



**ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

Εργαστήριο Φυσικής III - Οπτική

Πέτρος Ρακιτζής

Τμήμα Φυσικής

10. ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

1. Σκοπός

Στο πείραμα αυτό θα μετρήσετε την ταχύτητα του φωτός με την μέθοδο Foucault.

2. Θεωρία

Βασική προαπαιτούμενη γνώση

Serway, Physics for Scientists & Engineers, Τόμος ΙΙΙ, Κεφ.35.2 και τα αντίστοιχα προβλήματα.

2.1 Εισαγωγή

Η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι μια πολύ σημαντική και ενδιαφέρουσα σταθερά στη φύση. Έχει παρατηρηθεί ότι, είτε το φως προέρχεται από ένα laser τοποθετημένο στο εργαστήριο, είτε από ένα άστρο που ταξιδεύει στο διάστημα με πολύ μεγάλες ταχύτητες, αν μετρήσουμε την ταχύτητα του φωτός που εκπέμπουν θα διαπιστώσουμε ότι αυτή είναι σταθερή και ανεξάρτητη της σχετικής κίνησης της πηγής και του παρατηρητή. Επί πλέον, όπως πρώτος ο *Einstein* παρουσίασε στη γνωστή "*Θεωρία της Σχετικότητας*", η ταχύτητα του φωτός είναι σημαντική και για τους εξής ακόμη λόγους:

- Η ταχύτητα του φωτός καθορίζει ένα ανώτατο όριο ταχύτητας για οποιοδήποτε κινούμενο αντικείμενο.
- Τα αντικείμενα που κινούνται με ταχύτητες κοντά στην ταχύτητα του φωτός ακολουθούν φυσικούς νόμους δραστικά διαφορετικούς, όχι μόνο από τους νόμους του Νεύτωνα αλλά και από την καθημερινή εμπειρία και αντίληψή μας.

Είναι επομένως κατανοητό γιατί οι επιστήμονες έχουν αφιερώσει πολύ χρόνο για να μετρήσουν την ταχύτητα του φωτός. Μερικές από τις πιο ακριβείς μετρήσεις έγιναν από τον *Michelson* μεταξύ του 1926 και 1929, που χρησιμοποίησε μεθόδους παρόμοιες με αυτή που θα χρησιμοποιηθεί στο εργαστήριο. Ο *Michelson* μέτρησε την ταχύτητα του φωτός στον αέρα και την βρήκε ίση με $2.99712 \times 10^8 \text{ m/s}$. Από αυτήν την τιμή υπολόγισε την ταχύτητα στο κενό την οποία βρήκε ίση με $2.99796 \times 10^8 \text{ m/s}$. Ο *Michelson* δεν ήταν ο πρώτος που προσπάθησε να μετρήσει την ταχύτητα του φωτός. Η εργασία του φυσικά στηρίχθηκε σε μια σειρά από βελτιώσεις της μεθοδολογίας και της τεχνολογίας προγενέστερων πειραμάτων.

2.2 Μέτρηση της ταχύτητας του φωτός: ιστορική αναδρομή

Galilei

Δια μέσου της ιστορίας, οι λίγοι που ασχολήθηκαν με την ταχύτητα του φωτός, την θεώρησαν άπειρη. Ένας από τους πρώτους που αμφισβήτησαν την υπόθεση αυτή ήταν ο Ιταλός φυσικός *Galilei* ο οποίος μάλιστα πρότεινε μια μέθοδο μέτρησης της ταχύτητας του φωτός.

Η μέθοδος του *Galilei* ήταν απλή. Δύο άνθρωποι, έστω *A* και *B*, κρατώντας καλυμμένες λάμπες τοποθετούνται σε απόσταση περίπου 1 μιλίου. Ο *A* ανοίγει το σκέπαστρο της λάμπας του. Μόλις ο *B* παρατηρήσει το φως του *A* ανοίγει το σκέπαστρο της δικής του λάμπας. Μετρώντας το χρόνο που μεσολαβεί από το ξεσκέπασμα της λυχνίας του *A* μέχρι ο *A* να δει το φως του *B* και διαιρώντας αυτό το χρόνο με το διπλάσιο της απόστασης των *A* και *B* προσδιορίζουμε την ταχύτητα του φωτός.

Όμως, επειδή η ταχύτητα του φωτός είναι πολύ μεγάλη και επειδή ο χρόνος αντίδρασης του ανθρώπου είναι της τάξης δεκάτων του δευτερολέπτου ο *Galilei* κατόρθωσε μόνο να διαπιστώσει ότι η ταχύτητα είναι πολύ μεγάλη για να μετρηθεί με τη μέθοδο που πρότεινε. Όμως το πείραμα του έδωσε τη βάση για άλλα πειράματα αργότερα. Επίσης, εισήγαγε ένα σημαντικό σημείο: *ότι για να μετρήσεις μεγάλες ταχύτητες, η μέτρηση πρέπει να γίνει σε μεγάλη απόσταση.*

Roemer

Η πρώτη επιτυχής μέτρηση της ταχύτητας του φωτός έγινε από τον Δανό αστρονόμο *Olaf Roemer* το 1675. Ο *Roemer* στήριξε τη μέτρησή του στην παρατήρηση ενός από τους δορυφόρους του Δία. Καθώς ο δορυφόρος περιστρέφεται γύρω από το Δία, υπάρχει μια περίοδος χρόνου που ο Δίας βρίσκεται μεταξύ του δορυφόρου και της Γης και τον αποκρύπτει από τον γήινο παρατηρητή. Ο *Roemer* παρατήρησε ότι η

διάρκεια των εκλείψεων ήταν μικρότερη όταν η Γη κινείται προς τον Δία παρά όταν απομακρύνεται από αυτόν. Ο *Roemer* ορθώς απέδωσε τότε τη διαφορά αυτή στην πεπερασμένη ταχύτητα του φωτός.

Από τις παρατηρήσεις των εκλείψεων για διάστημα μερικών ετών, ο *Roemer* υπολόγισε την ταχύτητα σε $2.1 \times 10^8 \text{ m/s}$. Αυτή η τιμή είναι περίπου $1/3$ μικρότερη από την ακριβή τιμή που γνωρίζουμε σήμερα. Αυτό οφείλεται στη μη ακριβή γνώση της απόστασης Γης-Διός την εποχή εκείνη. Η μέθοδος, όμως, του *Roemer* καθόρισε πέρα από κάθε αμφιβολία ότι η ταχύτητα του φωτός είναι πεπερασμένη.

Fizeau

Ο Γάλλος επιστήμονας *Fizeau* το 1849 επινόησε μια έξυπνη μέθοδο μέτρησης της ταχύτητας του φωτός πάνω στη Γη. Χρησιμοποίησε ένα οδοντωτό τροχό περιστρεφόμενο γρήγορα μπροστά από μια φωτεινή πηγή, ώστε να μεταδώσει φως σε ένα κάτοπτρο τοποθετημένο σε μακρινή απόσταση, με μορφή παλμών. Τα κάτοπτρο αντανακλούσε το φως πίσω στον οδοντωτό κινούμενο τροχό. Το αν θα περάσει ή όχι το φως μέσα από το διάκενο του τροχού, ώστε να φθάσει σε ένα παρατηρητή πίσω από τον τροχό, εξαρτάται από τη θέση του οδόντος του τροχού.

Ο *Fizeau* μέτρησε την συχνότητα περιστροφής του τροχού που επέτρεπε την παρατήρηση του επιστρέφοντος παλμού, καθώς και την απόσταση τροχού και κατόπτρου, με ακρίβεια. Χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο βρήκε την ταχύτητα ίση με $3.15 \times 10^8 \text{ m/s}$, που είναι αρκετά κοντά στην ακριβή τιμή της ταχύτητας.

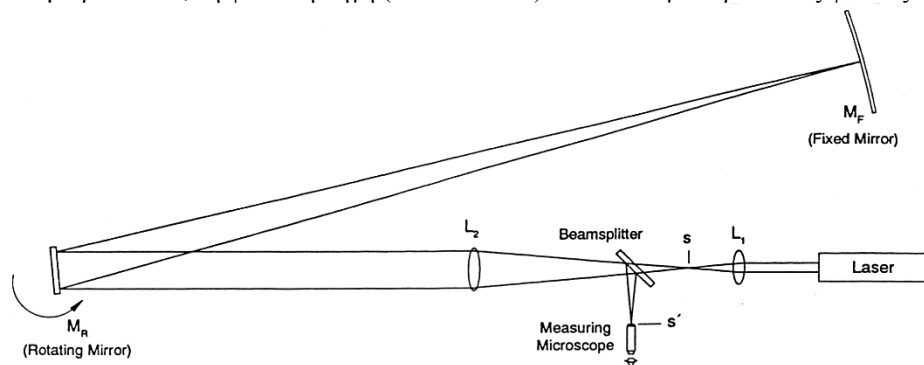
Foucault

Ο *Foucault* βελτίωσε τη μέθοδο του *Fizeau* χρησιμοποιώντας ένα περιστρεφόμενο κάτοπτρο αντί για οδοντωτό τροχό. Επειδή αυτή η μέθοδος θα χρησιμοποιηθεί σ' αυτό το πείραμα, οι λεπτομέρειες της μεθόδου θα δοθούν παρακάτω. Ο *Michelson* χρησιμοποίησε τη μέθοδο *Foucault* για να μετρήσει την ταχύτητα του φωτός με αρκετή ακρίβεια. Η καλύτερη των μετρήσεων του έδωσε την τιμή $2.99774 \times 10^8 \text{ m/s}$ που είναι συγκρίσιμη με την τιμή των $2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$ που δεχόμαστε σήμερα.

2.3 Η μέθοδος Foucault

2.3.1 Ποιοτική περιγραφή

Στο πείραμα αυτό θα χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο *Foucault* που είναι βασικά ίδια με αυτή που αναπτύχθηκε το 1862. Ένα διάγραμμα του πειράματος φαίνεται στο Σχήμα 1. Η πειραματική διάταξη περιλαμβάνει ένα περιστρεφόμενο (M_R) και ένα σταθερό (M_F) κάτοπτρο, έναν διαχωριστή δέσμης (beam splitter), ένα μικροσκόπιο, τη φωτεινή πηγή (εδώ ένα laser) και δύο συγκεντρωτικούς φακούς L_1 και L_2 .



Σχήμα 1. Διάγραμμα της διάταξης της μεθόδου *Foucault*

Με την ευθυγράμμιση τελειωμένη και το περιστρεφόμενο κάτοπτρο ακίνητο, ο οπτικός δρόμος έχει ως εξής: Η παράλληλη δέσμη του φωτός από το laser εστιάζεται από το φακό L_1 στο σημείο s . Ο φακός L_2 τοποθετείται με τέτοιο τρόπο ώστε το φως να προσπίπτει στο κάτοπτρο M_R και από αυτό στο M_F και να επιστρέφει στο ίδιο σημείο s . Ο διαχωριστής δέσμης χρησιμοποιείται για να ανακλά την επιστρέφουσα δέσμη στο μικροσκόπιο της μέτρησης στο σημείο s' .

Υποθέστε τώρα ότι το κάτοπτρο M_R περιστρέφεται ελαφρά, έτσι ώστε η ανακλώμενη δέσμη να προσπέσει στο M_F σε διαφορετικό σημείο. Επειδή το M_F είναι σφαιρικό κάτοπτρο η δέσμη θα ανακλαστεί πίσω στο

M_R . Το επιστρέφον είδωλο του σημείου της πηγής θα εμφανισθεί ξανά στα s και s' . Η μόνη σημαντική διαφορά λόγω μικρής περιστροφής του M_R είναι ότι το σημείο ανάκλασης πάνω στο M_F αλλάζει. Τώρα υποθέστε ότι το M_R περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα. Στην περίπτωση αυτή το είδωλο της πηγής δεν θα εμφανισθεί πλέον στα σημεία s και s' . Αυτό θα συμβαίνει γιατί με την περιστροφή του M_R , ο παλμός του φωτός που διαδίδεται από το M_R στο M_F και πίσω στο M_R βρίσκει το M_R σε διαφορετική γωνία, όταν επιστρέφει, από αυτήν που ήταν όταν ανακλάστηκε για πρώτη φορά. Όπως θα δείξουμε στη συνέχεια η μέτρηση της μετατόπισης του ειδώλου που προκαλείται από τη περιστροφή του M_R συνδέεται με την ταχύτητα του φωτός.

2.3.2 Ποσοτική περιγραφή

Για να χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο *Foucault* για τη μέτρηση της ταχύτητας του φωτός, είναι απαραίτητο να προσδιορίσουμε την ακριβή σχέση μεταξύ της ταχύτητας και της μετατόπισης του σημείου του ειδώλου. Βέβαια υπάρχουν και άλλοι παράμετροι που καθορίζουν στην πειραματική αυτή διάταξη την μετατόπιση του ειδώλου. Αυτές περιλαμβάνουν:

1. τον ρυθμό περιστροφής του M_R
2. την απόσταση μεταξύ M_R και M_F
3. την μεγέθυνση του L_2 που εξαρτάται από την εστιακή απόσταση του L_2 και επίσης από τις αποστάσεις μεταξύ L_2 , L_1 και M_F

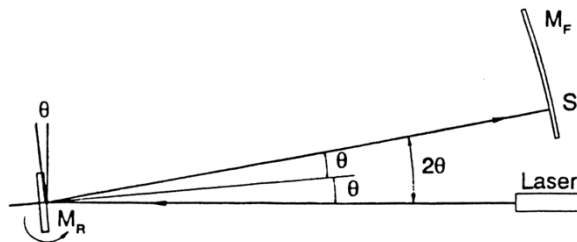
Κάθε μια από τις μεταβλητές που αναφέραμε εμφανίζεται στην τελική εξίσωση που αφορά την ταχύτητα του φωτός.

Κατ' αρχήν, ας θεωρήσουμε μια δέσμη laser, που ακολουθεί την πορεία που περιγράψαμε ποιοτικά παραπάνω. Δηλαδή, πρώτα η δέσμη εστιάζεται στο σημείο s , μετά ανακλάται από τα κάτοπτρα M_R και M_F και επιστρέφει στο M_R . Στη συνέχεια, η δέσμη επιστρέφει μέσω του διαχωριστή (beam splitter) και εστιάζεται στο σημείο s' , όπου μπορεί να παρατηρηθεί με το οπτικό μικροσκόπιο. Η δέσμη ανακλάται από ένα συγκεκριμένο σημείο του M_F . Πρώτα θα προσδιορίσουμε πώς το σημείο ανάκλασης σχετίζεται με τη γωνία περιστροφής του M_R .

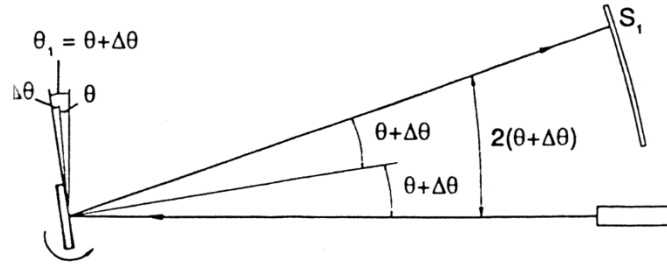
Το Σχήμα 2(a) δείχνει την πορεία της δέσμης όταν το M_R σχηματίζει γωνία θ με την κάθετο στην αρχική δέσμη. Σ' αυτή την περίπτωση η γωνία πρόσπτωσης στον M_R είναι επίσης ίση με θ . Επίσης, η γωνία ανάκλασης ισούται με την γωνία πρόσπτωσης, συνεπώς, η γωνία μεταξύ της δέσμης πρόσπτωσης και της ανακλώμενης είναι 2θ . Το φως προσπίπτει στο M_F στο σημείο S .

Το Σχήμα 2(b) δείχνει τον οπτικό δρόμο που ακολουθεί το φως που εξέρχεται από το laser, σε μία διαφορετική χρονική στιγμή, όταν το M_R βρίσκεται σε γωνία $\theta_1 = \theta + \Delta\theta$. Η γωνία πρόσπτωσης είναι τώρα $\theta_1 = \theta + \Delta\theta$ και επομένως η γωνία μεταξύ της δέσμης πρόσπτωσης στο M_R και ανάκλασης από αυτό είναι $2\theta_1 = 2(\theta + \Delta\theta)$. Το σημείο που η δέσμη συναντά τώρα το M_F το ονομάζουμε S_1 . Αν ορίσουμε ως D ($D = 14.492 \pm 0.030 \text{m}$) την απόσταση μεταξύ M_F και M_R τότε, για μικρές γωνίες, η απόσταση μεταξύ S και S_1 είναι:

$$\Delta S = S - S_1 = D(2\theta_1 - 2\theta) = D[2(\theta + \Delta\theta) - 2\theta] = 2D\Delta\theta \quad (1)$$



Σχήμα 2(a). Όταν το κάτοπτρο M_R είναι σε γωνία θ , η δέσμη του laser ανακλάται στο σημείο S πάνω στο M_F .



Σχήμα 2(b). Όταν το κάτοπτρο M_R είναι σε γωνία θ_1 , η δέση του laser ανακλάται στο σημείο S_1 πάνω στο M_F .

Στα επόμενα βήματα είναι χρήσιμο να θεωρούμε ότι το φως που εξέρχεται από το laser αποτελείται από μία ακολουθία μικρής χρονικής διάρκειας παλμών. Υποθέτουμε ότι το M_R περιστρέφεται και ένας παλμός laser φθάνει στο M_R όταν αυτό βρίσκεται στη γωνία θ όπως φαίνεται στο Σχήμα 2(a). Ο παλμός ανακλάται και φθάνει στο σημείο S στο M_F . Όμως, όταν ο παλμός επιστρέφει στο M_R από το M_F , το περιστρεφόμενο κάτοπτρο θα έχει αλλάξει θέση και θα έχει έρθει σε γωνία θ_1 . Επειδή, το M_R έχει περιστραφεί, το φως, επιστρέφοντας, θα εστιάσθαι τώρα σε ένα άλλο σημείο. Με άλλα λόγια η περιστροφή του M_R προκαλεί μετακίνηση του σημείου ανάκλασης πάνω στο κάτοπτρο M_F από τη θέση S στην S_1 . Είναι δυνατόν να συσχετίσουμε την απόσταση (SS_1) με αυτή των σημείων (ss_1) χρησιμοποιώντας τα φανταστικά είδωλα του Σχήματος 3, αδιαφορώντας για την περιστροφή. Σύμφωνα με τη θεωρία των φακών και το Σχήμα 3 το ΔS στο εστιακό επίπεδο του L_2 θα εστιάζεται στο επίπεδο που περιέχει το s με ύψος $(-i/o)\Delta S$, όπου i και o είναι οι αποστάσεις του φακού από το είδωλο και το αντικείμενο. Το αρνητικό πρόσημο δηλώνει ότι το είδωλο είναι αντεστραμμένο ως προς το αντικείμενο. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 3 ο διαιρέτης της δέσμης σχηματίζει ένα παρόμοιο είδωλο του ίδιου ύψους ($\Delta S = \Delta S'$).

Αρα, αγνοώντας το αρνητικό πρόσημο γιατί δεν μας ενδιαφέρει η αντιστροφή του ειδώλου, έχουμε

$$\Delta s' = \Delta s = \left(\frac{i}{o}\right)\Delta S = \frac{A}{D+B}\Delta S \quad (2)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (1) και (2), και το ότι $\Delta S = S_1 - S$, έχουμε για το $\Delta s'$ σε σχέση με την αλλαγή της γωνίας του M_R κατά $\Delta\theta$ τη σχέση

$$\Delta s' = \frac{2DA\Delta\theta}{D+B} \quad (3)$$

Η γωνία $\Delta\theta$ εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής του M_R και το χρόνο που χρειάζεται ο παλμός του φωτός να διαδοθεί από το M_R στο M_F και πίσω στο M_R . Η απόσταση από το M_R στο M_F και πίσω που διανύει το φως είναι $2D$. Η εξίσωση που ισχύει είναι:

$$\Delta\theta = \frac{D\omega}{c} \quad (4)$$

όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός και ω η κυκλική ταχύτητα του M_R σε rad/sec . (Ο χρόνος που χρειάζεται το φως να διανύσει την απόσταση (M_R , M_F) και πίσω στο M_R είναι $2D/c$).

Χρησιμοποιώντας την (4) για να αντικαταστήσουμε το $\Delta\theta$ στην (3) έχουμε

$$\Delta s' = \frac{4AD^2\omega}{c(D+B)} \quad (5)$$

Από την (5) έχουμε για την ταχύτητα του φωτός c την τελική σχέση

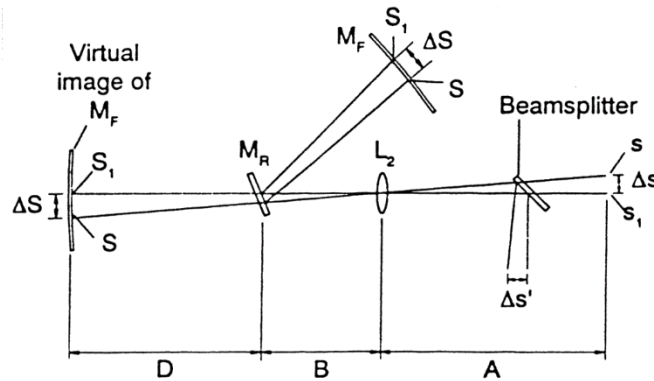
$$c = \frac{4AD^2\omega}{(D+B)\Delta s'} \quad (6)$$

όπου

- c , η ταχύτητα του φωτός
- ω , η ταχύτητα περιστροφής ($rads/sec$)
- A , η απόσταση (L_1, L_2) – f_{L_1}
- B , η απόσταση (L_2, M_R)
- D , απόσταση (M_R, M_F)

$\Delta s'$, η απόσταση των ειδώλων των σημείων όπως φαίνονται μέσα από το μικροσκόπιο ($\Delta s' = s_I - s$).
Το s αντιστοιχεί στο ακίνητο M_R και το s_I στο περιστρεφόμενο με γωνιακή ταχύτητα ω , κάτοπτρο.

Η υπόθεση που κάναμε για την οπτική δέσμη, ότι αυτή αποτελείται από παλμούς φωτός δεν επηρεάζει την ανάλυση μας για μια πηγή συνεχούς που μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από μια σειρά από παλμούς πολύ μικρού εύρους.

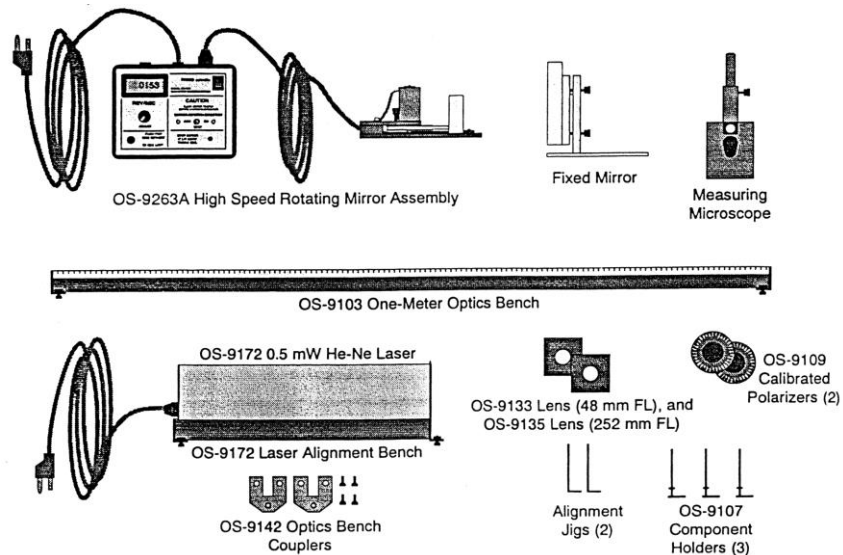


Σχήμα 3. Ανάλυση με την χρήση του φανταστικού ειδώλου

3. Η πειραματική διάταξη

Στο Σχήμα 4 φαίνονται τα διάφορα υποσυστήματα που χρειάζονται για να κάνουμε τη μέτρηση. Τα υποσυστήματα αυτά είναι:

- Ο οδηγός (ράγα) όπου τοποθετούνται τα διάφορα στοιχεία
- Το περιστρεφόμενο κάτοπτρο
- Το ακίνητο κάτοπτρο
- Το laser *He-Ne*
- Δύο πολωτές
- Δύο φακοί (lens OS-9133,9135) εστιακών αποστάσεων 48mm και 252mm αντίστοιχα
- Δύο βοηθητικές οπές για ευθυγράμμιση (alignment jigs)

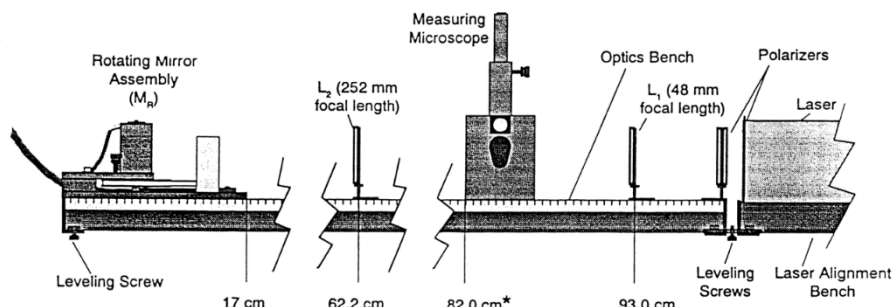


Σχήμα 4. Τα διάφορα υποσυστήματα της πειραματικής διάταξης.

4. Πειραματική εργασία

4.1 Περίληψη της ευθυγράμμισης

Κατ' αρχήν παρατηρήστε προσεκτικά το Σχήμα 5 για την κατά προσέγγιση τοποθέτηση των διαφόρων στοιχείων.



Σχήμα 5. Ευθυγράμμιση των διαφόρων στοιχείων της συσκευής του πειράματος

Η διαδικασία της ευθυγράμμισης έχει ως εξής:

1. Ευθυγραμμίστε τη δέσμη του laser ώστε να προσπίπτει στο κέντρο του περιστρεφόμενου κατόπτρου M_R χρησιμοποιώντας τις βοηθητικές οπές ευθυγράμμισης.
2. Ρυθμίστε τον άξονα περιστροφής του M_R ώστε να είναι παράλληλος με τη δέσμη (δηλ. καθώς το M_R περιστρέφεται θα πρέπει να υπάρχει μια θέση όπου η δέσμη του laser επιστρέφει στην οπή εξόδου του laser).
3. Τοποθετήστε το φακό L_1 για να εστιάσετε το laser σε ένα σημείο. Ρυθμίστε τον L_1 ώστε η δέσμη να είναι ξανά στο κέντρο του M_R .
4. Τοποθετήστε το φακό L_2 και ρυθμίστε τον ώστε να έχουμε τη δέσμη ξανά στο κέντρο του M_R .
5. Τοποθετήστε το μικροσκόπιο μέτρησης και βεβαιωθείτε ότι η δέσμη είναι ξανά στο κέντρο του M_R .

Προσοχή: Μην κοιτάξετε μέσα στο μικροσκόπιο μέχρι να τοποθετηθούν οι πολωτές μεταξύ του laser και του διαιρέτη της δέσμης.

6. Τοποθετήστε το κάτοπτρο M_F στην επιλεγμένη απόσταση από το M_R έτσι ώστε η δέσμη να προσπίπτει στο κέντρο του M_F .
7. Ρυθμίστε τη θέση του L_2 για να εστιασθεί η δέσμη σε ένα σημείο επί του M_F .
8. Ρυθμίστε το M_F ώστε η δέσμη να ανακλάται κατευθειάν πίσω στο M_R .
9. Τοποθετήστε του πολωτές μεταξύ του laser και του διαιρέτη της δέσμης, για να ρυθμίζετε την ένταση της δέσμης.
10. Εστιάστε το μικροσκόπιο στο σημείο του ειδώλου.
11. Αφαιρέστε τους πολωτές.

Υποδείξεις για την ευθυγράμμιση.

Όταν έχετε το μικροσκόπιο σε ευθυγράμμιση είναι ακόμα δύσκολο να έχετε ένα σημειακό είδωλο. Ίσως να υπάρχουν διάφορα άλλα σημεία ορατά με το μικροσκόπιο εκτός από το σημείο που προέρχεται από το M_F . Η πιο κοινή παρουσία σημείων προέρχεται από ανακλάσεις των φακών και μπορείτε να τα αγνοήσετε. Αν χρειαστεί στρέψτε τους φακούς ελάχιστα (1° - 2°) για να τα αποφύγετε. Επίσης, οι ανακλάσεις από τα παράθυρα της κατασκευής που περιέχει το περιστρεφόμενο κάτοπτρο M_R εμφανίζονται στο οπτικό πεδίο του μικροσκοπίου. Αν αποκόψετε τη δέσμη που πηγαίνει στο M_F θα διαπιστώσετε ποιο είναι το σημείο που ενδιαφέρει. Αν το σημείο που μας ενδιαφέρει είναι εκτός κέντρου ρυθμίστε το διαχωριστή της δέσμης (beam splitter).

Αν το είδωλο εμφανίζεται σαν γραμμή, βεβαιωθείτε ότι αυτό είναι πράγματι το είδωλο και μετά στρίψτε ελαφρά το L_2 ώστε να πάρετε σημείο.

Όταν το M_R αρχίζει να περιστρέφεται, είναι ασφαλές να παρατηρούμε μέσα στο μικροσκόπιο χωρίς τους πολωτές. Τότε θα παρατηρήσετε ότι το πεδίο τώρα περιλαμβάνει ένα τυχαίο σχέδιο συμβολής και μια

φωτεινή ζώνη στο κέντρο του πεδίου. Η ζώνη είναι το είδωλο του laser όταν για κάθε περιστροφή το φως επιστρέφει στην αρχική του θέση στο οπτικό πεδίο μέσω του διαχωριστή δέσμης. Αυτό είναι επίσης αναπόφευκτο.

Αν έχετε πετύχει εξαιρετική ευθυγράμμιση, τότε το σημείο που μας ενδιαφέρει θα είναι εντός της ζώνης που αναφέραμε πιο πάνω. Βεβαιωθείτε ότι έχετε το σημείο με τον M_R ακίνητο. Αν αυτό ισχύει τότε μετακινήστε ελαφρά το M_F (0.004° ή λιγότερο) γύρω από τον οριζόντιο άξονα. Αυτό θα φέρει το σημείο έξω από τη ζώνη που αναφέραμε.

4.2 Μέτρηση της ταχύτητας του φωτός

Η μέτρηση γίνεται με το να περιστρέψουμε το M_R με μεγάλη ταχύτητα και με το να μετρήσουμε την μετατόπιση του σημείου (ειδώλου) με το μικροσκόπιο. Περιστρέφουμε το κάτοπτρο διαδοχικά σε αντίθετες κατευθύνσεις ώστε η ολική μετατόπιση να διπλασιάζεται, οπότε διπλασιάζεται και η ακρίβεια της μέτρησης.

Προσοχή:

- Πριν ξεκινήσετε την περιστροφή του M_R βεβαιωθείτε ότι η βίδα ασφάλισης είναι τελείως χαλαρή ώστε το κάτοπτρο να περιστρέφεται με το χέρι σας.
- Όταν η ταχύτητα περιστροφής δεν έχει σταθεροποιηθεί, τότε είναι αναμμένο ένα κόκκινο LED (light emitting diode) στην πρόσοψη του κινητήρα. Όταν η ταχύτητα σταθεροποιηθεί το LED θα σβήσει. Αν δεν συμβεί αυτό, αποσυνδέστε τον κινητήρα από την παροχή ρεύματος και βεβαιωθείτε ότι η βίδα είναι τελείως χαλαρή.
- Ποτέ μην ενεργοποιείτε τον διακόπτη $MAX\ REV/SEC$ περισσότερο από ένα λεπτό κάθε φορά και σε χρονικά διαστήματα που να απέχουν λιγότερο από ένα λεπτό από το προηγούμενο σταμάτημα. Ο κινητήρας χρειάζεται να ψυχθεί στο διάστημα που δεν εργάζεται.

Διαδικασία της μέτρησης.

1. Με τη συσκευή ευθυγραμμισμένη και το είδωλο της δέσμης εστιασμένο, βάλτε τον διακόπτη κατεύθυνσης στο τροφοδοτικό του κινητήρα περιστροφής στο CW (clock wise) και ξεκινήστε τον κινητήρα. Αν το είδωλο δεν ήταν καλά εστιασμένο στο μικροσκόπιο ρυθμίστε το μικροσκόπιο. Μπορεί να χρειασθεί επίσης να ρυθμίσετε το L_2 ελαφρά ($1^\circ-2^\circ$) για να βελτιώσετε το είδωλο. Ίσως χρειασθεί να ρυθμίσετε το L_2 και το μικροσκόπιο αρκετές φορές για να επιτύχετε πολύ καλό είδωλο. Αφήστε τον κινητήρα να ζεσταθεί στις 600 περιστροφές/sec για 3 τουλάχιστον λεπτά.
2. Αυξήστε αργά τις στροφές και παρατηρήστε την αύξηση της απόκλισης της δέσμης.
3. Χρησιμοποιήστε το ρυθμιστή $ADJUST$ για να αυξήσετε την ταχύτητα στις 1000 στροφές/sec. Μετά πατήστε το $MAX\ REV/SEC$ και κρατήστε το πατημένο. Όταν η ταχύτητα σταθεροποιηθεί μετρήστε με το σταυρόνημα του μικροσκοπίου την απόκλιση και γράψτε την ταχύτητα περιστροφής που δείχνει το όργανο. Σταματήστε τον κινητήρα και βρείτε τη θέση του ειδώλου με το μικρόμετρο του μικροσκοπίου. **Σημείωση:** Φροντίστε ώστε όλες οι μετρήσεις που αφορούν μικρόμετρα να γίνονται προς την ίδια κατεύθυνση για να αποφεύγεται ο τζόγος (backlash).
4. Αντιστρέψτε την κατεύθυνση της περιστροφής του κινητήρα του M_R θέτοντας τον διακόπτη στο CCW (counter clockwise). Επιτρέψτε στον κινητήρα να ακινητοποιηθεί πριν αλλάξετε κατεύθυνση περιστροφής. Επαναλάβετε την μέτρηση που περιγράψαμε στο βήμα 3. **Σημείωση:** Όταν ο κινητήρας γυρίζει με 1000 στροφές/sec ή περισσότερο, το σημείο ειδώλο διευρύνεται κατά την κατεύθυνση της μετατόπισης. Βάλτε τότε το σταυρόνημα στο κέντρο της κηλίδας. Υπενθυμίζουμε ότι το μικρόμετρο στο μικροσκόπιο είναι βαθμονομημένο σε υποδιαιρέσεις του 0.01mm (10μm).
5. Η επόμενη εξίσωση αποδείχθηκε στην παράγραφο 3:

$$c = \frac{4AD^2\omega}{(D+B)\Delta s}$$

Όταν τροποποιηθεί για να περιλάβει τις παραμέτρους που έχουν μετρηθεί, γίνεται:

$$c = \frac{8\pi AD^2 \left[(\text{στροφές})_{CW} + (\text{στροφές})_{CCW} \right]}{(D+B)(s'_{CW} - s'_{CCW})}$$

Χρησιμοποιήστε αυτή την εξίσωση μαζί με το Σχήμα 1 για να υπολογίσετε το c , την ταχύτητα του φωτός. (Για να μετρήσετε το A μετρήστε την απόσταση (L_1, L_2) και αφαιρέστε την εστιακή απόσταση του L_1 που είναι 48mm).

6. Συγκρίνετε την ταχύτητα που βρήκατε με την αποδεκτή ταχύτητα που γνωρίζετε. Σχολιάστε τα σφάλματα των μετρήσεων. [Η εστιακή απόσταση του M_F είναι 13.5m και η βέλτιστη απόσταση (M_R, M_F) είναι από 10 - 15m για ακρίβεια μέχρι 5%].
7. Η σημερινή τεχνολογία παρέχει ανιχνευτές παλμών με ταχύτητα απόκρισης της τάξης των 10ps και υπάρχουν παλμοί laser της τάξης των 10fs. Σχεδιάστε ένα πείραμα μέτρησης της ταχύτητας του φωτός και σχολιάστε την ακρίβεια που αναμένετε.

Σημειώματα

Σημείωμα αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Κρήτης, Π. Ρακιτζής, 2014. «Εργαστήριο Φυσικής III - Οπτική». Έκδοση: 1.0. Ηράκλειο 2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <https://opencourses.uoc.gr>.

Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση, Όχι Παράγωγο Έργο 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Κρήτης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.

