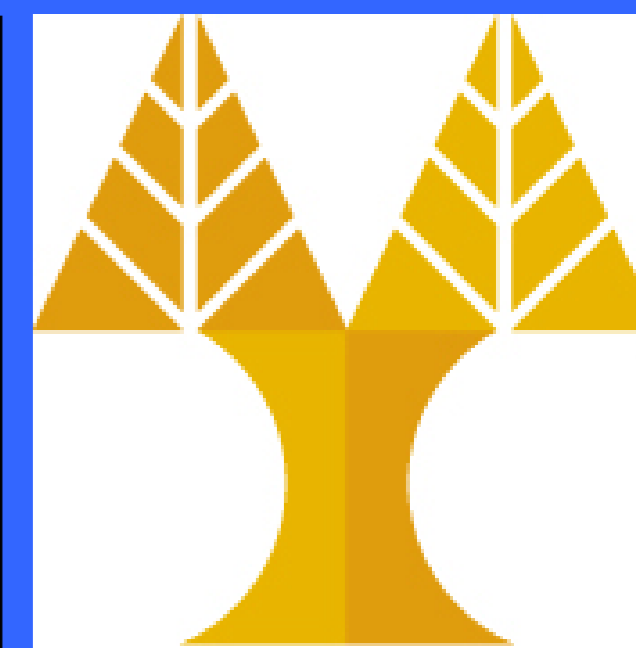


Κοσμικά Μιόνια Από το Διάστημα στο Έδαφος

Α. Απίκης¹, Φ. Πτωχός¹

¹Πανεπιστήμιο Κύπρου, Λευκωσία, Κύπρος



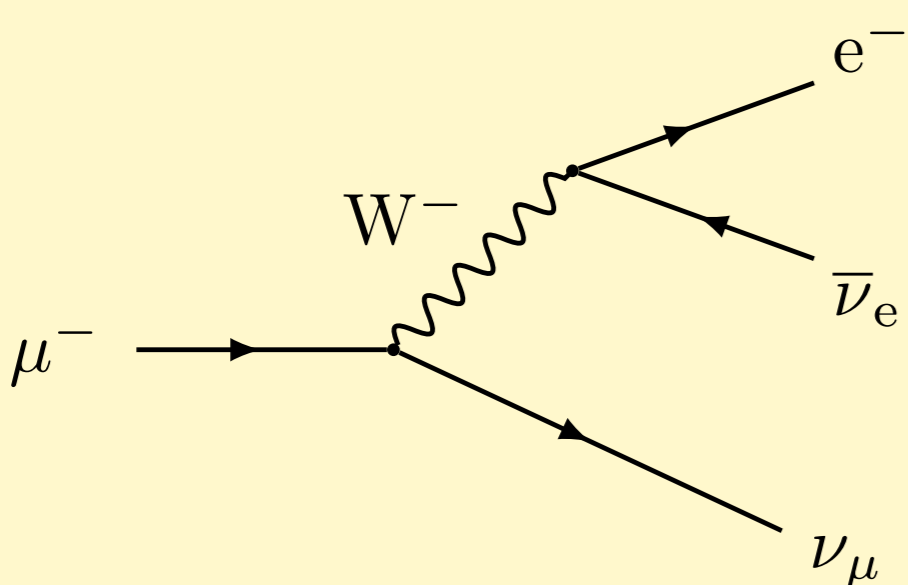
Τι είναι το μίονιο;

Το μίονιο αποτελεί ένα από τα 12 στοιχειώδη σωματίδια του Καθιερωμένου Πρωτύπου. Ανακαλύφθηκε το 1936 από τους Anderson και Neddermeyer με ένα θάλαμο νέφωσης εκτεθειμένο σε κοσμικές ακτίνες. Ανήκει στην οικογένεια των λεπτονίων και είναι μία βαρύτερη και ασταθής παραλλαγή του ηλεκτρονίου. Έχει αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο, ιδιοστροφορμή 1/2, και μάζα 207 φορές μεγαλύτερη από αυτήν του ηλεκτρονίου.

Πίνακας: Ιδιότητες των μιονίων και ηλεκτρονίων.

	Μίονιο (μ)	Ηλεκτρόνιο (e)	Μονάδες
Αναλλοίωτη Μάζα	1.9×10^{-28}	9.1×10^{-31}	kg
Μέσος Χρόνος Ζωής	2.20×10^{-6}	∞	s
Ηλεκτρικό Φορτίο	-1	-1	e
Ιδιοστροφορμή	1/2	1/2	\hbar

Τα μιόνια είναι ασταθή σωματίδια με μέση διάρκεια ζωής 2.2×10^{-6} δευτερόλεπτα (2.2 μ s). Η διάσπαση τους στο κενό γίνεται κατά κύριο λόγο μέσω της Ασθενούς Αλληλεπίδρασης σε ένα ηλεκτρόνιο και δύο νετρίνο, με την αντίδραση $\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$.



Εικόνα: Διάσπαση του μιονίου σε ένα ηλεκτρόνιο και δύο νετρίνο.

Τι είναι η κοσμική ακτινοβολία;

Ο αριθμός των μιονίων που παρατηρείται στο επίπεδο της θάλασσας προέρχεται κατά κύριο λόγο από τις κοσμικές ακτίνες. Η κοσμική ακτινοβολία περιλαμβάνει ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια και πυρήνες υψηλών ενεργειών που βομβαρδίζουν συνεχώς τα υψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Η ένταση αυτής της ακτινοβολίας αυξάνεται με το υψόμετρο, απόδειξη ότι προέρχεται από το διάστημα.

Κατά συντριπτικό ποσοστό η ακτινοβολία αποτελείται από πρωτόνια και πυρήνες ηλίου και προέρχεται από φαινόμενα εντός και εκτός του γαλαξία μας, όπως πυρηνικές αντιδράσεις στον ήλιο, μαύρες τρύπες, περιστροφόμενα αστέρια νετρονίου και εκρήξεις υπερκαινοφανών αστέρων (σούπερνόβα).

Πίνακας: Σύνθεση της κοσμικής ακτινοβολίας.

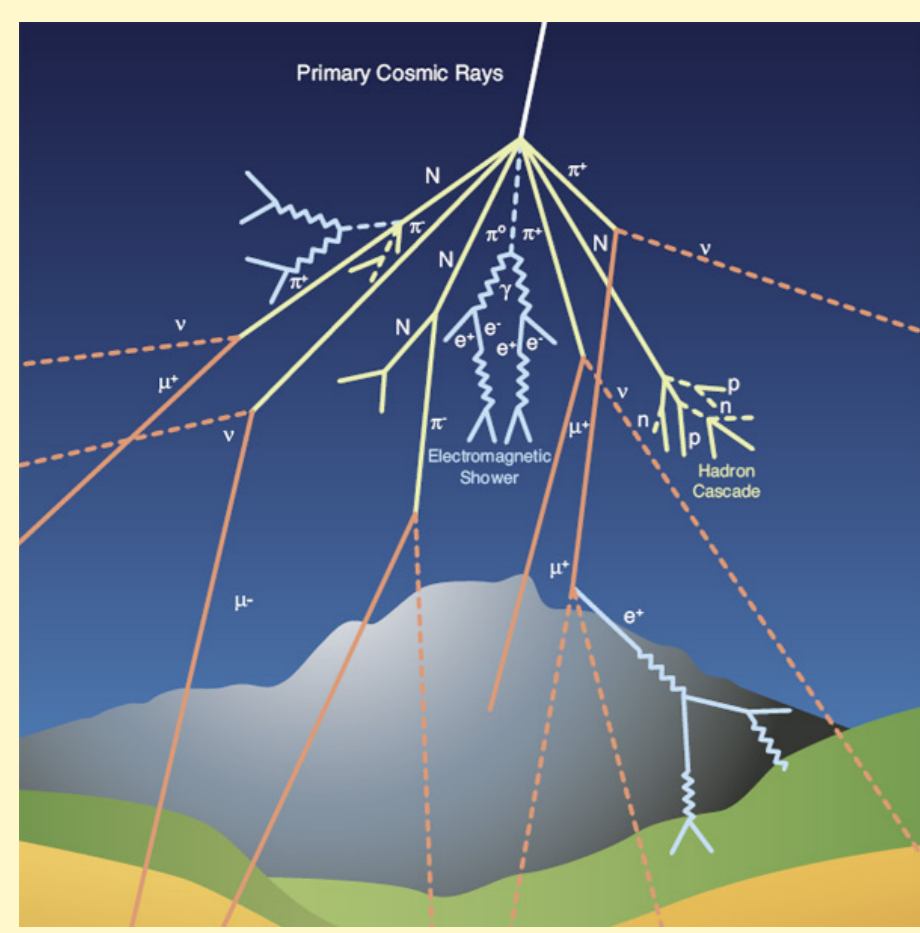
Πηγή	Ποσοστό (%)
Πρωτόνια	90
Πυρήνες ηλίου	8
Ηλεκτρόνια	1
Άλλα (λίθιο, βηρύλλιο, βόριο, ...)	< 1

Η αλληλεπίδραση των κοσμικών ακτίνων με τα μόρια του αέρα στα ψηλά στρώματα της ατμόσφαιρας της Γης, παράγει δευτερεύουσα ακτινοβολία που αποτελείται από πρωτόνια (p), νετρόνια (n), πόνια (π^0, π^\pm), καόνια (K^0, K^\pm), ηλεκτρόνια (e^\pm) και φωτόνια. Αυτά τα σωματίδια αλληλεπιδρούν μέσω Ηλεκτρομαγνητικών και Ασθενών Δυνάμεων με πυρήνες των ατόμων της ατμόσφαιρας, σε μία συνεχιζόμενη διαδικασία που παίρνει την μορφή καταγίδας σωματιδίων.

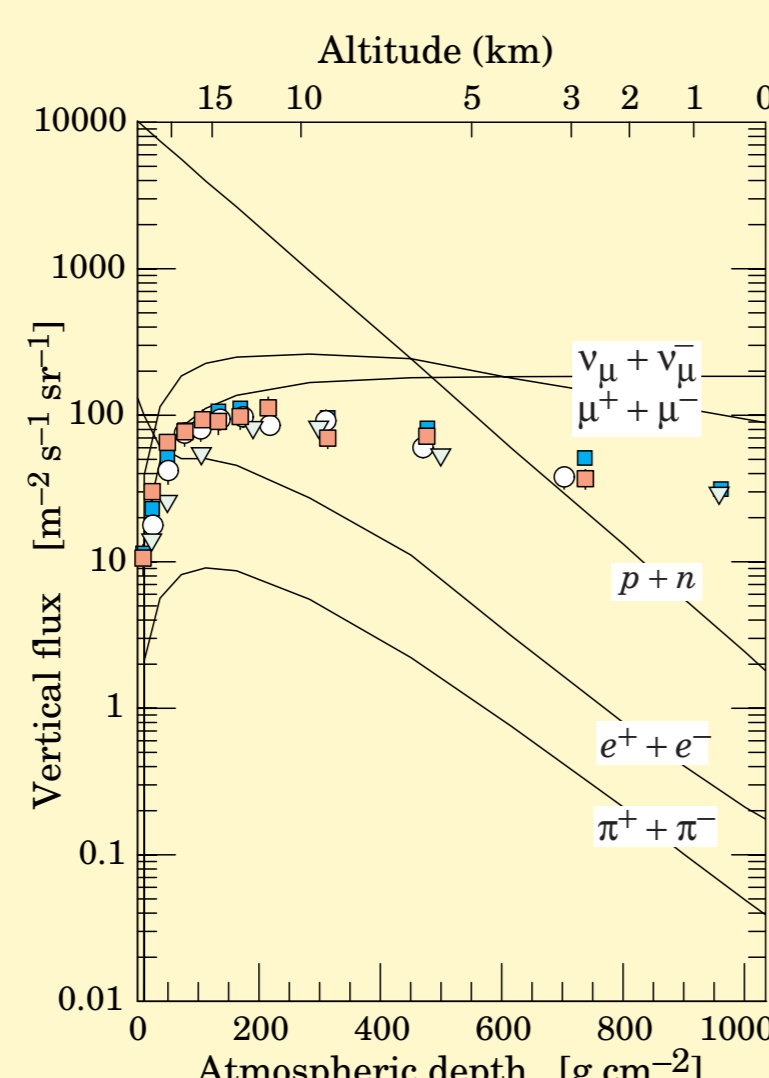
Τι είναι το κοσμικό μίονιο;

Αυτή η καταγίδα σωματιδίων, καθώς ταξιδεύει μέσα στην ατμόσφαιρα της Γης, μπορεί όχι μόνο να φτάσει στην επιφάνεια της αλλά και να τη διαπεράσει. Στο επίπεδο της θάλασσας η καταγίδα αυτή περιέχει κυρίως μιόνια. Τα μιόνια αυτά, που τα χαρακτηρίζουμε ως κοσμικά, παράγονται ψηλά στην ατμόσφαιρα, τυπικά στα 15 χιλιόμετρα περίπου, μέσω των διασπάσεων $\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$ και $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$.

Τα κοσμικά μιόνια ταξιδεύουν με ταχύτητα κοντά στη ταχύτητα του φωτός ($v \approx c$), διαπερνούν την ατμόσφαιρα και αλληλεπιδρούν με τα ηλεκτρικά πεδία των μορίων του αέρα ιονίζοντας τα. Η απώλεια ενέργειας είναι σχετικά μικρή και έτσι μπορούν να φτάσουν στην επιφάνεια της Γης. Η μέση ροή των κοσμικών μιονίων είναι 1 μίονιο ανά λεπτό ανά τετραγωνικό εκατοστό ($1 \text{ min}^{-1} \text{ cm}^{-2}$).



Εικόνα: Δημιουργία καταγίδας σωματιδίων στην ατμόσφαιρα (αριστερά) και κάθετες ροές κοσμικών ακτίνων στην ατμόσφαιρα με ενέργεια > 1GeV (δεξιά).



Τι είναι ο θάλαμος νέφωσης;

Ο θάλαμος νέφωσης είναι μία συσκευή που κάνει ορατές τις τροχιές ηλεκτρικά φορτισμένων σωματιδίων όταν την διαπερνούν. Όταν ένα τέτοιο σωματίδιο εισέρχεται στον θάλαμο νέφωσης ιονίζει τα μόρια του αέρα, δημιουργώντας λεπτές τροχιές υγραποίησης, λόγω συμπίκνωσης ατόμων υπέρκορης αλκοόλης. Αυτό το φαινόμενο είναι παρόμοιο με τη δημιουργία τροχιών συμπίκνωσης στον ουρανό πίσω από αεροπλάνα.



Εικόνα: Τροχιές συμπίκνωσης από κοσμικές ακτίνες σε θάλαμο νέφωσης (αριστερά) και τροχιές συμπίκνωσης από αεροπλάνα στον αέρα (δεξιά).

Ο θάλαμος νέφωσης αποτελείται από ένα διάφανο κουτί το οποίο κάθεται πάνω σε ένα στρώμα ξηρού πάγου (διοξειδίο του άνθρακα σε στερεά μορφή) που βρίσκεται σε θερμοκρασία -78.5°C . Αυτό δημιουργεί μία βαθμίδα θερμοκρασίας μεταξύ της κορυφής του θαλάμου που βρίσκεται σε θερμοκρασία δωματίου και το κάτω μέρος στους -78.5°C .

Το απορροφητικό ύφασμα στο πάνω μέρος του θαλάμου είναι εμποτισμένο με αλκοόλ (αιθανόλη). Η αιθανόλη βρίσκεται σε θερμοκρασία δωματίου και εξατμίζεται δημιουργώντας ατμούς. Οι ατμοί αιθανόλης ψύχονται από το κάτω μέρος του θαλάμου και αρχίζουν να συμπυκνώνονται σχηματίζοντας ένα σύννεφο από σταγονίδια αλκοόλης που πέφτουν προς τον πυθμένα. Ακριβώς πάνω από το σημείο όπου τα σταγονίδια σχηματίζονται υπάρχει μία περιοχή υπέρκορης αιθανόλης. Αυτό σημαίνει πως η θερμοκρασία είναι αρκετά χαμηλή για την ύπαρξη σταγονιδίων, αλλά όχι αρκετά για την αυθόρμητη δημιουργία τους. Αυτή η περιοχή είναι πολύ ευαίσθητη σε σιδήριτες που θα ευνοούσε τη δημιουργία σταγονιδίων αιθανόλης.

Όταν ένα ηλεκτρικά φορτισμένο σωματίδιο υψηλής ενέργειας περνά πάνω από το υπέρκορο στρώμα αιθανόλης συγκρούεται διαδοχικά με μόρια αέρα, αφαιρώντας ηλεκτρόνια και αφήνοντας πίσω του ιόντα. Αυτά δημιουργούν ιδανικές συνθήκες για τη συμπίκνωση των ατμών αιθανόλης που υγραποιείται αφήνοντας πίσω της ένα ορατό ίχνος. Έτσι, είναι δυνατή η ανίχνευση του σωματιδίου μέσω της οπτικοποίησης της τροχιάς του!

Τι βλέπω στο θάλαμο νέφωσης;

Οι τροχιές που παρατηρούμε μέσα στο θάλαμο νέφωσης σχηματίζονται κατά μήκος των διαδρομών κοσμικών ακτίνων. Οι χαρακτηριστικές τροχιές που παρατηρεί κάποιος είναι οι ακόλουθες:

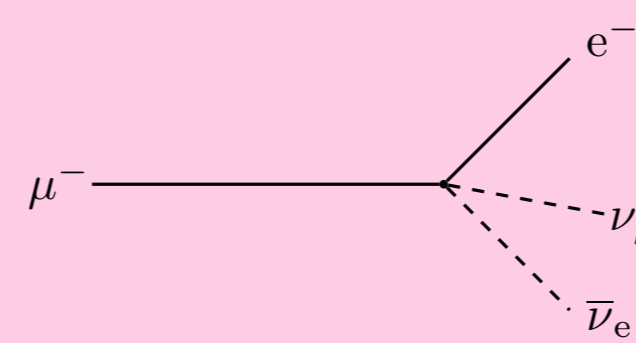
1 Μακριά, λεπτή και σχετικά ευθεία τροχία. Συνήθως προέρχεται από κοσμικό μίονιο υψηλής ενέργειας.



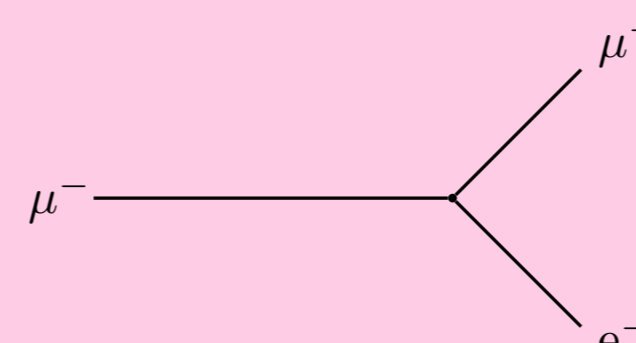
2 Κοντή, φαρδιά και έντονη ευθεία τροχία. Προέρχεται από σωματίδιο άλφα που προκαλεί εκτεταμένο ιονισμό.



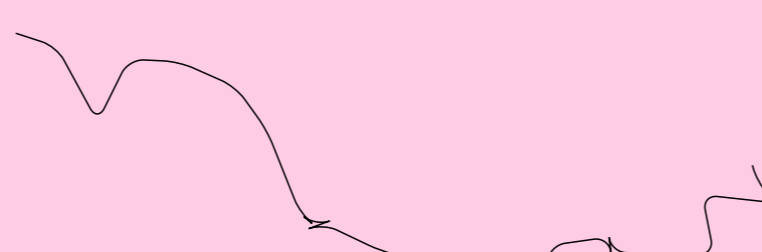
3 Μακριά, λεπτή, ευθεία τροχία που αλλάζει απότομα διεύθυνση. Αυτή είναι μία διάσπαση μιονίου σε ηλεκτρόνιο και νετρίνο $\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$. Δεδομένου πως μόνο φορτισμένα σωματίδια μπορούμε να παρατηρήσουμε, τα νετρίνο περνούν απαρατήρητα.



4 Τρεις τροχιές που συναντιούνται σε ένα σημείο. Η εισερχόμενη τροχία είναι ένα κοσμικό μίονιο που κτυπά ένα ατομικό ηλεκτρόνιο και το ελευθερώνει. Τα προϊόντα της σκέδασης αυτής είναι το εκπεμπόμενο ηλεκτρόνιο και το εκτρεπόμενο κοσμικό μίονιο.



5 Μία τροχία ζγκ-ζαγκ. Αυτή είναι μία κοσμική ακτίνα χαμηλής ενέργειας που συγκρούεται πολλές φορές με διάφορα άτομα στον ενεργό όγκο του ανικνευτή.



Πως φτάνουν τα μιόνια στο έδαφος;

Έστω ότι ένα μίονιο παράχθηκε σε ύψος 10 km από την επιφάνεια της Γης με τη διάσπαση $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ και κινείται προς τη Γη με ταχύτητα $v = 0.9999c$. Θα προλάβει το μίονιο να κτυπήσει το έδαφος πριν διασπαστεί;

Η απόσταση που διανύει το μίονιο είναι:

$$\Delta x = v\Delta t = (0.9999c) \cdot (2 \mu\text{s}) = 600 \text{ m}$$

Εφόσον $600 \text{ m} \ll 10 \text{ km}$ το μίονιο δεν θα φτάσει ποτέ στο έδαφος! Και όμως, βλέπουμε μιόνια να φτάνουν στον θάλαμο νέφωσης! Πως γίνεται αυτό;

Τη λύση μας την δίνει η Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας του Άνισταιν που βασίζεται σε δύο αξιώματα:

- 1 Η ταχύτητα του φωτός είναι η ίδια για όλους τους αδρανειακούς παρατηρητές, ανεξάρτητα από την σχετική τους κίνηση.
- 2 Οι νόμοι της φυσικής είναι αμετάβλητοι σε όλα τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς.

Οι συνέπειες των αξιωμάτων αυτών είναι:

- 1 Διαστολή Χρόνου: Ένας παρατηρητής βλέπει το ρολόι που φοράει ένας κινούμενος παρατηρητής να αργοπορεί σε σχέση με το δικό του.
- 2 Σύσπωση Μήκους: Οι διαστάσεις των αντικειμένων συστέλλονται κατά μήκος της διεύθυνσης κίνησης τους, σύμφωνα με ένα σχετικά ακίνητο παρατηρητή.

Οποιαδήποτε μέτρηση μεγέθους κίνησης, όπως του χώρου και του χρόνου, δεν έχει κανένα νόημα αν δεν ξέρουμε ως προς τι μετριέται. Τόσο ο χρόνος όσο και το μήκος είναι σχετικές ποσότητες!

Σύστημα αναφοράς κοσμικού μιονίου

Το πάχος ατμόσφαιρας αναφέρεται στο πάχος όπως μετριέται στο σύστημα ενός παρατηρητή στη Γη. Αντίθετα, ο χρόνος ζωής του μιονίου αναφέρεται στο χρόνο ζωής όπως τον αντιλαμβάνεται ένας παρατηρητής που κινείται με το μίονιο. Σε αυτό το σύστημα αναφοράς, θεωρούμε ότι αντί να κινείται το μίονιο, το έδαφος πλησιάζει το μίονιο με ταχύτητα $v = 0.9999c$. Έτσι, σε αυτό το χρονικό διάστημα το έδαφος διανύει μια απόσταση:

$$\Delta x = v\Delta t = (0.9999c) \cdot (2 \mu\text{s}) = 600 \text{ m}$$

πριν να διασπαστεί το μίονιο.

Ποιό είναι όμως το πάχος της ατμόσφαιρας που βλέπει το μίονιο; Λόγω του φαινομένου της σύσπωσης μήκους, το μήκος της ατμόσφαιρας όπως μετριέται από παρατηρητή που βρίσκεται στο σύστημα αναφοράς του μιονίου μικραίνει κατά ένα παράγοντα:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (0.9999)^2}} = 70.7$$

Έτσι, το πάχος της ατμόσφαιρας που βλέπει το μίονιο είναι 70.7 φορές πιο μικρό από ότι μετράει ο παρατηρητής στη Γη. Άρα, σύμφωνα με το μίονιο η ατμόσφαιρα φαίνεται να έχει πάχος:

$$\Delta x = \frac{\Delta x_0}{\gamma} = \frac{10 \text{ km}}{70.7} = 141 \text{ m}$$

όπου Δx_0 το μήκος ηρεμίας της απόστασης Γης-μιονίου, όταν αυτό παράχθηκε.

Εφόσον $600 \text{ m} > 141 \text{ m}$, το έδαφος θα φτάσει το μίονιο πριν αυτό διασπαστεί!

Σύστημα αναφοράς παρατηρητή στη Γη

Προσεγγίζουμε τα μιόνια σαν ρολόγια στο σύστημα αναφοράς του μιονίου. Τη χρονική στιγμή $t = 0$ το μίονιο παράγεται και τη χρονική στιγμή $t = \tau$ (μέσος χρόνος ζωής του μιονίου) το μίονιο διασπάται. Τα δύο γεγονότα λαμβάνουν χώρα στο ίδιο σημείο, αφού για ένα παρατηρητή που κινείται με το μίονιο, αυτό παραμένει ακίνητο.

Ένας ακίνητος παρατηρητής στη Γη μετράει τη χρονική απόσταση αυτών των γεγονότων ως:

$$\begin{aligned} \Delta t &= \gamma \Delta t_0 = \gamma \tau \\ \Delta t &= (70.7) \cdot (2 \mu\text{s}) \\ \Delta t &= 141.4 \mu\text{s} \end{aligned}$$

Δηλαδή, ο χρόνος ζωής του μιονίου φαίνεται να είναι 70.7 φορές μεγαλύτερος όταν μετρηθεί από ένα παρατηρητή στη Γη!

Έτσι, ο παρατηρητής στη Γη βλέπει το μίονιο να διανύει μια απόσταση:

$$\begin{aligned} \Delta x &= v\Delta t = (0.9999c) \cdot (141 \times 10^{-6} \text{ s}) \\ \Delta x &= 42296 \text{ m} \\ \Delta x &\approx 42 \text{ km} \end{aligned}$$

πριν αυτό διασπαστεί. Εφόσον $42 \text{ km} > 10 \text{ km}$, το μίονιο θα φτάσει το έδαφος πριν αυτό διασπαστεί!

Βρίσκουμε πως οι δύο παρατηρητές βγάζουν ακριβώς το ίδιο συμπέρασμα: το μίονιο θα φτάσει στην επιφάνεια της Γης πριν διασπαστεί! Οι νόμοι της φυσικής λοιπόν είναι οι ίδιοι για όλους και ανεξάρτητοι από το σύστημα αναφοράς που διαλέγουμε για να λύσουμε ένα πρόβλημα!