O15

Κοίλα κάτοπτρα

1. Σκοπός

Σκοπός της άσκησης είναι η εύρεση της εστιακής απόστασης κοίλου κατόπτρου σχετικά μεγάλου ανοίγματος και την μέτρηση του σφάλματος της σφαιρικής εκτροπής. .

2. Θεωρία

2.1 Γεωμετρική Οπτική

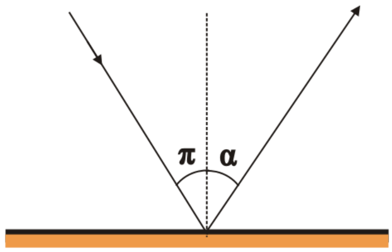
Το φως ως γνωστόν είναι εγκάρσιο ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Αποτελείται δηλαδή από ένα ηλεκτρικό και ένα μαγνητικό πεδίο τα οποία παραμένουν κάθετα μεταξύ τους και κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης. Στην προσέγγιση της γεωμετρικής οπτικής θεωρούμε ότι το φως διαδίδεται σε ευθείες γραμμές οι οποίες ονομάζονται οπτικές ακτίνες, Μπορούμε να πούμε πως οι ακτίνες φωτός συμπίπτουν με την διεύθυνση διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Αν τώρα η φωτεινή ακτίνα προσπέσει π.χ. σε ένα διάφραγμα το οποίο έχει οπή με διάμετρο πολύ μεγαλύτερη από το μήκος κύματος του φωτός τότε το φως πίσω από την οπή συνεχίζει την ευθύγραμμη πορεία του. Αν όμως η οπή έχει τις διαστάσεις του μήκους κύματος του φωτός, λόγω του φαινομένου της περίθλασης παύει να ισχύει η ευθύγραμμη διάδοση του φωτός. Το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση που το φως πέσει πάνω σε αδιαφανή εμπόδια. Αν οι διαστάσεις του εμποδίου είναι πολύ μεγαλύτερες από το μήκος κύματος του φωτός, τότε η σκιά του εμποδίου είναι καθορισμένη αυστηρά.

Στην περίπτωση της γεωμετρικής οπτικής θα θεωρήσουμε ότι ισχύει $\lambda << d$ όπου λ το μήκος κύματος του φωτός και d οι διαστάσεις της οπής ή του αντικειμένου. Αυτή η προσέγγιση περιγράφει αρκετά καλά την επίδραση των κατόπτρων και των φακών στην φωτεινή ακτίνα. Μία χρήσιμή αρχή για την κατανόηση της πορείας του φωτός είναι η **αρχή του Fermat:**κάθε φωτεινή ακτίνα που διέρχεται από δύο σημεία ακολουθεί τον χρονικά συντομότερο δρόμο **.**Μία άλλη χρήσιμη αρχή είναι η **αρχή αντίστροφης πορείας του φωτός:** Η πορεία την οποία ακολουθεί το φως δεν αλλάζει αν αντιστρέψουμε την φορά διάδοσής του.

2.2 Ανάκλαση

Όταν μία φωτεινή ακτίνα συναντήσει την διαχωριστική επιφάνεια δύο διαφορετικών οπτικών μέσων εν μέρει αλλάζει πορεία συνεχίζοντας να διαδίδεται στο ίδιο οπτικό μέσο. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ανάκλαση.

Νόμος της ανάκλασης



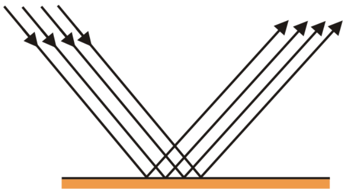
Σχήμα 1

Ας θεωρήσουμε μία φωτεινή ακτίνα η οποία πέφτει σε μία λεία επιφάνεια (Σχήμα 1) και ας ονομάσουμε π και α τις γωνίες πρόσπτωσης και ανάκλασης που σχηματίζουν

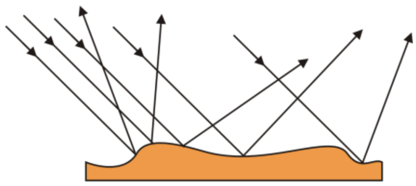
η προσπίπτουσα και η ανακλώμενη ακτίνα αντίστοιχα με την κάθετο στη διαχωριστική επιφάνεια. Τότε ισχύει ότι

$$\pi = \alpha \qquad (2.1)$$

και ακόμη ότι η προσπίπτουσα και η ανακλώμενη ακτίνα ορίζουν ένα επίπεδο κάθετο στη διαχωριστική επιφάνεια.



Σχήμα 2



Σχήμα 3

Φωτεινή δέσμη ονομάζουμε ένα σύνολο ακτίνων . Ας υποθέσουμε ότι ένα τέτοιο σύνολο ακτίνων παράλληλων μεταξύ τους προσπίπτει σε μία λεία και στιλπνή επιφάνεια. Μετά την ανάκλασή τους **παραμένουν μεταξύ τους παράλληλες**. Η ανάκλαση αυτή ονομάζεται **κατοπτρική ανάκλαση** (Σχήμα 2**)**. Όταν η ανάκλαση γίνεται γίνεται πάνω σε μη λεία επιφάνεια μετά την ανάκλαση οι ακτίνες κατευθύνονται ακανόνιστα προς όλες τις διευθύνσεις και το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **διάχυση** (Σχήμα 3).

2.3 Κάτοπτρα

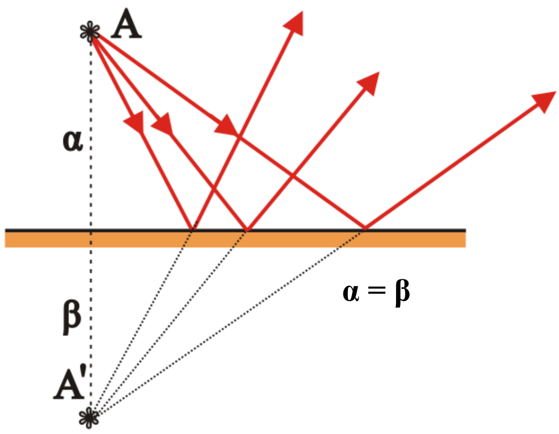
Κάτοπτρο θεωρείται κάθε λεία και στιλπνή επιφάνεια η οποία ανακλά όλο το φως που προσπίπτει πάνω της.

Επίπεδο κάτοπτρο

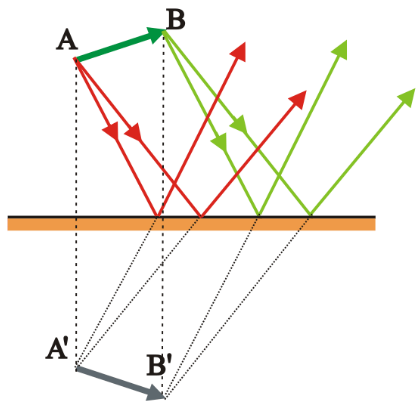
Θα αρχίσουμε την μελέτη μας με το πιο απλό κάτοπτρο, που είναι το **επίπεδο κάτοπτρο** γνωστό σε μας σαν **καθρέπτης** Θα μελετήσουμε την ανάκλαση του φωτός πάνω επάνω σε επίπεδο κάτοπτρο ξεχωρίζοντας δύο περιπτώσεις:

α) Ανάκλαση παράλληλης δέσμης: είναι ακριβώς η περίπτωση που μελετήθηκε λίγο πριν στην κατοπτρική ανάκλαση (Σχήμα 2)

β) Ανάκλαση αποκλίνουσας δέσμης:Ας θεωρήσουμε ότι μία **σημειακή φωτεινή πηγή** βρίσκεται στην θέση Α (Σχήμα 4). Η πηγή αυτή εκπέμπει αποκλίνουσες φωτεινές ακτίνες προς κάθε κατεύθυνση. Μερικές από αυτές προσπίπτουν στο επίπεδο κάτοπτρο και προφανώς ανακλώνται. Για κάθε μία από αυτές ισχύει ο νόμος της ανάκλασης (δηλαδή ότι η γωνία πρόσπτωσης ισούται με τη γωνία ανάκλασης). Η τομή των ανακλώμενων ακτινών ονομάζεται είδωλο. Αν η τομή προέρχεται από πραγματικές ακτίνες τότε το είδωλο ονομάζεται **πραγματικό.** Αν όμως προέρχεται από τομή προέκτασεων ακτίνων τότε το είδωλο ονομάζεται **φαναταστικό**.



Σχήμα 4



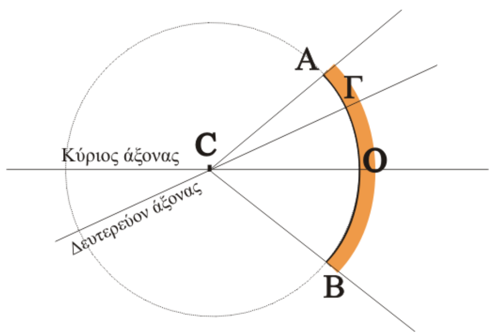
Σχήμα 5

Στην περίπτωσή μας **το είδωλο** του σημειακού φωτεινού αντικειμένου Α είναι το Α' και είναι φανταστικό.

Στην συνέχεια ας θεωρήσουμε ένα αντικείμενο με διαστάσεις (Σχήμα 5). Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι αποτελούνται από ένα άπειρο πλήθος σημειακών φωτεινών πηγών κάθε μία από τις οποίες έχει το είδωλό της και όλα τα είδωλα μαζί φτιάχνουν το είδωλο του αντικειμένου (γενικότερα είδωλο ονομάζεται η απεικόνιση ενός αντικειμένου από ένα οπτικό σύστημα). Από την γεωμετρία του σχήματος προκύπτει ότι το μέγεθος του ειδώλου θα ισούται με το μέγεθος του αντικειμένου.

Σφαιρικά κάτοπτρα

Σφαιρικά κάτοπτρα λέγονται εκείνα που η ανακλαστική επιφάνειά τους είναι τμήμα σφαίρας (Σχήμα 6) Χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες : τα κοίλα και τα κυρτά σφαιρικά κάτοπτρα.



Σχήμα 6

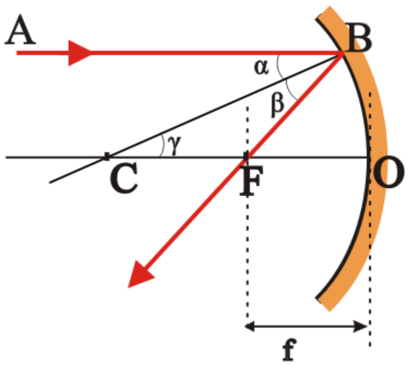
Τα κύρια χαρακτηριστικά ενός σφαιρικού κατόπτρου είναι τα εξής :

α) Το σημείο Ο το οποίο είναι το κέντρο της επιφάνειας του σφαιρικού κατόπτρου και ονομάζεται κορυφή του κατόπτρου.

β) Το κέντρο C της σφαίρας στην οποία ανήκει το κάτοπτρο και ονομάζεται κέντρο καμπυλότητας του κατόπτρου.

γ) Η ακτίνα CO της σφαίρας στην οποία ανήκει το κάτοπτρο και ονομάζεται ακτίνα καμπυλότητας του κατόπτρου.

δ) Η ευθεία από ορίζεται από τα σημεία C και O που ονομάζεται κύριος άξονας του κατόπτρου.
ε) Κάθε ευθεία που διέρχεται από το κέντρο καμπυλότητας C και από ένα τυχαίο σημείο Γ του κατόπτρου ονομάζεται δευτερεύον άξονας.
στ) Η γωνία ACB υπο την οποία φαίνεται από το κέντρο C το κάτοπτρο ονομάζεται γωνιακό άνοιγμα του κατόπτρου. Όταν αυτή είναι μικρότερη από $8°$, το κάτοπτρο λέγεται μικρού ανοίγματος



Σχήμα 7

Κοίλα σφαιρικά κάτοπτρα

Κοίλα σφαιρικά κάτοπτρα ονομάζονται εκείνα στα οποία η ανάκλαση δημιουργείται από την εσωτερική τους επιφάνεια.

Εύρεση της κύριας εστίας

Ας θεωρήσουμε μία ακτίνα AB που πέφτει στο κάτοπτρο παράλληλα με τον κύριο άξονα. Μετά την ανάκλασή της, η οποία υπακούει φυσικά το νόμο της ανάκλασης, θα περάσει από ένα σημείο του κύριου άξονα F. Η ευθεία CB είναι κάθετος στην επιφάνεια του κατόπτρου στο σημείο B διότι είναι ακτίνα του κατόπτρου και θα ισχύει

$$\hat{\alpha} = \hat{\beta}$$

Επειδή ακόμα ισχύει $\hat{\alpha} = \hat{\gamma}$ (ως εντός και εναλλάξ)

έχουμε $\hat{\beta} = \hat{\gamma}$

Συνεπώς το τρίγωνο CFB είναι ισοσκελές και άρα θα ισχύει

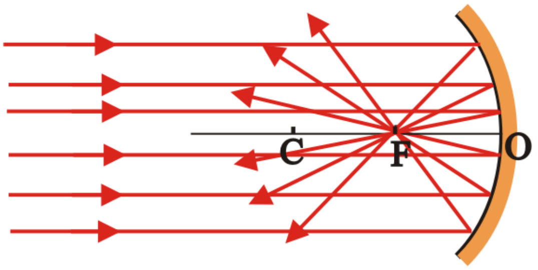
$$CF = FB$$

Στην περίπτωση που το κάτοπτρο είναι μικρού ανοίγματος τότε προσεγγιστικά μπορούμε να θεωρήσουμε ότι

$$FB \approx FO$$

και συνεπώς $FC = FO = \frac{R}{2}$ όπου

$R = CO$ η ακτίνα καμπυλότητας του κατόπτρου.

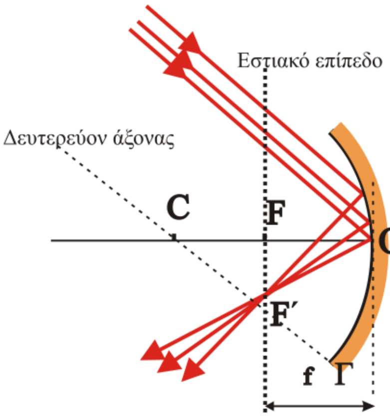


Σχήμα 8

Επειδή ο παραπάνω συλλογισμός ισχύει για οποιαδήποτε τυχαία ακτίνα παράλληλη με τον κύριο άξονα, εξάγουμε το συμπέρασμα ότι όλες οι ακτίνες οι παράλληλες με τον κύριο άξονα μετά την ανάκλασή τους στο κάτοπτρο θα περάσουν από το σημείο F.

Αν θεωρήσουμε λοιπόν μία παράλληλη δέσμη ακτίνων που είναι παράλληλη με τον κύριο άξονα του κατόπτρου, μετά την ανάκλασή τους στο κάτοπτρο όλες περνούν από το σημείο F του άξονα που λέγεται **κύρια εστία** του κατόπτρου (σχήμα 8). Η απόσταση μεταξύ της κύριας εστίας και της κορυφής Ο του κατόπτρου ονομάζεται εστιακή απόσταση f ($f=(FO)$) και όπως αποδείξαμε ισχύει

$$f=\frac{R}{2} \quad (2.2)$$



Σχήμα 9

Ας θεωρήσουμε στη συνέχεια μία παράλληλη δέσμη ακτινών που πέφτει στο κάτοπτρο παράλληλα προς τη διεύθυνση ενός δευτερεύοντα άξονα CΓ (σχήμα 9). Μετά την ανάκλασή τους οι ακτίνες συγκλίνουν σε ένα σημείο, το F', το οποίο ακολουθώντας τον ίδιο συλλογισμό με προηγουμένως μπορούμε να πούμε ότι απέχει από το κέντρο καμπυλότητας απόσταση $R/2$. Λόγω του μικρού ανοίγματος του κατόπτρου μπορούμε να θεωρήσουμε ότι όλες οι δευτερεύουσες εστίες βρίσκονται πάνω σε ένα επίπεδο το οποίο ονομάζεται εστιακό επίπεδο.

Θα πρέπει εδώ να τονίσουμε το γεγονός πως εξαιτίας της αρχής της αντίστροφης πορείας του φωτός κάθε ακτίνα που διέρχεται από μία κύρια ή δευτερεύουσα εστία , μετά την ανάκλασή της γίνεται παράλληλη με τον κύριο ή δευτερεύοντα άξονα

Ανάκλαση αποκλίνουσας δέσμης : Ας θεωρήσουμε ένα σημειακό φωτεινό αντικείμενο Α πάνω στον κύριο άξονα το οποίο βρίσκεται σε απόσταση μεγαλύτερη από την εστιακή απόσταση του κατόπτρου(σχήμα 10).

Ας θεωρήσουμε μία τυχαία ακτίνα ΑΒ η οποία προσπίπτει στο κάτοπτρο . Ακολουθώντας το νόμο της ανάκλασης ($\hat{\gamma}=\hat{\delta}$) βρίσκουμε την ανακλώμενη ακτίνα και κατ' επέκταση το σημείο Α' που αυτή τέμνει τον κύριο άξονα. Από το θεώρημα της διχοτόμου έχουμε

$$\frac{AB}{A'B}=\frac{AC}{A'C}$$

και επειδή προσεγγιστικά για κάτοπτρα μικρού ανοίγματος ισχύει

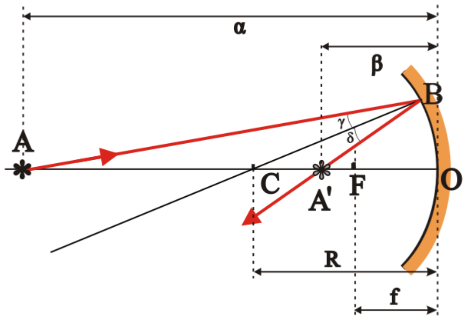
$$AB\approx AO \text{ και } A'B\approx A'O$$

έχουμε

$$\frac{AO}{A'O}=\frac{AC}{A'C}\Rightarrow\frac{\alpha}{\beta}=\frac{\alpha-R}{R-\beta}\Rightarrow$$

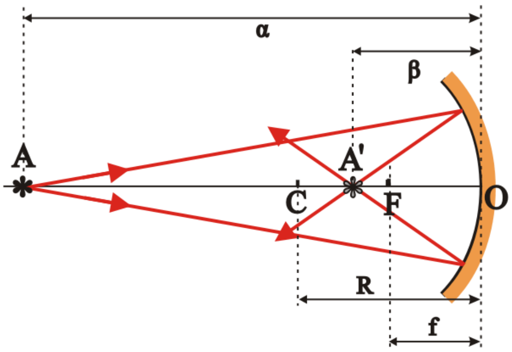
$$\frac{1}{\alpha}+\frac{1}{\beta}=\frac{2}{R}$$

$$\text{ή } \frac{1}{\alpha}+\frac{1}{\beta}=\frac{1}{f}$$

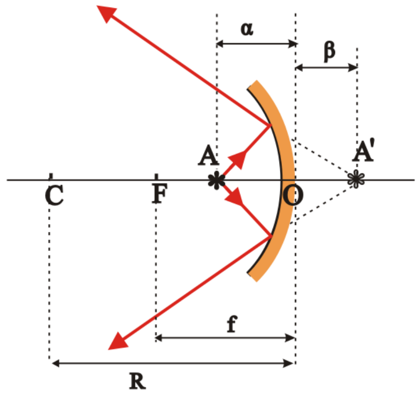


Σχήμα 10

όπου α, β οι αποστάσεις του αντικειμένου Α και του σημείου τομής Α΄ της ανακλώμενης ακτίνας με τον κύριο άξονα από την κορυφή Ο του κατόπτρου. Η παραπάνω ανάλυση έγινε με βάση μία τυχαία ακτίνα που ξεκινά από το σημειακό φωτεινό αντικείμενο Α. Άρα ισχύει για όλες τις ακτίνες που ξεκινούν από το Α και που μετά την ανάκλασή τους στο κάτοπτρο θα περνούν από το Α΄, το οποίο ονομάζεται **είδωλο του Α** και το οποίο είναι πραγματικό **(βρίσκεται από το σημείο τομής των ανακλώμενων ακτινών)**(σχήμα 11). Αν αρχίσουμε να πλησιάζουμε το αντικείμενο Α, τότε το είδωλο αρχίζει να απομακρύνεται και φθάνει στο άπειρο όταν το φωτεινό αντικείμενο συμπέσει με την κύρια εστία του κατόπτρου. Αν το σημειακό φωτεινό αντικείμενο βρίσκεται μεταξύ της κύριας εστίας και της κορυφής του κατόπτρου(σχήμα 12) , τότε η φωτεινή δέσμη μετά την ανάκλαση αποκλίνει και συνεπώς το είδωλο είναι φανταστικό γιατί προέρχεται από τομή προεκτάσεων ακτίνων.



Σχήμα 11

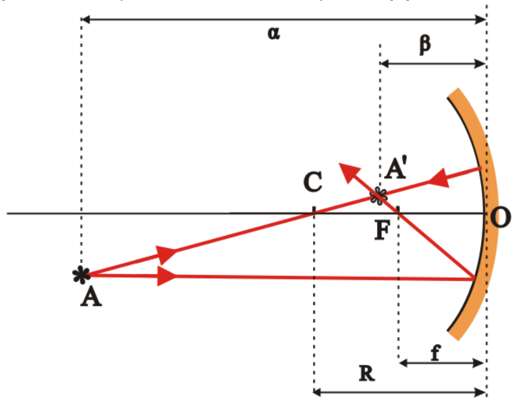


Σχήμα 12

Αν α και β είναι οι αποστάσεις του αντικειμένου και του ειδώλου από την κορυφή του κατόπτρου ισχύει η σχέση

$$\frac{1}{\alpha}+\frac{1}{\beta}=\frac{1}{f} \qquad (2.3)$$

Μέχρι τώρα ασχοληθήκαμε με την περίπτωση που το φωτεινό αντικείμενο βρίσκεται πάνω στον κύριο άξονα. Αν όμως δεν βρίσκεται (σημείο Α στο σχήμα 13) πάνω στον κύριο άξονα , τότε οι ακτίνες μετά την ανάκλαση τέμνονται σε ένα σημείο, σχηματίζοντας έτσι το είδωλο Α΄ του αντικειμένου Α ,το οποίο δεν βρίσκεται πάνω στον κύριο άξονα και τότε η προηγούμενη σχέση (2.3) ισχύει προσεγγιστικά.



Σχήμα 13

Γραφική εύρεση ειδώλου: Για να βρούμε γραφικά το είδωλο ενός σημειακού αντικειμένου, όπως δείχνουν τα παρακάτω γραφικά παραδείγματα ακολουθούμε τους εξής κανόνες:

α) Ακτίνα που διέρχεται από το κέντρο καμπυλότητας του κατόπτρου μετά την ανάκλαση της στο κάτοπτρο ακολουθεί την ίδια πορεία και έχει αντίθετη φορά.

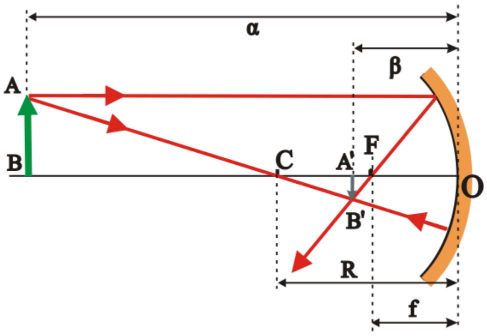
β)Ακτίνα παράλληλη με τον κύριο άξονα μετά την ανάκλαση της στο κάτοπτρο περνά από την κύρια εστία του κατόπτρου

γ) Ακτίνα που περνάει από την κύρια εστία του κατόπτρου μετά την ανάκλαση της στο κάτοπτρο γίνεται παράλληλη με τον κύριο άξονα.

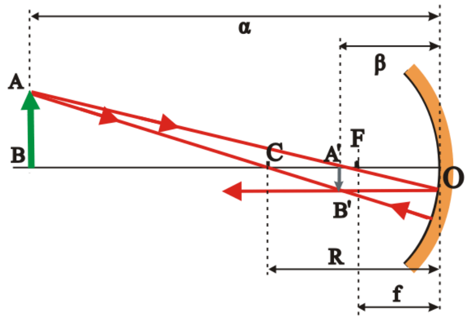
δ) Ακτίνα που συναντά το κάτοπτρο στην κορυφή Ο ανακλάται με γωνία ίση με την γωνία πρόσπτωσης

Για να βρούμε το είδωλο ενός σημειακού αντικειμένου μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε δύο από τους παραπάνω κανόνες βρίσκοντας έτσι το σημείο τομής δύο χαρακτηριστικών ακτίνων και συνεπώς το είδωλό του(όλες οι ακτίνες που ξεκινούν από το σημειακό αντικείμενο αναγκαστικά θα περνούν από αυτό το σημείο μετά την ανάκλασή τους).

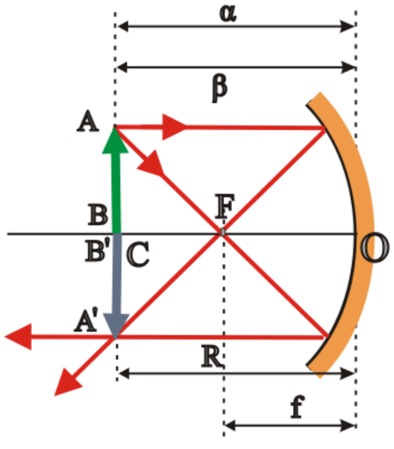
Αν τώρα το αντικείμενό μας έχει διαστάσεις μπορούμε να βρούμε το είδωλο των άκρων του και κατ΄ επέκταση και του ίδιου (σχήματα 14,15,16,17,18).



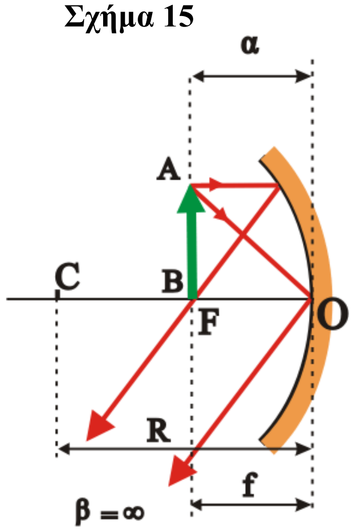
Σχήμα 14



Σχήμα 15



Σχήμα 16



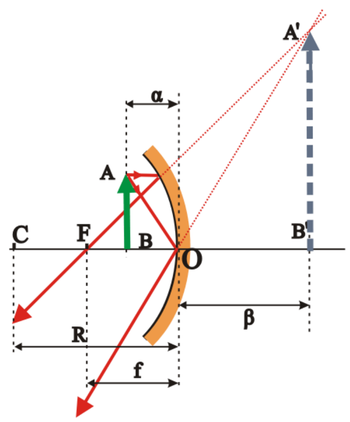
Σχήμα 17

Μεγέθυνση: ονομάζεται το πηλίκο του μήκους του ειδώλου προς το μήκος του αντικειμένου

$$M = \frac{(A'B')}{(AB)} \qquad (2.4)$$

όπου $(A,B),(A',B')$ τα μήκη του αντικειμένου και του ειδώλου αντίστοιχα. Όταν το είδωλο είναι αντεστραμμένο το $(A'B')$ είναι αρνητικό. Αποδεικνύεται ότι ισχύει

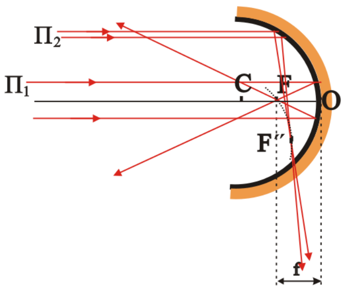
$$M = -\frac{\beta}{\alpha} \qquad (2.5)$$



Σχήμα 18

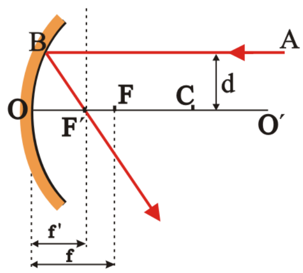
2.4 Σφάλματα σφαιρικών κατόπτρων

α)Σφαιρική εκτροπή: Η προηγούμενη ανάλυση των σφαιρικών κατόπτρων έγινε με βάση τις παραδοχές ότι τα κάτοπτρα είναι μικρού ανοίγματος και ότι οι ακτίνες είναι σχεδόν αξονικές (δηλαδή κοντά στον κύριο άξονα). Εάν μία από τις προηγούμενες παραδοχές δεν ισχύει ,τα κάτοπτρα σχηματίζουν όταν το αντικείμενο είναι σημειακό , μη σημειακό είδωλο (κηλίδα). Κατ' επέκταση, στην περίπτωση που το αντικείμενο έχει διαστάσεις τα σχηματιζόμενα είδωλά τους θα έχουν ασαφή όρια.
Αυτό το σφάλμα των φακών ονομάζεται σφαιρική εκτροπή. Ένα τέτοιο κάτοπτρο με σχετικά μεγάλο άνοιγμα φαίνεται στο παραπλεύρως σχήμα 19. Όταν σε ένα τέτοιο κάτοπτρο προσπέσει δέσμη παράλληλων ακτινών δεν συγκλίνουν όλες προς το ίδιο σημείο. Αυτές που βρίσκονται κοντά στον κύριο άξονα (αξονικές) του κατόπτρου που στο σχήμα παριστάνονται ως δέσμη Π_1 συγκλίνουν στην κύρια εστία F. Η δέσμη Π_2 που δεν είναι αξονική συγκλίνει στο σημείο F´´.
Ο γεωμετρικός τόπος των εστιών αποτελεί τμήμα περιφέρειας κύκλου.



Σχήμα 19

Στην συνέχεια θα ασχοληθούμε αναλυτικότερα με το σφάλμα της σφαιρικής εκτροπής. Ας θεωρήσουμε μία ακτίνα ΑΒ παράλληλη με τον κύριο άξονα και σε απόσταση d από αυτόν (σχήμα 20). Μετά την ανάκλασή της θα τέμνει τον κύριο άξονα στο σημείο F' και το σημείο αυτό θα είναι τόσο πιο κοντά στην κύρια εστία F όσο η d θα γίνεται μικρότερη. Η ακριβής σχέση που δίνει την εξάρτηση της f´ (είναι η απόσταση της F´ από το οπτικό κέντρο του κατόπτρου) από την ακτίνα καμπυλότητας R είναι η εξής



Σχήμα 20

$$\frac{f'}{R} = 1 - \frac{1}{2\sqrt{1-(\frac{d}{R})^2}} \qquad (2.6)$$

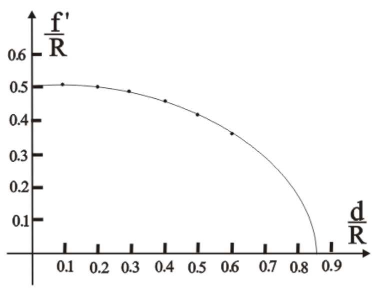
Αν στην παραπάνω σχέση θέσουμε $d << R$ τότε $\frac{d}{R} \to 0$ και έτσι το πηλίκο $\frac{f'}{R}$ λαμβάνει τη τιμή

$$\frac{f'}{R} = \frac{1}{2}$$

δηλαδή

$$f' = \frac{R}{2} \qquad (2.7)$$

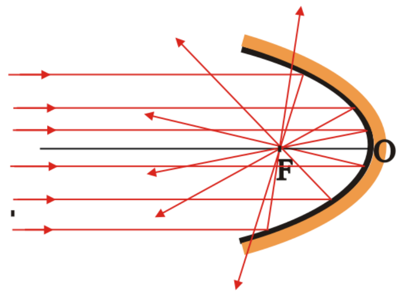
συνεπώς τότε τα σημεία F και F´ συμπίπτουν και το κάτοπτρο παρουσιάζει ιδανική συμπεριφορά. Αυτό όπως αντιλαμβανόμαστε συμβαίνει για τις αξονικές ακτίνες.



Σχήμα 21

Η γραφική παράσταση $\frac{f'}{R} = f(\frac{d}{R})$ φαίνεται στο σχήμα 21.

Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με τα παραβολικά κάτοπτρα (σχήμα 22)των οποίων η ανακλαστική επιφάνεια έχει σχήμα παραβολοειδούς εκ περιστροφής. Τότε αποδεικνύεται ότι οι ακτίνες θα διέλθουν όλες από ένα σημείο ανεξάρτητα από το άνοιγμα του κατόπτρου.



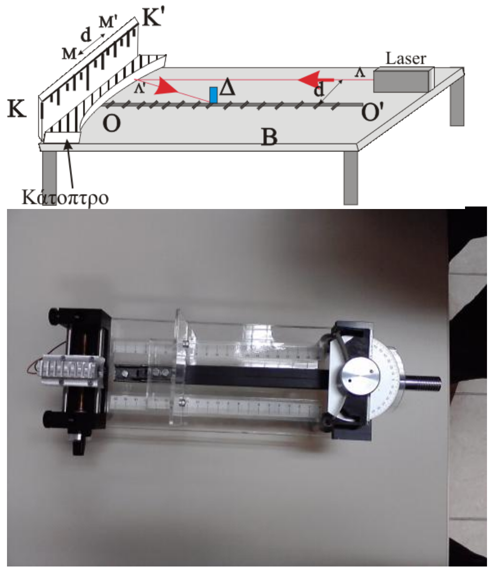
Σχήμα 22

β) Αστιγματική εκτροπή: Άλλος τύπος σφάλματος παρουσιάζεται όταν η προσπίπτουσα δέσμη ακτινών σχηματίζει μεγάλη γωνία με τον κύριο άξονα. Τότε οι ανακλώμενες ακτίνες δεν τέμνονται σε ένα σημείο , αλλά διέρχονται από δύο ευθείες οι οποίες είναι κάθετες μεταξύ τους και δεν βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο.

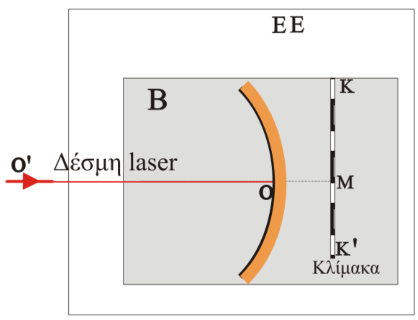
3. Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη για τη μέτρηση της εστιακής απόστασης κοίλου κατόπτρου αποτελείται (σχήματα 23 α,β) από μια βάση Β πάνω στην οποία βρίσκεται :

α) το κοίλο κάτοπτρο του οποίου θέλουμε να μετρήσουμε την εστιακή απόσταση ,
β) ο κύριος άξονας του κατόπτρου ΟΟ΄ που είναι χαραγμένος πάνω στη βάση (Β) και είναι βαθμολογημένος με κλίμακα παράλληλη σε αυτόν , το μηδέν της οποίας συμπίπτει με την κορυφή του κατόπτρου ,
γ) ο δείκτης (Δ) που μπορεί να μετακινείται κατά μήκος του κύριου άξονα του κατόπτρου και πάνω σε αυτόν υπάρχει η δυνατότητα να σημειωθεί το ίχνος της ανακλώμενης δέσμης (αυτό όπως θα δούμε παρακάτω χρησιμοποιείται για την ευθυγράμμιση του Laser),
δ) μια πηγή Laser, της οποίας η δέσμη είναι παράλληλη με το κύριο άξονα και η οποία με τη βοήθεια κατάλληλης στροφικής διάταξης μπορεί να μετακινείται σε διεύθυνση κάθετη στον κύριο άξονα του κατόπτρου ΟΟ΄. Με την βοήθεια αυτής της διάταξης μπορούμε να μετρήσουμε την απόσταση της δέσμης από τον κύριο άξονα.
Στα σχήματα 23α,24 και 25 η κλίμακα ΚΚ’ δείχνει παραστατικά την παράλληλη μετατόπιση του laser.



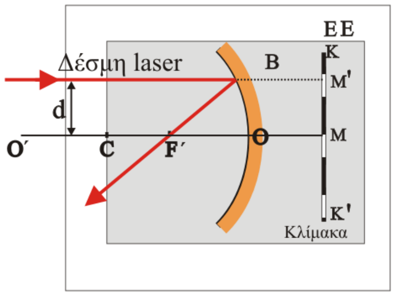
Σχήμα 23 α,β



Σχήμα 24

Είναι απαραίτητο να γίνει ευθυγράμμιση του συστήματος, δηλαδή η δέσμη Laser να είναι πάντα παράλληλη προς τον κύριο άξονα του κατόπτρου (OO΄).
Για να γίνει η ευθυγράμμιση , μετακινούμε το Laser έτσι ώστε η δέσμη του να διέρχεται ακριβώς πάνω από τον κύριο άξονα OO΄ και κατ' αυτό τον τρόπο να προσπίπτει στη κορυφή O του κατόπτρου (σχήμα 24) , η οποία έχει σημειωθεί με μαρκαδόρο πάνω στο κάτοπτρο. Σε αυτή τη περίπτωση, η ανακλώμενη και η προσπίπτουσα δέσμη Laser θα πρέπει να αφήνουν ίχνη πάνω στο δρομέα (Δ) τα οποία να βρίσκονται στην ίδια κατακόρυφο. Σημειώνουμε πάνω στο χαρτί του δρομέα (Δ) το ίχνος της ανακλώμενης δέσμης όταν το Laser είναι ευθυγραμμισμένο.
Όταν το σύστημα έχει ευθυγραμμισθεί τότε **σημειώνουμε τη θέση M** της κορυφής του κατόπτρου O στην κλίμακα KK΄ (σχήμα 24).Εναλλακτικά θα μπορούσαμε να σημειώσουμε την ένδειξη του κοχλία στη στροφική διάταξη μετακίνησης του Laser . Η θέση αυτή αντιστοιχεί σε απόσταση $d = 0$ της δέσμης από τον κύριο άξονα του κατόπτρου.

Στρέφοντας το κοχλία μετακινούμε το Laser κατά μία απόσταση d. Θα παρατηρήσουμε αντίστοιχη μετατόπιση του σημείου πρόσπτωσης της δέσμης Laser πάνω στο κάτοπτρο . Σημειώνουμε επίσης τη θέση M΄ του σημείου πρόσπτωσης της δέσμης πάνω στη κλίμακα KK΄ (σχήμα 25). Εναλλακτικά θα μπορούσαμε να σημειώσουμε την ένδειξη του κοχλία στη στροφική διάταξη μετακίνησης του Laser . Η απόσταση MM' ισούται με το d.



Σχήμα 25

$$MM' = d$$

Κατά τον ίδιο τρόπο ,η αφαίρεση των δύο ενδείξεων του κοχλία μας δίνει την απόσταση d.
Αποτέλεσμα της μετακίνησης είναι ότι μετά την ανάκλασή της , η δέσμη να διέρχεται από ένα σημείο F΄ του κύριου άξονα του κατόπτρου. Το σημείο αυτό μπορεί εύκολα να σημειωθεί με τη βοήθεια του δρομέα (Δ) (τον μετακινούμε μέχρι το ίχνος της ανακλώμενης δέσμης να συμπέσει ή να βρεθεί στην ίδια κατακόρυφο με το ίχνος της ανακλώμενης δέσμης που είχε σημειωθεί κατά την ευθυγράμμιση)και να μετρηθεί η απόσταση OF΄ πάνω στη βαθμολογημένη κλίμακα. Η απόσταση αυτή αποτελεί την απόσταση f' της σχέσης (2.6). Λύνοντας τη σχέση (2.6) ως προς την ακτίνα καμπυλότητας του κατόπτρου με προσέγγιση πρώτης τάξης έχουμε

$$R = f' + \sqrt{f'^2 + 0.5d^2} \qquad (3.1)$$

Έτσι από τον παραπάνω τύπο μπορούμε να υπολογίσουμε την ακτίνα καμπυλότητας και κατ' επέκταση από τη σχέση

$$f = \frac{R}{2} \qquad (3.2)$$

την εστιακή απόσταση του κατόπτρου.

4. Εργασίες

1) Θέτουμε σε λειτουργία τη συσκευή Laser και ευθυγραμμίζουμε σύμφωνα με τα προηγούμενα το σύστημα .Επαληθεύουμε την ευθυγράμμιση από το γεγονός ότι η ανακλώμενη δέσμη και η προσπίπτουσα δέσμη αφήνουν πάνω στο δρομέα (Δ) ίχνη στην ίδια κατακόρυφο.
2) Στη θέση αυτή σημειώνουμε την αντιστοιχία της κορυφής του κατόπτρου O στην κλίμακα KK΄(θέση M του σχήματος 24). Εναλλακτικά θα μπορούσαμε

να σημειώσουμε την ένδειξη του κοχλία στη στροφική διάταξη μετακίνησης του Laser.

3) Στρέφοντας το κοχλία μετακινούμε το Laser προς μία διεύθυνση, παράλληλη προς τη κλίμακα ΚΚ΄ ανά 5mm έως τα 4cm συμπληρώνοντας τη στήλη 2 του πίνακα 1 και για κάθε θέση σημειώνουμε με τη βοήθεια του δρομέα (Δ) το σημείο F΄ του κύριου άξονα από το οποίο διέρχεται η δέσμη όταν ανακλάται (βλέπε πειραματική διαδικασία).
4) Υπολογίζουμε την απόσταση $OF' = f_1'$ από την κλίμακα της βάσης για κάθε τιμή του d και συμπληρώνουμε τη στήλη 3 του πίνακα μετρήσεων 1.
5) Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία μετακινώντας το Laser προς την αντίθετη κατεύθυνση και καταχωρούμε τα αποτελέσματα f_2' στη στήλη 4 του πίνακα μετρήσεων 1.
6) Για κάθε απόσταση d υπολογίζουμε τη μέση τιμή των δύο μετρήσεων

$$f' = \frac{f_1' + f_2'}{2}$$

και την αναγράφουμε στη στήλη 5 του πίνακα μετρήσεων 1.

7) Από τη σχέση (3.1) υπολογίζουμε την ακτίνα καμπυλότητας R του κατόπτρου και αναγράφουμε τα αποτελέσματα στη στήλη 6 του πίνακα μετρήσεων 1.
8) Από τη σχέση (3.2) υπολογίζουμε την εστιακή απόσταση f του κατόπτρου και αναγράφουμε τα αποτελέσματα στη στήλη 7 του πίνακα μετρήσεων 1
9) Υπολογίζουμε τη μέση τιμή των εστιακών αποστάσεων $\bar{f}$ και αναγράφουμε τα αποτελέσματα στη στήλη 8 του πίνακα μετρήσεων 1
10) Υπολογίζουμε το τυπικό σφάλμα της μέσης τιμής καθώς και το επί τοις εκατό σχετικό σφάλμα

$$\delta\bar{f} =$$

$$\sigma_{\sigma\chi}\% = \frac{\delta\bar{f}}{\bar{f}}100$$

11) Γράφουμε το τελικό αποτέλεσμα στη μορφή

$$\bar{f} \pm \delta\bar{f} =$$

$$\bar{f} \pm \sigma_{\sigma\chi}\% =$$

12) Από τις τιμές του πίνακα βρίσκουμε τα πηλίκα $\frac{f'}{\bar{R}}, \frac{d}{\bar{R}}$ και συμπληρώνουμε τον πίνακα μετρήσεων 2

13)Κατασκευάζουμε το διάγραμμα $\frac{f'}{\bar{R}} = f(\frac{d}{\bar{R}})$

ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
α/α	d cm	f_1' cm	f_2' cm	f' cm	R cm	f cm	$\bar{f}$ cm	$\Delta\bar{f}$	$(\Delta f)^2$

ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ 2

1	2
$\frac{d}{R}$	$\frac{f'}{R}$

5 Θεματολογικές ερωτήσεις κατανόησης

1)Πως τροποποιείται ο τύπος των κατόπτρων αν μετρήσουμε τις αποστάσεις αντικειμένου και ειδώλου από την κύρια εστία του κατόπτρου;
2) Ισχύει ο τύπος των κατόπτρων στα επίπεδα κάτοπτρα;
3)Δίνονται δύο κοίλα κάτοπτρα της ίδιας εστιακής απόστασης αλλά διαφορετικού ανοίγματος. Σχηματίζουμε το είδωλο του ήλιου και με τα δύο σε ένα δοχείο με νερό. Σε ποιο από τα δύο θα αρχίσει να βράζει πιο γρήγορα το νερό;
4) Ένα κοίλο κάτοπτρο δίνει για ένα αντικείμενο ΑΒ το πραγματικό του είδωλο Α΄Β΄. Τι θα δούμε αν βάλουμε το μάτι μας στο Α΄Β΄.
5) Υπάρχει η δυνατότητα από ένα κοίλο κάτοπτρο να πάρουμε το είδωλο ενός αντικειμένου έτσι ώστε το ένα του μέρος να είναι πραγματικό και το άλλο φανταστικό;
6)Ένα πραγματικό αντικείμενο δίνει μέσω ενός κοίλου κατόπτρου, είδωλο πραγματικό και ίσου μεγέθους. Πόσο απέχει το αντικείμενο από το κάτοπτρο;