



**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΡΕΘΥΜΝΟΥ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ**

## **ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Ανάπτυξη εκπαιδευτικών ασκήσεων κυμάτων και δονήσεων**



**Κωνσταντίνος Σταυγιανουδάκης, Α.Μ:663**  
**Επιβλέπων Καθηγητής: Νεκτάριος Παπαδογιάννης**

## Περίληψη - σκοπός πτυχιακής

Η συγκεκριμένη πτυχιακή εξ αρχής είχε δύο στόχους, ο πρώτος ήταν η μελέτη δύο φαινομένων μέσω δύο πειραματικών διατάξεων, μία που αφορούσε το φαινόμενο Doppler και μία για τα διαγράμματα του Chladni, για αυτό το σκοπό έγινε μια πρώτη μελέτη της θεωρίας που περικλείει τα φαινόμενα, έπειτα ο υπολογισμός κάποιων θεωρητικών τιμών και στη συνέχεια έγιναν οι πειραματικές μετρήσεις.

Ο δεύτερος στόχος της πτυχιακής ήταν να έχει εκπαιδευτικό χαρακτήρα. Τα εν λόγω πειράματα προορίζονται να εξεταστούν άλλα και να εκτελεστούν από νέους φοιτητές του τμήματος κατά τις εργαστηριακές ώρες του μαθήματος της φυσικής κυματικής, το οποίο διδάσκεται κατά το πρώτο εξάμηνο φοίτησης βάση του οδηγού σπουδών. Για αυτόν τον λόγο υπάρχουν πολλές εικόνες, οδηγίες για την εκτέλεση του πειράματος βήμα προς βήμα, καθώς και τα κείμενα είναι όσο το δυνατόν φιλικότερα και ευκόλως κατανοητά για τον αναγνώστη – σπουδαστή. Το κυριότερο στοιχείο που αναδεικνύει τον εκπαιδευτικό χαρακτήρα της πτυχιακής είναι η δημιουργία καθοδηγητικού video clip για την εκτέλεση του πειράματος γύρω από φαινόμενο Doppler.

## Ευχαριστίες

ευχαριστώ θερμά τον επιβλέπων καθηγητή μου κ. Νεκτάριο Παπαδογιάννη για τη βοήθεια και υποστήριξη του κατά τη διάρκεια της εργασίας.

## Περιεχόμενα

### **Κεφάλαιο 1: Θεωρητική εισαγωγή**

1.1 Τι είναι ο ήχος.....	5
1.2 Βιογραφία Κρίστιαν Ντόπλερ.....	7
1.3 Η σκέψη και η εξίσωση.....	7
1.4 Ανάλυση της εξίσωσης.....	9
1.4.1 Πηγή ακίνητη - παρατηρητής κινούμενος.....	9
1.4.2 Πηγή κινούμενη – ακίνητος παρατηρητής.....	11
1.4.3 Κινούμενη πηγή κινούμενος παρατηρητής.....	13
1.4.4 Μη συνευθειακές κινήσεις.....	13

### **Κεφάλαιο 2: Πειραματικές μετρήσεις και ανάλυση**

2.1 Πειραματική διάταξη.....	14
2.2 Βασικά μέρη πειραματικής διάταξης.....	15
2.2.1 Συνδεσμολογία.....	19
2.3 Πειραματικές μετρήσεις και ανάλυση.....	20
2.3.1 Παρατηρήσεις.....	22

### **Κεφάλαιο 3 :Εκπαιδευτική εργασία.....25**

### **Κεφάλαιο 4:Εκπαιδευτικό - Video**

4.1 Σκοπός παραγωγής του video clip.....	31
4.2 Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε (software – hardware).....	31
4.3 Pre production – Production – Post production και Σπικάζ / voice over.....	32

**Κεφάλαιο 5: Διαγράμματα Chladni**

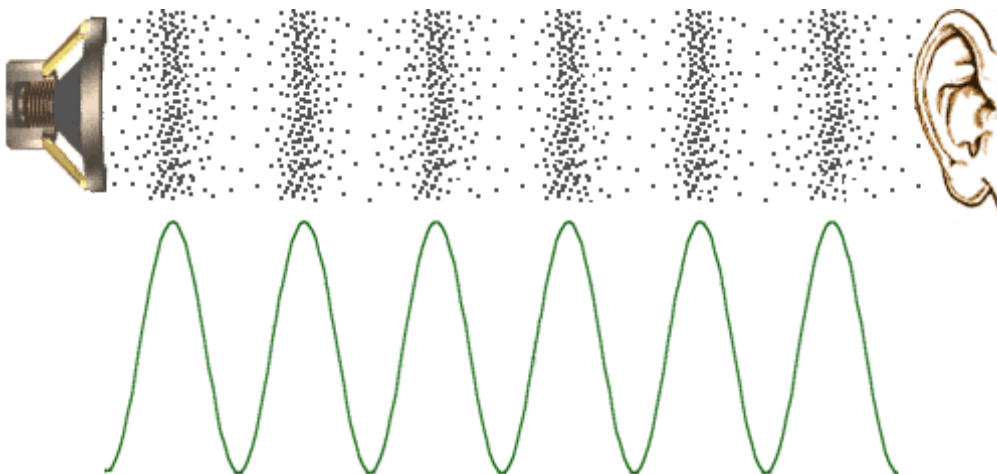
5.1 Ernst Chladni.....	34
5.2 Διαγράμματα Chladni.....	35
5.3 Πείραμα.....	37
5.3.1 Στόχος πειράματος.....	37
5.3.2 Εξοπλισμός – Εκτέλεση.....	38
5.3.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα.....	41
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>44</b>

## Κεφάλαιο 1 - Θεωρητική εισαγωγή

---

### 1.1 Τι είναι ήχος

Αυτό που εμείς οι άνθρωποι αντιλαμβανόμαστε ως «ήχο» είναι ουσιαστικά οι μεταβολές της πίεσης του αέρα, ικανότητα την οποία κατέχει το είδος μας φυσιολογικά όπως και άλλα είδη του πλανήτη μας, ώστε να αλληλεπιδρούμε καλύτερα με το περιβάλλον μας. Οι ήχοι τους οποίους ακούμε καθημερινά είναι συνήθως πολύπλοκοι γιατί αποτελούνται από πολλές διαφορετικές συχνότητες. Ο πιο απλός τρόπος παραγωγής ενός ήχου μίας μόνο συχνότητας είναι το διαπασών. Η ταλάντωση των μεταλλικών στελεχών του οργάνου αυτού με σταθερή συχνότητα μεταφέρει την παλμική κίνηση στον αέρα με τη μορφή μεταβολής της πίεσης, δημιουργώντας ένα κύμα πίεσης. Το κύμα αυτό είναι διάμηκες και όχι εγκάρσιο, δηλαδή η ταλάντωση λαμβάνει χώρα παράλληλα στην διεύθυνση διάδοσης του κύματος και όχι κάθετα σε αυτή, όπως συμβαίνει για παράδειγμα με τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και το φως. Το κύμα αυτό διαδίδεται στον αέρα και σε κανονικές συνθήκες με ταχύτητα  $\sim 340$  m/s και μεταφέρει τις μεταβολές της πίεσης του αέρα. Απαραίτητη προϋπόθεση για να υπάρξουν μεταβολές στην πίεση είναι η ύπαρξη του αέρα, έτσι ο ήχος είναι αδύνατο να διαδοθεί στο κενό.



Εικόνα 1-1 : Οι μεταβολές στην πίεση του αέρα και η αντίστοιχη κοματομορφή

Σταδιακά ο άνθρωπος απέκτησε την ικανότητα να αντιλαμβάνεται τις μεταβολές αυτές της πίεσης και να αποκωδικοποιεί το περιεχόμενό τους, μέσω των αυτιών και του κεντρικού νευρικού συστήματος. Το σχήμα των αυτιών είναι εκπληκτικό: η τοποθέτηση του πτερυγίου επιτρέπει την διάκριση των ήχων που έρχονται από το μπροστινό μέρος που βρίσκεται ο άνθρωπος από αυτούς που έρχονται από πίσω, ενώ σε συνδυασμό με τον υπόλοιπο λοβό δημιουργείται ένας από τους καλύτερους ενισχυτές που υπάρχουν. Επίσης, ο ανθρώπινος εγκέφαλος έχει την ικανότητα να συγκρίνει την χρονική διαφορά με την οποία ένας ήχος φτάνει στο κάθε αυτί, οπότε και να συμπεράνει την απόσταση από την οποία προέρχεται. Αυτή ήταν μία από τις σημαντικότερες άμυνες του ανθρώπου απέναντι στους κυνηγούς του, γι' αυτό και από πολύ νωρίς εξελίχθηκαν δύο αυτιά και όχι μόνο ένα. Το ανθρώπινο αυτί μπορεί να αντιληφθεί ήχους από 20Hz περίπου μέχρι και 20kHz. Οι ήχοι υψηλότερων συχνοτήτων δεν γίνονται αντιληπτοί και ονομάζονται υπέρηχοι.

Η φωνητικές χορδές επιτελούν την ακριβώς αντίστροφη διαδικασία. Πάλλονται με πολύ συγκεκριμένο τρόπο κατά το πρότυπο του διαπασών ώστε να παραχθούν ανάλογοι ήχοι διαφορετικών συχνοτήτων, ώστε με την κατάλληλη εξάσκηση αποκτάται η ικανότητα της ομιλίας.



Κρίστιαν Ντόπλερ

**Εικόνα 1-2 :** *Κρίστιαν Αντρέας Ντόπλερ (Christian Andreas Doppler) ήταν ένας Αυστριακός μαθηματικός που γεννήθηκε στο Σάλτσμπουργκ της Αυστρίας 29 Νοεμβρίου του 1803 και πέθανε στις 17 Μαρτίου του 1853 στη Βενετία της Ιταλίας.*

## 1.2 Βιογραφία

Ο Ντόπλερ γεννήθηκε από οικογένεια οικοδόμων στο Σάλτσμπουργκ. Η ασθενής του υγεία δεν του επέτρεψε να ακολουθήσει το επάγγελμα των γονιών του όπως συνηθιζόταν και έτσι ασχολήθηκε με τις επιστήμες. Ξεκίνησε τις σπουδές του στα Μαθηματικά στο Πολυτεχνείο της Βιέννης το 1822. Μετά από αυτές τις σπουδές επέστρεψε στο Salzburg όπου παρακολούθησε μαθήματα Φιλοσοφίας στο Λύκειο του Salzburg. Ακολούθως στο Πανεπιστήμιο της Βιέννης σπούδασε Ανώτερα Μαθηματικά, Μηχανική και Αστρονομία. Κατά τη διάρκεια της ακαδημαϊκής του καριέρας δίδαξε μαθηματικά στο Πολυτεχνείο της Πράγας από το 1836 έως το 1844. Στην περίοδο που εργαζόταν στην Πράγα ως καθηγητής, εξέδωσε περισσότερα από 50 επιστημονικά άρθρα στα πεδία των μαθηματικών, της φυσικής και της αστρονομίας. Το 1840 κατάφερε να εκλεγεί μέλος της Βασιλικής Βοημικής Κοινότητας και το 1843 εξαιτίας της επίδρασης της εργασίας του εκλέχτηκε τακτικό μέλος. Το 1846 εφόσον η υγεία του το επέτρεψε ανέλαβε τη θέση του Καθηγητή Μαθηματικών, Φυσικής και Μηχανικής στην Ακαδημία Μετάλλων και Δασών στην πόλη Banska Stiavnica. Το 1847 εκλέχτηκε γραμματέας της Κοινότητας και το 1848 τακτικό μέλος της Αυτοκρατορικής Ακαδημίας των Επιστημών στη Βιέννη και ανακηρύχτηκε επίτιμος διδάκτορας στο Πανεπιστήμιο της Πράγας. Το απόγειο της καριέρας του το έφτασε το 1850 όταν διορίστηκε διευθυντής του νέου Ινστιτούτου Φυσικής στο Πανεπιστήμιο της Βιέννης. Ο Ντόπλερ εξέδωσε την πρώτη του εργασία το 1839. Το 1842, παρουσίασε την εργασία που τον έκανε γνωστό μέσω του φαινομένου που περιέγραψε σε αυτήν, το οποίο πήρε το όνομά του. Η εργασία ονομαζόταν: "Σχετικά με το έγχρωμο φως διπλών αστέρων και συγκεκριμένων άλλων αστέρων του ουρανού θόλου" (Über das farbige Licht der Doppelsterne, 1842, Βιέννη). Στο κείμενο παρουσιάστηκε για πρώτη φορά η αρχή του φαινομένου του Ντόπλερ που συνδέει τη συχνότητα μιας πηγής με την ταχύτητά της σε σχέση με κάποιον παρατηρητή. Μετά από έντονα και μακροχρόνια αναπνευστικά προβλήματα αναζήτησε θερμότερο κλίμα και έτσι μετακόμισε στη Βενετία στα τέλη του 1852. Η ευαίσθητη υγεία του όμως ήταν ήδη πολύ βεβαρημένη και απεβίωσε στις 17 Μαρτίου του 1853.

## 1.3 Η σκέψη και η εξίσωση

Ο Doppler είναι γνωστός για τη θεωρητική θεμελίωση του φαινομένου Ντόπλερ που ονομάστηκε έτσι προς τιμήν του. Το έτος 1842 όταν ήταν περίπου 40 ετών με μία του δημοσίευση του εστίασε την προσοχή του στο φαινόμενο κατά το οποίο παρατηρείται αλλαγή στη συχνότητα ενός κύματος από έναν παρατηρητή που βρίσκεται σε σχετική κίνηση με την πηγή των κυμάτων. Από τη σκοπιά

της ακουστικής εμπειρίας αυτό που είναι μπορεί να διακρίνει το ανθρώπινο αυτί είναι το ΥΨΟΣ (η οξύτητα) του ήχου και ο ακροατής να αποφανθεί ότι ένας ήχος είναι υψηλότερος ή χαμηλότερος -πιο μπάσος- από έναν άλλο. Υπό αυτή την έννοια είναι ένα ΥΠΟΚΕΙΜΕΝΙΚΟ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ. Την εποχή του Doppler ήταν γνωστό ότι η έννοια η οποία θα μπορούσε να ποσοτικοποιήσει – αντικειμενικά- την υποκειμενική μας αντίληψη για ύψος είναι η ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ . Υψηλότερος κατά την αντίληψή μας ήχος, σημαίνει ήχος μεγαλύτερης (υψηλότερης, όπως συνηθίζεται να λέγεται) συχνότητας. Η ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ είναι ποσοτική έννοια που περιγράφει «πόσες μεταβολές συμβαίνουν ανά δευτερόλεπτο» ανεξάρτητα από το εάν ο ήχος θα γίνει αντιληπτός από το σχετικό αισθητήριο. Υπό την έννοια αυτή μπορούμε να πούμε ότι είναι ένα ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΟ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ. Την εποχή του Doppler ήταν γνωστό ότι η έννοια η οποία θα μπορούσε να ποσοτικοποιήσει – αντικειμενικά- την υποκειμενική μας αντίληψη για το ύψος είναι η ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ. Υψηλότερος κατά την αντίληψή μας ήχος, σημαίνει ήχος μεγαλύτερης (υψηλότερης, όπως συνηθίζεται να λέγεται) συχνότητας. Η ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ είναι ποσοτική έννοια που περιγράφει «πόσες μεταβολές συμβαίνουν ανά δευτερόλεπτο» ανεξάρτητα από το εάν ο ήχος θα γίνει αντιληπτός από το σχετικό αισθητήριο. Υπό την έννοια αυτή μπορούμε να πούμε ότι είναι ένα ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΟ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ.

Ο Christian Doppler παρουσίασε και την εξίσωση που απαντούσε στο ερώτημα «πόσο αλλοιώνεται η συχνότητα. Σύμφωνα με αυτή η συχνότητα που αντιλαμβάνεται ο ακροατής είναι μεγαλύτερη εφόσον πλησιάζει την πηγή και μικρότερη εφόσον απομακρύνεται από αυτή.

Για κύματα που διαδίδονται μέσα σε ένα υλικό μέσο (ηχητικά, υπερηχητικά, κύματα πίεσης κλπ.), η σχέση μεταξύ παρατηρούμενης συχνότητας ( $\nu'$ ) και εκπεμπόμενης (πραγματικής) συχνότητας ( $\nu$ ) δίνεται από τη σχέση:

$$(1) \quad \nu' = \left( \frac{v \pm v_o}{v \mp v_s} \right) \nu$$

Όπου,  $v$  είναι η ταχύτητα διάδοσης του κύματος (πχ. 340 m/s για τον ήχο στον αέρα),  $v_o$  είναι η ταχύτητα του παρατηρητή ως προς το μέσο διάδοσης, και  $v_s$  είναι η ταχύτητα της πηγής (που εκπέμπει το κύμα) ως προς το μέσο διάδοσης.

Τα πρόσημα στις ταχύτητες ακολουθούν την εξής σύμβαση: μια θετική τιμή σημαίνει κίνηση του παρατηρητή προς την πηγή, ενώ μια αρνητική τιμή σημαίνει απομάκρυνση από την πηγή. Για την ταχύτητα της πηγής ισχύει η αντίστροφη σύμβαση.

Ένας καλός μνημονικός κανόνας είναι ο εξής: τόσο για τον παρατηρητή όσο και για την πηγή, το



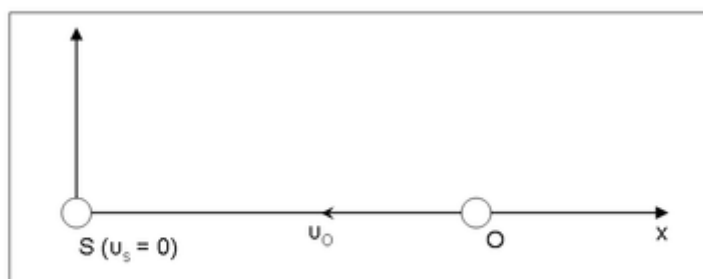
«πλησίασμα» έχει την τάση να αυξήσει τη συχνότητα, ενώ η «απομάκρυνση» την τάση να μειώσει τη συχνότητα, με τις φορές των κινήσεων να λαμβάνονται πάντοτε σε σχέση με το μέσο διάδοσης. Έχει σημασία να καταλάβουμε ότι όταν για παράδειγμα η φορά της κίνησης του παρατηρητή είναι «προς» την πηγή, δεν σημαίνει απαραίτητα ότι την πλησιάζει - μπορεί η πηγή να απομακρύνεται με μεγαλύτερη ταχύτητα. Για την εύρεση όμως του σωστού πρόσημου, αρκεί να γνωρίζουμε την «τάση» της πηγής ή του παρατηρητή να πλησιάζουν ή να απομακρύνονται, ανεξάρτητα από το τελικό αποτέλεσμα. Η τελική τιμή της συχνότητας θα προκύψει από τη σχετική «δύναμη» του αριθμητή και του παρονομαστή στον παραπάνω τύπο, και μπορεί να είναι μικρότερη, μεγαλύτερη ή και ίση με την πραγματική συχνότητα, ανάλογα με τον παράγοντα που υπερισχύει.

## 1.4 Ανάλυση εξίσωσης

Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι η συχνότητα του *εκπεμπόμενου* κύματος δεν αλλάζει. Αυτό που αλλάζει είναι η συχνότητα που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής, δηλαδή η συχνότητα με την οποία φτάνουν σ' αυτόν τα μέτωπα του κύματος. Ειδικότερα, στην περίπτωση που κινείται η πηγή ως προς το μέσο διάδοσης, αλλάζει και το *μήκος κύματος* (η απόσταση που «μετράει» ο παρατηρητής ανάμεσα σε δύο διαδοχικά μέτωπα κύματος), ενώ όταν η πηγή είναι ακίνητη το μήκος κύματος δεν μεταβάλλεται.

Ας αναλύσουμε ξεχωριστά κάθε μια από τις δύο περιπτώσεις:

### 1.4.1 Πηγή (S) ακίνητη - Παρατηρητής (O) κινούμενος





Στην προκειμένη περίπτωση, θεωρούμε ότι ο παρατηρητής (O) κινείται με ταχύτητα  $U_0$  προς την ακίνητη πηγή (S) ( $U_s=0$  σε σχέση με το μέσο διάδοσης). Εάν ο παρατηρητής ήταν ακίνητος, θα αντιλαμβανόταν ένα κύμα ταχύτητας  $v$  να τον πλησιάζει. Επομένως, σε χρόνο  $t$  θα «προσέκρουαν» σ' αυτόν

$$\frac{vt}{\lambda}$$

μέτωπα κύματος, όπου  $\lambda$  το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου κύματος. Επειδή, όμως, κινείται προς την πηγή με ταχύτητα  $U_0$ , δέχεται στον ίδιο χρόνο επιπλέον

$$\frac{v_0 t}{\lambda}$$

μέτωπα κύματος, δηλαδή συνολικά δέχεται

$$\frac{(v + v_0)t}{\lambda}$$

μέτωπα κύματος σε χρόνο  $t$ . Η συχνότητα ( $\nu =$  μέτωπα κύματος/χρόνο) επομένως που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής δίνεται από τη σχέση:

$$\nu' = \frac{(v+v_0)t}{\lambda t} = \frac{v + v_0}{\lambda} = \frac{v + v_0}{v/\nu},$$

εφόσον η αρχική συχνότητα είναι

$$\nu = v/\lambda$$

Άρα:

$$\nu' = \left( \frac{v + v_O}{v} \right) \nu.$$

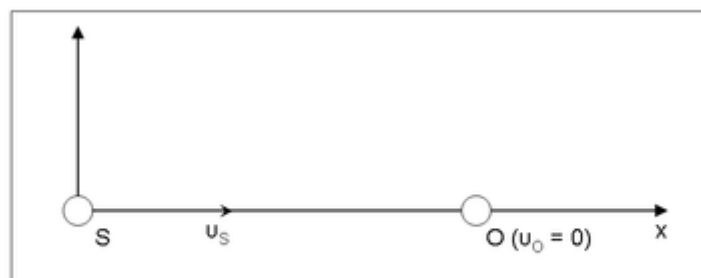
Στην περίπτωση που ο παρατηρητής αντί να πλησιάζει, **απομακρύνεται** από την πηγή, αλλάζει το πρόσημο στον τύπο:

$$\nu' = \left( \frac{v - v_O}{v} \right) \nu.$$

Στη γενική περίπτωση, επομένως, ισχύει:

$$\nu' = \left( \frac{v \pm v_O}{v} \right) \nu.$$

#### 1.4.2 Πηγή (S) κινούμενη - Παρατηρητής (O) ακίνητος



Ας υποθέσουμε τώρα ότι η πηγή (S) κινείται **προς** τον ακίνητο ( $U_0=0$ ) παρατηρητή με ταχύτητα  $U_s$ . Η κίνηση της πηγής έχει σαν αποτέλεσμα τα μέτωπα του κύματος να «συμπιέζονται» προς την κατεύθυνση της κίνησης της πηγής και να «αραιώνουν» στην αντίθετη κατεύθυνση (πίσω από την πηγή). Επειδή η πηγή μετατοπίζεται ανάμεσα στην εκπομπή μιας «κορυφής» του κύματος και της επόμενης, το μήκος κύματος διαφέρει σε σχέση με εκείνο της ακίνητης πηγής.

Συγκεκριμένα, εάν η πηγή ήταν ακίνητη, σε χρόνο μιας περιόδου  $T$  το κύμα θα είχε καλύψει απόσταση από την πηγή ίση με ένα μήκος κύματος:

$$\lambda = vT = \frac{v}{\nu}.$$

Όμως, στον ίδιο χρόνο, η κινούμενη πηγή μετατοπίστηκε κατά διάστημα  $v_s T$  στην ίδια κατεύθυνση. Συνεπώς, το μήκος κύματος ελαττώνεται κατά το ίδιο ποσό (μπροστά από την πηγή). Το νέο μήκος κύματος λ' είναι:

$$\lambda' = \lambda - v_s T = \frac{v}{\nu} - \frac{v_s}{\nu} = \frac{v - v_s}{\nu}.$$

Άρα, η συχνότητα που αντιλαμβάνεται ο ακίνητος παρατηρητής είναι:

$$\nu' = \frac{v}{\lambda'} = \left( \frac{v}{v - v_s} \right) \nu.$$

Στην περίπτωση που η πηγή αντί να πλησιάζει, **απομακρύνεται** από τον παρατηρητή, αλλάζει το πρόσημο στον τύπο:

$$\nu' = \frac{v}{\lambda'} = \left( \frac{v}{v + v_s} \right) \nu.$$

Στη γενική περίπτωση, επομένως, ισχύει:

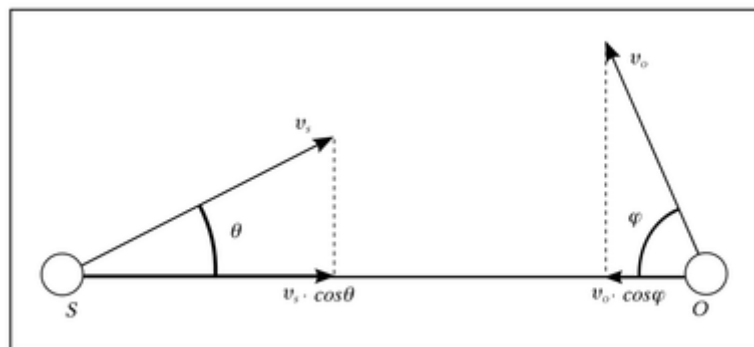
$$\nu' = \left( \frac{v}{v \mp v_s} \right) \nu.$$

### 1.4.3 Κινούμενη πηγή και παρατηρητής

Όταν κινούνται τόσο η πηγή, όσο και ο παρατηρητής ως προς το μέσο διάδοσης, τα δύο φαινόμενα που περιγράψαμε συνυπάρχουν, και η συχνότητα που τελικά αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής δίνεται, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, από τον τύπο:

$$\nu' = \left( \frac{v \pm v_O}{v \mp v_s} \right) \nu.$$

### 1.4.4 Μη συνευθειακές κινήσεις

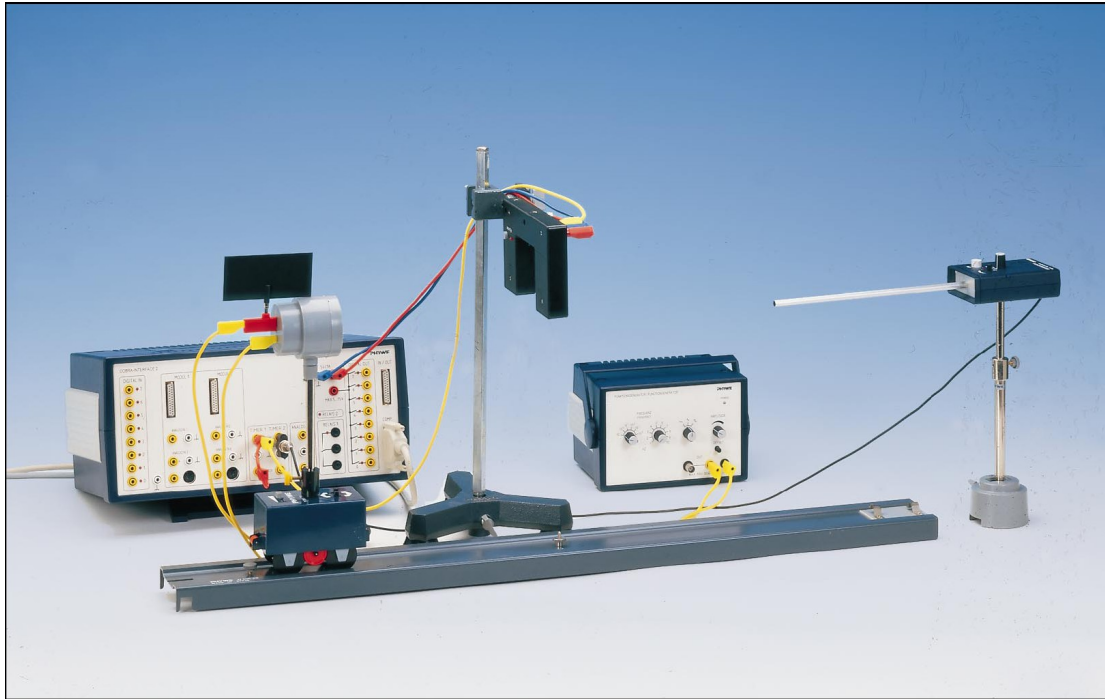


Εάν ο παρατηρητής και η πηγή κινούνται σε διευθύνσεις που σχηματίζουν τυχαία γωνία, τότε στον παραπάνω τύπο η συχνότητα υπολογίζεται παίρνοντας τις προβολές των ταχυτήτων της πηγής και του παρατηρητή πάνω στην ευθεία SO που τους συνδέει (βλ. διπλανό σχήμα):

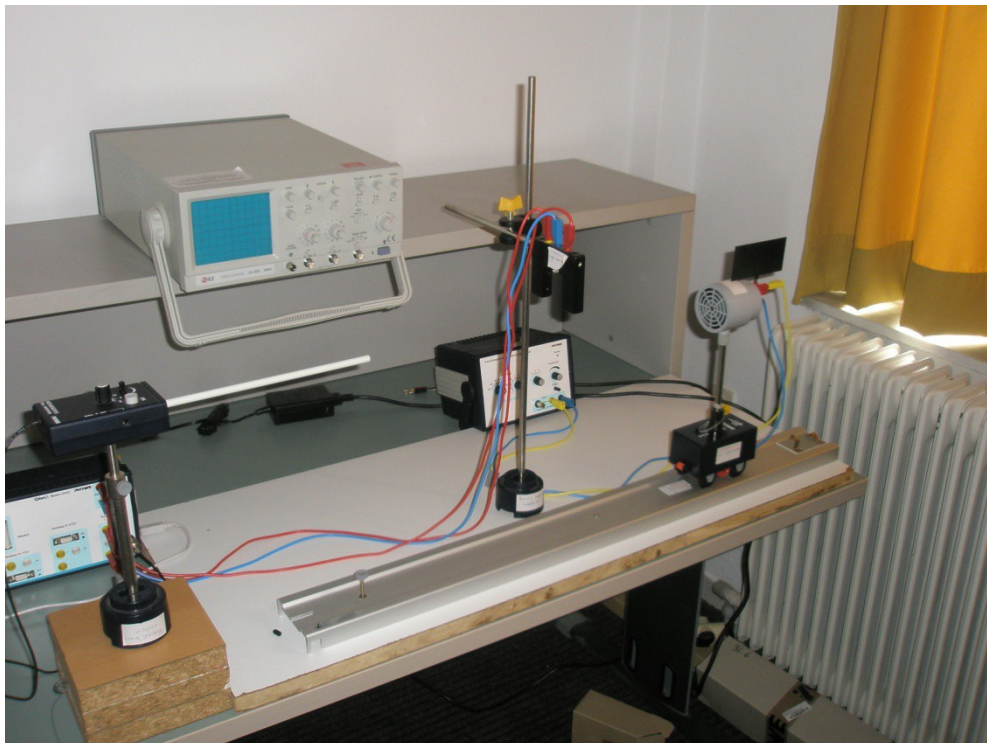
$$\nu' = \left( \frac{v \pm v_O \cos \phi}{v \mp v_s \cos \theta} \right) \nu.$$

## Κεφάλαιο 2 - Πειραματικές μετρήσεις και ανάλυση

---



*Εικόνα 2-2: Πειραματική διάταξη (φωτογραφία κατασκευαστή)*



*Εικόνα 3 – 2 : Πειραματική διάταξη (φωτογραφία στο εργαστήριο φυσικής κομματικής-  
τήμημα μουσικής τεχνολογίας και ακουστικής Ρεθύμνου, ΤΕΙ Κρήτης*

## 2.1 Βασικά μέρη πειραματικής διάταξης



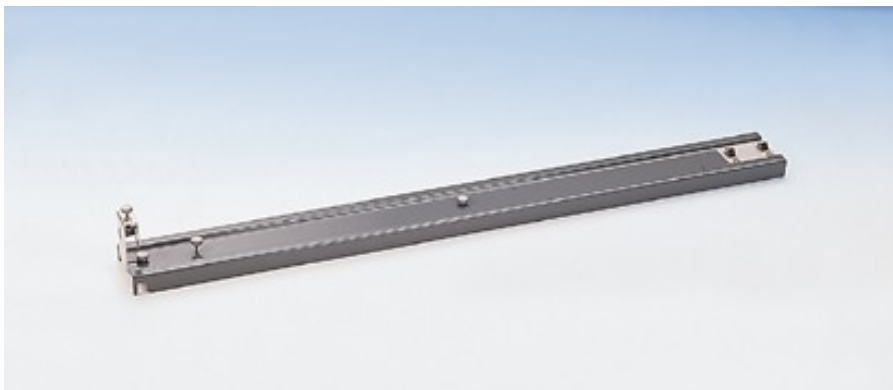
**Εικόνα 4-2. Αμαξίδιο, μηχανοκίνητο**

### **Λειτουργία**

Αμαξίδιο το οποίο είναι ικανό να εκτελέσει ομοιόμορφες κινήσεις με σταθερές ταχύτητες.

### **Χαρακτηριστικά**

Λειτουργεί με ενσωματωμένες μπαταρίες που τροφοδοτούν τον ηλεκτρικό του κινητήρα (μονωμένο για μείωση του θορύβου). Διαθέτει συρόμενος διακόπτη για συνεχή προσαρμογή της ταχύτητας και διακόπτη για αλλαγή κατεύθυνσης (μπροστά ή πίσω). Είναι τετρακίνητο και έχει διαστάσεις χωρίς τροχούς (mm): 114 × 53 × 64



**Εικόνα 5-2. Διάδρομος**

### **Λειτουργία**

διαθέτει ράγες και δυνατότητα κεκλιμένου επιπέδου ώστε να επιτευχθεί η ζητούμενη ευθύγραμμη ομαλή κίνηση

### **Χαρακτηριστικά**

Αποτελείτε από ειδικό μεταλλικό προφίλ με βίδες που καθορίζουν το ακριβές επίπεδο. Διαθέτει αφαιρούμενη υποδοχή δυναμόμετρου

Διαστάσεις (mm): 900 x 87 x 25.



**Εικόνα 6-2. Ηχείο-πηγή**

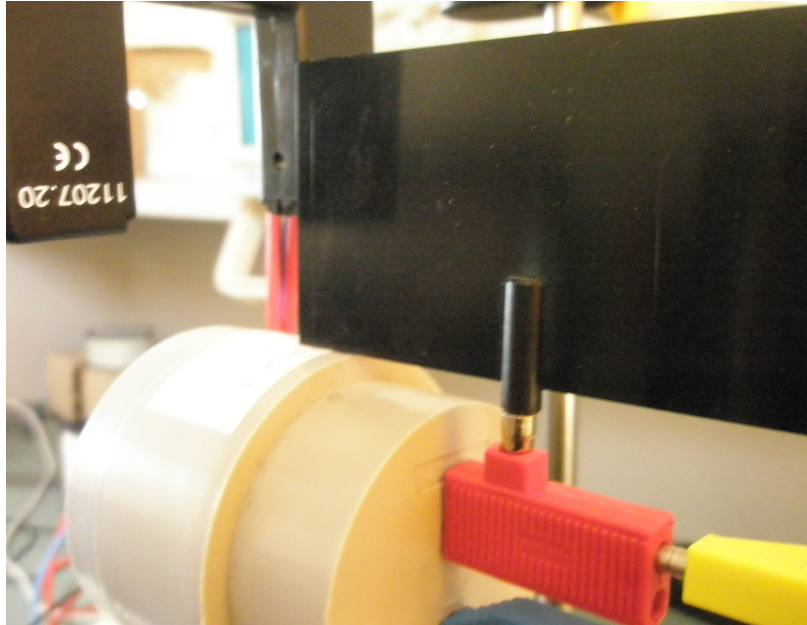
### **Λειτουργία**

Κατά τη διάρκεια του πειράματος έχει το ρόλο της κινούμενης πηγής τοποθετημένη πάνω στο αμαξίδιο.

### **Χαρακτηριστικά**

Είναι ένα Δυναμικό μεγάφωνο με ένα ζευγάρι υποδοχών των 4 mm. Έχει ισχύ εξόδου: 1 W (4 Ohm) και συχνοτική απόκριση ( $\pm 10$  dB): 150-20000 Hz.





**Εικόνα 7-2 Σύστημα μέτρησης χρόνου**

### **Λειτουργία**

Η μέτρηση του χρόνου προκύπτει από την ύπαρξη τριών εργαλείων της διάταξης, όπως φαίνεται στα αριστερά της εικόνας 7-2 το κύκλωμα (light barrier) το οποίο από τη μία πλευρά του εκπέμπει μη ορατό φως μέσω ειδικού LED και από την απέναντι του πλευρά υπάρχει ο φωτοαισθητήρας που αντιλαμβάνεται την ύπαρξη ή μη ύπαρξη του φωτός, έτσι όταν η ορθογώνια πλαστική μεμβράνη που φαίνεται στα δεξιά της εικόνας 7-2 και βρίσκεται πάνω στο κινούμενο ηχείο, διέλθει μέσα από αυτό σκιάζει τη μία πλευρά. Ο χρόνος που διαρκεί αυτή η σκίαση καταγράφεται και αμέσως μετά υπολογίζεται η ταχύτητα διέλευσης από το λογισμικό της Phywe σε m/s.

### **Χαρακτηριστικά**

Μήκος πλαστικής μεμβράνης: 100 mm. Μάζα:  $10 \pm 1$  g.

Διαστάσεις Light barrier: 40x40 mm



**Εικόνα 8-2. Μικρόφωνο**

### **Λειτουργία**

Τοποθετημένο σε σταθερό σημείο και στραμμένο προς το ηχείο, παίζει το ρόλο του παρατηρητή κατά τη διάρκεια του πειράματος. Με ενσωματωμένο ενισχυτή και τρεις επιλεγόμενες καταστάσεις εξόδου

level, signal, TTL-level.

### **Χαρακτηριστικά**

Τροφοδοτείται με μπαταρία Κλείνει αυτόματα μετά από 90 min αν τροφοδοτείται από μπαταρία και επανέρχεται πατώντας ένα κουμπί. Εύρος συχνοτήτων 30 Hz.-20kHz, (15-30 Hz και 20-40 kHz με μειωμένη λήψη). Διαθέτει 25 cm σωλήνα με αισθητήρα ( $d = 8 \text{ mm}$ ) που διασφαλίζει την μέτρηση του ηχητικού πεδίου χωρίς παρεμβολές.



**Εικόνα 9-2. Γεννήτρια Συχνοτήτων**

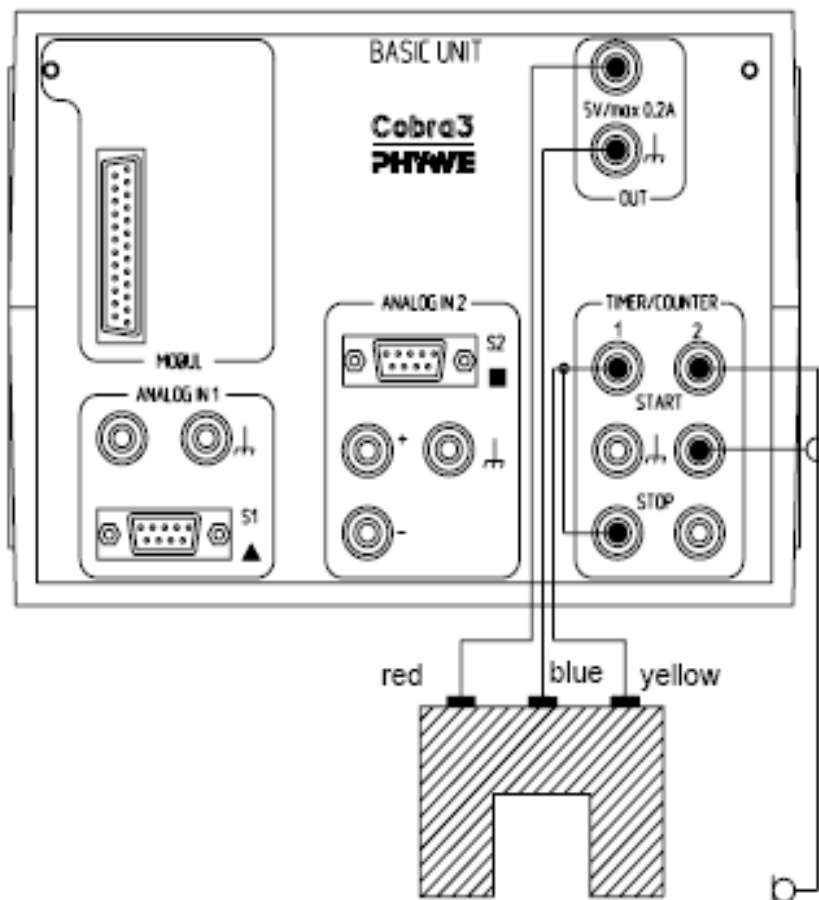
## Λειτουργία

Τροφοδοτεί την πηγή.

## Χαρακτηριστικά

Εύρος συχνοτήτων 0,1 Hz-100 kHz

## 2.2 Συνδεσμολογία



Εικόνα 10-4: συνδεσμολογία και καλωδίωση χρονομέτρου και μικροφώνου.

## 2.3 Πειραματικές μετρήσεις και ανάλυση

Μετά από την συνδεσμολόγηση της διάταξης και αξιολόγηση των δυνατοτήτων της, εκτελέστηκαν οι παρακάτω μετρήσεις για την επαλήθευση του φαινομένου Ντόπλερ.

### Μετρήσεις 1.α (η πηγή κινείται προς τον παρατηρητή)

**U**- ταχύτητα σε m/s (0,2301)

**$f_0$** - συχνότητα αναφοράς

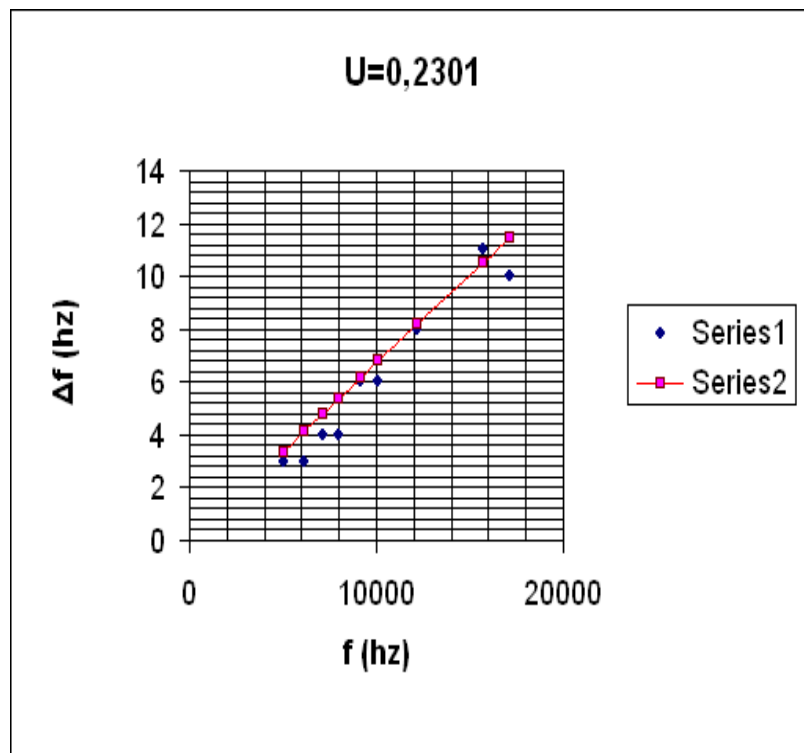
**$f_1$** - συχνότητα που μετρήθηκε με την επίδραση του φαινομένου Doppler

**$\Delta f$** - η διαφορά των παραπάνω

$f_0$ (hz)	$f_1$ (hz)	$\Delta f$ (hz)
5002	5005	3
6114	6117	3
7105	7109	4
8008	8012	4
9187	9193	6
10123	10129	6
12210	12218	8
15731	15742	11
17131	17141	10

θεωρητι  
κές  
τιμές

$f_0$ (hz)	$f_1$ (hz)	$\Delta f$ (hz)
5002	5005,356	3,355754
6114	6118,102	4,101775
7105	7109,767	4,766619
8008	8013,372	5,372426
9187	9193,163	6,163396
10123	10129,79	6,791342
12210	12218,19	8,191474
15731	15741,55	10,55365
17131	17142,49	11,49289



Μετρήσεις 1.β (η πηγή απομακρύνεται από τον παρατηρητή)

U- ταχύτητα σε m/s (0,2281)

$f_0$ - συχνότητα αναφοράς

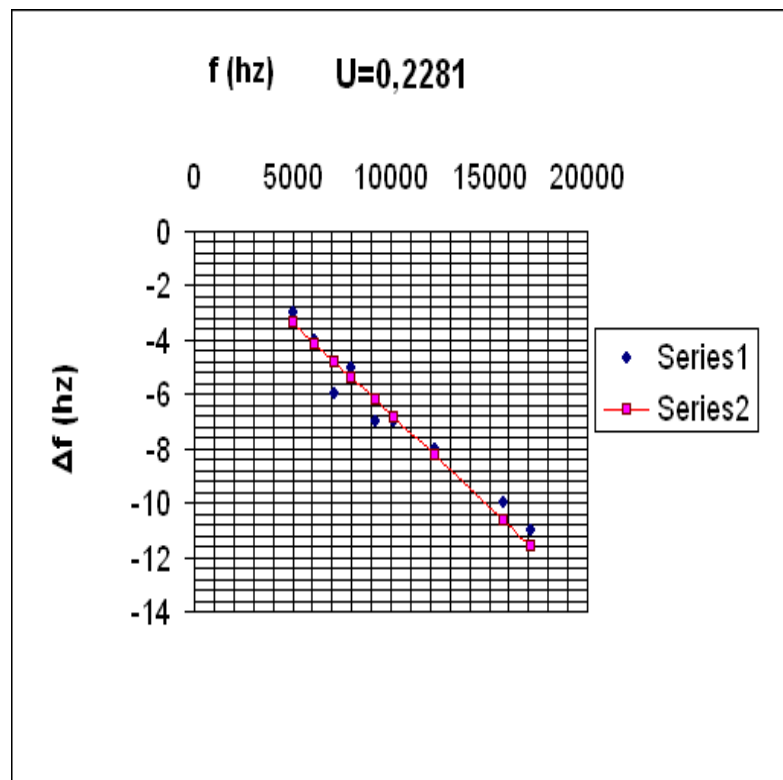
$f_1$ - συχνότητα που μετρήθηκε με την επίδραση του φαινομένου doppler

$\Delta f$ - η διαφορά των παραπάνω

$f_0$ (hz)	$f_1$ (hz)	$\Delta f$ (hz)
5002	4999	-3
6114	6110	-4
7105	7099	-6
8008	8003	-5
9187	9180	-7
10123	10116	-7
12210	12202	-8
15731	15721	-10
17131	17120	-11

θεωρητι  
κές τιμές

$f_0$ (hz)	$f_1$ (hz)	$\Delta f$ (hz)
5002	4998,615	-3,38518
6114	6109,862	-4,13774
7105	7100,192	-4,80841
8008	8002,58	-5,41953
9187	9180,783	-6,21744
10123	10116,15	-6,85089
12210	12201,74	-8,2633
15731	15720,35	-10,6462
17131	17119,41	-11,5937



### 2.3.1 Παρατηρήσεις και συμπεράσματα

Εξετάζοντας το φαινόμενο Doppler θεωρητικά, όσο η συχνότητα της πηγής ανεβαίνει τόσο μεγαλύτερη ποσοτικά (σε Hz) είναι η επίδραση του φαινομένου Doppler, υποκειμενικά όμως για τον άνθρωπο, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι επιδρά εξ ίσου σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων, ο παρατηρητής λοιπόν όπως αποδεικνύεται και από τις μετρήσεις, ακούει υψηλότερη συχνότητα από αυτήν που πραγματικά εκπέμπει η πηγή όταν αυτή κινείται προς το μέρος του με διαφορά ανάλογη της ταχύτητας, και χαμηλότερη όταν η πηγή απομακρύνεται από τον παρατηρητή. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες συχνότητες συγκριτικά με τις υπολογισμένες συχνότητες που προκύπτουν βάση της θεωρίας του Doppler, για διάφορες ταχύτητες, στην περίπτωση που η πηγή απομακρύνεται από ακίνητο παρατηρητή, ώστε να φανεί η διαφορά τους.

	ταχύτητα πηγής	ταχύτητα πηγής	ταχύτητα πηγής	ταχύτητα πηγής
	0,2508 m/s	0,2458 m/s	0,2033 m/s	0,16 m/s
<b>f<sub>0</sub> πηγής (Hz)</b>	<b>f στον παρατηρητή (Hz)</b>	<b>f στον παρατηρητή (Hz)</b>	<b>f στον παρατηρητή (Hz)</b>	<b>f στον παρατηρητή (Hz)</b>
<b>250</b>	250,1844118	250,1807353	250,1494853	250,1176471
<b>500</b>	500,3688235	500,3614706	500,2989706	500,2352941
<b>700</b>	700,5163529	700,5060588	700,4185588	700,3294118
<b>800</b>	800,5901176	800,5783529	800,4783529	800,3764706
<b>900</b>	900,6638824	900,6506471	900,5381471	900,4235294
<b>1000</b>	1000,737647	1000,722941	1000,597941	1000,470588
<b>1200</b>	1200,885176	1200,867529	1200,717529	1200,564706
<b>1500</b>	1501,106471	1501,084412	1500,896912	1500,705882
<b>1750</b>	1751,290882	1751,265147	1751,046397	1750,823529
<b>2000</b>	2001,475294	2001,445882	2001,195882	2000,941176
<b>2500</b>	2501,844118	2501,807353	2501,494853	2501,176471
<b>3000</b>	3002,212941	3002,168824	3001,793824	3001,411765
<b>3500</b>	3502,581765	3502,530294	3502,092794	3501,647059
<b>4000</b>	4002,950588	4002,891765	4002,391765	4001,882353
<b>5000</b>	5003,688235	5003,614706	5002,989706	5002,352941
<b>6000</b>	6004,425882	6004,337647	6003,587647	6002,823529
<b>7000</b>	7005,163529	7005,060588	7004,185588	7003,294118
<b>8000</b>	8005,901176	8005,783529	8004,783529	8003,764706
<b>9000</b>	9006,638824	9006,506471	9005,381471	9004,235294
<b>12000</b>	12008,85176	12008,67529	12007,17529	12005,64706
<b>14000</b>	14010,32706	14010,12118	14008,37118	14006,58824
<b>16000</b>	16011,80235	16011,56706	16009,56706	16007,52941
<b>16192</b>	16203,94398	16203,70586	16201,68186	16199,61976
<b>18000</b>	18013,27765	18013,01294	18010,76294	18008,47059

Έτσι λοιπόν και έχοντας ως δεδομένο ότι η ακρίβεια του μικρόφωνου στη συγκεκριμένη διάταξη πειράματος είναι  $\pm 1\text{Hz}$  βγαίνουν τα εξής συμπεράσματα για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του πειράματος.

<b>Περιοχή συχνοτήτων</b>	<b>Αξιολόγηση μετρήσεων</b>
250-1500 (Hz)	Μη αξιόπιστες μετρήσεις
1200-4000 (Hz)	Μεγάλη πιθανότητα λάθους
4000 (Hz) και άνω	Μέγιστη ακρίβεια



## Κεφάλαιο 3 - Εκπαιδευτική εργασία

---

### Εκπαιδευτική εργασία

#### 3.1 Προετοιμασία

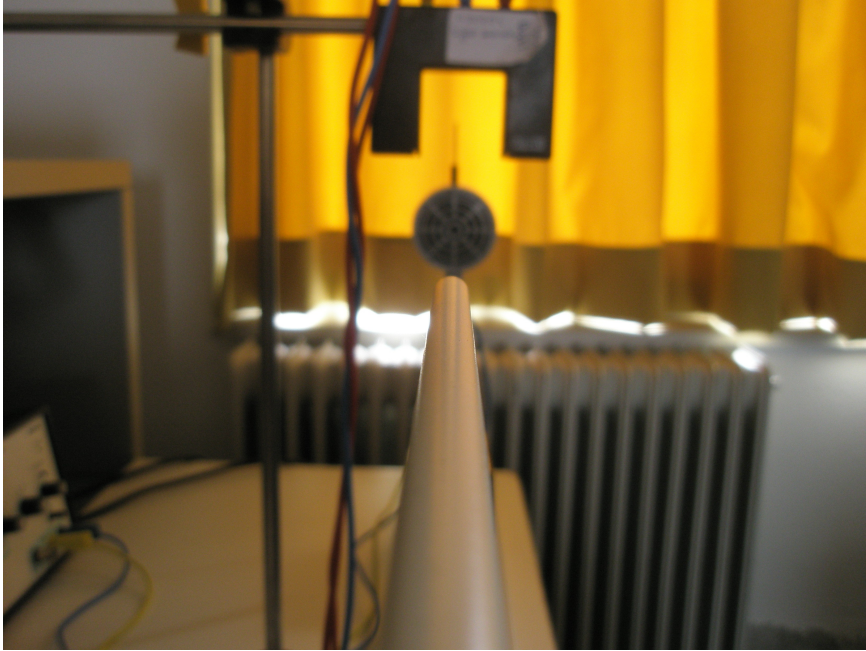
Η κατάλληλη προετοιμασία έχει μεγάλη σημασία και συμβάλει στο να ληφθούν αξιόπιστες μετρήσεις καθώς τα συμπεράσματα που προκύπτουν από το πείραμα βασίζονται στην λεπτομέρεια.

- Ενεργοποιήστε όλες τις συσκευές του πειράματος, ελέγξτε τις συσκευές που τροφοδοτούνται με μπαταρία (αμαξίδιο και μικρόφωνο) και αντικαταστήστε με καινούργιες αν χρειάζεται.
- η γεννήτρια χρειάζεται 10 περίπου λεπτά για να ζεσταθεί
- το μικρόφωνο ενεργοποιείται πιέζοντας το μεγάλο κουμπί (ON) και θέτεται τον διακόπτη για την μορφή της κυματομορφής στο ημίτονο όπως φαίνεται παρακάτω.



**Εικόνα 11 : επιλογές μικροφώνου.**

- ευθυγραμμίστε το μικρόφωνο με την πηγή (για όλο το μήκος του διαδρόμου).
- τοποθετήστε το χρονόμετρο κάθετα ως προς την μαύρη επιφάνεια - οθόνη η οποία συγκρατείται πάνω στην πηγή.



**Εικόνα 12 : Μικρόφωνο ευθυγραμμισμένο με το ηχείο.**

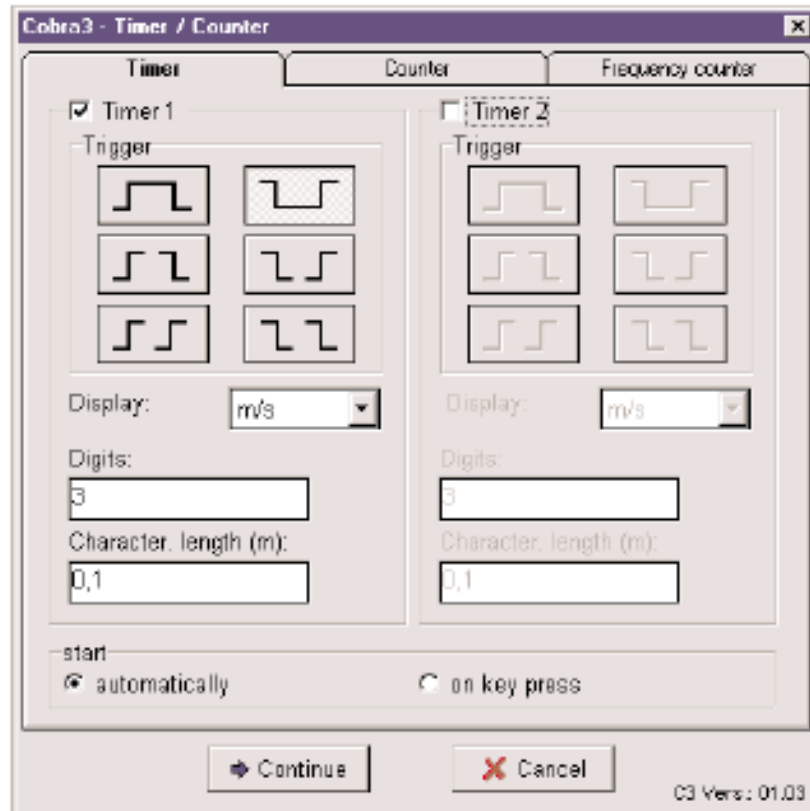
- βεβαιωθείτε ότι ο διάδρομος είναι καθαρός.

### **3.2 Μέτρηση ταχύτητας**

**Ξεκινώντας μια καινούργια μέτρηση ακολουθείται την παρακάτω διαδικασία.**

1) Ανοίγοντας το λογισμικό της PHYWE επιλέγεται νέα μέτρηση (new measurment).

2) Για την μέτρηση ταχύτητας επιλέξτε στον timer τις παρακάτω ρυθμίσεις



**Εικόνα 13 : Ρυθμίσεις timer.**

έπειτα continue...

-πριν θέσετε το αμαξίδιο σε κίνηση βεβαιώνεται πάντα ότι τα καλώδια δεν πατούν πάνω στο διάδρομο και δεν παρεμποδίζεται με κανένα τρόπο η κίνηση του αμαξιδίου.



**Εικόνα 14 : καλώδια εκτεθειμένα στην πορεία του αμαξιδίου**

### Μετρήσεις 1.α

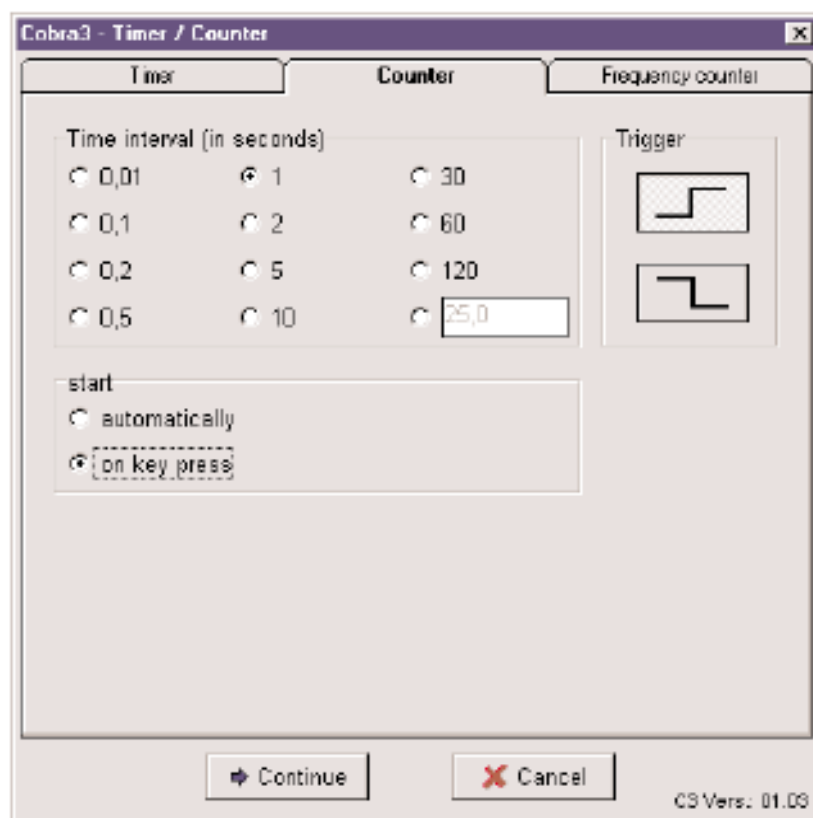
- θέστε τον διακόπτη του αμαξιδίου στο μέγιστο και εκκινήστε το σε αρκετή απόσταση από το χρονόμετρο ώστε να έχει αναπτύξει την προσδοκώμενη σταθερή ταχύτητα πριν περάσει από αυτόν.
- επαναλάβετε αρκετές φορές και καταγράψτε τις τιμές ξεχωριστά για κάθε κατεύθυνση, έπειτα υπολογίστε τον μέσο όρο.

*παρατήρηση: η απόκλιση μεταξύ των μετρήσεων ταχύτητας, για τις δυο κατευθύνσεις είναι φυσιολογική.*

Δεξιά κίνηση $U_+$	Αριστερή κίνηση $U_-$
1.	1.
2.	2.
3.	3.
4.	4.
5.	5.
$\mu.ο=$	$\mu.ο=$

### 3.2 Μέτρηση συχνότητας

Στον counter επιλέξτε τις παρακάτω ρυθμίσεις



Εικόνα 15 : Ρυθμίσεις counter για μέτρηση συχνότητας.

έπειτα continue...



Πηγή απομακρύνεται.

<b>f<sub>0</sub> (hz)</b>	<b>f-1 (hz)</b>	<b>Δf (hz)</b>

### 3.3 Ερωτήσεις προβλήματα

- 1) Συγκρίνετε τις τιμές που μετρήθηκαν με της θεωρητικές. Απέχουν? Αν ναι εξηγήστε τους πιθανούς λόγους.
  - 2) Η επίδραση του φαινομένου Doppler διαφέρει από συχνότητα σε συχνότητα?
  - 3) Μια πηγή κινείται με 5 m/s και σε αντίθετη κατεύθυνση κινείται ένας παρατηρητής με ταχύτητα 8 m/s. Ο παρατηρητής λαμβάνει από την πηγή συχνότητα 10000Hz, ποια είναι η συχνότητα πηγής  $f_0$ ?
  - 4) Αν η ταχύτητα της πηγής προσεγγίσει η ξεπεράσει την ταχύτητα του ήχου ποιο φαινόμενο θα παρατηρηθεί? Τι σχέση έχει με το φαινόμενο Doppler.
-

## Κεφάλαιο 4 - Video clip

---

### 4.1 Σκοπός παραγωγής video clip

Το γεγονός ότι το εν λόγω πείραμα προορίζεται να εξεταστεί αλλά και να εκτελεστεί από νέους φοιτητές του τμήματος κατά τις εργαστηριακές ώρες του μαθήματος της φυσικής κυματικής με οδηγεί σε ερωτήματα όπως, ποιο το γνωστικό υπόβαθρο των φοιτητών με βάση τον οδηγό σπουδών πάνω στη φυσική κυματική; Η απάντηση είναι ότι το εν λόγω μάθημα διδάσκεται κατά το πρώτο εξάμηνο, πράγμα που σημαίνει ότι οι φοιτητές έχουν τις ελάχιστες γνώσεις που έχουν εφοδιαστεί από το λύκειο. Άλλο ερώτημα είναι, ποιος ο βαθμός δυσκολίας του πειράματος; το πείραμα είναι αν όχι το πιο σύνθετο, είναι σίγουρα από τα πιο σύνθετα και δύσκολα πειράματα του εργαστηρίου, καθώς γίνονται διαφορετικές μετρήσεις για ταχύτητα και συχνότητα, με διαφορετικά εργαλεία συντονιζόμενα από λογισμικό σε υπολογιστή, και με εξωτερικές παραμέτρους που εύκολα μπορούν να επηρεάσουν τις τελικές μετρήσεις.

Και τέλος, επαρκεί ο χρόνος που παρέχεται στο εργαστήριο για την εκτέλεση του πειράματος; Η λογική απάντηση σε αυτό είναι ότι ένας νέος φοιτητής του ΤΕΙ θα χρειαστεί μεγάλη βοήθεια για να μπορέσει να εκτελέσει το πείραμα εντός του δώρου που προσφέρεται για το κάθε πείραμα.

Έχοντας λοιπόν υπόψιν τα παραπάνω δημιουργήθηκε η σκέψη για τη δημιουργία βοηθητικού υλικού το οποίο θα συνοδεύει το πείραμα, εναλλακτική λύση θα μπορούσε να είναι ένα έγγραφο – εγχειρίδιο που θα οδηγούσε βήμα βήμα τον φοιτητή στην εκτέλεση του πειράματος το οποίο ίσως να μοιάζει λειτουργικό επίσης αλλά κρίθηκε ότι δεν θα είχε την αμεσότητα και τη διαδραστικότητα που μπορεί να προσφέρει ένα video clip στο οποίο θα γινόταν αναπαράσταση της εκτέλεσης του πειράματος, τρόπος λειτουργίας, σημεία που πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή για την αποφυγή λαθών, και παρουσίαση των οργάνων της διάταξης.

## 4.2 Μέσα που χρησιμοποιήθηκαν (software – hardware)

### ◆ Εικόνα

Για την καταγραφή των πλάνων στο εργαστήριο φυσικής κυματικής χρησιμοποιήθηκε μία φορητή handy-cam της Sony, κάμερα η οποία προϋπήρχε στο εργαστήριο «Εικόνα και Ήχος», για τις φωτογραφίες που τραβήχτηκαν χρησιμοποιήθηκε η Olympus X-875

### ◆ Ήχος

Για την ηχητική καταγραφή στο εργαστήριο φυσικής κυματικής χρησιμοποιήθηκε το ενσωματωμένο μικρόφωνο της κάμερας, και για την καταγραφή της αφηγηματικής φωνής χρησιμοποιήθηκε το δυναμικό, καρδιοειδούς πολικού διαγράμματος e 815 S της SENHEISER, η επεξεργασία της φωνής έγινε με τη χρήση του λογισμικού (software) FL Studio 10 της Image line. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για το μοντάζ της εικόνας ήταν το Power Director της Cyberlink.



## 4.3 Pre production – Production – Post production και Σπικάζ / voice over

Η προ παραγωγή (pro production) ίσως ήταν η πιο βαρυσήμαντη διαδικασία της παραγωγής του clip, καθώς θα καθόριζε σε μεγάλο βαθμό την τελική εικόνα του clip. Σε αυτό το βήμα καθορίστηκε το γενικότερο ύφος, η σκηνές που θα τραβηχτούν και η διαδοχή αυτών, καθώς και η συγγραφή του κείμενο της αφήγησης που έχει τον κεντρικότερο ρόλο στο παρόν clip. Η διαδικασία της παραγωγής (production) ήταν σχετικά εύκολη και σύντομη διαδικασία, με την προσοχή να επικεντρώνεται στην δημιουργία των κάδρων αλλά και την επιλογή των καταλληλότερων γωνιών λήψης σε συνάρτηση με την καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση του φυσικού φωτός που υπήρχε στην αίθουσα. Η δουλειά μετά το τέλος της παραγωγής (post production) ήταν η πιο δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία, περιελάμβανε το μοντάζ, κατά το οποίο χρησιμοποιήθηκαν video αλλά και φωτογραφίες που είχαν



τραβηχτεί στο εργαστήριο, δημιουργήθηκαν επεξηγηματικές κάρτες, την ηχογράφιση της φωνής αφήγησης καθώς και την επεξεργασία αυτής. Η τελική διάρκεια του εκπαιδευτικού video clip είναι 4 λεπτά και ο τύπος της ψηφιακής του μορφής είναι avi.

## Κεφάλαιο 5 - Διαγράμματα Chladni

---

### 5.1 Ernst Chladni



Ο **Ernst Chladni** γεννήθηκε στο Wittenberg της Γερμανίας, η οικογένεια του καταγόταν από την Kremnica, μία μικρή πόλη στο κέντρο της Σλοβακίας, πρώην μέρος του βασιλείου της Ουγγαρίας, από αυτό ο Chladni αναφέρεται στη λογοτεχνία ως Γερμανός, Ουγγαρέζος και Σλοβάκος. Ο παππούς του George Chladni (1637–92) ήταν κληρικός, ο προπάππος του Martin Chladni (1669–1725), ήταν επίσης θεολόγος και το 1710 έγινε καθηγητής στο πανεπιστήμιο του Wittenberg, επίσης ο θείος του Chladni, Justus Georg Chladni (1701–1765), ήταν καθηγητής νομικής στο πανεπιστήμιο του Wittenberg. Ένας άλλος θείος του, ο Johann Martin Chladni (1710–1759) ήταν επίσης θεολόγος και ιστορικός, καθηγητής στο πανεπιστήμιο του Erlangen και στο πανεπιστήμιο του Leipzig. Ο πατέρας του Chladni, Ernst Martin Chladni (1715–1782), ήταν καθηγητής νομικής και πρύτανης στο πανεπιστήμιο του Wittenberg, από το οποίο εισήλθε στη νομική σχολή το 1746. Η μητέρα του ήταν η Johanna Sophia και ο Ernst Chladni ήταν το μόνο παιδί τους. Ο πατέρας του Chladni δεν έδινε σημασία στο ενδιαφέρον που έδειχνε στην επιστήμη και επέμενε ότι θα οδηγηθεί στην δικηγορική. Ο Chladni σπούδασε στη νομική και στην φιλοσοφική σχολή των πανεπιστημίων Wittenberg και Leipzig. Όταν ο πατέρας του απεβίωσε το 1782. Ο Chladni ξεκίνησε να ερευνά σοβαρά την φυσική. Ο Chladni απεβίωσε το 1827 στην Breslau, νοτιότερη Silesia μία περιοχή που τώρα βρίσκεται νοτιοδυτικά της Πολωνίας μέρος τότε του Βασιλείου της Πρωσίας η οποία ήταν μέλος της γερμανικής συνομοσπονδίας.

## 5.2 Διαγράμματα Chladni

Ένα από τα σπουδαιότερα επιτεύγματα του Chladni ήταν η τεχνική με την οποία έκανε ορατές τις καταστάσεις δόνησης επίπεδων επιφανειών. Αυτό το κατάφερε απλώνοντας άμμο πάνω σε επίπεδους δίσκους με ομοιόμορφο πάχος τους οποίους διέγειρε με ένα δοξάρι ώστε να παράγει ημιτονοειδή κύματα τα οποία όταν έφταναν σε συγκεκριμένες συχνότητες που ονομάζονται και ιδιοσυχνότητες ή modes εξανάγκαζαν την άμμο να απομακρυνθεί απ τα σημεία κίνησης (κυλκείες), προς τα σημεία που δεν υπήρχε (δεσμοί), έτσι δημιουργούσε κάποια σχήματα που σήμερα έχουν μείνει γνωστά ως τα διαγράμματα Chladni. Αυτή του η τεχνική δημοσιεύθηκε για πρώτη φορά στο βιβλίο του *Entdeckungen über die Theorie des Klanges* (“Ανακαλύψεις στην θεωρία του ήχου”) το 1787. Παραλλαγές αυτής της τεχνικής χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα κατά την σχεδίαση και κατασκευή ακουστικών μουσικών οργάνων όπως το βιολί, η κιθάρα και το τσέλο.



Εικόνα 1-5: Chladni figure εφαρμογή σε τσέλο

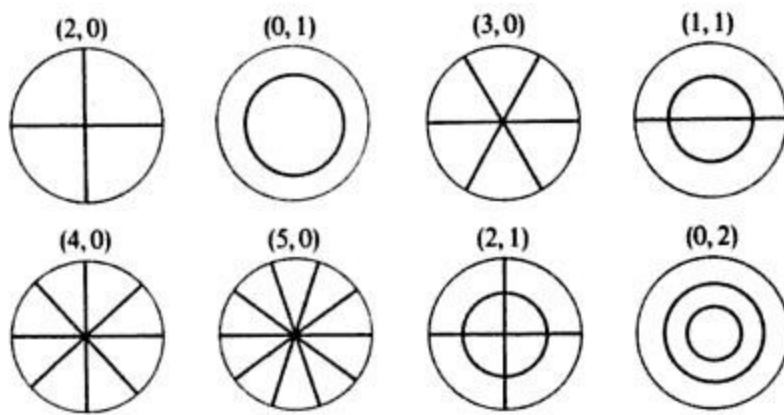


Εικόνα 2-5: Chladni figure εφαρμογή σε κιθάρα

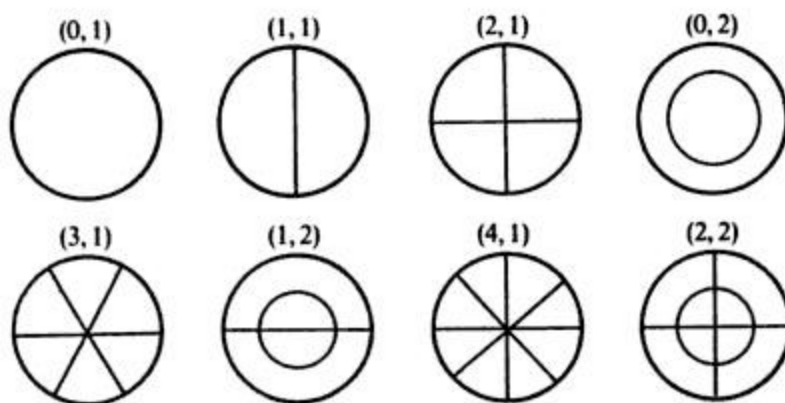


Εικόνα 3-5: Chladni figure εφαρμογή σε βιολί

Αυτό που θα διερευνηθεί παρακάτω με την διεξαγωγή πειράματος είναι οι τρόποι δόνησης κυκλικού δίσκου, στις εικόνες 4-5 και 5-5 παρουσιάζονται τα σχεδιαγράμματα κάποιων βασικών συντονισμών. Το  $n$  ισούται με τον αριθμό των ομόκεντρων κύκλων που τείνουν να σχηματιστούν, και το  $m$  ο αριθμός των διαμετρικών γραμμών που τείνουν να σχηματίσουν τα σημεία των δεσμών. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια διαγράμματα αναφορικά για κάποιους συνδυασμούς των  $m$  και  $n$ .



**Εικόνα 4-5:** Chladni figures  $(m,n)$  για δίσκους με μη πακτωμένες άκρες.



**Εικόνα 5-5:** Chladni figures  $(m,n)$  για δίσκους με πακτωμένες άκρες.

## 5.3 Πείραμα



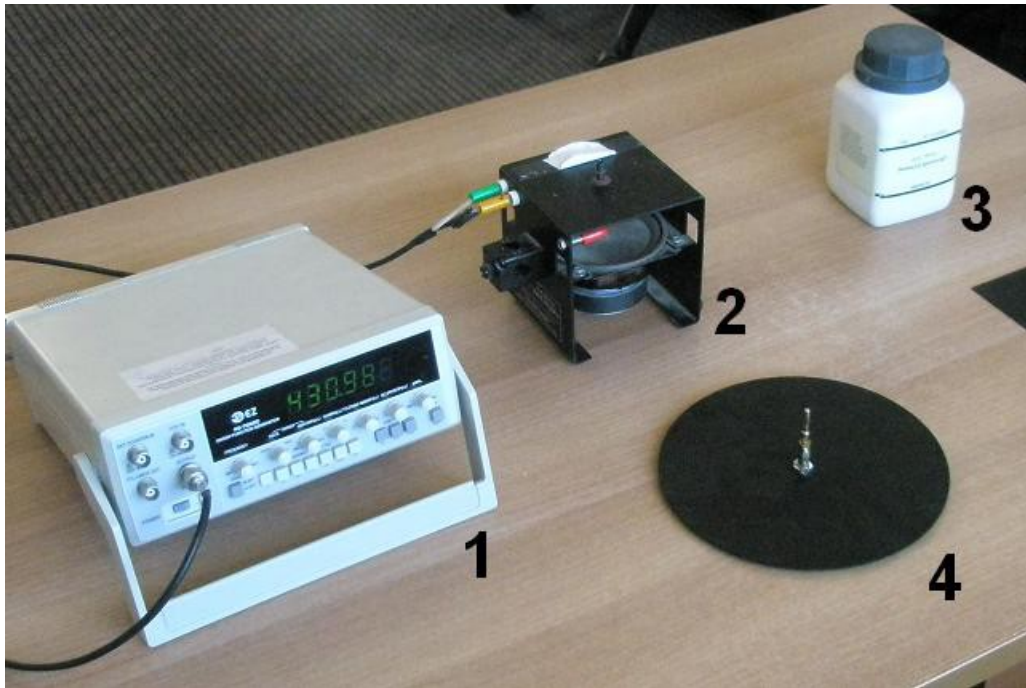
Εικόνα 4-5

### 5.3.1 Στόχος πειράματος

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο φυσικής κυματικής του ΤΕΙ για την μελέτη των φυσικών συχνοτήτων συντονισμού κυκλικού δίσκου με την χρήση τροποποιημένου ηχείου ως μεσώ μετάδοσης των συχνοτήτων, συνδεδεμένο στο κέντρο του δίσκου. Ο κύριος στόχος είναι να γίνουν ορατοί μέσω της άμμου που θα απλωθεί στην επιφάνεια του δίσκου αυτοί οι συντονισμοί βάσει της πεποίθησης ότι οι κόκκοι θα μεταπηδούν από τα σημεία που η ταλάντωση του δίσκου παρουσιάζει μέγιστο πλάτος (κοιλίες), σε σημεία – γραμμές που το πλάτος είναι μηδενικό (δεσμοί).

### 5.3.2 Εξοπλισμός – Εκτέλεση Πειράματος

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση του πειράματος ήταν αρχικά μια γεννήτρια ως πηγή των συχνοτήτων, ένας ενισχυτής ώστε να ενισχυθεί το σήμα της γεννήτριας, ένα τροποποιημένο ηχείο ως διεγέρτης (vibrator), ένας στρογγυλός δίσκος διαμέτρου 20cm με ομοιόμορφο πάχος και φυγοκεντρισμένη λευκή άμμος.



Εικόνα 5-5: βασικά εργαλεία – στοιχεία πειραματικής διάταξης. 1) γεννήτρια, 2) τροποποιημένο ηχείο, 3) φυγοκεντρισμένη λευκή άμμος, 4) στρογγυλός δίσκος.

-Το πρώτο βήμα ήταν να γίνει η κατάλληλη συνδεσμολογία με την εξής σειρά.

### Γεννήτρια → Ενισχυτής → Ηχείο

-Αφού έγινε δοκιμή για τη σωστή λειτουργία όλων των τμημάτων έγινε ρίψη της ειδικής άμμου ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια του δίσκου.

-Αμέσως μετά ξεκινώντας από τις χαμηλότερες συχνότητες στα 20 - 50Hz δόθηκε αρκετή ενίσχυση ώστε να αρχίσει να ταλαντεύεται ο δίσκος. Σε αυτήν την περιοχή συχνοτήτων οι κόκκοι άμμου δεν εμφάνισαν κάποια κινητικότητα. Κατά την άνοδο στα 80 με 90Hz οι κόκκοι άμμου σε ορισμένα σημεία της επιφάνειας άρχισαν να ταλαντεύονται και να κινούνται χωρίς όμως να σχηματίζεται κάποιο ξεκάθαρο σχήμα, όταν όμως η γεννήτρια έφτασε στα 100Hz μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα σχηματίστηκε ένας ξεκάθαρος κύκλος όπως φαίνεται στην εικόνα 6-5, καθώς αρκετή από την άμμο οδηγήθηκε εκτός δίσκου.



Εικόνα 6-5: 101Hz

Μέχρι περίπου τα 130Hz εξακολουθούσε να υπάρχει κινητικότητα των κόκκων αλλά ο κύκλος σιγά σιγά έφθινε, ενώ ταυτόχρονα γινόταν ρίψη επιπλέον άμμου. Στη συνέχεια ανεβάζοντας τις συχνότητες υπήρξε μια σχετική αδράνεια των κόκκων μέχρι τα 200Hz περίπου όπου πάλι εμφανίστηκε δραστηριότητα στην επιφάνεια του δίσκου χωρίς αρχικά να γίνεται αντιληπτός κάποιος φυσικός τρόπος συντονισμού, μετά όμως από λίγα δευτερόλεπτα φτάνοντας στα 206Hz και αυξομειώνοντας το πλάτος της ταλάντωσης από τον ενισχυτή, εμφανίστηκε το σχήμα που φαίνεται στην **εικόνα 7-5**.



**Εικόνα 7-5: 206Hz**

Η επόμενη περιοχή συχνοτήτων που αξίζει να αναφερθεί ως προς τον εντοπισμό κάποιου συντονισμού ήταν ξεπερνώντας το 1KHz στο 1.153KHz όπου διακρίνονται δύο κύκλοι, ένας μικρότερης και ένας μεγαλύτερης διαμέτρου όπως φαίνεται στην εικόνα 8-5



**Εικόνα 8-5: 513KHz**



Ανεβάζοντας τις συχνότητες πέρα των 2 kHz παρατηρήθηκε πολύ έντονος θόρυβος, καθώς και ο δίσκος έδειχνε ασταθής μέχρι που σε κάποιες συχνότητες κοντά στα 2,5kHz γύριζε γύρω απ τον άξονα του, σημάδια που έδειχναν την αδυναμία της πειραματικής διάταξης να ταλαντεύσει το δίσκο σε τόσο υψηλές συχνότητες. Παρά την αστάθεια φθάνοντας στα 2.880KHz παρατηρήθηκε άλλος ένας φυσικός τρόπος συντονισμού στο σχήμα που φαίνεται στην εικόνα 9-5



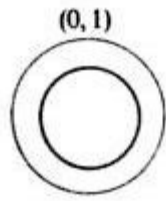
Εικόνα 9-5: 2.880KHz

### 5.3.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα

Σε γενικές γραμμές ο δίσκος φάνηκε να ταλαντεύεται ομαλά μέχρι το 1kHz όπου η εμφάνιση των συντονισμών επαληθεύονται και από τη θεωρία του Chladni, στα 1-2kHz άρχισε να παράγεται θόρυβος ο οποίος αυξανόταν κατά την άνοδο των συχνοτήτων και ξεπερνώντας τα 2kHz γινόταν ιδιαίτερα ενοχλητικός. Πιθανή αιτία της παραγωγής αυτού του θορύβου να είναι αποσπώμενη βάση του δίσκου που εφαρμόζε πάνω στον διεγέρτη-ηχείο, η οποία δεν ήταν η κατάλληλη για τη σωστή μετάδοση των συχνοτήτων στον δίσκο. Ένας πιο σταθερός και μόνιμος τρόπος σύνδεσης θα οδηγούσε σε καλύτερα αποτελέσματα.

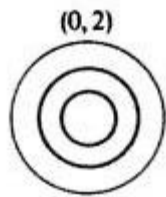
Μορφή συντονισμού  
και θεωρητική συχνότητα

Μορφή συντονισμού  
και συχνότητα γεννήτριας



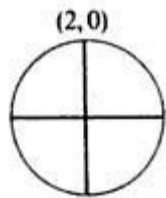
101Hz

A.



513Hz

B.



206Hz

Γ.

(4, 1)

?



2880Hz

Δ.

Άλλη μια παρατήρηση που αξίζει να γίνει είναι σχετικά με το χρόνο που χρειάστηκε για να σχηματιστούν τα διαγράμματα στην κάθε ιδιοσυχνότητα, καθώς για το πρώτο στα 100Hz χρειάστηκαν λιγότερο από 5 sec για να σχηματιστεί ένας καθαρός κύκλος, ενώ στους επόμενους οι οποίοι δεν είναι το ίδιο ξεκάθαροι χρειάστηκαν 30 έως 60 sec για να σχηματιστούν.

## Βιβλιογραφία

**Σκαρλάτος Δημήτρης [2003] «Εφαρμοσμένη Ακουστική»**

**Neville H. Fletcher and Thomas D. Rossing , [1993] «The Physics of Musical Instruments»,**

**N. Παπαδογιάννης, [2000] σημειώσεις «Φυσική Ακουστική Μουσικών Οργάνων»**

**L.E. Kinsler, A.R. Frey, A.B. Coppens, and J.V. Sanders, [1999] Fundamentals of Acoustics**

**T.D. Rossing, and N.H. Fletcher, [1994] Principles of Vibration and Sound**

## Πηγές στο Διαδίκτυο

<http://www.phywe.com>

<http://www.acs.psu.edu>

<http://el.wikipedia.org/wiki>

[http://en.wikipedia.org/wiki/Christian\\_Doppler](http://en.wikipedia.org/wiki/Christian_Doppler)

<http://www.unige.ch/~gander/Preprints/Ritz.pdf>