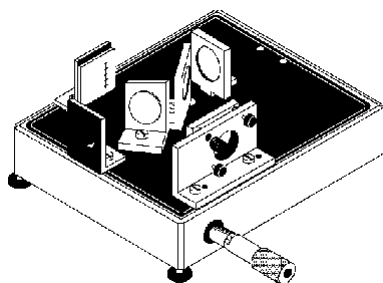
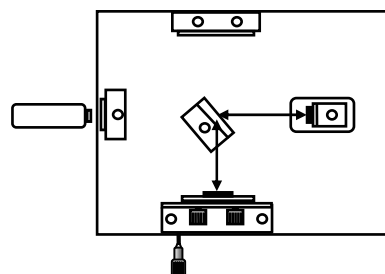


---

ΑΣΚΗΣΗ  
ΝΟ1

---

ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΟ MICHELSON  
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ  
LASER He-Ne



Γιώργος Μήτσου

Απρίλιος 2007

## A. ΘΕΩΡΙΑ

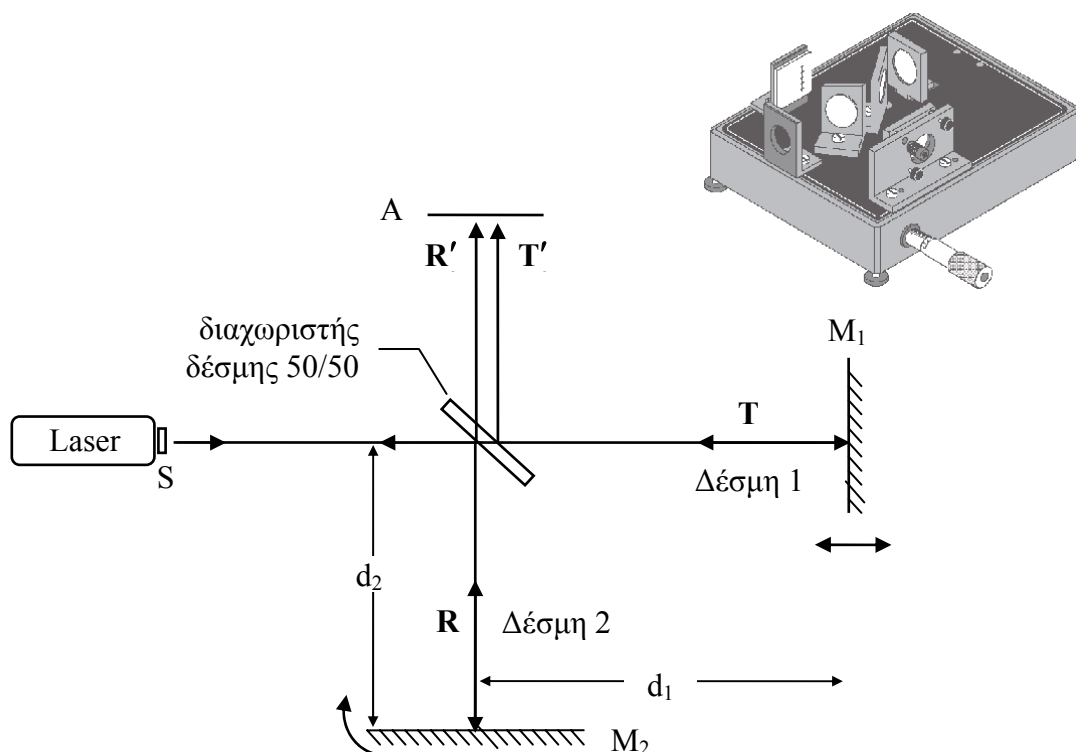
### Εισαγωγή

Τα οπτικά συμβολόμετρα είναι όργανα υψηλής ακρίβειας που μπορούν να δημιουργήσουν ακριβή και ελεγχόμενη διαφορά οπτικών δρόμων ανάμεσα σε δυο δέσμες φωτός, για τη μελέτη φαινομένων συμβολής. Το πιο γνωστό ίσως συμβολόμετρο είναι το συμβολόμετρο Michelson, που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα Michelson Morley (1886).

Για την κατανόηση και καλύτερη εκτέλεση της άσκησης αυτής, εκτός από τη θεωρία που θ' αναπτυχθεί παρακάτω, απαραίτητη είναι η γνώση της θεωρίας της συμβολής συμφώνου φωτός.

### 1. Διάταξη – Αρχή λειτουργίας

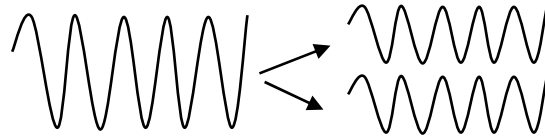
Η βασική διάταξη αυτού του συμβολόμετρου (**Σχήμα 1**) περιλαμβάνει ένα διαχωριστή δέσμης και δυο καθρέπτες κάθετους μεταξύ τους. Ο διαχωριστής δέσμης είναι μια γυάλινη πλάκα με λεπτή μεταλλική επίστρωση ώστε να παρουσιάζει μια ανακλαστικότητα γύρω στο 50%. Έτσι η αρχική δέσμη του laser χωρίζεται περνώντας το



**Σχήμα 1.** Το συμβολόμετρο Michelson.

διαχωριστή σε δυο τμήματα: ένα που διαδίδεται (T) κατ' ευθείαν στον καθρέπτη  $M_1$  και ένα που ανακλάται (R) στον διαχωριστή δέσμης (που βρίσκεται υπό γωνία  $45^\circ$  ως προς την αρχική δέσμη) και κατευθύνεται στον καθρέπτη  $M_2$ . Οι δυο δέσμες μετά την ανάκλασή τους στους καθρέπτες  $M_1$  και  $M_2$  ξαναπερνούν από το διαχωριστή. Κατ'

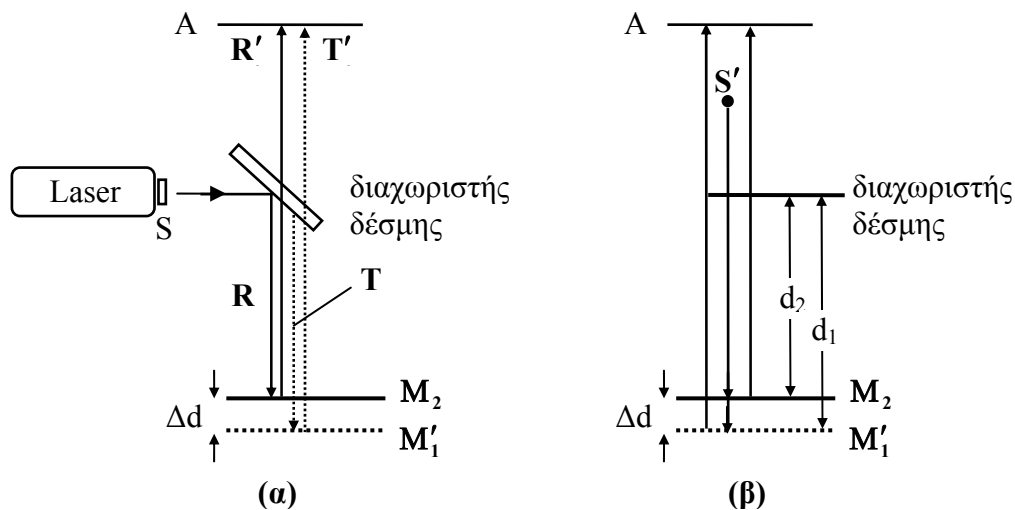
αυτό τον τρόπο ένα μέρος της δέσμης 1 ανακλάται προς την κατεύθυνση A και ένα μέρος της δέσμης 2 περνάει το διαχωριστή προς την κατεύθυνση A όπου συμβάλλει με το μέρος της δέσμης 1 (συμβολή δυο ακτίνων, σε αντίθεση με τα συμβολόμετρα πολλαπλών ακτίνων, όπως για παράδειγμα το συμβολόμετρο Fabry-Perot) και δημιουργεί κροσσούς συμβολής αν στη θέση A τοποθετηθεί οθόνη. Αυτή η διαδικασία



Σχήμα 2

είναι γνωστή ως συμβολή με διαίρεση πλάτους της ακτινοβολίας. (Σχήμα 2).

Για να κατανοήσουμε καλύτερα τη διαφορά των οπτικών δρόμων των δυο ακτίνων θεωρούμε το γραμμικό οπτικό ισοδύναμο του συμβολόμετρου, δηλαδή τοποθετούμε όλα τα οπτικά του στοιχεία στον ίδιο οπτικό άξονα (Σχήμα 3). Πρώτον αντικαθιστούμε τον καθρέπτη  $M_1$  με το είδωλό του, όπως αυτό φαίνεται όταν κοιτάζουμε στο



Σχήμα 3. (α) Οπτικό ισοδύναμο. (β) Γραμμικό οπτικό ισοδύναμο.

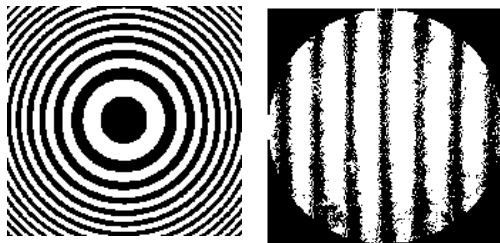
διαχωριστή δέσμης από το Laser (Σχήμα 3α). Η έξοδος του Laser S, την οποία θεωρούμε ως την αρχική φωτεινή πηγή, αντικαθίσταται από το είδωλό της  $S'$ , όπως φαίνεται στο διαχωριστή δέσμης αν κοιτάξουμε από τον καθρέπτη  $M_2$ . Στην ουσία έχουμε δημιουργήσει ένα εικονικό λεπτό φιλμ πάχους  $\Delta d$  με τις δυο ακτίνες που ξεκινούν από την πηγή  $S'$  να συμβάλουν στο A, αφού ανακλαστούν στις δυο επιφάνειες  $M_1$  και  $M_2$ . Η διαφορά των οπτικών δρόμων των δυο ακτίνων σ' αυτή την περίπτωση θα είναι  $2\Delta d$  (σημείωση: ο καθρέπτης  $M_1$  δεν είναι σταθερός, αλλά μετακινείται σε διεύθυνση κάθετη ως προς την επιφάνειά του).

Το αποτέλεσμα της συμβολής των δυο ακτίνων θα είναι μέγιστο, δηλαδή στο κέντρο της οθόνης θα παρουσιαστεί φωτεινός κροσσός (ενισχυτική συμβολή) αν η διαφορά των οπτικών δρόμων είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος  $\lambda$ :

$$2\Delta d = n\lambda \quad (1)$$

## 2. Σχηματισμός κροσσών συμβολής

Για να καταλάβουμε πώς σχηματίζονται οι κροσσοί πιο μακριά από το κέντρο της οθόνης, θα εξετάσουμε δυο περιπτώσεις. Αν η πηγή S είναι σημειακή, θα δημιουργηθούν κυκλικοί κροσσοί συμβολής. Από την άλλη πλευρά αν η πηγή τροφοδοτεί το συμβολόμετρο με παράλληλη δέσμη φωτός (π.χ η έξοδος του Laser χωρίς οπτικά



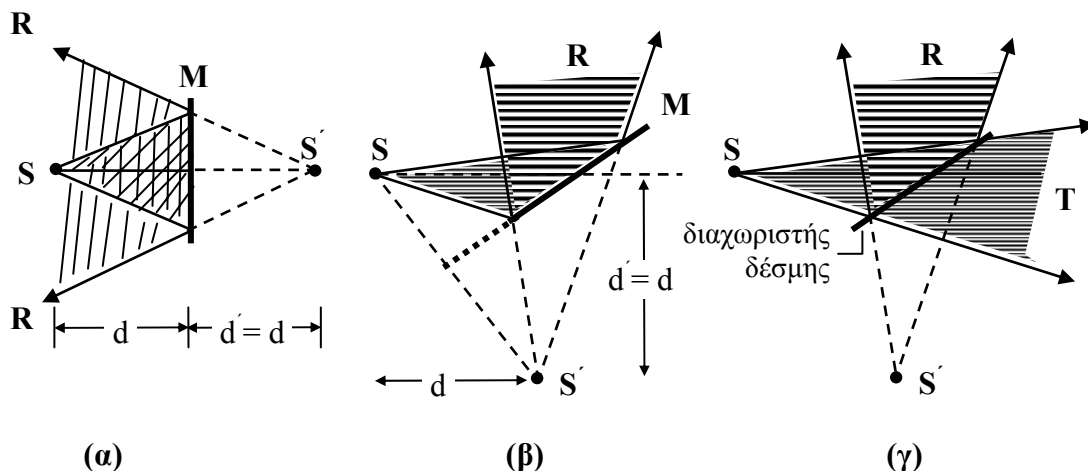
(α)

(β)

**Σχήμα 4.** (α) ομόκεντροι κυκλικοί κροσσοί συμβολής. (β) ισοπαχείς κροσσοί συμβολής.

βοηθήματα), θα παρατηρήσουμε ισοπαχείς και παράλληλους μεταξύ τους κροσσούς (Σχήμα 4). Πριν όμως προχωρήσουμε στην ανάλυση των δυο αυτών περιπτώσεων, ας εξετάσουμε συνοπτικά τη συμπεριφορά των καθρέπτων και των διαχωριστών δέσμης, όταν προσπίπτει στην επιφάνειά τους φως.

Στο Σχήμα 5α, οι ακτίνες μιας σημειακής φωτεινής πηγής S που ανακλώνται στην επιφάνεια επίπεδου κάτοπτρου, φαίνονται να προέρχονται από το φανταστικό είδωλο S' της πηγής S που βρίσκεται πίσω από το κάτοπτρο και είναι συμμετρικό του S ως προς το επίπεδο του καθρέπτη.



(α)

(β)

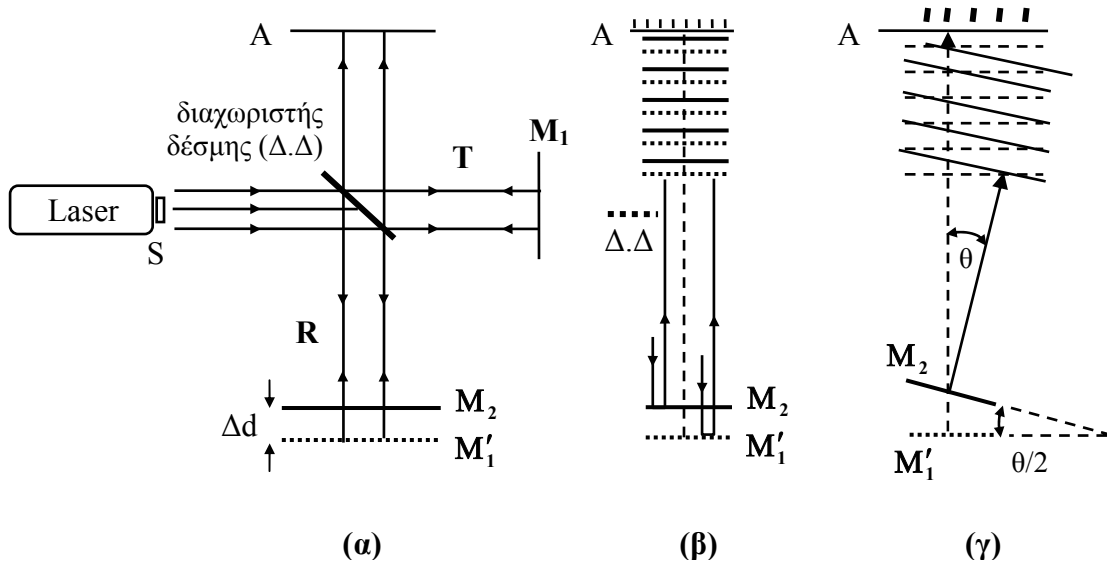
(γ)

**Σχήμα 5.** (α) κάθετη ανάκλαση από το κάτοπτρο. (β) υπό γωνία. (γ) υπό γωνία από το διαχωριστή δέσμης.

Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση 5(β) όπου ο καθρέπτης επεκτείνεται μέχρι να συναντήσει την SS'. Στο διαχωριστή δέσμης 5(γ), η δέσμη (T) που διαδίδεται, αποκλίνει από την αρχική πηγή S, ενώ η ανακλώμενη δέσμη (R) φαίνεται να αποκλίνει από τη

φανταστική πηγή  $S'$ . Τα κύματα T και R έχουν την ίδια αρχική φάση και είναι σύμφωνα μεταξύ τους, προερχόμενα από την ίδια πηγή S.

Ας δούμε τώρα την περίπτωση **ισοπαχών κροσσών συμβολής**. Η γεωμετρία για κροσσούς αυτής της μορφής φαίνεται στο **Σχήμα 6**. Μια παράλληλη δέσμη φωτός εισέρχεται στο συμβολόμετρο και ακολουθείται η διαδικασία που περιγράψαμε στην



**Σχήμα 6.** (α) παράλληλη δέσμη φωτός εισέρχεται στο συμβολόμετρο. (β) οι δυο καθρέπτες είναι μεταξύ τους παράλληλοι. (γ) ο καθρέπτης  $M_2$  στρέφεται υπό γωνία  $\theta/2$ .

παράγραφο 1. Ένα επίπεδο κύμα φωτός προσπίπτει στους καθρέπτες  $M_2$  και  $M_1'$  και ανακλάται (**Σχήμα 6β**). Αν η απόσταση μεταξύ των καθρεπτών είναι  $\Delta d$ , η διαφορά των οπτικών δρόμων των δυο ανακλώμενων κυμάτων θα είναι  $2\Delta d$ . Σε ένα σημείο της οθόνης A θα εμφανιστεί φωτεινός κροσσός αν  $2\Delta d = n\lambda$  και σκοτεινός αν  $2\Delta d = (2n + 1)\lambda/2$ , όπου  $n = 1, 2, 3, \dots$  και  $\lambda$  το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Στην περίπτωση που οι δυο καθρέπτες είναι τελείως παράλληλοι μεταξύ τους η οθόνη θα φωτιστεί ομοιόμορφα.

Αν ο καθρέπτης  $M_2$  περιστραφεί κατά γωνία  $\theta/2$ , η ανακλώμενη δέσμη θα αποκλίνει κατά  $\theta$  σε σχέση με τη δέσμη που ανακλάται από τον  $M_1'$  (**Σχήμα 6γ**). Οι δυο δέσμες θα συμβάλλουν δημιουργώντας παράλληλους κροσσούς. Όλο το σύστημα των κροσσών θα είναι παράλληλο προς τον άξονα στροφής του  $M_2$ .

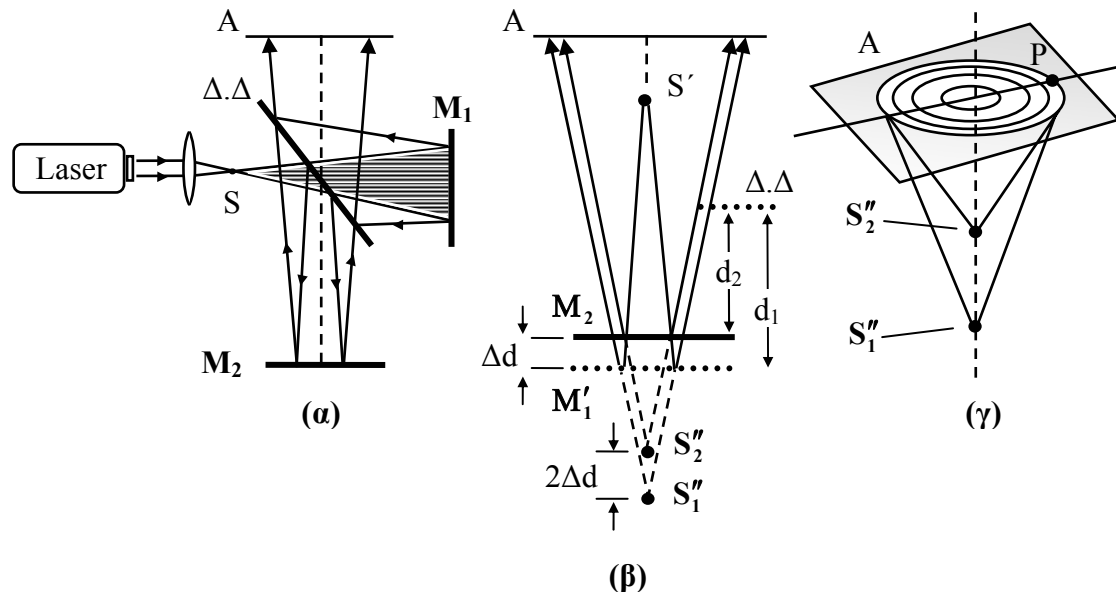
Αποδεικνύεται ότι η απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών κροσσών δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta x = 2\lambda/\eta\mu\theta \quad (2)$$

Όταν ο καθρέπτης  $M_1'$  μετακινηθεί σε διεύθυνση κάθετη ως προς την επιφάνειά του, καθώς μεταβάλλεται η απόσταση  $\Delta d$  παρατηρείται κατά μήκος της οθόνης μετακίνηση των κροσσών. Το πλήθος  $n$  των κροσσών που θα περάσει από το κέντρο της οθόνης για δεδομένο  $\Delta d$ , θα είναι:

$$n = 2\Delta d/\lambda \quad (3)$$

Για τη δημιουργία **ομόκεντρων κυκλικών κροσσών** διαμορφώνουμε μια σημειακή πηγή  $S$ , παρεμβάλλοντας στην πορεία της δέσμης του Laser ένα συγκλίνοντα φακό



**Σχήμα 7.** (α) σημειακή πηγή  $S$  στο εστιακό επίπεδο του φακού. (β) γραμμικό οπτικό ισοδύναμο. (γ) υπερβολοειδή εκ περιστροφής ως αποτέλεσμα της συμβολής των δυο κυμάτων.

μικρής εστιακής απόστασης που συγκλίνει τη δέσμη στο εστιακό του επίπεδο (**Σχήμα 7α**). Όπως και προηγουμένως, η πηγή  $S$  μπορεί να αντικατασταθεί από το φανταστικό της είδωλο  $S'$  λόγω της ανάκλασής της στο διαχωριστή δέσμης. Από την άλλη μεριά οι ανακλάσεις στους καθρέπτες  $M_1'$  και  $M_2$  δημιουργούν νέα είδωλα  $S_1''$  και  $S_2''$  αντίστοιχα (**Σχήμα 7β**). Επειδή τα είδωλα  $S_1''$ ,  $S_2''$  προκύπτουν από την αρχική σημειακή πηγή  $S$ , αποτελούν ζεύγος σύμφωνων μεταξύ τους σφαιρικών κυμάτων. Όταν οι δυο καθρέπτες είναι κάθετοι μεταξύ τους, οι δυο πηγές θα βρίσκονται πάνω στον ίδιο άξονα και το αποτέλεσμα της συμβολής τους θα είναι ένα σμήνος υπερβολοειδών εκ περιστροφής (**Σχήμα 7γ**). Αν τοποθετήσουμε την οθόνη κάθετα στον άξονα, η τομή του επιπέδου της οθόνης με το σμήνος των υπερβολοειδών θα μας δώσει ομόκεντρους κυκλικούς κροσσούς συμβολής.

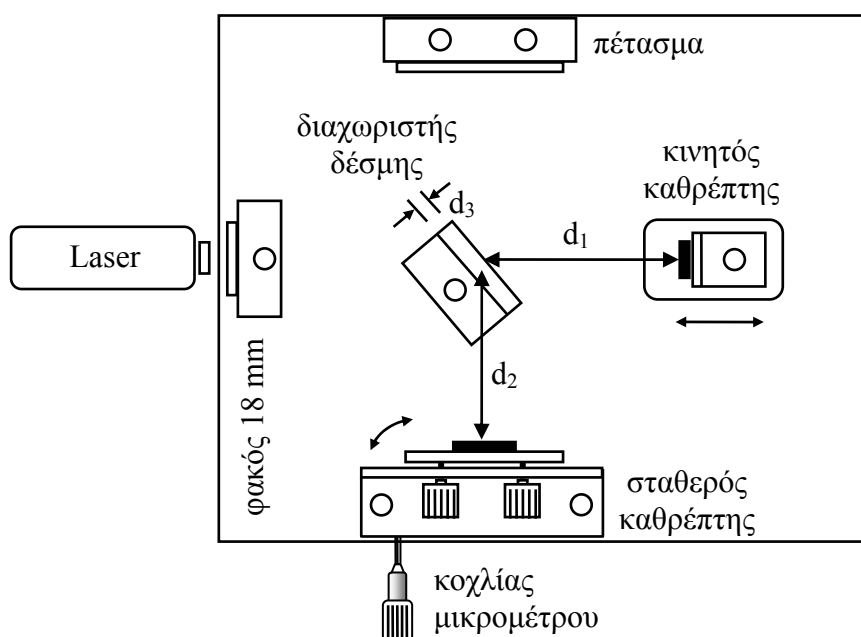
## B. ΠΕΙΡΑΜΑ

### 1. Σκοπός

Σ' αυτή την άσκηση θα συναρμολογήσουμε ένα συμβολόμετρο Michelson, θα εξετάσουμε τους κροσσούς συμβολής που δημιουργούνται από σημειακή φωτεινή πηγή και θα προσδιορίσουμε με ακρίβεια το μήκος κύματος ενός Laser He-Ne.

### 2. Πειραματική διάταξη

Η πλήρης διάταξη φαίνεται στο **Σχήμα 8** και αποτελείται από τα εξής μέρη:



**Σχήμα 8.** Χρήση συμβολόμετρου Michelson για τον προσδιορισμό του μήκους κύματος Laser He-Ne.

1. Ένα συμβολόμετρο Michelson που περιλαμβάνει τα εξής εξαρτήματα:

- Μια μεταλλική βάση 5 Kg
- Ένα επίπεδο κάτοπτρο με δυνατότητα μικρομετρικής μετακίνησης
- Ένα επίπεδο κάτοπτρο με δυνατότητα ρύθμισης της κλίσης του
- Ένα διαχωριστή δέσμης
- Ένα φακό 18 mm
- Μια μικρή οθόνη (πέτασμα)

2. Ένα Laser He-Ne ισχύος 1 mW

### 3. Πειραματική διαδικασία

Ευθυγραμμίζουμε το Laser με το συμβολόμετρο Michelson, ακολουθώντας τη διαδικασία που περιγράφεται στην παράγραφο 4.1 και ετοιμάζουμε το σύστημα για παρατήρηση ομόκεντρων κυκλικών κροσσών συμβολής. Προς τούτο τοποθετούμε το φακό

των 18 mm στην πορεία της δέσμης του Laser, δημιουργώντας κατ' αυτό τον τρόπο σημειακή πηγή στο εστιακό επίπεδο του φακού.

**ΠΟΤΕ ΜΗΝ ΚΟΙΤΑΤΕ ΤΗΝ ΑΚΤΙΝΑ ΤΟΥ LASER ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ Η ΑΠΟ ΑΝΑΚΛΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΕ ΛΕΙΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ**

Είναι πολύ πιθανό, εκτός από τους κροσσούς που μας ενδιαφέρουν, να παρατηρήσουμε στην οθόνη και άλλους κροσσούς μικρότερης λαμπρότητας που προέρχονται από τη συμβολή ανακλώμενων ακτίνων στο εμπρόσθιο και στο πίσω τμήμα της λεπτής επίστρωσης του διαχωριστή δέσμης (οι επιστρώσεις αυτές λειτουργούν ως λεπτά φιλμς). Οι δευτερογενείς αυτοί κροσσοί δεν μας ενδιαφέρουν και μπορούμε να τους παραβλέψουμε. Μπορούμε επί πλέον να τους ξεχωρίσουμε από τους άλλους, γυρνώντας τον κοχλία του μικρομέτρου. Κροσσοί που δεν μετακινούνται είναι άσχετοι.

**ΜΗΝ ΑΚΟΥΜΠΑΤΕ ΜΕ ΤΑ ΔΑΚΤΥΛΑ ΣΑΣ ΤΙΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΤΩΝ ΚΑΘΡΕΠΤΩΝ. ΥΠΑΡΧΕΙ ΚΙΝΔΥΝΟΣ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΗΣ ΤΟΥΣ**

Από τη Σχέση (1) έχουμε:

$$\Delta d = n\lambda/2 \quad (4)$$

όπου  $\Delta d$  είναι η απόσταση που μετακινείται (μέσω του μικρομέτρου) ο καθρέπτης  $M_1$  σε σχέση με τον καθρέπτη  $M_2$ . Επειδή το φως διασχίζει την απόσταση μεταξύ του  $M_1$  και του διαχωριστή δέσμης δυο φορές, αν ο  $M_1$  μετακινηθεί κατά  $\lambda/2$  τότε ο οπτικός δρόμος της ακτίνας θα είναι  $\lambda$  και το μοτίβο της συμβολής θα αλλάξει από μέγιστο σε ελάχιστο και πάλι σε μέγιστο. Για παράδειγμα, αν παρατηρούμε τον κεντρικό κροσσό που είναι φωτεινός, μεταβάλλοντας αργά την απόσταση  $\Delta d$  κατά  $\lambda/2$ , ο κροσσός θα μεταβληθεί σε σκοτεινό και πάλι σε φωτεινό. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι από το κέντρο της οθόνης έχει περάσει ένας κροσσός ( $n = 1$ ). Μετρώντας επομένως το πλήθος των κροσσών  $n$  που θα περάσουν από το κέντρο της οθόνης για συγκεκριμένη μετακίνηση  $\Delta d$  του καθρέπτη  $M_1$ , μπορούμε να υπολογίσουμε το μήκος κύματος  $\lambda$  του Laser από τη σχέση:

$$\lambda = 2\Delta d/n \quad (5)$$

Σημείωση: Η σταθερά της κλίμακας του μικρομέτρου είναι 1  $\mu\text{m}$ . Μια πλήρης στροφή του κοχλία μετακινεί τον καθρέπτη κατά 25  $\mu\text{m}$  ( $\Delta d = 25 \mu\text{m}$ ).



## 4. Εργασίες

### 4.1 Συναρμολόγηση και ευθυγράμμιση

1. Τοποθετείστε τη μεταλλική βάση του συμβολόμετρου με τον κοχλία του μικρομέτρου προς το μέρος σας.
2. Τοποθετείστε το Laser όπως φαίνεται στο Σχήμα 8 και ευθυγραμμίστε το ώστε η ακτίνα του να είναι παράλληλη με την επιφάνεια της βάσης του συμβολόμετρου. Προς τούτο μετρήστε με ένα χάρακα στα δυο άκρα της βάσης την απόσταση της ακτίνας από τη βάση (μερικά εκατοστά). Θα πρέπει να είναι η ίδια. Θέστε το Laser εκτός λειτουργίας.
3. Τοποθετείστε στην αντίστοιχη υποδοχή της βάσης τον κινητό καθρέπτη με την μπροστινή του επιφάνεια προς τ' αριστερά και σφίξτε τις βίδες.
4. Τοποθετείστε στην αντίστοιχη υποδοχή της βάσης το διαχωριστή δέσμης με τις βίδες προς τ' αριστερά, χωρίς να τις σφίξτε πολύ.
5. Στην υποδοχή που βρίσκεται πλησίον του κοχλία του μικρομέτρου τοποθετείστε το σταθερό καθρέπτη όπως φαίνεται στο Σχήμα 8 και σφίξτε τις βίδες.
6. Θέστε σε λειτουργία το Laser και ευθυγραμμίστε το έτσι ώστε η δέσμη του να περνά από το διαχωριστή δέσμης και να προσπίπτει περίπου στο κέντρο του κινητού καθρέπτη.
7. Αφαιρέστε το διαχωριστή δέσμης και διορθώστε την x-y θέση του Laser μέχρι η ανακλώμενη από τον κινητό καθρέπτη  $M_1$  ακτίνα να επανεισέρχεται στο Laser. Σημείωση: Για την αποφυγή θετικής οπτικής ανάδρασης που μπορεί να προκαλέσει φαινόμενα αστάθειας, ρυθμίστε ώστε η ανακλώμενη ακτίνα να βρίσκεται 2 mm πιο πάνω από την έξοδο του Laser.
8. Τοποθετείστε τη μικρή οθόνη με την αντίστοιχη βάση δεξιά του κινητού καθρέπτη. Σ' αυτό το σημείο θα πρέπει να παρατηρήσετε επάνω στην οθόνη μια κεντρική κουκίδα μαζί με μερικές δευτερεύουσες. Ρυθμίστε με προσοχή το Laser ώστε να εξαφανίσετε τις δευτερεύουσες κηλίδες. Η ακτίνα του Laser θα πρέπει τώρα να είναι κάθετη στον κινητό καθρέπτη.
9. Τοποθετείστε και πάλι το διαχωριστή δέσμης στη θέση του και ρυθμίστε τον έτσι που ένα μέρος της δέσμης να ανακλάται στο κέντρο του σταθερού καθρέπτη.
10. Τοποθετείστε τη μικρή οθόνη με τη βάση της στην αντίστοιχη υποδοχή που βρίσκεται απέναντι από το σταθερό καθρέπτη. Θα πρέπει να παρατηρήσετε στην οθόνη δυο φωτεινές κηλίδες. Ρυθμίστε και πάλι το διαχωριστή δέσμης έως ότου οι δυο κηλίδες πλησιάσουν η μια την άλλη όσο γίνεται και σφίξτε τις βίδες του. Χρησιμοποιήστε τις δυο βίδες που βρίσκονται

πίσω από το σταθερό καθρέπτη και ρυθμίστε την κλίση του ώστε οι δυο κηλίδες να συμπέσουν.

11. Τοποθετήστε το φακό των 18 mm στην αντίστοιχη μαγνητική βάση και θέστε τον εμπρός από το Laser, έτσι ώστε η αποκλίνουσα δέσμη να κεντράρει στο διαχωριστή δέσμης. Σ' αυτό το σημείο θα πρέπει να παρατηρήσετε στην οθόνη κυκλικούς κροσσούς. Αν όχι, τότε ξαναρυθμίστε με προσοχή την κλίση του σταθερού καθρέπτη μέχρι να εμφανιστούν κυκλικοί κροσσοί.
12. Αφού εμφανιστούν οι κυκλικοί κροσσοί θα τους κεντράρετε ρυθμίζοντας ελαφρώς την κλίση του σταθερού καθρέπτη. Γυρίστε τον κοχλία του μικρομέτρου και παρατηρείστε τους να μετακινούνται.
13. Χρησιμοποιήστε την κλίμακα που υπάρχει στην οθόνη για να μετρήσετε τους κροσσούς. Προς τούτο ευθυγραμμίστε το όριο μεταξύ ενός μεγίστου και ενός ελαχίστου με την κλίμακα όπως φαίνεται στο **Σχήμα 9**. Γυρίστε τον κοχλία του μικρομέτρου μέχρι το όριο του επόμενου μεγί-



**Σχήμα 9**

στου/ελαχίστου καταλάβει τη θέση του αρχικού ορίου. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι έχει μετρηθεί ένας κροσσός (η απεικόνιση των κροσσών δεν φαίνεται να μεταβάλλεται σε σχέση με την αρχική απεικόνιση).

14. Περιστρέφοντας τον κοχλία αριστερά, ο καθρέπτης μετακινείται προς τ' αριστερά. Στην αντίθετη περίπτωση ο καθρέπτης μετακινείται προς τα δεξιά, δηλαδή απομακρύνεται από το διαχωριστή δέσμης. Για την αποφυγή λαθών λόγω μηχανικών ανοχών του συστήματος περιστροφής, πάντα περιστρέφουμε τον κοχλία κατά ολόκληρη στροφή προς την ίδια φορά.

**Προσοχή: το συμβολόμετρο είναι πολύ ευαίσθητο. Ακόμη και ελαφρύς θόρυβος διαταράσσει το φαινόμενο της συμβολής.**

#### 4.2 Προσδιορισμός μήκους κύματος

1. Επιλέξτε στην οθόνη μια από τις γραμμές της κλίμακας ως σημείο αναφοράς και σημειώστε την ένδειξη της κλίμακας του μικρομέτρου (αρχική ένδειξη).  
 $d_{m1} = \dots\dots\dots$

2. Στρέψτε τον κοχλία (πάντα προς την ίδια φορά) και μετρήστε τουλάχιστον 20 κροσσούς να περνούν από το σημείο αναφοράς. Καταχωρείστε τον αριθμό των κροσσών **n** στον **Πίνακα 1**.
3. Σημειώστε και πάλι την ένδειξη της κλίμακας του μικρομέτρου (τελική ένδειξη)  $d_{m2} = \dots\dots$
4. Υπολογίστε την απόσταση  $\Delta d$  από τις ενδείξεις του μικρομέτρου  $d_{m2} - d_{m1}$  και καταχωρείστε την στον **Πίνακα 1**. (Σημείωση η σταθερά της κλίμακας του μικρομέτρου είναι  $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{m}$ ).
5. Από τη Σχέση (5) υπολογίστε το μήκος κύματος  $\lambda$  του Laser σε nm και καταχωρείστε την τιμή στον **Πίνακα 1**.
6. Να επαναλάβετε τις εργασίες 1 – 5, αυξάνοντας κάθε φορά τον αριθμό των κροσσών κατά 5.
7. Υπολογίστε τη μέση τιμή του  $\lambda$ , καθώς και το μέσο τυπικό και σχετικό % σφάλμα.

**Πίνακας 1**

Σειρά μετρήσεων	n	$d_{m2} - d_{m1}$	$\Delta d$ ( $\mu\text{m}$ )	$\lambda$ (nm)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
Μέση τιμή $\lambda$				
Μέσο τυπικό σφάλμα $\delta\lambda$				
Σχετικό % σφάλμα				
$\lambda = \bar{\lambda} \pm \delta\lambda =$ $\lambda = \bar{\lambda} \pm \sigma_{\sigma\lambda} \% =$				