνα 5 Απώλειες $-dE/dX$ για θετικά μόνια 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

Μιόνια σε μεγάλο βάθος.

Η ενέργεια που χάνεται είναι σχετικά μικρή και έτσι διεισδύουν βαθιά στο έδαφος.. Τα χαρακτηριστικά των μιονίων είναι η διεισδυτική τους ικανότητα και το μικρό φορτίο που αφήνουν στον ανιχνευτή. Μετά από μερικά μέτρα εδάφους έχουν απορροφηθεί τα περισσότερα αδρόνια και τα σωματίδια που ανιχνεύουμε είναι κυρίως μόνια.

Άλλη αντίδραση παραγωγής μιονίων είναι η αντίδραση νετρίνων με τους πυρήνες : Το ποσοστό είναι πολύ μικρό λόγω της μικρής ενεργού διατομής των νετρίνων. Σε μεγάλο βάθος όταν τα ατμοσφαιρικά μόνια έχουν απορροφηθεί παρατηρούμε μια ροή μιονίων που προέρχονται από τις αντιδράσεις νετρίνων.

Στο διαγραμμα σχ βλέπουμε την ροή των μιονίων σαν συνάρτηση του βάθους. Την ενέργεια την υπολογίζουμε από το πάχος του πετρώματος που διασχίζουν σε διαφορετικές γωνίες γωνίας πρόσπτωσης. Για να έχουμε ένα κοινό μέτρο σύγκρισης ανάμεσα στα πειράματα στο έδαφος και τα πειράματα στη θάλασσα, μετατρέπουμε το

βάθος σε ισοδύναμα χιλιόμετρα νερού (km.w.e.). Τα πετρώματα κατά μέσον όρο έχουν πυκνότητα $2,65 \text{ g/cm}^3$. δηλαδή όλη η ατμόσφαιρα αντιστοιχεί σε πάχος $<4 \text{ m}$ πετρώματος.

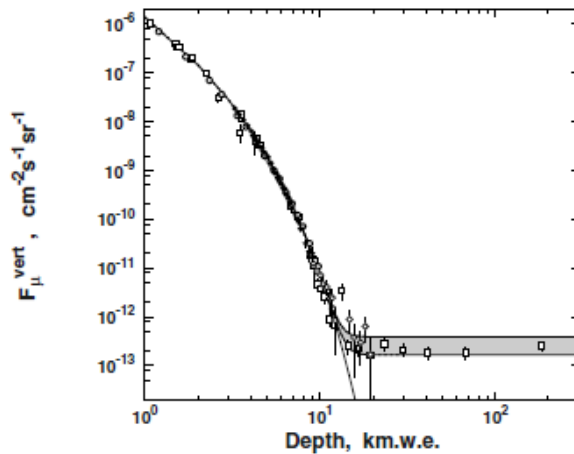


Fig. 7.1. Depth-intensity relation – the integral muon flux measured at different depths and angles and converted to vertical muon flux is compared to predictions. See text for the references to different data sets.

Εικόνα 6 Ολοκληρωτική ροή μιονίων, μετρημένη σε διαφορετικά βάθη και γωνίες και μετατραπείσα σε κατακόρυφη ροή

«Γρήγορα» μίονια.

Τα μίονια πολύ υψηλής ενέργειας προέρχονται από την διάσπαση των φορτισμένων πιονίων κατά την πρώτη αντίδραση του πρωτεύοντος. Μεταφέρουν σημαντικό κομμάτι της ενέργειας του πρωτεύοντος και η μορφή του φάσματος είναι ίδια με την μορφή του φάσματος των πρωτευόντων.

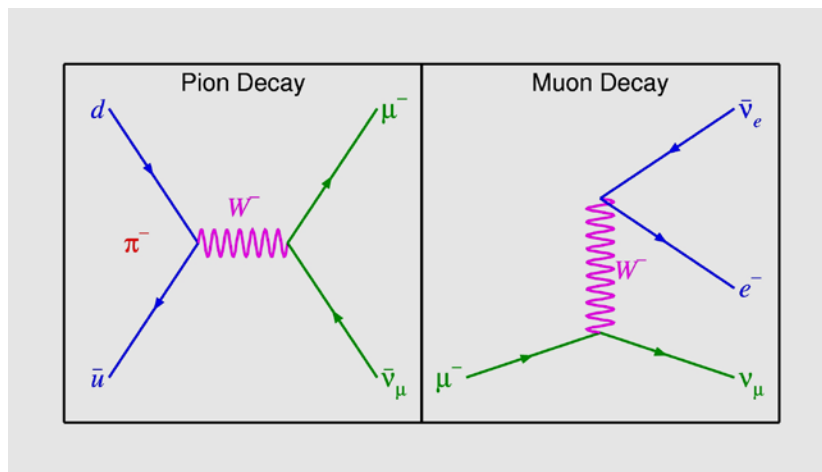
Προέρχονται από τη διάσπαση D^{*+} . Τα D περιέχουν ένα «charmed» κουόρκ, και έχουν πολύ μικρό χρόνο ζωής και διασπώνται πολύ κοντά στο σημείο παραγωγής τους. Η κρίσιμη ενέργεια για τα D είναι $4 \cdot 10^7 \text{ GeV}$ λόγω της μεγάλης μάζας ($\sim 1,87 \text{ GeV}$.) Έτσι D που παράγονται στην πρώτη αντίδραση του πρωτονίου μεταφέρουν μεγάλο μέρος της ορμής του πρωτογενούς. Διακρίνονται στη ροή των μιονίων κοντά στον ορίζοντα. Το ενεργειακό τους φάσμα ακολουθεί το φάσμα των πρωτογενών (τον φασματικό εκθέτη) και δεν εξαρτάται από τη ζενίθεια γωνία γιατί διασπώνται πριν αντιδράσουν. Σε μεγάλο βάθος στη γη τα συνηθισμένα μύονια απορροφούνται γρήγορα και απόμεινουν τα μίονια από D .

Η ζενιθιακή εξάρτηση δίνεται από τον τύπο $I(>E_\mu) = I_X + I_V \sec\theta$.

Προσθήκη.

Particle name	Particle symbol	Quark content ^[9]	Rest mass (MeV/c ²)	Spin	Mean lifetime (s)
Pion	π^0	$\frac{u\bar{u}-d\bar{d}}{\sqrt{2}}$ ^[a]	134.976	0	8.4×10^{-17}
Pion	$\pi^\pm$	ud, du	139.570	0	2.6033×10^{-8}
muon	$\mu^\pm$		105.658	1/2	2.197×10^{-6}
Kaon	$K^\pm$	us ⁻ , u ⁻ s	493.677	0	1.237×10^{-8}

Εικόνα 1 ιδιότητες σωματιδίων



Εικόνα 7. Διαγράμματα Feynman για την διάσπαση του πιονίου και του μιονίου. Η διαδικασία γίνεται μέσω ασθενούς αλληλεπίδραση

Βιβλιογραφία

T. J. Beringer *et al.* (PDG), PR D86, 010001 (2012).

K. Gaisser, “Cosmic Rays and Particle Physics” Cambridge University Press, 1990.

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