Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Τμήμα Φυσικής

Τομέας Πυρηνικής Φυσικής και Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων

Ανίχνευση μιονίων κοσμικής ακτινοβολίας σε 4x4 θάλαμο MDT και ανακατασκευή των τροχιών τους με τη χρήση LabView.

Διπλωματική Εργασία

του φοιτητή *Ευσταθίου Κ. Στεφανίδη* (Α.Ε.Μ. 9456)

Επιβλέπων : Επ. Καθηγητής *Α. Λιόλιος*

Θεσσαλονίκη
Ιούνιος 2000

Σ’εκείνους τους ανθρώπους
που τόσο λατρεύω.

Περιεχόμενα

Εισαγωγικά..... σελ. 5

Συμμετοχή του Α.Π.Θ στον ανιχνευτή μιονίων του ATLAS……. σελ. 7

Θάλαμοι Ολίσθηση (drift chambers)..... σελ. 9

Σύστημα μετρήσεων..... σελ. 12

Καμπύλη Σύμπτωσης δύο σπινθηριστών..... σελ. 17

Χρονικό φάσμα σωλήνα ολίσθησης..... σελ. 20

Λογισμικό πρόγραμμα κατασκευής τροχιάς μιονίου
σε θάλαμο MDT……. σελ. 21

Παράρτημα

Α. Πειραματικές τιμές για τη χάραξη της καμπύλης σύμπτωσης..... σελ. 26

Β. Επεξήγηση των ρουτίνων και των υποπρογραμμάτων..... σελ. 29

Γ. Διάγραμμα Ροής..... σελ. 31

Και φτάσαμε στον κόρυμβο·
και σα στερνή κοιτάξαμε φορά τι 'χαμε κάνει…
Ηρώ Τασιτσιώμη: "Νεανικά σκιρτήματα",
Εκδ. Πήγασος 2000
Θεσσαλονίκη, 1995

Η Φυσική των Στοιχειωδών Σωματιδίων είναι από τους πλέον δυναμικούς και προκλητικούς τομείς της Φυσικής. Μελετώντας τον μικρόκοσμο μπορούμε να δώσουμε απαντήσεις για τις ιδιότητες της φύσης γύρω μας, αλλά και "πάνω" μας, εννοώντας τη δομή του σύμπαντος και, εν τέλει, να προσεγγίσουμε, όσο αυτό είναι δυνατό στον ανθρώπινο νου, το τεράστιο ζήτημα της ανθρωπότητας, την κοσμογέννεση. Το πείραμα ATLAS προσδοκά να δώσει απαντήσεις σε τέτοιου είδους αναζητήσεις.

Η εργασία αυτή είναι ένα μέρος της δουλειάς που έγινε στα πλαίσια διπλωματικής εργασίας δίπλα στην ομάδα μιονίων του ανιχνευτή ATLAS, στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Το υπόλοιπο μέρος της δουλειάς είναι το αποτέλεσμα συλλογής εμπειριών, σχετικά με τις μεθόδους, τις τεχνικές και γενικά, την ικανότητα που απαιτεί η Πειραματική Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων και οι οποίες αποκτήθηκαν δίπλα στους ανθρώπους της ομάδας.

Οι επόμενες σελίδες αποτελούν την πρώτη προσπάθεια ενός προπτυχιακού φοιτητή να αρθρώσει επιστημονικό και τεκμηριωμένο λόγο φυσικής. Και αυτό δεν είναι εύκολο στην αρχή. Υπάρχουν αδυναμίες και για το λόγο αυτόν η επιείκεια του αναγνώστη θα ήταν επιθυμητή.

Κλείνοντας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στην ομάδα μιονίων του εργαστηρίου και πιο ειδικά, στην επικεφαλής, αναπληρώτρια καθηγήτρια κ. Χ. Πετρίδου, που με εμπιστεύθηκε και με στήριξε με πολλούς τρόπους.

Οφείλω πολλές ευχαριστίες στον επίκουρο καθηγητή κ. Α. Λιόλιο, που δέχτηκε να συνεργαστεί μαζί μου και να οδηγήσει, με την εμπειρία του και με τις χρήσιμες συμβουλές του, στην ολοκληρωμένη παρουσίαση αυτής της δουλειάς.

Στον υποψήφιο διδάκτορα κ. Χ. Βαλδεράνη χρωστώ μεγάλο ποσοστό της γνώσης και της εμπειρίας που απεκόμισα κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου.

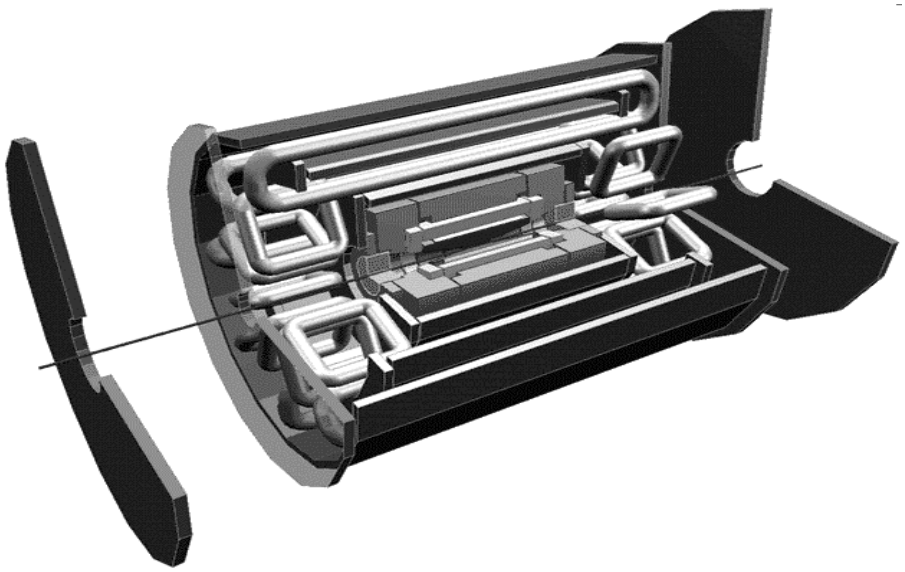
Τέλος, ευχαριστώ όλα εκείνα τα μέλη της ομάδας και του Εργαστηρίου Πυρηνικής Φυσικής και Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων που με βοήθησαν, πολλές φορές αθόρυβα, κατά τη διάρκεια των συζητήσεων που είχα μαζί τους.

Ιούνιος 2000
Ευστάθιος Κ. Στεφανίδης

Εισαγωγικά.

Στα μέσα του 1994 άρχισε η κατασκευή του ανιχνευτή ATLAS, στα πλαίσια του ομώνυμου πειράματος. Λαμβάνει χώρα στο Ευρωπαϊκό Κέντρο Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων (CERN), στη Γενεύη. Στο πείραμα αυτό συμμετέχουν 1700 φυσικοί από Πανεπιστήμια και Εργαστήρια 33 χωρών.

Ο ανιχνευτής ATLAS (σχήμα 1) θα τοποθετηθεί στο Μεγάλο Συγκρουστήρα Αδρονίων (Large Hadron Collider- LHC). Είναι σχεδιασμένος, ώστε να ανιχνεύει τα προϊόντα από τη σύγκρουση δύο πρωτονίων (pp detector), όπως φωτόνια (γ), ηλεκτρόνια (e^-), πίδακες (jets) από μιόνια και παράλληλα τα προϊόντα όλων των πιθανών αλληλεπιδράσεων.



Σχήμα 1: Ο ανιχνευτής ATLAS

Ένας από του στόχους του πειράματος ATLAS είναι η κατανόηση της *προέλευσης της μάζας* στο επίπεδο των ασθενών αλληλεπιδράσεων. Δηλαδή, με άλλα λόγια, θα προσπαθήσει να τεκμηριώσει τη θεωρία του «Καθιερωμένου Προτύπου των Στοιχειωδών Σωματιδίων και των Αλληλεπιδράσεων» (Standard Model of Fundamental Particles and Interactions). Η ανίχνευση και ο προσδιορισμός του σωματιδίου Higgs θα οδηγήσει στην επιβεβαίωση του Καθιερωμένου Προτύπου, το οποίο να είναι πιθανώς υπεύθυνο για τις μάζες των σωματιδίων.

Επιπλέον, πολύ σημαντικός στόχος είναι η ανίχνευση σωματιδίων που υπακούουν στη θεωρία της Υπερσυμμετρίας (Theory of Supersymmetry). Ο ανιχνευτής ATLAS θα είναι σε θέση να δώσει απαντήσεις για τη σύνθεση των θεμελιωδών

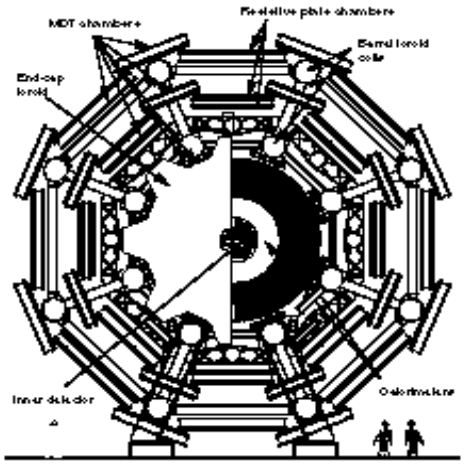
φερμιονίων, όπως επίσης και για την παραβίαση της CP συμμετρίας στα b-μεσόνια. Τέλος, θα μελετήσει διεξοδικά τις ιδιότητες του t-κουόρκ.

Αυτές ακριβώς οι πολλαπλές δυνατότητες του ATLAS οφείλονται στο γεγονός ότι ο ανιχνευτής θα αποτελείται από διαφορών ειδών επιμέρους τμήματα, τα οποία θα ανιχνεύουν καθένα και διαφορετικά σωμάτια.

Το πείραμα ATLAS είναι ένα από πλέον πρωτοπόρα πειράματα που έχουν γίνει στον τομέα αυτόν της Φυσικής. Αναγεννά τις προσδοκίες για την γνώση της απαρχής του Σύμπαντος, στη Μεγάλη Ενοποιημένη Θεωρία (Grand Unified Theory) και τέλος στην Θεωρία των Πάντων (Theory of Everything).

Συμμετοχή του Εργαστηρίου Πυρηνικής Φυσικής και Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων του Α.Π.Θ.

Προκειμένου να εντοπίσουμε μιόνια στον ανιχνευτή ATLAS, απαιτείται ένας φασματογράφος μιονίων, τοποθετημένος στο εξωτερικό περίβλημα του ανιχνευτή, αφού τα μιόνια είναι πολύ διεισδυτικά σωματίδια. Στο σχήμα 2 παρουσιάζεται ένας φασματογράφος μιονίων.



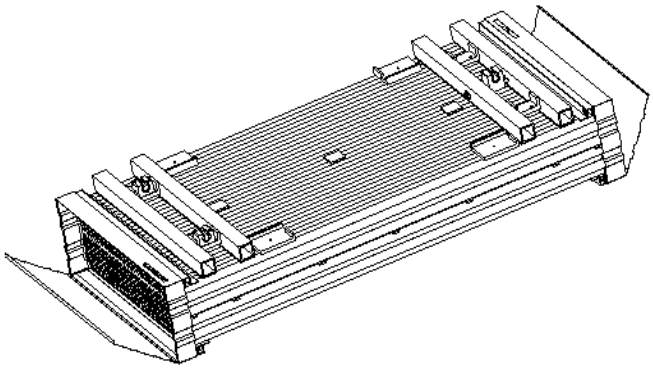
Σχήμα 2: Τομή του φασματογράφου μιονίων. Φαίνεται η θέση των MDT θαλάμων.

Ο φασματογράφος μιονίων βρίσκεται μέσα σ' ένα σωληνοειδές μαγνητικό πεδίο. Αποτελείται από δύο ειδών θαλάμους. Οι «*θάλαμοι σκανδαλισμού*» (**trigger chambers**) θα είναι σε θέση να δίνουν με ακρίβεια τη χρονική στιγμή κατά την οποία ανίχνευσαν τη διέλευση ενός σωματιδίου, ώστε να αρχίσει η λήψη μετρήσεων από τα ηλεκτρονικά συστήματα. Οι «*θάλαμοι τροχιών*» (**tracking chambers**) θα έχουν τη δυνατότητα να καταγράφουν και να απεικονίζουν στη συνέχεια την τροχιά του σωματιδίου. Στην κατηγορία αυτή των θαλάμων ανήκουν και οι **θάλαμοι MDT**.

Με τον όρο « θάλαμο MDT- (Monitored Drift Tubes) » θα εννοούμε στο εξής ένα σύστημα 30x8 σωλήνων ολίσθησης[1], διατεταγμένους όπως ακριβώς φαίνεται στο σχήμα 3.

Ο σκοπός του Εργαστηρίου Πυρηνικής Φυσικής και Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων του Τμήματος Φυσικής είναι και η κατασκευή και ο έλεγχος 128 θαλάμων MDT, οι οποίοι θα τοποθετηθούν στο εξωτερικό τμήμα του ανιχνευτή όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.

[1] Σχετικά με τους θαλάμους ολίσθησης, θα γίνει αναφορά στις επόμενες σελίδες.



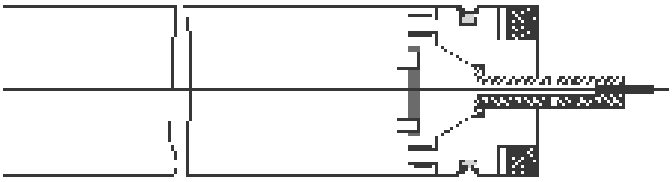
Σχήμα 3: Θάλάμος MDT.

Η κατασκευή εστιάζεται στην ακριβή τοποθέτηση και συγκόλληση των σωλήνων ολίσθησης σε κάθε στρώμα (layer), αλλά και των διαφόρων στρωμάτων μεταξύ τους. Ο έλεγχος εστιάζεται αρχικά, στην εξακρίβωση ότι όλα τα υλικά που χρησιμοποιούνται και παράλληλα, όλες οι παράμετροι (τάση νήματος και αντίσταση του καλωδίου, πίεση του αερίου, απώλειες αερίου από τον σωλήνα κ.ά) συμβαδίζουν με τα κριτήρια και τα όρια σφαλμάτων που έχουν τεθεί κατά τον αρχικό σχεδιασμό του θαλάμου (Technical Proposal), ενώ ως δεύτερο βήμα τίθεται η δοκιμή του όλου συστήματος και η λήψη δεδομένων χρησιμοποιώντας την κοσμική ακτινοβολία.

Θάλαμοι Ολίσθησης
(drift chambers)

Όπως προαναφέρθηκε, οι θάλαμοι MDT που θα χρησιμοποιηθούν για την καταγραφή της τροχιάς σωματιδίου στο φασματόμετρο μιονίων αποτελούνται από τους σωλήνες ολίσθησης. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η τομή ενός σωλήνα ολίσθησης, όπως ακριβώς θα χρησιμοποιηθεί στους θαλάμους του ATLAS.

Ας δούμε την φυσική ενός σωλήνα ολίσθησης.



Σχήμα 4: Τομή ενός σωλήνα ολίσθησης.

Α. Γενικά.

Οι αναλογικοί θάλαμοι (στους οποίους ανήκουν και οι θάλαμοι ολίσθησης) χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση στοιχειωδών σωματιδίων. Αποτελούνται από έναν κυλινδρικό (συνήθως) σωλήνα , στο κέντρο του οποίου υπάρχει σύρμα σε υψηλή τάση + V_o ως προς τον σωλήνα, δημιουργώντας ανάμεσά τους ηλεκτρικό πεδίο. Ο σωλήνας γεμίζεται με μείγμα αερίων σε καθορισμένη αναλογία.

Το σωματίδιο που διέρχεται από το αέριο μείγμα προκαλεί διαδοχικούς ιονισμούς και κατ' αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται ηλεκτρόνια και θετικά ιόντα.

Μάλιστα, τοποθετούμε μια ανιχνευτική διάταξη (σπινθηριστής) που θα δίνει παλμό κατά την άφιξη του σωματιδίου (trigger) .

Τα ιόντα, αφού ολισθήσουν για χρονικό διάστημα Δt, συγκεντρώνονται στα ηλεκτρόδια του θαλάμου και δημιουργούν ένα ηλεκτρικό σήμα, το οποίο κατάλληλα ενισχυμένο, φανερώνει το πέρασμα του σωματιδίου.

Συνάγεται εύκολα ότι η απόσταση που διανύει το προσπίπτον σωμάτιο θα είναι:

$$x = \int_{t_o}^{t_o+\Delta t} w(t)dt \quad (1)$$

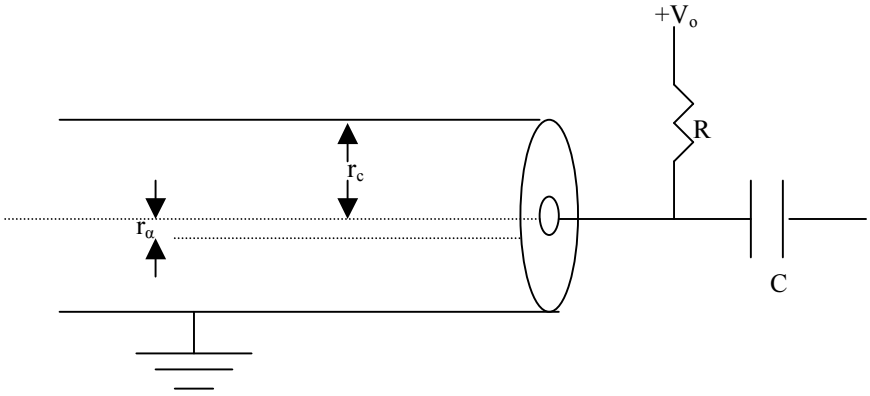
όπου t_o είναι ο χρόνος άφιξης του σωματιδίου, $t_o+\Delta t$ είναι ο χρόνος στον οποίο ο παλμός εμφανίζεται στο σύρμα και w(t) είναι η ταχύτητα ολίσθησης.

Βέβαια, είναι επιθυμητό να έχουμε σταθερή ταχύτητα ολίσθησης, οπότε, με σταθερό το ηλεκτρικό πεδίο, να έχουμε γραμμική σχέση ανάμεσα στο χρόνο ολίσθησης και την απόσταση που διήνυσε το σωμάτιο (στη συγκεκριμένη περίπτωση, το μιόνιο).

Το κύριο χαρακτηριστικό των θαλάμων αυτών είναι , όπως φανερώνει και το όνομά τους, ότι το σήμα της εξόδου είναι ανάλογο με τα ζεύγη ιόντων που δημιούργησε το ιονιστικό σωματίδιο.

Β. Λειτουργία των σωλήνων ολίσθησης.

Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός θαλάμου ολίσθησης μπορούν να παρουσιαστούν στο σχήμα 5.



Σχήμα 5: Βασικά στοιχεία ενός θαλάμου ολίσθησης.

Στην περιοχή ανάμεσα στην άνοδο και στην κάθοδο (μεταξύ του σύρματος και του σωλήνα) υπάρχει το ηλεκτρικό πεδίο. Εάν V_o είναι η υψηλή τάση στην άνοδο, τότε το ηλεκτρικό πεδίο E και το δυναμικό φ σε ένα σημείο $r_a \le r \le r_c$ θα είναι :

$$E = \frac{CV_o}{2\pi\varepsilon_o}\frac{1}{r} \tag{2}$$

$$\phi(r) = -\frac{CV_0}{2\pi\varepsilon_o}\ln(\frac{r}{r_a}) \tag{3}$$

όπου:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_o}{\ln(r_c / r_a)} \tag{4}$$

είναι χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους

με $2\pi\varepsilon_o$=0.5565 pF/cm.

Μια τυπική τιμή για το C είναι περίπου στα 9 pF/m (για r_c=1,5 cm και r_a=0,0025 cm). Συνεπώς, για μια τιμή υψηλής τάσης V_α περίπου 3 kVolts παίρνουμε ότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια της ανόδου είναι 187,2 kV/cm.

Το σήμα που παράγεται στο σύρμα ανόδου οφείλεται στη ροή των ηλεκτρονίων και των ελεύθερων ιόντων. Ας θεωρήσουμε ένα σωματίδιο με φορτίο q που βρίσκεται σε απόσταση r από το κεντρικό σύρμα. Η δυναμική ενέργεια που έχει το φορτίο είναι:

$$W = q\phi(r) \tag{5}$$

Αν τώρα το φορτίο κινηθεί κατά διάστημα dr, η μεταβολή στη δυναμική ενέργεια θα είναι:

$$dW = q\frac{d\phi(r)}{dr}dr \quad (6)$$

Για έναν κυλινδρικό πυκνωτή, ωστόσο, η ηλεκτροστατική ενέργεια του ηλεκτρικού πεδίου είναι:

$$W = \frac{1}{2}LCV_o^2 \quad (7)$$

όπου L είναι το μήκος του κυλίνδρου. Αν η κίνηση των φορτίων είναι γρήγορη σε σχέση με το χρόνο που απαιτείται ώστε η εξωτερική πηγή να αντιδράσει στις αλλαγές στην ενέργεια του συστήματος, τότε μπορούμε να θεωρήσουμε το σύστημα κλειστό. Η διατήρηση της ενέργειας τότε θα δώσει:

$$dW = LCV_o dV = q\frac{d\phi(r)}{dr}dr \quad (8)$$

Οπότε η μεταβολή στο δυναμικό θα είναι :

$$dV = \frac{q}{LCV_o}\frac{d\phi(r)}{dr}dr \quad (9)$$

Από τη στιγμή που ο πολλαπλασιασμός των ιόντων λαμβάνει χώρα πολύ κοντά στην άνοδο, τα περισσότερα από τα ηλεκτρόνια κινούνται διαμέσου μιας πολύ μικρής πτώσης τάσης, ενώ αντίθετα τα θετικά ιόντα που τείνουν να πλησιάσουν την κάθοδο, διατρέχουν μεγαλύτερο διάστημα, με αποτέλεσμα να δέχονται σχεδόν όλη την πτώση δυναμικού στο θάλαμο. Έτσι λοιπόν, όπως προκύπτει από την τελευταία σχέση, το σήμα που δεχόμαστε από την άνοδο οφείλεται , σχεδόν αποκλειστικά στην κίνηση των θετικών ιόντων.

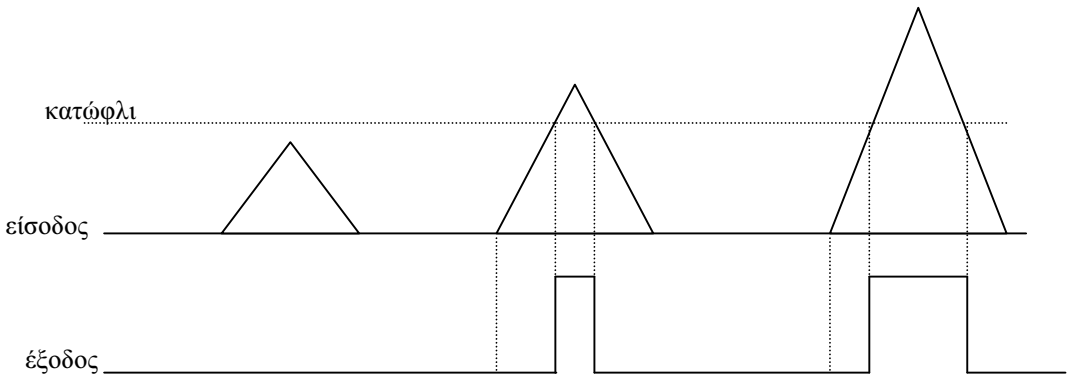
Σύστημα μετρήσεων

Η διάταξη του συνολικού συστήματος για τη λήψη και την καταγραφή των μετρήσεων χρησιμοποιώντας θαλάμους MDT παρουσιάζεται αναλυτικά στο σχήμα 6.

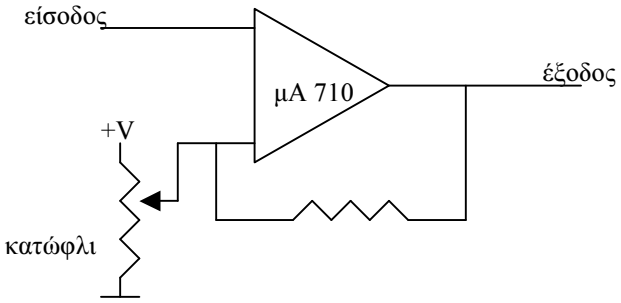
Θα ήταν χρήσιμο λοιπόν να αναφερθούμε επιγραμματικά και τονίζοντας κυρίως τη βασική λειτουργία, σε κάθε μονάδα ξεχωριστά:

- ***Αέρια*** : Η επιλογή των αερίων γέμισης για αναλογικούς θαλάμους στοχεύει στην επίτευξη χαμηλής τάσης λειτουργίας, υψηλής ενίσχυσης, καλής αναλογικότητας, μεγάλου ρυθμού μέτρησης και γρήγορης επανασύνδεσης. Γενικά, όλες αυτές οι προϋποθέσεις ικανοποιούνται αν χρησιμοποιήσουμε μείγμα αερίων, παρά ένα αέριο μόνο του. Για να έχουμε χαμηλή τάση λειτουργίας, επιλέγονται συνήθως ευγενή αέρια, αφού απαιτούν τη χαμηλότερη ένταση ηλεκτρικού πεδίου προκειμένου να δώσουν χιονοστοιβάδες. Εξαιτίας του μεγάλου σχετικού ιονισμού και το χαμηλό κόστος, προτιμάται κυρίως το αργό Ar. Το καθαρό αργό όμως δεν μπορεί να λειτουργήσει με ενίσχυση μεγαλύτερη από $10^3 - 10^4$. Και αυτό συμβαίνει λόγω της μεγάλης ενέργειας διέγερσης του αργό (11.6 eV): το διεγερμένα άτομα αργού που σχηματίζονται στη χιονοστοιβάδα, αποδιεγείρονται δίνοντας υψηλής ενέργειας φωτόνια, τα οποία προκαλούν νέες χιονοστοιβάδες, καταστρέφοντας την αναλογικότητα. Για να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα αυτό, προσθέτουμε μερικά ανόργανα αέρια όπως το CO_2 ή το BF_3, αλλά και πολυατομικά αέρια, όπως μεθάνιο ή αλκοόλη. Τα μόρια αυτά λειτουργούν σαν αποσβέστες απορροφώντας τα εκπεμπόμενα φωτόνια και αποδίδουν στη συνέχεια την ενέργεια αυτή με ελαστικές συγκρούσεις. Έτσι πετυχαίνονται ενισχύσεις μεγαλύτερες από 10^6.
- ***Έλεγχος πίεσης και ανάμειξη*** : Το μείγμα μας βρίσκεται σε αναλογία Ar:CO_2=92:8 και σε απόλυτη πίεση 2 barns. Το ροόμετρο της εισόδου είναι ικανό να δίνει μέγιστη ροή 5 lt/h για το CO_2 και 50 lt/h για το Ar, ενώ το ροόμετρο της εξόδου δίνει 55 lt/h για το μίγμα . Οι συνθήκες που εμείς έχουμε καθορίσει για την είσοδο και την έξοδο είναι αντίστοιχα 10.8% CO_2, 12.6% Ar και 10.6% για την έξοδο. Σύμφωνα λοιπόν και με τις μέγιστες τιμές των ροομέτρων, εύκολα μπορεί να κανείς να διαπιστώσει ότι έχουμε είσοδο 0.54 lt/h για CO_2 , 6.3 lt/h για το Ar (σύνολο 6.84 lt/h). Αν μάλιστα υπολογίσουμε τον όγκο του συστήματος από τη σχέση: $V = 16 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot l$ (για το σύστημα των 4x16 θαλάμων και με r=1.5 cm^2, l=100 cm, προκύπτει V=11300 cm^3=11,3 lt) , μπορούμε να βρούμε κάθε πόση ώρα αλλάζει το αέριο (στην περίπτωσή μας αλλάζει κάθε $\frac{11,3lt}{6,84lt/h} = 1,6h$). Η συνεχής ροή του μίγματος μέσα στο σωλήνα είναι απαραίτητη, ώστε να απομακρύνονται ανεπιθύμητες ουσίες που τυχόν υπάρχουν.

- ***Υψηλή τάση 1*** : Είναι η τάση εκείνη που εφαρμόζεται στο σύρμα και δημιουργεί το εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο. Ρυθμίζεται και ελέγχεται από ψηφιακή μονάδα. Συνήθεις τιμές αυτής είναι 2800-3100 Volts.
- ***Χαμηλή τάση***: Είναι η απαραίτητη τάση ώστε να λειτουργήσουν τα ηλεκτρονικά του σωλήνα (προενισχυτές). Η τιμή της είναι στα 5 Volts.
- ***Διευκρινιστής*** : Είναι γενικά μια ηλεκτρονική μονάδα η οποία μετατρέπει ένα αναλογικό σήμα εισόδου σε έναν συγκεκριμένο παλμό εξόδου, κάθε φορά που το πλάτος του σήματος εισόδου ξεπερνά ένα προκαθορισμένο κατώφλι τάσης. Η έξοδος ενός διευκρινιστή σε διάφορες μορφές εισόδου καθώς και ένα τυπικό κύκλωμα διευκρινιστή παρουσιάζονται στο σχήμα 7.
- ***Φωτοπολλαπλασιαστής***: Αποτελεί κύρια συσκευή των απαριθμητών σπινθηρισμού, ο οποίος έχει την ικανότητα να μετατρέπει εξαιρετικά μικρής έντασης φωτεινό παλμό ενός σπινθηριστή σε αντίστοιχο ηλεκτρικό σήμα, με βασικό πλεονέκτημα ότι δεν εισάγει μεγάλο θόρυβο στο σήμα. Η μεγάλη χρησιμότητά του στην διάταξή μας είναι ότι χρησιμοποιείται ως trigger, δηλαδή θα δηλώσει τη διέλευση σωματιδίου.
  Αξίζει να σημειώσουμε ότι οι φωτοπολλαπλασιαστές που χρησιμοποιούμε έχουν επιφάνεια εμβαδού 160 cm^2 περίπου. Υπολογίζεται ότι στην επιφάνεια της θάλασσας φτάνει 1 μιόνιο ανά cm^2 και ανά sec (βλ. Cosmic rays, T.K.Gaisser, T Stanev, 1995). Οπότε αναμένουμε 160 μιόνια/cm^2.sec σε κάθε σπινθηριστή. Επειδή όμως έχουμε δύο σπινθηριστές (και μάλιστα σε σύμπτωση) ο αριθμός των μιονίων που θα ανιχνεύουν θα είναι μικρότερος.
- ***Υψηλή τάση 2***: Είναι η τάση στην οποία στηρίζεται η λειτουργία του φωτοπολλαπλαστιαστή. Μάλιστα, θα πρέπει να σημειωθεί πως η ολική ενίσχυση που θα δώσει ο φωτοπολλαπλασιαστής εξαρτάται ισχυρά από την τάση αυτή. Η εφαρμοζόμενη στους σπινθηριστές τους συστήματός μας τάση είναι 2250 Volts.
- ***Σύμπτωση***: Αν και θα ασχοληθούμε με τη μονάδα αυτή πιο αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους, γενικά θα λέγαμε ότι είναι μία μονάδα η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδιορίσουμε αν δύο σήματα είναι ταυτοχρόνως παρόντα. Τα σήματα εισόδου περνούν συνήθως από τον διευκρινιστή, ώστε να παραχθούν συγκεκριμένοι παλμοί με πολύ καλά καθορισμένα τα άκρα τους. Ο ελάχιστος χρόνος ώστε να θεωρηθούν τα δύο σήματα εισόδου ως ταυτοχρόνως παρόντα ονομάζεται αλληλοεπικάλυψη σύμπτωσης (coincidence overlap) και είναι γενικά ~2 ns.



Σχήμα 7α: Απόκριση του διευκρινιστή σε τρεις παλμούς διαφορετικού ύψους.



Σχήμα 7β: Τυπικό κύκλωμα διευκρινιστή με το ολοκληρωμένο κύκλωμα μA 710

- ***Καθυστέρηση*** : Η καθυστέρηση μας βοηθάει ακριβώς να καθυστερήσουμε το σήμα μας και αυτό για να μπορέσει μια συγκεκριμένη μονάδα να το μετρήσει.
- ***Μονάδα ECL(emitter-coupled logic)***: Ανήκει στην οικογένεια των μονάδων CAMAC (σχήμα 8). Οι μονάδες CAMAC χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά δεδομένων και ελέγχου και είναι αναγκαία σε μεγάλα συστήματα που περιλαμβάνουν πολλούς απαριθμητές ή λογικές επεξεργασίες. Το ECL αποτελεί μία λογική οικογένεια και δίνει στην έξοδό του λογικό σήμα, με τιμές τάσης –1.75 V για το λογικό 1 και –0.90 V για το λογικό 0.

Σχήμα 8: Μονάδα CAMAC.

- ***TDC:*** (Time to Digital Convertor). Είναι μονάδα που μετατρέπει ένα χρονικό διάστημα μεταξύ δύο σημάτων σε ψηφιακό σήμα. Τα δύο χρονικά σήματα ενεργοποιούν το START και το STOP της μονάδας και ελέγχουν την έναρξη και τη λήξη της φόρτισης ενός πυκνωτή. Η χρονική διαφορά μετριέται συνήθως από τα άκρα του σήματος εισόδου. Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τρόποι λειτουργίας του TDC: η λειτουργία σε **common stop** και η λειτουργία σε **common start**. Ας τις εξετάσουμε με τη σειρά.

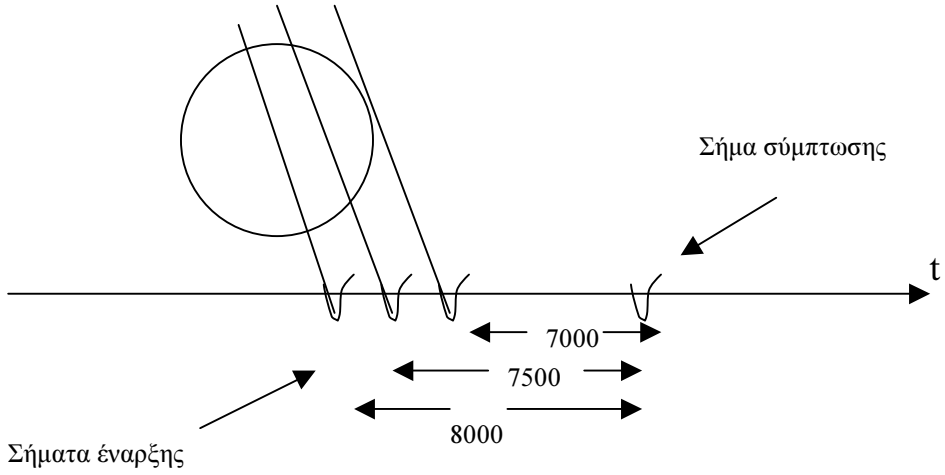
- ***Common Stop.***

Όπως είναι γνωστό, το TDC μετράει μόνο χρόνο και δίνει μόνο διαφορά χρόνων, μεταξύ των START και STOP σημάτων .

Στην περίπτωση αυτή, το TDC αρχίζει να μετράει μόλις πάρει το πρώτο σήμα από έναν σωλήνα και σταματάει μόλις πάρει το σήμα από τη μονάδα της σύμπτωσης. Η λειτουργία αυτή φαίνεται στο σχήμα 9.

Σωματίδιο που θα περάσει εφαπτομενικά του σωλήνα, θα δημιουργήσει χιονιστοιβάδα που θα φτάσει στο σύρμα (στο κέντρο του σωλήνα) πολύ αργότερα, από ό,τι ένα σωματίδιο που περνά από το κέντρο. Για το λόγο αυτό, σήματα που προκαλούνται πλησιέστερα στο σύρμα, προηγούνται στον άξονα του χρόνου.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση φαίνεται ότι δεν μπορώ να πάρω σήμα μεγαλύτερο από 8000 και μικρότερο από 7000 αυθαίρετες μονάδες χρόνου. Οι συγκεκριμένοι αυτοί χρόνοι υπολογίζονται, όπως προαναφέρθηκε, από το χρονικό φάσμα.



Σχήμα 9: Αρχή λειτουργίας του Common Stop. Οι χρόνοι είναι σε αυθαίρετες μονάδες

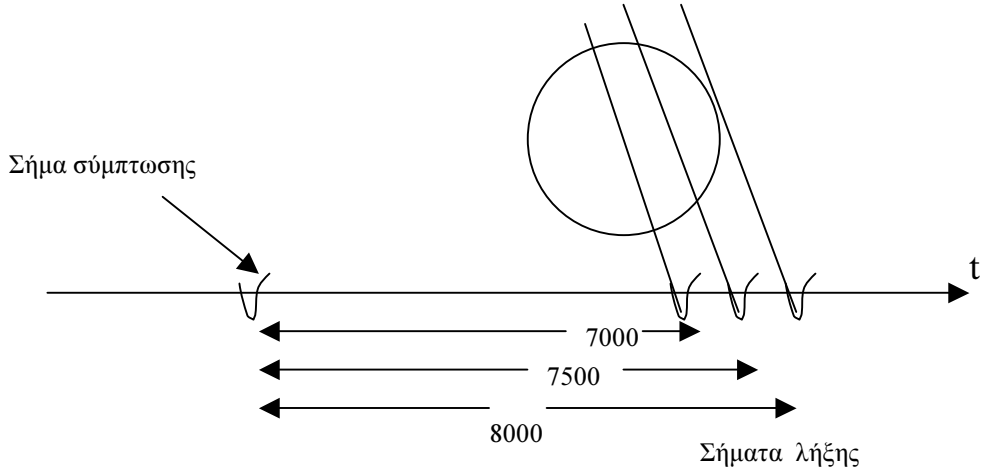
Έτσι λοιπόν, για να βρω τη **χρονική** απόσταση του κάθε σωματιδίου από το κέντρο θα πρέπει να αφαιρέσω από τον μέγιστο χρόνο (εδώ 8000) τον χρόνο του κάθε παλμού (π.χ 7000 ή 7500): το $1^{ο}$ σωματίδιο δημιούργησε χιονοστοιβάδα με χρόνο ολίσθησης 8000-8000=0 (πέρασε από το κέντρο) ενώ το $3^{ο}$ σωματίδιο δημιούργησε χιονοστοιβάδα με χρόνο ολίσθησης 8000-7000=1000 μονάδες χρόνου (πέρασε εφαπτομενικά).

- ***Common Start.***

Στην περίπτωση αυτή, το TDC αρχίζει να μετράει μόλις πάρει το πρώτο σήμα από τη σύμπτωση και σταματάει μόλις πάρει το σήμα από έναν σωλήνα, όπως φαίνεται στο σχήμα 10.

Και στην περίπτωση αυτή, σήματα που προκαλούνται πλησιέστερα στο σύρμα, προηγούνται στον άξονα του χρόνου.

Για να βρω τη χρονική διαφορά, θα πρέπει τώρα να αφαιρέσω από τον χρόνο του κάθε χτυπήματος τον ελάχιστο χρόνο (εδώ 7000). Στο πρώτο λοιπόν σωματίδιο αντιστοιχεί χρόνος 7000-7000=0, ενώ στο τρίτο αντιστοιχεί χρόνος 8000-7000=1000.



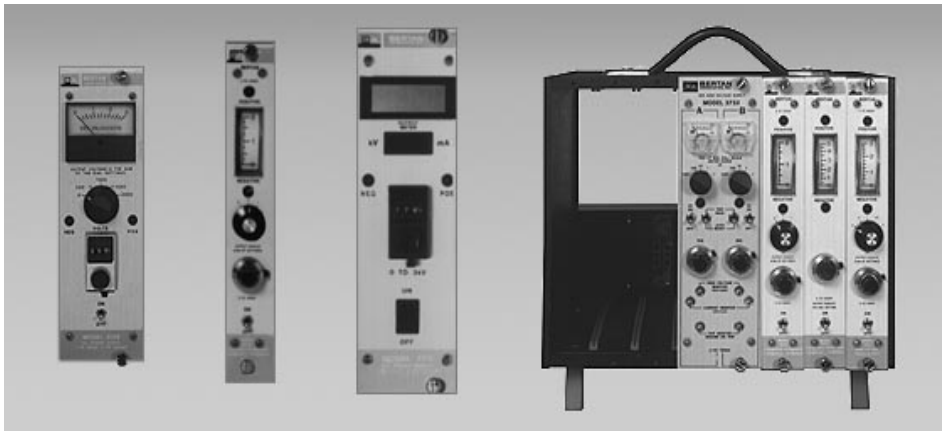
Σχήμα10: Αρχή λειτουργίας του Common Start. Οι χρόνοι είναι σε αυθαίρετες μονάδες

Κατά τη λήψη των δεδομένων, θέσαμε το TDC σε λειτουργία *Common Stop* ,αφού έτσι πετυχαίνουμε καλύτερη διακριτική ικανότητα.

Η μονάδα TDC που εμείς χρησιμοποιούμε έχει διακριτική ικανότητα 500 psec.

- ***GPIB interface:*** Είναι ο σύνδεσμος της επικοινωνίας του ηλεκτρονικού υπολογιστή με το υπόλοιπο σύστημα. Δια μέσου αυτού γίνεται και η εισαγωγή των δεδομένων στον ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι, εκτός από την ECL μονάδα και οι μονάδες TDC και GPIB είναι μονάδες CAMAC. Αντίθετα, οι μονάδες καθυστέρησης, σύμπτωσης και διευκρινιστή είναι μονάδες NIM. . Στις μονάδες τύπου NIM (σχήμα 11) περιέχονται μονάδες που δεν ελέγχονται από τον υπολογιστή και χρησιμοποιούνται σε μικρά συστήματα επεξεργασίας παλμών.



Σχήμα 11: Μονάδα NIM.

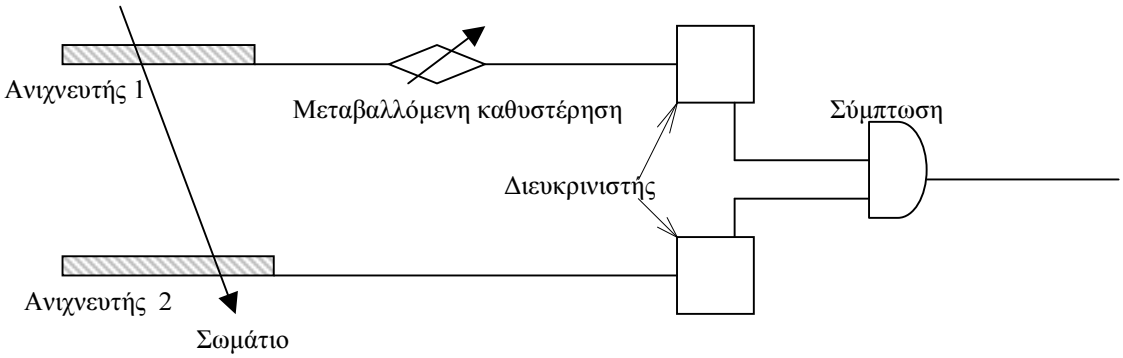
Καμπύλη σύμπτωσης των δύο σπινθηριστών.

Α. Θεωρητικά.

Αρχικά, πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, θα ήταν χρήσιμο να επισημάνουμε μερικά σημεία που αφορούν τόσο στη σκοπιμότητα της όλης διαδικασίας, όσο και στην αρχή λειτουργίας της μονάδας της σύμπτωσης.

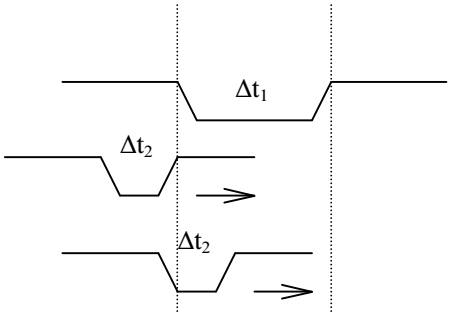
Υπάρχουν αρκετές περιπτώσεις, όπως και στην συγκεκριμένη, όπου επιθυμούμε να ξέρουμε, αν δύο σήματα από δύο ή περισσότερους ανιχνευτές σχετίζονται ως προς το χρόνο ή διαφορετικά, αν προκαλούνται από το **ίδιο** σωματίδιο.

Ας λάβουμε υπ'όψιν μας τη διάταξη του σχήματος 12: ένα σωματίδιο περνά από τον ανιχνευτή 1, διανύει κάποια συγκεκριμένη απόσταση, ώστε στο τέλος να περάσει μέσα από τον ανιχνευτή 2. Αν τα δύο σήματα που παίρνουμε στην έξοδο των δύο σπινθηριστών προέρχονται από το σωμάτιο αυτό (και δεν είναι για παράδειγμα, θόρυβος των ανιχνευτών), τότε θα περιμέναμε το σήμα από τον ανιχνευτή 2 να είναι πάντοτε καθυστερημένο, δηλαδή να έρχεται κατά κάποιο χρονικό διάστημα αργότερα, από το σήμα του ανιχνευτή 1. Μια μονάδα σύμπτωσης λοιπόν, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθορίσει αν τα δύο σήματα είναι μεταξύ τους ταυτόχρονα, δηλαδή προκαλούνται από το ίδιο σωμάτιο.



Σχήμα 12: Απλοποιημένο κύκλωμα σύπτωσης.

Το χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο η μονάδα της σύμπτωσης δίνει σήμα εξόδου λέγεται *πλάτος της σύμπτωσης* ή *χρόνος διάκρισης (resolving time).* Αυτή η ποσότητα, συνήθως προσδιορίζεται από το πλάτος των παλμών εισόδου, όπως φαίνεται στο σχήμα 13. Η μονάδα σύμπτωσης θα δίνει έξοδο όσο τα σήματα εισόδου 1 και 2 είναι παρόντα για χρόνο περισσότερο από την αλληλοεπικάλυψή τους. . Έτσι λοιπόν, αν φανταστούμε τον παλμό 1 να είναι σταθερός και μεταβάλουμε τον παλμό 2, θα πάρουμε αλληλοεπικάλυψη από τη στιγμή που η *ουρά* του παλμού 2 θα ακουμπήσει την αρχή του παλμού 1 μέχρι τη στιγμή που η αρχή του παλμού 1 θα ακουμπήσει την ουρά του παλμού 1.



Σχήμα 13: Παλμοί εισόδου σε μονάδα σύμπτωσης

Στο γεγονός ότι οι παλμοί μας έχουν πλάτος, οφείλεται και το πλατό που παρατηρούμε στις καμπύλες σύμπτωσης.

Β. Πειραματική Πορεία.

Το πρώτο μας βήμα, πριν από τη λήψη μετρήσεων, ώστε να κατασκευάσουμε το χρονικό φάσμα των σωλήνων ολίσθησης, ήταν να θέσουμε τους δύο σπινθηριστές σε ταυτοχρονισμό παρεμβάλλοντας, στο σήμα του ενός, κατάλληλη καθυστέρηση.

Η καθυστέρηση που βάζουμε κάθε φορά πετυχαίνεται με τη χρήση καλωδίων, κάθε ένα από τα οποία είναι έτσι κατασκευασμένο ώστε να δίνει μια ποικιλία τιμών καθυστέρησης, από 1 nsec έως 20 nsec περίπου.

Τοποθετώντας λοιπόν διαφορετικές τιμές καθυστέρησης στο δεύτερο σπινθηριστή (αυτόν που βρίσκεται πιο χαμηλά), παίρνουμε τον αριθμό των γεγονότων (rate) χρησιμοποιώντας έναν μετρητή (scaler) ανά συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και κατασκευάζουμε την καμπύλη του σχήματος 14. Στη συνέχεια τοποθετούμε ανάμεσά τους πηγή ^{22}Να και παίρνουμε την καμπύλη του σχήματος 15. Τέλος, πλησιάζουμε πιο κοντά τους δύο σπινθηριστές (σε απόσταση 13,5 cm) και παίρνουμε την καμπύλη του σχήματος 16. Τις πειραματικές τιμές μπορεί κανείς να δει στο παράρτημα.

Γ. Συμπεράσματα.

Αρχικά, αν θελήσουμε να σχολιάσουμε τη γενική μορφή της καμπύλης, θα μπορούσαμε να δούμε την παρουσία πλατώ, όπως ακριβώς προαναφέρθηκε και αιτιολογήθηκε στην παράγραφο Α. Επίσης παρατηρούμε τις «ουρές» στις άκρες της καμπύλης. Αυτές οφείλονται στα **τυχαία γεγονότα** : είναι δυνατόν, κατά τύχη, δύο σωματίδια, που περιέχονται μέσα στον λεγόμενο *θόρυβο,* να προκαλέσουν **ταυτόχρονα** δύο σήματα στους ανιχνευτές και μάλιστα μέσα στα όρια του χρόνου διάκρισης, οπότε αυτό να φανεί στην καμπύλη.

Έτσι λοιπόν, καθώς αυξάνεται ο χρόνος καθυστέρησης, τόσο αυξάνει και ο χρόνος αλληλοεπικάλυψης των δύο σπινθηριστών (αριστερή αύξουσα γραμμή) μέχρι να φτάσουμε στο πλατώ. Εκεί, υπάρχει συνεχής και ολοκληρωτική επικάλυψη των δύο σημάτων. Όσο όμως μεγαλώνουμε την καθυστέρηση του ενός ως προς του άλλου, μειώνεται η αλληλοεπικάλυψη και παίρνουμε τη δεξιά φθίνουσα γραμμή της καμπύλης.

Αν προχωρήσουμε σε ένας ποιοτικό σχολιασμό των τριών καμπυλών, θα μπορούσαμε να πούμε ότι στην περίπτωση που έχουμε την πηγή ^{22}Να έχουμε υψηλότερο ρυθμό γεγονότων απ' ότι στην περίπτωση της κοσμική ακτινοβολίας. Αυτό οφείλεται στο ό,τι έχουμε περισσότερα σωματίδια στην πρώτη περίπτωση, οπότε και μεγαλύτερη πιθανότητα σύμπτωσης των δύο ανιχνευτών. Άλλωστε, πάντα η χρήση μιας ραδιενεργούς πηγής μας δίνει καλύτερη στατιστική.

Επιπλέον, θα πρέπει να σημειώσουμε το γεγονός ότι έχουμε μεγαλύτερο ρυθμό γεγονότων ,όταν οι δύο ανιχνευτές έρθουν πιο κοντά. Αυτό εξηγείται, αν σκεφτούμε ότι στην περίπτωση αυτή, υπάρχει πιο μεγάλη πιθανότητα ένα σωμάτιο που πέρασε από τον ανιχνευτή 1 να περάσει και από τον ανιχνευτή 2.

Τέλος, είναι σημαντικό να υπενθυμίσουμε ότι και στις τρεις γραφικές παραστάσεις που προηγήθηκαν το σφάλμα στην τιμή του ρυθμού βρέθηκε από τη σχέση :

$$\sigma_R = \pm\sqrt{R} \tag{10}$$

όπου R είναι η τιμή του ρυθμού.

Χρονικό φάσμα σωλήνα ολίσθησης

Εάν προσπαθήσουμε να καταγράψουμε για κάθε σωλήνα, το χρόνο ολίσθησης των σωματιδίων που πέρασαν από το σωλήνα αυτόν (ιστόγραμμα), θα πάρουμε το λεγόμενο χρονικό φάσμα. Ένα χρονικό φάσμα παρουσιάζεται στο σχήμα 17.

Το συγκεκριμένο χρονικό φάσμα αναφέρεται στο σωλήνα 15 του 4x4 θαλάμου MDT. Κατά τη διάρκεια του πειράματος είχαμε την υψηλή τάση στα 3000 Volts και το κατώφλι του διευκρινιστή στα 25 mVolts. Ας δούμε λοιπόν και ας ερμηνεύσουμε το χρονικό αυτό φάσμα.

Αρχικά, στον οριζόντιο άξονα βάλαμε το χρόνο που παίρνουμε από το TDC. Αυτός ο χρόνος είναι ο χρόνος ολίσθησης και μετατρέπεται σε απόσταση από το κέντρο του σωλήνα, όπως θα δούμε παρακάτω, με μιά σχέση r-t χαρακτηριστική για κάθε μείγμα. Στον κατακόρυφο άξονα βάλαμε τον αριθμό των γεγονότων (συχνότητα) που έδωσαν αντίστοιχο χρόνο ολίσθησης.

Παρατηρούμε ένα πλατώ, ενώ δεξιά και αριστερά αυτού έχουμε κατακόρυφη πτώση και μηδενικές – σχεδόν- τιμές συχνότητας. Επίσης παρατηρούμε μιά έντονη κορυφή – ακίδα στο δεξιό άκρο[2] του πλατώ.

Είναι λοιπόν φανερό ότι το δεξιό και το αριστερό άκρο καθορίζουν τις διαστάσεις του μισού σωλήνα. Και αυτό γιατί ολισθήσεις συμβαίνουν μόνο μέσα στο αέριο του σωλήνα και αυτές δίνουν παλμό στο εσωτερικό σύρμα. Είναι οι διαστάσεις του μισού σωλήνα για το λόγο ότι έχουμε κυλινδρική συμμετρία και μάλιστα τυχαία γεγονότα. Οι τιμές εκτός του διαστήματος ολίσθησης (drift space) του φάσματος δεν είναι ακριβώς μηδενικές, όπως προαναφέρθηκε. Το γεγονός αυτό οφείλεται σε ηλεκτρονικό θόρυβο που εισάγουν τα όργανα του συστήματος.

Το πλατώ εξηγείται από την μη προτιμητέα κατεύθυνση του σωματιδίου. Έτσι λοιπόν ο αριθμός των σωματίδιων που έδωσε χρόνο t, δηλαδή πέρασε από απόσταση r από το κέντρο του σωλήνα, είναι ο ίδιος με τον αριθμό των σωματιδίων που έδωσε χρόνο t ±dt, δηλαδή που πέρασε σε απόσταση r±dr από το κέντρο του σωλήνα. Δηλώνεται με άλλα λόγια η ομοιόμορφη ακτινοβόληση του σωλήνα από κοσμική ακτινοβολία.

[2] Η κορυφή εμφανίζεται στα δεξιά λόγω της Common Stop λειτουργίας του TDC. Στην περίπτωση του Common Start θα είχαμε κατοπτρική αντιστροφή του φάσματος.

Αν θελήσουμε να ερμηνεύσουμε την κορυφή, θα πρέπει να παρατηρήσουμε κυρίως ότι αυτή βρίσκεται στο άκρο του φάσματος, δηλαδή πολύ κοντά στο εσωτερικό σύρμα. Το ηλεκτρικό πεδίο εκεί είναι λοιπόν ισχυρό με αποτέλεσμα ο χρόνος που μετράμε να μην είναι ανάλογος της απόστασης.

Η χρησιμότητα του χρονικού φάσματος είναι πολύ σημαντική. Εάν πάρουμε το χρονικό φάσμα του κάθε σωλήνα και το μετατοπίσουμε πάνω στον άξονα των χρόνων (παρεμβάλοντας καθυστερήσεις) έτσι, ώστε η μία άκρη του (εδώ η αριστερή) να πέσει στο μηδέν (t_{min}=0) τότε, και με τη χρησιμοποίησης της άλλης άκρης (t_{max}) μπορούμε να προσδιορίσουμε το χρόνο $t=t_{max}-t_{min}$, δηλαδή τον μέγιστο χρόνο ολίσθησης, και με την ύπαρξη ίδιων συνθηκών ολίσθησης, αυτοί πρέπει να είναι οι ίδιοι. Άλλωστε, από τη στιγμή που μετρώ το χρόνο ολίσθησης με ακρίβεια, μπορώ να πάρω με ακρίβεια και τη θέση του σωματιδίου από την r-t σχέση του συγκεκριμένου αερίου.

Λογισμικό Πρόγραμμα Κατασκευής Τροχιάς μιονίου, σε θάλαμο MDT.

Στόχος του συγκεκριμένου προγράμματος είναι ο υπολογισμός και η χάραξη της τροχιάς ενός μιονίου, όταν αυτό διέλθει μέσα από ένα MDT θάλαμο.

Ο προγραμματισμός έγινε σε γλώσσα LabView, ενώ ο κώδικας φαίνεται στο παράρτημα. Επίσης στο παράρτημα παρατίθενται το διάγραμμα ροής καθώς επίσης και επεξηγήσεις για τη δουλειά που κάνει η κάθε υπορουτίνα που χρησιμοποιήθηκε. Στην εικόνα 18 φαίνεται το αποτέλεσμα στην οθόνη του υπολογιστή κατά την εφαρμογή του προγράμματος.

Η κατασκευή του προγράμματος απαίτησε αρχικά το σχεδιασμό μιας κάθετης τομής του θαλάμου MDT. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπως προαναφέρθηκε αρχικά, χρησιμοποιήσαμε έναν θάλαμο από τέσσερις σωλήνες διατεταγμένους σε τέσσερα επίπεδα(layers), όπως ακριβώς παρουσιάζονται στο κυρίως πλαίσιο της οθόνης. Στο σχεδιασμό, κάθε σωλήνας σχεδιάστηκε με ακτίνα 2 cm και σε κόκκινο χρώμα.

Η κατασκευή των δεδομένων εισόδου στο πρόγραμμα στηρίχθηκε στην λήψη των δεδομένων από το TDC. Με άλλα λόγια, κατά την εκκίνηση του προγράμματος ζητείται από τον χρήστη να επιλέξει το αρχείο (data file) από το οποίο το πρόγραμμα θα παίρνει δεδομένα εισόδου. Το αρχείο αυτό έχει δημιουργηθεί κατά τη διάρκεια πειράματος, με τη χρήση του TDC, και παρέχει σε κάθε γεγονός (event)[3] το χρόνο που μέτρησε το TDC και το αντίστοιχο κανάλι. Όπως φαίνεται στην εικόνα 18, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να βλέπει ποιο γεγονός παρουσιάζεται στην οθόνη, ενώ παράλληλα μπορεί να συνεχίσει με το επόμενο γεγονός χρησιμοποιώντας την επιλογή NEXT EVENT.

Στη συνέχεια, σε κάθε γεγονός, και μέσα σε σωλήνα στον οποίο υπήρχε χτύπημα, σχεδιάζεται ένας εσωτερικός κύκλος (πράσινο χρώμα), του οποίου η ακτίνα υπολογίζεται από τον αντίστοιχο χρόνο που παίρνει το TDC. Η περιφέρεια του κύκλου υποδηλώνει τη σχετική θέση, ως προς το κέντρο του κύκλου, από την οποία πέρασε

[3] Θα ορίζουμε ως **γεγονός (event)** το σύνολο των χτυπημάτων (hits) που πραγματοποιήθηκαν στους σωλήνες από τη στιγμή που το TDC ξεκινά τη μέτρηση, μέχρι να σταματήσει τη συγκεκριμένη μέτρηση.

αρχικά το μιόνιο. Είναι λοιπόν αρκετά ενδιαφέρον να δούμε τον τρόπο με το οποίο υπολογίζεται η ακτίνα από το χρόνο.

Αφού γνωρίζουμε ότι το TDC λειτουργεί σε Common Stop, από το χρονικό φάσμα λαμβάνουμε τον μέγιστο χρόνο, οπότε αφαιρούμε κάθε φορά από τον χρόνο αυτόν τον χρόνο που δίνει το TDC, όπως παρουσιάστηκε παραπάνω. Από τη στιγμή που βρέθηκε η χρονική απόσταση της τροχιάς από το κέντρο του σωλήνα, η χωρική απόσταση υπολογίζεται με τη μέθοδο των τριών με τη λογική:

μέγιστος χρόνος t_o (εφαπτομενική διέλευση) αντιστοιχεί σε κύκλο ακτίνας r_o=2cm (περιφέρεια σωλήνα)
χρόνος t αντιστοιχεί σε κύκλο ακτίνας r

οπότε προκύπτει ότι:

$$r = \frac{2t}{t_o} \tag{11}$$

Με γνωστή πλέον την απόσταση r σχεδιάζεται εσωτερικός κύκλος, λόγω της κυλινδρικής συμμετρίας γύρω από το σύρμα.

Θα πρέπει να τονίσουμε στο σημείο αυτό ότι όλα τα προηγούμενα προϋποθέτουν **γραμμική** r-t σχέση. Αυτή όμως δεν είναι και η πραγματικότητα. Χαρακτηριστικά πειράματα (βλ. ATL-MUON-2000-006: Results from the 1998 test beam of the Calypso chamber filled with an Ar-CO_2 gas mixture) δείχνουν ότι υπάρχει απόκλιση από τη γραμμικότητα, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει συνάρτηση της μορφής r=at , ειδικά στις πολύ μικρές αποστάσεις από το σύρμα.

Στη δικιά μας περίπτωση, δεν γνωρίζουμε με ακρίβεια τη συνάρτηση r(t). Μπορούμε όμως να θεωρήσουμε, με μικρή ή μεγάλη προσέγγιση, γραμμική τη σχέση, ώστε να διευκολυνθούμε στα επόμενα βήματα.

Αφού λοιπόν έχουμε εντοπίσει από ποιους σωλήνες πέρασε το σωματίδιο και σε ποια απόσταση από το κέντρο, το επόμενο στάδιο είναι να χαράξουμε μια ευθεία η οποία θα αντιπροσωπεύει την τροχιά του σωματιδίου (κίτρινη γραμμή).

Ο προσδιορισμός της καλύτερης τροχιάς στους διάφορους σωλήνες μπορεί να γίνει με την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των ελαχίστων τετραγώνων των αποστάσεων των κέντρων των σωλήνων από την αντίστοιχη ευθεία ελαχίστων τετραγώνων, δηλαδή της ποσότητας

$$x^2 = \sum_i \Delta_i^2 \tag{12}$$

όπου Δ_i είναι η απόσταση του i-χτυπήματος από την ευθεία ελαχίστων τετραγώνων. Μάλιστα, από την απλή γεωμετρία είναι:

$$\Delta_i = \frac{\left| mx_i + c - y_i \right|}{\sqrt{1+m^2}} - r_i \tag{13}$$

όπου x_i , y_i και r_i είναι η συντεταγμένες του κέντρου του σωλήνα και η ακτίνα του χτυπήματος.

Η ευθεία ελαχίστων τετραγώνων θα είναι τότε της μορφής:

$$y = mx + c \tag{14}$$

Πιο συγκεκριμένα, το πρόγραμμα αρχικά παίρνει δύο αντιδιαμετρικά σημεία από κάθε χτύπημα (hit). Στη συνέχει παίρνει όλους τους δυνατούς συνδυασμούς των

σημείων αυτών και βρίσκει την ευθεία ελαχίστων τετραγώνων που διέρχεται από τα σημεία αυτά (σχέση 11) και έπειτα υπολογίζει το τετράγωνο της απόστασης του κάθε σημείου που *χρησιμοποιήθηκε* από την ευθεία αυτήν (σχέση 10). Η ελαχιστοποίηση αυτής της ποσότητας (σχέση 9) θα δώσει την καλύτερη αντίστοιχη ευθεία ελαχίστων τετραγώνων.

Το συγκεκριμένο πρόγραμμα χρησιμοποιεί συνδυασμούς χτυπημάτων, παίρνοντας ένα (ή κανένα) κάθε φορά σημείο από **κάθε επίπεδο (layer).** Έτσι λοιπόν δε θα είναι σε θέση να σχεδιάσει την ευθεία για ένα γεγονός που έχει μόνο τέσσερα σημεία στο ίδιο επίπεδο , δηλαδή για ένα σωματίδιο που πέρασε **οριζόντια.**

Σημαντική λειτουργία είναι και η δυνατότητα αποκοπής γεγονότων που είναι εκτός των ορίων που καθορίζονται από τον χρήστη, όπως φαίνεται στην εικόνα 1. Το όριο αυτό λαμβάνεται από το χρονικό φάσμα και έχει ως σκοπό να κρατήσει μόνο τους χρόνους που αντιστοιχούν στο πλατώ του φάσματος και προφανώς υποδηλώνουν τα γεγονότα που πραγματοποιήθηκαν μέσα στο σωλήνα. Στην οθόνη δίνεται ο αριθμός των χτυπημάτων που παραλήφθηκαν και από ποιους σωλήνες.

Αξίζει να τονιστεί ότι δεν έγινε συστηματική επιλογή των γεγονότων. Αυτό σημαίνει ότι θα σχεδιαστεί μια ευθεία ακόμα και με δύο χτύπημα, πράγμα άτοπο από φυσικής πλευράς, αφού δεν είναι δυνατή η διέλευση σωματιδίου μόνο από δύο σωλήνες. Είναι ο λεγόμενος **θόρυβος (noise)** που προέρχεται από τυχαία γεγονότα του περιβάλλοντος, που όμως , επειδή ακριβώς ήταν τυχαία, βρέθηκαν εντός των ορίων που προαναφέρθηκαν. Γενικότερες, σχετικές με το πρόβλημα αυτό, παράμετροι δε λήφθηκαν υπόψιν.

Τέλος, οι μελλοντικές προεκτάσεις του προγράμματος αφορούν τόσο τη βελτίωση του λογισμικού τμήματος όσο και την φιλικότερη προς τον χρήστη εικόνα. Έτσι λοιπόν μπορούμε σε γενικές γραμμές ότι προβλέπεται στο πρόγραμμα να προστεθούν:

- ✓ Δυνατότητα εισαγωγής της συνάρτησης r=r(t), η οποία έχει θεωρηθεί γραμμική. Είναι δυνατόν να δημιουργηθεί μια βάση δεδομένων, η οποία θα περιέχει τη σχέση r(t) για κάθε αναλογία του μείγματος αερίων.
- ✓ Δυνατότητα επιλογής κάποιου συγκεκριμένου γεγονότος με τυχαία προσπέλαση και όχι σειριακά, όπως γίνεται στην παρούσα έκδοση. Αυτό σημαίνει ότι ο χρήστης θα μπορεί να κινείται είτε σε προηγούμενα είτε σε επόμενα γεγονότα.
- ✓ Δυνατότητα ελέγχου και απόρριψης ανεπιθύμητων παλμών, ώστε να μην επηρεάζεται η ευθεία ελαχίστων τετραγώνων.

Βιβλιογραφική Αναφορά

- ATLAS Muon Notes
- Blum W., Rolandi L. : Particle Detection with drift chambers.
- Fernow R. : Introduction to experiment particle physics.
- William R. Leo : Techniques for Nuclear and Particle physics experiments: a how-to approach.
- Μ. Χαρδάλας – Σ. Δεδούσης : Όργανα και Μεθοδολογία Πυρηνικής Φυσικής.

Π α ρ ά ρ τ η μ α

Α. Πειραματικές τιμές για τη χάραξη της καμπύλης σύμπτωσης.

- α. Κοσμική ακτινοβολία

α/α	Σχετική καθυστέρηση (nsec)	Ρυθμός / 3 min	Σφάλμα
1.	-46	2	1,414214
2.	-43	2	1,414214
3.	-40	12	3,464102
4.	-38	52	7,211103
5.	-34	53	7,28011
6.	-32	52	7,211103
7.	-24	48	6,928203
8.	-16	70	8,3666
9.	-15	72	8,485281
10.	-14	62	7,874008
11.	-13	62	7,874008
12.	-12	59	7,681146
13.	-11	63	7,937254
14.	-10	56	7,483315
15.	-9	54	7,348469
16.	-8	64	8
17.	0	61	7,81025
18.	8	63	7,937254
19.	9	64	8
20.	10	58	7,615773
21.	11	56	7,483315
22.	12	44	6,63325
23.	13	45	6,708204
24.	14	59	7,681146
25.	15	57	7,549834

26.	16	59	7,681146
27.	24	53	7,28011
28.	32	55	7,416198
29.	34	63	7,937254
30.	38	41	6,403124
31.	40	11	3,316625
32.	43	3	1,732051
33.	46	2	1,414214

- β. Ακτινοβολία από πηγή ^{22}Na

α/α	Σχετική καθυστέρηση (nsec)	Ρυθμός / min	Σφάλμα
1.	-62	57	7,549834
2.	-54	77	8,774964
3.	-50	87	9,327379
4.	-48	125	11,18034
5.	-44	355	18,84144
6.	-40	1181	34,36568
7.	-38	1497	38,69108
8.	-32	1866	43,19722
9.	-24	1816	42,61455
10.	-16	1863	43,16248
11.	-8	1935	43,98863
12.	0	1887	43,43961
13.	8	1927	43,89761
14.	16	1834	42,82523
15.	24	1798	42,40283
16.	32	1868	43,22037
17.	36	1845	42,95346
18.	38	1641	40,50926
19.	40	1420	37,68289
20.	42	753	27,44085
21.	44	412	20,29778
22.	46	364	19,07878
23.	50	167	12,92285
24.	54	80	8,944272
25.	56	70	8,3666
26.	58	83	9,110434
27.	64	87	9,327379

- γ. Κοσμική ακτινοβολία με απόσταση σπινθηριστών 13.5 cm.

α/α	Σχετική καθυστέρηση (nsec)	Ρυθμός / 3 min	Σφάλμα
1.	-56	3	1,732051
2.	-50	5	2,236068
3.	-46	3	1,732051
4.	-44	3	1,732051
5.	-40	105	10,24695
6.	-36	131	11,44552
7.	-32	145	12,04159
8.	-24	168	12,96148
9.	-16	136	11,6619
10.	-8	164	12,80625
11.	0	132	11,48913
12.	8	134	11,57584
13.	16	159	12,60952
14.	24	152	12,32883
15.	32	117	10,81665
16.	36	112	10,58301
17.	40	88	9,380832
18.	44	5	2,236068
19.	46	6	2,44949
20.	50	5	2,236068
21.	56	3	1,732051

Β. **Επεξήγηση των ρουτίνων και των υποπρογραμμάτων.**

(κατά αλφαβητική σειρά).

Background: **Ζωγραφίζει τους 4x4 σωλήνες.**
Create Circles: **Δημιουργεί κύκλους. Δεν προσδιορίζεται το κέντρο και η ακτίνα.**
Create Circle centres: **Δημιουργεί τις συντεταγμένες των κέντρων των σωλήνων: 4 σωλήνες σε 4 επίπεδα, εφαπτόμενοι.**
Create Points of a circle: **Δημιουργεί 201 σημεία ενός κύκλου, χρησιμοποιώντας το ημίτονο και το συνημίτονο γωνίας.**
Create the inner circles: **Δημιουργεί τους εσωτερικούς κύκλους, με δεδομένη το κέντρο και την ακτίνα. Είναι το drift space.**
Extract channel information: **Από τα δεδομένα του TDC, αποκωδικοποιεί τον σωλήνα στον οποίο έγινε η καταγραφή.**
Extract hit information: **Από τα δεδομένα του TDC, αποκωδικοποιεί τον χρόνο στο οποίο έγινε η καταγραφή.**
Input: **Είναι η είσοδος των δεδομένων: οι συντεταγμένες του σωλήνα (x,y) και ο αντίστοιχος χρόνος.**
Linear fit: **Κατασκευάζει την καλύτερη ευθεία.**
Linear fit (step 1): **Αναλύει το κέντρο (x,y) κάθε σωλήνα που «χτυπήθηκε» σε δύο διαμετρικά αντίθετα σημεία, αφαιρώντας και προσθέτοντας την ακτίνα r : (x+r,y) και (x-r,y).**
Linear fit (step 1a): **Χωρίζει τα παραπάνω σημεία στα τέσσερα επίπεδα.**
Linear fit (step 2): **Παίρνει όλους τους δυνατούς συνδυασμούς των σημείων αυτών, υπολογίζει την ευθεία ελαχίστων τετραγώνων που περνά από τα σημεία αυτά καθώς επίσης και το άθροισμα των τετραγώνων των**

αποστάσεων των σημείων από την ευθεία. Έχει δε ως έξοδο το άθροισμα αυτό και τους αντίστοιχούς συντελεστές a,b της ευθείας.

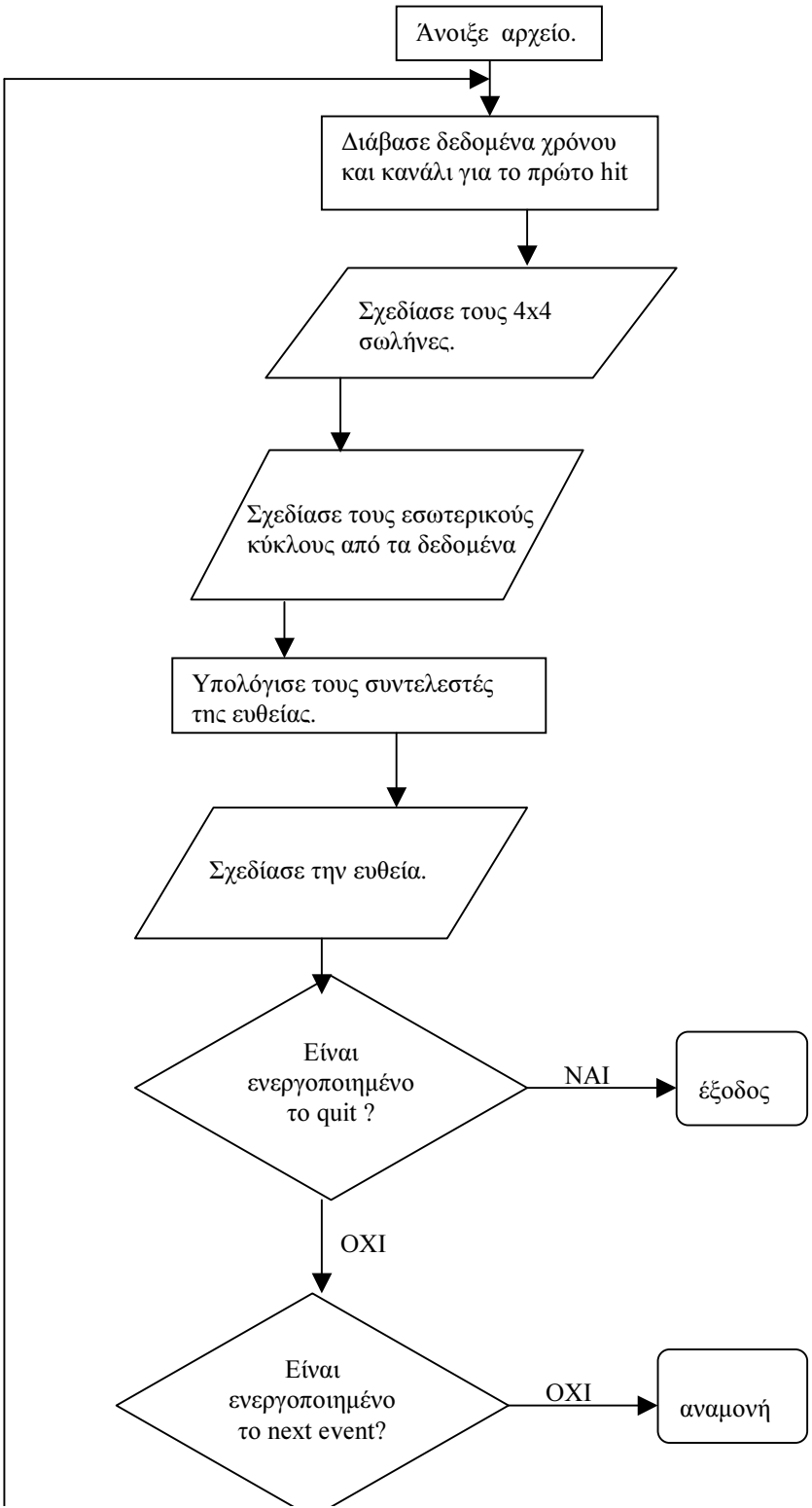
Linear fit (step 2a): **Απορρίπτει όλους τους συνδυασμούς που περιέχουν μέσα μηδενικά, δηλαδή τα επίπεδα που δεν είχαν χτύπημα.**

Linear fit (step 3): **Βγάζει το ελάχιστο άθροισμα των τετραγώνων και τους συντελεστές a,b της ευθείας που αντιστοιχεί στο άθροισμα αυτό.**

Main: **Είναι το κυρίως πρόγραμμα το οποίο ανοίγει το αρχείο δεδομένων και στη συνέχεια το επεξεργάζεται με όλες τις υπορουτίνες που έχει.**

No noise: **Απορρίπτει τα γεγονότα που είναι εκτός του drift space. Το άνω και κάτω όριο χρόνων το δίνει ο χρήστης.**

Plot of a line: **Σχεδιάζει μια ευθεία με 26 σημεία με δεδομένους τους συντελεστές a, b.**

Translate: **Αποκωδικοποιεί το αρχείο δεδομένων του TDC και βγάζει το χρόνο που μέτρησε και τον αντίστοιχο σωλήνα.**

Γ. Διάγραμμα Ροής του main.vi