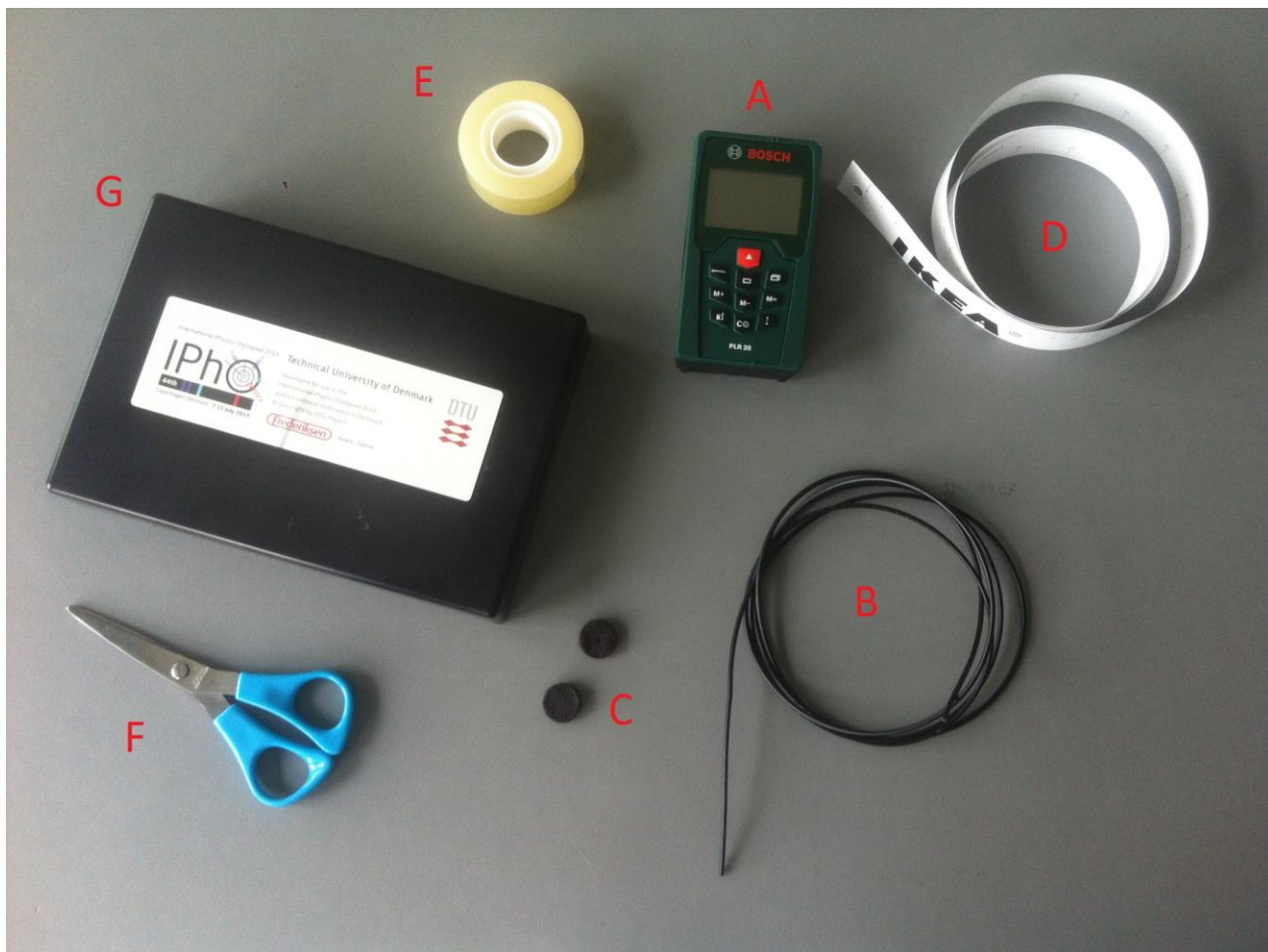


- Η πειραματική εξέταση διαρκεί 5 ώρες. Υπάρχουν 2 προβλήματα που λαμβάνουν συνολικά 20 βαθμούς. Παρακαλώ σημειώστε ότι τα ερωτήματα δεν είναι ισοδύναμα.
- Δεν επιτρέπεται να ανοίξετε τον καφέ φάκελο με τις εκφωνήσεις ή το κουτί με τον πειραματικό εξοπλισμό πριν τον ήχο που σηματοδοτεί την έναρξη της εξέτασης (συριγμός).
- Για κάθε πρόβλημα υπάρχουν ειδικά Φύλλα Απαντήσεων (δείτε την κεφαλίδα για τον αριθμό προβλήματος και το διακριτικό χρώμα). Γράψτε τις απαντήσεις σας στα κατάλληλα πλαίσια στο σωστό Φύλλο Απαντήσεων.
- Για αναλυτικούς υπολογισμούς χρησιμοποιήστε τις επίσημες σελίδες της IPhO ή το επίσημο μιλιμετρέ χαρτί της IPhO. **ΣΤΙΣ ΣΕΛΙΔΕΣ ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ και ΣΤΙΣ ΣΕΛΙΔΕΣ ΜΙΛΙΜΕΤΡΕ ΧΑΡΤΙΟΥ ΣΥΜΠΛΗΡΩΣΤΕ ΟΛΑ ΤΑ ΠΕΔΙΑ ΤΗΣ ΚΕΦΑΛΙΔΑΣ και ΓΡΑΨΤΕ ΜΟΝΟ ΣΤΗΝ ΕΜΠΡΟΣ ΟΨΗ ΤΟΥ ΧΑΡΤΙΟΥ** (η πίσω όψη δε θα φωτοτυπηθεί). Περιορίστε το κείμενο στις απαντήσεις σας στο απολύτως απαραίτητο: Προσπαθήστε να εξηγήσετε τις λύσεις σας χρησιμοποιώντας κυρίως εξισώσεις, αριθμούς, σύμβολα και/ή διαγράμματα. Αν γράψετε κάτι, σε οποιοδήποτε φύλλο, που δε θέλετε να βαθμολογηθεί, φροντίστε να το διαγράψετε.
- Δεν επιτρέπεται να εγκαταλείψετε το χώρο εργασίας σας χωρίς άδεια. Αν χρειάζεστε βοήθεια (χαλασμένος υπολογιστής τσέπης, πρόσθετες σελίδες χαρτιού, επίσκεψη στην τουαλέτα, κ.λπ.), παρακαλώ σηκώστε το χέρι σας και κρατήστε το όρθιο μέχρι να έρθει κάποιος από τους οδηγούς.
- **Το τέλος** της εξέτασης καθορίζεται από **ΗΧΗΤΙΚΟ ΣΗΜΑ** (συριγμός), οπότε πρέπει να σταματήσετε να γράφετε αμέσως, **ΑΛΛΑ ΝΑ ΠΑΡΑΜΕΙΝΕΤΕ ΚΑΘΙΣΜΕΝΟΙ**. Αν έχετε ολοκληρώσει τις απαντήσεις σας πριν το τέλος χρόνου, παρακαλώ σηκώστε το χέρι σας.
- **ΤΑΚΤΟΠΟΙΗΣΤΕ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΣΤΕ** τα χαρτιά σας με την ακόλουθη σειρά φροντίζοντας **ΟΙ ΑΠΑΝΤΗΣΕΙΣ ΣΑΣ ΝΑ ΕΙΝΑΙ ΓΡΑΜΜΕΝΕΣ ΣΤΗΝ ΕΜΠΡΟΣ ΟΨΗ** και τοποθετήστε τα στον καφέ φάκελο.
 1. Φύλλο Απαντήσεων E1 ακολουθούμενο από χαρτί απαντήσεων και μιλιμετρέ για το θέμα E1.
 2. Φύλλο Απαντήσεων E2 ακολουθούμενο από χαρτί απαντήσεων και μιλιμετρέ για το θέμα E2.
 3. Όλες τις υπόλοιπες σελίδες των πρόχειρων συμπεριλαμβανομένων.
- Στο **ΕΠΟΜΕΝΟ ΗΧΗΤΙΚΟ ΣΗΜΑ** (συριγμό) **ΜΠΟΡΕΙΤΕ ΝΑ ΑΠΟΧΩΡΗΣΕΤΕ**
- Δεν επιτρέπεται να πάρετε μαζί σας κανένα φύλλο χαρτιού όταν φεύγετε από το χώρο εξέτασης.

Σημείωση: Όλες οι μετρήσεις και οι υπολογισμοί να γίνουν στο S.I. με κατάλληλο πλήθος σημαντικών ψηφίων. Σφάλματα θα συμπεριληφθούν μόνο όταν ζητούνται ρητώς στην εκφώνηση.

1.0 Εισαγωγή

Πειράματα με ένα μετρητή απόστασης laser (laser distance meter ή LDM)



Εικόνα 1.1 Μέρος του εξοπλισμού του πειράματος

- A:** Μετρητής απόστασης laser
- B:** Καλώδιο οπτικής ίνας (μήκους περίπου 1 m)
- C:** Αυτοκόλλητα ταμπόν με οπές
- D:** Μετροταινία
- E:** Σελοτέιπ
- F:** Ψαλίδι
- G:** Καπάκι του μαύρου κουτιού

Ένας μετρητής απόστασης laser (LDM, βλ. Εικ. 1.2 και Εικ. 1.3) αποτελείται από έναν εκπομπό και ένα δέκτη. Ο εκπομπός είναι μια δίοδος laser που εκπέμπει μια διαμορφωμένη ακτίνα laser, δηλ. μια ακτίνα laser της οποίας το πλάτος μεταβάλλεται με πολύ μεγάλη συχνότητα. Όταν η

ακτίνα laser χτυπά σε ένα σώμα, το φως ανακλάται προς όλες τις κατευθύνσεις από το Ίχνος (κουκίδα) του laser. Μέρος αυτού του φωτός επιστρέφει στο δέκτη του οργάνου ο οποίος βρίσκεται ακριβώς δίπλα στον εκπομπό. Το οπτικό μέρος της διάταξης είναι εστιασμένο στο Ίχνος και δέχεται το φως που επιστρέφει από εκεί. Το ηλεκτρονικό κύκλωμα του οργάνου μετρά τη διαφορά χρόνου στη διαμόρφωση του φωτός που επιστρέφει στο δέκτη σε σχέση με το φως που εκπέμπεται. Η καθυστέρηση t στη διαμόρφωση συμπίπτει με το χρόνο που χρειάζεται το φως για να διασχίσει την απόσταση από τον εκπομπό στο δέκτη. Στη συνέχεια ο μετρούμενος χρόνος μετατρέπεται στην τιμή

$$y = \frac{1}{2}ct + k$$

Η τιμή y φαίνεται στην οθόνη του οργάνου και $c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ms}^{-1}$ είναι η ταχύτητα του φωτός.

Η σταθερά k εξαρτάται από τις ρυθμίσεις του οργάνου. Μπορείτε να ρυθμίσετε το όργανο ώστε να μετρά την απόσταση άλλοτε από την πίσω και άλλοτε από την εμπρός όψη του. Κατά την έναρξη λειτουργίας του ο LDM μετρά από την πίσω όψη. **Αυτή η ρύθμιση θα διατηρηθεί για όλη τη διάρκεια των μετρήσεων.**

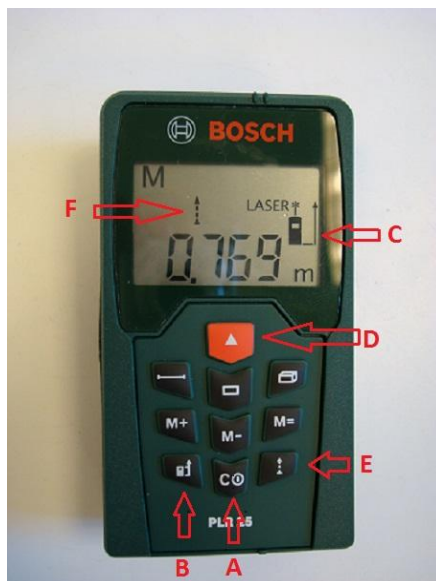
Λόγω του φαινομένου της παράλλαξης, ο LDM δε μπορεί να μετρήσει αποστάσεις μικρότερες των 5 cm. Η μέγιστη απόσταση που μπορεί να μετρηθεί είναι περίπου 25 m. Το σχήμα του οργάνου είναι τέτοιο ώστε τόσο η πίσω όψη όσο και η εμπρός να σχηματίζουν ορθή γωνία με τη δέσμη laser. Όταν το όργανο τοποθετείται στο τραπέζι η πόλωση είναι κατακόρυφη (κάθετη στην οθόνη).

Η δίοδος laser είναι κλάσης 2 με ισχύ $< 1 \text{ mW}$ και μήκος κύματος 635 nm. Η κατασκευαστική αβεβαιότητα είναι $\pm 2 \text{ mm}$.

ΠΡΟΣΟΧΗ: Η δίοδος laser μπορεί να βλάψει την όραση. Μην κοιτάτε απευθείας τη δέσμη και μη τη στρέψετε στα μάτια άλλων!

Ρυθμίσεις του LDM

Ο υπολογισμός του y προϋποθέτει προφανώς ότι το φως κινείται με ταχύτητα c . Στο επίπεδο ακρίβειας του πειράματος δε χρειάζεται να γίνει διαχωρισμός μεταξύ της ταχύτητας διάδοσης του φωτός στο κενό και στον αέρα, αφού ο δείκτης διάθλασης για ξηρή ατμόσφαιρα σε Κ.Σ. πίεσης και θερμοκρασίας είναι $1,000\,29 \approx 1,000$.



Εικόνα 1.2 Τα κουμπιά που δε σημειώνονται στο σχήμα με κόκκινο χρώμα δεν εμπλέκονται στο πείραμα (μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό εμβαδού και όγκου). Τα κουμπιά που θα χρησιμοποιήσετε είναι:

A: On/off.

B: Εναλλαγή μέτρησης από την εμπρός ή την πίσω όψη του οργάνου.

C: Σήμανση μέτρησης από την εμπρός ή την πίσω όψη του οργάνου.

D: Έναρξη μετρήσεων

E: Συνεχής μέτρηση

F: Σήμανση συνεχούς μέτρησης



Εικόνα 1.3 Ο LDM όπως φαίνεται από την πρόσθια όψη:

A: Δέκτης: Φακός για την εστίαση του τηλεσκοπίου στο Ίχθυος.

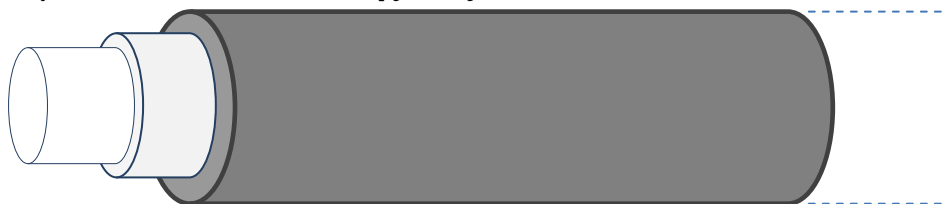
B: Πομπός: Μην κοιτάτε απευθείας στη δέσμη laser!

1.1 Μετρήσεις με τον LDM

Το όργανο θα εκτελέσει μια μέτρηση όταν πατηθεί το κουμπί **D**, βλ. Εικ. 1.2.

1.1a	Χρησιμοποιήστε τον LDM για να μετρήσετε την απόσταση H από την επιφάνεια του τραπεζιού μέχρι το πάτωμα. Γράψτε το σφάλμα ΔH . Σχεδιάστε ένα σχήμα που να δείχνει τον τρόπο που εκτελέσατε τη μέτρηση.	0,4
------	---	-----

1.2 Πείραμα με το καλώδιο οπτικής ίνας



Εικόνα 1.4 Διάγραμμα του καλωδίου οπτικής ίνας.

Σας έχει δοθεί ένα καλώδιο οπτικής ίνας μήκους κατά προσέγγιση 1 m και διαμέτρου κατά προσέγγιση 2 mm. Το καλώδιο αποτελείται από δύο οπτικά υλικά. Ο Πυρήνας (διαμέτρου περίπου 1 mm) είναι φτιαγμένος από πλαστικό με μεγάλο δείκτη διάθλασης. Γύρω από αυτόν υπάρχει Επένδυση από πλαστικό υλικό με λίγο μικρότερο δείκτη διάθλασης, το οποίο με τη σειρά του περιβάλλεται από μαύρο πλαστικό. Ο Πυρήνας και η Επένδυση λειτουργούν ως Κυματοδηγός για το φως που κινείται μέσα στην οπτική ίνα, αφού στη διαχωριστική επιφάνεια προκαλείται Ολική Ανάκλαση – εμποδίζοντας κατά συνέπεια το φως να διαφύγει από τον Πυρήνα – με την προϋπόθεση ότι η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη της κρίσιμης. Συνεπώς, το φως θα συνεχίσει να διαδίδεται μέσα στην οπτική ίνα, ακόμη και αν αυτή λυγίσει, αρκεί η κάμψη να μην είναι πολύ μεγάλη.

Ο LDM θα πρέπει τώρα να ρυθμιστεί για συνεχή μέτρηση. (**E**, βλ. Εικ. 1.2), με αποτέλεσμα η τιμή του y στην οθόνη να ανανεώνεται με συχνότητα περίπου μία φορά κάθε δευτερόλεπτο. Ο LDM θα περάσει σε κατάσταση αναμονής μετά από μερικά λεπτά. Μπορεί να ενεργοποιηθεί ξανά με το πάτημα του κόκκινου κουμπιού έναρξης μετρήσεων.

Με προσεκτικές και μαλακές κινήσεις καλύψτε το φακό του LDM με το μικρό μαύρο ταμπόν (το δεύτερο είναι εφεδρικό) που φέρει οπή διαμέτρου 2 mm (βλ. Εικ. 1.3A). Πιέστε μαλακά την αυτοκόλλητη πλευρά του ταμπόν πάνω στο φακό. Τοποθετήστε στην οπή του ταμπόν ένα κομμάτι καλωδίου οπτικής ίνας μήκους x έτσι ώστε να έρχεται σε επαφή το φακό, βλ. Εικ. 1.5.



Εικόνα 1.5 (a) Ταμπόν και καλώδιο οπτικής ίνας. (b) Τοποθετώντας το καλώδιο οπτικής ίνας.

Το άλλο άκρο του καλωδίου θα πρέπει να τοποθετηθεί μπροστά από τον εκπομπό, έτσι ώστε να αγγίζει το γυαλί στο μέσο της δέσμης laser. Διαβάστε τώρα την ένδειξη y από την οθόνη. Χρησιμοποιήστε το ψαλίδι για να κόψετε το καλώδιο οπτικής ίνας δε διάφορα μήκη x .

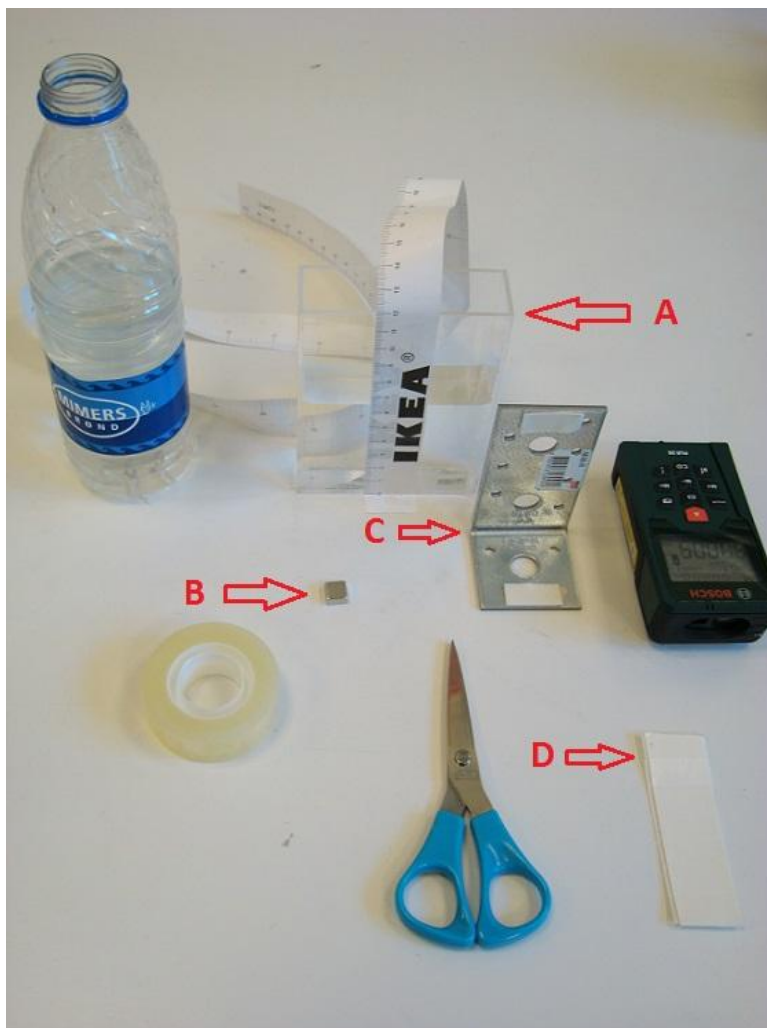
Σκεφθείτε πολύ προσεκτικά πριν κόψετε το καλώδιο, αφού δεν θα σας δοθεί περισσότερο από αυτό που θα πάρετε εξ αρχής.

Σημειώστε επίσης ότι στην οθόνη του LDM μπορεί να εμφανιστεί ένα θερμόμετρο μετά την ενεργοποίηση συνεχούς μέτρησης λόγω της υπερθέρμανσης της ηλεκτρονικής διάταξης. Αν συμβεί αυτό, σβήστε τον LDM για λίγο, προκειμένου να ψυχθεί το όργανο.

1.2a	Μετρήστε τις αντίστοιχες τιμές των x και y . Φτιάξτε ένα πίνακα με τις μετρήσεις σας. Σχεδιάστε μια γραφική παράσταση που να δείχνει το y ως συνάρτηση του x .	1,8
1.2b	Χρησιμοποιήστε το γράφημα αυτό για να υπολογίσετε το σχετικό δείκτη διάθλασης n_{co} του υλικού που αποτελεί τον Πυρήνα του καλωδίου οπτικής ίνας. Υπολογίστε την ταχύτητα του φωτός v_{co} στον Πυρήνα του καλωδίου οπτικής ίνας.	1,2

1.3 Μετρητής Απόστασης Laser (LDM) υπό γωνία ως προς την κατακόρυφο

Σε αυτό το μέρος του πειράματος θα χρειαστείτε τον εξοπλισμό που φαίνεται στην Εικ.1.6.



Εικόνα 1.6 Εξοπλισμός που φαίνεται στην εικόνα :

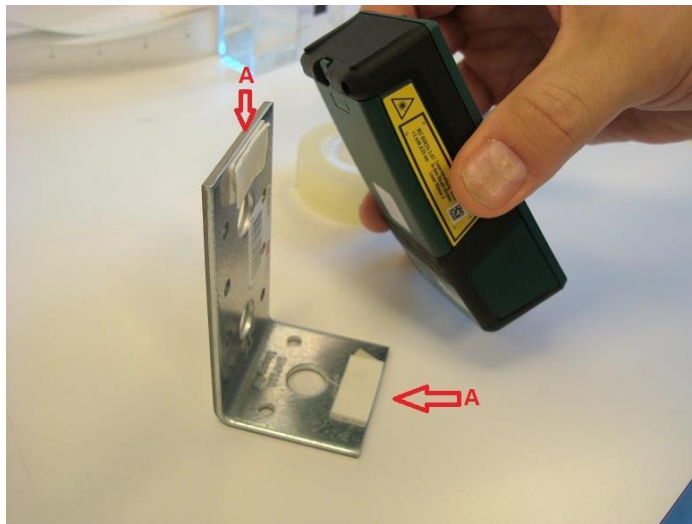
A: Διαφανές δοχείο με νερό και μετροταινία

B: Μαγνήτης για να στηρίξει τη σιδερένια γωνία στην κορυφή του μαύρου κουτιού. (Θα βρείτε το μαγνήτη τοποθετημένο στη σιδερένια γωνιά).

C: Σιδερένια γωνία με αυτοκόλλητες ταινίες

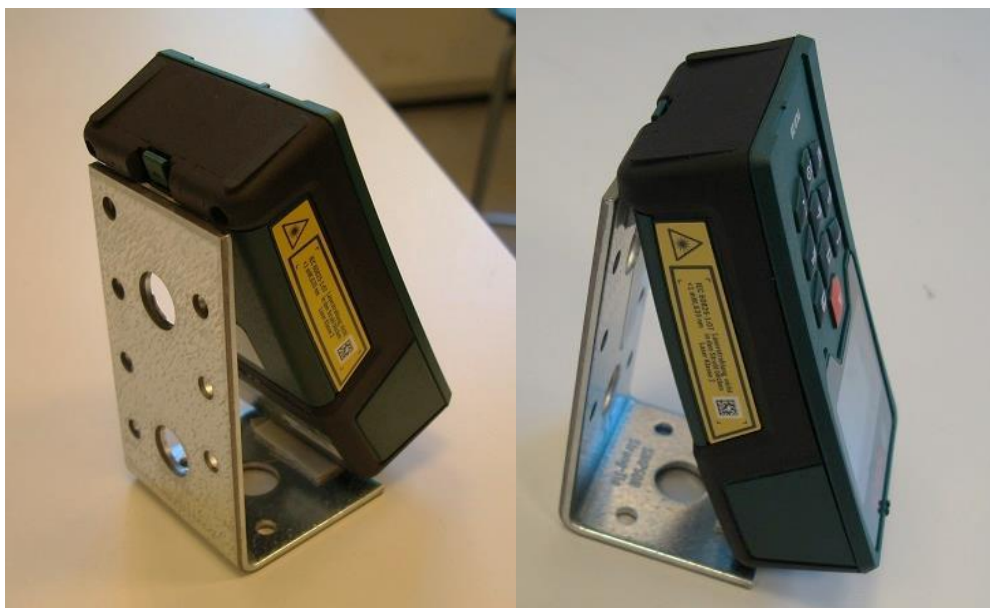
D: Αυτοκόλλητες ταινίες

Αφαιρέστε το μαύρο κάλυμμα από το φακό. Ο LDM πρέπει τώρα να τοποθετηθεί ως εξής: Τοποθετήστε δύο αυτοκόλλητες ταινίες στη σιδερένια γωνία, βλ. **A** στην Εικ. 1.7.



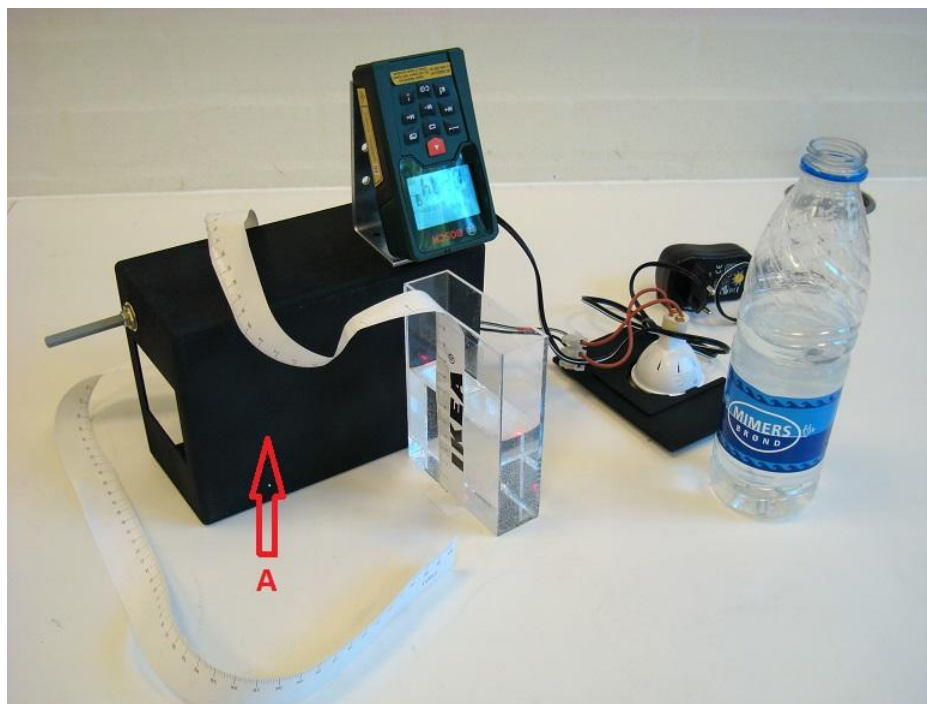
Εικόνα 1.7 Πώς να τοποθετήσετε τις δύο αυτοκόλλητες ταινίες στη σιδερένια γωνιά.

Ο LDM πρέπει να τοποθετηθεί προσεκτικά στη σιδερένια γωνιά όπως δείχνει η Εικ. 1.8.



Εικόνα 1.8 Πώς να τοποθετήσετε το LDM στη σιδερένια γωνιά.

Η σιδερένια γωνιά με τον LDM πρέπει να τοποθετηθεί στο μαύρο κουτί όπως δείχνει η Εικ. 1.9. Στερεώστε τη σιδερένια γωνιά στο κουτί με ένα μαγνήτη τον οποίο θα τοποθετήσετε κάτω από το κουτί στην εσωτερική του πλευρά. (Ο μικρός μαγνήτης βρίσκεται πάνω στη σιδερένια γωνιά) Είναι σημαντικό να στερεώσετε τον LDM ακριβώς όπως δείχνει η εικόνα, καθώς η πλευρά του κουτιού που βλέπει προς τα πάνω κλίνει κατά 4 μοίρες προσεγγιστικά. Η δέσμη Laser πρέπει τώρα να κατευθύνεται ανεμπόδιστα προς τα κάτω με κάποια κλίση (γωνία).



Εικόνα 1.9 Η πειραματική διάταξη (Το μαύρο κουτί χρησιμοποιείται απλώς σαν στήριγμα. Ο εξοπλισμός που φαίνεται πίσω από το μπουκάλι δε χρησιμοποιείται).

A: Σημαντικό: Το κάτω μέρος του μαύρου κουτιού πρέπει να είναι στραμένο προς τα εμπρός όπως δείχνει η εικόνα. Η πάνω πλευρά είναι με κλίση 4 μοίρες περίπου σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο.

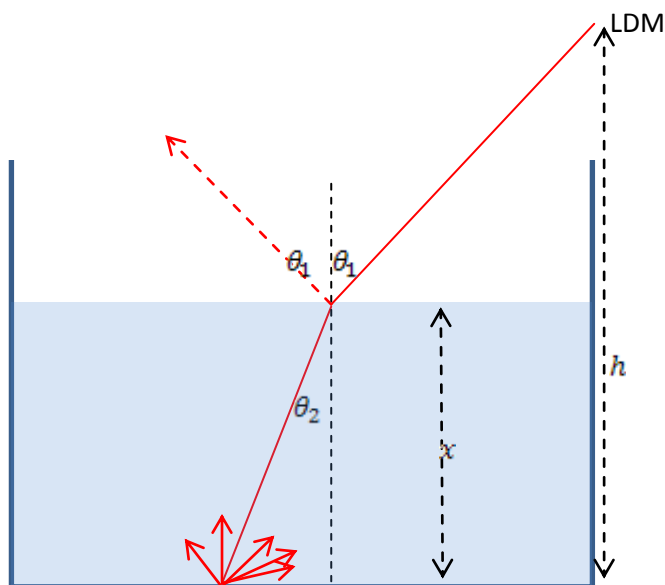
Εξασφαλίστε ότι η γωνία θ_1 παραμένει διαρκώς σταθερή.

Όταν ο LDM ανάψει και τοποθετηθεί όπως επεξηγήθηκε πιο πάνω, η δέσμη laser θα σχηματίζει μια γωνία θ_1 σε σχέση με την κατακόρυφη διεύθυνση. Αυτή η γωνία, που πρέπει να παραμείνει αμετάβλητη σε όλη τη διάρκεια του πειράματος, πρέπει τώρα να προσδιοριστεί. Το διαφανές δοχείο δεν χρειάζεται εδώ, έτσι μπορείτε να το αφήσετε στην άκρη, προς το παρόν.

1.3a	Μετρήστε την απόσταση y_1 που διανύει η δέσμη laser μέχρι το σημείο που κτυπά την επιφάνεια του τραπεζιού. Μετά μετακινήστε το κουτί με τον LDM οριζόντια έως ότου η δέσμη laser κτυπήσει το πάτωμα. Μετρήστε την απόσταση y_2 μέχρι το Ίχνος όπου η δέσμη laser κτυπά στο πάτωμα. Να γράψετε την αβεβαιότητα, (σφάλμα) στις μετρήσεις αυτές.	0,2
1.3b	Να υπολογίσετε τη γωνία θ_1 χρησιμοποιώντας μόνο αυτές τις μετρήσεις y_1 , y_2 και το H . Να προσδιορίσετε την αβεβαιότητα $\Delta\theta_1$.	0,4

1.4 Πείραμα με το διαφανές δοχείο

Τοποθετήστε το διαφανές δοχείο έτσι ώστε η δέσμη laser να κτυπά στον πυθμένα του δοχείου περίπου στο κέντρο, βλ Εικ. 1.10. Βάλτε λίγο νερό μέσα στο δοχείο. Το βάθος του νερού είναι x . Διαβάστε την τιμή y στην οθόνη του LDM.



Εικόνα 1.10 Διάγραμμα της δέσμης laser μέσα στο διαφανές δοχείο με νερό που έχει βάθος x .

1.4a	Να μετρήσετε τις αντίστοιχες τιμές των x και y . Να δημιουργήσετε ένα πίνακα με τις μετρήσεις σας. Να σχεδιάσετε γραφική παράσταση του y ως συνάρτηση του x .	1,6
1.4b	Να χρησιμοποιήσετε εξισώσεις για να εξηγήσετε θεωρητικά την αναμενόμενη μορφή της γραφικής παράστασης.	1,2
1.4c	Να χρησιμοποιήσετε τη γραφική παράσταση που χαράξετε για να καθορίσετε τον δείκτη διάθλασης n_w του νερού.	1,2

Φύλλο Απαντήσεων Κωδικός Χώρας (2 γράμματα)

Αριθμός Μαθητή (1-5)

1.1a	Τιμή $H =$ Τιμή $\Delta H =$ Να συμπεριλάβετε το σχήμα σε ξεχωριστό φύλλο	0,4																																																												
1.2a	Πίνακας: <table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table> Πρέπει να συμπεριλάβετε το γράφημα του y ως συνάρτηση του x																																																													1,8
1.2b	Τιμή $n_{co} =$ Τιμή $v_{co} =$ Να συμπεριλάβετε τους υπολογισμούς σε ξεχωριστό φύλλο	1,2																																																												

Φύλλο Απαντήσεων Κωδικός Χώρας (2 γράμματα)

Αριθμός Μαθητή (1-5)

1.3a	Τιμή $y_1 \pm \Delta y_1 =$	Τιμή $y_2 \pm \Delta y_2 =$	0,2																																																																
1.3b	Τιμή $\theta_1 =$	Τιμή $\Delta\theta_1 =$	0,4																																																																
	Να συμπεριλάβετε τους υπολογισμούς σε ξεχωριστό φύλλο																																																																		
1.4a	Πίνακας: <table border="1"> <tbody> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table> Να συμπεριλάβετε τη γραφική παράσταση του y σε συνάρτηση του x σε ξεχωριστό φύλλο																																																																		1,6
1.4b	Συμπεριλάβετε τις εξισώσεις σε ξεχωριστό φύλλο		1,2																																																																
1.4c	Τιμή $n_w =$ Συμπεριλάβετε τους υπολογισμούς σε ξεχωριστό φύλλο		1,2																																																																
	Σύνολο		8,0																																																																

Solution E1 /version 3 (Important: In this document decimal comma is used instead of decimal point in graphs and tables)

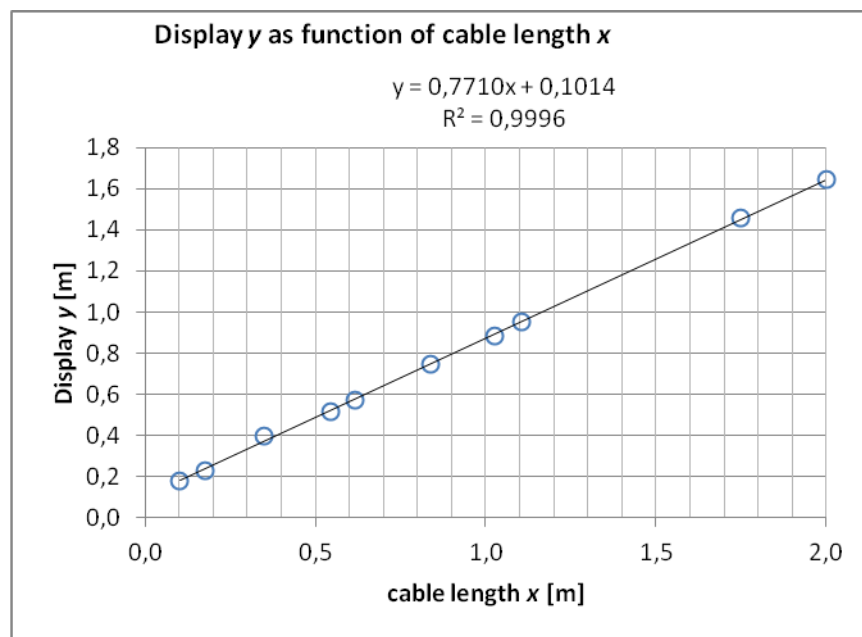
1.1

$H = 907 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$. See the sketch in the figure corresponding to 1.3b. It must appear how the height is measured with the LDM in the rear mode.

1.2a

I used a 2 m cable but 1 m is sufficient. There should be about 8 lengths evenly distributed in the interval $[0; 1 \text{ m}]$.

x	y
m	m
0,103	0,177
0,176	0,232
0,348	0,396
0,546	0,517
0,617	0,570
0,839	0,748
1,025	0,885
1,107	0,950
1,750	1,459
2,000	1,642



1.2b

The refractive index is twice the gradient of the linear graph, $n_{co} = 2 \cdot 0,7710 = 1,542$.

The reason for that is that the travel time for a light pulse

$$t = \frac{x}{v_{co}} = \frac{xn_{co}}{c}$$

The display will therefore show $y = \frac{1}{2}ct + k \Leftrightarrow y = \frac{1}{2}n_{co}x + k$.

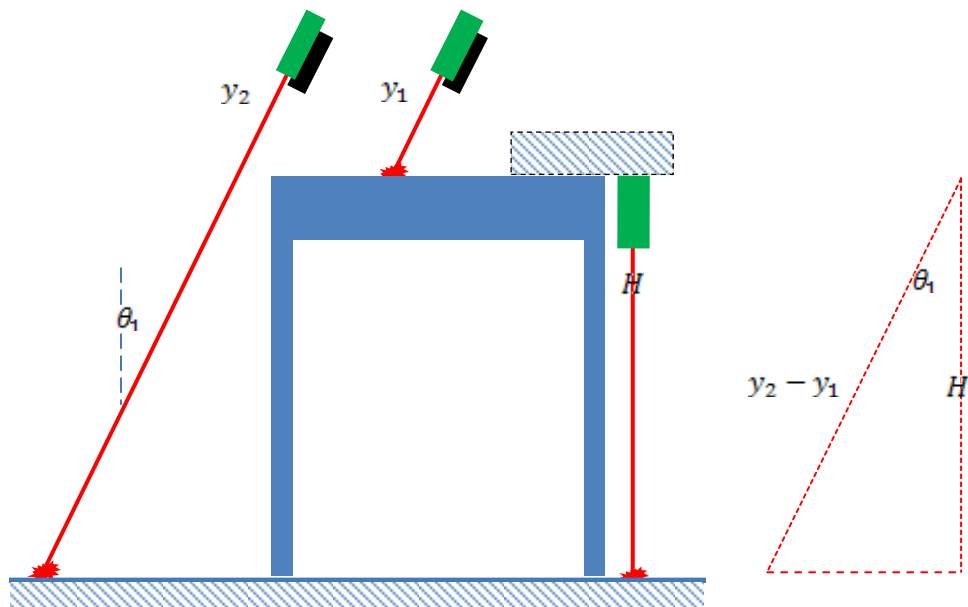
Lysets fart i lyslederkablet er $v_{co} = \frac{c}{n_{co}} = \frac{3,00 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1,542} = 1,95 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

1.3a

$$y_1 = 312 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}, y_2 = 1273 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$$

1.3b

$$\theta_1 = \cos^{-1}\left(\frac{H}{y_2 - y_1}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{907 \text{ mm}}{961 \text{ mm}}\right) = 19.30^\circ, \text{ se figure:}$$



Measuring the horizontal part of some triangle is very inaccurate because of the size of the laser dot. No marks will be awarded for that

Using $\delta = 2 \text{ mm}$ as the uncertainty of y_1 , y_2 and H , one can calculate the uncertainty of θ_1

$$\Delta \cos \theta_1 = \Delta \left(\frac{H}{y_2 - y_1} \right)$$

Using simple derivative, we get

$$\sin \theta_1 \cdot \Delta \theta_1 = \frac{\delta}{H} + \frac{2\delta}{y_2 - y_1}$$

$$\Delta \theta_1 = \frac{\left(\frac{\delta}{H} + \frac{2\delta}{y_2 - y_1} \right)}{\sin \theta_1} \cdot \frac{180^\circ}{\pi} = \frac{\left(\frac{2}{907} + \frac{4}{961} \right)}{\sin 19.30^\circ} \cdot \frac{180^\circ}{\pi} = 1.1^\circ$$

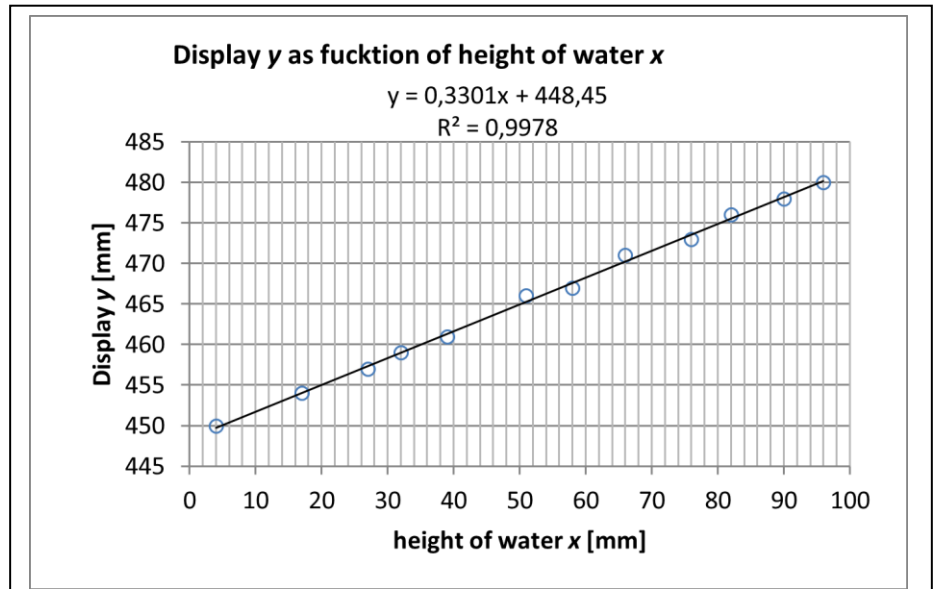
Otherwise, using min/max method

$$\Delta\theta_1 = \theta_{1\max} - \theta_1 = \cos^{-1}\left(\frac{H_{\min}}{y_{2\max} - y_{1\min}}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{905 \text{ mm}}{965 \text{ mm}}\right) - \cos^{-1}\left(\frac{907 \text{ mm}}{961 \text{ mm}}\right) = 1.0^\circ$$

Also, accept $\delta = 1 \text{ mm}$ and $\Delta\theta_1 = 0.5^\circ$

1.4a

x	y
mm	mm
4	450
17	454
27	457
32	459
39	461
51	466
58	467
66	471
76	473
82	476
90	478
96	480



1.4b

The time it takes the light to reach the water surface is

$$t_1 = \frac{(h - x) / \cos \theta_1}{c}$$

From the water surface to the bottom the light uses the time

$$t_2 = \frac{x / \cos \theta_2}{v}$$

Total travel time forth and back

$$t = 2t_1 + 2t_2 = 2 \frac{(h - x) / \cos \theta_1}{c} + 2 \frac{x / \cos \theta_2}{v} = 2 \frac{h - x}{c \cos \theta_1} + 2 \frac{nx}{c \cos \theta_2}$$

Hence, the display will show (we simply write $n = n_w$)

$$y = \frac{1}{2}ct + k = \left(\frac{n}{\cos \theta_2} - \frac{1}{\cos \theta_1} \right) x + \frac{h}{\cos \theta_1} + k$$

which is a linear function of x .

Using a trigonometric identity and Snell's law,

$$\cos \theta_2 = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_2} = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_1}{n^2}}$$

we get the gradient to be

$$\alpha = \frac{n}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_1}{n^2}}} - \frac{1}{\cos \theta_1} = \frac{n^2}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_1}} - \frac{1}{\cos \theta_1}$$

1.4c

Knowing the gradient α from the graph, we can find n solving this equation with respect to n .

Introducing a practical parameter,

$$p = \alpha + \frac{1}{\cos \theta_1}$$

our equation becomes

$$p = \frac{n^2}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_1}}$$

which can be written

$$n^4 - p^2 n^2 + p^2 \sin^2 \theta_1 = 0$$

and solved

$$n_w = \sqrt{\frac{p^2 \pm \sqrt{p^4 - 4p^2 \sin^2 \theta_1}}{2}} = \frac{\sqrt{2}}{2} p \sqrt{1 \pm \sqrt{1 - \left(\frac{2 \sin \theta_1}{p}\right)^2}}$$

From our graph, we get $\alpha = 0.3301$. From there we find $p = 1.37865$ and hence $n_w = 1.3437$, omitting negative solutions and solutions less than 1.

The official value of n_w for pure water at normal conditions is $n_w = 1.331$ for the laser wavelength

$\lambda = 635 \text{ nm}$.

Just for your interest, we have the following approximations:

For small angles, we have

$$n_w \approx \frac{\sqrt{2}}{2} p \sqrt{1 + 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{2 \sin \theta_1}{p}\right)^2} \approx p \sqrt{1 - \left(\frac{\sin \theta_1}{p}\right)^2} \approx p \left(1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\sin \theta_1}{p}\right)^2\right)$$

For very small angles, we get

$$n_w \approx p \approx \alpha + 1$$

It is much simpler but not recommendable to do the experiment with very small $\theta_1 \approx 0$: Reflections in the water surface will ruin the signal from the bottom.