



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ  
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΝΑΝΟΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ  
ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΚΑΙ  
ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ



**Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών**

**«Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές»**

# **Εφαρμογή της Τεχνικής Lock-In Amplifier στον Έλεγχο Στεγανότητας των Ανιχνευτών NSW Micromegas**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**του Αθανάσιου Αντωνίου**

**Επιβλέπων: Σταύρος Μαλτέζος**

**Αθήνα, Ιούνιος, 2018**



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
*Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών  
Επιστημών*  
*Τομέας Φυσικής*  
*Διατμηματικό πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών*  
*«Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές»*

# **Εφαρμογή της Τεχνικής Lock-In Amplifier στον Έλεγχο Στεγανότητας των Ανιχνευτών NSW Micromegas**

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

του

**ΑΝΤΩΝΙΟΥ ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ**

**Επιβλέπων:** Σταύρος Μαλτέζος  
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 28<sup>η</sup> Ιουνίου 2018.

*(Υπογραφή)*

.....  
Σταύρος Μαλτέζος  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

*(Υπογραφή)*

.....  
Αλεξόπουλος Θεόδωρος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

*(Υπογραφή)*

.....  
Ευάγγελος Γαζής  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα Ιούνιος 2018



.....

**ΑΝΤΩΝΙΟΥ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ**

Απόφοιτος του τμήματος Φυσικής Αθηνών του Εθνικού και Καποδιστριακού  
Πανεπιστημίου Αθηνών Ε.Κ.Π.Α

# Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η ανάπτυξη προηγμένης τεχνικής έλεγχου στεγανότητας υψηλής ευαισθησίας στους ανιχνευτές NSW Micromegas. Για το σκοπό αυτό σχεδιάστηκε η πειραματική μας διάταξη στην οποία εφαρμόστηκε η τεχνική Lock-In Amplifier (LIA).

Επίσης πέραν της ερευνητικής εφαρμογής της μεθόδου LIA, εγκαταστάθηκε μια άσκηση στο εργαστήριο του μεταπτυχιακού μαθήματος Οργανολογία για την διδασκαλία και εκμάθηση της LIA.

Η εγκατάσταση αυτή μας έδωσε τη δυνατότητα να εξομοιώσουμε διαρροές που αντιστοιχούν στα όρια επιτρεπτής λειτουργίας των ανιχνευτών Micromegas. Η εξομοίωση των διαρροών των Micromegas έγινε εφικτή με τη χρήση ιατρικών βελονών που τοποθετήθηκαν στις επιφάνειες του κυκλώματος αερίου που διατίθεται στο εργαστήριό μας.

Επίσης μελετήθηκε πειραματικά και θεωρητικά ο βέλτιστος ρυθμός διαρροών που μπορεί να επιτευχθεί στους ανιχνευτές Micromegas με την χρήση ελαστικών δακτυλίων, συνάρτηση της ασκούμενης πίεσης μεταξύ των υλικών επιφανειών που έρχονται σε επαφή μαζί του. Το υλικό που αποτελούνται οι συγκεκριμένοι ελαστικοί δακτύλιοι είναι το ίδιο με το ελαστικό υλικό που θα χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή των ανιχνευτών Micromegas και η πειραματική μας προσέγγιση μας έδωσε ακριβή αποτελέσματα των δυνατοτήτων στεγανότητας μεταξύ των ελαστικών αυτών και των εφαιπόμενων με αυτό υλικών επιφανειών.

Τέλος, υπήρξε ενασχόληση με τοπογραφία επιφανειών των υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των ανιχνευτών Micromegas. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήσαμε το Atomic Force Microscope που διατίθεται στο κτίριο Φυσικής του ΕΜΠ, και μελετήσαμε συγκεκριμένα δείγματα υλικών δειγματοληπτικά. Η ανάλυση των δεδομένων έγινε με χρήση ενός ελεύθερου λογισμικού.



# Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Σταύρο Μαλτέζο για την καθημερινή υποστήριξή του και την καθοδήγηση, ώστε να ολοκληρωθεί επιτυχώς η διπλωματική μου εργασία. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον πατέρα μου για την συμπαράστασή του στις σπουδές μου στο ΕΜΠ. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Γιώργο Κουτελιέρη και την ερευνήτρια διδάκτορα Βιολέτα Γκίκα, για τις πολύτιμες συμβουλές τους, καθώς και όλους τους συναδέλφους και φίλους για τη βοήθειά τους και την άριστη και επικοινωνιακή συνεργασία μαζί τους. Επίσης ευχαριστούμε την εταιρεία Signal Recovery για την υποστήριξη της συσκευής Lock-In Amplifier και προσωπικά τον κύριο Μωραΐτη που μας έδωσε δωρεάν τον κωδικό του λογισμικού του LIA, που αξιοποιήθηκε για τους εκπαιδευτικούς σκοπούς της εργαστηριακής άσκησης που αναπτύχθηκε από την ομάδα μας στη Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών για τις ανάγκες του μεταπτυχιακού Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές.





## Περιεχόμενα

Περίληψη .....	5
Ευχαριστίες.....	7
Κεφάλαιο 1.....	13
Τεχνικά χαρακτηριστικά του πειράματος ATLAS.....	13
1.1 Εισαγωγή.....	13
Τα πειράματα των επιταχυντών στο CERN .....	13
1.2 Ο μεγάλος επιταχυντής αδρονίων LHC .....	14
1.3 Χαρακτηριστικά του LHC.....	14
1.4 Το πείραμα ATLAS .....	16
1.5 Σύστημα μαγνητών.....	17
1.7 θερμιδόμετρα.....	18
1.8 Θάλαμοι μιονίων .....	18
1.9 Ανιχνευτές Micromegas .....	19
1.10 Θάλαμοι Ιονισμού .....	19
1.10.1 Κατανομή των ενεργειακών απωλειών .....	19
1.10.2 Διέγερση και ιονισμός σε αέρια .....	20
1.11 Οι Ανιχνευτές Micromegas .....	22
Τεχνολογία Ανιχνευτή MicroMeGas .....	22
1.11.1 Γεωμετρία και Αρχή Λειτουργίας Διάταξης .....	22
1.11.2 Ηλεκτρόδιο Ανόδου .....	23
1.11.3 Micromesh.....	23
1.11.3 Pillars.....	24
1.11.4 Ηλεκτρόδιο Καθόδου .....	24
1.11.6 Αρχή Λειτουργίας .....	24
1.11.7 Εγγενείς ιδιότητες .....	25
1.12 New Small Wheel.....	28
1.13 sLHC - ATLAS Upgrade – MAMMA .....	29
1.14 Ποιοτικός έλεγχος ανιχνευτών MicroMeGas.....	32

<b>Κεφάλαιο 2</b> .....	<b>35</b>
2.1 Εισαγωγή.....	35
2.1.1 Ο θόρυβος βολής (Shot noise ή θόρυβος Schottky).....	35
2.1.2 Θόρυβος 1/f (Flicker noise).....	36
2.1.3 Λόγος Σήματος Προς Θόρυβο .....	36
<b>Κεφάλαιο 3</b> .....	<b>39</b>
<b>Η τεχνική Lock-in Amplifier</b> .....	<b>39</b>
3.1 Η τεχνική Lock-in Amplifier.....	39
3.2 Οι βασικές συνιστώσες ηλεκτρονικού θορύβου στην τεχνική LIA .....	40
<b>Κεφάλαιο 4</b> .....	<b>47</b>
<b>Εφαρμογή της μεθόδου LIA στη διάταξη ελέγχου στεγανότητας ανιχνευτών</b>	
<b>αερίου</b> <b>47</b>	
4.1 Η πειραματική διάταξη του εργαστηρίου.....	47
4.2 Μετρήσεις του σήματος της μεθόδου FRL.....	49
4.3 Μετρήσεις αξιολόγησης.....	50
4.4 Απόκτηση και επεξεργασία δεδομένων .....	52
<b>Κεφάλαιο 5</b> .....	<b>55</b>
<b>Μελέτη τοπογραφίας επιφανειών των ανιχνευτών NSW Micromegas</b> .....	<b>55</b>
5.1 Εισαγωγή.....	55
Το μικροσκόπιο ατομικής δύναμης.....	55
<b>5.2 Η έννοια των Fractals (μορφοκλάσματα ή μορφοκλασματικά σύνολα)</b> .....	<b>57</b>
<b>Συμπεράσματα</b> .....	<b>65</b>
<b>Παραρτήματα</b> .....	<b>67</b>
Παράρτημα Α.....	67
Οδηγός της εκπαιδευτικής άσκησης για μεταπτυχιακούς φοιτητές.....	67
Παράρτημα Β .....	86
Το μικροσκόπιο ατομικής δύναμης (atomic force microscope AFM).....	86
2.2 Μέτρο ελαστικότητας, καθορισμός της επιφάνειας επαφής ακίδας- δείγματος	
.....	88
<b>Βιβλιογραφία</b> .....	<b>91</b>





# Κεφάλαιο 1

## Τεχνικά χαρακτηριστικά του πειράματος ATLAS

### 1.1 Εισαγωγή

#### Τα πειράματα των επιταχυντών στο CERN

Το CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) ιδρύθηκε στις 29 Σεπτεμβρίου 1954 με σκοπό την δημιουργία και εξέλιξη κατάλληλων επιταχυντών και ανιχνευτών ικανών να μας δώσουν πληροφορίες για την ύπαρξη στοιχειωδών σωματιδίων που είναι αδύνατον να ανιχνευθούν με άλλο τρόπο. Στο εσωτερικό των ανιχνευτών του CERN επιταχύνονται στοιχειώδη σωματίδια προσεγγίζοντας την ταχύτητα του φωτός και συγκρούονται μεταξύ τους σε ελεγχόμενες συνθήκες. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν θα μας δώσουν πληροφορίες για την τεκμηρίωση θεμελιωδών νόμων της φυσικής με βάση το καθιερωμένο πρότυπο.

Οι επιταχυντές έχουν ως στόχο να επιταχύνουν δέσμες σωματιδίων σε υψηλές ενέργειες και στη συνέχεια οι συγκρουόμενες δέσμες καταγράφονται από τους ανιχνευτές. Στο CERN χρησιμοποιείται για την επιτάχυνση των στοιχειωδών σωματιδίων ο μεγάλος επιταχυντής αδρονίων LHC (Large Hadron Collider), που είναι ο μεγαλύτερος και ισχυρότερος επιταχυντής αδρονίων που έχει κατασκευαστεί στην εποχή μας.

## 1.2 Ο μεγάλος επιταχυντής αδρονίων LHC

Ο μεγάλος επιταχυντής αδρονίων LHC (Large Hadron Collider) [1] χρησιμοποιεί συγκρούμενες δέσμες βαρέων σωματιδίων για να αναζητήσει τη ύπαρξη στοιχειωδών σωματιδίων ακόμη και να εξομοιώσει τις συνθήκες που επικρατούσαν λίγο μετά την μεγάλη έκρηξη. Έτσι στον επιταχυντή LHC μελετάται η αξιοπιστία του «Καθιερωμένου Προτύπου» μέσω των πειραματικών δεδομένων που συλλέγονται. Μάλιστα πρόσφατα έγινε πειραματική ανακάλυψη του μποζονίου Higgs και ενισχύθηκε και πειραματικά ακόμη περισσότερο το Καθιερωμένο πρότυπο. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, το καθιερωμένο πρότυπο μαζί με τον μηχανισμό του Higgs δίνουν μια λογική συνεπή ερμηνεία της μεγάλης μάζας των μποζονίων W και Z. Το πεδίο Higgs είναι απαραίτητο να διαρρέει ένα τον χώρο και προσδίδει μάζα σε ένα σωματίδιο ανάλογα με τον τρόπο που αλληλεπιδρά με αυτό.

Επίσης στον επιταχυντή LHC προσπαθούν να αναζητηθούν απαντήσεις για την έλλειψη της αντιύλης στο παρατηρήσιμο σύμπαν. Τέλος γίνεται μελέτη του πλάσματος quark – gluon όπου ο LHC θα δοκιμαστεί στο να αναπαράγει τις συνθήκες που επικρατούσαν στην απαρχή του σύμπαντος.

Ο επιταχυντής ξεκίνησε την λειτουργία του το 2008 και συνεχίζει να αναβαθμίζεται σταδιακά μέχρι σήμερα αυξάνοντας παράλληλα την ενέργεια σύγκρουσης των δεσμών. Στις 30 Μαρτίου του 2012 οι συγκρούσεις των δεσμών έφτασαν τα 7 TeV και έως σήμερα έχει καταφέρει να πραγματοποιήσει συγκρούσεις έως 14 TeV. Η επιτάχυνση μιας δέσμης μέχρι τα 7 TeV ανά πρωτόνιο, διαρκεί περίπου 20 λεπτά και σε αυτές τις ταχύτητες τα πρωτόνια φθάνουν το 99.9999991% της ταχύτητας του φωτός.

## 1.3 Χαρακτηριστικά του LHC

Ο Μεγάλος Επιταχυντής Αδρονίων έχει κυκλικό σχήμα σχηματίζοντας ένα δακτύλιο μήκους 27 Km και βρίσκεται σε βάθος 50-175 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Περιλαμβάνει 1232 διπολικούς μαγνήτες μήκους 15 m που κάμπτουν την ακτινοβολία (για στροφή) και 392 τετραπολικούς μαγνήτες πάχους 5-7 m που χρησιμοποιούνται για εστίαση, έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η πιθανότητα σύγκρουσης των δυο δεσμών. Για την ψύξη των υπεραγωγίων μαγνητών χρησιμοποιείται υγρό Ήλιο που τους διατηρεί σε θερμοκρασία 1.9 °K. Χρησιμοποιείται μαγνητικό πεδίο έντασης 8.3 T κατά την λειτουργία του επιταχυντή

σε ενέργεια 7 TeV. Τα πρωτόνια που χρησιμοποιούνται δεν βρίσκονται σε διάταξη δέσμης αλλά σε πακέτα έτσι ώστε οι συγκρούσεις ανάμεσα στις 2 δέσμες να μην είναι συνεχείς αλλά διακριτές, με απόσταση τουλάχιστον 25 ns.

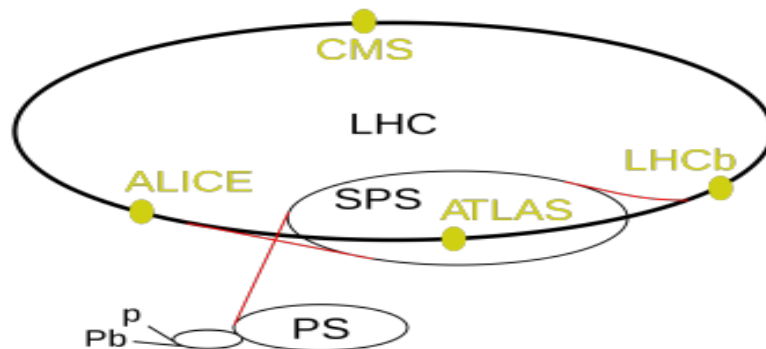
Όλα τα μέρη του επιταχυντή ελέγχονται από ένα χώρο το CERN control center, (Σχήμα 1.1) από όπου καθοδηγούνται τα σωματίδια μέσα στον επιταχυντή σε 4 κατευθύνσεις προς τους τέσσερις ανιχνευτές σωματιδίων αντίστοιχα, ATLAS, CMS, ALICE, LHCb (Σχήμα 1.2).

Πριν εισαχθούν στον LHC τα πρωτόνια επιταχύνονται από μια σειρά άλλων διατάξεων έτσι ώστε να αποκτήσουν τη μεγαλύτερη δυνατή ενέργεια. Αρχικά εισάγονται στον LINAC 2 (LINEar pArticle aCcelerator) που τα επιταχύνει σε ενέργεια 50 MeV και στη συνέχεια εισάγονται στον PSB (Proton Synchrotron Booster) που τα επιταχύνει στα 1,4 GeV. Σειρά έχουν το PS (Proton Synchrotron) που τα επιταχύνει έως τα 26 GeV και τέλος το SPS (Super Proton Synchrotron) που τελικά τα εισάγει στον LHC με ενέργεια 450 GeV.



Σχήμα1.1: Το CERN Control Centre (Image Google Street View)

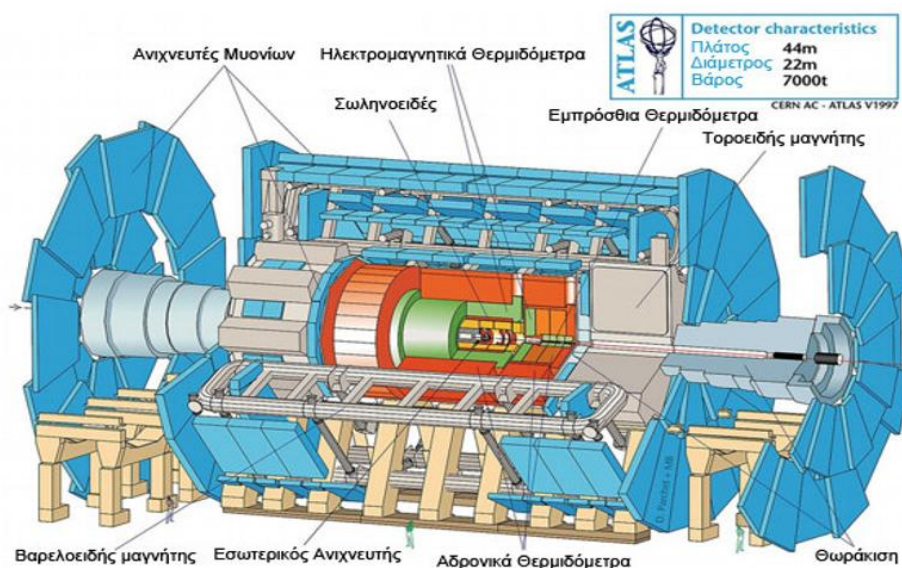
Πριν εισαχθούν στον LHC τα πρωτόνια επιταχύνονται από μια σειρά άλλων διατάξεων έτσι ώστε να αποκτήσουν τη μεγαλύτερη δυνατή ενέργεια. Αρχικά εισάγονται στον LINAC 2 (LINEar pArticle aCcelerator) που τα επιταχύνει σε ενέργεια 50 MeV και στη συνέχεια εισάγονται στον PSB (Proton Synchrotron Booster) που τα επιταχύνει στα 1,4 GeV. Σειρά έχουν το PS (Proton Synchrotron) που τα επιταχύνει έως τα 26 GeV και τέλος το SPS (Super Proton Synchrotron) που τελικά τα εισάγει στον LHC με ενέργεια 450 GeV.



Σχήμα1.2: Απεικόνιση της πορείας των σωματιδίων μέσα στον LHC

## 1.4 Το πείραμα ATLAS

Το πείραμα ATLAS [3] που πραγματοποιείται στο CERN αναζητά αποδείξεις για την ύπαρξη στοιχειωδών σωματιδίων αλλά και την αλληλεπίδρασή τους με την ύλη.



Σχήμα1.3: Ο ανιχνευτής ATLAS

Το πείραμα ATLAS, αποτελείται από 4 τμήματα, το σύστημα μαγνητών, τον εσωτερικό ανιχνευτή ή ανιχνευτή τροχιών, το ηλεκτρομαγνητικό θερμιδόμετρο το αδρονικό θερμιδόμετρο και από τους θαλάμους μιονίων.



## 1.5 Σύστημα μαγνητών

Το σύστημα μαγνητών του ATLAS αποτελείται από ένα γιγαντιαίο σύστημα τοροειδών μαγνητών που περιλαμβάνουν 8 υπεραγώγιμα πηνία μήκους 25 m το καθένα τοποθετημένα κατά τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργείται ένας κύλινδρος που να περιορίζει στο εσωτερικό του το μαγνητικό πεδίο των πηνίων (σχ. 1.4).

Το μαγνητικό πεδίο εντός του ανιχνευτή προκαλεί καμπύλωση των τροχιών που διαγράφουν τα φορτισμένα σωματίδια καθώς διέρχονται από το εσωτερικό του και μας δίνουν πληροφορίες για την ταυτότητά τους, συγκεκριμένα από τη φορά καμπύλωσης προκύπτει το φορτίο του σωματιδίου και από το βαθμό καμπύλωσης η ορμή του. Επιπλέον πληροφορίες προκύπτουν από τα σημεία που ξεκινούν να εμφανίζονται οι τροχιές, γιατί αν οι τροχιές εμφανιστούν σε σημείο διαφορετικό από εκείνο που έγινε η σύγκρουση των δεσμών μπορεί να έχουν προέλθει από διάσπαση άλλων σωματιδίων, αντικείμενο που αποτελεί προϊόν επιπλέον έρευνας



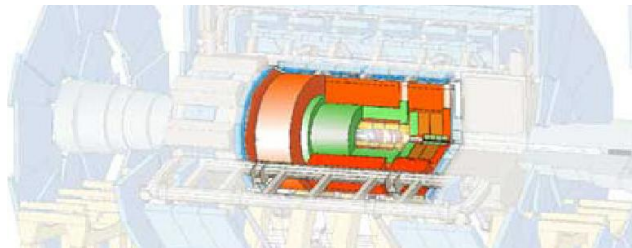
Σχήμα 1.4: Ο κεντρικός σωληνοειδής μαγνήτης

Η ανίχνευση των τροχιών γίνεται μέσω του Εσωτερικού ανιχνευτή πυριτίου υψηλής ανάλυσης που βρίσκεται εντός μαγνητικού πεδίου έντασης 2 T. Επίσης αξιοποιούνται και ανιχνευτές τροχιών και ανίχνευσης ακτινοβολίας μετάβασης για μια ολοκληρωμένη απεικόνιση των τροχιών των σωματιδίων που διέρχονται από τον ανιχνευτή.

## 1.7 Θερμιδόμετρα

Τα θερμιδόμετρα αποτελούνται από μεταλλικές πλάκες και αισθητήρες και μας δίνουν πληροφορία για την ενέργεια των σωματιδίων. Επειδή τα περισσότερα σωματίδια αλληλεπιδρούν με τα θερμιδόμετρα και υπάρχει απώλεια της ενέργειάς τους, τα τοποθετούμε εκτός του ανιχνευτή ώστε να έχει προλάβει να καταγραφεί η σωστή τροχιά του φορτισμένου απορροφούμενου σωματιδίου. Ωστόσο τα μύονια δεν επηρεάζονται τόσο από την αλληλεπίδρασή τους με τα θερμιδόμετρα και συνεχίζουν προς τους ανιχνευτές μιονίων. Στο πείραμα ATLAS αξιοποιούνται δυο διαφορετικά τμήματα θερμιδόμετρων:

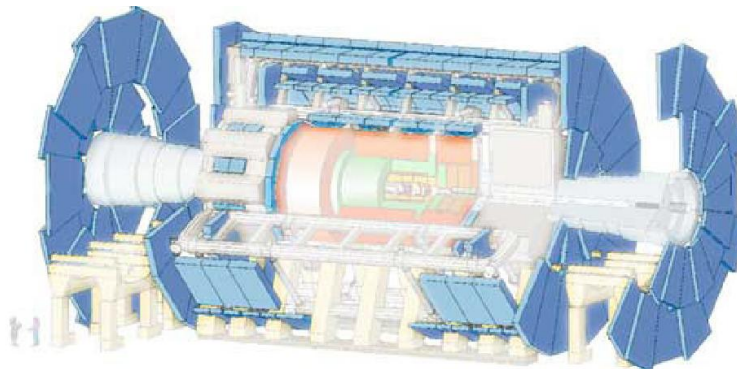
- I. Το ηλεκτρομαγνητικό θερμιδόμετρο που μετρά τη συνολική ενέργεια των ποζιτρονίων, των ηλεκτρονίων και των φωτονίων.
- II. Το αδρονικό θερμιδόμετρο που μετρά τη συνολική ενέργεια των αδρονίων.



Σχήμα 1.5: Ηλεκτρομαγνητικό (πράσινο) και αδρονικό (πορτοκαλί) θερμιδόμετρο

## 1.8 Θάλαμοι μιονίων

Τα μίονια μπορούν να φθάσουν στους θαλάμους μιονίων χωρίς να χάσουν πολύ ενέργεια κατά τη διέλευση τους από τα θερμιδόμετρα. Οι θάλαμοι μιονίων μπορούν να καταγράψουν με μεγάλη ακρίβεια την ορμή και την τροχιά των μιονίων.



Σχήμα 1.6: Το εσωτερικό του Atlas όπου φαίνονται οι θάλαμοι μιονίων.

## 1.9 Ανιχνευτές Micromegas

Πρόκειται για ανιχνευτές αερίου των οποίων η λειτουργία βασίζεται στα φαινόμενα ηλεκτρομαγνητικής φύσης που δημιουργούνται όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο διέρχεται μέσα από μια περιοχή αερίου. Η αλληλεπίδραση μεταξύ του σωματιδίου και των ατόμων του αερίου δημιουργεί δυο πολύ σημαντικά φαινόμενα, τη διέγερση και τον ιονισμό.

Σε ένα ανιχνευτή ιονισμού αερίου για μικρές τιμές εφαρμοζόμενης διαφοράς δυναμικού το παραγόμενο σήμα βασίζεται στα προϊόντα του πρωτογενούς ιονισμού (Ionization Chambers). Αν το ηλεκτρικό πεδίο αυξηθεί περαιτέρω, τα ηλεκτρόνια του έχουν αρκετή ενέργεια να προκαλέσουν με τη σειρά τους δευτερογενείς ιονισμούς στο αέριο πετυχαίνοντας μία ενδογενή ενίσχυση του φαινομένου για παραγωγή χρήσιμου σήματος. Αρχικά θα παρουσιάσουμε κάποια βασικά χαρακτηριστικά των ανιχνευτών ιονισμού και στην συνέχεια θα παρουσιάσουμε τον τρόπο λειτουργίας του ανιχνευτή MicroMeGas. Το βασικό πλεονέκτημα των συγκριμένων ανιχνευτών είναι η σχετικά εύκολη επίτευξη μεγάλων απολαβών (Gain) ενώ μπορούν να κατασκευαστούν και στις διαστάσεις που είναι επιθυμητές για κάθε πείραμα.

## 1.10 Θάλαμοι Ιονισμού

Οι **θάλαμοι Ιονισμού** (Ionization Chambers) είναι οι πιο απλοί ανιχνευτές αερίου και βασίζουν τη λειτουργία τους στη συλλογή των φορτίων που δημιουργούνται από τον πρωτογενή ιονισμό του αερίου που προκαλεί ένα εισερχόμενο σωματίδιο μέσω της εφαρμογής ενός ηλεκτρικού πεδίου. Οι υπόλοιποι ανιχνευτές αερίου αποτελούν εξέλιξη αυτών των ανιχνευτών με στόχο την βελτίωση της ποιότητας του παραγόμενου σήματος.

### 1.10.1 Κατανομή των ενεργειακών απωλειών

$$\text{Μπορεί η εξίσωση Beth-Block: } -\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = \frac{4\pi}{m_e c^2} \cdot \frac{nz^2}{\beta^2} \cdot \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \cdot \left[ \ln \left( \frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)} \right) - \beta^2 \right]$$

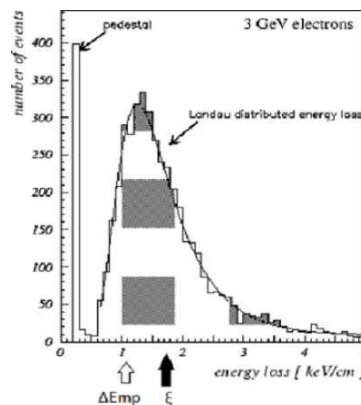
να μας δίνει την απώλεια ενέργειας ενός φορτισμένου σωματιδίου καθώς διασχίζει ένα υλικό, στην πραγματικότητα όμως η διαδικασία επιβράδυνσης ενός φορτισμένου σωματιδίου είναι ένα στατικό φαινόμενο, δεδομένου ότι οι αλληλεπιδράσεις που είναι υπεύθυνες για τις ενεργειακές απώλειες του σωματιδίου είναι μία σειρά ανεξάρτητων

επιτυχημένων γεγονότων. Κάθε αλληλεπίδραση του εισερχόμενου σωματιδίου με τα ατομικά ηλεκτρόνια μπορεί να μεταδώσει διαφορετικό κλάσμα της κινητικής του ενέργειας. Η εξίσωση Beth-Block μας επιτρέπει να υπολογίσουμε τη μέση τιμή της απώλειας ενέργειας, αλλά αυτή η τιμή υπόκειται σε στατιστικές διακυμάνσεις. Η ενέργεια που χάνεται σε ένα φορτισμένο σωματίδιο σε πάχος  $\chi$ , θα χαρακτηρίζεται από μία συνάρτηση κατανομής των ενεργειακών απωλειών. Το σχήμα δείχνει μια τυπική κατανομή Landau για την απώλεια ενέργειας φορτισμένου σωματιδίου σε υλικό μικρού πάχους με εξίσωση:

$$F(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{(-\frac{1}{2}\lambda + e^{-\lambda})}$$

όπου  $\lambda$  είναι η κανονικοποιημένη απόκλιση από την πιο πιθανή ενεργειακή απώλεια  $(\Delta)_{mp}$  όταν  $\Delta E$  είναι η πραγματική απώλεια και  $\xi$  η μέση τιμή της:

$$\lambda = \frac{\Delta - (\Delta)_{mp}}{\xi}$$



Σχήμα 0.7: Κατανομή Landau

Η κορυφή στο σχήμα αντιπροσωπεύει την πιο πιθανή τιμή της ενεργειακής απώλειας. Η κατανομή παρουσιάζει μία "ουρά" στην περιοχή των υψηλών απωλειών που οφείλεται στα παραγόμενα με μικρή σχετικά πιθανότητα  $\delta$  - ηλεκτρόνια. Αυτή η ουρά μετατοπίζει την μέση τιμή της κατανομής προς τα δεξιά.

### 1.10.2 Διέγερση και ιονισμός σε αέρια

Η ενεργειακή απώλεια του υπό ανίχνευση σωματιδίου μεταφέρεται στα ατομικά ηλεκτρόνια του απορροφητή μέσω δυο μηχανισμών, τη **διέγερση** και τον **ιονισμό**.

**Διέγερση:**

Στην περίπτωση του ιονισμού, ένα ατομικό ηλεκτρόνιο προσλαμβάνει ενέργεια που οδηγεί το άτομο σε μία ανώτερη ενεργειακά στάθμη (διεγερμένη), διαδικασία κατά την οποία δεν δημιουργούνται χρήσιμα ζεύγη ιόντων. Το άτομο στη συνέχεια επιστρέφει στη σταθερή του κατάσταση, συνήθως μέσω της εκπομπής ενός φωτονίου. Είναι όμως δυνατό η διέγερση να οδηγήσει σε ιονισμό σε ένα αέριο μείγμα που αποτελείται από ένα ευγενές αέριο και ένα αέριο "απόσβεσης" με ενέργεια ιονισμού μικρότερη από την ενέργεια της πρώτης διεγερμένης στάθμης του ευγενούς αερίου (συνήθως υδρογονάνθρακες). Τα διεγερμένα άτομα ή μόρια του ευγενούς αερίου μπορούν να ιονίσουν τα άτομα του αποσβέστη μέσω κρούσεων (φαινόμενο Penning). Ένα παράδειγμα τέτοιου ιονισμού είναι το παρακάτω όπου  $G$  είναι το ευγενές αέριο και  $M$  ο αποσβέστης [2].



#### **Ιονισμός:**

Ο ιονισμός συμβαίνει όταν δημιουργείται ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-ιόντος. Για να μπορέσει να συμβεί ο ιονισμός πρέπει η ενέργεια του σωματιδίου που διασχίζει το αέριο να υπερβαίνει την ενέργεια ιονισμού των ατόμων του απορροφητή. Η ενέργεια ιονισμού για τα ελάχιστα δέσμια ηλεκτρόνια είναι μεταξύ 10-25 eV στα αέρια που χρησιμοποιούνται στους περισσότερους ανιχνευτές αερίου.

#### **1.10.3 Αριθμός παραγόμενων ζευγών ιόντων**

Η μέση απώλεια ενέργειας του εισερχόμενου σωματιδίου ανά ζεύγος ιόντων που δημιουργείται συμβολίζεται με  $W_i$  και είναι σαφώς μεγαλύτερη από την ενέργεια ιονισμού των ατόμων του απορροφητή κυρίως λόγω της ενέργειας του σωματιδίου που διοχετεύεται σε διαδικασίες διέγερσης. Παρόλο που η τιμή του  $W_i$ , εξαρτάται από το είδος του αερίου, τον τύπο του υπό ανίχνευση σωματιδίου και την ενέργεια του, παρατηρήθηκε εμπειρικά ότι έχει μια σχετικά σταθερή τιμή για μεγάλο αριθμό σωματιδίων και αερίων, 25-35 eV/ζεύγος ιόντων.

Μπορούμε επομένως να υπολογίσουμε κατά προσέγγιση των αριθμών των παραγόμενων ζευγών γνωρίζοντας την συνολική απώλεια ενέργειας του σωματιδίου  $\Delta E$  σύμφωνα με τον τύπο:

$$n_T = \frac{\Delta E}{w_i}$$

## 1.11 Οι Ανιχνευτές Micromegas

Πρόκειται για ανιχνευτές αερίου των οποίων η λειτουργία βασίζεται στα φαινόμενα ηλεκτρομαγνητικής φύσης που δημιουργούνται όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο διέρχεται μέσα από μια περιοχή αερίου. Η αλληλεπίδραση μεταξύ του σωματιδίου και των ατόμων του αερίου δημιουργεί δυο πολύ σημαντικά φαινόμενα, τη διέγερση και τον ιονισμό.

Σε ένα ανιχνευτή ιονισμού αερίου για μικρές τιμές εφαρμοζόμενης διαφοράς δυναμικού το παραγόμενο σήμα βασίζεται στα προϊόντα του πρωτογενούς ιονισμού (Ionization Chambers). Αν το ηλεκτρικό πεδίο αυξηθεί περαιτέρω, τα ηλεκτρόνια του έχουν αρκετή ενέργεια να προκαλέσουν με τη σειρά τους δευτερογενείς ιονισμούς στο αέριο πετυχαίνοντας μία ενδογενή ενίσχυση του φαινομένου για παραγωγή χρήσιμου σήματος. Αρχικά θα παρουσιάσουμε κάποια βασικά χαρακτηριστικά των ανιχνευτών ιονισμού και στην συνέχεια θα παρουσιάσουμε τον τρόπο λειτουργίας του ανιχνευτή MicroMeGas. Το βασικό πλεονέκτημα των συγκριμένων ανιχνευτών είναι η σχετικά εύκολη επίτευξη μεγάλων απολαβών (Gain) ενώ μπορούν να κατασκευαστούν και στις διαστάσεις που είναι επιθυμητές για κάθε πείραμα.

### Τεχνολογία Ανιχνευτή MicroMeGas

Το 1996 προτάθηκε από τους I. Γιοματάρη & G. Charpak [3] μία νέα διάταξη ανιχνευτή αερίου, ο οποίος ονομάστηκε Micromegas από τα χαρακτηριστικά της διάταξης:

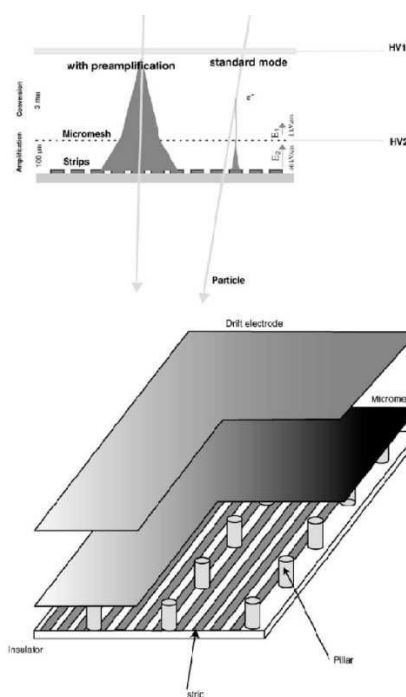
- **MICRO**
- **MEsh**
- **GAseous**
- **Structure**

Πρόκειται για έναν ανιχνευτή αερίου παράλληλων πλακών ο ενεργός χώρος του οποίου χωρίζεται σε δύο τμήματα, i) **περιοχή μετατροπής** και ii) **περιοχή ενίσχυσης**, από ένα μεταλλικό πλέγμα ιδιαίτερα μικρών οπών (**micromesh**).

#### 1.11.1 Γεωμετρία και Αρχή Λειτουργίας Διάταξης

Το βασικό χαρακτηριστικό του ανιχνευτή είναι η σημαντική ασυμμετρία που χαρακτηρίζει τις δύο ενεργές περιοχές του. Συγκεκριμένα ένα πλέγμα διαχωρίζει την περιοχή μετατροπής, πλάτους 5 mm, από την πολύ μικρότερη περιοχή ενίσχυσης, με

πλάτος περίπου 100  $\mu\text{m}$ . Ο συγκεκριμένος σχεδιασμός, όπως θα δούμε στη συνέχεια, μας επιτρέπει, εφαρμόζοντας λογικές τιμές τάσης στα ηλεκτρόδια της διάταξης, να λαμβάνουμε υψηλές τιμές για το ηλεκτρικό πεδίο στη περιοχή ενίσχυσης ( $\sim 100 \text{ kV/cm}$ ) και σχετικά ασθενές πεδίο στην περιοχή ολίσθησης. Επιτυγχάνουμε έτσι ιδιαίτερα υψηλό λόγο ανάμεσα στο ηλεκτρικό πεδίο της περιοχής ενίσχυσης και σε αυτό της περιοχής μετατροπής, κάτι που είναι απαραίτητο για την ιδανική λειτουργία της συσκευής. Το σχέδιο μίας εγκάρσιας τομής του ανιχνευτή παρουσιάζεται στο σχήμα 2.9 και στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε τα κύρια "συστατικά" της αρχικής διάταξης.



Σχήμα 0.8: Διάταξη ανιχνευτή MicroMeGas [4]

### 1.11.2 Ηλεκτρόδιο Ανόδου

Ανοδικά χάλκινα strips με μία επίστρωση χρυσού, πλάτους 200  $\mu\text{m}$ , εφαρμόζονται σε υπόστρωμα 1 mm. Το πάχος κάθε strip είναι 5  $\mu\text{m}$ . Τα ιδιαίτερα λεπτά strips κατασκευάζονται εύκολα μέσω διαδικασίας εναπόθεσης κενού, κατά την οποία κάθε άτομο/μόριο του υλικού εναποτίθεται πάνω σε κάποιο υπόστρωμα χωριστά. Πετυχαίνουμε έτσι σημαντική μείωση στο μέγεθος των διάκενων μεταξύ των διαδοχικών strips.

### 1.11.3 Micromesh

Αρχικά το πλέγμα ήταν φτιαγμένο από νικέλιο (πάχους 3  $\mu\text{m}$ ) με ανοίγματα διαμέτρου 17  $\mu\text{m}$  ανά 25  $\mu\text{m}$  μέσω μίας διαδικασίας που είναι γνωστή ως electrofirming technique. Η ακρίβεια που επιτυγχάνεται στη κατασκευή είναι καλύτερη του 1  $\mu\text{m}$  ενώ η διαπερατότητά του πλέγματος μετρήθηκε στο 45%. Στην πορεία εξέλιξης του Micromegas χρησιμοποιήθηκαν και άλλα υλικά που βοηθούσαν την καλύτερη λειτουργία του ανιχνευτή όπως χαλκός και ατσάλι ενώ και το μέγεθος και η απόσταση μεταξύ των οπών διαφέρει ανάλογα.

### 1.11.3 Pillars

Για τη δημιουργία της περιοχής ενίσχυσης, κατασκευάστηκαν κυλινδρικά spacers που διαχωρίζουν το micromesh από την άνοδο και τα διατηρούν παράλληλα μεταξύ τους. Οι ίνες αυτές τοποθετήθηκαν αρχικά με τον άξονα τους παράλληλο στο επίπεδο που βρίσκονται τα ανοδικά strips. Η διάμετρος τους είναι 100  $\mu\text{m}$  και απέχουν μεταξύ τους 2 mm απόσταση. Κατασκευάζονται από μονωτικό υλικό και αρχικά χρησιμοποιήθηκαν ίνες από  $\text{Si:O}_2$ . Σήμερα στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται **pillars** από karton ή kevlar που τοποθετούνται ανάμεσα σε άνοδο και πλέγμα με τέτοιο τρόπο ώστε το ύψος τους να καθορίζει το πλάτος της περιοχής ενίσχυσης.

### 1.11.4 Ηλεκτρόδιο Καθόδου

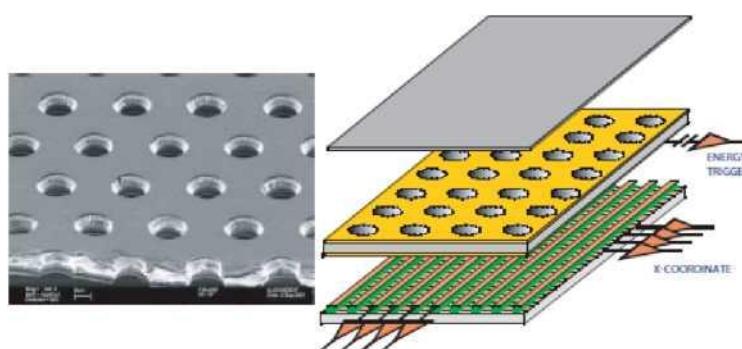
Το πρώτο ηλεκτρόδιο που συναντά το εισερχόμενο στον ανιχνευτή σωματίδιο έχει και αυτό τη μορφή πλέγματος για να επιτρέπει τη διέλευση του σωματιδίου. Η διαπερατότητα του φτάνει το 80% και αποτελεί την αρχή της περιοχής μετατροπής του ανιχνευτή. Για την κατασκευή του χρησιμοποιείται συνήθως αλουμίνιο και στην αρχική διάταξη το πάχος του ήταν 100  $\mu\text{m}$ . Το ηλεκτρικό πεδίο της πρώτης περιοχής δημιουργείται εφαρμόζοντας αρνητική τάση ( $HV_2$ ) στο micromesh και μία ελαφρώς μεγαλύτερη τάση ( $HV_1$ ) στο καθοδικό ηλεκτρόδιο που τοποθετείται σε απόσταση μερικών mm από το micromesh (συνήθως 5 mm). Στα νεότερα πρωτότυπα του ανιχνευτή το mesh κατασκευάζεται γειωμένο με την τάση να εφαρμόζεται στα strips γεγονός που διευκολύνει και απλουστεύει τη διαδικασία κατασκευής του ανιχνευτή [2].

### 1.11.6 Αρχή Λειτουργίας

Το προς ανίχνευση σωματίδιο αφού περάσει το ηλεκτρόδιο καθόδου βρίσκεται στην περιοχή μετατροπής που εκτείνεται μερικά mm πάνω από το micromesh. Εκεί



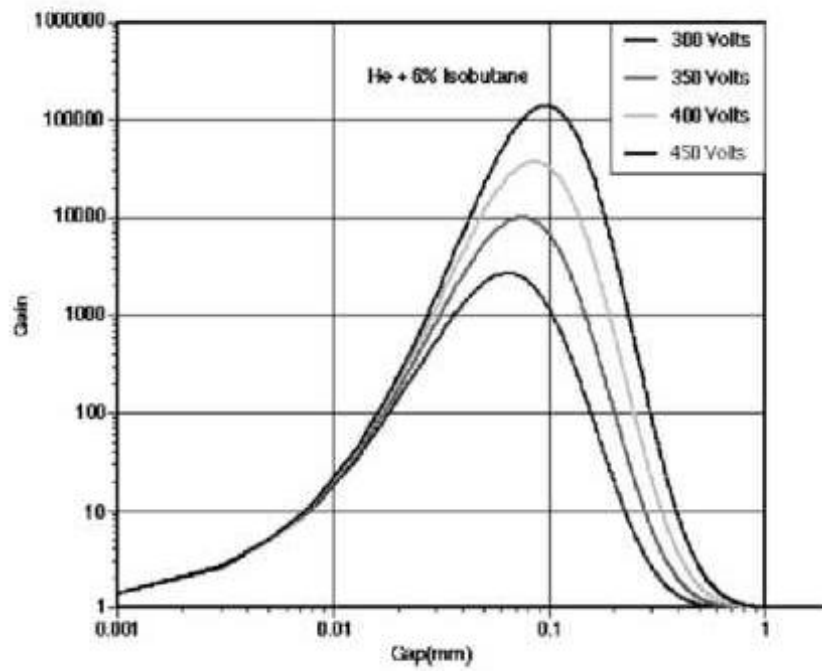
αλληλεπιδρώντας με το αέριο εναποθέτει την ενέργεια του στα άτομα του μέσω των γνωστών φαινομένων (ιονισμός/διέγερση). Ο ιονισμός του αερίου έχει σαν συνέπεια τη δημιουργία ηλεκτρονίων και θετικών ιόντων στην περιοχή μετατροπής του ανιχνευτή. Τα ηλεκτρόνια υπό την επίδραση ασθενούς ηλεκτρικού πεδίου ολισθαίνουν προς το micromesh ενώ τα ιόντα ακολουθούν την αντίθετη κατεύθυνση προς το ηλεκτρόδιο καθόδου. Μέσω του πλέγματος τα ηλεκτρόνια οδηγούνται στην περιοχή ενίσχυσης όπου λόγω του ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου που επικρατεί στην περιοχή προκαλούν δευτερεύοντες ιονισμούς. Η μεγάλη διαφορά στην στις τιμές του πεδίου για τις δύο περιοχές εξασφαλίζει ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των ηλεκτρονίων διαπερνά το πλέγμα και φτάνει στην περιοχή ενίσχυσης ισχυρού πεδίου. Σαν αποτέλεσμα δημιουργείται μία χιονοστιβάδα ηλεκτρονίων που συλλέγεται από τα ανοδικά strips ενώ τα δευτερεύοντα ιόντα ολισθαίνουν προς το πλέγμα όπου συλλέγονται [2].



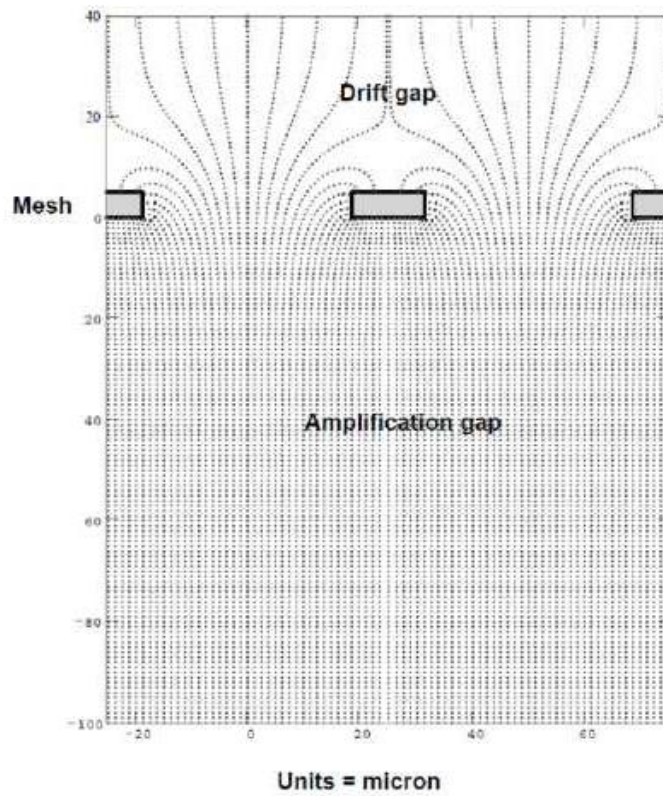
Σχήμα 0.9: Αποψη του Micromesh

### 1.11.7 Εγγενείς ιδιότητες

Ένα πολύ σημαντικό γνώρισμα αυτού του μικρών διαστάσεων ανιχνευτή είναι η επιλογή της απόστασης μεταξύ πλέγματος και ανόδου. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα η ενίσχυση που επιτυγχάνεται με τη συγκεκριμένη διάταξη εμφανίζει τη μέγιστη τιμή της για πλάτη της περιοχής ενίσχυσης 50-100  $\mu\text{m}$ . Ο ανιχνευτής MicroMeGas που λειτουργεί με αυτά τα χαρακτηριστικά εμφανίζει σταθερά υψηλή τιμή ενίσχυσης και επηρεάζεται ελάχιστα από μικρές τεχνικές ατέλειες της διάταξης.



Σχήμα 0.10: Η ενίσχυση συναρτήσει του πάχους της περιοχής ενίσχυσης



Σχήμα 1.11: Αναπαράσταση των δυναμικών γραμμών του ηλεκτρικού πεδίου στον MicroMeGas [5].

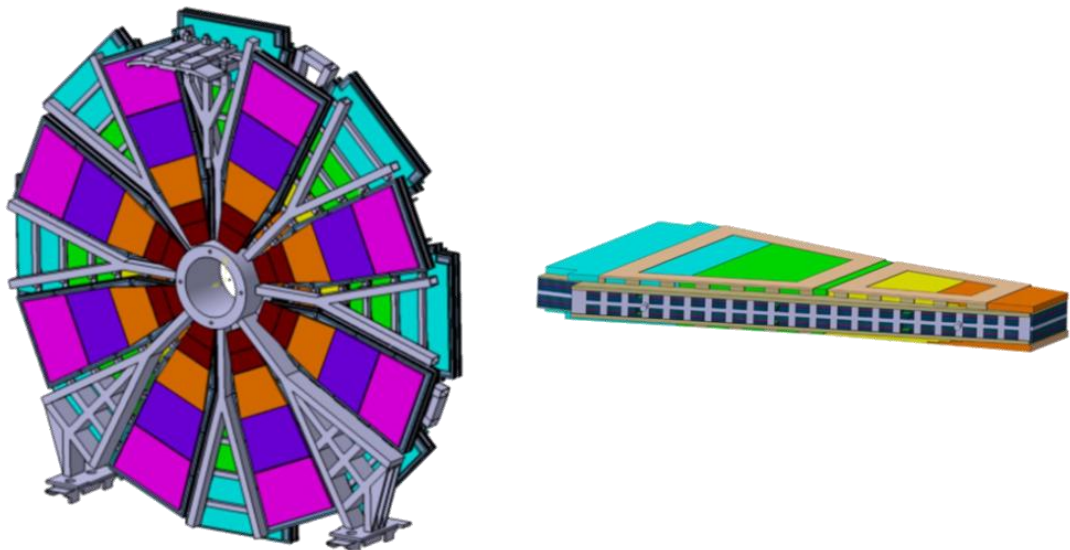
Η ομοιομορφία του ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή ενίσχυσης εγγυάται ικανοποιητική σταθερότητα στη δημιουργία και εξέλιξη της χιονοστιβάδας ιονισμού. Το σχήμα του ηλεκτρικού πεδίου, όμως, στρεβλώνεται κοντά στις οπές που παρουσιάζει το micromesh (Σχήμα 2.12). Η κατανόηση του εν λόγω φαινομένου είναι ιδιαίτερα σημαντική για την λειτουργία του ανιχνευτή, ειδικά για την ομαλή ροή των ηλεκτρονίων μέσω των οπών, αλλά και για την ταχεία απομάκρυνση των θετικών ιόντων. Εξαιτίας της κατανομής φορτίου στην εξωτερική επιφάνεια του mesh παρατηρείται αυτή η καμπυλότητα των δυναμικών γραμμών του πεδίου στην περιοχή των οπών. Χρησιμοποιώντας ένα micromesh μικρού πάχους, υπό την προϋπόθεση ότι ο λόγος του ηλεκτρικού πεδίου στις δύο περιοχές του ανιχνευτή είναι μεγαλύτερος του δέκα, καμία από τις δυναμικές γραμμές που ξεκινούν από την πάνω επιφάνεια του πλέγματος δεν έχει το πέρας της στην κάτω επιφάνεια του. Σαν συνέπεια το μεγαλύτερο ποσοστό των ηλεκτρονίων που δημιουργούνται στην περιοχή μετατροπής διέρχονται μέσω των οπών στην περιοχή ενίσχυσης προκαλώντας δευτερεύοντες ιονισμούς πριν καταλήξουν στα ανοδικά strip. Η συγκεκριμένη μορφή των δυναμικών γραμμών είναι υπεύθυνη και για την ταχύτερη "απορρόφηση" των θετικών ιόντων, ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα συγκέντρωσης φορτίου.

Το σήμα στα ανοδικά strips και στην κάθοδο (mesh) δημιουργείται εξ απαγωγής από τα κινούμενα ηλεκτρόνια και θετικά ιόντα αντίστοιχα. Το σήμα του φορτίου οφείλεται κυρίως στα θετικά ιόντα που ολισθαίνουν προς την κάθοδο για χρόνους της τάξεως των 100 ns ενώ το σήμα του ρεύματος δημιουργείται κατά κύριο λόγο από τα ηλεκτρόνια εξαιτίας της μεγάλης κινητικότητάς τους (περίπου 100 φορές μεγαλύτερη από των ιόντων).

Εξαιτίας της μικρής απόστασης μεταξύ των οπών του πλέγματος, η διασπορά του χρόνου κατά την τροχιά του ηλεκτρονίου είναι σχετικά μικρή. Κατά συνέπεια, ο ανιχνευτής χαρακτηρίζεται από εξαιρετική χρονική διακριτική ικανότητα [6]. Η εγκάρσια διατομή του επαγόμενου σήματος περιορίζεται σε μικρή περιοχή του ανοδικού στρώματος, γεγονός που συνεπάγεται εξαιρετική χωρική διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή [2].

## 1.12 New Small Wheel

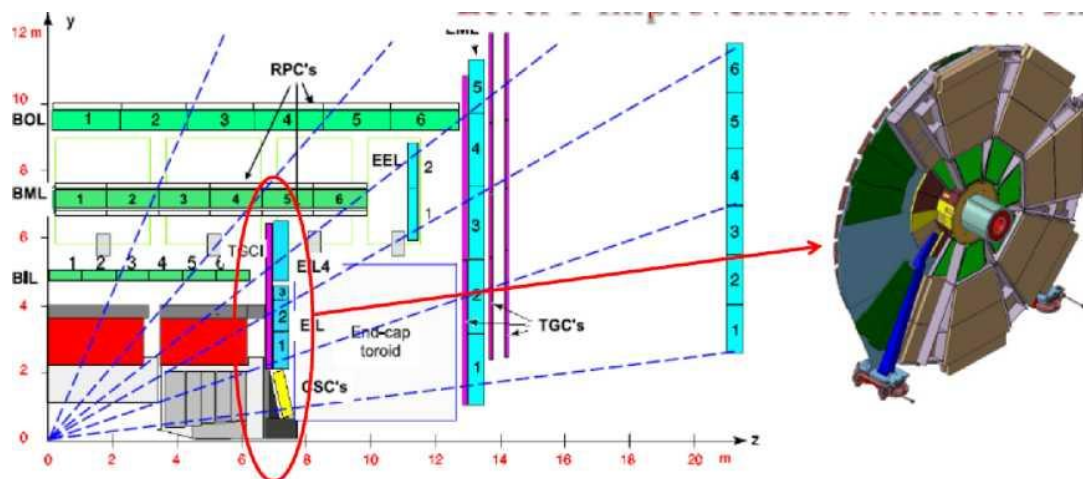
Δεδομένου των όλο και μεγαλύτερων απαιτήσεων σε μετρήσεις ακριβείας και αύξησης της ενέργειας σύγκρουσης των δεσμών στο ATLAS, απαιτείται να γίνεται συνεχής αναβάθμιση των εγκαταστάσεων. Έτσι έχει ήδη ξεκινήσει η σταδιακή αναβάθμιση του LHC στους μιονικούς θαλάμους και στα καλορίμετρα. Στην 1<sup>η</sup> φάση αναβάθμισης σκοπός είναι να βελτιωθεί το όριο σκανδαλισμού των ανιχνευτών Micromegas και η απομάκρυνση του θορύβου από το σήμα των ανιχνευτών. η 1<sup>η</sup> φάση θα ολοκληρωθεί εντός των επόμενων τεσσάρων ετών και θα περιλαμβάνει την κατασκευή 140 νέων ανιχνευτών μιονίων που θα δώσουν τη δυνατότητα να λειτουργήσει το πείραμα ATLAS με νέα πολύ μεγαλύτερη φωτεινότητα μετά την αναβάθμιση του LHC. Στη 2<sup>η</sup> φάση της αναβάθμισης του ATLAS που θα ξεκινήσει το 2022 θα γίνει πλήρης αντικατάσταση του κεντρικού συστήματος ανιχνευτών και αναβάθμιση του συστήματος σκανδαλισμού και ανάγνωσης. [7] [8] [9].



Σχήμα 1.12: New Small Wheel

Στους ανιχνευτές Micromegas που χρησιμοποιούνται στο πείραμα ATLAS χρησιμοποιείται ευγενές αέριο Αργό. Πρόκειται για ανιχνευτές που διοχετεύεται αέριο από μια είσοδο και εξέρχεται αντίστοιχη ποσότητα αερίου από αντίστοιχη έξοδο ώστε να ανανεώνεται συνεχώς το εσωτερικό τους και να υπάρχει μια ομοιόμορφη ροή χωρίς καθιζήσεις και ρύπους.

## 1.13 sLHC - ATLAS Upgrade – MAMMA



Σχήμα 1.13: Το Small Wheel το φασματόμετρο μιονίων του πειράματος ATLAS

Ο επιταχυντής sLHC είναι μια προτεινόμενη βελτίωση του μεγάλου επιταχυντή αδρονίων (Large Hadron Collider), η οποία βρίσκεται στις ερευνητικές εγκαταστάσεις του CERN στη Γενεύη και σκοπεύεται να λειτουργήσει για 10 περίπου επιχειρησιακά έτη. Η βελτίωση στοχεύει στην αύξηση της φωτεινότητας της μηχανής κατά έναν παράγοντα 10, προσεγγίζοντας, έτσι, την τιμή  $10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ , παρέχοντας με τον τρόπο αυτό αύξηση της πιθανότητας ανίχνευσης και μελέτης σπάνιων φυσικών διεργασιών και παράλληλα στατιστική βελτίωση των οριακών μετρήσεων.

Προκειμένου να προετοιμαστεί για την προτεινόμενη αναβάθμιση του LHC σε μεγαλύτερη φωτεινότητα για την επόμενη δεκαετία (sLHC), το πείραμα ATLAS ερευνά τις απαραίτητες αλλαγές που πρέπει να γίνουν στα διάφορα υποσυστήματα του ανιχνευτή ώστε να αυτά να είναι ανθεκτικά κατά την έκθεση τους σε πολύ υψηλότερη στιγμιαία φωτεινότητα από την παρούσα και λειτουργικά πέρα των  $3000 \text{fb}^{-1}$  συνολικών δεδομένων. Ο στόχος είναι να επιτευχθεί η ίδια, ή καλύτερη απόδοση του ανιχνευτή στον sLHC σε σύγκριση με τον LHC παρά την μεγάλη αύξηση στον ρυθμό καταγραφής γεγονότων και την τελική συνολική δόση.

Η περιοχή του Small Wheel του συστήματος των μιονίων είναι από τα τμήματα του ανιχνευτή που χρήζουν αναβάθμισης προκειμένου να ανταπεξέλθουν στις νέες

πιο απαιτητικές συνθήκες. Οι υπάρχοντες ανιχνευτές (CSC & MDT) δεν θα είναι λειτουργικοί στην αναμενόμενη φωτεινότητα ( $5 \cdot 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) και δεν έχουν τα χαρακτηριστικά που απαιτούνται προκειμένου να συμμετέχουν στο L1 trigger του ATLAS. Ακόμη, εξαιτίας της ανικανότητας των υπάρχοντων ανιχνευτών στην συγκεκριμένη περιοχή να μας εφοδιάσουν με το διάλυσμα της τροχιάς κάθε σωματιδίου που προέρχεται από το σημείο αλληλεπίδρασης το μεγαλύτερο μέρος των γεγονότων που καταγράφονται από το ανιχνευτή αποτελούν fake γεγονότα υποβάθρου. Προκειμένου αυτά τα ανεπιθύμητα γεγονότα να αποκοπούν για την offline επεξεργασία των δεδομένων εφαρμόζονται ιδιαίτερα σκληρά κριτήρια αποκοπής στην κατανομή των σωματιδίων.

Κατά συνέπεια θα αντικατασταθούν κατά την αναβάθμιση του ανιχνευτή από νέας τεχνολογίας ανιχνευτές που θα είναι λειτουργικοί σε υψηλούς ρυθμούς διερχόμενων σωματιδίων και θα μπορούν να ανακατασκευάσουν τροχιές με ακρίβεια μεγαλύτερη του 1 mrad συμμετέχοντας στο L1 trigger του πειράματος μειώνοντας αισθητά το ποσοστό των fake rates αυξάνοντας τη στατιστική των δεδομένων.



**Σχήμα1.14:** (α ) Ανιχνευτής Micromegas δοκιμαστικού μεγέθους στο Small Wheel του πειράματος ATLAS [2].



Σχήμα 1.15: Η συναρμολόγηση ενός μεγάλου ανιχνευτή Micromegas [2].

Η ομάδα MAMMA (Muon ATLAS Micromegas Activities), που ασχολείται με την έρευνα και την εξέλιξη του ανιχνευτή Micromegas τα τελευταία χρόνια, προτείνει την τεχνολογία του resistive Micromegas για την αντικατάσταση των ανιχνευτών του SW στο πείραμα ATLAS [10]. Τα εξαιρετικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης τεχνολογίας μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- Μπορεί να λειτουργήσει τόσο σαν trigger ανιχνευτής όσο και σαν ανιχνευτής τροχιών λόγω της εξαιρετικής χρονικής και χωρικής διακριτικής ικανότητας.
- Χωρική διακριτική ικανότητα καλύτερη των 80  $\mu\text{m}$  ακόμα για τροχιές με γωνία μέχρι και  $45^\circ$ .
- Μπορεί να διακρίνει περισσότερες από μία τροχιές ανά γεγονός (double track).
- Χρονική διακριτική ικανότητα της τάξεως των 5 ns.
- Εξαιρετική Απόδοση ( 99% efficient).
- Ο ανιχνευτής λειτουργεί απροβλημάτιστα ακόμα και για ρυθμό εισερχόμενων σωματιδίων μεγαλύτερο των 5  $\text{kHz}/\text{cm}^2$

Τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά έχουν μελετηθεί και επιβεβαιωθεί σε δέσμες δοκιμής και η εκτενής μελέτη τους είναι το αντικείμενο και της παρούσας εργασίας. Ακόμη πρωτότυποι ανιχνευτές Micromegas μικρού μεγέθους έχουν τοποθετηθεί "παρασιτικά" στην περιοχή του SW του πειράματος ATLAS και τα πρώτα αποτελέσματα της ανάλυσης των δεδομένων αυτών επιβεβαιώνουν την εξαιρετική

λειτουργία και απόδοση των ανιχνευτών. Οι προσπάθειες έρευνας και εξέλιξης επικεντρώνονται πλέον στην κατασκευή ανιχνευτών του συγκεκριμένου τύπου με μεγάλο μέγεθος, που θα μπορούν να καλύψουν επιτυχώς την επιφάνεια του SW διατηρώντας όλες τις εξαιρετικές δυνατότητες του ανιχνευτή Micromegas.

## 1.14 Ποιοτικός έλεγχος ανιχνευτών MicroMeGas

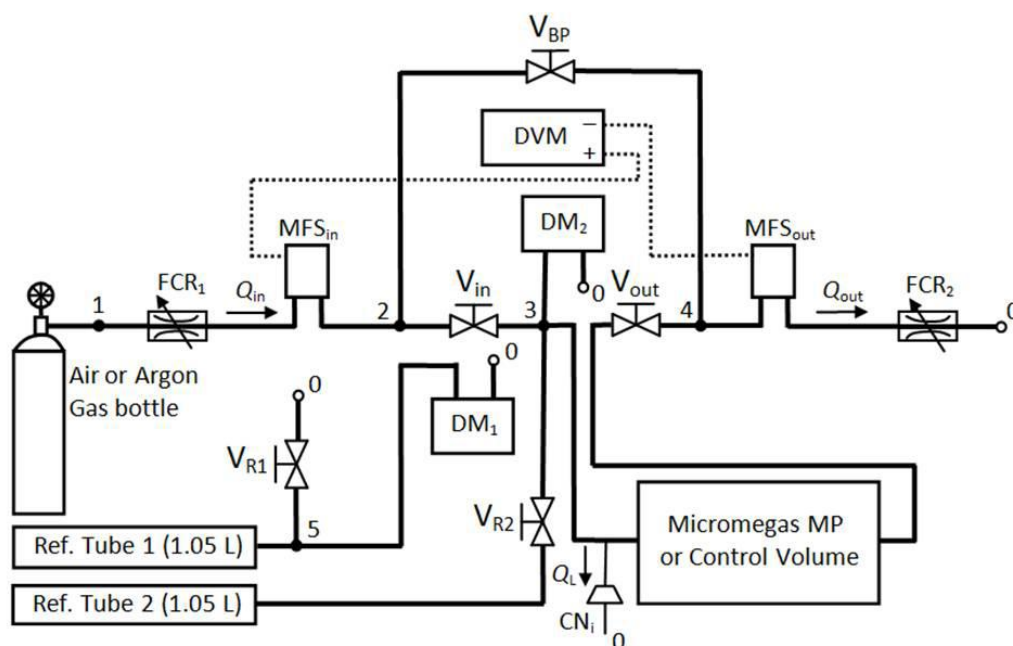
Για τον σκοπό της παραγωγής των NSW Micromegas Quadruplet για την φάση I αναβάθμισης του LHC, που πραγματοποιείται στο CERN, είναι θεμελιώδους σημασίας η ακριβής σφράγιση του φυσικού αερίου που περιέχουν στο εσωτερικό του.

Η δοκιμή στεγανότητας των ανιχνευτών είναι ουσιώδους σημασίας, γιατί η εξασφάλιση της στεγανότητας των ανιχνευτών θα εξασφαλίσει την απρόσκοπτη λειτουργία τους. Εάν οι θάλαμοι που θα κατασκευαστούν παρουσιάζουν διαρροές πάνω από κάποιο όριο τότε η αποκατάσταση του προβλήματος θα είναι χρονοβόρα και δαπανηρή. Για τον σκοπό αυτό προβλέπεται έλεγχος της στεγανότητας στο εργαστήριο του CERN πριν την εγκατάστασή τους στο NSW. Η ερευνητική μας ομάδα έχει αναπτύξει την ειδική καινοτόμο μέθοδο Flow Rate Loss (FRL). Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην αρχή διατήρησης της μάζας του αερίου μίγματος. Στη διαδικασία καταγραφής του σήματος που εκφράζει τη διαρροή αερίου (διαφορικό σήμα από τους αισθητήρες ροής μάζας) έχει χρησιμοποιηθεί κατάλληλα η μέθοδος Lock-in Amplifier (LIA) με σκοπό να αυξηθεί σημαντικά η ευαισθησία του συστήματος μέτρησης.

Στην μέθοδο FRL μελετάμε ένα διαφορικό σήμα τύπου DC που προέρχεται από δύο αισθητήρες ροής μάζας (Mass Flow Sensors). Η τάξη μεγέθους του διαφορικού σήματος είναι μερικά mV και κοντά στο όριο αποδοχής. Όμως, σε αυτό το σήμα συμπεριλαμβάνεται και ισχυρός θόρυβος που επηρεάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεών μας. Με την αξιοποίηση της τεχνικής LIA μπορεί να αυξηθεί ο λόγος S/N του διαφορικού σήματος και να περιοριστεί η ένταση του θορύβου συναρτήσει του μεγέθους του σήματος, δίνοντάς μας καλύτερες πειραματικές μετρήσεις. Και οι δύο μέθοδοι αξιοποιούνται σε ένα σύστημα του εργαστηρίου στο οποίο εξομοιώνουμε τις συνθήκες διαρροών που θα επικρατούν στους ανιχνευτές και είναι



στο επίπεδο του αποδεκτού ορίου. Οι πιέσεις μετρώνται με τη χρήση δύο ψηφιακών διαφορικών μανόμετρων. Το πρωτότυπο setup απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα:



**Εικόνα 1.14.1** Απεικόνιση του πρωτότυπου setup στο οποίο απεικονίζεται η φιάλη αερίου και οι δύο Mass flow Sensors.

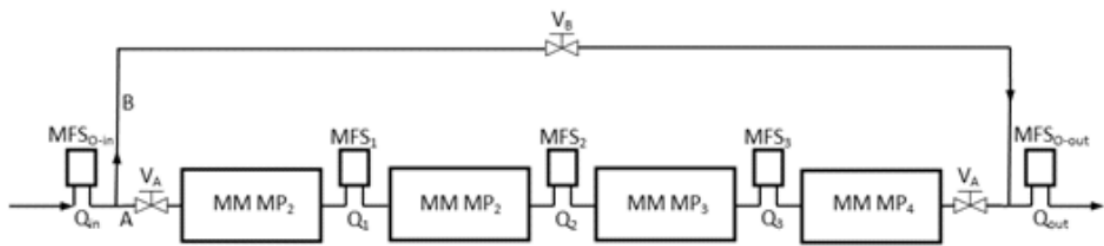
Οι εξομοιούμενες διαρροές που δημιουργούμε στο εργαστήριο θα μπορούσαν να ελεγχτούν με τη χρήση ενός T-connector. Αρχικά για την βαθμονόμησή τους έγιναν κάποια τεστ εκτίμησης. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο PDR αποκτήσαμε μια αρχική εκτίμηση την πτώσης πίεσης που δημιουργείται σε ένα κλειστό κύκλωμα αερίου, μέσω της διαρροής που προκύπτει από μια ιατρική βελόνα τύπου 31G-CN ενώ οι διακυμάνσεις στην ατμόσφαιρα αντισταθμίζονται με τη χρήση ενός διαφορικού μανόμετρου. Η εξίσωση της καμπύλης που προκύπτει από το την βαθμονόμηση είναι  $p = -10.2t + 1.13$  με μονάδες μέτρησης second για τον χρόνο και mbar για την πίεση με σφάλμα στην κλίση 10%. Η μικρή θετική διαφορά που φαίνεται στον ρυθμό της ροής αντιστοιχεί στην απώλεια λόγω της διαρροής.

Στην μέθοδο FRL η έξοδος τάσης των MFS στην είσοδο και έξοδο εξομοιώνονται τεχνητές διαρροές των θαλάμων Micromegas με τη χρήση ιατρικών βελονών διαφόρων τύπων (όπως η G32). Συνεπώς, το ποσοστό της απώλειας διαρροής που είναι θετική ποσότητα, υπολογίζεται σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

$$Q_L = (Q_{in}^A - Q_{out}^A) - (Q_{in}^B - Q_{out}^B) = \frac{1}{b_1}[(V_{0,in}^A - V_{0,out}^A) - \frac{b_1}{b_2}(V_{0,in}^B - V_{0,out}^B)] \text{ Όπου } V_{0,in}^A$$

και  $V_{0,out}^A$  είναι η διαφορά δυναμικού ο κλάδος A και αντίστοιχα  $V_{0,in}^B$  και  $V_{0,out}^B$  είναι η διαφορά δυναμικού εάν χρησιμοποιείται ο κλάδος B.

Η δοκιμή έλεγχου διαρροών με τη χρήση της μεθόδου FRL μπορεί να εφαρμοστεί κατά την διαδικασία μαζικής παραγωγής στο σταθμό BB5 στο CERN, όπου θα γίνεται ο έλεγχος στεγανότητας των ανιχνευτών. Κατά την μέθοδο FRL η απώλεια μάζας του αερίου που υπάρχει στο εσωτερικό των ανιχνευτών και χάνεται στο περιβάλλον, εκφράζεται μέσω της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των αισθητήρων που θα βρίσκονται τοποθετημένοι στην είσοδο και έξοδο του ανιχνευτή, έτσι θα είναι εύκολος και γρήγορα αντιληπτός ο τρόπος που χάνεται μια μικρή ποσότητα αερίου μέσω των μεταβολών των τάσεων των MFS. Η θέση των Mass Flow Sensors και των ανιχνευτών MM MP<sub>2</sub> αναπαρίσταται στο παρακάτω σχήμα.



1.14.2

Η χρήση της μεθόδου FRL ενδείκνυται για τις μετρήσεις διαρροών στους ανιχνευτές Micromegas και έγινε πιο αποτελεσματική με την χρήση της μεθόδου LIA που αξιοποιήσαμε. Με την μέθοδο LIA απομακρύναμε μεγάλο μέρος του θορύβου από το διαφορικό σήμα μεταξύ των Mass Flow Sensors και βελτιώσαμε την ικανότητα ανίχνευσης διαρροών μέσω του SETUP του εργαστηρίου μας σε βαθμό που να μπορούμε να ανιχνεύουμε διαρροές που βρίσκονται κάτω από το ελάχιστο αποδεκτό όριο. Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε αναλυτικά περισσότερες πληροφορίες για τα είδη θορύβου που υπάρχουν στη φύση και πως αξιοποιήθηκε η μέθοδος LIA στο εργαστήριό μας.

# Κεφάλαιο 2

## Ηλεκτρονικός θόρυβος

### 2.1 Εισαγωγή

Στη φύση υπάρχουν πολλά είδη ηλεκτρονικού θορύβου που επηρεάζουν την ποιότητα ενός σήματος για τα οποία θα αναφερθούμε στη συνέχεια. Το σημαντικότερο είδος θορύβου σήματος είναι ο Θερμικός θόρυβος ή θόρυβος Johnson που μελετήθηκε αρχικά το 1928 από τους Johnson και Nyquist και οφείλεται στη κίνηση Brown. Σχετίζεται με την τυχαία διακύμανση της ηλεκτρικής τάσης στα άκρα ενός αντιστάτη R, λόγω της θερμικής κίνησης των ηλεκτρονίων [11] με κύρια χαρακτηριστικά του ότι ακολουθεί γκαουσιανή στατιστική κατανομή με μέση τιμή μηδέν και τυπική απόκλιση  $V_n$ . Επίσης, έχει ομοιόμορφη φασματική πυκνότητα ισχύος. Ο θόρυβος αυτός έχει ομοιόμορφο φάσμα σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων και χαρακτηρίζεται και λευκός θόρυβος [12]. Η μέση τετραγωνική τιμή της τάσης δίνεται από τον τύπο:

$$V_N = \sqrt{4kTR\Delta f} \quad , \quad \text{όπου } k=1.4 \cdot 10^{-3} \frac{J}{K} \text{ η σταθερά του Boltzman, } T \text{ η}$$

θερμοδυναμική θερμοκρασία και  $\Delta f$  η ζώνη συχνοτήτων (Bandwidth). Ο θόρυβος αυτός εμφανίζεται πάντα σε πηγές τάσης.

#### 2.1.1 Ο θόρυβος βολής (Shot noise ή θόρυβος Schottky)

Αυτός ο θόρυβος εμφανίζεται όταν υπάρχει ηλεκτρικό ρεύμα [11] [12]. Οφείλεται στην τυχαία άφιξη φορτισμένων σωματιδίων που οδηγούν σε διακυμάνσεις του ρεύματος και είναι ανεξάρτητος της θερμοκρασίας.

Για τον θόρυβο βολής ισχύει:

$$I_{sh}=I_n=\sqrt{\langle I_N^2 \rangle} = \sqrt{2eI_{DC}\Delta f} \quad \text{όπου } e = 1.6*10^{-16}\text{C.}$$

Ο θόρυβος βολής έχει ομοιόμορφο φάσμα και χαρακτηρίζεται ως λευκός θόρυβος. Στην ανάλυση κυκλωμάτων παριστάνεται ως μια πηγή ρεύματος  $I_N$ , με σχετική διακύμανση

$$\frac{I_N}{I_{DC}} = \sqrt{\frac{2e\Delta f}{I_{DC}}}$$

Η κατανομή του θορύβου βολής είναι και αυτή γκαουσιανή, για κινούμενα τυχαία φορτία χωρίς μεταξύ τους συσχετίσεις. Στις ωμικές αντιστάσεις το ρεύμα έχει πολύ λιγότερο θόρυβο απ' ότι προβλέπεται από την παραπάνω σχέση, γιατί στους μεταλλικούς αγωγούς η κίνηση σχετίζεται με φορτία μεγάλων αποστάσεων [10].

### 2.1.2 Θόρυβος 1/f (Flicker noise)

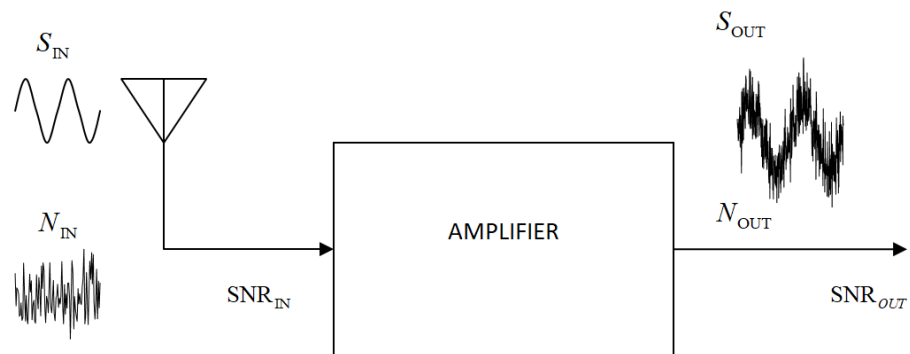
Αφορά κυρίως χαμηλές συχνότητες μικρότερες των 100 Hz και η ισχύς του μεταβάλλεται συναρτήσει του 1/f. Σχετίζεται κυρίως με τις συνδέσεις και το υλικό των ακροδεκτών. Κυριαρχεί στην περιοχή του συνεχούς και για να τον αποφύγουμε χρησιμοποιούμε την τεχνική της διαμόρφωσης για να μεταθέσουμε τα σήματα χαμηλών συχνοτήτων.

### 2.1.3 Λόγος Σήματος Προς Θόρυβο

Ο λόγος σήματος προς θόρυβο είναι ένας δείκτης που εκφράζει τη σχέση του επιπέδου του σήματος σε σχέση με τον θόρυβο  $S / N$ , όπου  $S$  το πλάτος του σήματος και  $N$  ο θόρυβος (η διακύμανση ως rms), αποτελεί δε βασικό χαρακτηριστικό στο οποίο αναφερόμαστε όταν θέλουμε να μιλήσουμε για τη βελτίωση του σήματός μας

από το θόρυβο Ο λόγος  $S / N$  εκφράζεται κυρίως ως λόγος τάσεων εκφρασμένων σε decibel (dB).

Επομένως, πρόκειται για ένα βασικό λόγο δυο σημάτων που μας δείχνει την διαφορά τον σήματος από τον θόρυβο που το περιβάλλει και είναι πολύ χρήσιμος για την μελέτη της ενίσχυσης του χρήσιμου σήματος  $S_{IN}$ .



**2.1: Εισερχόμενο σήμα στον Amplifier ( $S_{IN}$ ) και εξερχόμενο ( $SNR_{OUT}$ ) μετά από σχετική διαμόρφωση**

Το κλάσμα μεταξύ των δύο αυτών σημάτων ονομάζεται λόγος σήματος-προς-θόρυβο (signal- to-noise ratio – SNR), και ορίζεται ως:

$$SNR_{IN} = \frac{S_{IN}}{N_{IN}}$$

όπου  $S_{IN}$  είναι η ισχύς του σήματος στην είσοδο του δέκτη, και  $N_{IN}$  είναι η ισχύς του θορύβου στην είσοδο του δέκτη.

Αντίστοιχα, ορίζεται ο λόγος σήματος προς θόρυβο στην έξοδο του δέκτη ως

$$SNR_{OUT} = \frac{S_{OUT}}{N_{OUT}}$$

όπου  $S_{OUT}$  είναι η ισχύς του σήματος στην έξοδο του δέκτη, και  $N_{OUT}$  είναι η ισχύς του θορύβου στην έξοδο του δέκτη.

Το κλάσμα  $SNR_{IN}$  προς  $SNR_{OUT}$  ονομάζεται λόγος θορύβου NR (noise ratio)

$$NR = \frac{SNR_{IN}}{SNR_{OUT}}$$

Αν εκφράσουμε όλες τις ποσότητες σε dB, τότε ο λόγος θορύβου ονομάζεται δείκτης θορύβου NF (noise figure).

$$NR = NF = SNR_{in} - SNR_{out}$$

Με άλλα λόγια, ο δείκτης θορύβου N μας δείχνει κατά πόσο μειώνεται ο λόγος σήματος προς θόρυβο από την είσοδο προς την έξοδο του δέκτη.

# Κεφάλαιο 3

## Η τεχνική Lock-in Amplifier

### 3.1 Η τεχνική Lock-in Amplifier

Η τεχνική Σύγχρονου Ενισχυτή (ή Σύγχρονης Αποδιαμόρφωσης), γνωστή με τον Αγγλικό όρο Lock-in Amplifier (LIA), σύμφωνα με την βιβλιογραφία, πιστεύεται ότι εφευρέθηκε από τον Robert H. Dicke στο Πανεπιστήμιο του Princeton. Η τεχνική αυτή έχει ως στόχο να ενισχύσει και να καταγράψει ένα ασθενικό σήμα, επηρεαζόμενο από τον εγγενή ή εξωγενή θόρυβο, βελτιώνοντας κατά πολύ τον λόγο σήματος προς θόρυβο (S/N ratio). Ο εγγενής θόρυβος (λευκός θόρυβος και θόρυβος βολής) έχει καθορισμένα στατιστικά χαρακτηριστικά με βάση τα οποία έχει αναπτυχθεί η τεχνική LIA.

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες σημάτων, η πρώτη αφορά στα περιοδικά σήματα και η δεύτερη τα απεριοδικά σήματα (ουσιαστικά με άπειρη περίοδο). Κάθε περιοδικό σήμα,  $x(t)$ , κάτω από κάποιες προϋποθέσεις, μπορεί να αναπτυχθεί σε τριγωνομετρική σειρά Fourier, όπως παρακάτω:

$$s(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(2\pi nft) + \sum_{m=1}^{\infty} b_m \sin(2\pi mft) \sqrt{a^2 + b^2}$$

Ο όρος  $a_0$  αντιπροσωπεύει τη συνεχή συνιστώσα (DC component) του σήματος. Οι συντελεστές  $a_0$ ,  $a_n$  και  $b_n$  υπολογίζονται μέσω των ολοκληρωμάτων του

αναπτύγματος Fourier. Η τεχνική LIA εφαρμόζεται σε σχετικά σταθερά περιοδικά σήματα (αρμονικά ή διαμορφωμένα) όχι όμως σε συνεχή. Τα συνεχή σήματα για να μετρηθούν θα πρέπει προηγουμένως να διαμορφωθούν με μια συχνότητα αναφοράς. Ένα τετραγωνικό σήμα (square-wave) με μηδενική μέση τιμή αναπτύσσεται σε σειρά Fourier ως εξής:

$$s(t) = 4A \left( \frac{\sin \omega_0 t}{\pi} + \frac{\sin 3\omega_0 t}{3\pi} + \frac{\sin 5\omega_0 t}{5\pi} + \dots \right)$$

όπου  $A$  το πλάτος του σήματος και  $\omega_0$  η θεμελιώδης συχνότητα. Η λειτουργία της μεθόδου LIA βασίζεται στην ορθογωνιότητα των ημιτονικών συναρτήσεων. Για ημιτονικό σήμα αναφοράς (reference signal) και μια κυματομορφή εισόδου  $V_s(t)$ , το DC σήμα  $V_{out}(t)$  μπορεί να υπολογιστεί από την εξής σχέση για τον Lock-in Amplifier:

$$V_{out}(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t \sin(2\pi f_R t + \varphi) V_s(t) dt \sqrt{a^2 + b^2}$$

Όπου  $\varphi$  είναι η φάση και  $T$  η περίοδος. Αν στο σήμα υπερτίθεται θόρυβος, τότε από τις συνιστώσες της ανάπτυξης του σήματος επιζεί μόνο εκείνη που η συχνότητά της είναι ίση με τη συχνότητα αναφοράς.

## 3.2 Οι βασικές συνιστώσες ηλεκτρονικού θορύβου στην τεχνική LIA

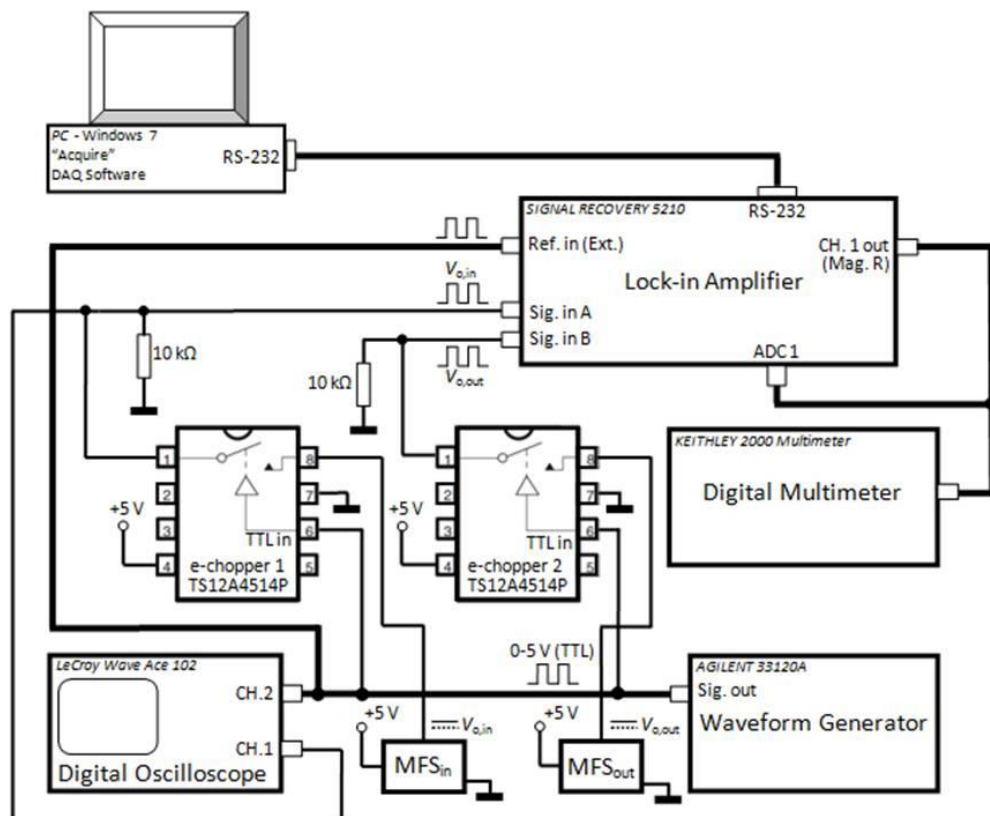
Δύο είναι τα βασικότερα είδη ηλεκτρικού θορύβου:

- a) Ο θεμελιώδης θόρυβος, που είναι κυρίως ενδογενούς προέλευσης και οφείλεται στην τυχαία κίνηση φορέων ηλεκτρικού φορτίου (γνωστός στις μορφές, «λευκού» ή «θερμικού» θορύβου και θορύβου «βολής») και
- b) Ο μη θεμελιώδης θόρυβος, που προέρχεται κυρίως από ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του περιβάλλοντος.



Όσον αφορά την μέθοδο LIA πρόκειται για μια μέθοδο με βάση την οποία αποκόπτονται όλα τα σήματα που έχουν συχνότητα διαφορετική από τη συχνότητα αναφοράς (του σήματος reference). Σε γενικές γραμμές πρόκειται για ένα μετρητή εναλλασσόμενης τάσης που ανταποκρίνεται μόνο σε εκείνα τα σήματα που συμπίπτουν με τη συχνότητα αναφοράς ενώ αποκόπτονται όλα τα άλλα σήματα, με πολύ υψηλές επιδόσεις. Η μέθοδος LIA είναι τόσο πιο αποτελεσματική όσο πιο μικρό είναι το ύψος του σήματος αν συγκρίσει με τον εγγενή θόρυβο. Δηλαδή λειτουργεί καλύτερα για περιπτώσεις που ο λόγος σήματος προς θορύβου είναι πολύ μικρότερος της μονάδας. Με την μέθοδο LIA μπορεί να μετρηθεί και ένα συνεχές σήμα με την απαραίτητη προϋπόθεση ότι αυτό πρώτα θα διαμορφωθεί.

Η συχνότητα αναφοράς παράγεται από μια εξωτερική γεννήτρια, το σήμα της οποίας εφαρμόζεται στην μονάδα LIA που αξιοποιούμε στην πειραματική μας διάταξη, και είναι συγχρονισμένη με το υπό μελέτη σήμα. Έτσι το διαμορφωμένο σήμα έχει ακριβώς την ίδια συχνότητα με τη συχνότητα αναφοράς (reference signal).



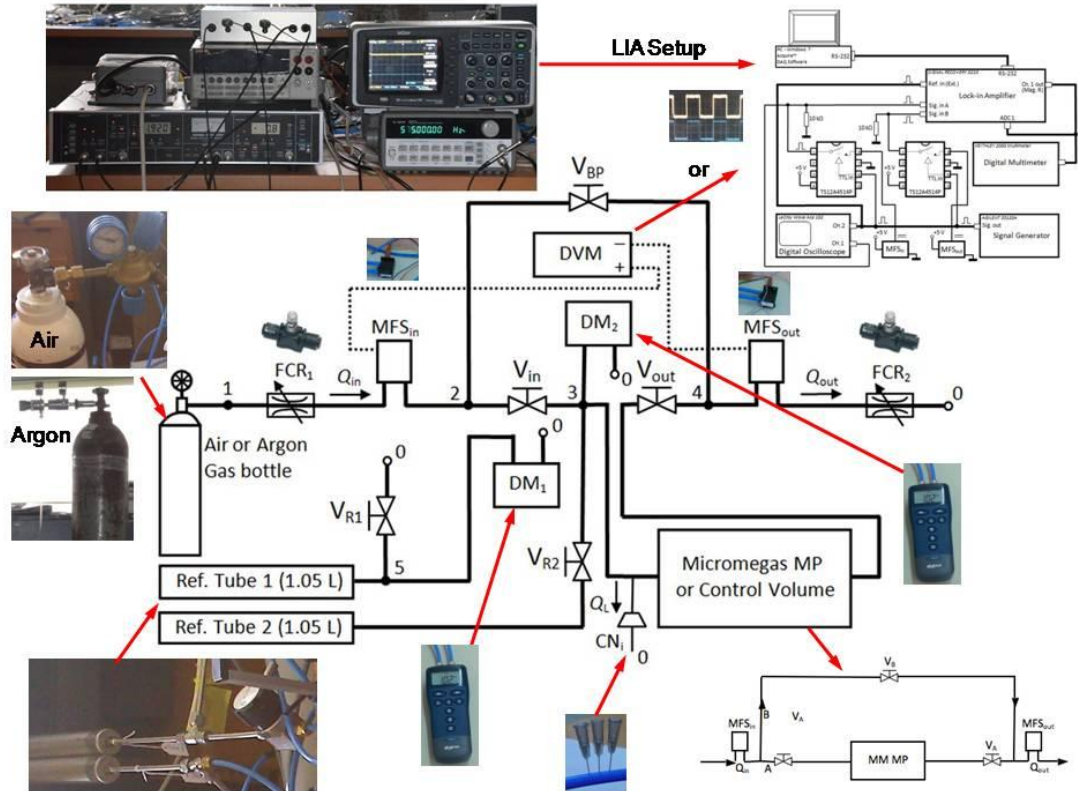
Σχήμα 3.1: Εδώ φαίνεται το ολοκληρωμένο διάγραμμα που απεικονίζει την ολοκληρωμένη διάταξη του εργαστηρίου μας στην οποία εφαρμόζεται η μέθοδος LIA

Στο σχήμα 4.1 απεικονίζονται οι δυο ηλεκτρονικοί τεμαχιστές (electron choppers, e-choppers) στις εξόδους των οποίων είναι συνδεδεμένες παράλληλα αντιστάσεις 10 kΩ. Στη συνέχεια οδηγούνται τα δυο σήματα στα κανάλια IN A και IN B του LIA. Επίσης απεικονίζεται η γεννήτρια (AGILENT 33120A), που μας δίνει το σήμα reference μέσω του καναλιού REF IN, αλλά και το τετραγωνικό σήμα διαμόρφωσης.

Επίσης αξιοποιείται και ένα ψηφιακό βολτόμετρο υψηλής ακρίβειας 6 ψηφίων, της KETHLEY για άμεσες μετρήσεις των σημάτων. Επίσης το συγκεκριμένο βολτόμετρο μπορούμε να το συνδέσουμε με την έξοδο του διαμορφωμένου σήματος από το LIA που βρίσκεται στο μπροστινό PANEL, στο κανάλι OUTPUT CH1, με σκοπό να πραγματοποιήσουμε άμεσα παρατηρήσεις για τη σταθερότητα και το μέγεθος του σήματος όπως προκύπτει μέσα από την ενίσχυσή του. Εναλλακτικά μπορούμε να μετρήσουμε το σήμα εξόδου συνδέοντάς το με ένα από τα τέσσερα κανάλια ADC (CH1-CH4) που βρίσκεται στο πίσω πάνελ του LIA μέσω ενός ομοαξονικού καλωδίου BNC.

Το μετρούμενο σήμα μπορούμε να το απεικονίσουμε γραφικά απευθείας μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή ο οποίος συνδέεται με το LIA μέσω ενός καλωδίου RS232. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήσαμε το λογισμικό της Signal Recovery που διατίθεται μαζί με το LIA. Το συγκεκριμένο λογισμικό μας δίνει τη δυνατότητα να αποθηκεύουμε της μετρήσεις μας σε μορφή TXT, μια λειτουργία που ναι πολύ χρήσιμη για την περαιτέρω επεξεργασία του δοθέντος σήματος με εξειδικευμένα λογισμικά στη δημιουργία στατιστικών κατανομών (ROOT, Matlab). Οι μετρήσεις μας γίνονται επάνω στο διαφορικό σήμα που προκύπτει από προσομοιωμένη διαρροή αερίου, η οποία εξομοιώνεται με την ροή αερίου που διέρχεται μέσω μιας ειδικής ιατρικής βελόνας τύπου 32G και τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που αντιστοιχούν στο εσωτερικό των θαλάμων Micromegas.

Παρακάτω (σχήμα 3.2) παραθέτουμε μια παραστατική εικόνα της εργαστηριακής διάταξης που περιλαμβάνει φωτογραφίες των επιμέρους οργάνων και εξαρτημάτων.



Σχήμα 3.2: Baseline setup/stage-0 (overall configuration)

Στην μέθοδο LIA που χρησιμοποιήσαμε το υπό μελέτη ασθενές σήμα που χρησιμοποιήσαμε είναι της τάξης των μερικών mV με τάξη θορύβου ίδια ή περισσότερη από αυτό, η ενίσχυση που πετύχαμε φθάνει σε επίπεδα τάξης μεγέθους των μερικών V. Επομένως υπάρχει μια ενίσχυση της τάξης του  $10^3$ . Η μέθοδος LIA είναι αποτελεσματική και για ημιτονικό σήμα αλλά και για τετραγωνικό σήμα εισόδου.

Πιο συγκεκριμένα, επειδή σε ένα ασθενές σήμα τάσης  $V_i$  στο οποίο υπερτίθεται εγγενής θόρυβος επιλέγουμε προσεχτικά την συχνότητα του σήματος reference να είναι έξω από την συχνότητα των γραμμών τροφοδοσίας των κτιρίων γιατί οι γραμμές τροφοδοσίας λειτουργούν ως πηγή θορύβου ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας πολλαπλάσιων των 50 Hz, (50 Hz, 100 Hz και 150 Hz) που οφείλονται στη θεμελιώδη συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου, σε υπόβαθρο καθώς και στην 3η αρμονική της συχνότητας του ηλεκτρικού δικτύου αντίστοιχα. Έτσι λοιπόν για να χρησιμοποιήσουμε Ενισχυτή Σύγχρονης Διαμόρφωσης (Lock-in Amplifier)

επιλέγουμε συχνότητα του σήματος διαμόρφωσης  $\omega_R$  σε περιοχή έξω από τις κορυφές του θορύβου (πέρα από τη μεγαλύτερη συχνότητα κορυφής θορύβου).

Συγκεκριμένα, μπορούμε να θέσουμε:  $\omega_R = 2\pi \cdot 175 \text{ Hz} = 2\pi \cdot 175 = 1099.56 \text{ s}^{-1}$

. Σε αυτή τη περίπτωση το σήμα του Ανιχνευτή Φάσης (Phase Sensitive Detector, PSD),  $V_{PSD}$ , προ της διάβασής του από το βαθυπερατό φίλτρο (κανάλι X) είναι:

$$\begin{aligned} V_{PSD,X}(t) &= [V_S \sin(\omega_R t + \varphi_S) + n(t)] \cdot [V_L \sin(\omega_L t + \varphi_R)] = \\ &= V_S V_L \sin(\omega_R t + \varphi_S) \sin(\omega_L t + \varphi_R) + V_L n(t) \sin(\omega_L t + \varphi_R) = \\ &= \frac{V_S V_L}{2} \cos[(\omega_R - \omega_L)t + \varphi_S - \varphi_R] - \frac{V_S V_L}{2} \cos[(\omega_R + \omega_L)t + \varphi_S + \varphi_R] + V_L n(t) \sin(\omega_L t + \varphi_R) \end{aligned}$$

Θεωρώντας ότι το σήμα  $v_L(t) = V_L \sin(\omega_L t + \varphi_R)$  είναι σύμφωνο με το  $v_S(t) = V_S \sin(\omega_R t + \varphi_S)$ , δηλαδή τα σήματα  $v_L(t)$  και  $v_S(t)$  έχουν την ίδια συχνότητα,  $\omega_L = \omega_R$ . Στην περίπτωση που θα έχουν και ίδια φάση, δηλαδή για  $\varphi_S = \varphi_R$  τότε το σήμα του PSD θα γίνει:

$$V_{PSD,X}(t) = \frac{V_S V_L}{2} - \frac{V_S V_L}{2} \cos(2\omega_R t + \varphi_S + 2\varphi_R) + V_L n(t) \sin(\omega_R t + \varphi_R)$$

Ο πρώτος όρος είναι σταθερός (DC) και εξαρτάται μόνο από τη διαφορά φάσης. Ο δεύτερος όρος αναφέρεται σε διπλάσια συχνότητα ενώ ο τρίτος όρος αποτελεί θόρυβο με φάσμα στο οποίο οι δύο κορυφές έχουν μετατοπιστεί κατά  $\pm\omega_R$  και  $\pm\omega_L$ .

Στην πραγματικότητα όμως οι φάσεις μπορεί να διαφέρουν, οπότε θα έχουμε:

$$V_{PSD,X}(t) = \frac{V_S V_L}{2} \cos(\varphi_S - \varphi_R) - \frac{V_S V_L}{2} \cos(2\omega_R t + \varphi_S + \varphi_R) + V_L n(t) \sin(\omega_R t + \varphi_R)$$

Στην περίπτωση αυτή ο πρώτος όρος εξαρτάται από τον βαθμό προσέγγισης (συγχρονισμού) των φάσεων με μέγιστη τιμή για  $\varphi_S = \varphi_R$ . Όλοι οι υπόλοιποι όροι εμπεριέχουν τα ίδια χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν. Επομένως, το σήμα  $V_{PSD,X}(t)$

διερχόμενο από βαθυπερατό φίλτρο θα διατηρήσει μόνον τη μέση τιμή του και μια μικρή συνεισφορά από το φάσμα του θορύβου σε μια στενή περιοχή γύρω από τη συχνότητα  $\omega_R$  και το οποίο εξαρτάται κυρίως από το επίπεδο του θορύβου σε αυτήν:

$$V_{PSD,X} = \frac{V_s V_L}{2} \cos(\varphi_s - \varphi_R). \text{ Το σήμα του ανιχνευτή φάσης (Phase Sensitive}$$

Detector, PSD) μετά από μετάθεση φάσης κατά  $\frac{\pi}{2}$  (κανάλι Y) θα γίνει:

$$V_s \cos(\omega_R t + \varphi_s) + n_1(t). \text{ Το σήμα } V_{PSD,Y}(t) \text{ μετά τη διέλευσή του από βαθυπερατό}$$

φίλτρο θα γίνει:  $V_{PSD,X} = \frac{V_s V_L}{2} \sin(\varphi_s - \varphi_R)$ . Έτσι, το συνολικό σήμα εισόδου από τα

δύο κανάλια θα είναι:

$$V_{PSD,R}(t) = \sqrt{V_{PSD,X}^2(t) + V_{PSD,Y}^2(t)}$$



# Κεφάλαιο 4

## Εφαρμογή της μεθόδου LIA στη διάταξη ελέγχου στεγανότητας ανιχνευτών αερίου

### 4.1 Η πειραματική διάταξη του εργαστηρίου

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιείται στο εργαστήριο μας περιλαμβάνει την συσκευή Lock – in Amplifier 5210 της Signal Recovery που είναι συνδεδεμένη με την γεννήτρια Agilent 33120A η οποία μας δίνει το σήμα reference στα 575 Hz. Επίσης χρησιμοποιούμε δυο e-chopper που τετραγωνίζουν το υπό μελέτη σήμα εισόδου. Επίσης επιτυγχάνουμε και σύνδεση με ηλεκτρονικό υπολογιστή αξιοποιώντας το λογισμικό DAQ Software που μας παρέχει η εταιρεία. Με το συγκεκριμένο λογισμικό πετύχαμε δυο στόχους, πρώτον την πλήρη απομακρυσμένη διαχείριση του LIA και δεύτερον την λήψη και αποθήκευση μετρήσεων με δυνατότητα on line δημιουργίας διαγράμματος και αποθήκευση μέσων τιμών σε μεγάλο χρονικό εύρος για πλήρη κατανόηση των φυσικών φαινομένων που εξετάζουμε.



Σχήμα 4.1: Φωτογραφία της ολοκληρωμένης πειραματικής διάταξης που διαθέτουμε στο ΕΜΠ

Full scale Sensitivity	Gain		
	High Stability	Normal	High Reserve
3V	0.03332	0.03332	0.03332
1V	1	1	1
300mV	3.332	3.332	3.332
100mV	10	10	10
30mV	33.32	3.332	3.332
10mV	100	10	10
3mV	333.2	33.32	3.332
1mV	1000	100	10
300μV	3332	333.2	33.32
100Mv	10000	1000	100
30μV	33320	3332	333.2
10μV	100000	10000	1000
3μV	333200	33320	3332
1μV	1000000	100000	10000
300nV	3332	333200	33320
100nV	1000000	1000000	100000

Σχήμα 4.2: Πίνακας ενίσχυσης -GAIN- του LIA



## 4.2 Μετρήσεις του σήματος της μεθόδου FRL

Το σήμα που προέρχεται από την μέθοδο FRL είναι διαφορικό και προέρχεται από τους δυο Mass Flow Sensors. Το ύψος του διαφορικού σήματος DC εξαρτάται από το μέγεθος της διαρροής και από το αέριο που χρησιμοποιείται. Ο υπερτιθέμενος θόρυβος σχετίζεται με την διακύμανση των σημάτων που λαμβάνουμε από τους δυο αισθητήρες ροής μάζας. Το r.m.s. επίπεδο των διακυμάνσεων είναι της τάξεων των 2.5 mV και εξαρτάται από τη ροή αερίου που ελέγχεται με συγκεκριμένες συνθήκες πίεσης θερμοκρασία στο εργαστήριο. Το r.m.s επίπεδο είναι διαφορετικό για διαφορετικά είδη αερίων. Για το αέριο Αργό που χρησιμοποιούμε στους ανιχνευτές Micromegas το αποδεκτό όριο διαρροών που θέλουμε να εξομοιώσουμε κυμαίνεται στα 35 mV. Η ενίσχυση του σήματος μας δίνει λόγο σήματος προς θόρυβο S/N ratio ίσο με 14. Για περιπτώσεις ακόμα μικρότερων διαρροών ο λόγος σήματος προς θόρυβο μπορεί να ενισχυθεί πολλές τάξεις μεγέθους με τη λειτουργία του LIA. Ο στόχος μας στη πειραματικής διαδικασία είναι να βελτιωθεί το μέγιστο ο λόγος S/N του διαφορικού σήματος των mass Flow meters μέσω της τεχνικής LIA. Το διαφορικό τους σήμα πρέπει να είναι τετραγωνικό για να μπορέσει να εφαρμοστεί η τεχνική LIA και για αυτό τεμαχίζεται μέσω δυο ηλεκτρονικών e-chopper όπως φαίνεται στην εικόνα παρακάτω.



Σχήμα 4.3: Το τεμαχισμένο σήμα όπως απεικονίζεται στον παλμογράφο

Για την χρησιμοποίηση του 5210 LIA είναι απαραίτητο αρχικά να ρυθμίσουμε το σήμα DC που έχουμε να μετρήσουμε. Για να το πετύχουμε αυτό σχεδιάσαμε ένα σύστημα διπλού συγχρονισμού (Double SEC) που βασίζεται σε δυο analog switches τύπου SPST (δηλ. διαθέτουν μια έξοδο output και μια είσοδο input. Ο διακόπτης αποσυνδέεται εντελώς ή κλείνει για διαφορετικό σήμα εισόδου.) και τύπου CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) τύπου TS12A4514 P-package. Το

απαραίτητο σήμα reference είναι τύπου TTL και δίνεται από ένα τετραγωνικό παλμό που προέρχεται από μια ψηφιακή γεννήτρια της εταιρείας AGILENT, τύπου 33120A. Αυτό το σήμα αποτελεί το σήμα αναφοράς του setup του εργαστηρίου. Επιλέξαμε το σήμα των 575 Hz για δυο λόγους, αρχικά για να αποφύγουμε την θεμελιώδη συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου (50 Hz) αλλά και τις κύριες αρμονικές του ηλεκτρικού δικτύου (100 Hz, 150 Hz, και 200Hz) Επίσης επιλέξαμε αυτή την συχνότητα για να είναι μέσα στην ήσυχη περιοχή θορύβου που κυμαίνεται από τα 500 Hz έως τα 100 kHz, όπου υπάρχει μόνο λευκός θόρυβος. Επιπλέον επιλέξαμε την μικρότερη συχνότητα επειδή παρατηρήσαμε μικρότερη απόκλιση του αναπαραγόμενου DC σήματος άρα και μικρότερο θόρυβο σε αυτή τη περιοχή χαμηλών συχνοτήτων εν' συγκρίσει με τη διακύμανση σε περιοχή υψηλών συχνοτήτων. Για το διαφορικό σήμα εισόδου, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την είσοδο A-B IN σε floating mode του LIA. Το σχέδιο του πρωτότυπου setup φαίνεται και στην εικόνα 3.1 όπως απεικονίζεται η μπροστινή όψη του 5210.

### 4.3 Μετρήσεις αξιολόγησης

Πραγματοποιήσαμε περαιτέρω αξιολόγηση της ρύθμισης του πρωτότυπου setup μετρώντας τον ρυθμό διαρροής αερίου που προκαλείται από μια συγκεκριμένη βαθμονομημένη βελόνα (id number 32G-CN9) με μετρούμενη πίεση  $1.00 \pm 0.05$  mbar χρησιμοποιώντας αέρα από μια φιάλη που μας παρείχε σταθερή πίεση. Στο βολτόμετρο που καταγράψαμε on line τις τιμές μας επιλέξαμε ένα φίλτρο που κατέγραφε ένα μέσο όρο 100 μετρήσεων και τον πρόβαλε στο πάνελ. Η ευαισθησία στο 5210 LIA ρυθμίστηκε αυτόματα στα 0.03 V που αντιστοιχεί σε ενίσχυση  $A_u = 33.33$ , για καταμέτρηση που αντιστοιχήθηκε σε σταθερό χρονικό διάστημα 10 s. Το μετρούμενο διαφορικό σήμα όπως προκύπτει μέσω της ενίσχυσης του συμβολίζεται με  $V_{x.PSD}$  όταν προκύπτει με την βελόνα τοποθετημένη στο σύστημα μας είναι ίσο με 5.257(X) V, όπου το σύμβολο X δείχνει το επίπεδο του σφάλματος μέτρησης που έχουμε να είναι στο τέταρτο δεκαδικό ψηφίο. Το σήμα αυτό αντιστοιχεί σε πραγματικό σήμα 0.0350(X) V.

Το αντίστοιχο διαφορικό σήμα για την εξομοιούμενη διαρροή που χαρακτηρίζει η ύπαρξη της ιατρικής βελόνας 32G,  $V_{x.PSD}$ . Εξ αιτίας της χαμηλής

ποιότητας των υλικών που αποτελούν τους ανιχνευτές πίεσης αερίου, υπάρχει ένα σταθερό σφάλμα που εισέρχεται στο διαφορικό σήμα και αλλάζει τις τιμές του. Αυτό το σφάλμα χαρακτηρίζεται σαν απόβαρο «tare» και πρέπει να το καταμετρήσουμε και να το αφαιρέσουμε από τις μετρήσεις μας ώστε να έχουμε το ζητούμενο αποτέλεσμα του καθαρού διαφορικού σήματος. Το ενισχυμένο σήμα διαμορφώνεται σε 4.958(X) V που αντιστοιχεί σε διαφορικό σήμα 0.0332(X) V. Αντιλαμβανόμαστε έτσι ότι το σταθερό τεχνικό σφάλμα που έχουμε είναι της τάξης  $\Delta V_{rp-tare}=0.00180(X) V = 1.80 \text{ mV} \pm 0.014 \text{ mV}$ . Το μέγεθος της διαρροής της βελόνας που προκύπτει μετά την διόρθωση του σφάλματος των mass flow meters είναι  $Q_L=0.00328(\text{L/h}) \text{ mV} * (1.800 \pm 0.014) \text{ mV} = 0.00590 \pm 0.00003 \text{ L/h}$ .

Το πρωτότυπο setup του εργαστηρίου μας έχει αξιολογηθεί και σε εξαιρετικά μικρά επίπεδα διαρροών. Αυτό πραγματοποιήθηκε με τον εξής τρόπο: Επιλέξαμε χαμηλότερη ροή αερίου μειώνοντας την πίεση, χρησιμοποιώντας μια συσκευή flow control στη γραμμή παρακολούθησης. Επειδή σε τόσο χαμηλές πιέσεις η διαρροή εξαρτάται άμεσα με την πίεση, μάλιστα υπάρχει μια γραμμική εξάρτηση της πίεσης με το ύψος της διαρροής που μας ενδιαφέρει, χαμηλώνοντας την πίεση μειώνουμε αντίστοιχα και το μέγεθος της διαρροής. Γι' αυτό το σκοπό μειώσαμε την πίεση αρχικά σε  $p=0.25 \text{ mbar}$ , και στη συνέχεια σε  $p=0.15 \text{ mbar}$ . Οι τιμές των διαρροών που αποκτήθηκαν με την LIA είναι αντίστοιχα 4.876(X) V και 4.796 V. Στη συνέχεια επαναλάβαμε τις μετρήσεις μας και τα επαναπροσδιορισθέντα σήματα που αποκτήθηκαν φαίνονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα (σχήμα 4.4).

Differential signals and leak rate	$p = 1.00 \text{ mbar}$	$p = 0.25 \text{ mbar}$	$p = 0.15 \text{ mbar}$
$\Delta V_{X,PSD} \text{ (V)}$	$5.257 \pm 0.001$	$4.876 \pm 0.001$	$4.783 \pm 0.001$
$\Delta V_{X,PSD-tare} \text{ (V)}$	$4.958 \pm 0.001$	$4.796 \pm 0.001$	$4.730 \pm 0.001$
$\Delta V_{rp} \text{ (mV)}$	$35.00 \pm 0.01$	$32.50 \pm 0.01$	$31.88 \pm 0.01$
$\Delta V_{rp-tare} \text{ (mV)}$	$33.20 \pm 0.01$	$31.96 \pm 0.01$	$31.52 \pm 0.01$
$\Delta V_{rp} - \Delta V_{rp-tare} \text{ (mV)}$	$1.80 \pm 0.01$	$0.54 \pm 0.01$	$0.36 \pm 0.01$
$Q_L \text{ (L/h)}$	$0.00590 \pm 0.00003$	$0.00174 \pm 0.00003$	$0.00115 \pm 0.00003$
$Q_L/Q_L^{LM1}$	6.4	22	33

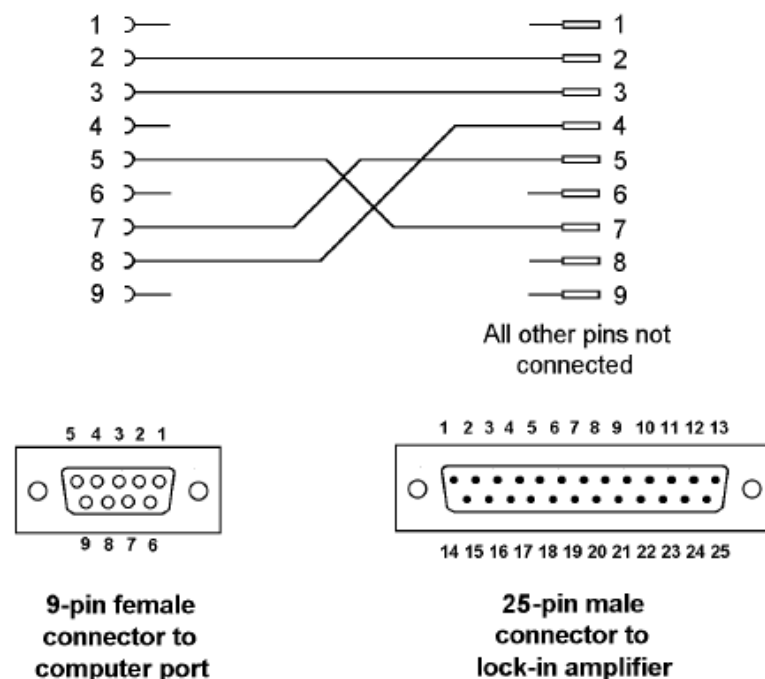
**4.4:** Τα διαφορικά σήματα που λάβαμε συναρτήσει των διαρροών που αντιστοιχίζονται. Για τη δημιουργία των διαρροών χρησιμοποιήσαμε ιατρικές βελόνες τύπου ID 32G-CN9 σε διαφορετικές βαθμίδες πίεσης με τη χρήση του πρωτότυπου setup που βασίζεται στο 5210 LIA. Η διαρροή  $Q_L^{LM1}$  αντιπροσωπεύει το όριο αποδοχής διαρροών των MM MP τύπου LM1 που ισούται με 0.038 L/h.

Ο επιτευχθείς λόγος σήματος προς θόρυβο, S/N για πίεση των 0.15 mbar έφτασε την τιμή 38 δηλαδή S/N=38. Η αντίστοιχη βελτίωση σήματος προς θόρυβο για το διαφορικό σήμα που μετρήσαμε απευθείας με το ψηφιακό βολτόμετρο

ακριβείας και την ίδια στατιστική των 100 ψηφίων, φτάνει S/N=3. Επομένως αντιλαμβανόμαστε ότι υπάρχει μια βελτίωση της απόδοσης του εργαστηρίου μας με τη χρήση του LIA ίση με 12 φορές.

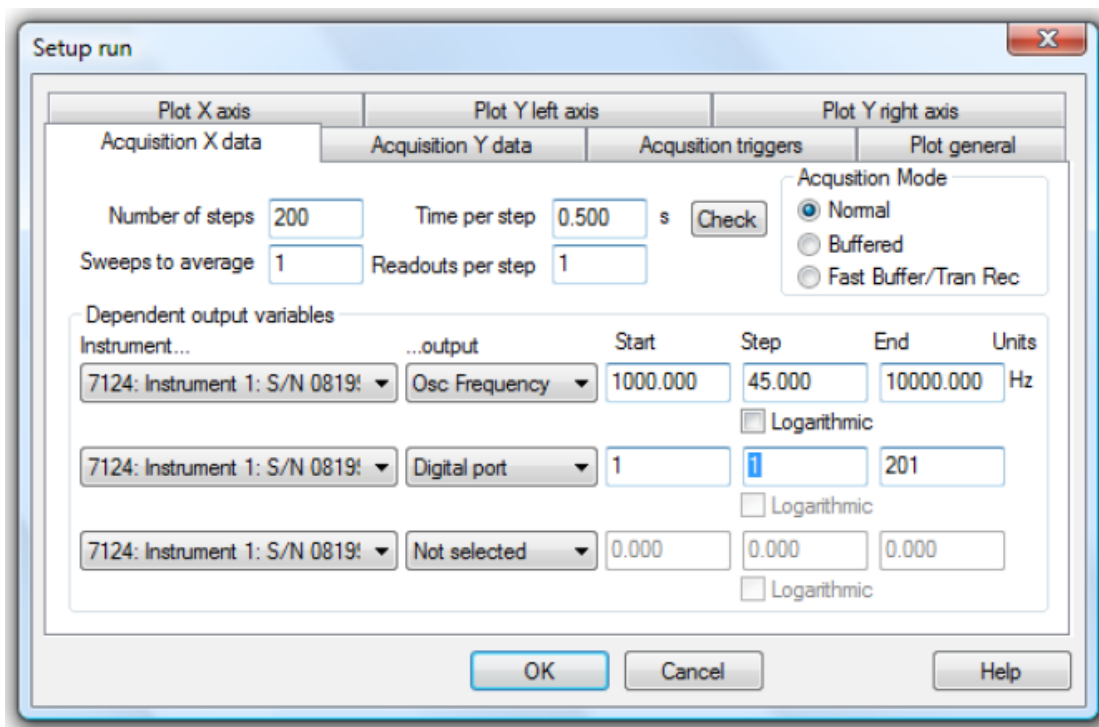
#### 4.4 Απόκτηση και επεξεργασία δεδομένων

Το 5210 LIA υποστηρίζεται από τον κατασκευαστή με ένα software επικοινωνίας που παράγεται από τη εταιρεία «SIGNAL RECOVERY» και μας δίνει τη δυνατότητα διασύνδεσης του LIA με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και απόκτησης on-line δεδομένων και διαγραμμάτων καθώς και αποθήκευσης των δεδομένων για περαιτέρω επεξεργασία. Το λογισμικό αυτό ονομάζεται «Acquire Data Acquisition Software» (ADAS) version 42. Επιτρέπει να παίρνουμε ευθέως τον έλεγχο μέσω υπολογιστή μέσω ενός καλωδίου RS232 9 pin- to 25 pin [δηλαδή που αποτελείται από καλώδιο που περιλαμβάνει: female 9pin sub-miniature D type και 25- pin sub-miniature D type male connector modem eliminator cable (Part Number C01002)], όπως φαίνεται στην εικόνα 4.5.



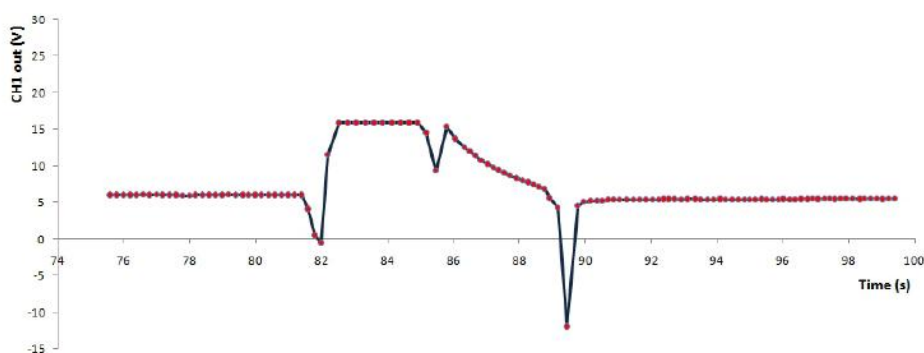
Σχήμα 4.5: Interconnecting RS232 Cable Wiring Diagram

Από το πρόγραμμα ADAS παρέχονται δυο τρόποι λειτουργίας, το πρώτο είναι το «remote front panel» και το δεύτερο είναι το «experiment recording». Στο remote front panel η πλειοψηφία των λειτουργιών του LIA ελέγχονται από τον υπολογιστή μέσω ενός εικονικού πάνελ που είναι διαθέσιμο στο λογισμικό και στο οποίο αντιστοιχίζονται οι δυνατότητες και λειτουργίες του μπροστινού πάνελ της συσκευής τις οποίες ελέγγαμε χειροκίνητα χωρίς τη χρήση του υπολογιστή. Επιπλέον οι έξοδοι του οργάνου (CH1, CH2, CH3, CH4) μπορούν να εμφανιστούν στην οθόνη του υπολογιστή. Στη λειτουργία καταγραφής πειράματος (recording mode) ο χρήστης μπορεί να ορίσει τον τρόπο καταγραφής ενός πειράματος στο οποίο οι επιλεγμένες έξοδοι τάσης που δίνουν το ενισχυμένο σήμα, να καταγράφονται ως συνάρτηση του χρόνου. Έτσι, μπορούμε να ορίσουμε το αριθμό των επαναλήψεων (Number of steps), το χρονικό διάστημα που θα μεσολαβεί ανάμεσα στις μετρήσεις μας, (time per step), τον αριθμό των πειραμάτων (Sweeps to average) και τον αριθμό των μετρήσεων(readout average ) των οποίων παίρνουμε τη μέση τιμή, για παράδειγμα ένα step μπορεί να αντιστοιχεί στο μέσο όρο 100 μετρήσεων.



**4.6: Setup run- Acquisition X data.** Εδώ βλέπουμε τις ρυθμίσεις ενός πειράματος που αποτελείται από εκατό βήματα χωρίς τη χρήση μέσης τιμής ανά βήμα.

Με τη χρήση του λογισμικού επικοινωνίας με τον υπολογιστή καταγράψαμε το κανάλι εξόδου CH1 όταν βρισκόταν σε λειτουργία Lock-In ο LIA 5210 και πήραμε συνεχείς μετρήσεις για δυο φάσεις του πειράματος, η πρώτη ήταν με την φιάλη παροχής αερίων κλειστή χωρίς να δημιουργείται κάποια εξομοίωση της διαρροής και η δεύτερη φάση αφορά με διαρροή αερίου μέσω από την βελόνα. Κατά την διάρκεια της πρώτης φάσης του πειράματος μας όπως δεν υπήρχε διαρροή αερίου παρατηρήθηκε ότι οι τιμές που λαμβάναμε ήταν 5.1 V με διακύμανση 0.3 %. Σχεδόν την ίδια τιμή λάβαμε και όταν ξανακλείσαμε την φιάλη και διακόψαμε τη ροή αερίου. Ενώ όταν υπάρχει ροή αερίου παρατηρήσαμε ότι η μέση τιμή που λάβαμε από το CH1 είναι μεγαλύτερη και φτάνει στα 15 V με την ίδια διακύμανση της τάξεως των 0.3 %. Κατά τα ενδιάμεσα στάδια του πειράματός μας επειδή προκαλούνται ισχυρές διαταραχές στο σύστημά μας παρατηρούμε αυξομειώσεις που μπορούν να φτάσουν προσωρινά και το ύψος των 10 V. Για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα δεν μπορούμε να πάρουμε μετρήσεις διότι λόγω των διαταραχών που προκαλούνται στο σύστημά μας χάνεται προσωρινά η λειτουργία εγκλειδωσης φάσης (Lock-In). Μετά από ένα μικρό χρονικό διάστημα επανέρχεται αυτόματα η διαδικασία Lock In και σταθεροποιείται το σήμα με την αναμενόμενη μικροδιακύμανση που έχουμε παρατηρήσει(εικόνα 4.7).



**4.7 Απεικόνιση των μετρήσεών μας αρχικά χωρίς διαρροή στη συνέχεια επικρατεί μια μεγαλύτερη τιμή που αντιστοιχεί στη διαρροή μέσω της βελόνας τύπου 32 G κατά τη διάρκεια του ογδοηκοστού δευτέρου και τρίτου δευτερόλεπτου. Επίσης φαίνεται η έντονη διαταραχή που προκαλείται κατά τη διάρκεια των εναλλαγών.**

# Κεφάλαιο 5

## Μελέτη τοπογραφίας επιφανειών των ανιχνευτών NSW Micromegas

### 5.1 Εισαγωγή

#### Το μικροσκόπιο ατομικής δύναμης

Για τον προσδιορισμό της τραχύτητας και άλλων χαρακτηριστικών των επιφανειών που έρχονται σε επαφή με το o-ring χρησιμοποιήσαμε μικροσκόπιο ατομικής δύναμης. Το Μικροσκοπία ατομικής δύναμης «Atomic Force Microscopy (AFM)» (παράρτημα 1) μετράει τη μορφολογία μιας επιφάνειας, δηλ μετράει την κατανομή κατά μήκος μιας οριζόντιας επιφάνειας L. Εάν ορίσουμε για το λαμβανόμενο σήμα μια συνάρτηση  $h(x)$ , όπου  $x$  είναι η θέση της μεταβλητής, με μέση τιμή της συνάρτησης  $h(x)$  να είναι κοντά στο μηδέν, προκύπτει το ορισμένο ολοκλήρωμα:

$$\int_{-L/2}^{+L/2} h(x)dx = 0$$

Ας υποθέσουμε ότι η φασματική πυκνότητα Power Spectrum (PS) έχει καθοριστεί πειραματικά, και επίσης ότι η φασματική πυκνότητα έχει παραμετροποιηθεί σύμφωνα με την υπόθεση η επιφάνειας είναι ισοτροπική και

φράκταλ όπως περιμένουμε να είναι στην επιφάνειά που μελετάμε. Η επιφάνεια ονομάζεται *self - affine fractal* λόγω των συγκεκριμένων ιδιοτήτων που αναφέρθηκαν.

Σε αυτή τη περίπτωση προσδιορίζεται η συνάρτηση  $C(q)$  από την εξής σχέση:  
 $C(q) = |F(q)|^2 = q^{-2(H+1)}$  όπου  $F(q)$  ορίζεται η συνάρτηση Fourier, (Fourier Transformer (FT)) του σήματος  $h(x)$ ,  $q$  είναι κυματικός αριθμός (wave number) και  $H$  είναι ο εκθέτης (Hurst Exponent) της ιστροπικής επιφάνειας που σχετίζεται με την αυτοσυσχέτιση της επιφάνειας. Πρόκειται για την συσχέτιση ενός σήματος με το ίδιο το σήμα ως συνάρτηση του χρόνου.

Η παράμετρος  $H$  (Hurst exponent) σχετίζεται με την δομή του φράκταλ. Ο συντελεστής  $D_f$  της επιφάνειας σχετίζεται με τη σχέση  $H = 3 - D_f$ , όπου  $H$  παίρνει τιμές από 0 έως 1 όπου η μονάδα αντιστοιχεί σε μια όμοια επιφάνεια που προκύπτει από μεγέθυνση της αρχικής (self similar surface). Μια επιφάνεια λέγεται self-similar όταν έχει τις ίδιες στατιστικές ιδιότητες ως μεγέθυνση του εαυτού του. Έτσι εάν  $z = h(x, y)$  είναι η εξίσωση μιας επιφάνειας self-similar, τότε η μεγεθυμένη επιφάνεια θα είναι  $z = \lambda h(x / \lambda, y / \lambda)$  και είναι όμοια με την αρχική. Μια self-affine επιφάνεια είναι ανάλογη, με την αρχική κατά ένα παράγοντα  $\lambda$  ο οποίος πρέπει να υψωθεί στη δύναμη  $H$  (δηλαδή  $\lambda^H$ ) για να μην αλλοιωθεί η στατιστική μας. Η μετασχηματισμένη επιφάνεια που υπολογίζεται με τον συντελεστή,  $z = \lambda^H h(x / \lambda, y / \lambda)$  μοιάζει εξαιρετικά με την αρχική συνάρτηση  $z=h(x,y)$ . Για πραγματικές επιφάνειας αυτό ισχύει για πολύ περιορισμένο αριθμό κυμάτων  $q_0 < q < q_1$ . Σε πολλές περιπτώσεις υπάρχει ένας κυματοειδής αριθμός  $q_0$  κάτω από τον οποίο η συνάρτηση  $C(q)$  είναι σταθερή.



5.1: Μια εικόνα που μας δείχνει μια τρισδιάστατη επιφάνεια αυτοσυσχέτισης.



Όπως μπορούμε να δούμε παρακάτω ο φορέα διανύσματος και η πεπερασμένη περιοχή αφορούν το μέτρο της. Ο γενικός ορισμός του πλάτους της τραχύτητας του RMS για άμεσο υπολογισμό από την κατανομή ύψους είναι:

$$R_{hh}(0, L_1, L_2) \equiv \langle h_o^2 \rangle(L_1, L_2) = \frac{1}{L_2 - L_1} \int_{L_1}^{L_2} h^2(x_0) dx_0$$

όπου  $L_1$  και  $L_2$  είναι οι ακραίες θέσεις της ευθείας γραμμής της σάρωσης.

## 5.2 Η έννοια των Fractals (μορφοκλάσματα ή μορφοκλασματικά σύνολα)

Με τον διεθνή όρο fractal, (μορφόκλασμα ή μορφοκλασματικό σύνολο) ονομάζεται ένα γεωμετρικό σχήμα που επαναλαμβάνεται αυτούσιο σε άπειρο βαθμό μεγέθυνσης και συχνά αναφέρεται ως «απείρως περίπλοκο». Χαρακτηριστικό των fractals είναι η λεγόμενη αυτό-ομοιότητα στη δομή τους, η οποία εμφανίζεται σε διαφορετικά επίπεδα μεγέθυνσης.

Αυτοόμοιο είναι ένα αντικείμενο του οποίου τα μέρη από τα οποία αποτελείται μοιάζουν (είναι όμοια) με το σύνολο (το αντικείμενο). Αυτή η επανάληψη των ακανόνιστων λεπτομερειών ή σχηματισμών, συμβαίνει προοδευτικά σε μικρότερες κλίμακες και είναι δυνατόν να συνεχίσουν απεριόριστα έτσι ώστε, κάθε τμήμα ενός τμήματος όταν μεγεθύνει να μοιάζει βασικά με το συνολικό αντικείμενο. Ουσιαστικά ένα αυτοόμοιο αντικείμενο παραμένει αναλλοίωτο σε αλλαγές κλίμακας. Το φαινόμενο αυτό είναι εύκολο να παρατηρηθεί στις νιφάδες του χιονιού, στο φλοιό των δέντρων και στις ακτογραμμές.



5.2 Νιφάδα χιονιού όπου αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα ενός Fractal της φύσης

Τα fractal δεν μπορούν να οριστούν με τη βοήθεια της ευκλείδειας γεωμετρίας, διότι, έχουν λεπτομέρειες οι οποίες γίνονται ορατές μετά από μεγέθυνσή τους σε κάποια κλίμακα. Συγκεκριμένα αν μεγεθύνουμε κάποιο αντικείμενο το οποίο μπορεί να οριστεί με την ευκλείδεια γεωμετρία, π.χ. η περιφέρεια ενός κύκλου, μετά από πολλές μεγεθύνσεις θα μοιάζει με ευθύγραμμο τμήμα. Αντίθετα σε ένα fractal κατά τη μεγέθυνσή του θα εμφανίζονται όμοια τμήματα με το αρχικό σχήμα. Οι fractal εικόνες είναι ανεξάρτητες από τις αλλαγές της κλίμακας και δεν έχουν χαρακτηριστικό μέγεθος μέτρησης.

Σε κάθε πραγματική επιφάνεια υπάρχουν ατέλειες και στρεβλώσεις που κυμαίνονται από τις μαζικές στρεβλώσεις έως και τις τοπικές μικροσκοπικές ανωμαλίες. Επηρεάζουν σημαντικά φαινόμενα όπως το φαινόμενο της τριβής και της διαρροής αερίων μεταξύ δυο επιφανειών που έρχονται σε επαφή. Η τραχύτητα κάποιων επιφανειών διαμορφώνει τους μηχανισμούς επαφής μεταξύ των στερεών και η μελέτη τους συνεχίζεται για την εύρεση και κατασκευή βέλτιστων επιφανειών.

Η τραχύτητα μια επιφάνεια εμποδίζει – περιορίζει την επαφή μεταξύ των στερεών σωμάτων σε ένα μικρό μόνο ποσοστό από αυτό της ονομαστικά διαθέσιμης περιοχής για επαφή. Σε μια επιφάνεια σε επίπεδο nm υπάρχουν περίσσεια άτομα ή ελλείποντα άτομα, που έχουν ως αποτέλεσμα ένας μεγάλος αριθμός ατόμων να

συνδέονται με ασθενείς δεσμούς σε σχέση με τα εσωτερικά άτομα που συνδέονται καλύτερα μεταξύ τους. Θεωρητικά χωρίς ατέλειες οι επιφάνειες θα ήταν αδρανείς.

Έχει παρατηρηθεί ότι τα προφίλ της τραχύτητας των επιφανειών είναι όμοια με τις ηλεκτρικές καταγραφές του λευκού θορύβου και έχουν υιοθετηθεί παρόμοιες μέθοδοι στατιστικής για την ανάλυσή του. Η καμπύλη που προκύπτει είναι ένα ολοκλήρωμα της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας  $P(z)$ . Στην περίπτωση που η κατανομή του ύψους είναι γκαουσιανή κατανομή, τότε η καμπύλη αντιστοιχίζεται στην κλασική συνάρτηση  $p(z)$  της κλασικής μηχανικής. Επομένως οι περισσότερες επιφάνειες εμφανίζουν στη φύση Γκαουσιανές κατανομές.

Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στον τρισδιάστατο χαρακτηρισμό επιφανειών είναι συναρτήσεις που εξαρτώνται από τη κλίμακα μεγέθους στην οποία υπολογίζονται. Πρόκειται για μεθόδους μετασχηματισμού Fourier, μεθόδους μετασχηματισμού wavelets (κυματίδια), μεθόδους fractal, και μεθόδους fractal-wavelets.

Οι μέθοδοι Fractals (μορφοκλασματικές) επιτρέπουν τον χαρακτηρισμό των στοιχείων μιας επιφάνειας ανεξάρτητα από τη κλίμακα μεγέθους. Οι διαστάσεις των Fractals είναι αυτές που υιοθετούνται για τον χαρακτηρισμό των επιφανειών που εμφανίζουν τραχύτητα. Από τα τραχύμετρα ή το AFM λαμβάνεται από οπτικές μετρήσεις η διαφορά στο ύψος «Z» επάω από μια μέση θέση σε σχέση με την απόσταση κατά μήκος του άξονα «X» στο προφίλ μιας επιφάνειας. Το ύψος  $Z(x)$  προσδιορίζεται από τη συνάρτηση Weierstrass-Mandelrot, που περιλαμβάνει τη διάσταση fractal  $D$  και δίνεται από τη σχέση:

$$Z(x) = G^{(D-1)} \sum_{n=n_i}^{\infty} \frac{\cos 2\pi\gamma^n x}{\gamma^{(2-D)n}} \text{ για } 1 < D < 2 \text{ και } \gamma > 1$$

όπου  $Z(x)$  είναι η διακύμανση του ύψους της επιφάνειας κατά μήκος του άξονα  $x$ .

$G$ : είναι το χαρακτηριστικό μήκος κλίμακας μιας επιφάνειας [m]. Εξαρτάται από την τραχύτητα της επιφάνειας.

$n_i$  : είναι η χαμηλότερη συχνότητα του προφίλ, δηλαδή η συχνότητα αποκοπής η οποία εξαρτάται από το μήκος δειγματοληψίας  $L$  σύμφωνα με τη σχέση  $\gamma^{n_i} = \frac{1}{L}$  [ $m^{-1}$  ]

$\gamma$ : είναι η παράμετρος που καθορίζει τη πυκνότητα του φάσματος και τη σχετική διαφορά φάσης μεταξύ των φασματικών μεθόδων, συνήθως  $\gamma=1.5$ .

$\gamma^n$ : οι μέθοδοι συχνότητας που αντιστοιχούν στο αντίστροφο μήκος κύματος της τραχύτητας

D : Είναι η διάσταση fractal που κυμαίνεται μεταξύ 1 και 2. Εξαρτάται από το βαθμό λείανσης της επιφάνειας. Για λείες επιφάνειες βρίσκεται μεταξύ του 1.7 με 1.9 ενώ για το έδαφος είναι 1.6 και για επιφάνειες που έχουν υποστεί επεξεργασία με τórνο είναι 1.8.

Η συνάρτηση Weierstrass-Mandelbrot έχει την ιδιότητα της παραγωγής προφίλ που δε μεταβάλλεται ανεξάρτητα από τη μεγέθυνση παρατήρησής του. Το προφίλ που παράγεται από τη συνάρτηση αυτή εμφανίζει πολλές ομοιότητες με μιας πραγματικής επιφάνειας. Επειδή η διάσταση Fractal είναι ανεξάρτητη από το μήκος δειγματοληψίας, παρέχει συνεπείς δείκτες για την τραχύτητα μιας επιφάνειας.

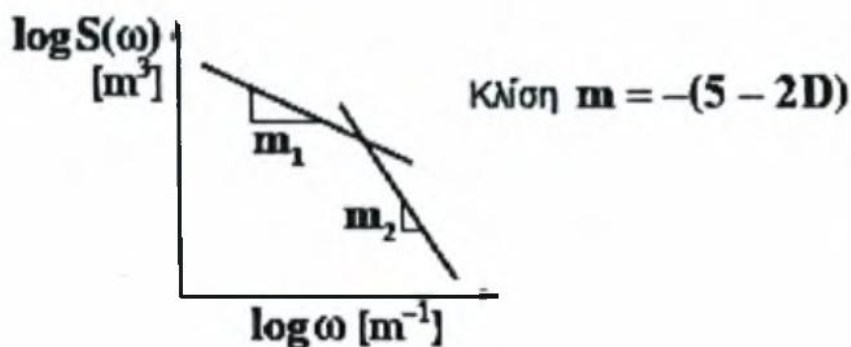
Οι παράμετροι G και D μπορούν να προσδιοριστούν από το φάσμα ισχύος (power spectrum) της συνάρτησης Weierstrass-Mandelbrot που είναι στη μορφή:

$$S(\omega) = \frac{G^{2(D-1)}}{2 \ln \gamma} \frac{1}{\omega^{(5-2D)}}$$

Όπου  $S(\omega)$  : είναι το φάσμα ισχύος [ $m^3$  ]

$\omega$  : είναι η συχνότητα., το όριο χαμηλής συχνότητας αντιστοιχεί στο μήκος δειγματοληψίας, ενώ το όριο υψηλής συχνότητας σχετίζεται με τη διακριτική ικανότητα του οργάνου.

Η διάσταση fractal D λαμβάνεται από την κλίση m της γραφικής απεικόνισης log-log της  $S(\omega)$ , όπως φαίνεται παρακάτω στην εικόνα.



5.3 Το διάγραμμα  $\log S(\omega)$ - $\log \omega$  με βάση τη κλίση του οποίου λαμβάνουμε τη διάσταση fractal  $D$ .

Η παράμετρος  $G$  καθορίζει τη θέση του φάσματος ισχύος και είναι χαρακτηριστική της κλίμακας του μήκους της επιφάνειας.

Οι σταθερές  $D$ ,  $G$  και  $n_i$  της συνάρτησης Weierstrass-Mandelbrot διαμορφώνουν ένα πλήρες σύνολο ανεξάρτητων παραμέτρων κλίμακας που χαρακτηρίζουν μια ισοτροπική τραχεία επιφάνεια. [13]. Όταν είναι γνωστοί μπορεί να προσδιοριστεί η τραχύτητα οποιασδήποτε επιφάνειας σε κάθε κλίμακα μήκους βάση της συνάρτησης Weierstrass-Mandelbrot.

Στο μοντέλο των fractal η κλίμακα μήκους τείνει να είναι απεριόριστη, έτσι εάν επιλέξουμε ένα ικανοποιητικό μήκος δειγματοληψίας τότε θα είναι δυνατόν να παρατηρήσουμε τα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας. Η επιλογή ενός αλγορίθμου για τον υπολογισμό της fractal διάστασης είναι πολύπλοκο διότι δεν υπάρχει κάποια δυνατότητα να γνωρίζουμε την αληθινή ή ακόμα και την ονομαστική διάσταση fractal του υπό εξέταση προφίλ επιφάνειας. [14][16].

Μια δημοφιλής μέθοδος που περιγράφει τον υπολογισμό της διάστασης fractal είναι η δισδιάστατη ανάλυση του Hurst με βασικό περιορισμό ότι λειτουργεί καλά σε ισότροπες επιφάνειες, δηλαδή σε επιφάνειες που εμφανίζουν τα ίδια χαρακτηριστικά σε όλες τις κατευθύνσεις [15]. Για να υπερκεραστεί αυτός ο περιορισμός αναπτύχθηκε η μέθοδος HOT (Hurst Orientation Transform) που μας δίνει τη δυνατότητα μας δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού των συντελεστών Hurst ( $H$ ) που σχετίζονται με την διάσταση fractal μιας επιφάνειας, δηλαδή ισχύει  $D = 3 - H$ , σε όλες τις δυνατές κατευθύνσεις. Αυτοί οι συντελεστές όταν αναπαρασταθούν συναρτήσει του προσανατολισμού παράγουν την ανισοτροπία μιας επιφάνειας.

Επίσης οι συναρτήσεις αυτοσυσχέτισης είναι ένα πολύ σημαντικό εργαλείο για την εξαγωγή και αναπαράσταση ορισμένων χαρακτηριστικών γνωρισμάτων της τρισδιάστατης τοπογραφίας μιας επιφάνειας.

Για την παραμετροποίηση χρησιμοποιούνται κάποιες παράμετροι όπως η μέση Αριθμητική τραχύτητα  $R_a$ , το μέγιστο βάθος  $R_t$ , το μέγιστο ύψος από τη κεντρική γραμμή  $R_p$  η παράμετρος διαστήματος  $R_{sm}$  η διάσταση Fractal  $D$  εκ των οποίων η πιο σημαντική συμβολή έχει η διάσταση  $D$  που σχετίζεται με τον υπολογισμό του συντελεστή Hurst ( $H=3-D$ ).

Στη συνέχεια προσδιορίσαμε τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης από την οποία προκύπτει το μήκος αυτοσυσχέτισης  $\beta$  (correlation length), για να γίνει χαρακτηρισμός των επιφανειών που χρησιμοποιήσαμε.

Η πιο σημαντική επίδραση στη τραχύτητα προκύπτει από το φάσμα ισχύος rms με τον προσδιορισμό του οποίου ασχοληθήκαμε εκτενώς.

Η Fractal dimension εξαρτάται από πολλούς παράγοντες συμπεριλαμβανομένου της σκληρότητας του υλικού που μελετάμε. Η διάσταση fractal είναι χαρακτηριστική μιας επιφάνειας και δεν αποτελεί μέτρο για το μέγεθος της τραχύτητας διότι η επιμήκυνση μιας επιφάνειας στη κατεύθυνση  $z$  για να αυξηθεί το εύρος της τραχύτητας δεν προκαλεί μεταβολές στη διάσταση fractal [16], επομένως είναι σημαντική η πληροφορία του φάσματος ισχύος για τον υπολογισμό της τραχύτητας των επιφανειών.

Ο γενικός ορισμός του πλάτους της τραχύτητας του RMS για άμεσο υπολογισμό από την κατανομή ύψους είναι:

$$R_{hh}(0, L_1, L_2) \equiv \langle h_o^2 \rangle(L_1, L_2) = \frac{1}{L_2 - L_1} \int_{L_1}^{L_2} h^2(x_0) dx_0$$

όπου  $L_1$  και  $L_2$  είναι οι ακραίες θέσεις της ευθείας γραμμής της σάρωσης.

Συνοψίζοντας αποκτήσαμε τα πειραματικά μας δεδομένα και υπολογίσαμε το power spectrum των υψών σε μια πεπερασμένη επιφάνεια για τα υλικά που έρχονται σε επαφή μεταξύ του, δηλαδή για το υλικό Cartpon που χρησιμοποιείται στα FR4 των Micromegas και το υλικό Kartpon που αποτελεί το o-ring και έρχεται σε επαφή μαζί του. Κάνοντας fitting τα δεδομένα, μπορέσαμε να τα παραμετροποιήσουμε με

γραμμική προσαρμογή που βασίζεται στη λογαριθμική κλίμακα ( $\log_{10} C(q) - \log_{10} q$  scales) με το πρόγραμμα Gwiddion. Επίσης υπολογίστηκε η επιφάνεια διαχωρισμού των δυο υλικών, που σχετίζεται με την ελάχιστη ασκούμενη πίεση ώστε να έρχονται οριακά τα υλικά σε επαφή μεταξύ τους και στη συνέχεια υπολογίστηκε η ελάχιστη διαρροή που οφείλεται στην υφή των υλικών που σχετίζεται με την τραχύτητα.

Η επιφάνεια διαχωρισμού συμβολίζεται με  $h_{0,r}(P_0)|_{\zeta=\zeta_c}$  και προκύπτει από τη σχέση:

$$h_{0,r}(P_0)|_{\zeta=\zeta_c} \approx \frac{h_{0,A}}{\sqrt{2}} \left( 1 + \frac{1}{\frac{\pi^2 C_0 q_0^{2(1-H)}}{50 P_0^2 (1-H)} \left( \frac{E}{1-\nu^2} \right)^2} \right)^{\frac{H}{2(H-1)}}, \text{ όπου } \zeta_c \text{ είναι η κρίσιμη}$$

μεγέθυνση. για  $\zeta_c \gg 1$ , προσεγγιστικά για υψηλές πιέσεις γίνεται:

$$h_{0,r}(P_0)|_{\zeta=\zeta_c} \approx \frac{\pi}{\sqrt{2}} \frac{H^{*H^*}}{50^{H^*}} h_{0,A}^{\frac{1}{(1-H)}} \left( \frac{q_0^2}{\varepsilon^{*2}} \right)^{H^*}$$

Για την πιο συνήθη περίπτωση self affine fractal ισχύει:  $H = 2/3 \approx 0.667$  οπότε έχουμε:

$$h_{0,r}(\varepsilon^*)|_{\zeta=\zeta_c} \approx \frac{\pi}{50\sqrt{2}} h_{0,A}^3 \frac{q_0^2}{\varepsilon^{*2}} \varepsilon^{0.15} \approx \frac{\pi}{1.6} h_{0,A}^3 q_0^2 \approx 2 h_{0,A}^3 q_0^2 \text{ και } H^* = 1$$

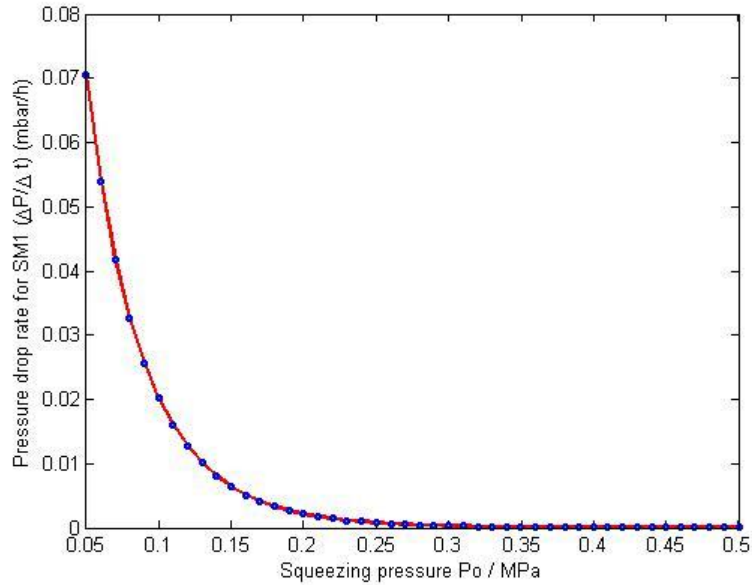
Για  $H < 2/3 \Rightarrow H^* > 1$  οπότε υπάρχει μεγαλύτερη τάση διαχωρισμού των επιφανειών.

Για  $H > 2/3 \Rightarrow H^* < 1$  υπάρχει μικρότερη τάση διαχωρισμού μεταξύ των επιφανειών.

Υποθέτοντας έναν λόγο συμπίεσης  $\varepsilon^* = 0.15$ ,  $H = 2/3$   $h_A = 0.3057 \mu\text{m}$  και  $q_0 = 2.51 \times 10^6$  ο διαχωριστικός χώρος στην κρίσιμη μεγέθυνση με τις κατάλληλες παραμέτρους που αντιστοιχούν στα δεδομένα για την επιφάνεια τύπου FR4 γίνεται:

$$\log_{10} h_{0,r}(\varepsilon^*)|_{\zeta=\zeta_c, \varepsilon^*=0.15} \approx -6.44$$

Στη συνέχεια παραμετροποιήθηκε ο ρυθμός διαρροής αερίου ως συνάρτηση της τραχύτητας των δυο υλικών (FR4 και Karton) που έρχονται σε επαφή μεταξύ τους και προέκυψε γραφικά η εξής σχέση:



**5.1: Γραφική απεικόνιση του λαμβανόμενου ρυθμού διαρροής αερίου που αναφέρεται σε συνδυασμό χρήσης των υλικών FR4 και Karton που χρησιμοποιούνται στο MM SM1 Quadruplet ως συνάρτηση της ασκούμενης πίεσης που τα συμπιέζει.**



# Συμπεράσματα

Αρχικά μελετήσαμε το διαφορικό σήμα που προέρχεται από δυο αισθητήρες ροής μάζας (mass flow sensors) με τη χρήση της μεθόδου FRL. Για την μελέτη του σήματος αυτού, που είναι σε επίπεδο μερικών mV αξιοποιήσαμε δύο τεχνικές. Στην πρώτη περίπτωση συνδέσαμε το διαφορικό σήμα απευθείας με ένα ψηφιακό βολτόμετρο υψηλής ακρίβειας 4.5 ψηφίων, και είδαμε ότι οι μετρήσεις μας παρουσίαζαν διακύμανση στο πρώτο δεκαδικό ψηφίο. Το συγκεκριμένο βολτόμετρο έχει τη δυνατότητα να υπολογίζει αυτόματα με τη χρήση του λογισμικού του την μέση τιμή 100 μετρήσεων, με αποτέλεσμα να βελτιώνεται το σφάλμα μέτρησης και να λαμβάνουμε τιμές μεγαλύτερης ακρίβειας με διακύμανση στο δεύτερο δεκαδικό ψηφίο. Ωστόσο για τις ανάγκες του εργαστηρίου μας είχαμε ανάγκη μεγαλύτερης ακρίβειας και καταγραφής των μετρήσεών μας απευθείας στον ηλεκτρονικό υπολογιστή με λογισμικό, για περαιτέρω αξιοποίηση και μελέτη των δεδομένων που προκύπτουν σε διάφορα επίπεδα λειτουργίας του setup του εργαστηρίου μας.

Για τον σκοπό αυτό εγκαταστήσαμε στο setup του εργαστηρίου μας τον Lock-in-Amplifier της εταιρείας Signal Recovery που διαθέτει το ΕΜΠ, με στόχο να απαλλαγούμε από τον ηλεκτρονικό θόρυβο που συνυπάρχει με το διαφορικό σήμα που μελετήσαμε. Επίσης πετύχαμε και τον δεύτερο στόχο μας, μέσω του λογισμικού “Acquire Data Acquisiti Software” που διατίθεται από την εταιρεία που υποστηρίζει τον Signal Recovery's Lock-in-Amplifier 5210 στην Ελλάδα. Με την αξιοποίηση του συγκεκριμένου λογισμικού μπορέσαμε να αποκτήσουμε on-line δεδομένα που σχετίζονται με το διαφορικό σήμα που προέρχεται από τους δυο αισθητήρες (Mass Flow Sensors), μέσω ενός συστήματος όπου είναι συνδεδεμένοι, το οποίο αναπτύχθηκε στο εργαστήριο μας και εξομοιώνει τις διαρροές που αναλογούν στο επιτρεπτό όριο διαρροών των ανιχνευτών Micromegas που θα εγκατασταθούν στον CERN και θα ελέγχεται η στεγανότητά τους από την ομάδα μας, σε ένα ειδικά διαμορφωμένο χώρο τον BB5 του CERN.

Επίσης στα πλαίσια της διπλωματικής μου εργασίας αναπτύχθηκε μια εργαστηριακή άσκηση εκπαιδευτικού χαρακτήρα για τις ανάγκες του μαθήματος Οργανολογίας που διδάσκεται από τον επιβλέποντα καθηγητή μου, δρ. Μαλτέζο Σταύρο, σε συνεργασία με την ομάδα μας, με βάση την οποία οι φοιτητές

ενημερώνονται για την λειτουργία της τεχνικής LIA, και μελετάνε τα όρια επιτρεπτών διαρροών και τον τρόπο λειτουργίας των ανιχνευτών Micromegas, αξιοποιώντας την εγκατάσταση που διατίθεται στο εργαστήριο μας. Μάλιστα με την χρήση του λογισμικού ADAS που μας διατίθεται μπορούν να παρατηρούν άμεσα τις διακυμάνσεις του ληφθέντος σήματος από τους αισθητήρες. Το διαφορικό σήμα που λαμβάνουμε μέσω του LIA είναι της τάξης μερικών Volt, απαλλαγμένο από τον υπερτιθέμενο θόρυβο, και αφορά αρχικό σήμα της τάξης μερικών δεκάδων millivolt. Έτσι είναι πολύ πιο εύκολο να εντοπιστούν οι αλλαγές που υφίσταται το αρχικό σήμα και να μελετηθούν γραφικά με μεγαλύτερη ακρίβεια, καθώς για το συγκεκριμένο σήμα που μελετάμε έχει επιτευχθεί βελτίωση του λόγου σήματος προς θόρυβο (signal to noise ratio) ίσος με 12, με αποτέλεσμα να είμαστε σε θέση να μελετάμε σήματα με μεγάλη ακρίβεια. Μάλιστα η τεχνική LIA μας δίνει την δυνατότητα μελέτης ακόμη μικρότερων σημάτων, που να αντιστοιχίζονται ακόμη και κάτω από το ελάχιστο αποδεκτό όριο διαρροών στους θαλάμους Micromegas.

# Παραρτήματα

## Παράρτημα Α

### Οδηγός της εκπαιδευτικής άσκησης για μεταπτυχιακούς φοιτητές.

#### 1. Η μέθοδος σύγχρονου ενισχυτή

Η μέθοδος Σύγχρονου Ενισχυτή (ή Σύγχρονης Αποδιαμόρφωσης), γνωστή με τον Αγγλικό όρο Lock-in Amplifier (LIA), σύμφωνα με την βιβλιογραφία, πιστεύεται ότι εφευρέθηκε από τον Robert H. Dicke στο Πανεπιστήμιο του Princeton. Η μέθοδος αυτή έχει ως στόχο να ενισχύσει και να καταγράψει ένα ασθενικό σήμα συγκρίσιμου ή πολύ μικρότερου πλάτους σε σχέση με τον εγγενή ή εξωγενή θόρυβο. Κατά συνέπεια, η τεχνική αυτή επιτυγχάνει σημαντική βελτίωση του λόγου σήματος προς θόρυβο (S/N ratio) αυξάνοντας την ευαισθησία της μέτρησης. Ο εγγενής θόρυβος (λευκός θόρυβος και θόρυβος βολής) έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τα οποία λαμβάνονται υπόψη στη μέθοδο LIA. Το πρώτο χαρακτηριστικό είναι η φασματική του κατανομή η οποία, θεωρητικά, εκτείνεται από συχνότητα μηδέν ως άπειρο. Το δεύτερο αφορά στα στατιστικά του χαρακτηριστικά που είναι, θεωρητικά, η μηδενική μέση τιμή καθώς και η τυπική απόκλιση που είναι πεπερασμένη και καθορίζει το πλάτος ή την ισχύ του.

Σε ότι αφορά στα σήματα, υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες: η πρώτη περιλαμβάνει τα περιοδικά σήματα και η δεύτερη τα απεριοδικά σήματα (ουσιαστικά το σήμα έχει άπειρη περίοδο). Κάθε περιοδικό σήμα,  $x(t)$ , κάτω από κάποιες προϋποθέσεις, μπορεί να αναπτυχθεί σε τριγωνομετρική σειρά Fourier, όπως παρακάτω:

$$s(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(2\pi nft) + \sum_{m=1}^{\infty} b_m \sin(2\pi mft)$$

Ο όρος  $a_0$  αντιπροσωπεύει τη μέση τιμή που αποτελεί τη συνεχή συνιστώσα (DC component) του σήματος. Τόσο ο συντελεστής  $a_0$  όσο και οι  $a_n$  και  $b_n$  υπολογίζονται μέσω των ολοκληρωμάτων σύμφωνα με τη μέθοδο αναπτύγματος Fourier.

Η τεχνική LIA εφαρμόζεται σε σχετικά σταθερά περιοδικά σήματα (αρμονικά ή σύνθετα) όχι όμως, άμεσα τουλάχιστον, σε συνεχή. Τα συνεχή σήματα για να μετρηθούν θα πρέπει προηγουμένως να διαμορφωθούν μέσω μιας συχνότητας αναφοράς. Τα συνεχή σήματα θα πρέπει προηγουμένως να διαμορφωθούν ή απλούστερα να τεμαχιστούν (chopping) μέσω κάποιας τεχνικής αναλόγως της φύσης του σήματος (φωτεινή δέσμη, συνεχής τάση κ.α.). Αν η διαμόρφωση γίνει μέσω τεμαχισμού τότε το προκύπτον σήμα είναι τετραγωνικό (square-wave). Ένα τετραγωνικό σήμα με μηδενική μέση τιμή αναπτύσσεται σε σειρά Fourier ως εξής:

$$s(t) = 4A \left( \frac{\sin \omega_0 t}{\pi} + \frac{\sin 3\omega_0 t}{3\pi} + \frac{\sin 5\omega_0 t}{5\pi} + \dots \right)$$

όπου  $A$  το πλάτος του σήματος και  $\omega_0$  η θεμελιώδης συχνότητα. Η λειτουργία της μεθόδου LIA βασίζεται στην ορθογωνιότητα των ημιτονικών συναρτήσεων. Συγκεκριμένα, για ένα αρμονικό σήμα αναφοράς (reference signal) και μια κυματομορφή εισόδου  $V_s(t)$ , το DC σήμα εξόδου  $V_{out}(t)$  μπορεί να υπολογιστεί από έναν αναλογικό Lock-in Amplifier από την εξής σχέση

$$V_{out}(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t \sin(2\pi f_R t + \varphi) V_s(t) dt, \text{ όπου } \varphi \text{ είναι η φάση και } T \text{ η περίοδος. Αν στο}$$

σήμα υπερτίθεται θόρυβος, τότε από τις συνιστώσες της ανάπτυξης του σήματος επιζεί μόνο εκείνη που η συχνότητά της είναι ίση με τη συχνότητα αναφοράς.

## 2. Αρχή λειτουργίας της μεθόδου

Δύο είναι τα βασικότερα είδη ηλεκτρικού θορύβου: α) Ο θεμελιώδης θόρυβος, που είναι κυρίως ενδογενούς προέλευσης και οφείλεται στην τυχαία κίνηση φορέων ηλεκτρικού φορτίου (γνωστός στις μορφές, «λευκού» ή «θερμικού» θορύβου και θορύβου «βολής») και β) Ο μη θεμελιώδης θόρυβος, που προέρχεται κυρίως από ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του περιβάλλοντος.

Σε ένα ασθενές σήμα τάσης  $V_i$  στο οποίο υπερτίθεται θόρυβος (εγγενής ομοιόμορφου φάσματος και εξωτερικός από παρεμβολές), π.χ. από τις γραμμές της εσωτερική ηλεκτρικής εγκατάστασης των κτιρίων που λειτουργούν ως πηγή θορύβου ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η θεμελιώδης συχνότητα του θορύβου παρεμβολής είναι 50 Hz ενώ η δεύτερη και τρίτη αρμονική είναι 100 Hz και 150 Hz αντίστοιχα. Οι ανώτερες αρμονικές συχνότητες έχουν πολύ μικρότερο πλάτος και μπορούν να αμεληθούν. Για να χρησιμοποιήσουμε Ενισχυτή Σύγχρονης Διαμόρφωσης (Lock-in Amplifier) επιλέγουμε συχνότητα του σήματος διαμόρφωσης  $\omega_R$  στην λεγόμενη ήσυχη περιοχή του φάσματος του θορύβου (περίπου από τα 500 Hz ως τα 10 kHz και πάντα έξω από τις κορυφές του εξωγενούς θορύβου (πέρα από τη μεγαλύτερη συχνότητα κορυφής θορύβου). Συγκεκριμένα, μπορούμε να θέσουμε  $\omega_R = 2\pi \cdot 175 \text{ Hz} = 2\pi \cdot 175 = 1099.56 \text{ s}^{-1}$ .

Έστω το σήμα  $v_s(t) = V_s \sin(\omega_R t + \varphi_s)$  στο οποίο υπερτίθεται θόρυβος  $n(t)$ . Τότε το σήμα του Ανιχνευτή Φάσης (Phase Sensitive Detector, PSD),  $V_{PSD}$ , προ της διάβασής του από το βαθυπερατό φίλτρο (κανάλι X) είναι:

$$\begin{aligned} V_{PSD,X}(t) &= [V_s \sin(\omega_R t + \varphi_s) + n(t)] \cdot [V_L \sin(\omega_L t + \varphi_R)] = V_s V_L \sin(\omega_R t + \varphi_s) \sin(\omega_L t + \varphi_R) \\ &+ V_L n(t) \sin(\omega_L t + \varphi_R) = \frac{V_s V_L}{2} \cos[(\omega_R - \omega_L)t + \varphi_s - \varphi_R] - \\ &- \frac{V_s V_L}{2} \cos[(\omega_R + \omega_L)t + \varphi_s + \varphi_R] + V_L n(t) \sin(\omega_L t + \varphi_R) \end{aligned}$$

Θεωρούμε ότι το σήμα  $v_L(t) = V_L \sin(\omega_L t + \varphi_R)$  είναι σύμφωνο με το  $v_s(t) = V_s \sin(\omega_R t + \varphi_s)$ , δηλαδή έχουν την ίδια συχνότητα,  $\omega_L = \omega_R$ . Αν έχουν και ίδια φάση,  $\varphi_s = \varphi_R$  τότε το σήμα του PSD θα γίνει:

$$V_{PSD,X}(t) = \frac{V_s V_L}{2} - \frac{V_s V_L}{2} \cos(2\omega_R t + 2\varphi_R) + V_L n(t) \sin(\omega_R t + \varphi_R)$$

Ο πρώτος όρος είναι σταθερός (DC) και εξαρτάται μόνο από τη διαφορά φάσης. Ο δεύτερος όρος αναφέρεται σε διπλάσια συχνότητα ενώ ο τρίτος όρος

αποτελεί θόρυβο με φάσμα στο οποίο οι δύο κορυφές έχουν μετατοπιστεί κατά  $\pm\omega_R$  και  $\pm\omega_L$ . Στην πράξη όμως οι φάσεις μπορεί να διαφέρουν, οπότε θα έχουμε:

$$V_{PSD,X}(t) = \frac{V_s V_L}{2} \cos(\varphi_s - \varphi_R) - \frac{V_s V_L}{2} \cos(2\omega_R t + \varphi_s + \varphi_R) + V_L n(t) \sin(\omega_R t + \varphi_R)$$

Στην περίπτωση αυτή ο πρώτος όρος εξαρτάται από τον βαθμό προσέγγισης (συγχρονισμού) των φάσεων με μέγιστη τιμή για  $\varphi_s = \varphi_R$ . Όλοι οι υπόλοιποι όροι εμπεριέχουν τα ίδια χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν. Επομένως, το σήμα  $V_{PSD,X}(t)$  διερχόμενο από βαθυπερατό φίλτρο θα διατηρήσει μόνον τη μέση τιμή του και μια μικρή συνεισφορά από το φάσμα του θορύβου σε μια στενή περιοχή γύρω από τη συχνότητα  $\omega_R$  και το οποίο εξαρτάται κυρίως από το επίπεδο του θορύβου σε

αυτήν:  $V_{PSD,X} = \frac{V_s V_L}{2} \cos(\varphi_s - \varphi_R)$ . Το σήμα του ανιχνευτή φάσης (Phase Sensitive

Detector, PSD) μετά από μετάθεση φάσης κατά  $\frac{\pi}{2}$  (κανάλι Y) θα γίνει:

$V_{PSD,Y}(t) = V_s \cos(\omega_R t + \varphi_s) + n_1(t)$ . Το σήμα  $V_{PSD,Y}(t)$  μετά τη διέλευσή του από

βαθυπερατό φίλτρο θα γίνει:  $V_{PSD,Y} = \frac{V_s V_L}{2} \sin(\varphi_s - \varphi_R)$ . Το συνιστάμενο σήμα

εισόδου από τα δύο κανάλια θα είναι:

$$V_{PSD,R}(t) = \sqrt{V_{PSD,X}^2(t) + V_{PSD,Y}^2(t)}$$

Το σήμα εξόδου είναι:  $V_{out} = VL_{out} \cos\theta$ , όπου  $VL_{out}$  είναι το πλάτος του σήματος αναφοράς (reference input).

Ο λόγος σήματος προς θόρυβο είναι ένας δείκτης που εκφράζει τη σχέση του επιπέδου του σήματος σε σχέση με τον θόρυβο  $S/N$ , όπου  $S$  το πλάτος του σήματος και  $N$  ο θόρυβος (η διακύμανση ως rms), αποτελεί δε βασικό χαρακτηριστικό στο οποίο αναφερόμαστε όταν θέλουμε να μιλήσουμε για τη βελτίωση του σήματος από το θόρυβο Ο λόγος S/N.

### 3. Βασικές οδηγίες χρήσης του Lock-in Amplifier 5210 (LIA)

Θα παρουσιάσουμε τις βασικές οδηγίες χρήσης για το setup του 5210 Lock in Amplifier. Αρχικά, βλέποντας το μπροστινό πάνελ του 5210, βλέπουμε έξι ομάδες, κοιτώντας από τα αριστερά προς τα δεξιά. Η πρώτη ομάδα έχει τον τίτλο **SENSITIVITY**. Εκεί πρέπει να είναι πατημένη η επιλογή **A**, όταν έχουμε να συνδέσουμε κάτι σε ένα κανάλι στην είσοδο **A**, ενώ, στην περίπτωση μέτρησης διαφορικού σήματος, πρέπει να είναι πατημένη η επιλογή **A-B** με σκοπό να ενεργοποιήσουμε και τα δύο κανάλια **A** και **B** έτσι ώστε να εισάγουμε διαφορικό σήμα.

Στη συνέχεια, χρειαζόμαστε την επιλογή **AUTO**, με την οποία ρυθμίζεται αυτόματα η βέλτιστη συχνότητα και η ενίσχυση του σήματος. Έτσι, επιλέγουμε το κουμπί **AUTO** στο πρώτο panel (**SENSITIVITY**) και μετά πατάμε αμέσως το κουμπί **MEAS**, περιμένοντας λίγο χρόνο μέχρι να σβήσει η φωτεινή ένδειξη **AUTO**. Από τη στιγμή εκείνη και μετά μπαίνει ο LIA σε λειτουργία ενγκλείδωσης φάσης, με βάση το σήμα αναφοράς (σήμα reference). Το σήμα reference εφαρμόζεται στο **REF IN** connector, λαμβάνεται από μια δεύτερη γεννήτρια και το καθορίσαμε να είναι στα 575 Hz. Η ενίσχυση του σήματος εισόδου δίνεται από τον παρακάτω πίνακα με βάση τον κατασκευαστή του LIA:

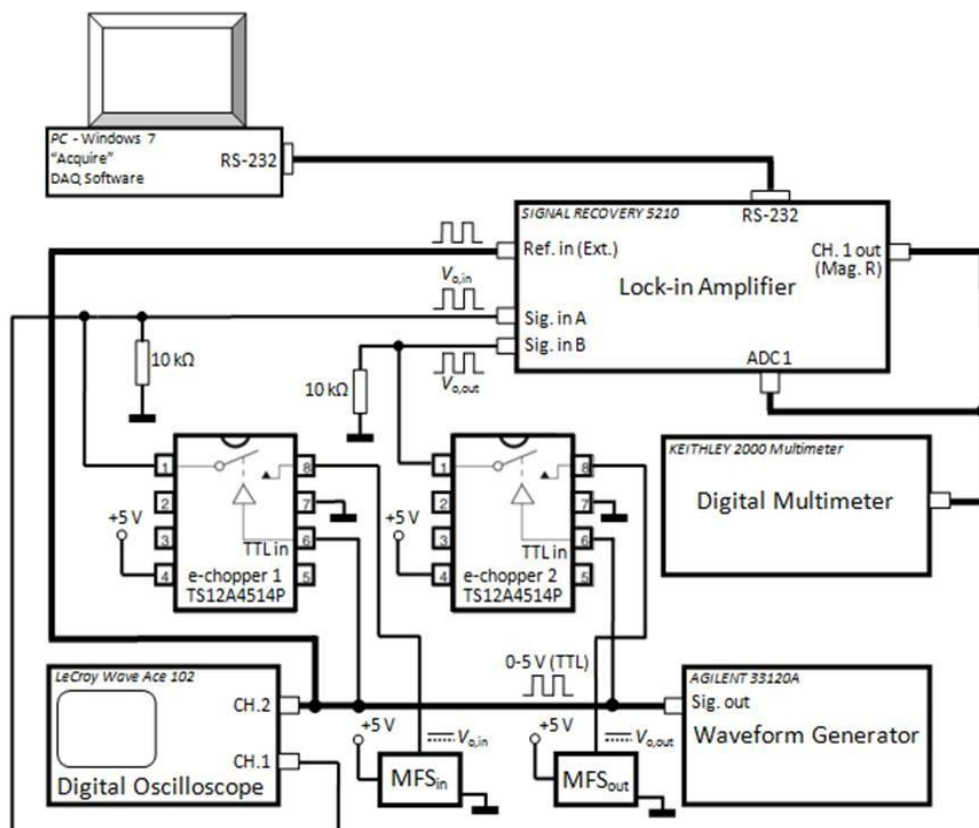
Full scale Sensitivity	Gain		
	High Stability	Normal	High Reserve
3V	0.03332	0.03332	0.03332
1V	1	1	1
300mV	3.332	3.332	3.332
100mV	10	10	10
30mV	33.32	3.332	3.332
10mV	100	10	10
3mV	333.2	33.32	3.332
1mV	1000	100	10
300μV	3332	333.2	33.32
100Mv	10000	1000	100
30μV	33320	3332	333.2
10μV	100000	10000	1000
3μV	333200	33320	3332
1μV	1000000	100000	10000
300nV	3332	333200	33320
100nV	1000000	1000000	100000

Βλέπουμε ότι όσο μικρότερο είναι το σήμα που θέλουμε να ενισχύσουμε, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ενίσχυση του ( το GAIN). Επίσης, για να λειτουργήσει ο LIA, πρέπει να έχουμε συνδέσει στο τρίτο panel το σήμα reference. Το σήμα εισόδου πρέπει να είναι ή ημιτονικό ή τετραγωνικό.

Για απόκριση ημιτονικού σήματος (sine-wave response) επιλέγουμε **NOTCH**, **LP,BP**, ενώ μόνο για την περίπτωση απόκρισης τετραγωνικού σήματος (square-wave response), επιλέγουμε το **FLAT**. Στη διάταξή μας χρησιμοποιούμε τετραγωνικό σήμα, που προκύπτει από δύο συγχρονισμένους ηλεκτρονικούς τεμαχιστές σήματος (e-choppers), τα οποία αποκόπτουν με σταθερό ρυθμό το προς μέτρηση συνεχές σήμα μέσω τετραγωνικού σήματος TTL παρεχόμενο από μια γεννήτρια σήματος.

#### 4. Πειραματική διάταξη

Παρακάτω, παραθέτουμε το διάγραμμα της διάταξης του εργαστηρίου για τη μέτρηση του διαφορικού σήματος δύο αισθητήρων ροής μάζας (Mass Flow Sensors).



Εικόνα 1

Στην Εικ. 1 φαίνονται οι δύο ηλεκτρονικοί τεμαχιστές (electronic choppers, e-choppers) που στις εξόδους τους είναι συνδεδεμένες παράλληλα αντιστάσεις 10 kΩ.

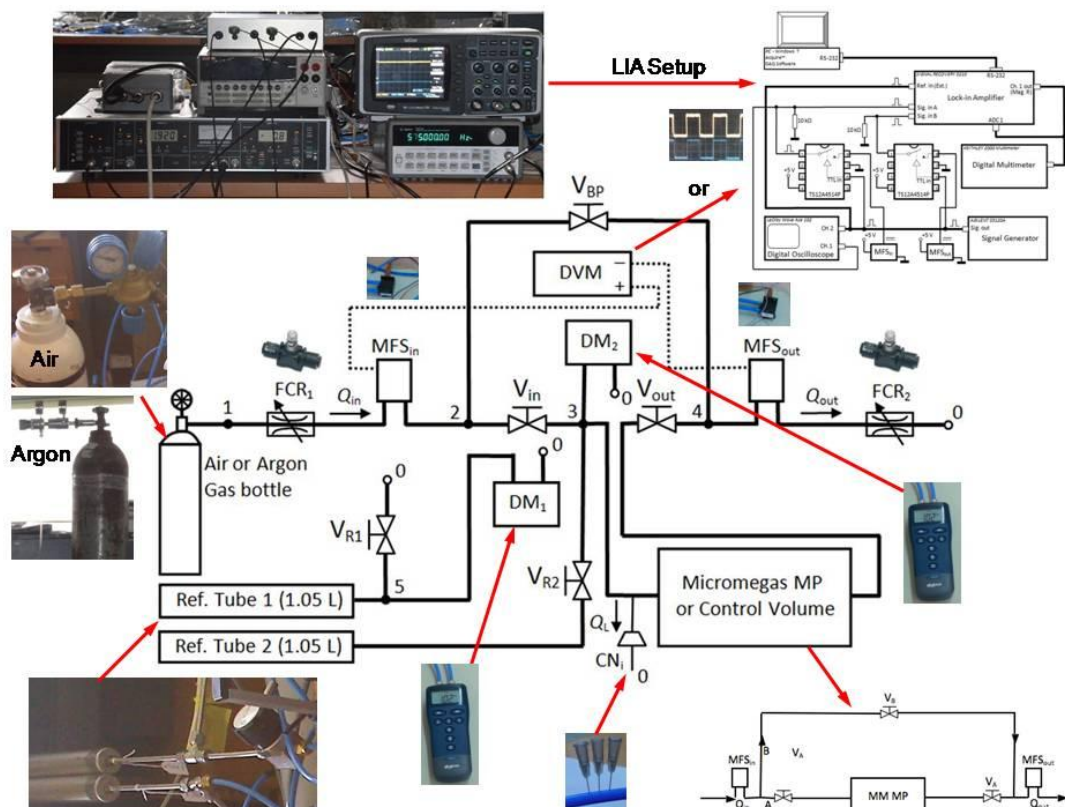


Τα σήματα οδηγούνται στη συνέχεια στα κανάλια IN A και IN B του LIA. Επίσης, βλέπουμε τη γεννήτρια (AGILENT 33120A), που μας δίνει το σήμα reference στο κανάλι REF IN αλλά και το τετραγωνικό σήμα διαμόρφωσης.

Επίσης, υπάρχει ένα ψηφιακό βολτόμετρο της KEITHLEY 6 ψηφίων, για μετρήσεις των σημάτων με υψηλή ακρίβεια. Το βολτόμετρο αυτό μπορούμε να το συνδέσουμε με την έξοδο του διαμορφωμένου σήματος από το LIA, που είναι στο μπροστινό πάνελ, στο OUTPUT CH1, και να κάνουμε άμεσα παρατηρήσεις για τη σταθερότητα του σήματος και το μέγεθός του, όπως προκύπτει μέσα από την ενίσχυσή του. Μπορούμε, εναλλακτικά να μετρήσουμε το σήμα εξόδου του LIA συνδέοντας το με ένα από τα τέσσερα κανάλια ADC (CH1-CH4) στο πίσω πάνελ του LIA, χρησιμοποιώντας ομοαξονικά καλώδια BNC.

Με τον τρόπο αυτό καταγράφουμε τις μετρήσεις μέσω υπολογιστή ο οποίος συνδέεται με RS232 (καλώδιο συνδέσεων 25pin to 9 pin). Οι μετρήσεις αφορούν στο διαφορικό σήμα των αισθητήρων που προέρχεται από προσομοιωμένη διαρροή αερίου μέσω ειδικής ιατρικής βελόνας τύπου 32G καθώς επίσης και σε μετρήσεις θερμοκρασίας ή διαφορική πίεση του αερίου.

Παρακάτω (Εικ. 2), παραθέτουμε μια παραστατική εικόνα της εργαστηριακής διάταξης με φωτογραφίες των επιμέρους οργάνων και εξαρτημάτων.

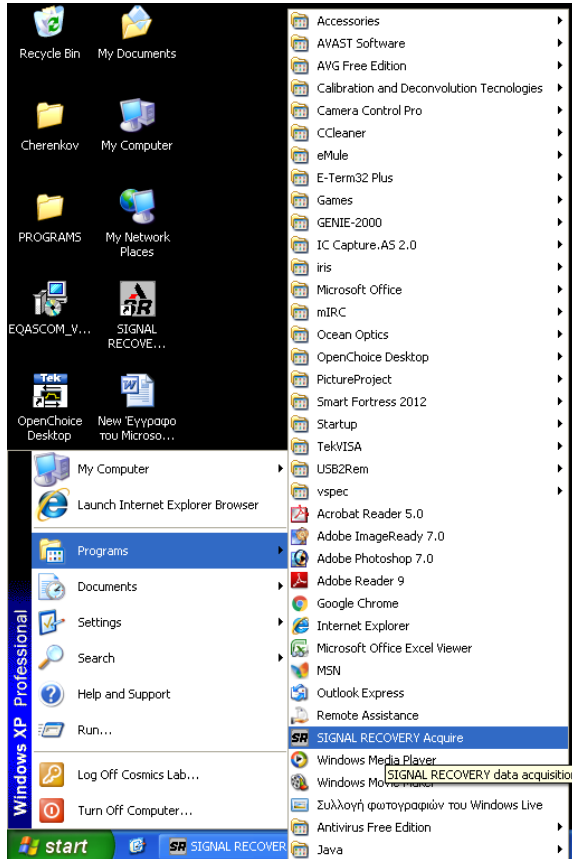


## **Εικόνα 2**

Ο σκοπός αυτής της διάταξης είναι ο έλεγχος στεγανότητας αερίου των ανιχνευτών Micromegas του New Small Wheel στο CERN. Ο εντοπισμός τυχόν διαρροών κατά τον ποιοτικό έλεγχο είναι βασικής σημασίας για τη σωστή λειτουργία των ανιχνευτών. Η μέθοδος LIA επιτρέπει να πάρουμε μετρήσεις πολύ κάτω του ελάχιστου επιτρεπτού ορίου διαρροών (περίπου 30 φορές). Σε αυτά τα επίπεδα ευαισθησίας, η βελτίωση του λόγου σήματος προς θόρυβο είναι της τάξης του 12.

## 5. Βασικές οδηγίες χρήσης του λογισμικού της Signal Recovery

Αρχικά πατάμε επάνω στην επιλογή της μπάρας με τα εγκατεστημένα προγράμματα στην έναρξη των windows, όπως φαίνεται παρακάτω (Εικ. 3):



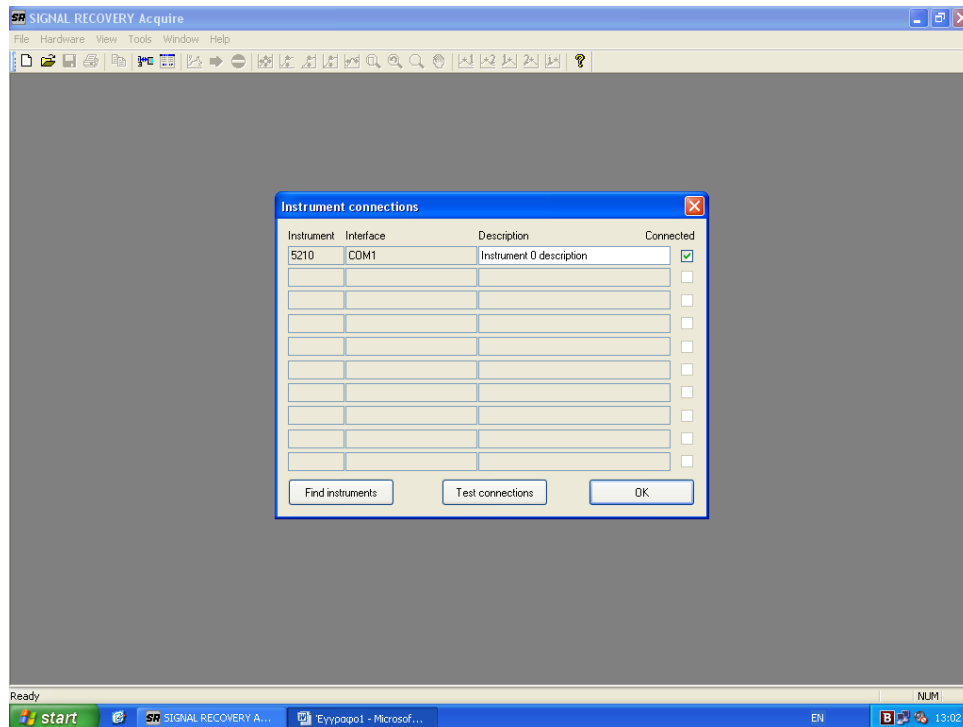
Εικόνα 3

Και πατάμε επάνω στην επιλογή (Εικ. 3):



Εικόνα 4

Στη συνέχεια, εμφανίζεται η παρακάτω οθόνη έναρξης:



**Εικόνα 5**

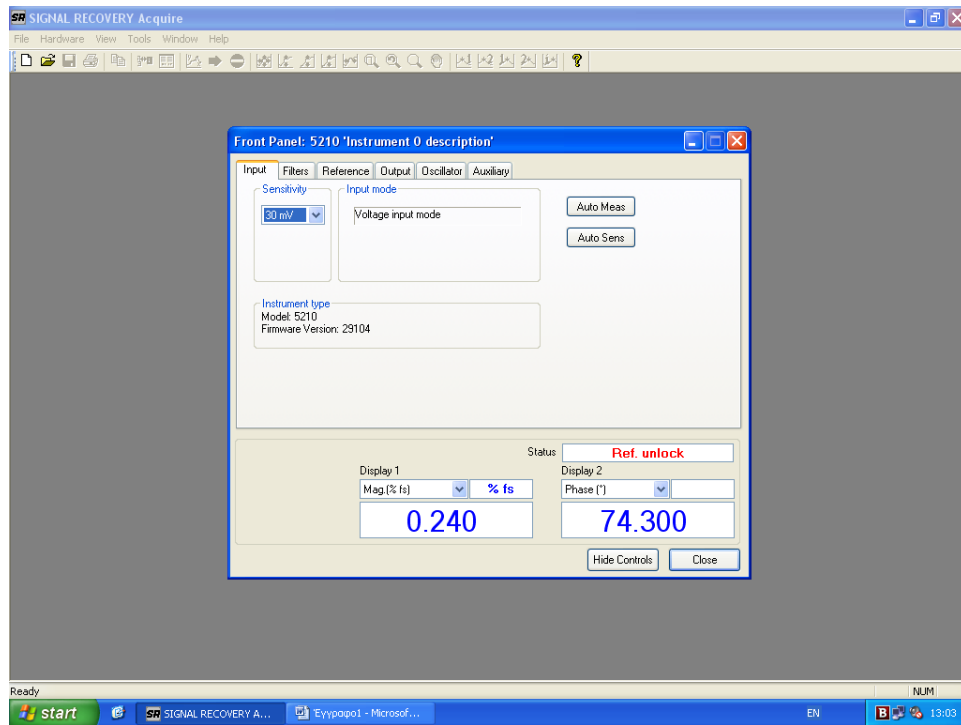
Εδώ (Εικ. 5), εφόσον είναι συνδεδεμένο και ανοιχτό το LIA, θα εμφανιστεί στις επιλογές μας και πατάμε OK για συνέχεια και επιστροφή στο πρόγραμμα επιλογών.

Στη συνέχεια, για να δούμε τις λειτουργίες του 5210 που είναι ενεργοποιημένες εκείνη τη στιγμή, πατάμε επάνω στην επιλογή (Εικ. 6), η οποία είναι πάνω αριστερά στην οθόνη που κοιτάμε. Εναλλακτικά, μπορούμε να επιλέξουμε από το menu: **Hardware->Instrument connection->...**



**Εικόνα 6:** (toolbar button)

Έτσι, εμφανίζεται το panel που αφορά τις ρυθμίσεις του 5210 (Εικ. 7). Μία χρήσιμη επιλογή είναι να κάνουμε AUTO MEASURE μέσω του λογισμικού.

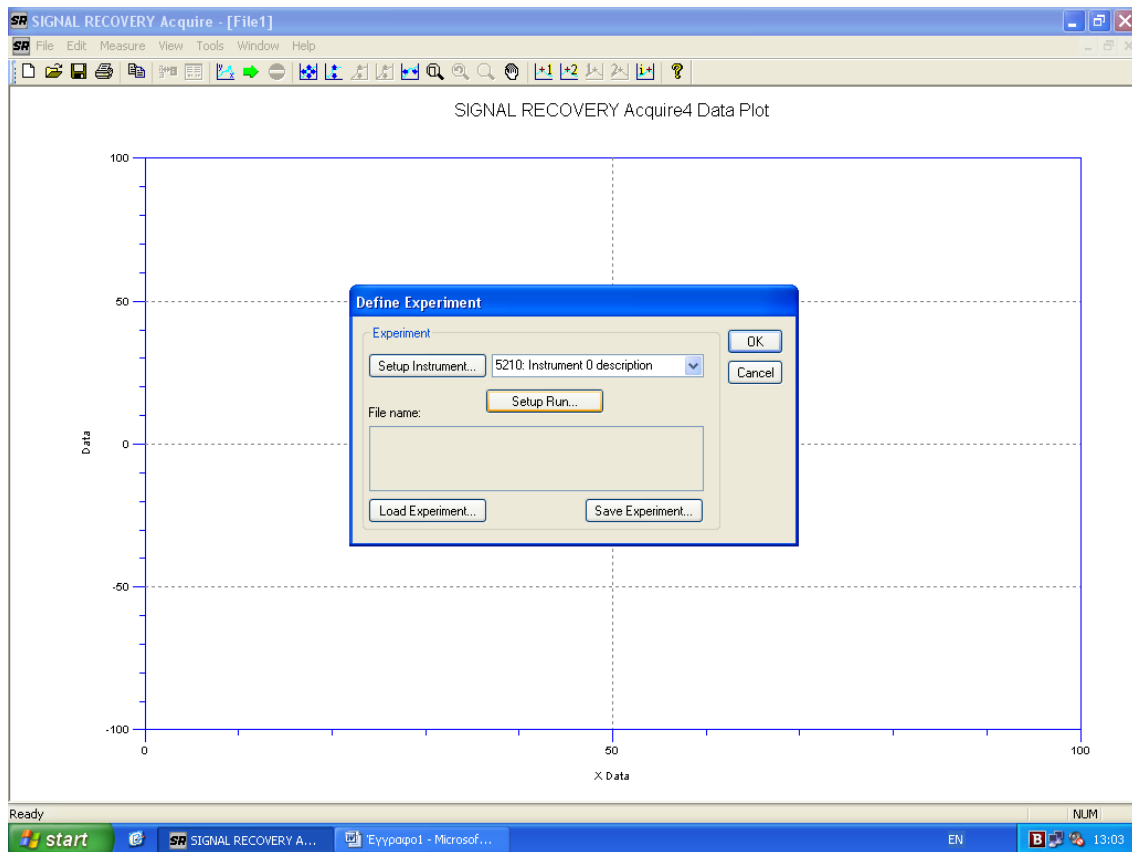


**Εικόνα 7**

Επίσης, στην περίπτωση που έχουμε συνδέσει κάποια συσκευή στις εξόδους CH1,CH2,CH3,CH4 του πίσω panel, μπορούμε να δούμε την τιμή της μετρούμενης τάσης εκείνη τη στιγμή.

## 6. Παράθυρα λήψης μετρήσεων

Για να κάνουμε καταμέτρηση, πατάμε επάνω στο **NEW BUTTON** (που έχει άσπρο χρώμα πάνω αριστερά στην οθόνη) ή επιλέγουμε **FILE NEW** και ανοίγει το παρακάτω παράθυρο (Εικ. 8):

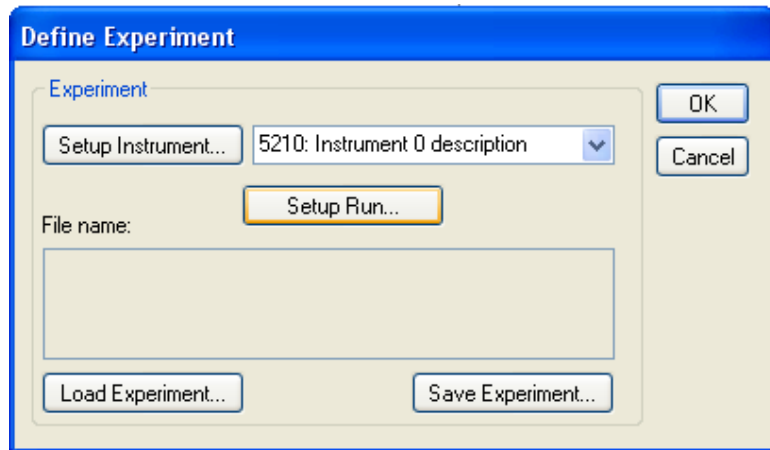


Εικόνα 8

### Setup Run

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε τη χρήση του λογισμικού και κάποιες προτεινόμενες επιλογές για τη σωστή χρήση του και καλύτερη κατανόησή του. Όσον αφορά τη χρήση του λογισμικού, μπορούμε να κάνουμε πολλές επιλογές και να δημιουργήσουμε διαφορετικά πειράματα, ανάλογα με τη στατιστική μελέτη που θέλουμε να κάνουμε.

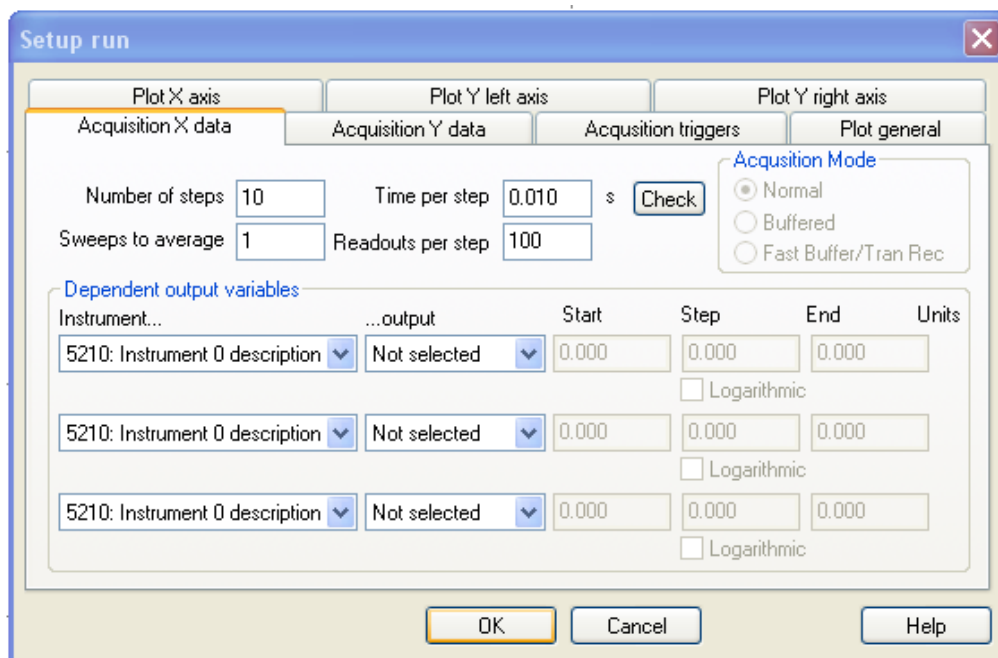
Αρχικά, πρέπει να επιλέξουμε **SETUP RUN** (Εικ. 9) στο παράθυρο διαλόγου **Define Experiment**. Σε αυτό το παράθυρο έχουμε την επιλογή να επιλέξουμε επίσης **Load Experiment**, από την οποία εισάγουμε τις ρυθμίσεις ενός παλιού πειράματος. Η επιλογή **Save Experiment** μας δίνει τη δυνατότητα να αποθηκεύσουμε τις δικές μας επιλογές που θα κάνουμε μέσω του **Setup Run**.



Εικόνα 9

### Acquisition X data

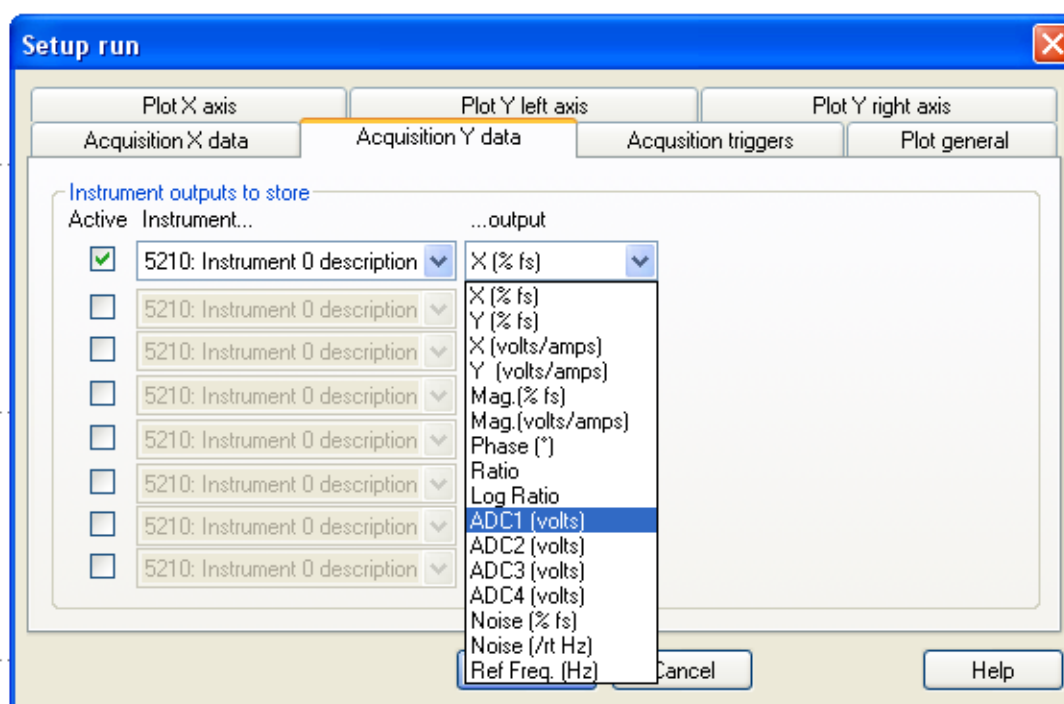
Στο παράθυρο (εικ.10) **Acquisition X data**, μια ιδανική μέτρηση είναι να ορίσουμε στο λογισμικό να πάρει 10 τιμές (10 **steps**) με 100 αναγνώσεις ανά τιμή (100 **readouts**) σε 1 σάρωση (1 **sweep**).



Εικόνα 10

## Acquisition Y data

Εδώ, (Εικ. 11) πρέπει να είναι επιλεγμένη η επιλογή **Active** και στην επιλογή **output** πρέπει να έχουμε επιλεγμένο **CH1** αντίστοιχα, αν έχουμε συνδέσει τη συσκευή μας στο CH1. Επίσης, μπορούμε να επιλέξουμε και περισσότερες από μια εξόδους ,στο CH2, CH3 και CH4, αναλόγως των περιφερειακών συσκευών που θέλουμε να δούμε.

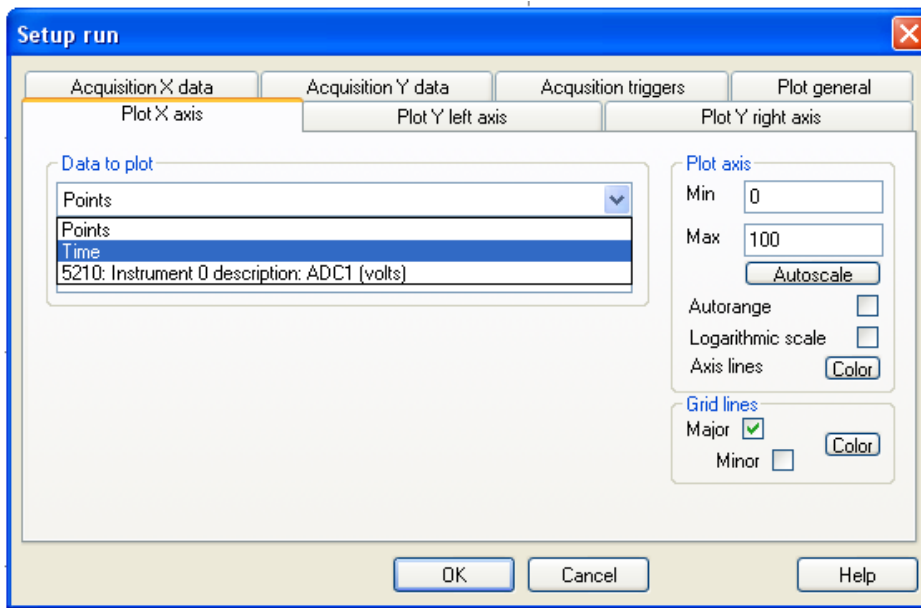


Εικόνα 11

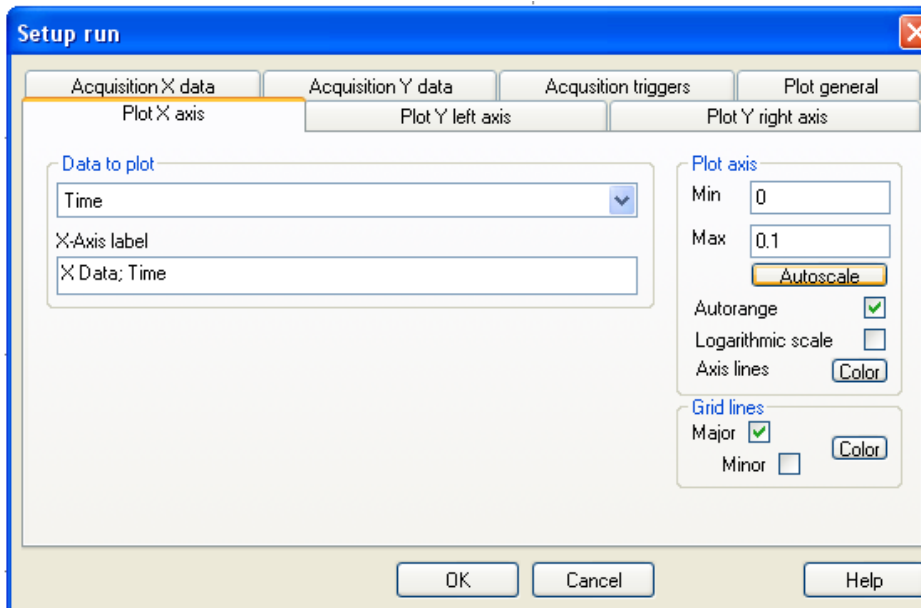
## Plot X axis

Εδώ, (Εικ. 12) πρέπει να ορίσουμε εμείς το **Min** και **Max** των τιμών του πειράματός μας, ώστε να είναι ορατές κατά την καταμέτρησή τους. Επίσης, στον άξονα X μπορούμε να επιλέξουμε **Time** αντί για Points(εικ.13).



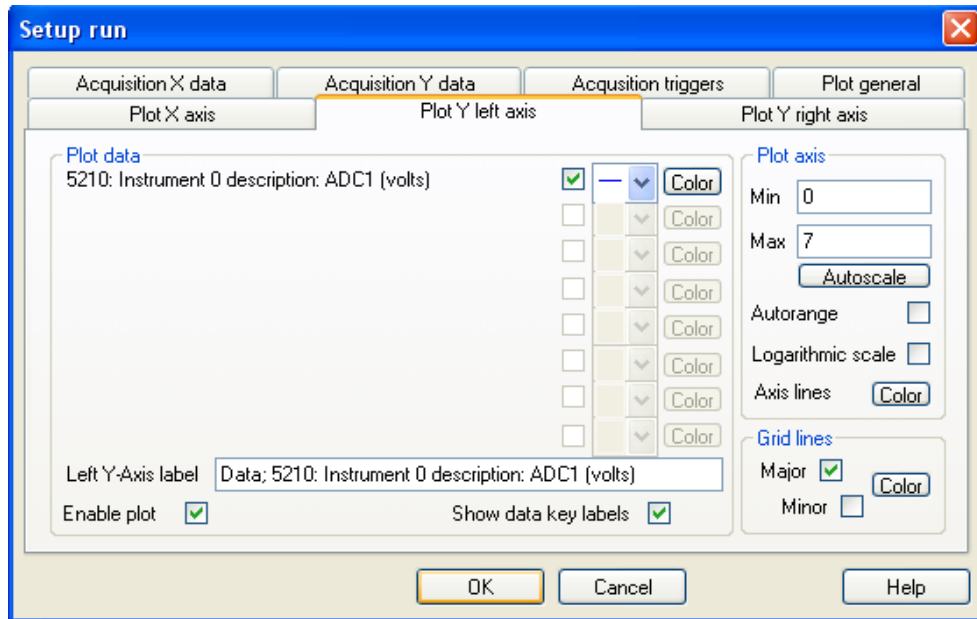


Εικόνα 12



Εικόνα 13

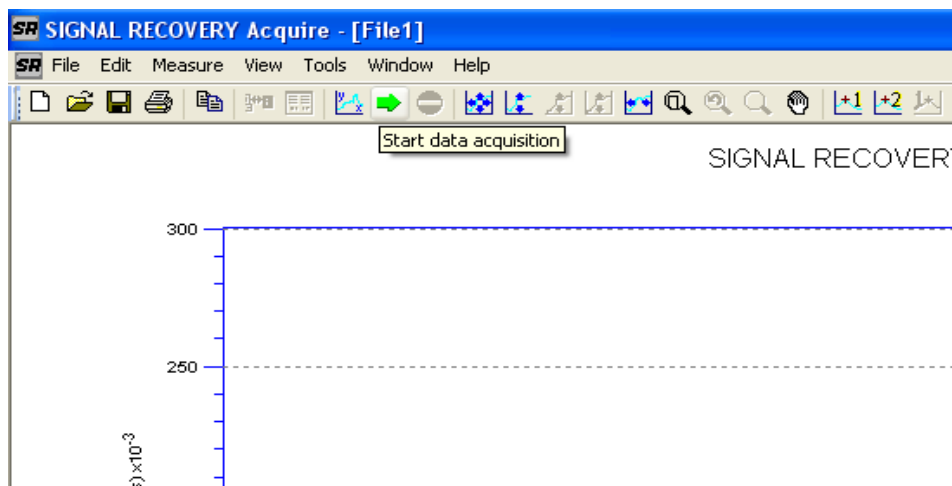
## Plot Y left axis



Εικόνα 14

Στο παράθυρο αυτό (εικ.14) πρέπει να είναι επιλεγμένος ο άξονας, όπως φαίνεται στην εικόνα, και μπορούμε να επιλέξουμε διάφορα σχήματα και χρώματα, που θα συμβολίζουν τα σημεία του διαγράμματος. Πολύ σημαντικό είναι να έχουμε κάνει την επιλογή **Enable plot**, αλλιώς δε θα φαίνεται τίποτα στο διάγραμμα.

Αφού κάνουμε τις παραπάνω επιλογές, μπορούμε να ξεκινήσουμε το πείραμά μας πατώντας **ok** και στη συνέχεια **Start data acquisition** (Εικ. 15)

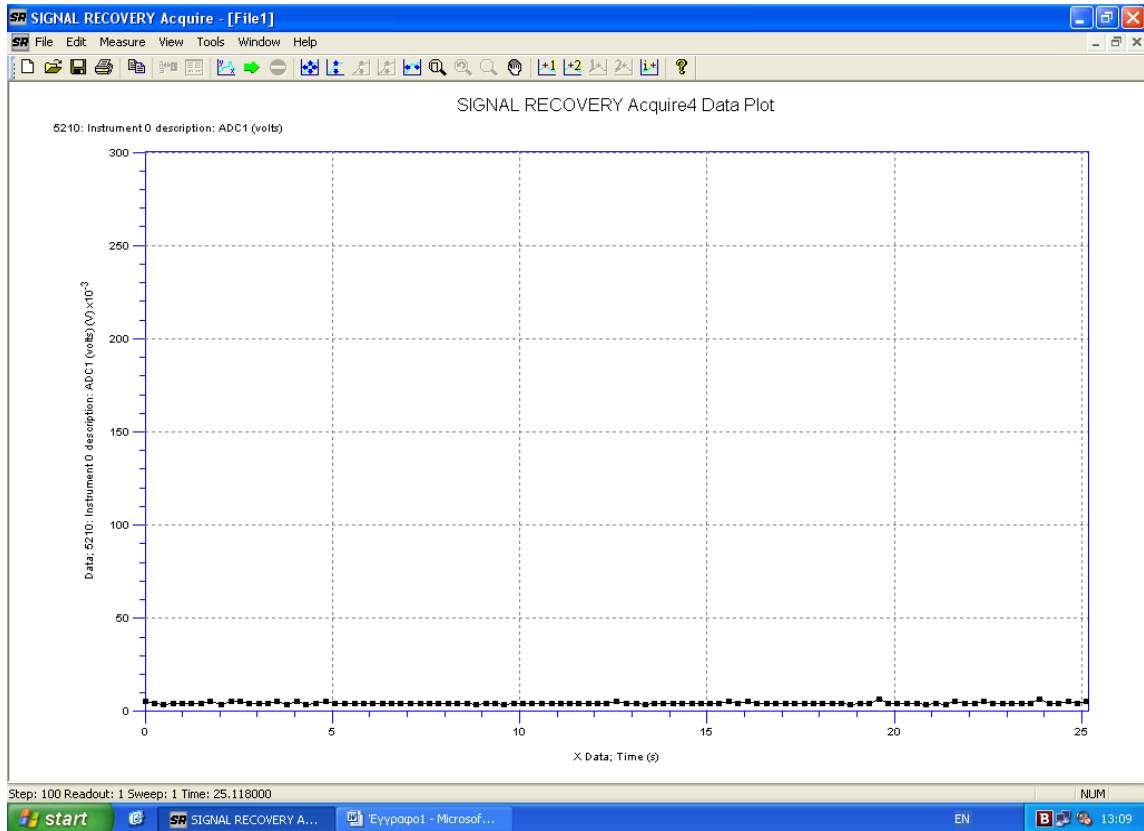


Εικόνα 15

Δηλαδή επάνω στο πράσινο βέλος:



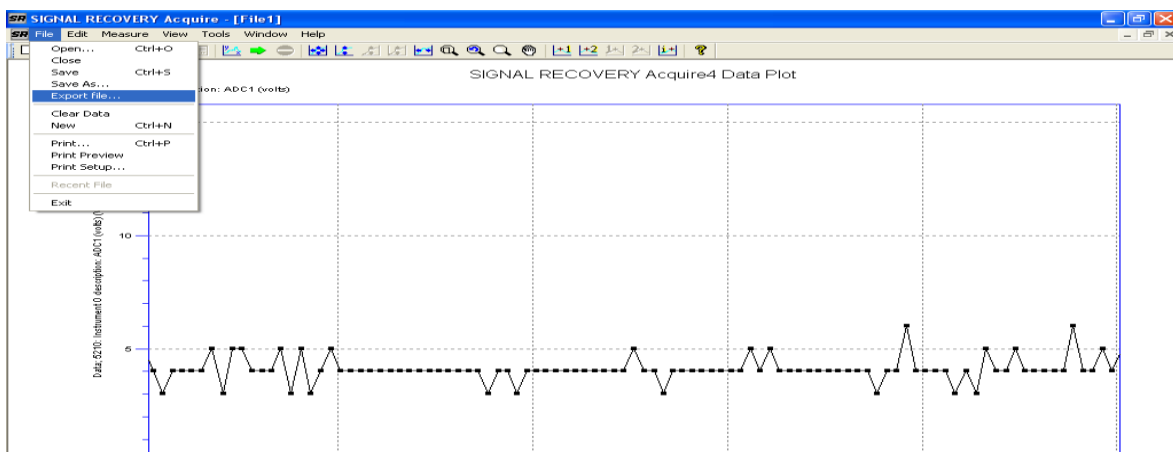
Εικόνα 16



Εικόνα 17

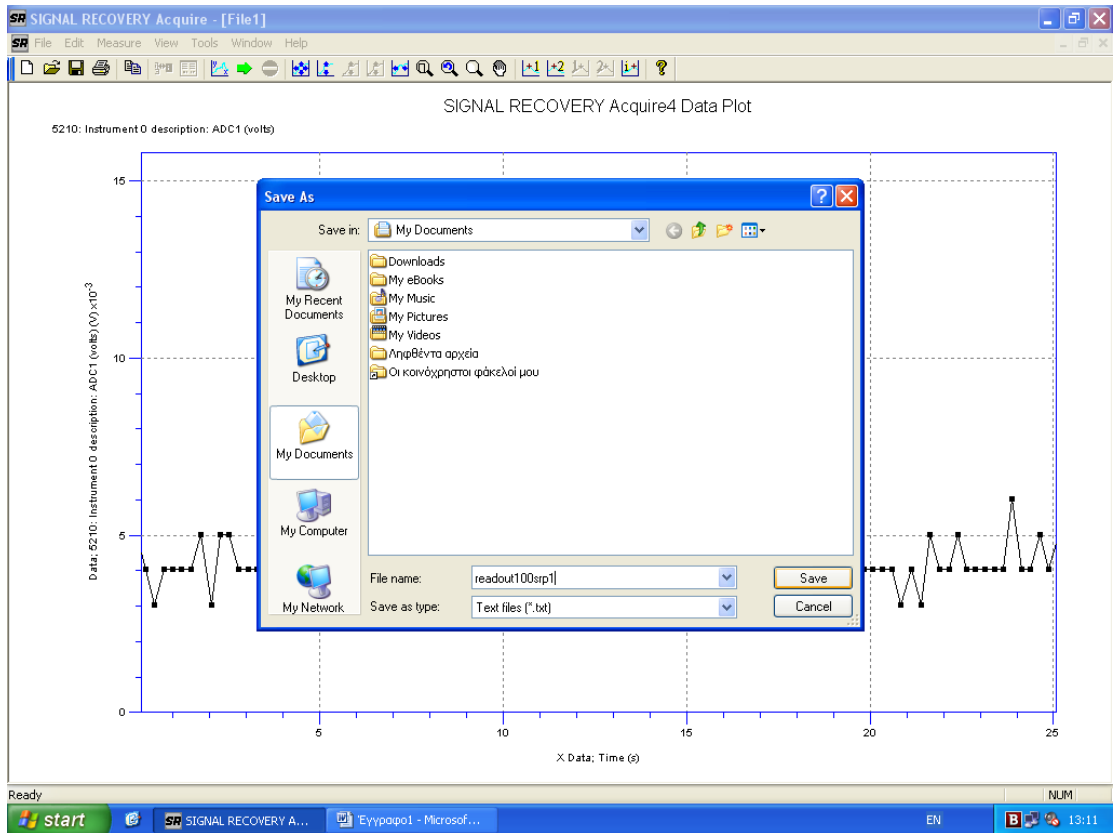
Έτσι μπορούμε να παρακολουθήσουμε το πείραμά μας, μέσω του υπολογιστή που καταγράφει τις μετρήσεις μας σε ένα διάγραμμα (Εικ.17)

Αν θέλουμε να μεγεθύνουμε την περιοχή καταμέτρησης, κάνουμε κλικ επάνω στον μεγεθυντικό φακό τον και στη συνέχεια επιλέγουμε την περιοχή που είναι συγκεντρωμένες οι περισσότερες μετρήσεις (Εικ.18).



Εικόνα 18

Τέλος, (Εικ. 19) μπορούμε να αποθηκεύσουμε τις μετρήσεις μας σε αρχείο txt από το μενού: FILE->EXPORT FILE -> Save as type TXT(Εικόνα 17)->SAVE, αφού ορίσουμε ένα όνομα αρχείου (File name) σχετικό με τις μετρήσεις μας π.χ. stps10readout100 (Εικ. 20).



Εικόνα 19

## 7. Πραγματοποίηση μετρήσεων και δοκιμών

Σε κάθε βήμα να μη ξεχνάτε να κάνετε lock in μέσω της λειτουργίας AUTO->MEASURE.

1) Αρχικά μετρήστε τις τάσεις εξόδου των δύο αισθητήρων ροής μάζας μέσω βολτομέτρου καθώς και το διαφορικό σήμα.

2) Εφαρμόστε τις εξόδους των e-choppers στον παλμογράφο και καταγράψτε τις κυματομορφές.

3) Καταγράψτε την τιμή του διαφορικού σήματος απευθείας στον ψηφιακό βολτόμετρο της KEITHLEY και προσέξτε τη θέση του ψηφίου που μεταβάλλεται.

4) Καταγράψτε την τιμή του σήματος εξόδου στον LIA, αντί για απευθείας καταμέτρηση του σήματος στο ψηφιακό βολτόμετρο με τον εξής τρόπο: Συνδέστε το τετραγωνικό σήμα που προκύπτει από τα e-choppers στην είσοδο A και B του LIA και καταγράψτε την τιμή του σήματος εξόδου και την θέση του ψηφίου που μεταβάλλεται στο βολτόμετρο της KEITHLEY, μέσω ενός καλωδίου που να συνδέει την έξοδο OUTPUT-> CH2 με το βολτόμετρο KEITHLEY.

5) Αντί να χρησιμοποιήσετε το βολτόμετρο, να καταγράψετε το σήμα αποκλειστικά από το LIA με τον εξής τρόπο: Μέσω ενός ομοαξονικού καλωδίου συνδέστε την έξοδο OUTPUT-> CH2 του LIA με την είσοδο CH1 στο πίσω PANEL του LIA και στη συνέχεια αξιοποιήστε το λογισμικό της SIGNAL RECOVERY (SR) που διαθέτει ο ηλεκτρονικός υπολογιστής για να δείτε απευθείας την μετρούμενη τιμή, σύμφωνα με τις οδηγίες που σας έχουν δοθεί.

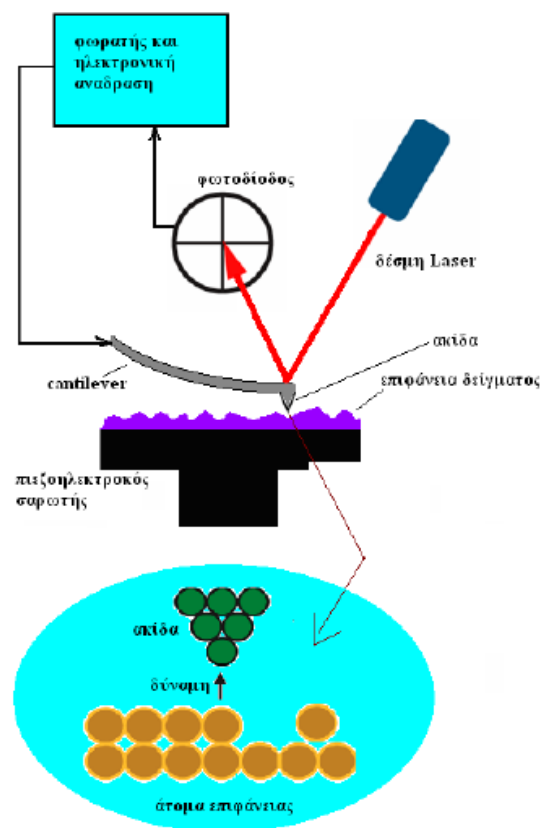
6) Να λάβετε αντίστοιχο αριθμό μετρήσεων για διαρροή χρησιμοποιώντας τη βελόνα τύπου 32G. Παρατηρείτε κάποια αύξηση στη μέση τιμή της πίεσης σε σύγκριση με τη αντίστοιχη του υποβάθρου; Πόση είναι η διαφορά της πίεσης που παρατηρείτε;

7) Συνεχίστε τις μετρήσεις σας μειώνοντας σταδιακά την πίεση με σκοπό να γίνει πιο ασθενικό το σήμα μας για να μελετήσουμε τον τρόπο ενίσχυσης του LIA. Παρατηρήστε την καταγραφή του διαφορικού σήματος μέσω LIA. Πόσος είναι ο τελικός λόγος σήματος προς θόρυβο (S/N) που καταφέραμε να επιτύχουμε;

## Παράρτημα Β

### Το μικροσκόπιο ατομικής δύναμης (atomic force microscope AFM)

Το μικροσκόπιο ατομικής δάρωσης (AFM) αναπτύχθηκε από τον Binnig 1986 (34) και ανήκει στην κατηγορία των μικροσκοπιών κοντινού πεδίου ή σαρωτικής ανίχνευσης. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία [31] το μικροσκόπιο AFM είναι ένα μικροσκόπιο υπέρ υψηλής ανάλυσης με διακριτική ικανότητα σε επίπεδα nm με μεγεθυντική ικανότητα μεγαλύτερη από  $10^6$ . Βασίζεται στη λειτουργία μέτρησης της αλληλεπίδρασης μιας μοριακής ακίδας με την υπό παρατηρούμενη επιφάνεια και μας δίνει τη δυνατότητα μελέτης μοριακών δομών και του τρόπου διαμόρφωσης της ύλης σε νανομετρική κλίμακα. Για αυτό σήμερα έχει καθιερωθεί ως το βασικό εργαλείο για απεικόνιση και μετρήσεις σε επίπεδα nm. Επιτρέπει την παρατήρηση δειγμάτων σε αέρα, ελεγχόμενη ατμόσφαιρα και υγρό. Έχει την δυνατότητα παρατήρησης χωρίς προετοιμασία ενός δείγματος γεγονός που καθιστά την παρατήρηση ακόμη και ενός βιολογικού δείγματος κοντά στη φυσική του κατάσταση.



0-1: Διάγραμμα Block του AFM

Αναλυτικότερα, το AFM αποτελείται από μια μικρής κλίμακας κυρτής δοκού (cantilever) που στο ένα άκρο της έχει διαμορφωθεί μια πολύ αιχμηρή ακίδα (probe) που χρησιμοποιείται για την σάρωση της υπό εξέταση επιφάνειας. Το cantilever είναι κατασκευασμένο συνήθως από πυρίτιο ή νιτρίδιο του πυριτίου και η ακίδα έχει μια ακτίνα καμπυλότητας της τάξεως των nm. Όταν η ακίδα φθάσει πλησίον της επιφάνειας τότε λόγω των δυνάμεων μεταξύ της επιφάνειας και της ακίδας προκαλείται μια παραμόρφωση στο cantilever ύμφωνα με τον νόμο του Hooke.[43], [44]. Ανάλογα με την θέση τοποθέτησης της ακίδας στην υπό εξέταση επιφάνεια οι δυνάμεις που μετρά το AFM αυτές μπορεί να είναι δυνάμεις μηχανικής επαφής, δυνάμεις Van der Waals, δυνάμεις συνάφειας, ηλεκτροστατικές δυνάμεις, μαγνητικές δυνάμεις, κλπ. Στο σχήμα 6-1 παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας του AFM.



0-2: Σύστημα απεικόνισης AFM. Αποτελείται από το AFM, το ηλεκτρονικό σύστημα έλεγχου και το υπολογιστή που διαθέτει λογισμικό απεικόνισης της ακίδας. [17]

Η παραμόρφωση στο cantilever μετρείται με τη χρήση ενός laser, που η φωτεινή δέσμη προσπίπτει και ανακλάται στην περιοχή της ακίδας του cantilever και στη συνέχεια ανιχνεύεται μετά την ανάκλαση της, από μια σειρά φωτοδιόδων. Ανάλογα με την παραμόρφωση που υφίσταται το cantilever η δέσμη laser προσπίπτει σε διαφορετική κάθε φορά θέση του φωτοανιχνευτή. Η καταγραφή του επαγόμενου φωτορεύματος με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή δίνει την τοπογραφία τις επιφάνειας του δείγματος. Επίσης, ένας μηχανισμός ανάδρασης λειτουργεί έτσι ώστε να προσαρμόζει την απόσταση ακίδας – επιφάνειας, ώστε να υφίσταται μεταξύ τους μια σταθερή δύναμη. Έτσι το υπό εξέταση δείγμα είναι τοποθετημένο σ' ένα πιεζοηλεκτρικό σωλήνα ο οποίος μετακινούμενος μετακινεί το δείγμα στην

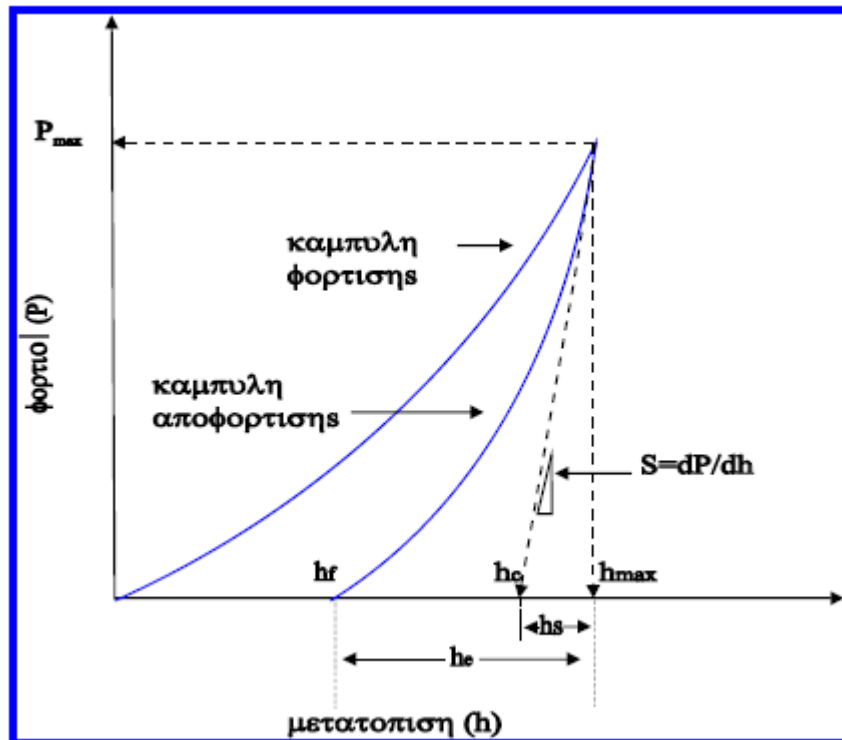
κατακόρυφη διεύθυνση  $z$  ώστε να εξασφαλίζεται η διατήρηση της σταθερής δύναμης και ταυτόχρονα να σαρώνεται η επιφάνεια του δείγματος στις διευθύνσεις  $x$  και  $y$ . Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιείται ένα τρίποδο που συνδυάζει τρεις πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων που ο καθένας έχει ρόλο να προκαλεί την μετατόπιση έτσι ώστε να επιτυγχάνεται σάρωση  $x$ ,  $y$  και  $z$  κατευθύνσεις. Με μια τέτοια διάταξη αποφεύγονται φαινόμενα που προκαλούν στρεβλώσεις στην τελική εικόνα τελικά η απεικόνιση δίνει ένα χάρτη της επιφάνειας  $z = f(x,y)$  που αντιπροσωπεύει την τοπογραφία του δείγματος.

Τα πλεονεκτήματα του AFM είναι τα εξής: Το AFM παρέχει μια πραγματική τρισδιάστατη επιφάνεια του προφίλ. Επιπλέον, τα χρησιμοποιούμενα δείγματα στην μικροσκοπία AFM, δεν απαιτούν ειδικές επεξεργασίες όπως επιχρίσματα που προκαλούν μια ανεπίστρεπτη αλλαγή ή και ζημιά στο δείγμα. Επίσης Τα AFM μπορούν να αποδώσουν μια πραγματική εικόνα με ευκρίνεια ατομικής κλίμακας ιδιαίτερα αν χρησιμοποιείται υπέρ υψηλό κενό (ultra-high vacuum - UHV). Το AFM είναι σε θέση να αποδώσει εικόνες με μέγιστο ύψος της τάξης του  $1\mu\text{m}$  και να καλύψει (σαρώσει) μια επιφάνεια  $150\mu\text{m} \times 150\mu\text{m}$ . Επίσης η τεχνική απεικόνισης μέσω AFM, απαιτεί την επιλογή της κατάλληλης ακίδας και αν γίνει λάθος επιλογή υπάρχουν σοβαρά προβλήματα. η μικροσκοπία AFM έχει το πλεονέκτημα της απεικόνισης σχεδόν κάθε είδους επιφάνεια, συμπεριλαμβανομένου πολυμερή, κεραμικά, σύνθετα υλικά, γυαλί, και βιολογικά δείγματα. Σήμερα η μικροσκοπία AFM χρησιμοποιείται από ευρύ φάσμα επιστημών και κυρίως την επιστήμη των υλικών, τη φυσική και τη βιολογία. Χρησιμοποιείται για την απεικόνιση και το χαρακτηρισμό επιφανειών με διακριτική ικανότητα που φτάνει το  $0,1\text{nm}$  αλλά και για τη μελέτη μηχανικών ιδιοτήτων διαφόρων υλικών, όπως μονωτών, ημιαγωγών και ηλεκτρικά αγώγιμων υλικών.

## **2.2 Μέτρο ελαστικότητας, καθορισμός της επιφάνειας επαφής ακίδας-δείγματος**

Κατά την εκτέλεση ενός πειράματος σκληρομέτρησης λαμβάνονται καμπύλες φόρτισης – αποφόρτισης  $P$  συναρτήσει του βάθους διείσδυσης  $h$  της ακίδας του εγχάρκτη στο δείγμα. Από τη κλίση της καμπύλης του διαγράμματος προκύπτει η ακαμψία  $s$  (Stiffness) των δειγμάτων.





0-3: Καμπύλη φόρτισης αποφόρτισης

Στις καμπύλες φόρτισης- αποφόρτισης διακρίνονται τα ακόλουθα κρίσιμα μεγέθη:

$h_{max}$ : Μέγιστο βάθος διείσδυσης

$P_{max}$ : Μέγιστο εφαρμοζόμενο φορτίο

$h_f$ : Τελικό παραμένον βάθος διείσδυσης μετά την αποφόρτιση

$h_e$ : Βάθος επαφής υλικού και ακίδας εγχάραξης μετά την αποφόρτιση

$h_e$ : Ελαστική μετατόπιση της επιφάνειας του δείγματος μετά την αποφόρτιση

$h_s$ : Ελαστική μετατόπιση της επιφάνειας του δείγματος δίχως επαφή με την ακίδα.

Η ποσότητα Stiffness:

$$S = \frac{dP}{dh}$$

Επίσης ισχύει:

$$S = \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}}\right)\sqrt{A} * Er$$

όπου  $S$  η ακαμψία (Stiffness),  $A$  η επιφάνεια επαφής, για  $A=f(h_c)$  και  $h_c$  το βάθος επαφής. Η σχέση αυτή προέκυψε από θεώρηση κυλινδρικής ακίδας και εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που το αρχικό τμήμα της αποφόρτισης είναι γραμμικό. Το βάθος επαφής καθορίζεται από την εξής σχέση:

$$h_c = h_{max} - h_s$$

Η ελαστική μετατόπιση το δείγματος προκύπτει από τις σχέσεις:

$$h_s = \frac{\pi - 2}{\pi} (H_{max} - h_f)$$

$$2\varepsilon = \frac{\pi - 2}{\pi}$$

$$h_{max} - h_f = \frac{2P}{S}$$

$$\text{Οπότε: } h_c = h_{max} - \varepsilon \frac{P_{max}}{S}$$

Όπου  $\varepsilon$  ο συντελεστής εξαρτώμενος από την γεωμετρία της ακίδας. Από τη σχέση  $h_c = h_{max} - \varepsilon \frac{P_{max}}{S}$ , είναι δυνατός ο υπολογισμός της επιφάνειας επαφής  $A$  και του μέτρου ελαστικότητας  $E_r$ . Το μέτρο της ελαστικότητας ενός δείγματος δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1 - \nu^2}{E} + \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}$$

Όπου  $\nu$  και  $\nu_i$  είναι ο λόγος του Poisson για το δείγμα και την ακίδα αντίστοιχα. Το μέτρο της ελαστικότητας  $E$  του δείγματος αντιστοιχεί στην ελαστικότητα του δείγματος λεπτό υμένιο - υπόστρωμα.

# Βιβλιογραφία

<https://atlas.cern>.

[1]

Κωσταντίνος Ντέκας, "Μελέτη ανιχνευτή MicroMeGas σε δοκιμαστική δέσμη πιονίων ορμής 120 GeV/c στο H6/SPS/CERN," 2012.

I. Γιοματάρης και G. Charpak, "G. Charpak, J. Derr, Y. Giomataris, and Ph. Rebourgeard. Micromegas, a multipurpose gaseous detector. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 478(1-2):26 -- 36, 20,".

Ph. Rebourgeard, J. P. Robert, and G. Charpak Y. Giomataris, *Micromegas: a high- granularity position-sensitive gaseous detector for high particle-flux environments. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectro.*

Y. Giomataris, *Development and prospects of the new gaseous detector micromegas. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 419(2-3):239 -- 250, 1998.*

J. Derr, A. Giganon, Y. Giomataris, D. Jourde, C. Kochowski, S. Loucatos, G. Puill, Ph. Rebourgeard, and J. P. Robert. G. Charpak, *First beam test results with micromegas, a high-rate, high-resolution detector. Nuclear Instruments and Methods in Physi.*

*ATLAS New Small Wheel. Technical Design Report. CERN-LHCC-2013-006,*  
[7] *ATLAS-TDR-20-2013, June 2013.*

*Thin Gap Chamber upgrade for SLHC: Position resolution in a test beam. V.*  
[8] *Smakhtin , G. Mikenberg, A. Klier, Y. Rozen, E. Duchovni, E. Kajamovitz, A. Hershenhorn.*

<https://indico.in2p3.fr/event/10020/session/15/material/0/0.pdf>.

[9]

J Wotschack, *Development of micromegas muon chambers for the atlas upgrade.*  
[10] *Journal of Instrumentation, 7(02):C02021, 2012.*

Zhong Yuan Chang and Willy M. C. Sansen, *Low-noise wide-band amplifiers in bipolar and CMOS technologies, Kluwer Publications, February 2002,*

[11] ISBN:0792390962.

C. D. Motchenbacher and J. A. Connelly, *Low-noise electronic system design*,

[12] *Wiley-Interscience Publications, New York, 1998.*

Lesniewska E, Giocondi MC, Vie V, et al. 1998. *Atomic force microscopy of renal*

[13] *cells: limits and prospects. Kidney Int. Suppl. 53 (Suppl. 65): S42-S8.*

M. G. Hamblin and G.W. Stachowiak, *Measurement of Fractal Surface Profiles*

[14] *Obtained from Scanning Electron and Laser Scanning Microscope images and contact profile meter, journal of computer assisted microscopy, vol 6.No. 4 1994, pp. 181-194.*

Stachowiak and Podsiadlo, *Surface Characterization of Wear Particles, Wear,*

[15] *Vol. 225-229, 1999, pp. 1171-1185.*

Tsolaki Naoum, *Μη συμβατικός χαρακτήρισμός τοπογραφίας κατεργασμένων*

[16] *επιφανειών.*

[http://thesis.ekt.gr/thesisBookReader/id/15767#page/1/mode/2up.](http://thesis.ekt.gr/thesisBookReader/id/15767#page/1/mode/2up)

[17]

HUGH D. YOUNG, *ΦΥΣΙΚΗ*. Αθήνα: Παπαζήση, 1994.

[18]

Raymond A. Serway- Glement J. Moset-Curt A. Moyer, *Σύγχρονη ΦΥΣΙΚΗ.:*

[19] *ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΚΡΗΤΗΣ.*

*ATLAS Collaboration, ATLAS New Small Wheel Technical Design Report*}, in the

[20] *framework of ATLAS Phase I Upgrade, CERN-LHCC-2013-006, ATLAS– TDR-20-2013.*

E. Gazis, S. Maltezos T. Alexopoulos, *Investigation of Gas Leak Test Methods for*

[21] *the NSW Micromegas Multiplet's Mass Production, Internal ATLAS Communication Note, ATL-COM-MUON-2015-054.*

E. Gazis, S. Maltezos T. Alexopoulos, *Gas Leak Test Prototype Setup for the*

[22] *NSW Micromegas Multiplets: Implementation and Calibration Technique, Internal ATLAS Communication Note, ATL-COM-MUON-2015-094.*

T. Alexopoulos, *“Introduction to Signal Analysis”*, page 671.

[23]

] R. J. Higgins, *Electronics with Digital and Analog Integrated Circuits, Prentice-*

[24] *Hall, INC. (1983).*

*P. Horowitz and W. Hill, The Art of Electronics, 2nd Edition, Cambridge*

[25] *University Press (1989).*

*J. F. Keitley, Low Level Measurements, 5th Edition, J. Yeager and M. A.*

[26] *Hrusch-Tupta, Keithley Instruments, Inc., U.S.A. (1998).*

*C. G. Enke H.V. Malmstadt, Digital Electronics for Scientists, W. A. Benjamin,*

[27] *Inc., New York (1969).*

*C. G. Enke, S. R. Crouch, G. Horlick H.V. Malmstadt, Electronic Measurements*

[28] *for Scientists, W. A. Benjamin, Inc., New York (1974).*

*SIGNAL RECOVERY, What is a Lock-in Amplifier ?, Technical Note TN 1000.*

[29]

*SIGNAL RECOVERY, Specifying Lock-in Amplifiers, Technical Note TN 1001.*

[30]

*AMETEK, Signal Recovery, Dual Phase Lock-in Amplifier, Instruction Manual,*

[31] *2002.*

*B.N.J. Persson and C. Yang, "Theory of the leak-rate of seals", arXiv:0805.0699,*

[32] *2008.*

*Yang and B N J Persson, "Contact mechanics: contact area and interfacial*

[33] *separation from small contact to full contact", J. Phys.: Condens. Matter 20 (2008).*

*D. Stauffer and A. Aharony, "An Introduction to Percolation Theory", CRC Press*

[34] *(1991).*

*C. Yang, U. Tartaglino and B.N.J. Persson, Eur. Phys. J E19, 47 (2006).*

[35]

*K. L. Johnson, "Contact Mechanics", Cambridge University Press (1985).*

[36]

*B. N. J. Persson et al., "On the nature of surface roughness with application to*

[37] *contact mechanics, sealing, rubber friction and adhesion", TOPICAL REVIEW, J.*

*Phys.: Condens. Matter 17 (2005) R1-R62.*

*Church E. L., Takacs R. Z., "Surface Scattering, in Handbook of Optics", 2nd ed,*

[38] *Section 7, Vol. I, Fundamentals, Techniques and Design, McGraw Hill, New York,*

*1995.*

*B. Lorenz, "Contact Mechanics and Friction of Elastic Solids on Hard and*

[39] *Rough Substrates", Ph.D Dissertation, Technischen Hochschule Aachen (2012).*

R. Gavrilă, A. Dinescu, D. Mardare, "A Power Spectral Density Study of Thin  
[40] Films Morphology Based on AFM Profiling", *Romanian Journal of Information Science and Technology*, Volume 10, Number 3, 2007.

B. Lorenz and B.N.J. Persson, "Leak-rate of seals: comparison of theory with  
[41] experiment", *arXiv:0904.2988v1*, 2009.

<http://www.physics.ntua.gr/~micronano/ERG%20TEXNIKES/AFM%20SHMEI>  
[42] OSEIS-SEMFE.pdf.

Kasas S, Gotzos V, Celio MR. 1993. Observation of living cells using the atomic  
[43] force microscope. *Biophys. J.* 64: 539-44.

A. Majumdar and B. Bhushan, *Role of Fractal Geometry in Roughness*  
[44] *Characterization and Simulation of Rough Surfaces*, *Wear*, Vol. 136, 1990, pp. 313-127.

AMETEK, *\emph*  
[45]

B.N.J. Persson, O. Albohr, C. Creton and V. Peveri, *J.Chem. Phys.* 120, 8779  
[46] (2004).

Binnig G, Quate CF, Gerber V. 1986. Atomic force microscope. *Phys. Rev. Lett.*  
[47] 56: 930-3.