

# Συμβολή

Ονοματεπώνυμο: Κλάϊντι Τσάμη

# Contents

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Θεωρητική Εισαγωγή</b>	<b>3</b>
2.1	A. Κάτοπτρο του Lloyd - Μέτρηση μήκους κύματος Laser He-Ne . . . . .	3
2.2	B. Διάταξη του Newton - Ακτίνα καμπυλότητας επιπεδόκυρτου φακού και μήκη κύματος λυχνίας Hg . . . . .	5
2.3	Γ. Συμβολόμετρο Michelson (Διάταξη Pohl) - Μέτρηση μήκους κύματος του πράσινου Laser . . . . .	6
2.4	Δ. Συμβολόμετρο Michelson - Μέτρηση μήκους του φωτός λευκής λυχνίας .	7
<b>3</b>	<b>Πειραματική διαδικασία</b>	<b>8</b>
3.1	A. Κάτοπτρο του Lloyd - Μέτρηση μήκους κύματος Laser He-Ne . . . . .	8
3.2	B. Διάταξη του Newton - Ακτίνα καμπυλότητας επιπεδόκυρτου φακού και μήκη κύματος λυχνίας Hg . . . . .	11
3.2.1	1. Υπολογισμός ακτίνας καμπυλότητας επιπεδόκυρτου φακού . . . . .	12
3.2.2	2. Υπολογισμός του μήκους κύματος της κίτρινης γραμμής του Hg. .	13
3.2.3	3. Υπολογισμός του μήκους κύματος της μπλε γραμμής του Hg. . . .	15
3.3	Γ. Συμβολόμετρο Michelson (Διάταξη Pohl) - Μέτρηση μήκους κύματος του πράσινου Laser . . . . .	16
3.4	Δ. Συμβολόμετρο Michelson - Μέτρηση μήκους του φωτός λευκής λυχνίας .	18
<b>4</b>	<b>Συμπεράσματα</b>	<b>19</b>

# 1 Εισαγωγή

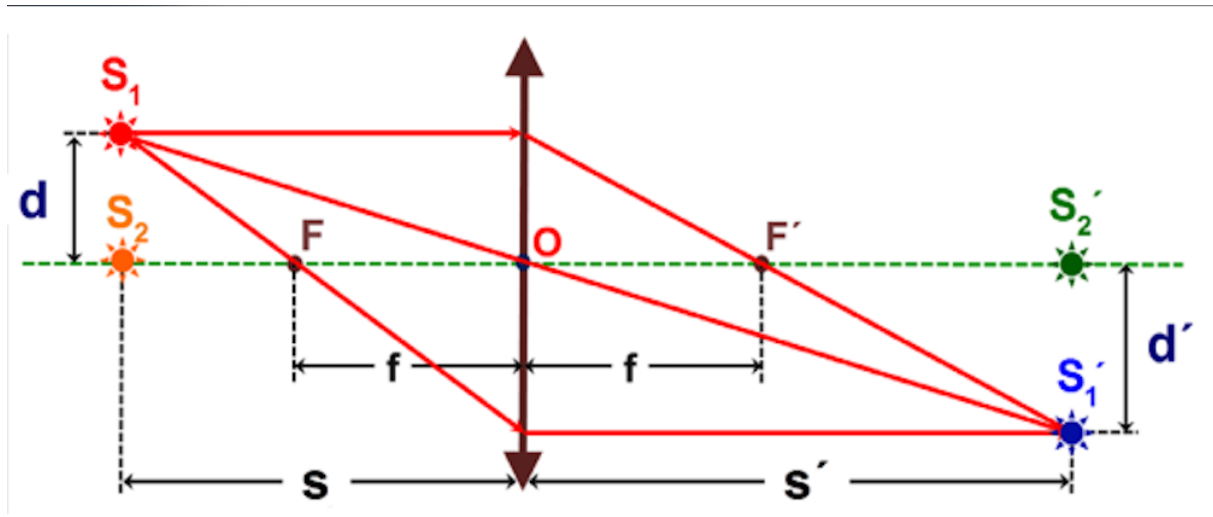
Στην παρούσα εργασία θα επιχειρήσουμε να μελετήσουμε το φαινόμενο της συμβολής στην οπτική, ένα από τα πιο θεμελιώδη και εντυπωσιακά φαινόμενα της κυματικής φύσης του φωτός. Μέσω κατάλληλων πειραματικών διατάξεων, θα συλλέξουμε πειραματικά δεδομένα και, με τη βοήθεια θεωρητικής ανάλυσης και υπολογισμών, θα προσπαθήσουμε να εξαγάγουμε φυσικές ποσότητες που σχετίζονται με τη συμπεριφορά του φωτός κατά τη συμβολή.

Οι πειραματικές διατάξεις που θα χρησιμοποιηθούν περιλαμβάνουν το κάτοπτρο του Lloyd, τη διάταξη του Newton και το συμβολόμετρο του Michelson. Κάθε μία από αυτές μας δίνει τη δυνατότητα να παρατηρήσουμε το φαινόμενο της συμβολής υπό διαφορετικές συνθήκες και γεωμετρίες, προσφέροντας πολύτιμη πληροφορία για την κυματική φύση του φωτός, καθώς και για τη μελέτη φυσικών παραμέτρων όπως το μήκος κύματος.

Η εργασία αυτή αποσκοπεί όχι μόνο στην κατανόηση του φαινομένου της συμβολής, αλλά και στην εξοικείωση με πειραματικές τεχνικές και μεθόδους ανάλυσης που χρησιμοποιούνται ευρέως στη φυσική. Μέσα από τη διαδικασία των μετρήσεων και των υπολογισμών θα ενισχυθεί η αντίληψή μας για τη συμπεριφορά του φωτός και θα τεθούν οι βάσεις για τη βαθύτερη κατανόηση πιο σύνθετων οπτικών φαινομένων.

## 2 Θεωρητική Εισαγωγή

### 2.1 Α. Κάτοπτρο του Lloyd - Μέτρηση μήκους κύματος Laser He-Ne



Εικόνα 1: Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου συμβολής στο κάτοπτρο του Lloyd.

Η παραπάνω σχηματική απεικόνιση παρουσιάζει τη γεωμετρία του φαινομένου συμβολής στο κάτοπτρο του Lloyd. Το λέιζερ He-Ne εκπέμπει μια συνεκτική ακτίνα, η οποία διαχωρίζεται σε δύο επιμέρους δέσμες. Η μία φτάνει απευθείας στο πέτασμα παρατήρησης, ενώ η άλλη ανακλάται από το κάτοπτρο, δημιουργώντας έτσι δύο φαινόμενες (συνεκτικές) πηγές φωτός  $S_1$  και  $S_2$ .

Για την παρατήρηση των ειδώλων των συμφώνων πηγών, παρεμβάλλεται ένας φακός απεικόνισης με εστιακή απόσταση  $f$ , ο οποίος σχηματίζει τα είδωλα  $S'_1$  και  $S'_2$ . Οι αποστάσεις  $s$ ,  $s'$  και  $d'$  αντιστοιχούν στην απόσταση των αρχικών και εικονικών πηγών από τον φακό και στην κατακόρυφη μεταξύ τους απόσταση. Το σημείο  $O$  αντιπροσωπεύει την οπτική τομή των δεσμών, ενώ οι πράσινες και μπλε εικονικές πηγές δηλώνουν την προβολή των ακτίνων στο επίπεδο παρατήρησης.

Η διάταξη αυτή επιτρέπει την ποιοτική και ποσοτική ανάλυση του συμβολικού προτύπου μέσω των ειδώλων, διευκολύνοντας τη μέτρηση του μήκους κύματος της δέσμης λέιζερ με υψηλή ακρίβεια.

Μαθηματικά οι τιμές  $s, d$  και  $D$  μπορούν να υπολογιστούν από τις παρακάτω σχέσεις:

Απεικόνισης φακού:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

Μεγέθυνση φακού:

$$\frac{s}{s'} = \frac{d}{d'} \quad (2)$$

Απόσταση πετάσματος-πηγών:

$$D = s + s' \quad (3)$$

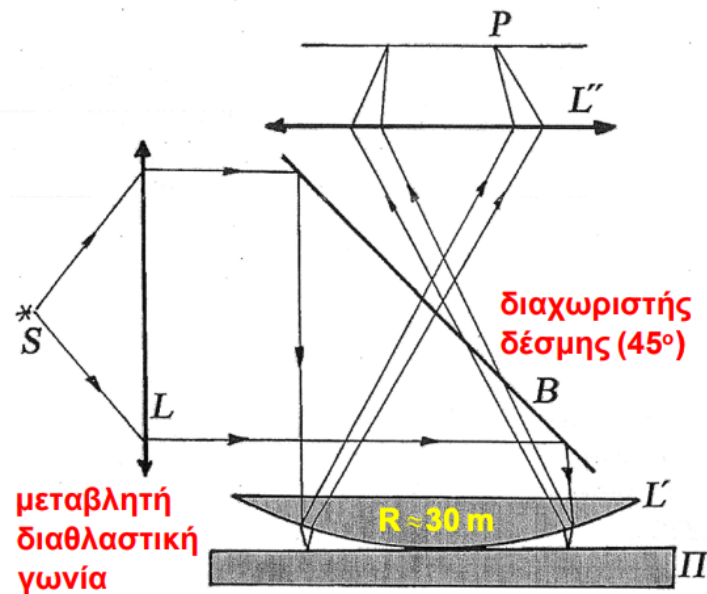
Ενώ για της αποστάσεις μεταξύ των κροσσών συμβολής στο πέτασμα θα ισχύει η σχέση:

$$\Delta x = \lambda D \frac{1}{d} \quad (4)$$

Η παραπάνω σχέση (4) έχει τη μορφή  $y = ax + \beta$ , και επομένως, αν από τα πειραματικά δεδομένα κατασκευαστεί το διάγραμμα  $\Delta x - \left(\frac{1}{d}\right)$ , τότε η κλίση της ευθείας που προκύπτει από την προσαρμογή στα σημεία του διαγράμματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του μήκους κύματος του laser. Δηλαδή:

$$\lambda = \frac{\alpha}{D} \quad (5)$$

## 2.2 Β. Διάταξη του Newton - Ακτίνα καμπυλότητας επιπεδόκυρτου φακού και μήκη κύματος λυχνίας Hg



Εικόνα 2: Επιπεδόκυρτος φακός επάνω σε πλακίδιο.

Η διάταξη των δακτυλίων του Newton απεικονίζεται στην παραπάνω εικόνα. Με τη χρήση ενός φακού και την τοποθέτηση ενός διαχωριστή δέσμης υπό γωνία  $45^\circ$ , διασφαλίζεται ότι οι ακτίνες προσπίπτουν κάθετα σε έναν επιπεδόκυρτο φακό με ακτίνα καμπυλότητας  $R$ . Στο σημείο επαφής του φακού με το γυάλινο πλακίδιο, ένα μέρος της προσπίπτουσας δέσμης ανακλάται, ενώ το υπόλοιπο διαθλάται και ανακλάται εκ νέου στην κάτω επιφάνεια του φακού ή στο πλακίδιο. Οι δύο ανακλώμενες ακτίνες, που έχουν διανύσει διαφορετικά οπτικά μονοπάτια, συμβάλλουν μεταξύ τους, οδηγώντας στον σχηματισμό κυκλικών συμβολικών χροσσών. Οι ακτίνες των χροσσών συμβολής μπορούν να υπολογιστούν από τις παρακάτω σχέσεις:

Μέγιστο:

$$r_m = \sqrt{\left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda R}{n_f}} \quad (6)$$

Ελάχιστο:

$$r_m = \sqrt{m \frac{\lambda R}{n_f}} \quad (7)$$

όπου:

- $r_m$ : η ακτίνα του  $m$ -οστού φωτεινού δακτυλίου,
- $\lambda$ : το μήκος κύματος του προσπίπτοντος φωτός,
- $R$ : η ακτίνα καμπυλότητας του φακού,

- $n_f$ : ο δείκτης διάθλασης του μέσου (στο πείραμα το μέσο είναι ο αέρας άρα  $n_f = 1$ ),
- $m$ : η τάξη του μέγιστου συμβολής.

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι, για δείκτη διάθλασης  $n_f = 1$ , η ακτίνα των σκοτεινών χροσσών δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$r_m = \sqrt{m\lambda R} \quad (8)$$

Επομένως, η διαφορά τετραγώνων μεταξύ δύο διαδοχικών χροσσών τάξης  $m$  και  $m + \Delta m$  δίνεται από:

$$\Delta r^2 = r_{m+\Delta m}^2 - r_m^2 = \lambda R \Delta m \quad (9)$$

Η παραπάνω σχέση (9) έχει τη μορφή  $y = ax + \beta$ , και επομένως, αν από τα πειραματικά δεδομένα κατασκευαστεί το διάγραμμα  $\Delta r^2 - \Delta m$ , τότε η κλίση της ευθείας που προκύπτει από την προσαρμογή στα σημεία του διαγράμματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της ακτίνας καμπυλότητας του επιπεδόκυρτου φακού. Δηλαδή:

$$\alpha = \lambda R \Rightarrow R = \frac{\alpha}{\lambda} \quad (10)$$

## 2.3 Γ. Συμβολόμετρο Michelson (Διάταξη Pohl) - Μέτρηση μήκους κύματος του πράσινου Laser

Από τη θεωρία της συμβολής έχει αποδειχθεί ότι, στο συμβολόμετρο Michelson, η μεταβολή της τάξης συμβολής μεταξύ δύο διαφορετικών θέσεων των κατόπτρων —δηλαδή ο αριθμός  $\Delta N$  των συμβολικών χροσσών που διέρχονται από το κέντρο κατά τη μετακίνηση του κινούμενου κατόπτρου— σχετίζεται με τη διαφορά αποστάσεων  $d_2 - d_1$  ως εξής:

$$2(d_2 - d_1) = (m_2 - m_1)\lambda = \Delta N \lambda$$

Αναδιατυπώνοντας, προκύπτει ότι η μετατόπιση του κατόπτρου εκφράζεται ως:

$$\Delta d = \frac{\lambda}{2} \Delta N \quad (11)$$

Η παραπάνω σχέση (11) έχει τη μορφή  $y = ax + \beta$ , και επομένως, αν από τα πειραματικά δεδομένα κατασκευαστεί το διάγραμμα  $\Delta d - \Delta N$ , τότε η κλίση της ευθείας που προκύπτει από την προσαρμογή στα σημεία του διαγράμματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του μήκους κύματος του πράσινου laser. Δηλαδή:

$$\alpha = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \lambda = 2\alpha \quad (12)$$

## 2.4 Δ. Συμβολόμετρο Michelson - Μέτρηση μήκους του φωτός λευκής λυχνίας

Το μήκος συμφωνίας  $I_c$  αποτελεί θεμελιώδη παράμετρο στη μελέτη των φαινομένων συμβολής και εκφράζει τη μέγιστη απόσταση κατά την οποία δύο φωτεινά κύματα παραμένουν συνεκτικά, δηλαδή διατηρούν σταθερή διαφορά φάσης και μπορούν να συμβάλλουν δημιουργώντας σταθερό πρότυπο συμβολής. Όσο μικρότερο είναι το φασματικό εύρος μιας πηγής (δηλαδή όσο πιο μονοχρωματική είναι), τόσο μεγαλύτερο είναι το μήκος συμφωνίας της.

Το μήκος συμφωνίας δίνεται από τη σχέση:

$$I_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \quad (13)$$

όπου:

- $\lambda$  είναι το κεντρικό μήκος κύματος της πηγής,
- $\Delta\lambda$  είναι το φασματικό εύρος της πηγής.

Γνωρίζοντας ότι το λευκό φως καλύπτει φασματικό εύρος από 400 nm έως 700 nm, έχουμε:

$$\begin{aligned}\Delta\lambda &= 700 \text{ nm} - 400 \text{ nm} = 300 \text{ nm} \\ \lambda &= \frac{700 \text{ nm} + 400 \text{ nm}}{2} = 550 \text{ nm}\end{aligned}$$

Τότε το μήκος συμφωνίας υπολογίζεται ως:

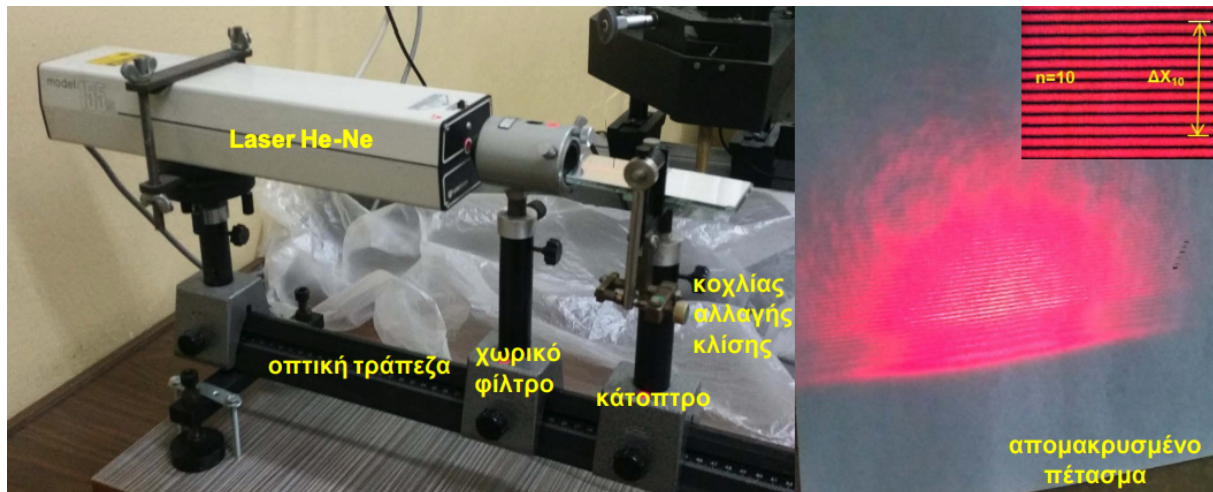
$$I_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} = \frac{(550 \text{ nm})^2}{300 \text{ nm}} = \frac{302,500 \text{ nm}^2}{300 \text{ nm}} = 1008,33 \text{ nm} \approx 1,01 \mu\text{m}$$

Συνεπώς, το μήκος συμφωνίας του λευκού φωτός είναι περίπου:  $I_c = 1,01\mu\text{m}$ .

### 3 Πειραματική διαδικασία

#### 3.1 Α. Κάτοπτρο του Lloyd - Μέτρηση μήκους κύματος Laser He-Ne

Στο πρώτο μέρος της πειραματικής εργασίας θα επιχειρήσουμε, με τη βοήθεια του κατόπτρου του Lloyd, να μετρήσουμε το μήκος κύματος του λέιζερ He-Ne. Η αντίστοιχη πειραματική διάταξη απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα.



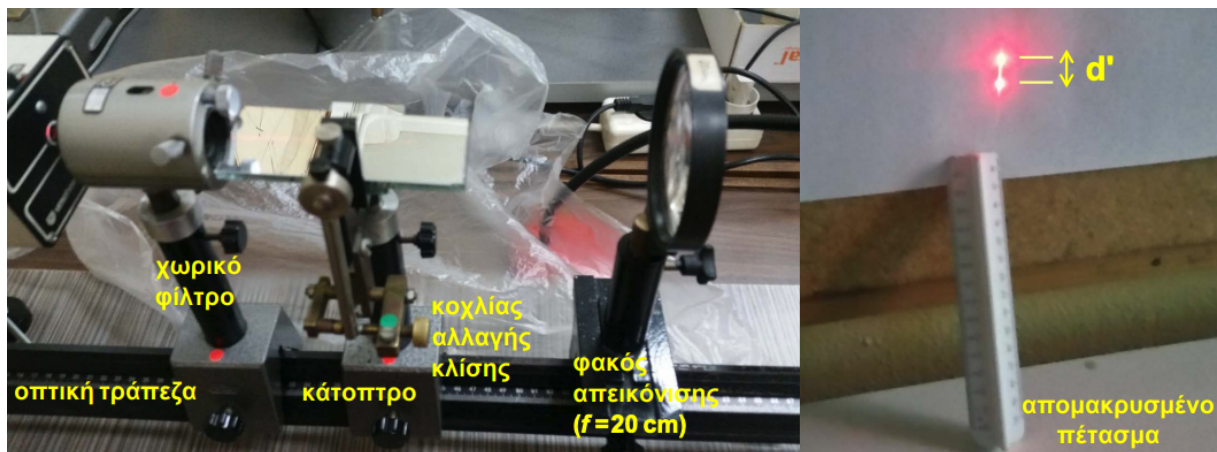
Εικόνα 3: Πειραματική διάταξη κατόπτρου Lloyd.

Η παραπάνω πειραματική διάταξη αποτελείτε από τα εξής στοιχεία:

- **Laser He-Ne:** Πηγή μονοχρωματικής και συνεκτικής ακτινοβολίας.
- **Οπτική τράπεζα:** Σταθερή βάση για τη στήριξη των οπτικών στοιχείων της διάταξης.
- **Χωρικό φίλτρο:** Χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της ποιότητας της δέσμης λέιζερ.
- **Κάτοπτρο:** Δημιουργεί την απαραίτητη ανάκλαση για την εμφάνιση του φαινομένου της συμβολής.
- **Κοχλίας αλλαγής κλίσης:** Επιτρέπει την ακριβή ρύθμιση της γωνίας του κατόπτρου.
- **Απομακρυσμένο πέτασμα:** Επιφάνεια παρατήρησης του προκύπτοντος συμβολικού προτύπου.
- **Εικόνα συμβολής:** Το συμβολικό πρότυπο εμφανίζεται ως διαδοχόμενες φωτεινές και σκοτεινές γραμμές.

Η πειραματική διάταξη της Εικόνας 1 μάς δίνει στο απομακρυσμένο πέτασμα το πρότυπο συμβολής. Για να παρατηρήσουμε τα είδωλα των σύμφωνων πηγών (τις δύο κηλίδες), θα χρειαστεί να παρεμβάλουμε πάνω στην οπτική τράπεζα, μετά τον κάτοπτρο έναν φακό απεικόνισης, ο οποίος έχει εστιακή απόσταση  $f = 20 \text{ cm}$ . Πειραματικά, η διάταξη μαζί με τον φακό παρουσιάζεται παρακάτω.





Εικόνα 4: Πειραματική διάταξη κατόπτρου Lloyd για την παρατήρηση των ειδώλων των συμφώνων πηγών.

Η διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί πειραματικά είναι η εξής: αφού ενεργοποιηθεί όλη η διάταξη και τοποθετηθεί ο φακός απεικόνισης πάνω στην οπτική τράπεζα, ρυθμίζουμε τη θέση του φακού κατά μήκος της τράπεζας, έτσι ώστε να επιτύχουμε σχετικά μικρή απόσταση μεταξύ των δύο ειδώλων, δηλαδή μικρό  $d'$ . Στη συνέχεια, καταγράφουμε την τιμή της απόστασης  $d'$ , καθώς και την απόσταση  $s'$  μεταξύ του φακού και του απομακρυσμένου πετάσματος. Ακολουθώντας, αφαιρούμε τον φακό και, από το πρότυπο συμβολής που εμφανίζεται στο απομακρυσμένο πέτασμα, καταγράφουμε την απόσταση μεταξύ 10 διαδοχικών χροσσών συμβολής,  $\Delta x_n$ . Τα πειραματικά δεδομένα που συλλέχθηκαν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

α/α	Απόσταση μεταξύ 10 χροσσών ( $\Delta x_n$ ) [cm]	Απόσταση ειδώλων των πηγών στο πέτασμα ( $d'$ ) [cm]	Απόσταση του φακού απεικόνισης από το πέτασμα ( $s'$ ) [cm]
1	2,35	1,5	337
2	3	1,3	338
3	1,4	2,6	338
4	1,85	1,9	337,7

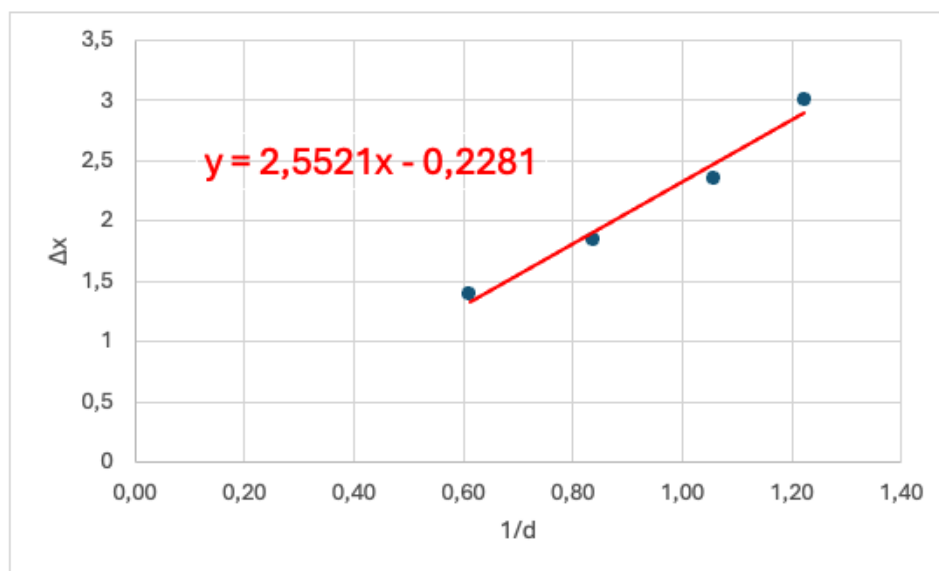
Πίνακας 1: Πειραματικά δεδομένα πειράματος στο κάτοπτρο του Lloyd.

Με βάση τα πειραματικά δεδομένα του παραπάνω πίνακα και τις εξισώσεις (1) - (2) και (3), πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητοι υπολογισμοί που οδήγησαν στα αποτελέσματα του παρακάτω πίνακα.

f (mm)									
200									
$\alpha/\alpha$	Αρ. Κροσσών (n)	$\Delta x n$ (mm)	$\Delta x$ (mm)	$d'$ (mm)	$s'$ (mm)	$s=f*s'/(s'-f)$	$D=s+s'$	$d=d's/s'$	$1/d$
1	10	23,5	2,35	15	3370	212,62	3582,62	0,95	1,06
2	10	30	3	13	3380	212,58	3592,58	0,82	1,22
3	10	14	1,4	26	3380	212,58	3592,58	1,64	0,61
4	10	18,5	1,85	19	3377	212,59	3589,59	1,20	0,84

Πίνακας 2: Απαραίτητες τιμές για την εύρεση του μήκους κύματος του Laser He-Ne.

Από τις παραπάνω τιμές μπορεί να κατασκευαστεί το διάγραμμα  $\Delta x - \left(\frac{1}{d}\right)$ , το οποίο παρουσιάζεται παρακάτω.



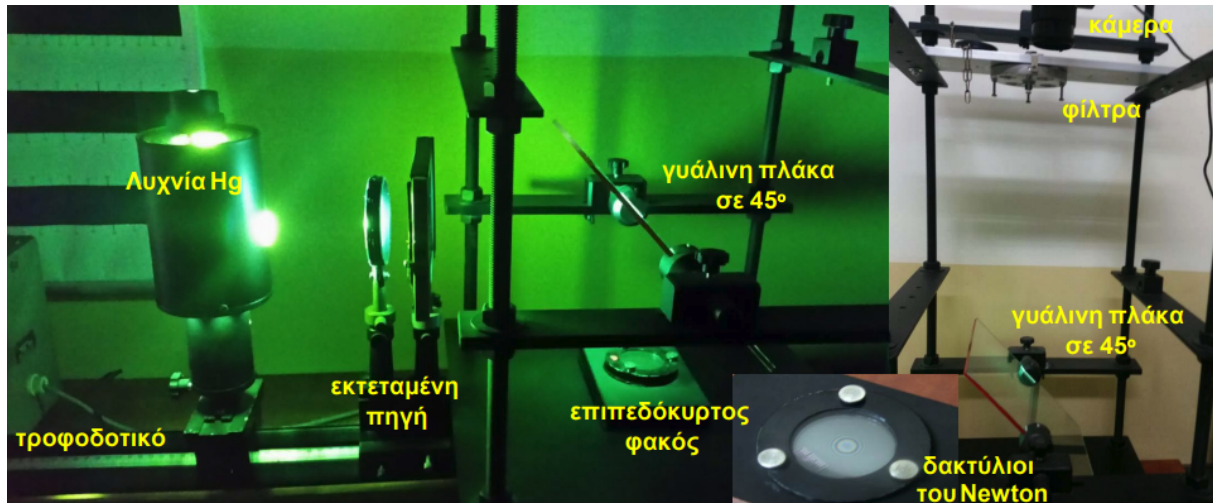
Διάγραμμα 2: Διάγραμμα  $\Delta x - \left(\frac{1}{d}\right)$  μέσω των δεδομένων του πίνακα 2.

Παρατηρούμε από το παραπάνω διάγραμμα ότι η κλίση της ευθείας που προσαρμόζεται στα πειραματικά σημεία είναι  $a = 2,5521$ . Επιπλέον, αν λάβουμε τη μέση τιμή των αποστάσεων  $D$  από τον Πίνακα 2, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι  $D = 3589,34 \text{ mm}$ . Συνεπώς, με βάση τη σχέση (5), το μήκος κύματος του laser υπολογίζεται ως:

$$(5) \Rightarrow \lambda = \frac{\alpha}{D} = \frac{2,5521}{3589,34} = 0,000711 \text{ mm} = 711 \text{ nm}$$

### 3.2 Β. Διάταξη του Newton - Ακτίνα καμπυλότητας επιπεδόκυρτου φακού και μήκη κύματος λυχνίας Hg

Στο δεύτερο μέρος της εργαστηριακής άσκησης, στόχος μας είναι ο υπολογισμός της ακτίνας καμπυλότητας του επιπεδόκυρτου φακού καθώς και των μηκών κύματος της λυχνίας υδραργύρου (Hg), μέσω της διάταξης του Newton. Η αντίστοιχη πειραματική διάταξη παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 5: Πειραματική διάταξη Newton.

Η παραπάνω πειραματική διάταξη αποτελείτε από τα εξής στοιχεία:

- Λυχνία υδραργύρου (Hg) — πηγή φωτός.
- Τροφοδοτικό για την παροχή ενέργειας στη λυχνία.
- Σύστημα επέκτασης της φωτεινής πηγής (εκτεταμένη πηγή).
- Επιπεδόκυρτος φακός — σχηματίζει τους δακτυλίους του Newton.
- Υάλινη πλάκα τοποθετημένη υπό γωνία  $45^\circ$  (χρησιμοποιείται για ανάκλαση).
- Κάμερα για την καταγραφή των δακτυλίων συμβολής.
- Φίλτρα επιλογής συγκεκριμένων μηκών κύματος.
- Ορατοί δακτύλιοι του Newton στο σημείο επαφής του φακού με την υάλινη επιφάνεια.

#### Σημείωση:

Λόγω σφάλματος στο λογισμικό καταγραφής, οι αρχικά μετρηθείσες τιμές των διαμέτρων των σκοτεινών χροσσών προέκυψαν περίπου τριπλάσιες των πραγματικών. Για τον λόγο αυτό, στους τρεις επόμενους πίνακες οι τιμές των διαμέτρων έχουν διορθωθεί δια του 3, ώστε να ανταποκρίνονται στην πραγματική κλίμακα.

### 3.2.1 1. Υπολογισμός ακτίνας καμπυλότητας επιπεδόκυρτου φακού

Η πειραματική διαδικασία που ακολουθείται περιλαμβάνει την ενεργοποίηση ολόκληρης της διάταξης, συμπεριλαμβανομένου του υπολογιστή που λαμβάνει την εικόνα συμβολής από την κάμερα. Στη συνέχεια, τοποθετείται το πράσινο φίλτρο στο οπτικό σύστημα και εκκινείται το κατάλληλο λογισμικό στον υπολογιστή. Καταγράφεται η εικόνα συμβολής και πραγματοποιούνται μετρήσεις των διαμέτρων των σκοτεινών χροσσών. Τα πειραματικά δεδομένα που προέκυψαν από τη διαδικασία αυτή παρατίθενται στον Πίνακα 3.

α/α	Τάξη σκοτεινού χροσσού μετρούμενου από τον κεντρικό	Διάμετρος σκοτεινού χροσσού, 2r <sub>n</sub> (mm)
1	1	7,30
2	2	10,83
3	3	13,53
4	4	15,71
5	5	17,53
6	6	19,31

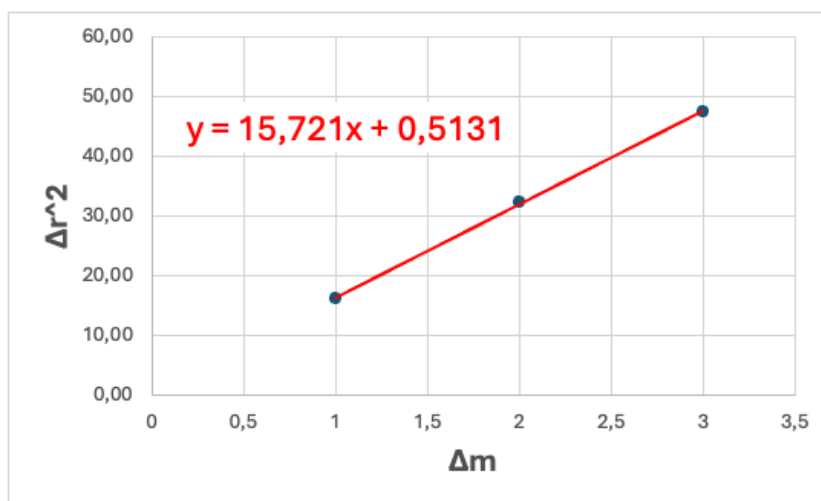
Πίνακας 3: Πειραματικά δεδομένα πράσινου φίλτρου στην διάταξη του Newton.

Σύμφωνα με τη θεωρία, για τον υπολογισμό της ακτίνας καμπυλότητας του επιπεδόκυρτου φακού απαιτείται η κατασκευή του διαγράμματος  $\Delta r^2 - \Delta m$ . Για τον σκοπό αυτό, είναι αναγκαίο να προηγηθούν ορισμένοι υπολογισμοί, οι οποίοι παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

α/α	Σχετική τάξη χροσσού (m)	Διάμετρος χροσσού 2r <sub>m</sub> (mm)	Ακτίνα χροσσού r <sub>m</sub> (mm)	r <sub>m</sub> <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	Διαφορά τάξης χροσσών	Δm	Δr <sup>2</sup> = r <sup>2</sup> (m+Δm) - r <sub>m</sub> <sup>2</sup>
1	1	7,30	3,65	13,31	2η - 1η	1	16,04
2	2	10,83	5,42	29,35	3η - 1η	2	32,34
3	3	13,53	6,76	45,76	4η - 1η	3	47,48
4	4	15,71	7,85	61,69	5η - 1η	4	-
5	5	17,53	8,76	76,79	6η - 1η	5	-
6	6	19,31	9,66	93,24	7η - 1η	6	-

Πίνακας 4: Δεδομένα για τον σχεδιασμό της γραφικής παράστασης  $\Delta r^2 - \Delta m$ .

Σύμφωνα με τα παραπάνω πειραματικά δεδομένα το διάγραμμα  $\Delta r^2 - \Delta m$  παρουσιάζεται παρακάτω.



Διάγραμμα 4: Διάγραμμα  $\Delta r^2$ – $\Delta m$ .

Παρατηρούμε από το παραπάνω διάγραμμα ότι η κλίση της ευθείας που προσαρμόζεται στα πειραματικά σημεία είναι  $a = 15,721$ . Συνεπώς, με βάση τη σχέση (10), η ακτίνα καμπυλότητας του επιπεδόκυρτου φακού υπολογίζεται ως:

$$(10) \Rightarrow R = \frac{\alpha}{\lambda} = \frac{15,721 \text{ mm}^2}{456 \text{ nm}} = 29 \text{ m}$$

Η υπολογισθείσα τιμή είναι πολύ κοντά στη θεωρητικά αναμενόμενη ( $R = 30 \text{ m}$ ), γεγονός που επιβεβαιώνει την ορθότητα της πειραματικής διαδικασίας και την αξιοπιστία των μετρήσεων.

### 3.2.2 2. Υπολογισμός του μήκους κύματος της κίτρινης γραμμής του Hg.

Με τον ίδιο τρόπο μπορεί να υπολογιστεί και το μήκος κύματος της κίτρινης γραμμής του υδραργύρου (Hg). Πειραματικά, απαιτείται η αντικατάσταση του πράσινου φίλτρου με το αντίστοιχο κίτρινο στην πειραματική διάταξη και, ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία, η καταγραφή των διαμέτρων των σκοτεινών κροσσών. Τα πειραματικά δεδομένα που προέκυψαν παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

α/α	Τάξη σκοτεινού κροσσού μετρούμενου από τον κεντρικό	Διάμετρος σκοτεινού κροσσού, $2rn$ (mm)
1	1	7,69
2	2	11,37
3	3	13,82
4	4	16,35
5	5	18,30
6	6	20,34

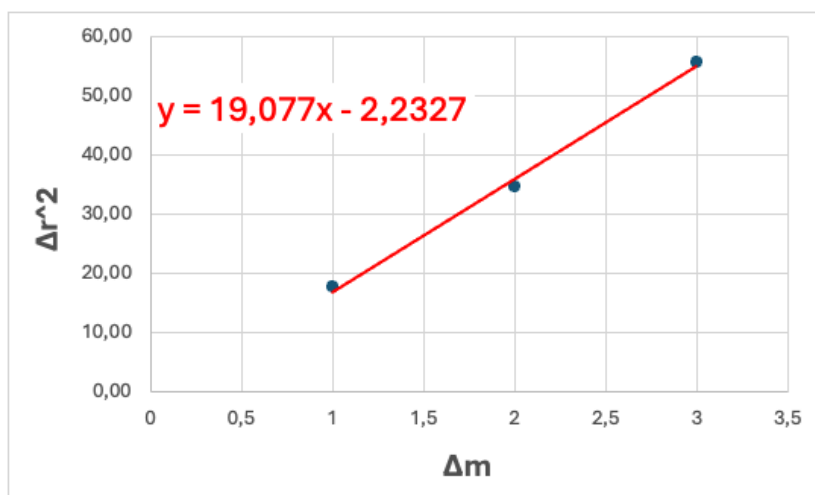
Πίνακας 5: Πειραματικά δεδομένα μέρους 2.

Για την κατασκευή της γραφικής παράστασης, με την ίδια μεθοδολογία όπως και προηγουμένως, απαιτείται ο υπολογισμός ορισμένων τιμών. Οι υπολογισμοί αυτοί παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

α/α	Σχετική τάξη κροσσού (m)	Διάμετρος κροσσού 2rm (mm)	Ακτίνα κροσσού rn (mm)	rm <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	Διαφορά τάξης κροσσών	Δm	Δr <sup>2</sup> = r <sup>2</sup> (m+Δm) - rm <sup>2</sup>
1	1	7,69	3,84	14,77	2η - 1η	1	17,56
2	2	11,37	5,69	32,33	3η - 1η	2	34,49
3	3	13,82	6,91	47,75	4η - 1η	3	55,71
4	4	16,35	8,17	66,82	5η - 1η	4	-
5	5	18,30	9,15	83,77	6η - 1η	5	-
6	6	20,34	10,17	103,46	7η - 1η	6	-

Πίνακας 6: Δεδομένα για τον σχεδιασμό της γραφικής παράστασης  $\Delta r^2 - \Delta m$ .

Σύμφωνα με τα παραπάνω πειραματικά δεδομένα το διάγραμμα  $\Delta r^2 - \Delta m$  παρουσιάζεται παρακάτω.



Διάγραμμα 6: Διάγραμμα  $\Delta r^2 - \Delta m$ .

Παρατηρούμε από το παραπάνω διάγραμμα ότι η κλίση της ευθείας που προσαρμόζεται στα πειραματικά σημεία είναι  $a = 19,077$ . Συνεπώς, με βάση τη σχέση (10), από την ακτίνα καμπυλότητας του επιπεδόκυρτου φακού μπορούμε να υπολογίσουμε το μήκος κύματος της κιτρινης γραμμής:

$$(10) \Rightarrow R = \frac{a}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{a}{R} = \frac{19,077 \text{ mm}^2}{29 \text{ m}} = 657,8 \text{ nm}$$

Από την πειραματική επεξεργασία των δεδομένων προέκυψε ότι το μήκος κύματος της κίτρινης γραμμής του υδραργύρου είναι  $\lambda = 657,8 \text{ nm}$ . Η τιμή αυτή παρουσιάζει σημαντική απόκλιση από την θεωρητικά αναμενόμενη τιμή των  $578 \text{ nm}$ , η οποία πιθανώς οφείλεται σε συστηματικά σφάλματα κατά τη μέτρηση ή τον υπολογισμό των διαμέτρων των συμβολικών κροσσών.

### 3.2.3 3. Υπολογισμός του μήκους κύματος της μπλε γραμμής του Hg.

Ακολουθώντας την ίδια πειραματική διαδικασία, τοποθετείται το μπλε φίλτρο στην οπτική διάταξη και, με τη βοήθεια του λογισμικού, πραγματοποιείται η καταγραφή των διαμέτρων των σκοτεινών κροσσών. Οι μετρήσεις αυτές παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

α/α	Τάξη σκοτεινού κροσσού μετρούμενου από τον κεντρικό	Διάμετρος σκοτεινού κροσσού, 2r (mm)
1	1	6,56
2	2	9,65
3	3	11,92
4	4	13,88
5	5	16,27
6	6	18,17

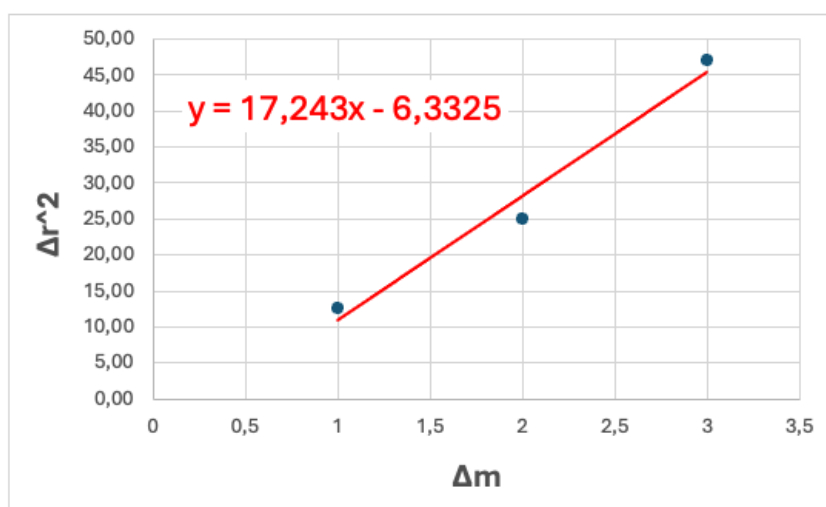
Πίνακας 7: Πειραματικά δεδομένα μέρους 3.

Ενώ οι υπολογιζόμενες τιμές παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

α/α	Σχετική τάξη κροσσού (m)	Διάμετρος κροσσού 2r (mm)	Ακτίνα κροσσού r (mm)	r <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	Διαφορά τάξης κροσσών	Δm	Δr <sup>2</sup> = r <sup>2</sup> (m+Δm) - r <sup>2</sup> m
1	1	6,56	3,28	10,74	2η - 1η	1	12,56
2	2	9,65	4,83	23,30	3η - 1η	2	24,86
3	3	11,92	5,96	35,51	4η - 1η	3	47,04
4	4	13,88	6,94	48,16	5η - 1η	4	-
5	5	16,27	8,13	66,17	6η - 1η	5	-
6	6	18,17	9,09	82,55	7η - 1η	6	-

Πίνακας 8: Δεδομένα για τον σχεδιασμό της γραφικής παράστασης  $\Delta r^2 - \Delta m$ .

Ενώ το αντίστοιχο διάγραμμα παρουσιάζεται παρακάτω.



Διάγραμμα 8: Διάγραμμα  $\Delta r^2 - \Delta m$ .



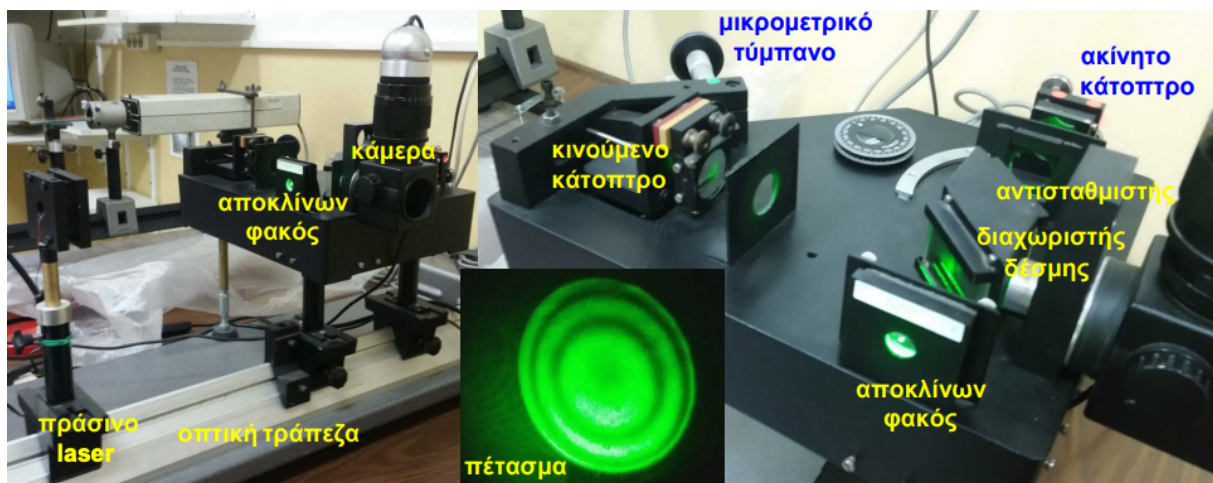
Παρατηρούμε από το παραπάνω διάγραμμα ότι η κλίση της ευθείας που προσαρμόζεται στα πειραματικά σημεία είναι  $a = 17,243$ . Συνεπώς, με βάση τη σχέση (10), από την ακτίνα καμπυλότητας του επιπεδόκυρτου φακού μπορούμε να υπολογίσουμε το μήκος κύματος της μπλέ γραμμής:

$$(10) \Rightarrow R = \frac{\alpha}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{\alpha}{R} = \frac{17,243 \text{ mm}^2}{29 \text{ m}} = 595 \text{ nm}$$

Από την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων προέκυψε μήκος κύματος  $\lambda = 595 \text{ nm}$  για την μπλε γραμμή του υδραργύρου. Η τιμή αυτή αποκλίνει σημαντικά από την αναμενόμενη θεωρητική τιμή των  $435,8 \text{ nm}$ , γεγονός που υποδηλώνει την ύπαρξη συστηματικού σφάλματος στις μετρήσεις ή τους υπολογισμούς. Πιθανές αιτίες περιλαμβάνουν ανακρίβεια στην καταγραφή των διαμέτρων, εσφαλμένη αντιστοίχιση τάξης συμβολής ή χρήση φίλτρου που δεν απομονώνει επαρκώς την επιθυμητή φασματική γραμμή.

### 3.3 Γ. Συμβολόμετρο Michelson (Διάταξη Pohl) - Μέτρηση μήκους κύματος του πράσινου Laser

Στο τρίτο μέρος της παρούσας εργαστηριακής άσκησης, στόχος είναι ο προσδιορισμός του μήκους κύματος της πράσινης ακτινοβολίας Laser, μέσω της χρήσης του συμβολομέτρου Michelson. Η πειραματική διάταξη του συμβολομέτρου απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 6: Πειραματική διάταξη συμβολόμετρου Michelson.

Πειραματικά, η διαδικασία που θα πρέπει να ακολουθηθεί είναι η εξής: Έχοντας ενεργοποιήσει την πειραματική διάταξη του συμβολομέτρου Michelson και διασφαλίσει τη σταθερότητα της δέσμης από την πηγή Laser, αρχικά τοποθετούμε το κινούμενο κάτοπτρο σε μία συγκεκριμένη αρχική θέση και καταγράφουμε την ένδειξη του μικρομετρικού τυμπάνου, σημειώνοντας την τιμή  $d_1$  ( $d_1 = 0$ ). Στη συνέχεια, παρατηρούμε την κίνηση των συμβολικών χροσών καθώς απομακρύνουμε σταδιακά το κινούμενο κάτοπτρο. Κατά την απομάκρυνση, παρακολουθούμε τον αριθμό των φωτεινών ή σκοτεινών χροσών που περνούν από το κέντρο του πεδίου παρατήρησης. Η μετατόπιση συνεχίζεται μέχρι να αλλάξει ο κεντρικός χροσός



κατά πλήθος  $\Delta N = 20, 25, 30, \dots, 50$ . Για κάθε μεταβολή  $\Delta N$ , καταγράφεται η νέα ένδειξη του τυμπάνου  $d_2$ , και υπολογίζεται η μετατόπιση του κατόπτρου ως:

$$\Delta d = (d_2 - d_1) \times 2 \mu m$$

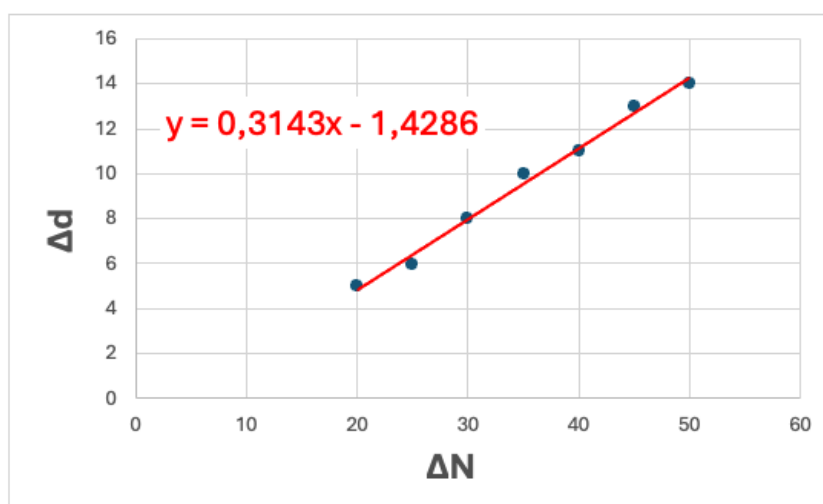
Ο πολλαπλασιασμός με τον συντελεστή  $2 \mu m$  πραγματοποιείται διότι κάθε διαβάθμιση του μικρομετρικού τυμπάνου αντιστοιχεί σε πραγματική μετατόπιση του κινούμενου κατόπτρου κατά  $2 \mu m$  στον χώρο. Τέλος, κατασκευάζουμε το διάγραμμα  $\Delta d - \Delta N$ , από το οποίο προκύπτει η γραμμική συσχέτιση που μας επιτρέπει να προσδιορίσουμε το μήκος κύματος  $\lambda$  της πράσινης ακτινοβολίας του πράσινου διοδικού Laser.

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα που συλλέχθηκαν κατά την εκτέλεση της περιγραφείσας διαδικασίας.

α/α	Μετακινούμενοι σκοτεινοί κροσσοί στο κέντρο, $\Delta N$	Γραμμές μετακίνησης του τυμπάνου στο συμβολόμετρο $d_2 \times 2 \mu m$ ( $\mu m$ )
1	20	5
2	25	6
3	30	8
4	35	10
5	40	11
6	45	13
7	50	14

Πίνακας 9: Πειραματικά δεδομένα διάταξης POHL.

Με βάση τα παραπάνω πειραματικά δεδομένα, δύναται να κατασκευαστεί το διάγραμμα  $\Delta d - \Delta N$ , το οποίο παρουσιάζεται ακολούθως.



Διάγραμμα 9: Διάγραμμα  $\Delta d - \Delta N$  μέσω των πειραματικών δεδομένων της διάταξης POHL.

Σύμφωνα με την σχέση (11) για το μήκος κύματος του πράσινου Laser, προκύπτει ότι:

$$(11) \Rightarrow \lambda = 2\alpha = 2 \cdot 0,3143 \mu\text{m} = 629 \text{ nm}$$

### 3.4 Δ. Συμβολόμετρο Michelson - Μέτρηση μήκους του φωτός λευκής λυχνίας

Στο τέταρτο και τελευταίο μέρος της παρούσας εργαστηριακής άσκησης θα επιχειρήσουμε μέσω της παρακάτω πειραματικής διάταξης να μετρήσουμε το μήκος συμφωνίας του φωτός της λευκής λυχνίας.



Εικόνα 7: Πειραματική διάταξη συμβολόμετρου Michelson για την μέτρηση του μήκους συμφωνίας του φωτός της λευκής λυχνίας.

Πειραματικά, η διαδικασία έχει ως εξής: Έχοντας ενεργοποιήσει όλη τη διάταξη, κινούμε το μικρομετρικό τύμπανο προς τη μία κατεύθυνση μέχρι την πλήρη εξαφάνιση των συμβολικών χροσών και καταγράφουμε την αντίστοιχη τιμή. Στη συνέχεια, επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία μετακινώντας το τύμπανο προς την αντίθετη κατεύθυνση, καταγράφοντας και πάλι τη σχετική ένδειξη. Με αυτόν τον τρόπο, καταγράφουμε τις γραμμές μετακίνησης του τυμπάνου στο συμβολόμετρο για την πλήρη εξαφάνιση των χροσών. Τα πειραματικά δεδομένα που αντλήθηκαν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

<b>α/α</b>	<b>Γραμμές μετακίνησης του τυμπάνου στο συμβολόμετρο για πλήρη εξαφάνιση των κροσσών (d2-d1) <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Μήκος συμφωνίας <math>I_c</math> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
<b>1</b>	<b>3</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>3,5</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>3,5</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>3,5</b>	<b>7</b>
<b>Μέση τιμή <math>I_c</math> =</b>		<b>6,75</b>

Πίνακας 10: Πειραματικά δεδομένα συμβολόμετρου Michelson.

Θεωρητικά, το μήκος συμφωνίας του λευκού φωτός, λαμβάνοντας υπόψη το φασματικό εύρος 400–700 nm, υπολογίζεται ίσο με 1,01  $\mu\text{m}$ . Πειραματικά, ωστόσο, το μήκος συμφωνίας που προσδιορίστηκε ανέρχεται σε 6,75  $\mu\text{m}$ . Η απόκλιση αυτή μπορεί να αποδοθεί σε διάφορους παράγοντες, όπως η μη ιδανική μονοχρωματικότητα της πηγής, η περιορισμένη ευαισθησία του οφθαλμού στην πλήρη εξαφάνιση των συμβολικών κροσσών, καθώς και σε ενδεχόμενες πειραματικές αβεβαιότητες κατά τη ρύθμιση και καταγραφή των μετατοπίσεων. Επιπλέον, στην πράξη, το φάσμα της πηγής μπορεί να είναι πιο περιορισμένο από το πλήρες εύρος 400–700 nm, οδηγώντας σε μεγαλύτερο μήκος συμφωνίας σε σχέση με την ιδανική θεωρητική τιμή.

## 4 Συμπεράσματα

Μέσα από την παρούσα εργασία καταφέραμε να μελετήσουμε πειραματικά το φαινόμενο της συμβολής του φωτός χρησιμοποιώντας διαφορετικές πειραματικές διατάξεις, όπως το κάτοπτρο του Lloyd, οι δακτύλιοι του Newton και το συμβολόμετρο του Michelson. Η ανάλυση των δεδομένων μάς επέτρεψε να υπολογίσουμε σημαντικές φυσικές ποσότητες, όπως το μήκος κύματος και το μήκος συμφωνίας.

Παρά τις μικρές αποκλίσεις μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών τιμών —όπως παρατηρήθηκε στην περίπτωση του μήκους συμφωνίας του λευκού φωτός— τα αποτελέσματα κρίνονται ικανοποιητικά και εντός αποδεκτών ορίων. Οι αποκλίσεις αυτές μπορούν να αποδοθούν σε πειραματικές αβεβαιότητες, περιορισμούς των οργάνων, ή/και σε θεωρητικές προσεγγίσεις που απλοποιούν την πραγματικότητα.

Συνολικά, η πειραματική εργασία κρίνεται επιτυχής, καθώς επιτεύχθηκε ο βασικός στόχος: η κατανόηση του φαινομένου της συμβολής και η πρακτική εξοικείωση με τις μεθόδους και τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη της κυματικής φύσης του φωτός. Τα αποτελέσματα υποστηρίζουν σε μεγάλο βαθμό τη θεωρητική θεμελίωση της συμβολής και επιβεβαιώνουν την εγχυρότητα των πειραματικών διαδικασιών που εφαρμόστηκαν.