# Πειραματική Φυσική Υψηλών Ενεργειών στο ΕΜΠ

Τη δραστηριότητα στην πειραματική Φυσική Υψηλών Ενεργειών (ΦΥΕ) στο ΕΜΠ την ξεκίνησε ο αείμνηστος καθηγητής Αναστάσιος Φίλιππας. Ο Φίλιππας το 1958 πήρε υποτροφία (πρόγραμμα Fulbright, ΗΠΑ) και έκανε διδακτορικό στο πανεπιστήμιο Carnegie Institute of Technology (Carnegie Mellon University) στην πόλη Pittsburgh της πολιτείας Pennsylvania των ΗΠΑ. Το 1964 διορίστηκε στο Δημόκριτο ως ερευνητής. Το 1975 διορίζεται Έκτακτος Καθηγητής στο ΕΜΠ όπου πλαισιώθηκε με νέους ερευνητές που προσέλαβε και σχημάτισε μια πειραματική ομάδα ΦΥΕ. Από τότε (1975) αρχίζει η πειραματική δραστηριότητα του ΕΜΠ στη ΦΥΕ με πειράματα στο CERN. Στη συνέχεια αναφερόμαστε σε μερικά πειράματα στα οποία συμμετείχε η ομάδα του ΕΜΠ.

**1) Μελέτη αντιδράσεων $\bar{p}p$ σε 7,3 GeV/c**

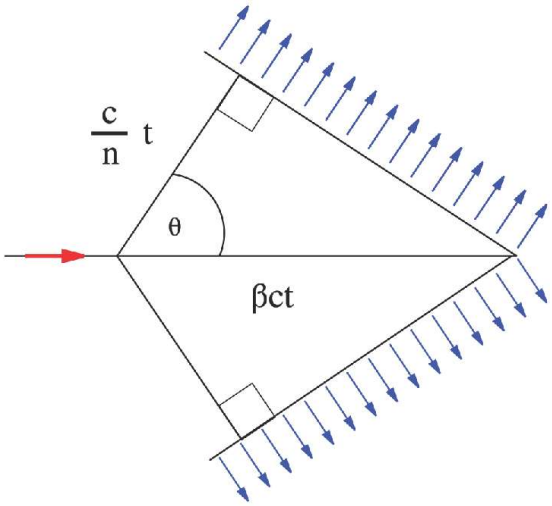
Πανεπιστήμιο Λίβερπουλ, NIKHEF Amsterdam, Ινστιτούτο Βιέννης, Πανεπιστήμιο Αθηνών, ΚΠΕ Δημόκριτος, ΕΜΠολυτεχνείο.

Πρόκειται για πείραμα θαλάμου φυσαλίδων. Τα αντιπρωτόνια συγκρούονται και αλληλεπιδρούν με τα πρωτόνια του υγρού υδρογόνου του θαλάμου φυσαλίδων του CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire ή European Council for Nuclear Research, Ευρωπαϊκό Κέντρο Πυρηνικών Ερευνών). Οι τροχιές των παραγόμενων σωματιδίων, φωτογραφίζονταν και η ανάλυση των φωτογραφιών έγινε στα παραπάνω συνεργαζόμενα Ιδρύματα, δηλαδή μέρος αυτής της ανάλυσης έγινε στο ΕΜΠ.

**2) Μελέτη αντιδράσεων φωτοπαραγωγής (photoproduction) σε υψηλές ενέργειες και με μεγάλες εντάσεις δέσμης, δηλαδή μεγάλες ροές φωτονίων. Πείραμα NA14 (NA14/1, NA14/2).**

CERN, College de France, Ecole Polytechnique, Imperial College, Orsay, Saclay, Southampton, Strasbourg, Warsaw και ΕΜΠ .
( NA14 Collaboration)

Αυτό είναι πείραμα με ηλεκτρονικούς ανιχνευτές. Το πείραμα έγινε στο CERN σε δυο φάσεις (NA14/1, NA14/2) στον επιταχυντή SPS (Super Proton Synchrotron, Υπερσύγχροτρον Πρωτονίων). Χρησιμοποιήθηκε δέσμη φωτονίων. Τα φωτόνια αλληλεπιδρούν με τα νουκλεόνια του στόχου και παράγοντα διάφορα σωματίδια. Το κάθε φωτόνιο της δέσμης είχε ενέργεια 80 GeV. Η ένταση της δέσμης φωτονίων ήταν πολύ μεγάλη, της τάξης $10^7$ φωτόνια ανά παλμό. Οι ανιχνευτές καταγράφουν ηλεκτρικά σήματα (ηλεκτρικούς παλμούς) που δημιουργεί η διέλευση μέσα από τους ανιχνευτές των σωματιδίων τα οποία παράγονται κατά τις αλληλεπιδράσεις φωτοπαραγωγής. Από αυτά τα σήματα, προσδιορίζονται οι τροχιές των σωματιδίων.
Στην πρώτη φάση του πειράματος, NA14/1, από τους βασικούς στόχους ήταν η μελέτη της βαθιάς (σκληρής) σκέδασης φωτονίου με ένα από τους δομικούς λίθους των νουκλεονίων του στόχου (δηλαδή ένα παρτόνιο που είναι κουάρκ ή γκλουόνιο). Αυτό οδηγούσε στην παραγωγή πιδάκων σωματιδίων. Οι πίδακες παραγόμενων σωματιδίων σχετίζονται με βαθιά σκέδαση. Συγκεκριμένα, το εξερχόμενο από τη σκέδαση παρτόνιο δε μπορεί να υπάρξει ως τέτοιο και να καταγραφεί από τους ανιχνευτές. Όπως λέμε, ντύνεται και σχηματίζει πίδακα συνήθων σωματιδίων, που είναι πιόνια, καόνια και άλλα. Τα σωματίδια έχουν διανυσματικές ορμές κοντά η μια στην άλλη κατά τη φορά του εξερχόμενου παρτονίου, έτσι έχομε τους λεγόμενους πίδακες σωματιδίων. Στη δεύτερη φάση έγινε μελέτη φωτοπαραγωγής σωματιδίων με κβαντικό αριθμό charm (τσαρμ, γοητεία). Συγκεκριμένα, ανιχνεύτηκαν τα παρακάτω σωματίδια που περιέχουν τσαρμ κουάρκ, $D^*$, D , $D_s$ και $\Lambda_c$, και μετρήθηκαν οι χρόνοι ζωής τους (lifetimes), οι λόγοι διάσπασής τους σε διάφορα κανάλια και υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες ενεργές διατομές. Για την καλύτερη ταυτοποίηση των παραγόμενων σωματιδίων, η ομάδα του ΕΜΠ σχεδίασε και κατασκεύασε ανιχνευτή Cherenkov (ονομάστηκε Οδυσσέας) ο οποίος τοποθετήθηκε μέσα σε έναν ηλεκτρομαγνήτη που δημιουργούσε ισχυρό μαγνητικό πεδίο. Στο Σχήμα 1 φαίνεται η παραγωγή φωτός Cherenkov από φορτισμένο σωματίδιο κινούμενο μέσα σε κάποιο υλικό. Για εκπομπή φωτός Cherenkov ισχύει $\beta = \upsilon / c > 1/n,\ n > 1$, δηλαδή η ταχύτητα του σωματιδίου πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα του φωτός μέσα στο υλικό που κινείται το σωματίδιο. Το Σχήμα 2 δείχνει φωτογραφία κατά τη διαδικασία της εγκατάστασης του Οδυσσέα.

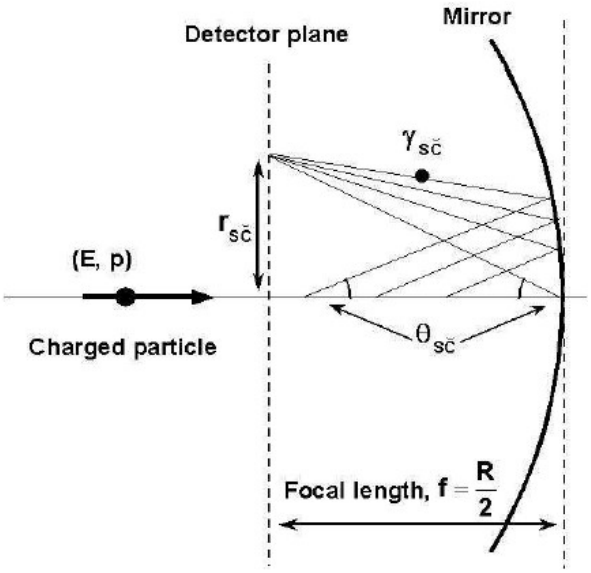



Σχήμα 1 . Εκπομπή ακτινοβολίας Cherenkov, $\beta > 1/n$ .

Σχήμα 2 . Διαδικασία της εγκατάστασης του ανιχνευτή Cherenkov με το όνομα Οδυσσέας.

**3) Μελέτη αντιδράσεων συγκρουόμενων δεσμών $e^+e^-$ με το πείραμα DELPHI (Detector with Lepton, Photon and Hadron Identification), στον επιταχυντή LEP (Large Electron Positron collider, Μεγάλος επιταχυντής συγκρουόμενων Ηλεκτρονίων Ποζιτρονίων).**

Μεταξύ των άλλων ανιχνευτών που κατασκευάστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν, για την ταυτοποίηση (αναγνώριση) των σωματιδίων, κατασκευάστηκε και χρησιμοποιήθηκε ένας καινούργιος ανιχνευτής Cherenkov (Τσερένκοβ), ο Ring Imaging CHerenkov (RICH). Αυτό το είδος ανιχνευτή προτάθηκε για πρώτη φορά το 1977 από τους Jacques Seguinot και τον Tom Ypsilantis. Ένας τέτοιος ανιχνευτής προσδιορίζει την ταχύτητα του σωματιδίου. Οι συνήθεις ανιχνευτές Τσερένκοβ απλώς ανιχνεύουν αν έχει παραχθεί φως Τσερένκοβ ή όχι, δηλαδή αν η ταχύτητα υπερβαίνει μια κρίσιμη τιμή για παραγωγή φωτός Τσερένκοβ. Η αρχή λειτουργίας του RICH φαίνεται στο Σχήμα 3 όπου εικονίζεται η απλή περίπτωση όπου το σωματίδιο κινείται κατά μήκος του κύριου άξονα του κοίλου σφαιρικού κατόπτρου οπότε το ανακλώμενο φως (τα φωτόνια) σχηματίζουν κυκλικό δακτυλίδι στο επίπεδο που σημειώνεται στο σχήμα ως Detector plane. Σε αυτή την περίπτωση το επίπεδο είναι το (κύριο) εστιακό επίπεδο του σφαιρικού κοίλου κατόπτρου. Μετριέται η ακτίνα του δακτυλιδιού, $r_{sc}$ και βρίσκεται η γωνία Τσερένκοβ, $\theta_{sc}$. Η ταχύτητα, $\upsilon$, υπολογίζεται από τη σχέση που την συνδέει με τη γωνία Τσερένκοβ, $\cos\theta_{sc} = \frac{1}{\beta n}$, $\beta = \upsilon / c$, $n$ είναι ο δείκτης διάθλασης του μέσου όπου παράγεται η ακτινοβολία. Στην πιο γενική περίπτωση η γεωμετρία είναι διαφορετική, αντί για το κυκλικό δαχτυλίδι έχομε έλλειψη ή παραβολή, αλλά η ανάλυση είναι και πάλι σχετικά εύκολη.




Σχήμα 3 . Αρχή λειτουργίας του RICH.

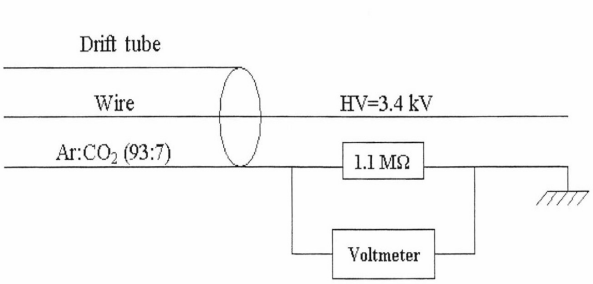
Ένας σημαντικός στόχος του πειράματος ήταν η μελέτη της φυσικής που συνδέεται με τα σωματίδια $W^{\pm}$ και $Z^0$ . Ουσιαστικά έγινε επιβεβαίωση της ισχύος του καθιερωμένου προτύπου. Σημαντική ήταν η προσπάθεια της ομάδας του ΕΜΠ για ανίχνευση λεπτοκουάρκ. Αυτά θα ήταν σωματίδια με λεπτονικό και βαρυονικό αριθμό.
Εκτός των άλλων, η ομάδα του ΕΜΠ ασχολήθηκε με τον έλεγχο ποιότητας μονάδων ψηφιοποίησης (TDC, Time to Digital Converters) που κατασκευάστηκαν από ελληνική εταιρεία.

**4) Μελέτη αντιδράσεων pp στον επιταχυντή LHC. Πείραμα ATLAS (A Toroidal Lhc ApparatuS).**

Το πείραμα σχεδιάστηκε έτσι ώστε να μπορεί να μετρήσει συγκρούσεις σε ενέργειες κέντρου μάζας μέχρι περίπου 14 TeV, με μεγάλες ροές (luminosities, λαμπρότητες) δεσμών συγκρουόμενων σωματιδίων, της τάξης $10^{34}$ $cm^{-2}$ $s^{-1}$. Εκτός από τους άλλους ανιχνευτές, φτιάχτηκαν και χρησιμοποιήθηκαν ανιχνευτές τύπου MDT (Monitored Drift Tubes, MDT ), για τη μέτρηση μιονίων. Το πλήθος τέτοιων ανιχνευτών MDT που φτιάχτηκαν στην Ελλάδα ήταν 30 000. Αυτό είναι το ένα δέκατο του συνόλου των MDT που χρησιμοποιήθηκαν στο ATLAS. Οι ανιχνευτές είχαν σχήμα κυλινδρικού σωλήνα, στον άξονα του οποίου ήταν τεντωμένο σύρμα (κεντρικό ηλεκτρόδιο). Το υλικό του σωλήνα ήταν αλουμίνιο. Το σύρμα ήταν επιχρυσωμένο κράμα βολφραμίου-ρηνίου (W-Re). Το ρήνιο αυξάνει το όριο θραύσης του σύρματος στα 620 gf ενώ η τάση που έχει το νήμα του ανιχνευτή είναι 350 gf. Όμως η παρουσία του ρηνίου προκαλεί εξασθένηση του σήματος διότι έχει μεγαλύτερη ωμική αντίσταση (44 Ω/m) σε σχέση με την αντίσταση του σύρματος από βολφράμιο (29 V/m).
Το μήκος του σύρματος του κάθε ελληνικού σωλήνα-ανιχνευτή ήταν $L = (1650,0 \pm 0,5)$ mm , η διάμετρος του σύρματος ήταν $d = (50,0 \pm 0,5)$ μm. Η πυκνότητα του υλικού του σύρματος ήταν $\rho = 19,3$ $g/cm^3$ . Η εξωτερική διάμετρος του κυλινδρικού σωλήνα ήταν $D = \left(30,000 \pm^{0,000}_{0,030}\right)$ mm .
Το μίγμα αερίου μέσα στους σωλήνες ανιχνευτές ήταν Ar:CO2 Ar:$CO_2$, 93:7, με απόλυτη πίεση 3 bar.
Στο εγχείρημα συνεργάστηκαν τρεις ελληνικές ομάδες, από το ΕΚΠΑ, το ΕΜΠ και το Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Στο ΕΚΠΑ κατασκευάζονταν οι σωλήνες ανιχνευτές, στο ΕΜΠ γίνονταν ο έλεγχος ποιότητας των «σωλήνων» (QA/QC, Quality Assurance/Quality Control) και στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης η συναρμολόγησή τους σε μορφή θαλάμων-ανιχνευτών με πολλά επίπεδα.
Ποιο συγκεκριμένα, οι δραστηριότητες ελέγχου ποιότητας των ανιχνευτών μιονίων (MDT) στο ΕΜΠ ήταν όπως φαίνεται παρακάτω:

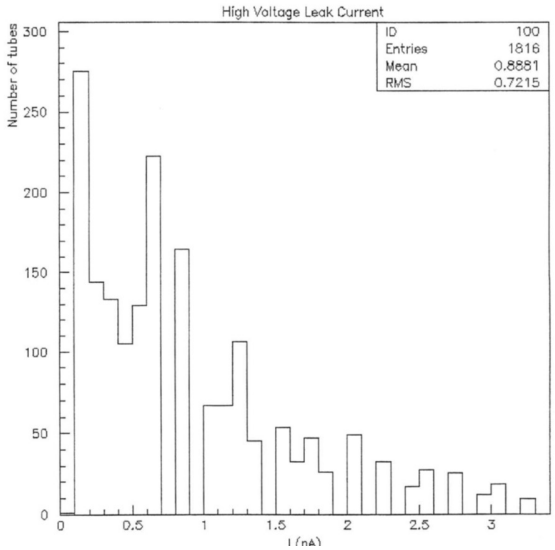
**α) Ηλεκτρικό ρεύμα διαρροής υπό υψηλή τάση:**

Γίνονταν έλεγχος (μέτρηση) του ηλεκτρικού ρεύματος διαρροής. Οι σωλήνες-ανιχνευτές περιείχαν το παραπάνω (κανονικό) μείγμα αερίων με απόλυτη πίεση 3 bar (σχετική πίεση 2 bar). Η μέτρηση γίνονταν αφού καθαρίζονταν ο σωλήνας αφήνοντας να ρέει μέσα από τον όγκο του αέριο επί αρκετό χρόνο ώστε στον κάθε σωλήνα γίνονταν αντικατάσταση (τουλάχιστον) τριών όγκων αερίου. Εφαρμόζονταν στους ανιχνευτές δοκιμαστική υψηλή τάση 3400 V. Αυτό σημαίνει ενίσχυση αερίου $1{,}6\times10^5$. Το ηλεκτρικό ρεύμα διαρροής για τον κάθε σωλήνα έπρεπε να είναι μικρότερο από (περίπου) 2 nA/m = 2 nC/(m s). Για τους δικούς μας σωλήνες μήκους 1,65 m, μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα διαρροής θεωρήθηκε το 3,4 nA. Η μέτρηση γίνονταν αφού πρώτα αν ο σωλήνας αρχικά είχε μεγάλο ρεύμα διαρροής είχε υποστεί την διαδικασία ανάκτησης (θεραπείας) που περιγράφεται παρακάτω. Το εν λόγω ρεύμα διαρροής είναι ρεύμα μεταξύ του σύρματος (άνοδος) και της καθόδου (κυλινδρικό περίβλημα, από αλουμίνιο) που διέρχεται μέσα από τα δυο πώματα στα άκρα του κάθε σωλήνα. Αν το μετρούμενο ρεύμα διαρροής ξεπερνά το ανωτέρω όριο ο σωλήνας απορρίπτεται. Αυτό το ρεύμα προκαλεί ηλεκτρονικό θόρυβο στο σήμα του ανιχνευτή και επίσης προκαλεί μακροπρόθεσμα καταστροφή του σωλήνα-ανιχνευτή, οπότε έπρεπε να μην υπερβαίνει το παραπάνω όριο. Η τιμή αυτή του οριακού ρεύματος αντιστοιχεί περίπου σε ρυθμό 2 kH/m σωματιδίων ελάχιστου ιον(τ)ισμού (minimum ionizing particles) που δημιουργεί το καθένα φορτίο 1 pC.
Η διαδικασία εικονίζεται στο Σχήμα 4, όπου φαίνεται η μέτρηση της τάσης στα άκρα της (πολύ μεγάλης) αντίστασης των 1,1 ΜΩ και υπολογίζεται το ρεύμα με χρήση του νόμου του Ωμ. Χρησιμοποιήθηκε το βολτόμετρο (KEITHLEY2000 multimeter) που έχει εσωτερική αντίσταση 10 ΜΩ. Η σύνθετη (συνολική) αντίσταση αυτών των δυο παράλληλα συνδεδεμένων αντιστάσεων είναι, με ικανοποιητική ακρίβεια, 1 ΜΩ. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να γίνει υπολογισμός (έμμεση μέτρηση) μικρών ρευμάτων της τάξης nA αφού οδηγούν σε πτώσεις τάσης της τάξης μερικών mV που μετριούνται εύκολα. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε στη λήψη δεδομένων, όπου γίνεται σύνδεση με υπολογιστή με κάρτα ADC.Αυτό επιτρέπει την ταυτόχρονη μέτρηση πολλών σωλήνων. Το όργανο μέτρησης συνδέεται με το καλώδιο γείωσης όπου δεν υπάρχει υψηλή τάση. Το αποτέλεσμα είναι πρακτικώς το ίδιο με την περίπτωση που το όργανο συνδέονταν με το κεντρικό σύρμα του ανιχνευτή του οποίου το ρεύμα θέλομε να γνωρίζομε (μετρήσομε).




Σχήμα 4 Η διάταξη για τη μέτρηση του ηλεκτρικού ρεύματος διαρροής.

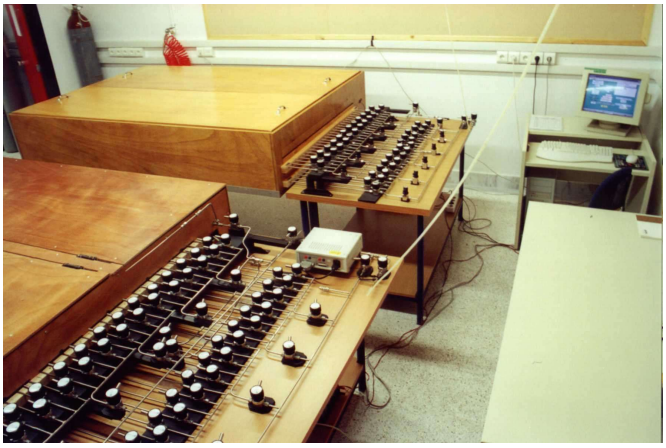
Υιοθετήθηκε μια διαδικασία ανάκτησης (θεραπείας) ανιχνευτικών σωλήνων με υψηλό ρεύμα διαρροής. Συγκεκριμένα, εφαρμόζονταν ανάστροφη (αρνητική) τάση μεταξύ του σύρματος (ανόδου) και του κυλινδρικού σωλήνα για μερικές ώρες. Οι μετρήσεις των ηλεκτρικών ρευμάτων διαρροής μετά από αυτή τη διαδικασία έδιναν πολύ μικρότερες τιμές οι οποίες ήταν αποδεκτές. Στο Σχήμα 5 φαίνονται χαρακτηριστικές μετρήσεις που αναφέρονται σε 1816 σωλήνες. Δύο (0,1 %) σωλήνες δεν έγιναν αποδεκτοί, δεν επανήλθαν (δεν θεραπεύθηκαν) με την εφαρμογή της ανάστροφης τάσης. Η εξήγηση του φαινομένου της θεραπείας στηρίζεται μάλλον στο ότι θετικά ιόντα συσσωρεύονται στην κάθοδο (κυλινδρικό τμήμα) του ανιχνευτικού σωλήνα, δημιουργώντας ένα στρώμα που επικαλύπτει την επιφάνεια της καθόδου. Η ανάστροφη τάση προκαλεί κίνηση ηλεκτρονίων προς την κάθοδο που εξουδετερώνουν αυτά τα θετικά ιόντα. Στη πράξη χρησιμοποιήθηκε σύστημα παράλληλου ελέγχου 16 σωλήνων όπου τα αναλογικά σήματα διαρροής λαμβάνονταν με μια κάρτα ψηφιοποίησης PCI-ADC με χρήση κώδικα LabView.



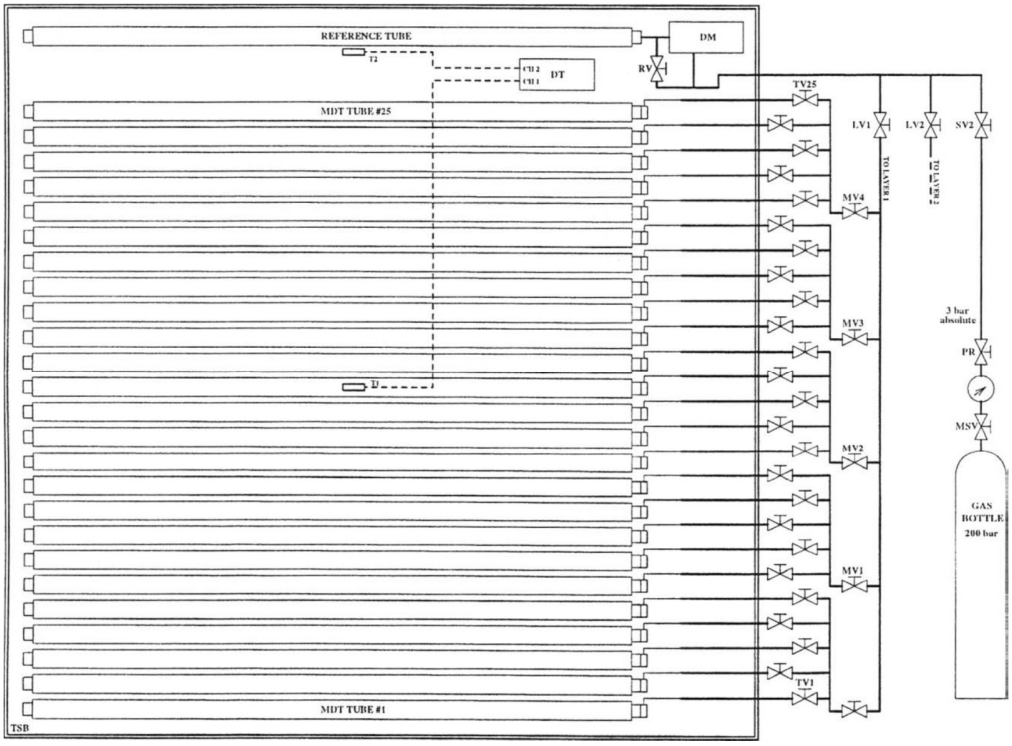

Σχήμα 5 Μετρήσεις του ηλεκτρικού ρεύματος διαρροής.

**β) Στεγανότητα:** Γίνονταν έλεγχος της στεγανότητας των σωλήνων. Σημειώνομε ότι η διαρροή συνηθίζεται να μετριέται σε πίεση επί όγκο σωλήνα επί χρόνο.

Με αυτή την προϋπόθεση, η διαρροή αερίου πρέπει να είναι μικρότερη από κάποια αποδεκτή τιμή, συγκεκριμένα μικρότερη από $1{,}2\times10^{-8}\ \mathrm{bar}\cdot\tau\cdot\mathrm{s}$ , όπου $\tau$ είναι ο όγκος του σωλήνα. Αυτός ο περιορισμός στη διαρροή χρειάζεται για να υπάρχει σταθερή πίεση στον σωλήνα και να αποφεύγεται εισροή οξυγόνου και αζώτου στο σωλήνα. Αυτά είναι ηλεκτραρνητικά στοιχεία που απορροφούν (δεσμεύουν) ηλεκτρόνια. Η διαρροή θα μπορούσε να προέρχεται από τα πώματα του σωλήνα αλλά ίσως και από το κυλινδρικό μέρος των σωλήνων από κάποια κακοτεχνία. Πρόκειται για μια σχετικά πολύπλοκη διαδικασία, η πλέον πολύπλοκη από τις διαδικασίες ποιοτικού ελέγχου που έγιναν. Εδώ απλά θα πούμε δυο λόγια, για τις λεπτομέρειες παραπέμπομε στις σχετικές εργασίες που αναφέρονται στη Βιβλιογραφία [1], [3], [4]. Η μέθοδος μέτρησης της στεγανότητας στηρίζεται στην πτώση πίεσης του αερίου του σωλήνα μετά από κάποιο χρόνο. Γίνεται χρήση διαφορικής μεθόδου, δηλαδή, η πίεση συγκρίνεται με την πίεση ενός σωλήνα αναφοράς με χρήση διαφορικού μανόμετρου, που είχε ακρίβεια 0,024 mbar. Η μέθοδος είναι ευαίσθητη στη σταθερότητα της θερμοκρασίας και στην ομοιομορφία κατά μήκος του ελεγχόμενου σωλήνα και του σωλήνα αναφοράς. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκαν δύο θερμικά μονωμένα κουτιά όπου τοποθετούνταν οι προς μέτρηση σωλήνες και ο σωλήνας αναφοράς. Ο σωλήνας αναφοράς είχε ίδιο μέγεθος με του υπόλοιπους σωλήνες αλλά είχε κατασκευαστεί με ειδικό τρόπο ώστε να είναι ιδανικός, δηλαδή χωρίς διαρροή αερίου. Μέσα στο κουτί η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των ακραίων σημείων τους ήταν 0,1 $^{\circ}\mathrm{C}$ . Απλά αναφέρομε ότι μόνο το 0,5 % του συνόλου των σωλήνων απορρίφτηκε επειδή είχαν μεγαλύτερη διαρροή από την αποδεκτή που αναφέραμε παραπάνω.



Σχήμα 6 . Μια όψη των δυο κιβωτίων, που είχαν εσωτερική θερμομόνωση, με το σύστημα βαλβίδων για την επιλογή του προς μέτρηση σωλήνα.




Σχήμα 7 . Σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής διάταξης που δείχνει ένα επίπεδο 25 σωλήνων MDT, το διαφορικό μανόμετρο (DM), το διπλό θερμόμετρο (TH), τις βαλβίδες των σωλήνων (TVi), τις βαλβίδες των πολλαπλοτήτων (manifolds) (MVi), τις βαλβίδες των γραμμών (LVi), τη βαλβίδα αναφοράς (RV), τη βαλβίδα της κύριας παροχής (MSV), τον μειωτήρα πίεσης (PR), τη βαλβίδα παροχής (SV2) και τους αισθητήρες θερμοκρασίας (T1, T2, Tm1-Tm3).

**γ) Μηχανική τάση:** Έπρεπε στον ήδη κατασκευασμένο και επομένως κλειστό σωλήνα το σύρμα να έχει μηχανική τάση 350 gf (σε θερμοκρασία 20 $^{o}$C) με ανοχή της τάξης του 5 % . Αυτή η τιμή είναι κατάλληλη ώστε το σύρμα να παραμένει στον άξονα του σωλήνα. Δηλαδή έτσι περιορίζεται η βαρυτική κάμψη του σύρματος και οι ταλαντώσεις του ένεκα των ηλεκτροστατικών δυνάμεων όταν εφαρμοστεί η κανονική υψηλή τάση λειτουργίας μεταξύ του κεντρικού ηλεκτροδίου και του περιβλήματος του σωλήνα. Η μηχανική τάση μετριέται με ένα όργανο (ένα είδος wire stretch meter) κατασκευασμένο από την ιταλική εταιρεία CAEN. Ο τύπος του οργάνου έχει τον κωδικό SY502. Η αρχή λειτουργίας είναι ως εξής: Το σύρμα του σωλήνα διεγείρεται από έναν τετραγωνικό παλμό ρεύματος. Ένα τμήμα του σωλήνα στη μέση του, μήκους περίπου, 10 cm, βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από ένα μόνιμο μαγνήτη (55 mm x 45 mm x 60 mm) της εταιρείας Alcomex. Το μαγνητικό πεδίο είναι κάθετο στο σύρμα.

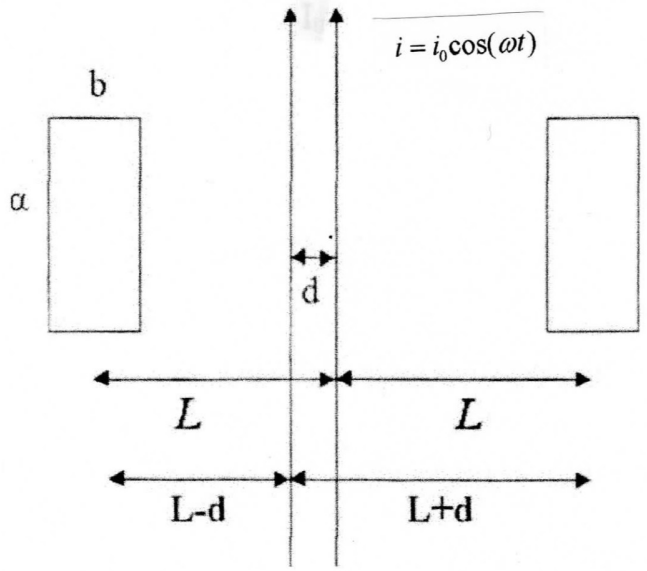
Ένεκα του παλμού ρεύματος ασκείται στο σύρμα παλμός δύναμης Laplace που κάνει το σύρμα να ταλαντεύεται. Με τη σειρά της η ταλάντωση του σύρματος μέσα στο μαγνητικό πεδίο δημιουργεί στο σύρμα ηλεκτρεγερτική δύναμη εξ επαγωγής (φαινόμενο ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής), την οποία ανιχνεύει (μετρά) το όργανο της CAEN. Ένας μηχανισμός ανάδρασης (feedback) διατηρεί τις ταλαντώσεις ώστε να μην μειώνονται ένεκα «τριβών». Επειδή η διέγερση γίνεται στη μέση του σύρματος, κυριαρχεί η θεμελιώδης συχνότητα. Στο Σχήμα 8 φαίνεται αυτή η διάταξη.

Σχήμα 8 . Η συσκευή SY502 της CAEN για τη μέτρηση της μηχανικής τάσης του ανοδικού σύρματος.

Οι ταλαντώσεις του σύρματος είναι ταλαντώσεις μικρού πλάτους οπότε ισχύουν οι γνωστές σχέσεις. Το μήκος κύματος για τη θεμελιώδη συχνότητα είναι $\lambda = 2L$ . Η

θεμελιώδης συχνότητα είναι $f = \upsilon / \lambda = \upsilon / (2L)$. Η ταχύτητα διάδοσης είναι $\upsilon = \sqrt{F / \mu}$ όπου $F$ η μηχανική τάση και $\mu$ η γραμμική πυκνότητα (μάζας) του σύρματος. Αν $\rho$ είναι η πυκνότητα (όγκου) τότε ισχύει, $\mu = \rho \pi D^2 / 4$, όπου $D$ η διάμετρος του σύρματος. Επομένως, η μηχανική τάση, $F$, υπολογίζεται από τη σχέση $F = \pi \rho D^2 L^2 f^2$. Στην περίπτωσή μας, $\rho = 19{,}3$ g/cm$^3$, $D = 50\,\mu$m και το μήκος του σύρματος είναι $L = 165$ cm. Αν χρησιμοποιήσομε την ανωτέρω σχέση στο SI (στο οποίο ισχύει), πρέπει τα παραπάνω δεδομένα να μετατραπούν σε αυτό το σύστημα. Η συσκευή της CAEN κάνει τον υπολογισμό της μηχανικής τάσης και το αποτέλεσμα φαίνεται στη μικρή οθόνη της (display). Η συσκευή μπορεί και συνδέεται με υπολογιστή ο οποίος κάνει τον υπολογισμό με μεγαλύτερη ακρίβεια σε περιβάλλον LabView.
Έγιναν έλεγχοι και βαθμονόμηση της διάταξης με δυο διάφορους τρόπους. Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ένα σύρμα μήκους 165 cm ίδιο με αυτό του σωλήνα. Τεντώθηκε με τη χρήση ενός βάρους γνωστού με μεγάλη ακρίβεια 350 gf. Στη συνέχεια λήφθηκαν μετρήσεις αφού προστέθηκαν βάρη ακριβείας 50 gf και 100 gf. Οι μετρήσεις συμφωνούσαν με τα βάρη με σφάλμα της τάξης του 1 %.
Στη δεύτερη περίπτωση μετρήθηκε η συχνότητα ταλάντωσης του σύρματος με ψηφιακό παλμογράφο (τον LeCroy 9314AM) και συγκρίθηκε με αυτήν που μετρούσε η συσκευή CAEN. Η συμφωνία ήταν καλύτερη από 0,5 %.

**δ) Μέτρηση της απόκλισης της θέσης του ανοδικού σύρματος:** Για τον προσδιορισμό της τροχιάς των μιονίων είναι σημαντική η ακρίβεια με την οποία είναι γνωστή η θέση του σύρματος ως προς τον άξονα του σωλήνα MDT. Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιήθηκε ένα ηλεκτρομαγνητικό μικρόμετρο EMMI (electromagnetic micrometer). Η αρχή λειτουργίας του φαίνεται στο Σχήμα 9.




Σχήμα 9. Αρχή λειτουργίας του ηλεκτρομαγνητικού μικρομέτρου, EMMI.

Το σύρμα (του σωλήνα) διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα, $i(t) = i_0 \cos(\omega t)$. Η συχνότητα του ρεύματος είναι $f = 235\,\text{Hz}$. Η επιλογή συχνότητας έγινε έτσι που να μην είναι πολλαπλάσιο των 50 Hz ή 60 Hz που είναι οι συχνότητες του δικτύου στην Ευρώπη και στις ΗΠΑ αντιστοίχως. Αν ήταν πολλαπλάσιο μπορεί να δημιουργούσε προβλήματα κατά τη μέτρηση διότι θα συνέπιπτε με αρμονικές των ανωτέρω συχνοτήτων οι οποίες υπάρχουν όταν έχομε παραμορφώσεις στην τάση του δικτύου. Τα πηνία είναι τοποθετημένα σε μια απόσταση από το σύρμα, περίπου 3,5 cm και σε σημεία που απέχουν από τα άκρα του σωλήνα, περίπου 30 cm. Η μαγνητική επαγωγή που δημιουργείται σε απόσταση $r$ από το σύρμα είναι $B = \mu_0 i_0 \cos(\omega t)/(2\pi r)$. Τα δυο ορθογώνια με διαστάσεις $a \times b$ παριστάνουν πηνία με $N$ σπείρες το καθένα. Αν το μέσον του πηνίου βρίσκεται σε απόσταση $L$ από το σύρμα τότε η (συνολική) μαγνητική ροή που διέρχεται από το πηνίο είναι $\Phi_B = \dfrac{N\mu_0 i_0 \cos(\omega t)}{2\pi}\alpha \ln\left(1 + \dfrac{b}{L - b/2}\right)$. Αυτό προκύπτει εύκολα αν χρησιμοποιηθεί το Σχήμα 9. Προφανώς ισχύουν,

$$\Phi_B = \int_{L-b/2}^{L+b/2} \frac{N\mu_0 i_0 \cos(\omega t)}{2\pi r}\alpha \,\mathrm{d}r = \frac{N\mu_0 i_0 \alpha \cos(\omega t)}{2\pi}\int_{L-b/2}^{L+b/2} \frac{\mathrm{d}r}{r}$$
$$= \frac{N\mu_0 i_0 \alpha \cos(\omega t)}{2\pi}\ln\frac{L + b/2}{L - b/2}$$
$$= \Phi_B = \frac{N\mu_0 i_0 \cos(\omega t)}{2\pi}\alpha \ln\left(1 + \frac{b}{L - b/2}\right)$$

Η ηλεκτρεγερτική δύναμη είναι,

$$E_{\text{ΗΕΔ}} = -\frac{\mathrm{d}\Phi_b}{\mathrm{d}t} = \frac{N\omega\mu_0 i_0 \sin(\omega t)}{2\pi}\alpha \ln\left(1 + \frac{b}{L - b/2}\right)$$

Οι αποστάσεις των δυο πηνίων από το σύρμα είναι, $L - d$ και $L + d$, οπότε οι ηλεκτρεγερτικές τους δυνάμεις είναι,

$$\Delta E_{\text{ΗΕΔ}} = \quad E_{\text{ΗΕΔ1}} = -\frac{\mathrm{d}\Phi_b}{\mathrm{d}t} = \frac{N\omega\mu_0 i_0 \sin(\omega t)}{2\pi}\alpha \ln\left(1 + \frac{b}{L - d - b/2}\right)$$
$$E_{\text{ΗΕΔ2}} = -\frac{\mathrm{d}\Phi_b}{\mathrm{d}t} = \frac{N\omega\mu_0 i_0 \sin(\omega t)}{2\pi}\alpha \ln\left(1 + \frac{b}{L + d - b/2}\right)$$

Η διαφορά τους είναι,

$$\Delta E_{\text{ΗΕΔ}} = \frac{N\omega\mu_0 i_0 \sin(\omega t)}{2\pi}\alpha \ln\left(\frac{1+\dfrac{b}{L-d-b/2}}{1+\dfrac{b}{L+d-b/2}}\right)$$

Μετά από μερικούς υπολογισμούς καταλήγομε στη σχέση,

$$\Delta E_{\text{ΗΕΔ}} = \frac{N\omega\mu_0 i_0 \sin(\omega t)}{2\pi}\alpha \ln\left(1+\frac{2db}{L^2-\left(d+b/2\right)^2}\right)$$

Επειδή $d << b, L$ και για $x << 1$ έχομε $\ln(1+x) = x - x^2/2 + x^3/3 - x^4/4 + ... \approx x$ , τελικώς βρίσκομε,

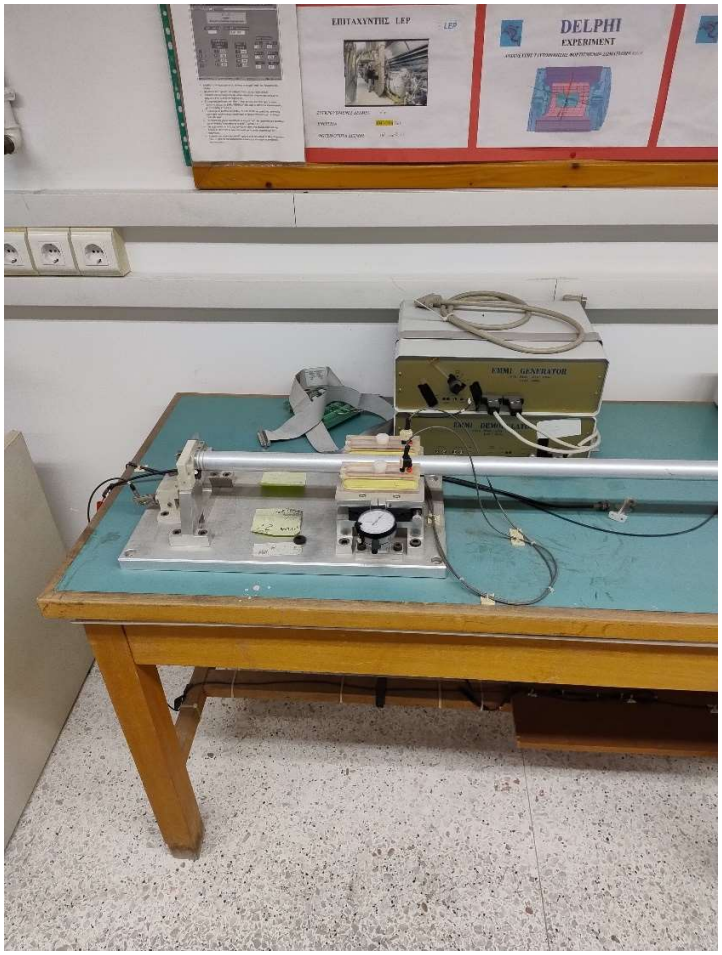
$$\Delta E_{\text{ΗΕΔ}} = \frac{N\omega\mu_0 i_0 \sin(\omega t)}{\pi}\frac{\alpha db}{L^2 - b^2/2}$$

$$= \Delta E_0 \sin(\omega t)$$

$$\Delta E_0 = \frac{N\omega\mu_0 i_0}{\pi}\frac{\alpha b}{L^2 - b^2/2} d$$

Παρατηρούμε ότι για μικρές αποκλίσεις από τη συμμετρική περίπτωση όπου $d = 0$, η διαφορά των ηλεκτρεγερτικών δυνάμεων (τάσεων) είναι ανάλογη (proportional) του $d$, δηλαδή της απόκλισης. Επειδή το πλάτος αυτής της διαφοράς τάσεων είναι μικρό, της τάξης του ηλεκτρονικού θορύβου, δηλαδή mV, για τη μέτρηση χρησιμοποιούνται ενισχυτές κλειδώματος φάσης, lock-in amplifiers. Η διαδικασία της μέτρησης της απόκλισης από το κέντρο του σωλήνα είναι η εξής. Υπάρχουν δυο (διαμαγνητικά) στηρίγματα σχήματος V στα δυο άκρα του σωλήνα. Ο σωλήνας περιστρέφεται γύρω από τον άξονα του πώματος, στην πράξη περιστρέφεται ενώ ακουμπά συνεχώς στα δυο V. Μετριέται το πλάτος $\Delta E_0$ σε 4 γωνιακές θέσεις κατά τη περιστροφή, συγκεκριμένα για γωνίες $0^o, 90^o, 180^o, 270^o$ . Η μετατόπιση του σύρματος από το κέντρο του σωλήνα προκύπτει από το $\Delta E_0$, αφού έχει γίνει κατάλληλα βαθμονόμηση ($\Delta E_0$ συναρτήσει μετατόπιση του σύρματος). Το μετρούμενο σήμα είναι σε mV και η μετατόπιση σε μm. Για τη βαθμονόμηση η μετατόπιση μετρήθηκε με τη χρήση δυο μικρομέτρων τύπου MITUYOMO dial indicator.

Σχήμα 10 . Η διάταξη για τον προσδιορισμό της θέσης του σύρματος ως προς τον άξονα του σωλήνα. Φαίνονται τα δυο άκρα του σωλήνα και οι ενισχυτές lock-in. Τα μικρόμετρα δεν φαίνονται πολύ καθαρά.

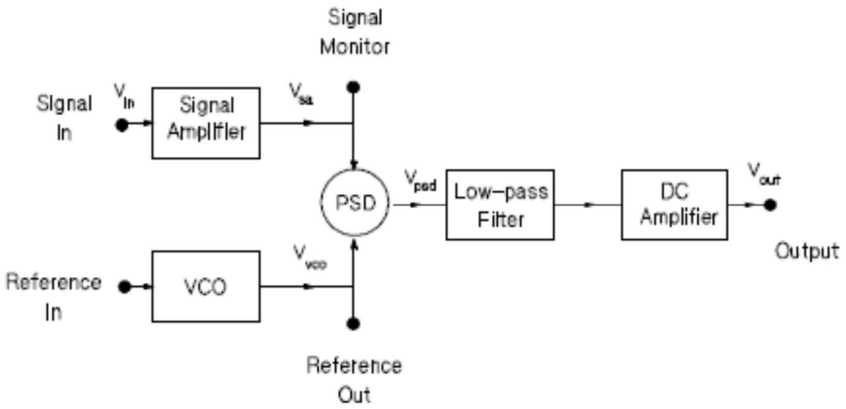



Σχήμα 11 . Η διάταξη για τον προσδιορισμό της θέσης του σύρματος ως προς τον άξονα του σωλήνα. Φαίνεται μόνο το ένα άκρο του σωλήνα, το μικρόμετρο και η διάταξη ενισχυτών lock-in .

Στη συνέχεια θα πούμε δυο λόγια για τη λειτουργία του ενισχυτή κλειδώματος φάσης, lock-in amplifier.

Σημειώνομε ότι ένας τέτοιος ενισχυτής μπορεί να μετρήσει σήματα (τάσεις, δυναμικά) τόσο μικρά ως και μερικά nanovolt που μπορεί να συνυπάρχουν με πολύ μεγαλύτερα σήματα, ακόμη και χιλιάδες φορές μεγαλύτερα. Θυμίζομε ότι ένα βολτόμετρο μετρά το άθροισμα όλων τον τάσεων που βρίσκονται στην είσοδό του. Στο Σχήμα 12 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα (block diagram) του ενισχυτή. Το σήμα εισόδου (signal in) είναι το $V_{\text{in}}$ το οποίο ενισχύεται από τον ενισχυτή σήματος, Signal Amplifier. Ο VCO (voltage controlled oscillator) είναι απλά ένας ταλαντωτής ο οποίος όμως μπορεί και συγχρονίζεται σε φάση και συχνότητα με ένα εξωτερικό σήμα αναφοράς (reference signal). Ο ανιχνευτής PSD (phase sensitive detector) είναι ένα κύκλωμα που έχει ως είσοδο δυο τάσεις (δυναμικά) των οποίων σχηματίζει το γινόμενο που εμφανίζεται στην έξοδό του. Το φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων (low pass filter) μειώνει σχεδόν στο μηδέν τις

εναλλασσόμενες συνιστώσες τάσης. Ο ενισχυτής συνεχούς (DC amplifier) ενισχύει τη συνεχή τάση που απομένει.




Σχήμα 12 . Σχηματικό διάγραμμα του ενισχυτή lock-in.

Στη συνέχεια παραθέτομε τη μαθηματική ανάλυση. Έστω $V_{\mathrm{in}}(t) = V_{\mathrm{s}}\cos(\omega_{\mathrm{s}}t + \varphi_{\mathrm{s}})$ ένα από τα διάφορα σήματα εισόδου διαφόρων συχνοτήτων και αρχικών φάσεων (Σήμα εισόδου, Signal in). Ο ενισχυτής σήματος έχει ενίσχυση $G_{\mathrm{ac}}$ επομένως στην έξοδό του το εν λόγω σήμα γίνεται, $V_{\mathrm{ac}}(t) = G_{\mathrm{ac}}V_{\mathrm{s}}\cos(\omega_{\mathrm{s}}t + \varphi_{\mathrm{s}})$. Ο ενισχυτής VCO διεγείρεται από το σήμα αναφοράς και δίνει στην έξοδό του τάση $V_{\mathrm{VCO}}(t) = V_{\mathrm{L}}\cos(\omega_{\mathrm{L}}t + \varphi_{\mathrm{L}})$. Η έξοδος $V_{\mathrm{psd}}$ του πολλαπλασιαστή των δυο αυτών τάσεων είναι $V_{\mathrm{psd}}(t) = G_{\mathrm{ac}}V_{\mathrm{s}}V_{\mathrm{L}}\cos(\omega_{\mathrm{s}}t + \varphi_{\mathrm{s}})\cos(\omega_{\mathrm{L}}t + \varphi_{\mathrm{L}})$. Με τη χρήση τριγωνομετρίας βρίσκομε,

$$V_{\mathrm{psd}}(t) = \frac{1}{2}G_{\mathrm{ac}}V_{\mathrm{s}}V_{\mathrm{L}}\cos\left[(\omega_{\mathrm{s}} - \omega_{\mathrm{L}})t + \varphi_{\mathrm{s}} - \varphi_{\mathrm{L}}\right] - \frac{1}{2}G_{\mathrm{ac}}V_{\mathrm{s}}V_{\mathrm{L}}\cos\left[(\omega_{\mathrm{s}} + \omega_{\mathrm{L}})t + \varphi_{\mathrm{s}} + \varphi_{\mathrm{L}}\right].$$

Αν αυτό το σήμα περάσει από ένα φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων το αποτέλεσμα θα είναι μηδέν. Αν όμως $\omega_{\mathrm{s}} = \omega_{\mathrm{L}}$ τότε η έξοδος γίνεται

$$V_{\mathrm{psd}}(t) = \frac{1}{2}G_{\mathrm{ac}}V_{\mathrm{s}}V_{\mathrm{L}}\cos(\varphi_{\mathrm{s}} - \varphi_{\mathrm{L}}) - \frac{1}{2}G_{\mathrm{ac}}V_{\mathrm{s}}V_{\mathrm{L}}\cos\left[(\omega_{\mathrm{s}} + \omega_{\mathrm{L}})t + \varphi_{\mathrm{s}} + \varphi_{\mathrm{L}}\right]$$

Το φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων είναι τέτοιο που απορρίπτει την εναλλασσόμενη συνιστώσα οπότε απομένει η συνεχής συνιστώσα, η οποία ενισχύεται από το ενισχυτή συνεχούς (DC amplifier), ο οποίος έχει ενίσχυση ενίσχυση $G_{\mathrm{dc}}$. Το τελικό αποτέλεσμα, δηλαδή η έξοδος, είναι,

$$V_{\mathrm{out}} = \frac{1}{2}G_{\mathrm{dc}}G_{\mathrm{ac}}V_{\mathrm{s}}V_{\mathrm{L}}\cos(\varphi_{\mathrm{s}} - \varphi_{\mathrm{L}}).$$

Αυτή η έξοδος που μετρούμε είναι ανάλογη (proportional) του σήματος $V_{\mathrm{s}}$. Τελικώς, από αυτή τη σχέση υπολογίζομε το ζητούμενο $V_{\mathrm{s}}$.

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Ποιοτικός έλεγχος και Μελέτη των Φυσικών και Τεχνικών Χαρακτηριστικών των Σωλήνων και Θαλάμων Ολίσθησης MDT για την Ανίχνευση Μιονίων στο Πείραμα ATLAS/LHC. Ραχήλ-Μαρία Αβραμίδου. Διδακτορική διατριβή, Ιούλιος 2002.
εισόδου

[2] Ποιοτικός έλεγχος των ελεγχόμενων θαλάμων ολίσθησης του ανιχνευτή ATLAS με τομογραφία ακτίνων-Χ. Δ. Δρακουλάκος, Διδακτορική Διατριβή, Ιούνιος 1999.

[3] T. Alexopoulos, R. Avramidou, E. Dris, T.A. Filippas, E.N. Gazis, E.C. Katsoufis, S. Maltezos, P. Savva, G. Stavropoulos, G. Tsipolitis.
A gas leak rate measurement system for the ATLAS MUON BIS – monitored drift tubes. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 521 (2004) 332-342.

[4] T. Alexopoulos, R. Avramidou, E. Dris, T.A. Filippas, E.N. Gazis, E.C. Katsoufis, S. Maltezos, P. Savva, G. Stavropoulos, G. Tsipolitis E. Tzamarioudaki.
Quality control results of the drift tubes for the ATLAS MDT-BIS chamber. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 560 (2006) 633-639.

. .