

ΑΣΚΗΣΗ 10

Μελέτη των φαινομένων συμβολής και περίθλασης του φωτός



10.1 Απαραίτητα όργανα και υλικά

1. Φωτεινή πηγή λέιζερ μήκους κύματος 632,8nm.
2. Φράγμα πολλαπλών σχισμών (300 σχισμές/mm).
3. Φράγμα με μονή σχισμή.
4. Οπτική τράπεζα.
5. Πέτασμα.
6. Κινητή βάση.

10.2 Απαραίτητες γνώσεις

Γεωμετρική και κυματική φύση του φωτός, φως λέιζερ, περίθλαση, περίθλαση Fresnel, περίθλαση Fraunhofer, φράγμα περίθλασης, φαινόμενο συμβολής, αρχή επαλληλίας (υπέρθεσης), αρχή Huygens.

10.3 Πείραμα

10.3.1 Σκοπός

- Παρατήρηση και κατανόηση των φαινομένων της συμβολής και της περίθλασης.
- Υπολογισμός του μήκους κύματος του φωτός λέιζερ, χρησιμοποιώντας γνωστό οπτικό φράγμα.
- Υπολογισμός του εύρους της σχισμής ενός οπτικού φράγματος, αν είναι γνωστό το μήκος κύματος του φωτός.
- Υπολογισμός του μέτρου της αβεβαιότητας της ορμής με τη βοήθεια του διαμορφώματος περίθλασης από μονή σχισμή.
- Επιβεβαίωση της αρχής απροσδιοριστίας του Heisenberg.

10.3.2 Θεωρία

10.3.2.1 Το φως, εκτός από ιδιότητες κύματος παρουσιάζει και ιδιότητες σωματιδίου

Ενώ αρχικά οι επιστήμονες απέδειξαν ότι το φως είναι ηλεκτρομαγνητικό κύμα, τα πειράματα της Φυσικής επέβαλαν αργότερα να δεχθούμε ότι το φως συμπεριφέρεται και ως «σωματίδιο». Η κυματική φύση του φωτός αποδείχτηκε πειραματικά από τον Thomas Young το 1802 και περιγράφηκε μαθηματικά από τον James Maxwell το 1864. Η σωματιδιακή φύση του φωτός προτάθηκε για πρώτη φορά από τον Max Planck το 1900.

Σύμφωνα με την κυματική συμπεριφορά του φωτός, θεωρούμε ότι το φως αποτελείται από ένα ηλεκτρικό και ένα μαγνητικό πεδίο. Η ενέργεια του φωτός εξαρτάται από τη συχνότητα αυτών των πεδίων και υπολογίζεται από τη σχέση $E=hn$, όπου h είναι μια παγκόσμια σταθερά (σταθερά του Planck) και ν η συχνότητα των πεδίων. Δηλαδή, το φως έχει τόσο μεγαλύτερη ενέργεια όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητά του. Για παράδειγμα, παρατηρώντας την εικόνα του ορατού ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, καταλαβαίνουμε γιατί το μπλε χρώμα έχει περισσότερη ενέργεια από το κόκκινο.

Σύμφωνα με τη σωματιδιακή φύση του φωτός δεχόμαστε ότι το φως έχει ορμή και μηδενική μάζα ηρεμίας, και ότι εκπέμπεται από τις φωτεινές πηγές, κατά αδιαίρετες μικρές ποσότητες ενέργειας, που ονομάζονται κβάντα.

Το φως αποτελείται από φωτόνια και είναι ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Τα φωτόνια χαρακτηρίζονται από το μήκος κύματος και τη συχνότητά τους. Το φως λέιζερ διαφέρει από το φως των άλλων γνωστών μέχρι σήμερα φωτεινών πηγών ως προς το ότι αποτελείται από εντελώς ταυτόσημα φωτόνια. Αυτή η ιδιότητα του προσδίδει τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του, όπως η κατευθυντικότητα του, η μονοχρωματικότητά του, η μεγαλύτερη ενέργειά του.

Φαινόμενα, όπως η συμβολή και η περίθλαση, μας υποχρεώνουν να δεχτούμε ότι το φως έχει και κυματικό χαρακτήρα.

Συμβολή (interference) είναι το φαινόμενο, κατά το οποίο, όταν διαφορετικές φωτεινές δέσμες που ταξιδεύουν (κύματα) συναντούνται, τότε δημιουργούν μια νέα φωτεινή κατανομή ως αποτέλεσμα της υπέρθεσής τους. Αν τοποθετήσουμε ένα πέτασμα στη θέση συνάντησης των δύο αυτών φωτεινών δεσμών, παρατηρούμε μια αλληλουχία από φωτεινές και σκοτεινές περιοχές.

Περίθλαση (diffraction) είναι το φαινόμενο κατά το οποίο, όταν ένα σώμα φωτιστεί από τη μια πλευρά του, το φως διαδίδεται και στην πίσω από το σώμα σκοτεινή πλευρά του

Η διάκριση μεταξύ των φαινομένων συμβολής και περίθλασης είναι μερικές φορές ασαφής. Η περίθλαση είναι εύκολα παρατηρήσιμη για σώματα (ανοίγματα ή εμπόδια) με διαστάσεις περίπου της τάξης του μήκους κύματος του προσπίπτοντας φωτός. Παρόλα αυτά είναι πολλές φορές αντιληπτή ακόμα και για διαστάσεις ανοιγμάτων πολύ μεγαλύτερων του μήκους κύματος. Το φαινόμενο της περίθλασης μπορεί να χαρακτηριστεί ως **Περίθλαση Fresnel** ή ως **Περίθλαση Fraunhofer** ανάλογα με το αν το επίπεδο πάνω στο οποίο παρατηρείται το φαινόμενο είναι κοντά ή μακριά από το εμπόδιο που προκαλεί την περίθλαση.

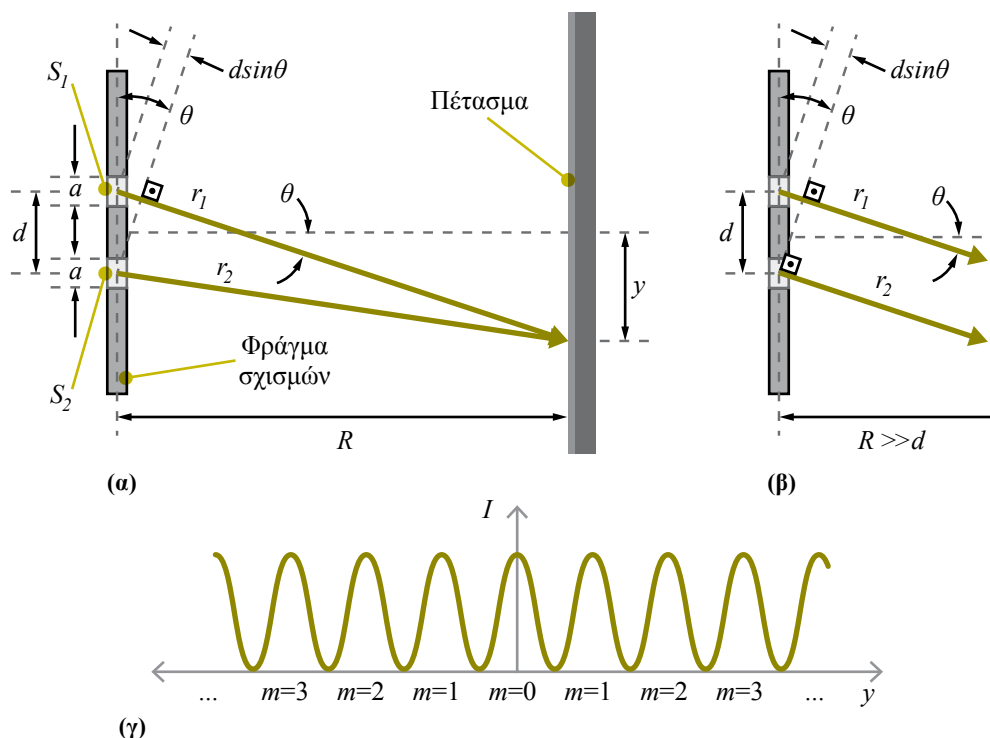
Περίθλαση Fresnel (περίθλαση κοντινού πεδίου) συμβαίνει, όταν το επίπεδο παρατήρησης (πέτασμα) ή η φωτεινή πηγή ή και τα δύο είναι πολύ κοντά στο άνοιγμα περίθλασης.

Περίθλαση Fraunhofer (περίθλαση μακρινού πεδίου) συμβαίνει, όταν το επίπεδο παρατήρησης (πέτασμα) και η φωτεινή πηγή που εκπέμπει με μήκος κύματος λ , είναι πολύ απομακρυσμένα από το άνοιγμα περίθλασης. Θεωρούμε τότε ότι όλα τα σημεία του πετάσματος ισαπέχουν από το σημείο παρατήρησης με ακρίβεια μεγαλύτερη της τιμής του ενός τετάρτου του μήκους κύματος $\lambda/4$.

Ο διαχωρισμός των δυο περιπτώσεων περίθλασης (Fresnel και Fraunhofer) δεν είναι πάντα εύκολος και, συνήθως, χρειάζεται λεπτομερειακή μελέτη και αιτιολόγηση.

10.3.2.2 Φαινόμενο συμβολής από δύο πηγές

Για τη συμβολή δύο φωτεινών δεσμών, προκειμένου αυτές να είναι ταυτόσημες, δηλαδή να είναι ίδιες σε όλα τους τα χαρακτηριστικά, θεωρούμε ότι προέρχονται από την ίδια φωτεινή πηγή και ότι δημιουργούνται με την παρεμβολή ενός φράγματος δύο σχισμών. Οι σχισμές αυτές απέχουν μεταξύ τους απόσταση d (σχήμα 10.1.α) Επίσης οι σχισμές θεωρούνται μικρού εύρους a όταν η τάξη μεγέθους του a είναι συγκρίσιμη με εκείνη του μήκους κύματος της φωτεινής πηγής.



Σχήμα 10.1 – Συμβολή κυμάτων φωτός της ίδιας φωτεινής πηγής που διέρχονται μέσω δύο σχισμών (ισοδύναμο με συμβολή δύο σύμφωνων σημειακών φωτεινών πηγών). (α) Γεωμετρική ανάλυση, (β) γεωμετρική ανάλυση αν $R \gg d$, (γ) κατανομή της έντασης των φωτεινών κροσσών κατά το φαινόμενο συμβολής των δύο σημειακών φωτεινών πηγών. Στην περίπτωση των δύο σχισμών, μεταξύ δύο γειτονικών κύριων μεγίστων, εμφανίζεται ένα ελάχιστο και όλα τα μέγιστα έχουν ίδια φωτεινή ένταση.

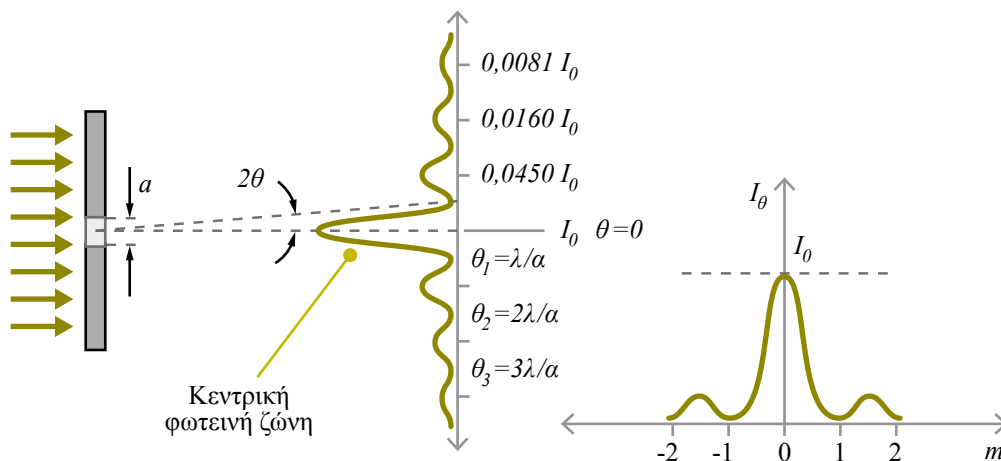
Για να παρατηρηθεί ενισχυτική συμβολή δύο σημειακών φωτεινών πηγών σε κάποιο σημείο πάνω στο πέτασμα, πρέπει η διαφορά του οπτικού δρόμου μεταξύ των δύο φωτεινών δεσμών στο σημείο που συμβάλλουν να είναι $d \sin \theta$ και ίση με ακέραιο αριθμό μηκών κύματος (βλέπε σχήμα 10.1.γ):

$$d \sin \theta_m = m \lambda \tag{10.1}$$

όπου d η απόσταση μεταξύ των σχισμών, λ το μήκος κύματος της φωτεινής πηγής, $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ η τάξη του κροσσού που αντιστοιχεί στην γωνία θ_m (το μηδέν αντιστοιχεί στον κεντρικό κροσσό) και θ η γωνία που σχηματίζει η ακτίνα που περνά από τη σχισμή με την κάθετο στη σχισμή.

10.3.2.3 Φαινόμενο περίθλασης από μονή σχισμή (diffraction at slit split)

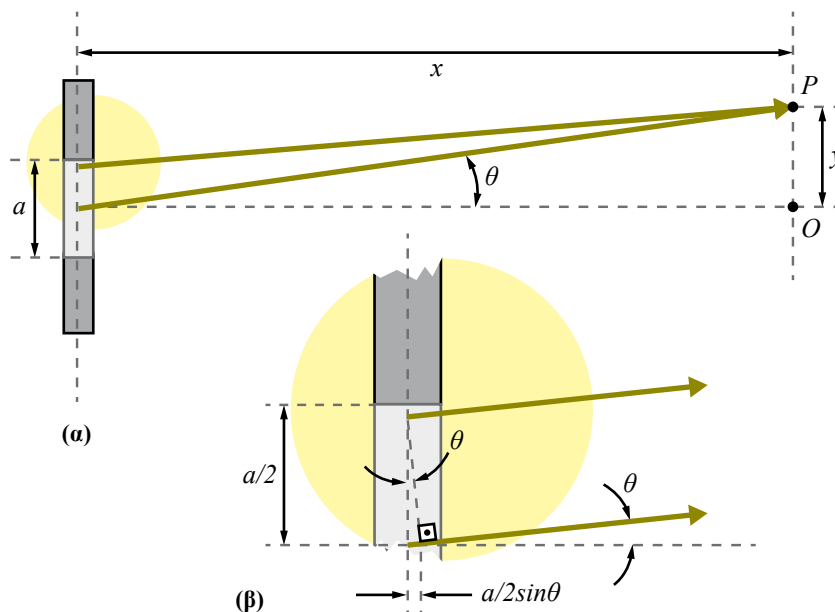
Αν φως μήκους κύματος λ προσπίπτει σε σχισμή εύρους a , όπου το a είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από το μήκος κύματος λ , τότε κάθε στοιχειώδες σημείο της σχισμής είναι αφετηρία ενός νέου δευτερογενούς σφαιρικού φωτεινού μετώπου (κύματος) και το παρατηρούμενο φως πάνω σε πέτασμα, πίσω από τη σχισμή, θα προέρχεται από τα δευτερογενή αυτά κύματα. Για παράδειγμα, στα παράθυρα που έχουν εύρος της τάξης 1 έως 2m, συμβαίνει περίθλαση μόνο στα ηχητικά κύματα (το ορατό φως έχει μήκος κύματος της τάξης $6 \times 10^{-7}m$, ενώ τα ηχητικά κύματα συχνότητας 256Hz έχουν μήκος κύματος 1,3m). Το διαμόρφωμα της περίθλασης εμφανίζεται με τη μορφή που εξηγεί το σχήμα 10.2.



Σχήμα 10.2 – Διαμόρφωση περίθλασης (περίθλασόγραμμα). Κατανομή φωτεινής έντασης για φράγμα μονής σχισμής με τη φωτεινή ένταση να σχεδιάζεται ως συνάρτηση της γωνίας θ και της τάξης του κροσσού. Η γωνία θ θεωρείται περίπου ίση με τη γωνία θ του σχήματος 10.1.

Δύο φωτεινές ακτίνες που διέρχονται μέσω μονής σχισμής εύρους a και που απέχουν μεταξύ τους $a/2$, όπως στο σχήμα 10.3, παρουσιάζουν διαφορά φάσης (phase difference) φ που μπορεί να υπολογισθεί ως συνάρτηση γεωμετρικών ποσοτήτων. Ισχύει ότι:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta \quad (10.2)$$



Σχήμα 10.3 – Εγκάρσια τομή φράγματος μιας σχισμής (α) όταν η απόσταση $x \gg a$, οι ακτίνες που ξεκινούν από σημεία που απέχουν απόσταση $a/2$ μπορούν να θεωρηθούν παράλληλες, (β) μεγέθυνση του μισού της σχισμής εύρους a .

Η φωτεινή ένταση I_θ των κροσσών της περίθλασης είναι:

$$I_\theta = I_0 \left[\frac{\sin \left[\frac{\pi a (\sin \theta)}{\lambda} \right]}{\frac{\pi a (\sin \theta)}{\lambda}} \right]^2 \Rightarrow I_\theta = I_0 \left[\frac{\sin \left[\frac{\varphi}{2} \right]}{\frac{\varphi}{2}} \right]^2 \quad (10.3)$$

όπου I_0 η φωτεινή ένταση στο σημείο θ (όταν $\theta=0$), που εξαρτάται από το μήκος κύματος και τη γεωμετρία.

Οι κορυφές της έντασης I_{max} (βλέπε σχήμα 10.2) παρατηρούνται κατά προσέγγιση στις κατευθύνσεις όπου ο αριθμητής της σχέσης (10.3) είναι μέγιστος, δηλαδή $a \sin \theta / \lambda = \pi(2m + 1/4)$, όπου $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$. Η συνθήκη αυτή δίνεται από την:

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{a} \left(2m + \frac{1}{2} \right) \quad (10.4)$$

Τα ελάχιστα της έντασης, $I_{min} = 0$, βλέπε σχήμα 10.2 (σκοτεινοί κροσσοί), παρατηρούνται στις κατευθύνσεις όπου ο αριθμητής της σχέσης (10.3) είναι ίσος με μηδέν, δηλαδή:

$$\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta = m\pi \quad (10.5)$$

Επίσης είναι φανερό ότι από τις σχέσεις (10.3) και (10.6) τα ελάχιστα της έντασης παρατηρούνται στις κατευθύνσεις, όπου ο αριθμητής της σχέσης (10.6) μηδενίζεται. :

$$\frac{\sin \left[\frac{\varphi}{2} \right]}{\frac{\varphi}{2}} \quad (10.6)$$

όταν $\varphi = 2m\pi$. Από τη σχέση (10.5) προκύπτει ότι:

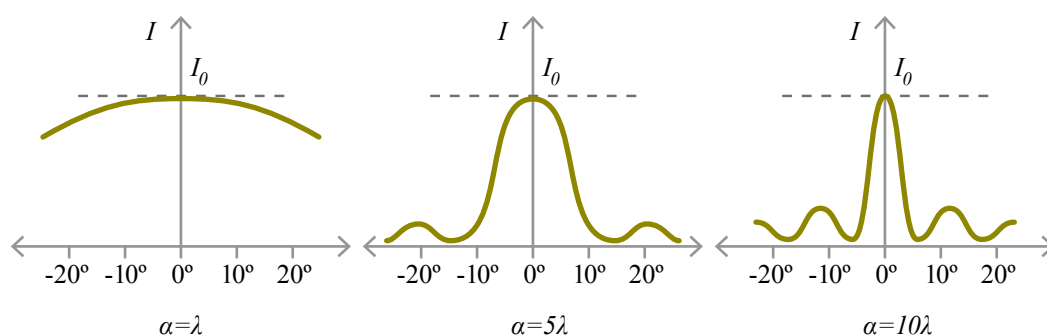
$$\sin \theta = m \frac{\lambda}{a} \quad (10.7)$$

που είναι η συνθήκη μηδενισμού της φωτεινής έντασης, για $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

Άρα, όταν $m=1$ υπολογίζουμε την γωνία θ_1 στην οποία αντιστοιχεί σκοτεινός κροσσός πρώτης τάξης στο πέτασμα, όπου η φωτεινή ένταση είναι μηδέν, όπως στο σχήμα 10.2.

Σύμφωνα με τη σχέση (10.7), όσο μικραίνει το εύρος a της σχισμής του φράγματος τόσο μεγαλώνει η γωνία θ_1 του πρώτου μηδενισμού της έντασης του φωτός, με αποτέλεσμα να μεγαλώνει και το εύρος της κεντρικής φωτεινής περιοχής στο πέτασμα (δείτε το σχήμα 10.4, π.χ. για $a=5\lambda$ σε σύγκριση με $a=10\lambda$).

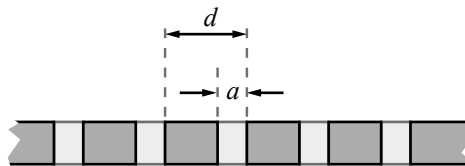
Όταν $a=\lambda$, τότε από τη σχέση (10.7) προκύπτει ότι $\sin \theta_1 = 1$, δηλαδή $\theta_1 = 90^\circ$ που σημαίνει ότι ο πρώτος μηδενισμός της έντασης του φωτός I θα συμβαίνει στο άπειρο, (σχήμα 10.4 για $a=\lambda$).



Σχήμα 10.4 – Αποτέλεσμα περίθλασης (κατανομή φωτεινής έντασης) από φράγμα μόνης σχισμής για διάφορες τιμές του εύρους a της σχισμής. Για παράδειγμα, όταν το εύρος $a=2\lambda$, τότε $\sin \theta = \lambda/a = 1/2$ ή $\theta = 30^\circ$.

10.3.2.4 Φαινόμενο περίθλασης από φράγμα

Στην οπτική, με τον όρο **φράγμα** εννοούμε γυάλινο πλακίδιο το οποίο φέρει μεγάλο αριθμό παραλλήλων και διαφανών σχισμών εύρους a , οι οποίες απέχουν μεταξύ τους απόσταση d (σχήμα 10.5). Το d ονομάζεται σταθερά του φράγματος.

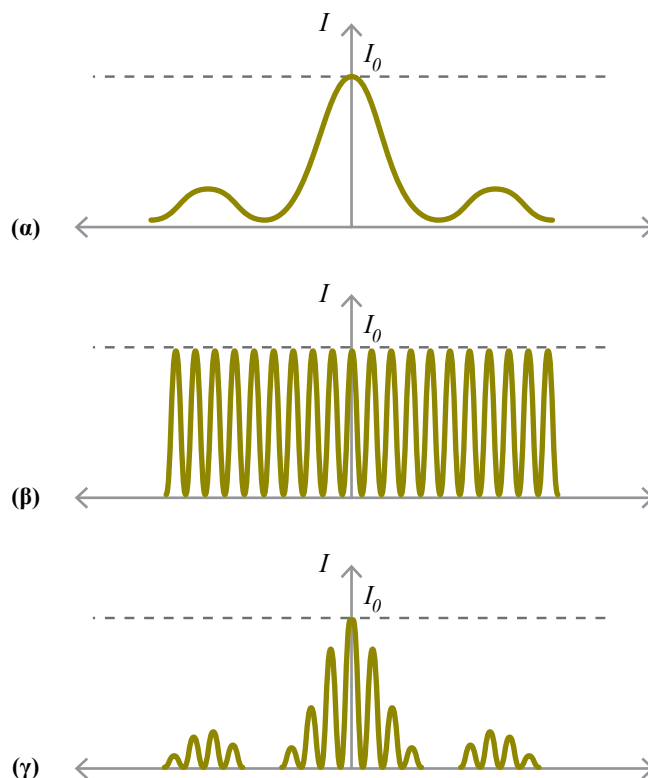


Σχήμα 10.5 – Σχηματική αναπαράσταση τμήματος ενός φράγματος (τομή).

Παραπάνω έγινε αναφορά της συμβολής του φωτός από δύο σχισμές και της περίθλασης από μονή σχισμή. Το διαμόρφωμα περίθλασης πίσω από φράγμα πολλών σχισμών παρουσιάζει νέα ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά.

Έστω ότι φως πέφτει πάνω σε φράγμα δύο σχισμών εύρους a , οι οποίες απέχουν μεταξύ τους απόσταση d και ισχύει ότι $a > d$ (π.χ. $a = 5d$). Το διαμόρφωμα περίθλασης πάνω σε πέτασμα, λόγω της μία σχισμής εύρους a , θα ήταν όπως αυτό του σχήματος 10.6.α, ενώ η εικόνα συμβολής, λόγω των δύο σχισμών που απέχουν μεταξύ τους απόσταση d , θα ήταν όπως αυτή του σχήματος 10.6.β.

Η εικόνα, που εμείς θα παρατηρήσουμε πάνω στο πέτασμα, θα είναι αυτή που παρουσιάζεται στο σχήμα 10.6.γ, ως συνδυασμός των δύο φαινομένων που προκύπτει από την υπέρθεση κυμάτων προερχομένων από διάφορα μέρη των δύο ανοιγμάτων. Το φαινόμενο μπορούμε να το ονομάσουμε είτε συμβολή είτε περίθλαση.



Σχήμα 10.6 – Διαμόρφωμα περίθλασης (κατανομή φωτεινής έντασης) πίσω από φράγμα πολλών σχισμών: (α) αποτέλεσμα φαινομένου περίθλασης, (β) αποτέλεσμα φαινομένου συμβολής, (γ) παρατηρούμενος συνδυασμός των (α) και (β).

Η διαφορά δρόμου για τις φωτεινές ακτίνες που διέρχονται από τις άκρες της κάθε σχισμής είναι:

$$a \sin \theta \quad (10.8)$$

και η διαφορά φάσης τους είναι:

$$\varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta \quad (10.9)$$

Η διαφορά δρόμου για τις ακτίνες από δύο γειτονικές σχισμές που απέχουν μεταξύ τους απόσταση d είναι:

$$d \sin \theta \quad (10.10)$$

και η διαφορά φάσης τους είναι:

$$\varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta \quad (10.11)$$

Έτσι, οι κύριες κορυφές (principal maxima) χάνονται σε ένα φράγμα περίθλασης όταν $\sin \theta = m\lambda/d = \lambda/a$, δηλαδή $m=d/a$. Για παράδειγμα, όταν $d/a=5$, τότε η κύρια κορυφή πέμπτης τάξης χάνεται.

Η συνθήκη για μέγιστη ένταση στην εικόνα περίθλασης δίνεται από τη σχέση (10.1). Σε φράγμα N σχισμών, οι N ακτίνες παρατηρούνται σε ένα σημείο υπό γωνία περίθλασης θ , η ένταση της περίθλασης θα έχει πλάτος E_θ και υπολογίζεται από τη σχέση

$$I_\theta = E_\theta^2 \left[\frac{\sin \left[\frac{N\phi_2}{2} \right]}{\phi_2/2} \right]^2 \quad (10.12)$$

Όπου E_θ^2 είναι η ένταση της ακτίνας που περιθλάται από απλή σχισμή.

$$E_\theta^2 \approx \frac{\sin^2 \left[\frac{\phi_1}{2} \right]}{\left(\frac{\phi_1}{2} \right)^2} \quad (10.13)$$

Η ένταση της περίθλασης του συνολικού φράγματος N σχισμών προκύπτει από το συνδυασμό των σχέσεων (10.12) και (10.13) ως:

$$I_\theta = \frac{\sin^2 \left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta \right) \sin^2 \left(\frac{N\pi d}{\lambda} \sin \theta \right)}{\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta \right)^2 \sin^2 \left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta \right)} = I_s I_d \quad (10.14)$$

Το πρώτο μέρος του γινομένου της σχέσης (10.14) είναι η κατανομή της έντασης σε μια απλή σχισμή I_s , το δεύτερο μέρος είναι το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της περίθλασης των N σχισμών I_d .

Αυτό δείχνει ότι τα ελάχιστα στην απλή σχισμή διατηρούνται και στην περίπτωση του φράγματος, γιατί, αν ο πρώτος όρος γίνει μηδέν, το γινόμενο επίσης μηδενίζεται.

Στην περίπτωση που $N=2$, η σχέση (10.14) γίνεται:

$$I_{\theta} = \frac{\sin^2 \left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta \right) \sin^2 \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta \right)}{\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta \right)^2 \sin^2 \left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta \right)} \quad (10.15)$$

Τα ελάχιστα των κύριων κορυφών, για τη μονή σχισμή, λόγω μηδενισμού του αριθμητή του πρώτου όρου της σχέσης (10.15) παρατηρούνται όταν:

$$a \sin \theta_m = m\lambda \quad (10.16)$$

για $m=\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$, ενώ για $m=0$ παρατηρείται κεντρικός (μέγιστος) κροσσός.

Τα ελάχιστα των δευτερευουσών κορυφών (subsidiary maxima), για πολλές σχισμές, λόγω μηδενισμού του αριθμητή του δεύτερου όρου (χωρίς σύγχρονο μηδενισμό του παρανομαστή) της σχέσης (10.15) παρατηρούνται όταν:

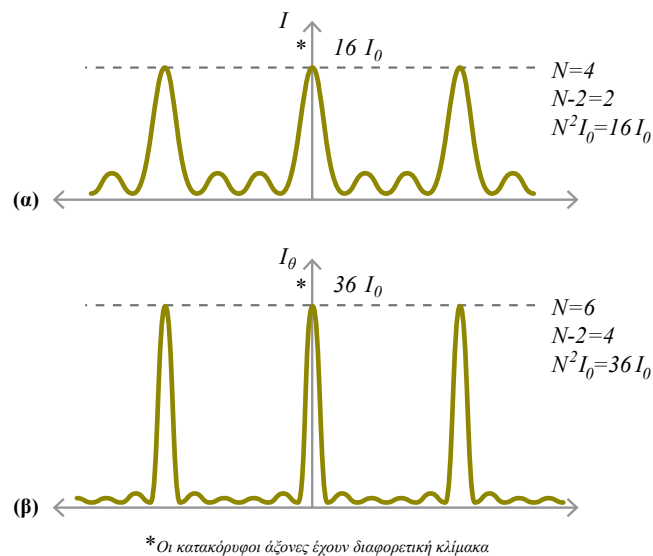
$$2d \sin \theta_m = (2m + 1)\lambda \quad (10.17)$$

για $m=\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

Ο σύγχρονος μηδενισμός αριθμητή και παρανομαστή του δεύτερου όρου της (10.15) είναι οι κύριες κορυφές δεύτερης τάξης:

$$d \sin \theta_m = m\lambda \quad (10.18)$$

Στα φράγματα πολλών σχισμών οι κύριες κορυφές (δεύτερης τάξης) είναι πολύ μεγαλύτερης έντασης (ανάλογης του N^2) και πολύ μικρότερου εύρους, όπως φαίνεται στο σχήμα 10.7. Το περίγραμμα του σχήματος του διαμορφώματος περίθλασης πολλών σχισμών είναι ισοδύναμο με εκείνο μιας μονής σχισμής εύρους a . Μεταξύ των κύριων κορυφών υπάρχουν πάντα ($N-2$) δευτερεύουσες μέγιστες κορυφές (βλέπε σχήμα 10.7).



Σχήμα 10.7 – Διαμορφώματα περίθλασης (κατανομή φωτεινής έντασης) π.χ. για φράγμα (α) 4 σχισμών και (β) 6 σχισμών. Όπου I_0 η ένταση για μονή σχισμή στη θέση $\theta=0$ ($m=0$).

10.3.2.5 *Αβεβαιότητα της ορμής, αρχή απροσδιοριστίας του Heisenberg (uncertainty of location and momentum)*

Η Θεωρία της Κβαντικής Φυσικής (ή Κβαντομηχανικής) υποστηρίζει ότι η φύση στη μικροσκοπική της μορφή (ατομική κλίμακα) είναι ασυνεχής και απρόβλεπτη. Έτσι, είναι πρακτικά και αντικειμενικά αδύνατο να γνωρίζουμε με ακρίβεια το «πού» και το «πόσο». Η Κβαντική Φυσική ενδιαφέρεται για την πιθανότητα ένα φυσικό μέγεθος να έχει κάποια συγκεκριμένη τιμή εισάγοντας την αβεβαιότητα στις μετρήσεις. Επίσης την ενδιαφέρει το πόσο συχνά αυτό το φυσικό μέγεθος παίρνει αυτήν την τιμή.

Στην Κβαντομηχανική εισάγεται η έννοια της ασυνέχειας, δηλαδή ότι ένα φυσικό μέγεθος δεν μπορεί να παίρνει κατ' ανάγκη μια σειρά από συνεχείς τιμές αλλά μόνο συγκεκριμένες, οι οποίες πρέπει να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο μιας σταθεράς, όπως οι ενέργειες και οι τροχιές των ηλεκτρονίων γύρω από το άτομο. Οι αβέβαιες αλλά συγκεκριμένες τιμές έχουν σημασία μόνο σε ατομική κλίμακα, όπως στα φαινόμενα κίνησης μικροσκοπικών σωματιδίων (υποατομικών), σε μικροσκοπικές περιοχές χώρου (10^{-8} cm).

Επίσης η Κβαντομηχανική δέχεται ότι η φωτεινή ακτινοβολία εκπέμπεται με ασυνεχή τρόπο, με τη μορφή μικρών ενεργειακών ποσοτήτων, των φωτονίων (κβάντων) και ότι η ενέργεια κάθε φωτονίου (κβάντου) καθορίζεται από τη συχνότητα της φωτεινής ακτινοβολίας.

Μια σημαντική αρχή της Κβαντικής Φυσικής είναι η αρχή της απροσδιοριστίας, η οποία εκφράζεται με μια μαθηματική σχέση που δηλώνει ότι δεν είναι δυνατή η ταυτόχρονη ακριβής γνώση της θέσης και της ταχύτητας ενός σωματιδίου, στη μικροσκοπική κλίμακα, π.χ. ηλεκτρόνια, φωτόνια.

10.3.2.6 *Φυσική σημασία της παγκόσμιας σταθεράς h του Planck και της αρχής της απροσδιοριστίας*

Η σταθερά του Planck είναι το όριο στη δυνατότητα να γνωρίζουμε ταυτόχρονα τη θέση και την ορμή ενός σωματιδίου ή ισοδύναμα το όριο στην ακρίβεια της πρόβλεψης της μελλοντικής θέσης (τροχιάς του). Η απροσδιοριστία είναι αντίστροφα ανάλογη της μάζας. Έτσι, ο βαθμός, στον οποίο η αρχή της απροσδιοριστίας περιορίζει τη δυνατότητα της πρόβλεψης μιας μελλοντικής θέσης ενός αντικειμένου, εξαρτάται από το μέγεθος της μάζας του, γιατί η πρόβλεψη βασίζεται στη γνώση της ταχύτητας.

Πρώτος ο Max Bohr το 1926 υποστήριξε την πιθανότητα, και όχι τη βεβαιότητα, ένα σωματίδιο να βρεθεί σε κάποια θέση. Ο Verner Heisenberg εξέφρασε αυτό το γεγονός ποσοτικά μέσω μίας μαθηματικής σχέσης. Η αρχή της απροσδιοριστίας έχει και φιλοσοφικές προεκτάσεις δεδομένου ότι προκάλεσε ένα μεγάλο πλήγμα στο κίνημα της αιτιοκρατικής αντίληψης του κόσμου (ντετερμινισμός).

Αποδεικνύεται εύκολα ότι η απροσδιοριστία είναι αντίστροφα ανάλογη της μάζας, δηλαδή όσο μεγαλύτερη μάζα έχει ένα αντικείμενο, τόσο λιγότερο σημαντική είναι η αρχή της απροσδιοριστίας. Στον κόσμο της καθημερινής μας εμπειρίας (μακρόκοσμος), επειδή οι μάζες των αντικειμένων είναι πολύ μεγάλες σε σχέση με εκείνες της ατομικής κλίμακας (μικρόκοσμος) που δεν είναι ορατές με γυμνό μάτι, το σφάλμα στη θέση ενός αντικειμένου, υπολογιζόμενο από την αρχή της απροσδιοριστίας, είναι της τάξης μεγέθους του μήκους κύματος του φωτός, δηλαδή αμελητέα.

Αντίθετα, σε ατομική κλίμακα, το σφάλμα είναι πολύ μεγάλο, ώστε να είναι αδύνατη η πρόβλεψη της θέσης του σωματιδίου. Μπορείτε να σκεφθείτε ότι όλα οφείλονται στο γεγονός ότι προσπαθούμε να παρατηρήσουμε και να μετρήσουμε το μικρόκοσμο με μακροσκοπικές μεθόδους και συνεπώς, διαταράσσουμε το μικροσκοπικό σύστημα εισάγοντας επιπλέον νέα σφάλματα στον προσδιορισμό των παραμέτρων του.

Το πείραμα της περίθλασης φωτονίων από μονή σχισμή επιβεβαιώνει την αρχή απροσδιοριστίας του Heisenberg. Επίσης το πείραμα της περίθλασης ηλεκτρονίων από διπλή σχισμή αποδεικνύει ότι είναι αδύνατο να μετρήσουμε ταυτόχρονα τις σωματιδιακές και τις κυματικές ιδιότητες των ηλεκτρονίων.

Σύμφωνα με την κβαντομηχανική, η αρχή απροσδιοριστίας του Heisenberg περιγράφεται μαθηματικά από τη σχέση:

$$\Delta y \Delta p \geq \frac{h}{2\pi} \quad (10.19)$$

όπου $h=6,6262 \times 10^{-34}$ Js η σταθερή του Planck και Δy , Δp τα σφάλματα μέτρησης της θέσης και της ορμής. Αν το ένα είναι πολύ μικρό, το άλλο απαραίτητα θα είναι πολύ μεγάλο.

Ο Heisenberg εξήγησε ότι τα σφάλματα Δy και Δp δεν οφείλονται σε ατέλειες της πειραματικής συσκευής αλλά στην κβαντική δομή της ύλης. Έτσι έχουμε αδυναμία του απόλυτου προσδιορισμού της κατεύθυνσης κατά την οποία περιθλάται ένα φωτόνιο ή ηλεκτρόνιο που διέρχεται από μια σχισμή.

Για ένα ρεύμα φωτονίων που διέρχεται από μονή σχισμή εύρους a (όπως στο σχήμα 10.2) μπορεί να θεωρηθεί ότι ισχύει:

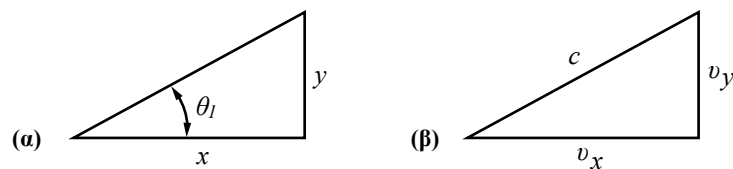
$$\Delta y = a \quad (10.20)$$

Τα φωτόνια πριν τη σχισμή ταξιδεύουν στη διεύθυνση την κάθετη στο επίπεδο της σχισμής (x -διεύθυνση). Μετά τη σχισμή έχουν δυνατότητα κίνησης και στην y -διεύθυνση.

Η πιθανότητα της έντασης της συνιστώσας ταχύτητας v_y δίνεται από την κατανομή της έντασης του διαμορφώματος της περίθλασης. Το πρώτο ελάχιστο χρησιμοποιείται για τον ορισμό της αβεβαιότητας (diffraction uncertainty) όπως εξηγεί το σχήμα 10.8:

$$\Delta v_y = c \sin \theta_1 \Rightarrow \Delta p_y = m_p c \sin \theta_1 \quad (10.21)$$

όπου θ_1 είναι η γωνία του πρώτου ελαχίστου, m_p η μάζα του φωτονίου και c η ταχύτητα του φωτός.



Σχήμα 10.8 – Γεωμετρία για την περίθλαση μέσω μονής σχισμής: (α) ο δρόμος που έχει διανυθεί, (β) οι συνιστώσες της ταχύτητας του φωτονίου.

Η σχέση του de Broglie συνδέει την ορμή με το μήκος κύματος ενός σωματίου, και από αυτή μπορεί να υπολογισθεί η μάζα και να αντικατασταθεί στη σχέση (10.21), όπως και το $\sin \theta_1$ που υπολογίζεται για $m=1$, από τη σχέση (10.7):

$$p = \frac{h}{\lambda} = mc \Rightarrow m = \frac{h}{\lambda c} \quad (10.22)$$

$$\Delta p_y = \frac{h}{\lambda} \sin \theta_1 \quad (10.23)$$

Από τις σχέσεις (10.7) και (10.23), για τον πρώτο μηδενισμό της φωτεινής έντασης, προκύπτει ότι:

$$\Delta p_y = \frac{h}{\lambda} \frac{\lambda}{a} = \frac{h}{a} \quad (10.24)$$

Το μέτρο της αβεβαιότητας της ορμής υπολογίζεται πειραματικά από τη σχέση (10.23), αν υπολογίσουμε τη γωνία θ_1 από τη γεωμετρία της πειραματικής διάταξης (βλέπε σχήμα 10.8.α), από όπου φαίνεται ότι:

$$\tan \theta_1 = \frac{y_1}{x} \quad (10.25)$$

άρα η (10.23) γίνεται:

$$\Delta p_y = \frac{h}{\lambda} \sin \theta_1 \left(\arctan \frac{y_1}{x} \right) \quad (10.26)$$

Από τις σχέσεις (10.20) και (10.24) υπολογίζεται το γινόμενο $\Delta y \Delta p$:

$$\Delta y \Delta p = a \frac{h}{a} = h \quad (10.27)$$

Η σχέση (10.27) δηλώνει ότι, αν το εύρος της σχισμής Δy αυξάνει, το πρώτο ελάχιστο του διαμορφώματος της περίθλασης βρίσκεται σε μεγαλύτερη γωνία θ_1 .

Αν στη σχέση (10.27) αντικατασταθεί η (10.20) και η (10.26), προκύπτει:

$$\Delta y \Delta p_y = a \frac{h}{\lambda} \sin \left(\arctan \frac{y_1}{x} \right) = h \Rightarrow \frac{a}{\lambda} \sin \left(\arctan \frac{y_1}{x} \right) = 1 \quad (10.28)$$

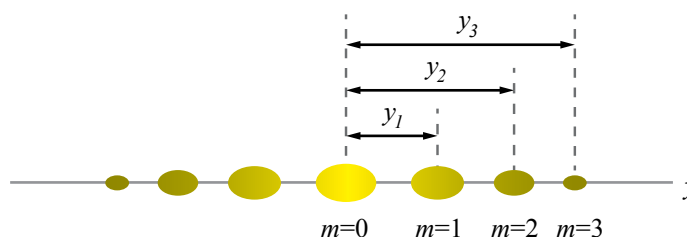
Από τις μετρήσεις του πειράματος (y_1 και x), με γνωστά το εύρος της σχισμής a και το μήκος κύματος του λέιζερ λ , μπορεί να επιβεβαιωθεί η σχέση (10.28), η οποία αποτελεί την έκφραση της αρχής της απροσδιοριστίας του Heisenberg.

10.3.3 Εκτέλεση

Να αναγνωρίσετε τις συσκευές του πειράματος.

Προσοχή! Η ακτίνα φωτός λέιζερ πρέπει να παρατηρείται υπό γωνία και ποτέ να μη προσπέσει στην επιφάνεια του ματιού σας.

1. Να θέσετε σε λειτουργία τη συσκευή λέιζερ.
2. Η οπτική τράπεζα είναι ένας αλουμινένιος σωλήνας μήκους 3,5m. Τοποθετήστε το πέτασμα στο άλλο άκρο της οπτικής τράπεζας, απέναντι από τη συσκευή λέιζερ.
3. Να τοποθετήσετε το οπτικό φράγμα (με τις 300 σχισμές/mm) στη πορεία της δέσμης του λέιζερ, πάνω σε βάση κοντά στη συσκευή λέιζερ.
4. Παρατηρήστε τους κροσσούς συμβολής πάνω στο πέτασμα. Η εικόνα που θα δείτε πάνω στο πέτασμα θα μοιάζει με εκείνη του σχήματος 10.9. Μετρήστε με ακρίβεια την απόσταση y_1 του πρώτου κροσσού συμβολής (πρώτης τάξης, $m=1$) από τον κεντρικό κροσσό συμβολής (μηδενικής τάξης, $m=0$). Μπορείτε να μετρήσετε είτε αριστερά είτε δεξιά του κεντρικού κροσσού.



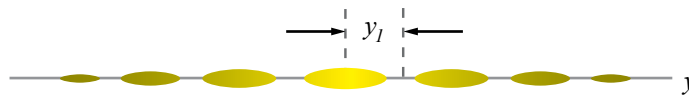
Σχήμα 10.9 – Εικόνα κροσσών συμβολής.

5. Μετρήστε την απόσταση x του πετάσματος από το φράγμα.
6. Επαναλάβετε το βήμα 4 μετρώντας τις αποστάσεις y_2 και y_3 του δεύτερου ($m=2$) και τρίτου ($m=3$) κροσσού συμβολής, αντίστοιχα από τον κεντρικό για την ίδια απόσταση x , όπως εξηγεί το σχήμα 10.9.
7. Οι μετρήσεις σας από τα βήματα 4, 5 και 6 να καταχωρηθούν σε πίνακα της μορφής του πίνακα 10.1.

Απόσταση πετάσματος – φράγματος x (mm) = ...	
Τάξη κροσσού m	Απόσταση κροσσού από τον κεντρικό y_m (mm)
1	...
2	...
...	...

Πίνακας 10.1 – Καταχώριση μετρήσεων.

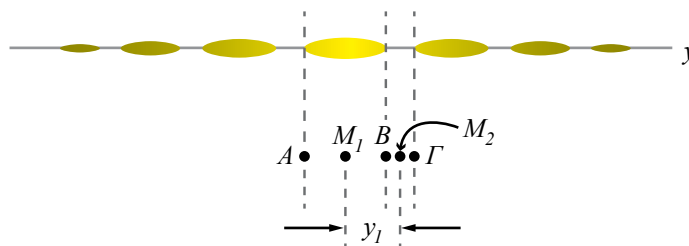
8. Να τοποθετήσετε το οπτικό φράγμα με μονή σχισμή στη πορεία της δέσμης του λέιζερ, πάνω σε βάση κοντά στη συσκευή του λέιζερ. Προσέξτε η σχισμή να είναι τοποθετημένη κάθετα, και η δέσμη του φωτός να κτυπάει ακριβώς πάνω στη σχισμή.
9. Παρατηρήστε την εικόνα της περίθλασης πάνω στο πέτασμα. Η εικόνα που θα δείτε πάνω στο πέτασμα θα μοιάζει με αυτή του σχήματος 10.10.
10. Μετρήστε με ακρίβεια την απόσταση y_1 του πρώτου μηδενισμού του φωτός από το κέντρο (σχήμα 10.10).



Σχήμα 10.10 – Εικόνα περίθλασης από φράγμα μονής σχισμής.

Τρόπος μέτρησης της απόστασης y_1 με ακρίβεια:

Τοποθετήστε ένα κομμάτι λευκό χαρτί πάνω στο πέτασμα, έτσι ώστε η εικόνα της περίθλασης να φαίνεται πάνω σε αυτό. Σημειώστε πάνω στο χαρτί τα δύο άκρα A και B της κεντρικής φωτεινής περιοχής καθώς και την αρχή της δεύτερης φωτεινής περιοχής Γ , (σχήμα 10.11.α). Αφαιρέστε το χαρτί. Βρείτε το μέσον M_1 της απόστασης AB καθώς και το μέσον M_2 της απόστασης $B\Gamma$, (σχήμα 10.11.β). Η απόσταση M_1M_2 ισούται με την απόσταση y_1 , που θέλετε να υπολογίσετε.



Σχήμα 10.11 – Τρόπος μέτρησης της απόστασης y_1 με ακρίβεια.

11. Μετρήστε την απόσταση x του πετάσματος από το φράγμα.
12. Επαναλάβετε το βήμα 10 για τρεις ακόμα διαφορετικές τιμές του x .
13. Οι μετρήσεις σας από τα βήματα 10, 11 και 12 να καταχωρηθούν σε πίνακα της μορφής του πίνακα 10.2.

Απόσταση πετάσματος – φράγματος x (mm)	Απόσταση του πρώτου μηδενισμού του φωτός y_1 (mm)
...	...
...	...

Πίνακας 10.2 – Καταχώριση μετρήσεων.

10.3.4 Επεξεργασία των μετρήσεων

1. Από τη σχέση (10.1) υπολογίστε το μήκος κύματος του λέιζερ της άσκησης για $m=1, 2, 3$.
Το $\sin\theta_m$ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sin\theta_m = \frac{y_m}{\sqrt{y_m^2 + x^2}} \quad (10.29)$$

όπου: d η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σχισμών του φράγματος (εδώ $d=1/300\text{mm}$), x η απόσταση μεταξύ φράγματος και πετάσματος, y_m η απόσταση του m -στου μεγίστου από το κεντρικό μέγιστο.

2. Υπολογίστε τη μέση τιμή του λ από τις τρεις τιμές που θα υπολογίσετε (για $m=1, m=2$ και $m=3$).
3. Βρείτε την επί της εκατό διαφορά της τιμής αυτής από την πραγματική τιμή του λ ($\lambda=633\text{nm}$).
4. Για καθεμία από τις μετρήσεις του πίνακα 10.2 υπολογίστε το εύρος a της σχισμής.

Από τη σχέση (10.7) για $m=1$ προκύπτει ότι:

$$a = \frac{\lambda}{\sin\theta_1} \quad (10.30)$$

με:

$$\sin\theta_1 = \frac{y_1}{\sqrt{y_1^2 + x^2}} \quad (10.31)$$

όπου: a το εύρος της σχισμής, x η απόσταση μεταξύ φράγματος και πετάσματος, y_1 η απόσταση του πρώτου μηδενισμού του φωτός, λ το μήκος κύματος του λέιζερ (633 nm).

5. Βρείτε τη μέση τιμή του a από τις πέντε τιμές που θα υπολογίσετε.
6. Να υπολογίσετε το μέτρο της αβεβαιότητας της ορμής από τη σχέση (10.26).
7. Να επιβεβαιωθεί η αρχή αβεβαιότητας του Heisenberg με την επαλήθευση της σχέσης (10.28).

10.4 Ενδεικτική βιβλιογραφία

- [1] H. D. Young, R. A. Freedman, and A. L. Ford, “Chapter 38: Diffraction of light Waves,” *University Physics*, Volume 3 (CHS. 37-44). Pearson Education, 2011.
- [2] H. D. Young, R. A. Freedman, and A. L. Ford, “Chapter 37: Inference of Light Waves,” *University Physics*, Volume 3 (CHS. 37-44). Pearson Education, 2011.
- [3] M. Nelkon and P. Parker, “Chapter 17: Oscillations and waves,” in *Advanced Level Physics*, Heinemann Educational, 1995, pp. 465-487.
- [4] M. Nelkon and P. Parker, “Chapter 20: Diffraction of Light waves,” in *Advanced Level Physics*, Heinemann Educational, 1995, pp. 539, pp. 542.
- [5] Ν. Αφεντάκης, Σ. Μουσταϊζής, Ε. Σεργάκη, *ΛΕΙΖΕΡ – Αρχές Λειτουργίας και Εφαρμογές*, Εκδόσεις Ίδρυμα Ευγενίδου, Αθήνα, 2008.

