

Άσκηση 5: Μέτρηση του χρόνου ζωής $\tau_{1/2}$ του μιονίου

1.1 Εισαγωγή

Το μίονιο λεπτόνιο και είναι ένας από τους θεμελιώδεις δομικούς λίθους της ύλης. Παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με το ηλεκτρόνιο, εκτός από τη μάζα του που είναι περίπου 210 φορές μεγαλύτερη, γεγονός που το καθιστά ασταθές. Ανακαλύφθηκε το 1937 από τους C.W. Anderson και S.H. Neddermayer¹, όταν αυτοί εξέθεσαν έναν θάλαμο Wilson (cloud chamber)² στην κοσμική ακτινοβολία. Πρώτος ο F. Rasetti³ το 1941 έδειξε ότι το μίονιο έχει πεπερασμένο χρόνο ζωής και έδωσε μία πρώτη εκτίμηση του χρόνου αυτού.

Η πειραματική διάταξη που περιγράφεται σε αυτόν τον οδηγό επιτρέπει τη μέτρηση του μέσου χρόνου ζωής μιονίων σε πλαστικό σπινθηριστή και της σχετικής ροής μιονίων, ενώ παρέχει και τη δυνατότητα μίας ποιοτικής διαπίστωσης του φαινομένου της διαστολής του χρόνου όπως αυτό προβλέπεται από την ειδική θεωρία της σχετικότητας.

Σκοπός της άσκησης αυτής είναι η εισαγωγή των φοιτητών στη φυσική μιονίων, η εξοικείωση με την αρχή λειτουργίας του ανιχνευτή και ο πειραματικός προσδιορισμός του μέσου χρόνου ζωής των κοσμικών μιονίων.

1.2 Θεωρία

1.2.1 Η πηγή μιονίων...

Τα ανώτερα στρώματα της γήινης ατμόσφαιρας βομβαρδίζονται συνεχώς από φορτισμένα σωματίδια υψηλής ενέργειας, τη λεγόμενη κοσμική ακτινοβολία (υπερ)υψηλής ενέργειας ((Ultra)High-Energy Cosmic Rays). Τα σωματίδια αυτά παράγονται σε διάφορες πηγές στο σύμπαν μέσω μηχανισμών που δεν είναι ακόμα πλήρως κατανοητοί. Η κοσμική ακτινοβολία απαρτίζεται κατά 98% περίπου από πρωτόνια και σωματίδια-α (περίπου 87% πρωτόνια και 12% σωματίδια-α) και κατά 2% από ηλεκτρόνια, ακτίνες-γ, νετρίνα και βαρύτερους πυρήνες που προέρχονται από πυρηνοσύνθεση στο εσωτερικό άστρων, αν και πρέπει να σημειωθεί ότι οι αναλογίες αυτές μεταβάλλονται με την ενέργεια των σωματιδίων.

Η σύγκρουση της κοσμικής ακτινοβολίας με τους πυρήνες των αερίων της ατμόσφαιρας (κυρίως πυρήνες άζωτου και οξυγόνου) παράγει καταιγισμούς (showers) σωματιδίων που περιλαμβάνουν πρωτόνια, νετρίνα, πόνια (φορτισμένα και ουδέτερα), καόνια, φωτόνια, ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.1.

Αυτά τα δευτερεύοντα σωματίδια υφίστανται διάφορες ηλεκτρομαγνητικές και πυρηνικές αλληλεπιδράσεις που έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή επιπλέον σωματιδίων σε μια διαδικασία καταιγισμού. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα φορτισμένα πόνια που παράγονται. Μερικά από αυτά θα αλληλεπιδράσουν ισχυρά με μόρια της ατμόσφαιρας, αλλά ένα μέρος τους θα διασπαστεί αυθόρμητα μέσω της ασθενούς αλληλεπίδρασης σε ένα μίονιο και ένα (αντι)νεutrino.

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu \quad (1.1)$$

και αντίστοιχα,

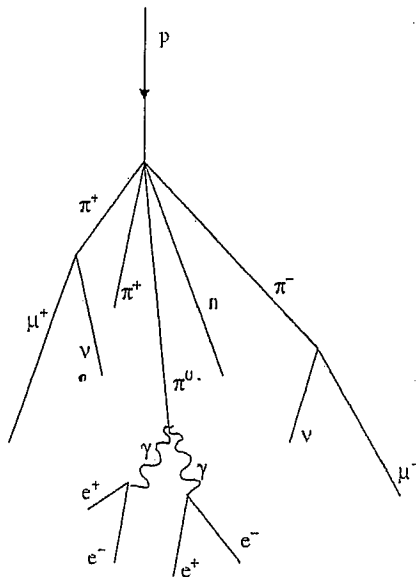
$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu} \quad (1.2)$$

Τα μίονια αυτά είναι και η πηγή μιονίων που θα χρησιμοποιηθεί σε αυτό το πείραμα!

¹S.H. Neddermayer, C.W. Anderson, Phys. Rev. 51, 884
<http://web.ihep.su/dbserve/compas/src/neddermayer37/eng.pdf>

²Ο θάλαμος Wilson των Anderson και Neddermayer:
<http://www.orau.org/PTP/collection/Miscellaneous/cloudchamber.htm>

³F. Rasetti, Phys. Rev. 59, 613
<http://web.ihep.su/dbserve/compas/src/rasetti41/eng.pdf>



Σχήμα 1.1: Καταιγισμός σωματιδίων (shower) από αλληλεπίδραση πρωτονίου κοσμικής ακτινοβολίας με πυρήνα ενός ατμοσφαιρικού μορίου

Τα σωματίδια που παράγονται στην ανώτερη ατμόσφαιρα δε φτάνουν όλα στην επιφάνεια της γης λόγω της αλληλεπίδρασής τους με τους ατμοσφαιρικούς πυρήνες και της αυθόρμητης τους διάσπασης. Η ροή μιονίων στο επίπεδο της θάλασσας είναι περίπου 1 μόνιο ανά λεπτό ανά cm^2 με μέση κινητική ενέργεια περί τα $4GeV$ και αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο μέρος της ροής φορτισμένων σωματιδίων κοντά στην επιφάνεια της Γης.

Η προσεκτική μελέτη του φαινομένου δείχνει ότι το μέσο υψόμετρο παραγωγής των μιονίων που ανιχνεύονται στο επίπεδο της θάλασσας είναι τα $15km$ περίπου. Κινούμενα σχεδόν με την ταχύτητα του φωτός, χάνουν περίπου $2GeV$ κινητικής ενέργειας λόγω ιονισμού μέχρι να φτάσουν στην επιφάνεια της γης μετά από χρόνο περί τα $50 \mu s$. Δεδομένου ότι ο χρόνος ζωής μιονίων σε ηρεμία είναι 20 φορές περίπου μικρότερος, η ανίχνευση ροής μιονίων στην επιφάνεια της γης αποτελεί συνέπεια του φαινομένου της σχετικιστικής διαστολής του χρόνου.

1.2.2 Κατανομή του χρόνου διάσπασης μιονίων

Η μαθηματική περιγραφή του χρόνου διάσπασης των μιονίων είναι απλή. Υποθέτουμε ότι έχουμε $N(t)$ μιονία τη χρονική στιγμή t . Τότε, αν λ είναι η σταθερά διάσπασης των μιονίων, η πιθανότητα να διασπαστεί ένα μόνιο σε μικρό χρόνο dt είναι $\lambda \cdot dt$, με επακόλουθη μείωση του πληθυσμού κατά $dN = -N(t) \cdot \lambda \cdot dt$, ή αλλιώς:

$$\frac{dN}{N(t)} = -\lambda dt \quad (1.3)$$

Ολοκληρώνοντας τη σχέση (1.3) κανείς έχει:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.4)$$

όπου N_0 ο πληθυσμός μιονίων τη χρονική στιγμή $t = 0$. Παρατηρούμε ότι η ανάλυση αυτή ταυτίζεται με την περιγραφή των ραδιενεργών διασπάσεων. Ο μέσος χρόνος ζωής τ των μιονίων ορίζεται ως το αντίστροφο της σταθεράς διάσπασης, δηλαδή $\tau = \frac{1}{\lambda}$.

Για να ανταποκρίνεται, ωστόσο, η περιγραφή αυτή στην ανιχνευτική μας διάταξη πρέπει να λάβουμε υπόψιν το γεγονός ότι εδώ δεν έχουμε έναν δεδομένο πληθυσμό μιονίων περιορισμένο εντός του όγκου του ανιχνευτή,

αλλά ανιχνεύουμε διασπάσεις μιονίων που εισέρχονται στον ανιχνευτή σε τυχαίες χρονικές στιγμές. Αυτό δεν αλλάζει φυσικά το γεγονός ότι ο χρόνος διάσπασης ακολουθεί τον απλό νόμο της εκθετικής μείωσης που περιγράφηκε παραπάνω. Οδηγούμαστε, όμως, στο να θεωρήσουμε ένα νέο μέγεθος, την κατανομή του χρόνου διάσπασης $D(t)$ (decay time distribution), όπου η ποσότητα $D(t) \cdot dt$ εκφράζει τη χρονοεξαρτώμενη πιθανότητα πραγματοποίησης μίας διάσπασης στο χρόνο μεταξύ t και $t + dt$.

Διαφορίζοντας το νόμο της εκθετικής μείωσης (σχέση (1.4)) παίρνουμε:

$$-dN = N_0 \lambda e^{-\lambda t} dt \Rightarrow -\frac{dN}{N_0} = \lambda e^{-\lambda t} dt \quad (1.5)$$

όπου ο λόγος $\frac{dN}{N_0}$ εκφράζει το μέρος του αρχικού πληθυσμού μιονίων N_0 που διασπάται μεταξύ χρόνου t και $t + dt$. Προκύπτει έτσι, σύμφωνα με τα παραπάνω, ότι $D(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}$. Παρατηρούμε ότι η $D(t)$ είναι ανεξάρτητη του αρχικού πληθυσμού μιονίων N_0 καθώς και ότι η κατανομή είναι επίσης εκθετική με τον ίδιο εκθετικό παράγοντα που περιγράφει τον επιζώντα πληθυσμό μιονίων. Όπως και παραπάνω, τον μέσο χρόνο ζωής των μιονίων εκφράζει η ποσότητα $\tau = \frac{1}{\lambda}$.

Σημειώνεται πως το γεγονός ότι τα μίονια των οποίων ανιχνεύουμε τη διάσπαση δεν παράγονται μέσα στον ανιχνευτή, αλλά υψηλότερα στην ατμόσφαιρα, δεν παίζει ρόλο στις μετρήσεις μας, αφού ο χρόνος διάσπασης των μιονίων ακολουθεί εκθετική κατανομή: η μορφή της εκθετικής μείωσης είναι η ίδια ανεξαρτήτως του χρόνου στον οποίο την παρατηρούμε.⁴

1.2.3 Η αρχή λειτουργίας του ανιχνευτή

Ο ενεργός όγκος του ανιχνευτή είναι ένας πλαστικός σπινθηριστής κυλινδρικού σχήματος, διαμέτρου 15 cm και ύψους 12.5 cm τοποθετημένος στον πυθμένα του μαύρου κυλίνδρου ανοδιομένου κράμματος αλουμινίου. Ο πλαστικός σπινθηριστής είναι ένα διαφανές οργανικό υλικό που κατασκευάζεται με ανάμιξη ενός ή περισσότερων φθοριτών με έναν στερεό πλαστικό διαλύτη με δομή αρωματικού δακτυλίου.

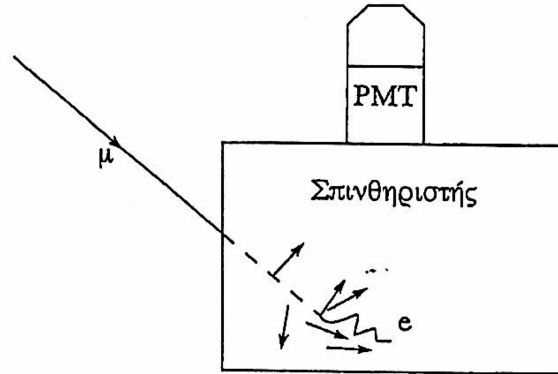
Ένα φορτισμένο σωματίδιο που διέρχεται από τον σπινθηριστή χάνει μέρος της κινητικής του ενέργειας λόγω ιονισμού ή/και διεγέρσης των ατόμων του σπινθηριστή. Μέρος της ενέργειας αυτής μεταφέρεται στα άτομα των φθοριτών, τα ηλεκτρόνια των οποίων διεγείρονται σε υψηλότερες ηλεκτρονιακές στάθμες. Η επακόλουθη αποδιέγερσή τους οδηγεί στην εκπομπή φωτονίων στο μπλε και ιώδες τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος με χαρακτηριστικούς χρόνους αποδιέγερσης των μερικών ns. Τυπική τιμή της απόδοσης ενός πλαστικού σπινθηριστή είναι εκπομπή ενός οπτικού φωτονίου ανά 100 eV αποτιθέμενης ενέργειας.

Για τη μέτρηση του χρόνου ζωής του μιονίου μας ενδιαφέρει να εξετάσουμε μόνο εκείνα τα μίονια που εισέρχονται, επιβραδύνονται, σταματούν και διασπώνται εντός του ανιχνευτή, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.2. Τα μίονια αυτά έχουν κατά την είσοδό τους στον ανιχνευτή κινητική ενέργεια μέχρι περίπου 160 MeV, αφού μίονια με μεγαλύτερη ενέργεια θα διαφύγουν από τον ανιχνευτή πριν εναποθέσουν όλη τους την ενέργεια. Καθώς το μίονιο επιβραδύνεται και σταματά, ο διεγερμένος σπινθηριστής εκπέμπει φωτόνια που ανιχνεύονται από τον φωτοπολλαπλασιαστή (PMT) προκαλώντας ένα λογικό σήμα που εκκινεί ένα χρονόμετρο (βλ. παράγραφο 3.1). Το μίονιο σε ηρεμία διασπάται μετά από ένα μικρό χρόνο σε ένα ηλεκτρόνιο ή ποζιτρόνιο, ένα νεutrino και ένα αντινεutrino (βλ. επόμενη ενότητα). Λόγω της πολύ μικρότερης του μάζας ($m_\mu/m_e \cong 210$), το ηλεκτρόνιο είναι πολύ πιο ενεργητικό και προκαλεί σπινθηρισμούς πρακτικά καθ' όλο το μήκος της διαδρομής του. Φυσικά, μέρος της ενέργειας του μιονίου προσλαμβάνεται από τα (αντι)νεutrino, η ανίχνευση, ωστόσο, των οποίων είναι εντελώς αδύνατη με τον ανιχνευτή αυτόν. Τα φωτόνια που παράγονται από τα ηλεκτρόνια ανιχνεύονται από τον φωτοπολλαπλασιαστή προκαλώντας με τη σειρά τους ένα σήμα που σταματά το χρονόμετρο. Το σύστημα καταγραφής καταχωρεί τις χρονικές διαφορές μεταξύ δύο διαδοχικών

⁴Πιο αυστηρά, αυτή η ιδιότητα της εκθετικής συνάρτησης μπορεί να εκφραστεί ως εξής: ο χρόνος που χρειάζεται ώστε η τιμή της να μειωθεί e -φορές είναι ο ίδιος και ίσος με τ ανεξαρτήτως από το χρονικό διάστημα στο οποίο την μελετάμε. Πράγματι:

$$\frac{N_0}{e} = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \Rightarrow t = 1/\lambda \equiv \tau, \forall t$$

ενεργοποιήσεων και απενεργοποιήσεων του χρονομέτρου που αντιστοιχούν πρακτικά στο χρόνο διάσπασης των αντίστοιχων μιονίων.



Σχήμα 1.2: Η αλληλεπίδραση μιονίου - ανιχνευτή

1.2.4 Αλληλεπίδραση των μιονίων με την ύλη

Είναι προφανές ότι η ανίχνευση των μιονίων προϋποθέτει την αλληλεπίδρασή τους με το υλικό του ενεργού όγκου του ανιχνευτή, κάτι που φυσικά ισχύει για κάθε ανιχνευτικό σύστημα σωματιδίων. Πώς όμως αλληλεπιδρούν τα μίονια με την ύλη;

Τα μίονια χάνουν ενέργεια κυρίως μέσω ηλεκτρομαγνητικών αλληλεπιδράσεων, δηλαδή μέσω ιονισμού, ακτινοβολίας πέδησης (bremsstrahlung), δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου (pair production) και φωτοπυρηνικών αλληλεπιδράσεων. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.3, για ενέργειες κάτω από 100 GeV υπερισχύει ο μηχανισμός απώλειών ενέργειας μέσω ιονισμού. Οι απώλειες αυτές περιγράφονται από τη γνωστή εξίσωση Bethe-Bloch που δίνει για σωματίδιο δεδομένης αρχικής ενέργειας την απώλεια ενέργειας ανά μονάδα μήκους διαδρομής dE/dx εντός δεδομένου υλικού. Από την εξίσωση Bethe-Bloch μπορεί κανείς να εξάγει την εμβέλεια των μιονίων μέσα στο σπινθηριστή ώστε να καταλήξει στη μέγιστη τιμή που δώσαμε παραπάνω για την κινητική ενέργεια των μιονίων που θα εναποθέσουν όλη τους την ενέργεια μέσα στον ανιχνευτή.

Η διάσπαση των μιονίων πραγματοποιείται κυρίως μέσω της ασθενούς αλληλεπίδρασης:



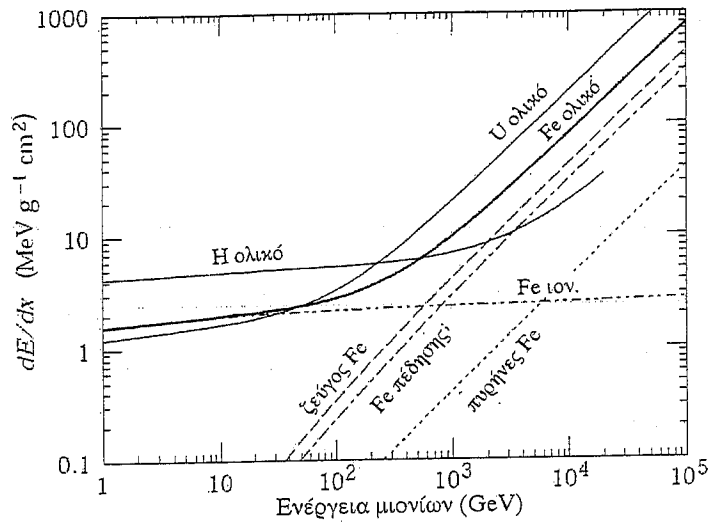
και:



Ενώ, όμως, τα θετικά φορτισμένα μίονια απλώς «περιμένουν» να διασπαστούν από την ώρα που θα σταματήσουν μέσα στον ανιχνευτή, τα αρνητικά μίονια είναι δυνατόν να δεσμευτούν από άτομα του ανιχνευτή και να δημιουργήσουν μιονικά άτομα καταλαμβάνοντας θέση σε κάποια ηλεκτρονιακή στιβάδα.

Η απαγορευτική αρχή του Pauli δεν απαγορεύει την κατάληψη από μίονιο στάθμης ήδη κατειλημμένης από ατομικό ηλεκτρόνιο. Ένα τέτοιο δέσμιο αρνητικό μίονιο έχει λόγω της μεγάλης του μάζας μία ακτίνα Bohr περίπου 200 φορές μικρότερη από αυτήν του ηλεκτρονίου και έτσι, έχοντας φτάσει σε σχετικά σύντομο -ως προς το χρόνο ζωής του- χρόνο στην K-στιβάδα, ενδέχεται να αλληλεπιδράσει ασθενώς με ένα πρωτόνιο του πυρήνα προτού διασπαστεί:





Σχήμα 1.3: Εμβέλεια των μιονίων συναρτήσει της ενέργειας. (Πηγή: Review of Particle Physics, Particle Data Group, <http://pdg.lbl.gov/2008/download/rpp-2008-plB667.pdf>)

Η πιθανότητα ένα μίονιο να βρεθεί εντός του πυρήνα είναι ανάλογη του κύβου του ατομικού αριθμού Z , ενώ η πιθανότητα το μίονιο να συναντήσει ένα πρωτόνιο εντός του πυρήνα είναι ανάλογη του αριθμού των πρωτονίων. Συνολικά, επομένως, η πιθανότητα ένα μίονιο να αλληλεπιδράσει με ένα πρωτόνιο του πυρήνα είναι ανάλογη του Z^4 .

Η ύπαρξη δύο καναλιών (τρόπων) διάσπασης των αρνητικών μιονίων σε αντίθεση με το μοναδικό κανάλι διάσπασης των θετικών έχει ως αποτέλεσμα ο χρόνος ζωής των αρνητικών μιονίων να είναι κατά τι μικρότερος του χρόνου ζωής των θετικών. Η πειραματική μας διάταξη, ωστόσο, δεν είναι σε θέση να κάνει αυτόν το διαχωρισμό και έτσι ο χρόνος ζωής που θα προσδιοριστεί θα αποτελεί έναν μέσο όρο επί του φορτίου και θα είναι μικρότερος από την αποδεκτή τιμή του χρόνου ζωής του μιονίου στο κενό $\tau_\mu = 2.19703 \pm 0.00004$ μs.

1.2.5 Ο λόγος φορτίου μ^+/μ^- στην επιφάνεια της γης

Όπως είδαμε παραπάνω, η μέτρηση του μέσου χρόνου ζωής των μιονίων μέσα στον πλαστικό σπινθηριστή είναι ουσιαστικά η μέτρηση της μέσης τιμής του χρόνου ζωής των θετικά και αρνητικά φορτισμένων μιονίων. Τα μ^- έχουν μέσο χρόνο ζωής λίγο μικρότερο από τα μ^+ λόγω των ασθενών αλληλεπιδράσεων μεταξύ των μ^- και των πρωτονίων των πυρήνων του σπινθηριστή (βλ. παράγραφο 2.5). Η πιθανότητα της αλληλεπίδρασης αυτής είναι ανάλογη του Z^4 , συνεπώς ο μέσος χρόνος ζωής των αρνητικών μιονίων μέσα στον σπινθηριστή (τ^-) πρέπει να είναι περίπου ίσος με τον μέσο χρόνο ζωής τους μέσα σε άνθρακα (βλ. παράγραφο 2.4) ο οποίος έχει μετρηθεί ίσος με $\tau_c = 2.043 \pm 0.003$ μs.⁵

Είναι εύκολο να καθοριστεί ο αναμενόμενος μέσος χρόνος ζωής τ_{obs} των θετικών και αρνητικών μιονίων μέσα στον σπινθηριστή. Έστω λ^- , λ^+ οι σταθερές διάσπασης των αρνητικών και θετικών μιονίων αντίστοιχα, μέσα σε πλαστικό σπινθηριστή. Αν N^- και N^+ είναι αντίστοιχα ο αριθμός των αρνητικών και θετικών μιονίων που προσπίπτουν στον πλαστικό σπινθηριστή στη μονάδα του χρόνου, τότε η μέση σταθερά διάσπασης $\langle \lambda \rangle$ που παρατηρείται δίνεται από τον τύπο:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{N^+ \lambda^+ + N^- \lambda^-}{N^+ + N^-} \quad (1.9)$$

⁵R.A. Reiter et al., Precise Measurements of the Mean Lives of μ^+ and μ^- Mesons in Carbon, Phys. Rev. Lett. 5, 22 - 23 (1960)
http://prola.aps.org/abstract/PRL/v5/i1/p22_1

Θέτοντας στην εξίσωση (1.9) $\rho \equiv N^+/N^-$ εύκολα καταλήγει κανείς ότι ο αντίστοιχος μέσος χρόνος ζωής των μιονίων δίνεται από τον τύπο:

$$\tau_{obs} = (1 + \rho) \cdot \left(\frac{1}{\tau^-} + \frac{\rho}{\tau^+} \right)^{-1} \quad (1.10)$$

όπου $\tau^- \equiv (\lambda^-)^{-1}$ και $\tau^+ \equiv (\lambda^+)^{-1}$ είναι ο μέσος χρόνος ζωής των αρνητικών και θετικών μιονίων αντίστοιχα μέσα στον ανιχνευτή.

Όπως προαναφέρθηκε, μπορεί να θεωρηθεί $\tau^- = \tau_c$ και όσον αφορά στον τ^+ , μπορεί να τεθεί ίσος με τον μέσο χρόνο ζωής των μιονίων στον κενό χώρο, τ_μ , αφού τα θετικά μίονια δε συλλαμβάνονται από τους πυρήνες του σπινθηριστή.

Για να προσδιοριστεί το ρ για το εύρος των ορμών των μιονίων που σταματούν μέσα στον σπινθηριστή, μπορεί να λυθεί ως προς ρ η σχέση (1.10), οπότε θα έχουμε:

$$\rho = -\frac{\tau^+}{\tau^-} \left(\frac{\tau^- - \tau_{obs}}{\tau^+ - \tau_{obs}} \right) \quad (1.11)$$

1.2.6 Υπόβαθρο

Ο ανιχνευτής μπορεί να ανιχνεύσει μόνο τα σωματίδια τα οποία ξεπερνούν ένα ενεργειακό κατώφλι κατά την πρόσπασή τους στον σπινθηριστή. Τα σωματίδια αυτά μπορεί να είναι είτε φορτισμένα, όπως ηλεκτρόνια (e^-) ή μίονια (μ), είτε ουδέτερα, όπως τα φωτόνια, τα οποία «παράγουν» άλλα φορτισμένα σωματίδια όταν αλληλεπιδρούν με το υλικό του σπινθηριστή. Είναι προφανές ότι ο ανιχνευτής δεν είναι δυνατόν να έχει άμεση γνώση του αν ένα σωματίδιο σταματά ή όχι μέσα στον σπινθηριστή, και επομένως, δεν μπορεί να διαχωρίσει μεταξύ των μιονίων τα οποία εισέρχονται και διασπώνται μέσα στον σπινθηριστή, και των μιονίων τα οποία διέρχονται μέσα από όλη τη διάταξη και απομακρύνονται, χωρίς να διασπαστούν.

Αυτή η-πολύ σημαντική πηγή «γεγονότων υποβάθρου» (background events) μπορεί να υπολογιστεί και να αφαιρεθεί από τους υπολογισμούς με δύο τρόπους:

- Αφενός, μπορούμε να περιορίσουμε το χρονικό διάστημα στο οποίο αναμένουμε τους δύο χαρακτηριστικούς διαδοχικούς παλμούς στον φωτοπολλαπλασιαστή
- Αφετέρου, μπορούμε να εκτιμήσουμε το υπόβαθρο παρατηρώντας το ιστόγραμμα μας στην περιοχή μεγάλων χρόνων, όπου δε θα υπάρχουν πραγματικά γεγονότα.

1.2.7 Σταθερά σύζευξης Fermi

Τα μίονια διασπώνται μέσω της ασθενούς αλληλεπίδρασης. Η **σταθερά σύζευξης Fermi** είναι ένα μέτρο της έντασης της ασθενούς αλληλεπίδρασης. Σε μια καλή προσέγγιση, η σχέση ανάμεσα στο χρόνο ημιζωής του μιονίου, τ , και την σταθερά σύζευξης Fermi, G_F , είναι:

$$\tau = \frac{192 \cdot \pi^3 \hbar^7}{G_F m^5 c^4} \quad (1.12)$$

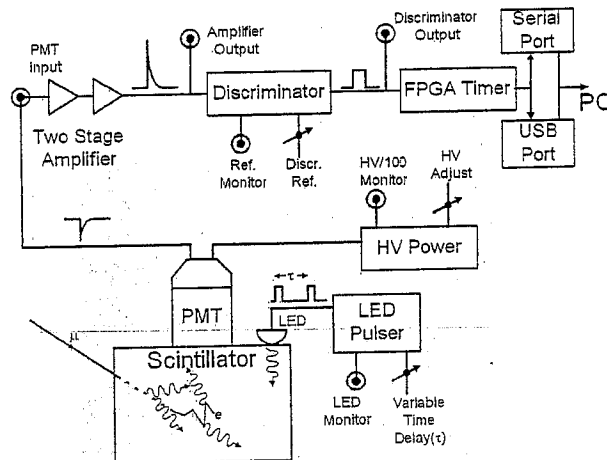
όπου η μάζα m είναι η μάζα του μιονίου, η οποία μπορεί να βρεθεί στη διεθνή βιβλιογραφία⁶ ενώ τα υπόλοιπα σύμβολα είναι γνωστά.

⁶Για παράδειγμα στη διεύθυνση <http://pdg.lbl.gov/>

1.3 Πειραματική Διάταξη

1.3.1 Ηλεκτρονικά

Ένα σχηματικό διάγραμμα της ηλεκτρονικής διάταξης ανάγνωσης, συνοδευόμενο από τη μορφή των αντίστοιχων εμφανιζόμενων παλμών εξόδου, παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.4. Η λογική της επεξεργασίας του σήματος είναι απλή. Το φως του σπινθηριστή ανιχνεύεται από ένα φωτοπολλαπλασιαστή (PMT) του οποίου το σήμα εξόδου τροφοδοτεί έναν ενισχυτή. Στην συνέχεια η έξοδος του ενισχυτή τροφοδοτεί με την σειρά της έναν διευκρινιστή με ρυθμιζόμενο κατώφλι. Ο διευκρινιστής παράγει έναν TTL⁷ παλμό εξόδου για σήματα εισόδου πάνω από το εκάστοτε κατώφλι και αυτός ο παλμός ενεργοποιεί ένα FPGA⁸ κύκλωμα χρόνου (timing circuit). Ένας δεύτερος TTL παλμός που φτάνει στην είσοδο FPGA, εντός ορισμένου χρονικού διαστήματος, θα κλείσει το κύκλωμα χρόνου και θα το επαναφέρει στις αρχικές του συνθήκες (για την επαναφορά αυτή απαιτείται περίπου 1 ms και κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος ο ανιχνευτής δεν λειτουργεί (dead time)). Το χρονικό διάστημα μεταξύ της έναρξης και της λήξης του παλμού (παλμοί «start» και «stop») είναι η πληροφορία που αποστέλλεται στον υπολογιστή και η οποία θα χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του χρόνου ζωής των μιονίων. Στην περίπτωση που δεν φτάσει ένας δεύτερος TTL παλμός μέσα στο χρονικό διάστημα που έχουμε εμείς ορίσει, τότε το κύκλωμα χρόνου θα σβήσει από την μνήμη του τον πρώτο παλμό και θα αναμένει την επόμενη μέτρηση.



Σχήμα 1.4: Σχηματικό διάγραμμα της ηλεκτρονικής ανάγνωσης μιονίων. Τα σήματα εξόδου του ενισχυτή (Amplifier) και του διευκρινιστή (Discriminator) είναι διαθέσιμα στον κεντρικό πίνακα επιλογών του κιβωτίου ηλεκτρονικής. Η πηγή υψηλής τάσης (HV) είναι ενσωματωμένη στο σωλήνα ανίχνευσης.

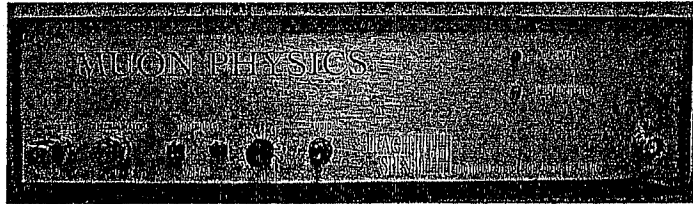
Η μπροστινή πλευρά του κιβωτίου ηλεκτρονικών παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.5. Την έξοδο του ενισχυτή την λαμβάνουμε μέσω του BNC υποδοχέα που ονομάζεται «Amplifier output». Ομοίως, την έξοδο του διευκρινιστή την λαμβάνουμε μέσω του BNC υποδοχέα που ονομάζεται «Discriminator output». Η τάση του διευκρινιστή που ορίζει το κατώφλι της μέτρησης, καθορίζεται μέσω του ρυθμιστή «Threshold control». Μπορούμε να ελέγξουμε την τιμή της τάσης κάθε στιγμή με την χρήση ενός πολυμέτρου, το οποίο συνδέουμε με τον κόκκινο και μαύρο υποδοχέα. Ο διακόπτης (Audio/OFF) ελέγχει έναν βομβητή (beeper), που ηχεί όταν ένα σήμα του ενισχυτή είναι πάνω από το κατώτατο όριο του διευκρινιστή. Το beeper μπορεί και να απενεργοποιηθεί.

Η πίσω πλευρά του κιβωτίου ηλεκτρονικών παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.6. Μια πρόσθετη ασφάλεια είναι τοποθετημένη μέσα στο διακόπτη τάσης.

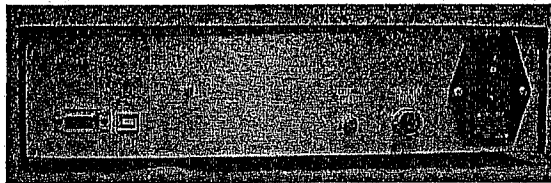
Η Εικόνα 1.7 παρουσιάζει την κορυφή του κυλινδρικού ανιχνευτή. Ο ανιχνευτής τροφοδοτείται με εναλλασσόμενη τάση μέσω του κουτιού των ηλεκτρονικών με τον υποδοχέα DC Power. Η υψηλή τάση (HV) του φωτοπολλαπλασιαστή ρυθμίζεται γυρνώντας τον προσαρμογέα που βρίσκεται στο πάνω μέρος του ανιχνευτή (HV adj). Μπορούμε και πάλι να ελέγξουμε την τιμή της τάσης με την χρήση ενός πολυμέτρου, το οποίο

⁷ Transistor-transistor logic (TTL)

⁸ field-programmable gate array (FPGA)

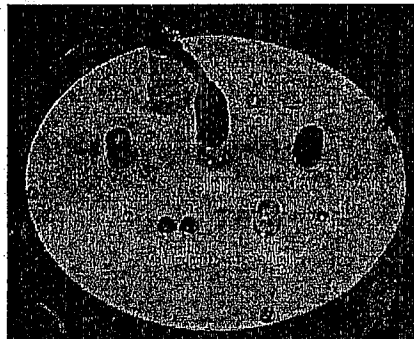


Σχήμα 1.5: Μπροστινή πλευρά του κιβωτίου ηλεκτρονικών.



Σχήμα 1.6: Πίσω πλευρά του κιβωτίου ηλεκτρονικών. Οι θύρες (σειριαλ/ΥΣΒ) επικοινωνίας με το PC φαίνονται αριστερά. Χρησιμοποιήστε μόνο την μία.

συνδέουμε με τον κόκκινο και μαύρο υποδοχέα. **ΠΡΟΣΟΧΗ:** Η τάση που παρατηρούμε είναι το 1/100 της υψηλής τάσης που εφαρμόζουμε στον φωτοπολλαπλασιαστή.



Σχήμα 1.7: Πάνω μέρος του καπακιού του ανιχνευτή. Εδώ βρίσκονται τα ποτενσιόμετρα ρύθμισης HV και οι θύρες ελέγχου για το PMT.

Ένας παλμικός ταλαντωτής ενεργοποιεί μια φωτοδίοδο (LED) που βρίσκεται ενσωματωμένη στο σωλήνα ανίχνευσης του σπινθηριστή. Ενεργοποιείται από το διακόπτη παλμών (pulser) στην κορυφή του ανιχνευτή. Η παλμική φωτοδίοδος παράγει ζευγάρια παλμών σε σταθερή συχνότητα 100Hz, ενώ ο χρόνος μεταξύ των δύο παλμών του ζεύγους, ρυθμίζεται με τον ρυθμιστή «Time Adj». Η τάση εξόδου του ταλαντωτή μπορεί να παρατηρηθεί στην έξοδο «Pulse Output».

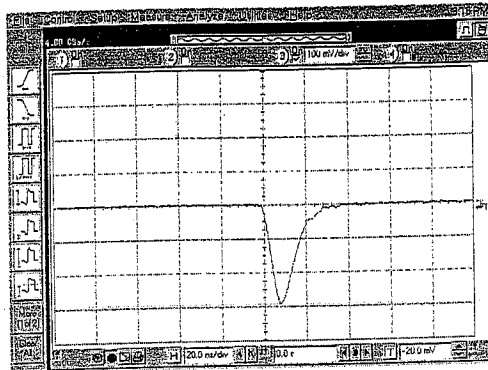
Παράδειγμα σήματος εξόδου κατευθείαν από το PMT σε ένα φόρτο 50Ω φαίνεται στην Εικόνα 1.8.

Η Εικόνα 1.9 παρουσιάζει παλμούς εξόδου του ενισχυτή και του διευκρινιστή αντίστοιχα.

1.3.2 Το λογισμικό και το περιβάλλον αλληλεπίδρασης με το χρήστη

Γενικές Πληροφορίες

Το λογισμικό χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των οργάνων, την καταγραφή και την επεξεργασία των δεδομένων. Υπάρχει επίσης λογισμικό για την προσομοίωση δεδομένων μιονικών διασπάσεων. Όλο το



Σχήμα 1.8: Άμεσα παραγόμενος από το PMT παλμός σε αντίσταση 50Ω. Η οριζόντια κλίμακα είναι 20 ns/div και η κάθετη κλίμακα είναι 100 mV/div.



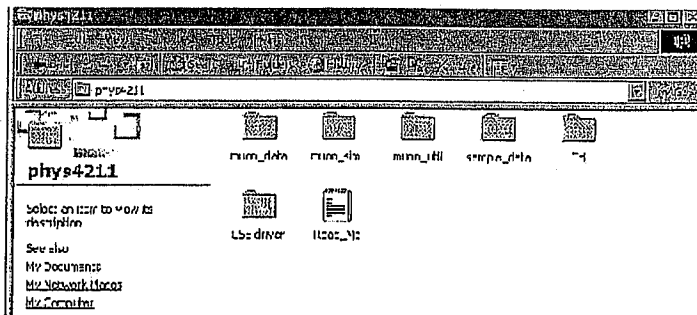
Σχήμα 1.9: Παλμός εξόδου ενισχυτή από το σήμα εισόδου της Εικόνας 1.8 και ο αντίστοιχος παραγόμενος παλμός εξόδου του διευκρινιστή. Η οριζόντια κλίμακα είναι 20 ns/div και η κάθετη είναι 100 mV/div (έξοδος ενισχυτή) και 200 mV/div (έξοδος διευκρινιστή)

λογισμικό περιλαμβάνεται στο CD που συνοδεύει τα όργανα και μπορεί επίσης να αποκτηθεί ελεύθερα από το <http://www.muon.edu>. (για λειτουργικά Microsoft Windows και Linux). Ο πηγαίος κώδικας για το περιβάλλον αλληλεπίδρασης με το χρήστη και το λογισμικό προσαρμογής γραμμής τάσης (fitting) των δεδομένων έχει γραφεί σε γλώσσα προγραμματισμού Tcl/Tk, που παρέχεται. Εντός του CD θα πρέπει να βρείτε τους φακέλους και υποκαταλόγους που παρουσιάζονται στην Εικόνα 1.10.

Όλο το λογισμικό μπορεί να εκτελεσθεί είτε απευθείας από το CD είτε αντιγράφοντάς τα περιεχόμενά του CD στο δίσκο του υπολογιστή. Το λογισμικό προσομοίωσης διάσπασης μιονίων μπορεί να εκτελεσθεί και χωρίς την ύπαρξη ανιχνευτή. Πρέπει να αντιγράψετε και τους έξι φακέλους του CD σε έναν κατάλληλο φάκελο. Στον Πίνακα 1.1 απαριθμούνται οι φάκελοι και περιγράφεται το λογισμικό που περιέχουν.

Όνομα Φακέλου	Περιγραφή
muon_data	Κυρίως εκτελέσιμο και αρχεία δεδομένων
muon_simu	Πρόγραμμα προσομοίωσης και προσομοιωμένα δεδομένα
muon_util	Χρήσιμα προγράμματα
sample_data	Αρχείο/α δεδομένων μέτρησης
Tcl	Πηγαίος κώδικας περιβάλλοντος αλληλεπίδρασης με το χρήστη
USB Driver	Οδηγοί USB για επικοινωνία με το PC

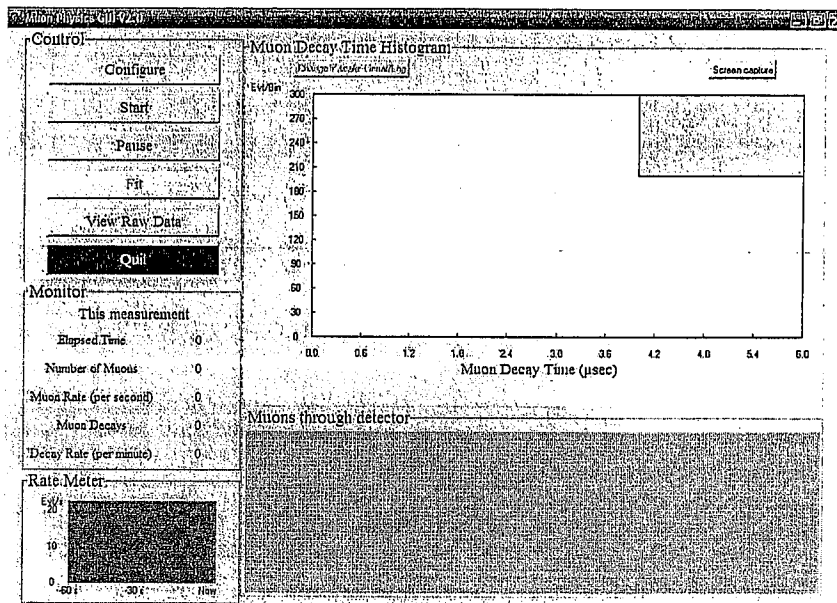
Πίνακας 1.1: Περιγραφή των φακέλων στο CD



Σχήμα 1.10: Φάκελοι του CD: Muon Physics

Περιγραφή του προγράμματος

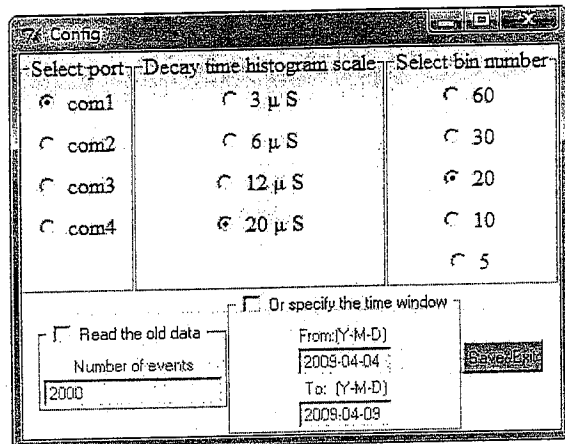
Εκτελώντας το αρχείο μυον.exe έχουμε τη βασική κονσόλα του προγράμματος. Αυτή, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.11, χωρίζεται στα επιμέρους τμήματα: Control, Monitor, Rate Meter και στο τμήμα με τα ιστογράμματα (των μιονίων που απλά πέρασαν από τον ανιχνευτή και αυτών που διασπάστηκαν μέσα στο ενεργό υλικό του ανιχνευτή).



Σχήμα 1.11: Η βασική κονσόλα του προγράμματος

Από το control (βλέπε Εικόνα 1.12) μπορούμε να παραμετροποιήσουμε το πρόγραμμα. Στην αρχή διαλέγουμε το port επικοινωνίας, ενώ στη δεύτερη στήλη διαλέγουμε την κλίμακα που θέλουμε να έχουμε στον οριζόντιο άξονα.

Από μόνο του το πρόγραμμα έχει προεπιλεγμένη την τιμή 20 μs . Στην τελευταία στήλη διαλέγουμε το bin size για το ιστόγραμμα. Με το Start κουμπί ξεκινάει η λήψη μετρήσεων. Αν το πρόγραμμα έχει συνδεθεί με τον ανιχνευτή θα πρέπει να δούμε κινητικότητα στο Rate Meter. Με το Pause σταματάμε προσωρινά τη λήψη μετρήσεων δίχως να κλείνουμε το αρχείο, ενώ η επανέναρξη γίνεται ξανά με το Pause. Το fit για να χρησιμοποιηθεί θέλει να εισάγετε τον κωδικό «μυον». Τα δεδομένα στο Decay Time Histogram προσαρμόζονται (fit) και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην πάνω δεξιά γωνία του ιστογράμματος. Κάθε φορά που το πρόγραμμα λαμβάνει μια νέα μέτρηση υπολογίζει εκ νέου το fit αυτόματα. Με το Quit σταματάει η μέτρηση



Σχήμα 1.12: Η Εικόνα του control

και ο χρήστης επιλέγει αν θέλει να αποθηκευτούν τα δεδομένα. Η κατάληξη του αρχείου-output είναι .data.

Τα δεδομένα που αποθηκεύονται μετά από κάθε μέτρηση είναι οργανωμένα σε δυο στήλες. Η πρώτη στήλη αποτελείται από θετικούς ακέραιους αριθμούς. Αν ο αριθμός είναι μικρότερος από το 40000 τότε είναι ο μετρούμενος χρόνος διάσπασης σε ns. Μόνο αυτοί οι χρόνοι εισέρχονται στο ιστόγραμμα του χρόνου διάσπασης. Αν ο αριθμός αυτός είναι μεγαλύτερος από 40000 τότε δηλώνει απλά ότι πέρασε σωματίδιο αλλά δε διασπάστηκε. Η δεύτερη στήλη δηλώνει το χρόνο που συνέζη η μέτρηση, μετρούμενο σε δευτερόλεπτα από την 1 Ιανουαρίου του 1970 (00:00:00 1970 – 01 – 01 UTC) (Unix Time).

Χρήσιμα Προγράμματα

Ο φάκελος muon_util περιέχει πολλά χρήσιμα προγράμματα που διευκολύνουν την ανάλυση των δεδομένων διάσπασης. Το εκτελέσιμο αρχείο **sift.exe** διατρέχει ένα αρχείο δεδομένων με χρόνους διασπάσεων και καταγράφει σε ένα αρχείο της επιλογής σας μόνο τα αρχεία που περιγράφουν δυνατές διασπάσεις μιονίων. Αγνοεί τα αρχεία που περιγράφουν γεγονότα χρονικά ασυμβίβαστα με πραγματικές διασπάσεις μιονίων.

Το εκτελέσιμο αρχείο **merge.exe** συγχωνεύει δύο αρχεία δεδομένων της επιλογής σας σε ένα ενιαίο αρχείο της επιλογής σας. Τα δεδομένα των αρχείων είναι χρόνοι, που διατάσσονται σύμφωνα με την ημερομηνία της αρχικής καταγραφής, έτσι ώστε όσο παλαιότερο είναι ένα αρχείο τόσο νωρίτερα εμφανίζεται στο συγχωνευμένο αρχείο.

Το εκτελέσιμο αρχείο **ratecalc.exe** υπολογίζει το μέσο ποσοστό ενεργοποίησης του ανιχνευτή (ανά δευτερόλεπτο) και το ποσοστό μιονικών διασπάσεων (ανά λεπτό) από ένα αρχείο δεδομένων της επιλογής σας. Τα λάθη που επιστρέφονται είναι στατιστικά.

Το εκτελέσιμο **freewrap.exe** είναι ο μεταγλωττιστής (compiler) για κάθε Tcl / Tk κώδικα που έχετε γράψει ή τροποποιήσει. Αν τροποποιήσετε ένα Tcl / Tk κώδικα (script), πρέπει πριν το εκτελέσετε (run) να του κάνετε μεταγλώττιση (compile). Σε λειτουργικό Windows αυτό το κάνετε με το άνοιγμα ενός παραθύρου εντολών DOS, και πηγαίνοντας στο φάκελο **muon_util**. Στη συνέχεια εκτελείτε την εντολή:

```
freewrap όνομα_αρχείου.tcl
```

όπου «όνομα_αρχείου.tcl» είναι το όνομα του Tcl / Tk κώδικα (script). Μην ξεχάσετε την επέκταση «.tcl» διότι διαφορετικά η εντολή δεν θα εκτελεστεί.

1.4 Εκτέλεση του Πειράματος

1.4.1 Συνδεσμολογία της διάταξης

1. Συνδέστε το καλώδιο ισχύος και το καλώδιο σήματος με το κουτί των ηλεκτρονικών και στη συνέχεια με τον ανιχνευτή, προσέχοντας να οι συνδέσεις να γίνουν στις σωστές υποδοχές. Συνδέστε το καλώδιο επικοινωνίας USB στο πίσω μέρος του κουτιού ηλεκτρονικών και σε κάποια από τις θύρες USB του υπολογιστή.
2. Ανοίξτε την ισχύ στο κουτί ηλεκτρονικών. (Ο διακόπτης βρίσκεται στο πίσω μέρος). Το κόκκινο LED θα πρέπει τώρα να είναι αναμμένο σταθερά. Το πράσινο LED μπορεί να αναβοσβήνει.
3. Ανεβάστε την υψηλή τάση (HV) περίπου στα 1100 με 1200 Volts χρησιμοποιώντας το ρυθμιστή υψηλής τάσης που βρίσκεται στο πάνω μέρος του σωλήνα ανίχνευσης. Η ακριβής ρύθμιση δεν είναι κρίσιμη και η τάση μπορεί να μετρηθεί χρησιμοποιώντας τις υποδοχές για ακροδέκτες πολύμετρου που βρίσκονται δίπλα στο ρυθμιστή.

Αν είστε περίεργοι, μπορείτε να δείτε το σήμα εξόδου του φωτοπολλαπλασιαστή χρησιμοποιώντας την έξοδο PMT του σωλήνα ανίχνευσης και έναν παλμογράφο (κατά προτίμηση ψηφιακό). Τερματίστε την είσοδο με αντίσταση τερματισμού 50 Ω, αλλιώς το σήμα σας θα παραμορφωθεί. Θα πρέπει να δείτε ένα σήμα που μοιάζει με την Εικόνα 1.8.

4. Χρησιμοποιώντας ένα καλώδιο BNC, συνδέστε την έξοδο PMT του ανιχνευτή με την είσοδο PMT στο κουτί ηλεκτρονικών. Ρυθμίστε το κατώφλι (threshold) στο κουτί ηλεκτρονικών ούτως ώστε να είναι την περιοχή 180 – 220 mV. Για να το πετύχετε αυτό, τοποθετήστε τους ακροδέκτες του πολυμέτρου στις υποδοχές δίπλα στο ρυθμιστή του κατωφλίου, και χρησιμοποιήστε τον μέχρι να φτάσετε στη ζητούμενη τάση. Το πράσινο LED στο μπροστινό μέρος του κουτιού θα πρέπει τώρα να αναβοσβήνει.

Μπορείτε να δείτε τα σήματα εξόδου του ενισχυτή και του διευκρινιστή χρησιμοποιώντας την αντίστοιχη έξοδο στο μπροστινό μέρος του κουτιού και έναν παλμογράφο. Όπως και προηγουμένως, η είσοδος θα πρέπει να τερματιστεί με αντίσταση 50 Ω. Η Εικόνα 1.9 απεικονίζει τυπικά σήματα για τις εξόδους του ενισχυτή και του διευκρινιστή σε κοινό γράφημα.

1.4.2 Εκτέλεση του προγράμματος καταμέτρησης

1. Αν δεν έχει γίνει εγκατάσταση του προγράμματος καταμέτρησης, εισάγετε το CD με το πρόγραμμα στον υπολογιστή και αντιγράψτε όλους τους φακέλους σε έναν φάκελο στον υπολογιστή.
2. Ανοίξτε το φάκελο muon_data και εκτελέστε το πρόγραμμα muon.exe (Τα Windows μπορεί να κρύβουν την κατάληξη .exe). Θα πρέπει τώρα να βλέπετε το user interface του προγράμματος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.11.
3. Όπως περιγράφεται στην παράγραφο 10.2.1, ρυθμίστε τη θύρα (port) του υπολογιστή, τις επιλογές του ιστογράμματος και κάντε κλικ στο Save/Exit.
4. Για να ξεκινήσετε τη συλλογή δεδομένων, κάντε κλικ στο «Start». Θα πρέπει να βλέπετε το ρυθμό συλλογής γεγονότων στην κάτω αριστερή πλευρά της οθόνης. Ο μέσος ρυθμός πρέπει να είναι γύρω στα 6 Hz.

1.5 Ερωτήματα - Επεξεργασία Μετρήσεων

Με βάση όλα τα παραπάνω, καλείστε (όπως και μεις, τότε!) να απαντήσετε στα παρακάτω ερωτήματα:

1. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που πήρατε μετά την εκτέλεση του πειράματος και κάνοντας «fit» με τη βοήθεια μιας εκθετικής συνάρτησης (προγράμματα Origin / Root / άλλο) να δώσετε μια εκτίμηση για το χρόνο ζωής των μιονίων, καθώς και για το σφάλμα του. Στη συνέχεια, να συγκρίνετε το χρόνο αυτό με το χρόνο που χρειάζεται ένα μίονιο που παράγεται στην ατμόσφαιρα (15 km) για να φτάσει στην επιφάνεια

της θάλασσας (θεωρώντας ότι η ταχύτητά του είναι περίπου ίση με την ταχύτητα του φωτός). Αναφερθείτε στο φαινόμενο της διαστολής το χρόνου σύμφωνα με τη θεωρία της σχετικότητας. Μπορείτε ακόμα να συγκρίνετε την **πειραματική σας τιμή** για το χρόνο ζωής των μιονίων, με το χρόνο ζωής που δίνεται στην διεθνή βιβλιογραφία. Το σφάλμα που υπολογίσατε δικαιολογεί αυτή τη διαφορά; Αν όχι, εξηγήστε πού μπορεί να οφείλεται. Τέλος, από τη μέτρηση του χρόνου ζωής και την τιμή της μάζας των μιονίων να υπολογίσετε τη σταθερά σύζευξης Fermi. Συγκρίνετε την τιμή αυτή με την τιμή που δίνεται από τη βιβλιογραφία.

2. Αν θεωρήσουμε ότι $\rho = 1$ και με βάση τις παραδοχές που έγιναν στη θεωρία, **υπολογίστε** το μέσο χρόνο ζωής των μιονίων που αναμένεται να παρατηρηθεί μέσα στον σπινθηριστή (τ_{obs}).

3. Με δεδομένο ότι η κατανομή του χρόνου ζωής των μιονίων ακολουθεί την κατανομή Poisson, και ενώ γνωρίζουμε ότι ο ανιχνευτής ανιχνεύει περίπου ένα μίονιο ανά λεπτό, να υπολογίσετε:

(α) Την πιθανότητα να **μη δούμε 1 μίονιο σε χρόνο 1 λεπτού**

(β) Την πιθανότητα να **μη δούμε 1 μίονιο σε χρόνο 4 λεπτών**

4. Τα μίονια, των οποίων το χρόνο ζωής μετράμε σε αυτό το πείραμα, γεννιούνται στην ατμόσφαιρα και συνεπώς «ξοδεύουν» ένα άγνωστο κομμάτι του χρόνου ζωής τους **έξω** από τον ανιχνευτή. Έτσι, δεν μετράμε ποτέ τον πραγματικό χρόνο ζωής των μιονίων. Παρόλα αυτά ισχυριζόμαστε ότι τον μετράμε. Πώς δικαιολογείται αυτό;