

«Κοσμικά» μίονια:
Από το διάστημα στη Γη

Φώτης Πτωχός
Πανεπιστήμιο Κύπρου

Τι είναι το Μιόνιο?

Το μιόνιο είναι ένα από τα 12 θεμελιώδη σωματίδια του Καθιερωμένου Προτύπου.

Ανακαλύφθηκε το 1936 από τους Anderson και Neddermeyer με τη χρήση ενός θαλάμου νέφωσης που εκτέθηκε σε κοσμικές ακτίνες.

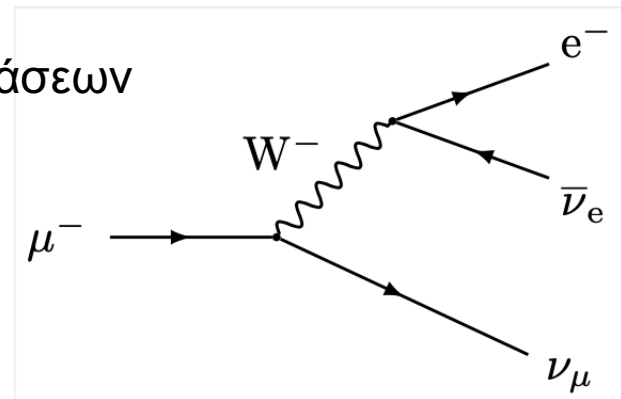
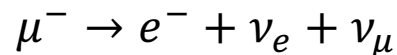
Ανήκει στην οικογένεια των λεπτονίων και είναι η βαρύτερη, ασταθής παραλλαγή των ηλεκτρονίων

Έχει αρνητικό φορτίο, spin 1/2, και μάζα **207 φορές μεγαλύτερη** από τη μάζα του **ηλεκτρονίου**.

Χαρακτηριστικό	Μιόνιο (μ)	Ηλεκτρόνιο (e)	Μονάδες
Μάζα	1.9×10^{-28}	9.1×10^{-31}	kg
Μέσος χρόνος ζωής	2.2×10^{-6}	∞	s
Ηλεκτρικό φορτίο	-1	-1	e
Spin	1/2	1/2	\hbar

Τα μιόνια είναι ασταθή σωματίδια με μέσο χρόνο ζωής 2.2×10^{-6} seconds (2.2 μ s)

Διασπώνται μέσω των ασθενών αλληλεπιδράσεων σε ένα ηλεκτρόνιο και δύο νετρίνο:



Τι είναι κοσμική ακτινοβολία

- Ο αριθμός των μιονίων που παρατηρούνται στην επιφάνεια της θάλασσας προέρχεται από κοσμικά σωματίδια (κοσμική ακτινοβολία).
- Η κοσμική ακτινοβολία είναι ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια και πυρήνες πολύ υψηλής ενέργειας που βομβαρδίζουν συνεχώς τα υψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας (πολύ μεγάλο υψόμετρο).
- Συνήθως η κοσμική ακτινοβολία αποτελείται από **πρωτόνια** (90%), **πυρήνες ηλίου** (8%), **ηλεκτρόνια** (1%) και **άλλοι πυρήνες** (Λίθιο, Βυρήλιο, Βόριο...) (<1%)
 - Τα σωματίδια αυτά προέρχονται από φαινόμενα που συμβαίνουν στον γαλαξία μας ή έξω από αυτόν, όπως πυρηνικές διασπάσεις στον ήλιο, μελανές οπές, περιστρεφόμενοι αστέρες νετρονίων, εκρήξεις supernova.
- Η αλληλεπίδραση των κοσμικών σωματιδίων με τα μόρια της ατμόσφαιρας της Γης δημιουργεί δευτερογενή ακτινοβολία, αποτελούμενη από: πρωτόνια (p), νετρόνια (n), πιόνια (π^{\pm}, π^0), καόνια (K^{\pm}, K^0), ηλεκτρόνια (e^{\pm}) και φωτόνια (γ).
- Τα σωματίδια αυτά με τη σειρά τους αλληλεπιδρούν συνεχώς με τα μόρια της ατμόσφαιρας μέσω ασθενών και ηλεκτρομαγνητικών αλληλεπιδράσεων και δημιουργού μια καταιγίδα σωματιδίων.

Τι είναι τα κοσμικά μίονια?

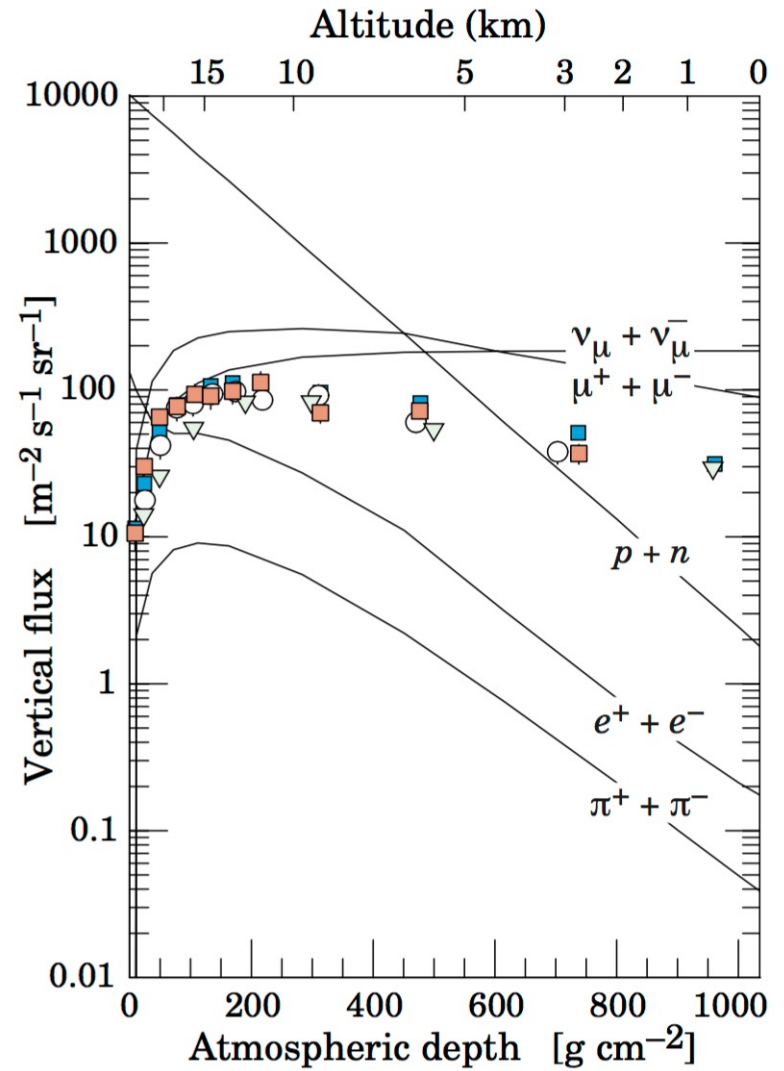
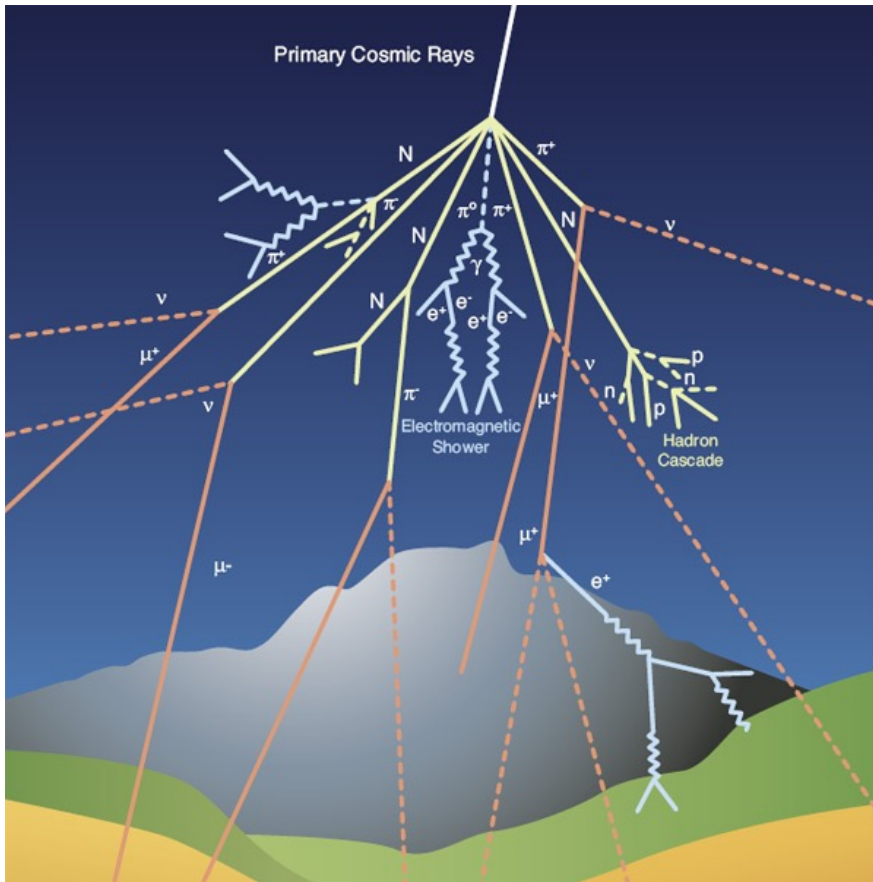
- Η καταιγίδα αυτή των σωματιδίων κινείται διαμέσως της ατμόσφαιρας της γης και φθάνει στην επιφάνεια της και αρκετές φορές την διεισδύει. Στην επιφάνεια της θάλασσας, η καταιγίδα αποτελείται από μίονια.
- Αυτά τα κοσμικά μίονια παράγονται σε μεγάλο υψόμετρο στην ατμόσφαιρα, συνήθως 15km, από διασπάσεις άλλων σωματιδίων όπως οι παρακάτω:



- Τα κοσμικά μίονια κινούνται με ταχύτητα πολύ κοντά στην ταχύτητα του φωτός ($v \sim c$), περνώντας την ατμόσφαιρα και παράλληλα ionίζουν μόρια του αέρα εξαιτίας της αλληλεπίδρασης των ηλεκτρικών πεδίων των φορτίων
- Η απώλεια Ενέργειας, είναι αρκετά μικρή, επιτρέποντάς τα να φθάσουν στην επιφάνεια της γης.
- Η μέση ροή κοσμικών μιονίων ένα μίονιο ανά λεπτό ανά τετραγωνικό εκατοστό.

1muon /min/cm²

Τι είναι κοσμικά μίονια?



Τι είναι ο θάλαμος νέφωσης

- Ο θάλαμος νέφωσης είναι μια συσκευή που οπτικοποιεί το ίχνος ενός φορτισμένου σωματιδίου καθώς διαπερνά τη διάταξη.
- Όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο εισέλθει στον θάλαμο, ιονίζει τα μόρια του αέρα, δημιουργώντας λεπτές γραμμές συμπύκνωσης εξαιτίας της συμπύκνωσης των ατμών αλκοόλης που βρόισκεται σε υπέρκορη κατάσταση.



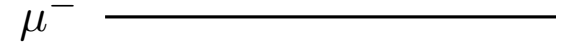
- Το φαινόμενο μοιάζει με τη δημιουργία των γραμμών που αφήνουν καθώς κινούνται τα αεροπλάνα.

Τι βλέπουμε σε έναν θάλαμο νέφωσης

Συνηθισμένα σχήματα ιχνών από κοσμικές ακτίνες που παρατηρούνται σε έναν θάλαμο είναι:

1. Μακριές, λεπτές και σχετικά ευθύγραμμες τροχιές:

Κοσμικά μίονια υψηλής ενέργειας



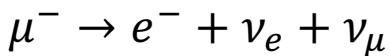
2. Κοντές, παχιές, έντονες τροχιές:

Αλφα σωματίδια που προκαλούν εκτεταμένο ιονισμό

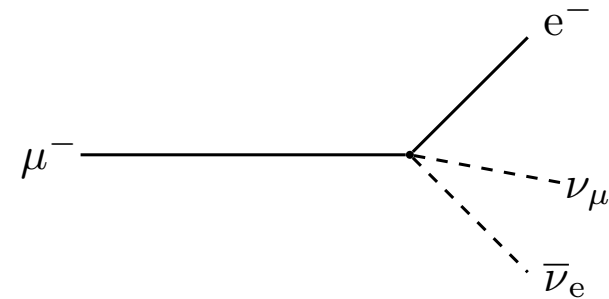


3. Μακριές, λεπτές, ευθύγραμμες τροχιές που ξαφνικά αλλάζουν διεύθυνση:

Διασπάσεις μιονίου σε ηλεκτρόνιο και νευτρίνα

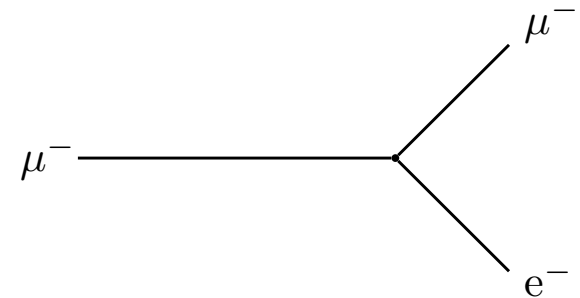


Τα νευτρίνα δεν ανιχνεύονται



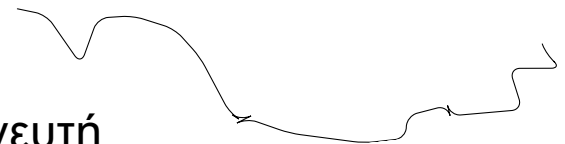
4. Τρεις τροχιές να συγκλίνουν σε ένα σημείο:

Ένα κοσμικό μίονιο συγκρούεται με ατομικό ηλεκτρόνιο και το απελευθερώνει. Τα προϊόντα της σκέδασης περιλαμβάνουν το ηλεκτρόνιο και το μίονιο



5. Zigzag τροχιές:

Ένα κοσμικό μίονιο χαμηλής ενέργειας συγκρούεται πολλές φορές με διάφορα άτομα στον όγκο του ανιχνευτή



Πώς φθάνουν τα μίονια στο έδαφος?

Θεωρήστε ότι ένα μίονιο παράγεται σε ύψος 10 km από τη διάσπαση $\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu_\mu$ και κινείται προς το έδαφος με ταχύτητα $v = 0.9999c$

➤ Θα προλάβει το μίονιο να φθάσει στη γη πριν διασπαστεί ?

Από κλασική άποψη, το μίονιο πριν διασπαστεί θα διανύσει απόσταση:

$$\Delta x = v\Delta t = 0.9999c \times 2\mu s = 600m$$

Αλλά $600\text{ m} \ll 10\text{ km}$, επομένως το μίονιο δεν θα φθάσει στο έδαφος

➤ Ωστόσο, παρατηρούμε μίονια που φθάνουν στη Γη. Πώς είναι δυνατόν?

Η θεωρία της Ειδικής Σχετικότητας του Einstein δίνει την απάντηση, με βάση δύο αξιώματα:

1. Η ταχύτητα του φωτός είναι η ίδια για όλους τους αδρανειακούς παρατηρητές, ανεξάρτητα της σχετικής τους ταχύτητας.
2. Οι νόμοι της φυσικής είναι αμετάβλητοι για όλα τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς.

➤ Επακόλουθα των δύο αξιωμάτων

Διαστολή του χρόνου: Ένας ακίνητος παρατηρητής βλέπει το ρολόι ενός κινούμενου παρατηρητή να καθυστερεί σε σχέση με το δικό του ρολόι.

Συστολή του μήκους: Οι διαστάσεις των αντικειμένων συστέλλονται κατά μήκος της διεύθυνσης κίνησης όπως μετρούνται από έναν ακίνητο σχετικά παρατηρητή.

Σύστημα αναφοράς του μιονίου

Το πάχος της ατμόσφαιρας αναφέρεται στο πάχος όπως μετρείται από παρατηρητή που βρίσκεται στην επιφάνεια της γης.

Ο χρόνος ζωής του μιονίου είναι ο χρόνος που μετρείται στο σύστημα αναφοράς του μιονίου (παρατηρητής ακίνητος πάνω στο μίονιο).

Σε αυτό το σύστημα αναφοράς, υποθέτουμε ότι το μίονιο είναι ακίνητο και ότι η γη πλησιάζει το μίονιο με ταχύτητα $v = 0.9999c$

Επομένως, η γη κινείται προς το μίονιο καλύπτοντας απόσταση $\Delta x = 600m$ πριν το μίονιο διασπαστεί

➤ **Ποιο είναι το πάχος της ατμόσφαιρας της γης που «βλέπει» το μίονιο?**

Εξαιτίας της συστολής του μήκους, η απόσταση που μετρείται από παρατηρητή στο σύστημα αναφοράς του μιονίου, ελαττώνεται κατά έναν παράγοντα:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = 70.7$$

Δηλαδή, το μίονιο βλέπει το πάχος της ατμόσφαιρας ελαττωμένο κατά 70.7 φορές.

Επομένως, σύμφωνα με το μίονιο, η ατμόσφαιρα έχει πάχος:

$$\Delta x = \frac{\Delta x_0}{\gamma} = \frac{10000m}{70.7} = 141m < 600m$$

Σύστημα αναφοράς της γης

Ας θεωρήσουμε τα μίονια ως ρολόγια στο σύστημα αναφοράς τους.

Τη χρονική στιγμή $t = 0$, παράγεται ένα μίονιο και τη χρονική στιγμή $t = \tau$ (μέσος χρόνος ζωής) το μίονιο διασπάται

Για παρατηρητή στο σύστημα αναφοράς του μιονίου, τα δύο γεγονότα λαμβάνουν χώρα στην ίδια τοποθεσία, γιατί το μίονιο είναι ακίνητο στο σύστημα αναφοράς του.

Για ακίνητο παρατηρητή στη γη, το χρονικό διάστημα ανάμεσα στα δύο αυτά γεγονότα μετριέται ότι είναι

$$\Delta t = \gamma \Delta t_0 = \gamma \tau$$

$$\Delta t = 70.7 \times 2.2 \mu s = 141.4 \mu s$$

Ο χρόνος ζωής του μιονίου είναι μεγαλύτερος κατά 70.7 φορές του χρόνου ζωής του στο δικό του σύστημα αναφοράς

Για παρατηρητή στη γη, το μίονιο μπορεί να διανύσει απόσταση:

$$\Delta x = v \Delta t = 0.9999c \times \gamma \times 2 \mu s = 600m \times 70.7 = 42km > 10000m$$

Άρα το μίονιο φθάνει στη γη!

Και οι δύο παρατηρητές (στο μίονιο και στη γη) παρατηρούν το ίδιο φαινόμενο.

Τα μίονια φθάνουν στη γη πριν διασπαστούν και οι νόμοι της φυσικής παραμένουν αμετάβλητοι