O14

Συμβολή κυμάτων – Πείραμα διπλής σχισμής – Προσδιορισμός της κατανομής της έντασης της οπτικής ακτινοβολίας

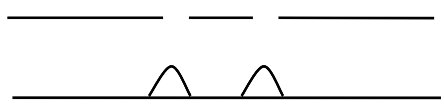
1. Σκοπός

Στα πλαίσια αυτού του πειράματος θα μελετήσουμε το φαινόμενο της συμβολής κυμάτων και ειδικότερα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, θα ανιχνεύσουμε την κυματική φύση του φωτός και μέσω της πειραματικής διάταξης διπλής σχισμής (πείραμα του Young) θα δούμε πως διαμορφώνεται η κατανομή της έντασης της οπτικής ακτινοβολίας κατά μήκος των κροσσών που δημιουργούνται από τη συμβολή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

2. Θεωρία

Μέχρι το 1801 που ο Thomas Young πραγματοποίησε το πολύ γνωστό και ιστορικό πείραμά του, η φύση του φωτός, αν δηλαδή το φως ήταν κυματικό ή σωματιδιακό φαινόμενο, δεν είχε αποσαφηνιστεί. Ο Newton, για παράδειγμα, θεωρούσε ότι το φως αποτελούνταν από σωματίδια, ενώ ο Ολλανδός φυσικός Huygens (Χόγκενς) θεωρούσε τη φύση του φωτός κυματική. Ας δούμε το θέμα πιο αναλυτικά.

Ας συμφωνήσουμε αρχικά ότι το φως είναι σωματίδια και ας θεωρήσουμε ένα πέτασμα Α (εμπόδιο) που φέρει δυο μικρά ανοίγματα. Αν ρίξουμε μια ποσότητα άμμου (η άμμος είναι σωματίδια) στο πέτασμα, ένα μέρος της θα περάσει μέσα από τα ανοίγματα και στο επίπεδο Β θα σχηματίσει δυο σωρούς (Σχήμα 1).

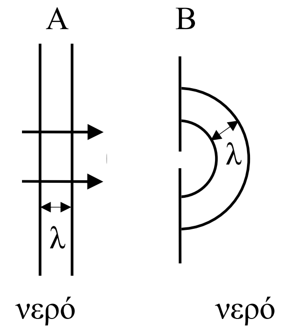


Σχήμα 1. *Οι κόκκοι της άμμου, αφού περάσουν μέσα από τα ανοίγματα (επίπεδο Α), θα σχηματίσουν δυο σωρούς στο επίπεδο Β.*

Η παραπάνω εικόνα θα αλλάξει δραματικά αν στο εμπόδιο προσπέσει ένα κύμα. Θα έχετε παρατηρήσει άλλωστε (φαινόμενο γνωστό και από το 17^{ο} αιώνα), ότι κύματα νερού που περνούν από ένα μικρό άνοιγμα, εξέρχονται από αυτό σε κυκλική διάταξη (Σχήμα 2).

Είναι κατανοητό ότι αν η ταχύτητα των κυμάτων που προσπίπτουν στο εμπόδιο είναι η ίδια με την ταχύτητα των κυμάτων που διαμορφώνονται μετά το άνοιγμα, τότε και το μήκος κύματος λ θα είναι το ίδιο. Σε διαφορετική περίπτωση, το λ αλλάζει. Ο Huygens, κατά το 17^{ο} αιώνα πρότεινε μια ιδέα που αργότερα (κατά το 19^{ο} αιώνα) βελτιώθηκε από το Fresnel και είναι γνωστή ως η αρχή των Huygens – Fresnel:

Αν ένα επίπεδο μονοχρωματικό κύμα προσπίπτει σε πέτασμα που φέρει ένα άνοιγμα, τότε όλα τα σημεία στο επίπεδο του ανοίγματος μπορεί να θεωρηθούν ως δευτερογενείς σημειακές πηγές που εκπέμπουν σφαιρικά κύματα (στην περίπτωση του νερού κυκλικά κύματα – χώρος 2 διαστάσεων) και αυτές οι σημειακές πηγές αντικαθιστούν την πραγ-



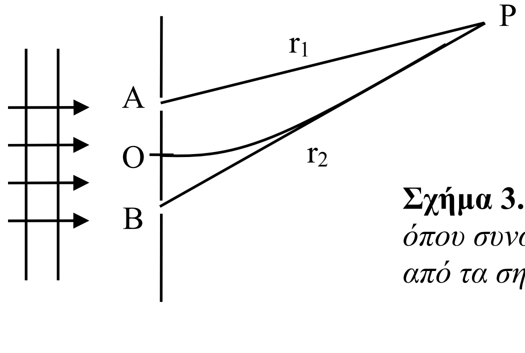
Σχήμα 2. *Τα κύματα θα εξέλθουν σε σφαιρική ή κυκλική διάταξη από το άνοιγμα του εμποδίου.*

ματική πηγή η οποία πλημμυρίζει το πέτασμα, ενώ το ίδιο το πέτασμα απορροφά την ακτινοβολία που προσπίπτει σ' αυτό.

Η αρχή των Huygens – Fresnel είναι αρκετά ισχυρή ως προς τη διατύπωσή της, αν και υπάρχουν διαφορετικές γνώμες ως προς την επιστημονική της αξία. Για παράδειγμα, ο Melvin Schartz στο γνωστό βιβλίο του «Αρχές Ηλεκτροδυναμικής» αναφέρει το εξής: *Η αρχή του Huygens μας λέει να θεωρήσουμε κάθε σημείο επάνω σ' ένα μέτωπο κύματος ως μια νέα πηγή ακτινοβολίας και να αθροίσουμε την ακτινοβολία απ' όλες αυτές τις νέες πηγές μαζί. Φυσικά αυτό δεν στέκει γιατί το φως δεν εκπέμπει φως, παρά μόνο επιταχυνόμενα φορτία εκπέμπουν φως.*

Ας θεωρήσουμε κι εμείς προς στιγμήν ότι η αρχή των Huygens – Fresnel δεν ισχύει: αργότερα θα δούμε ότι μας δίνει τη σωστή απάντηση για λάθος όμως αιτίες.

Έχουμε λοιπόν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα και ειδικότερα ένα οπτικό κύμα που προ-

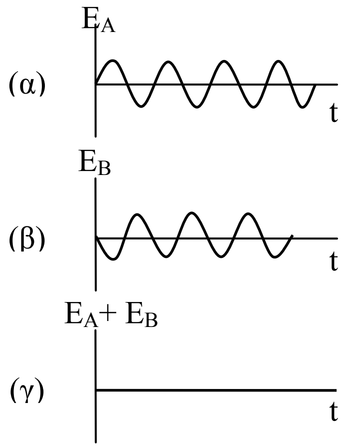


Σχήμα 3. *Θεωρούμε τυχαίο σημείο P του χώρου όπου συναντώνται τα κύματα που προέρχονται από τα σημεία A και B.*

προσπίπτει σε πέτασμα το οποίο φέρει δυο σχισμές A και B (Σχήμα 3). Τότε σ' ένα σημείο P του χώρου θα φτάσουν κύματα που θα προέρχονται από τα A και B. Τα ανύσματα των ηλεκτρικών πεδίων αυτών των κυμάτων θα αθροιστούν στο P διανυσματικά.

Φανταστείτε τώρα ότι $BP - AP = \frac{1}{2}\lambda$.

Η παραπάνω σχέση μας διαμορφώνει πρακτικά στο σημείο Ρ την εικόνα του Σχήματος 4.



Σχήμα 4. *Στην περίπτωση που* $BP - AP = \frac{1}{2}\lambda$ *παρατηρούμε ότι η υπέρθεση των δυο κυμάτων (α) και (β) στο σημείο Ρ θα μας δώσει την εικόνα (γ).*

Με άλλα λόγια αυτό που έχουμε είναι **φως + φως = σκότος**, δηλαδή το ένα κύμα καταστρέφει το άλλο (**φαινόμενο καταστροφικής συμβολής**)

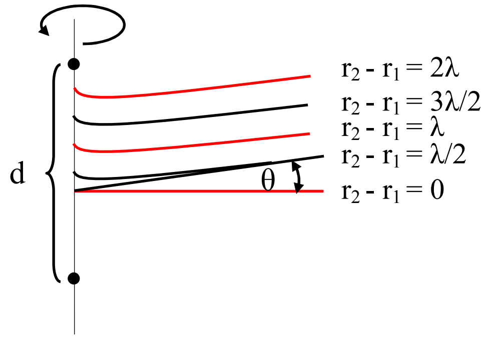
Τα κύματα που ξεκινούν από το Α και Β αντίστοιχα θα έχουν διαφορά φάσης 180^o ή π κι αν θεωρήσουμε όλα τα σημεία όπου η διαφορά των οπτικών δρόμων είναι λ/2, αυτά θα βρίσκονται επάνω σε μια υπερβολοειδή επιφάνεια (θυμηθείτε ότι αν ΑΡ + ΒΡ = σταθερό, έχουμε έλλειψη. Αν όμως ΑΡ - ΒΡ = σταθερό, τότε έχουμε υπερβολή). Έτσι στην περίπτωσή μας για οποιοδήποτε σημείο που βρίσκεται επάνω στο υπερβολοειδές, έχουμε διαφορά λ/2 (Σχήμα 3).

Σημείωση 1: Τα σωματίδια δεν συμπεριφέρονται σύμφωνα με τα παραπάνω, δηλαδή ένα σωματίδιο προστιθέμενο με ένα άλλο σωματίδιο δεν μας δίνει μηδέν σωματίδια).

Πέρα από τις υπερβολοειδείς επιφάνειες που διαμορφώνει η σχέση $BP - AP = \frac{1}{2}\lambda$, υπάρχουν και άλλες υπερβολοειδείς επιφάνειες που μας δίνουν **ενισχυτική συμβολή**.

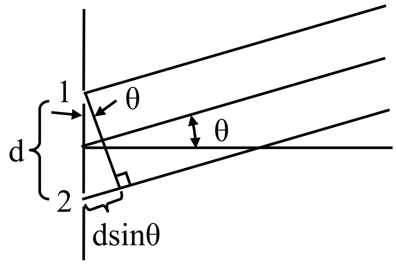
Αν, για παράδειγμα έχουμε ΒΡ – ΑΡ = mλ, όπου m = 0, ±1, ±2, ±3, ….., τότε θα έχουμε σχηματίσει επιφάνειες που μας δίνουν ενισχυτική συμβολή και η διαφορά φάσης ανάμεσα στα δυο κύματα θα είναι 0, 2π, 4π, ….

Έτσι θα έχουμε επιφάνειες με καταστροφική συμβολή (ελάχιστα) και επιφάνειες με ενισχυτική συμβολή (μέγιστα) (Σχήμα 5). Ας το δούμε αναλυτικά.



Σχήμα 5. *Οι υπερβολοειδείς επιφάνειες που διαμορφώνονται από διαφορά οπτικών δρόμων 0, λ, 2λ, … δίνουν μέγιστα, ενώ οι επιφάνειες που διαμορφώνονται από διαφορά οπτικών δρόμων λ/2, 3λ/2, 5λ/2, … δίνουν ελάχιστα.*

Θεωρείστε το Σχήμα 6 και υποθέστε ότι το σημείο παρατήρησης βρίσκεται πολύ μακριά από το πέτασμα που φέρει τις δυο σχισμές, έτσι που οι ακτίνες να φτάνουν σ'



Σχήμα 6. *Οι ακτίνες από τις δυο πηγές φτάνουν στο σημείο παρατήρησης ως παράλληλες ακτίνες.*

αυτό παράλληλες. Από τη γεωμετρία του Σχήματος 6 προκύπτει ότι η **διαφορά οπτικών δρόμων μεταξύ των δυο κυμάτων θα είναι d sinθ**.

Αν διαιρέσουμε το d sinθ με το λ, ο λόγος $\frac{d\sin\theta}{\lambda}$ μας δείχνει πόσα μήκη κύματος χωρούν στην οπτική διαδρομή **d sinθ**. Για κάθε μήκος κύματος που χωράει εκεί, η διαφορά φάσης θα είναι 2π και επομένως:

Διαφορά φάσης $\delta = \frac{2\pi d\sin\theta}{\lambda}$ (1)

Η συνθήκη **ενισχυτικής συμβολής** θα είναι

$\delta = m2\pi$ για $m = 0, \pm1, \pm2, \pm3, \ldots$ (2)

και σε όρους διαφοράς οπτικών δρόμων:

$d\sin\theta_m = m\lambda$ (3)

Αν m = 0, βρισκόμαστε ακριβώς στο οριζόντιο επίπεδο (επίπεδο κάθετο στη σελίδα) που περνάει από το μέσο της απόστασης μεταξύ των δυο σχισμών και επομένως η απόσταση κάθε σημείου από τις πηγές 1 & 2 είναι η ίδια.

Στην περίπτωση **καταστροφικής συμβολής** θέλουμε δ = π, 3π, 5π, ….., δηλαδή

$\delta = (2m + 1)\pi$ (4)

και σε όρους διαφοράς οπτικών δρόμων:

$d\sin\theta_m = \frac{(2m+1)}{2}\lambda$ (5)

Αν κοιτάξουμε από το μέσο μεταξύ των σχισμών προς τις διευθύνσεις που σχηματίζονται τα μέγιστα και ελάχιστα, μπορούμε να προσδιορίσουμε ακριβώς τις γωνίες στις οποίες σχηματίζονται, αν επιλύσουμε τις σχέσεις (3) και (5) ως προς $\sin\theta_m$ αντίστοιχα. Έτσι θα έχουμε:

$$d\sin\theta_m = m\lambda \Rightarrow \sin\theta_m = \frac{m\lambda}{d} \qquad (6)$$

Η σχέση (6) προσδιορίζει ακριβώς όλες εκείνες τις διευθύνσεις στις οποίες παρουσιάζονται μέγιστα, δηλαδή εκεί που έχουμε φαινόμενα **ενισχυτικής συμβολής**.

Κατά τον ίδιο τρόπο, από τη σχέση (5)

$$\sin\theta_m = \frac{(2m+1)}{2d}\lambda \qquad (7)$$

Η σχέση (7) προσδιορίζει ακριβώς όλες εκείνες τις διευθύνσεις στις οποίες παρουσιάζονται ελάχιστα, δηλαδή εκεί που έχουμε φαινόμενα **καταστροφικής συμβολής**.

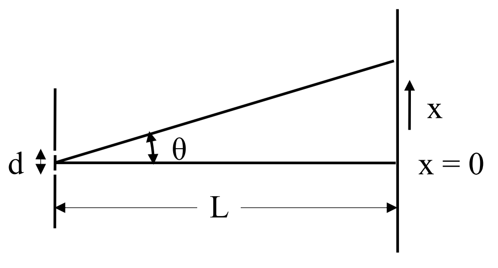
Επίσης, αν προβάλλουμε την απεικόνιση της συμβολής επάνω σ' ένα πέτασμα που βρίσκεται πολύ μακριά από το επίπεδο των σχισμών, μπορούμε να προσδιορίσουμε και τη γραμμική απόσταση των μεγίστων ή ελαχίστων από το κεντρικό μέγιστο ($\theta = 0$).

Στην περίπτωση αυτή, η γεωμετρία του Σχήματος 7 μας δίνει προσεγγιστικά για μικρές γωνίες θ (σημειώστε $\tan\theta_m = \frac{x}{L} = \sin\theta_m$) τα εξής:

$$x_m = \frac{Lm\lambda}{d} \quad \textbf{(μέγιστα)} \qquad (8)$$

$$x_m = \frac{L(2m+1)\lambda}{2d} \quad \textbf{(ελάχιστα)} \qquad (9)$$

Για να γίνουν πιο κατανοητά τα παραπάνω ας δούμε ένα παράδειγμα όπου έχουμε πέτασμα που φέρει δυο λεπτές σχισμές πολύ κοντά τη μια στην άλλη (δηλαδή το d είναι πολύ μικρό) και ας θεωρήσουμε το επίπεδο παρατήρησης πολύ μακριά από το πέτασμα (Σχήμα 7). Υποθέτουμε επίσης ότι έχουμε μονοχρωματική ακτινοβολία ερυθρού (μήκους κύματος $\lambda = 600$ nm), $L = 5$ m και $d = 1/4$ mm. Θα εξετάσουμε την περίπτωση ενισχυτικής συμβολής.



Σχήμα 7. *Μονοχρωματική ακτινοβολία προσπίπτει σε πέτασμα που φέρει δυο σχισμές. Η παρατήρηση γίνεται σε πολύ μεγάλη απόσταση από το επίπεδο του πετάσματος.*

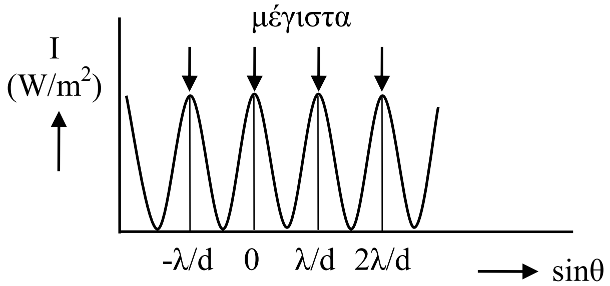
Σημείωση 2: Για μικρές γωνίες θ ισχύει προσεγγιστικά $\sin\theta = \frac{x}{L}$

Με τη βοήθεια των σχέσεων (2), (6) & (8) για τιμές του $m = 0, \pm1, \pm2, \pm3, \ldots$, θα υπολογίσουμε τις τιμές των δ, sinθ και x_m. Έχουμε:

m	δ	sinθ	x_m
0	0	0	0
±1	±2π	$2.4x10^{-3}$	±1.2 cm
.	.	.	.
.	.	.	.
±10	±20π	$24x10^{-3}$	±12 cm

Πίνακας 1. *Για m = 0, ±1, ±2, ±3, … προσδιορίζονται οι τιμές των δ, sinθ και x_m. Παρατηρούμε ότι η μεταβολή των μεγεθών είναι γραμμική.*

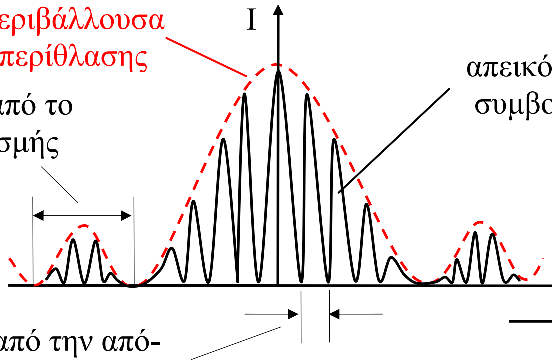
Αν τώρα θελήσουμε να δούμε την κατανομή της έντασης της ακτινοβολίας κατά μήκος των κροσσών συμβολής (μέγιστα και ελάχιστα), θα πάρουμε το διάγραμμα του Σχήματος 8. Παρατηρείστε ότι τα μέγιστα παρουσιάζονται στο 0 (κεντρικός κροσσός), στο λ/d, στο 2λ/d κ.ο.κ. Επίσης βρίσκονται στο -λ/d στο -2λ/d στο -3λ/d για m = 0, ±1, ±2, ±3, ….. αντίστοιχα. Τα ελάχιστα ευρίσκονται ακριβώς στη μέση μεταξύ των μεγίστων.



Σχήμα 8. *Ιδανική κατανομή της έντασης της ακτινοβολίας κατά μήκος των κροσσών συμβολής, ως συνάρτηση της γωνίας θ. Αυτή την εικόνα θα παίρναμε αν το εύρος των δυο σχισμών ήταν πολύ μικρό.*

Είναι κατανοητό ότι η διεύθυνση στην οποία σχηματίζονται τα μέγιστα και ελάχιστα εξαρτάται από το μήκος κύματος λ της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο επίπεδο των σχισμών. Για διαφορετικό λ, θα έχουμε τα μέγιστα και ελάχιστα σε διαφορετικές γωνίες (για m = 0 όλα τα κεντρικά μέγιστα συμπίπτουν, ανεξάρτητα από την τιμή του λ).

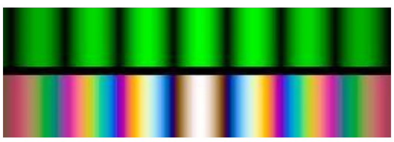
Στην κατανομή της οπτικής έντασης του Σχήματος 8 θεωρήσαμε την ιδανική περίπτωση όπου το εύρος **a** των δυο σχισμών είναι πάρα πολύ μικρό σε σχέση με το μήκος κύματος λ της ακτινοβολίας που προσπίπτει στις σχισμές (δηλαδή a << λ). Το γεγονός αυτό διαμορφώνει τις σχισμές ως δυο σημειακές πηγές . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ισότροπη κατανομή ακτινοβολίας από κάθε σχισμή, πράγμα που διαμορφώνει και την εικόνα του Σχήματος 8 (καθαρά φαινόμενο συμβολής από δυο πηγές) . Όμως στην περίπτωση αυτή η ακτινοβολία δεν είναι αρκετά ισχυρή για να μπορέσουμε να την παρατηρήσουμε και επομένως απαιτούνται σχισμές μεγαλύτερου εύρους a. Τέτοιες σχισμές θα μας δώσουν ανισότροπη γωνιακή κατανομή, δηλαδή η κάθε σχισμή θα δημιουργεί μια απεικόνιση της έντασης της ακτινοβολίας η οποία θα αντιστοιχεί σε περίθλαση απλής σχισμής. Αυτό διαμορφώνει κατά πλάτος την απεικόνιση της συμβολής των κυμάτων που προέρχονται από τις δυο σχισμές (Σχήμα 9).



Σχήμα 9. *Εδώ η διαμόρφωση πλάτους της απεικόνισης συμβολής δημιουργείται από την περίθλαση (κόκκινη καμπύλη).*

Σημείωση 3: Για να παρατηρήσουμε φαινόμενα συμβολής, θα πρέπει οι δυο πηγές να είναι σύμφωνες, να έχουν δηλαδή την ίδια φάση ή σταθερή διαφορά φάσης και να έχουν επίσης την ίδια συχνότητα.

Στην περίπτωση που η προσπίπτουσα ακτινοβολία δεν είναι μονοχρωματική αλλά παρουσιάζει ένα διευρυμένο φάσμα συχνοτήτων (περίπτωση λευκού φωτός για παράδειγμα), οι κροσσοί συμβολής, μετά τον κεντρικό, παρουσιάζονται ασαφείς ως μια ταινία χρωμάτων, όπου τα μέγιστα και ελάχιστα δεν είναι διακριτά (Εικόνα 1). Αυτό συμβαίνει γιατί σύμφωνα με τα παραπάνω κάθε συχνότητα (μήκος κύματος) σχηματίζει τα μέγιστα και ελάχιστα σε διαφορετικές διευθύνσεις, ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες συχνότητες, με αποτέλεσμα να υπάρχει μια αλληλοκάλυψη όπου μέγιστα μιας συχνότητας να συμπίπτουν με μέγιστα άλλης συχνότητας κ.ο.κ



Εικόνα 1. *Στο επάνω μέρος της εικόνας παρατηρούμε κροσσούς συμβολής μονοχρωματικής ακτινοβολίας (πράσινο), όπου τα όρια μεγίστων – ελαχίστων σχηματίζονται πολύ καθαρά. Στο κάτω μέρος παρατηρούμε τους κροσσούς συμβολής από πηγή λευκού φωτός. Παρατηρείστε ότι μόνο ο κεντρικός κροσσός διαφαίνεται καθαρά, ενώ οι υπόλοιποι είναι τελείως ασαφείς.*

Σημείωση 4: Η συνολική ένταση I στο σημείο παρατήρησης P είναι συνάρτηση του $\cos^2(\delta/2)$. Ειδικότερα, για την περίπτωση διπλής σχισμής αποδεικνύεται ότι:

$$I_{ολ} = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right) \tag{10}$$

όπου I_0 η ένταση κάθε κύματος χωριστά (την απόδειξη της σχέσης μπορείτε να την αναζητήσετε σ' οποιοδήποτε βιβλίο Οπτικής).

Η απεικόνιση συμβολής δυο συμφώνων κυμάτων που παρουσιάστηκε από το Young το 1801, είναι μια καθαρή απόδειξη ότι το φως είναι κυματικό φαινόμενο. Όμως η φυσική του εικοστού αιώνα έδειξε ότι το φως αποτελείται από πακέτα κβαντισμένης ενέργειας που καλούνται φωτόνια, τα οποία παρουσιάζουν σωματιδιακή συμπεριφορά.

Μπορούμε να ανιχνεύσουμε φωτόνια, ξεχωριστά το καθένα, κατά τον ίδιο τρόπο που ανιχνεύουμε κάθε κόκκο της άμμου. Ωστόσο, η απεικόνιση συμβολής που παρατηρούμε, μπορεί μόνο να εξηγηθεί αν θεωρήσουμε ότι το κάθε φωτόνιο πέρασε ταυτόχρονα και από τις δυο σχισμές. Πως όμως μπορεί να συμβεί αυτό; Θα πρέπει να είναι είτε η μια σχισμή είτε η άλλη και εδώ βρίσκεται το μεγάλο μυστήριο. **Το φως είναι και τα δυο: είναι κύμα αν εμείς θέλουμε να είναι κύμα και είναι σωματίδιο, αν το θέλουμε σωματίδιο.**

Αν καταφέρουμε, για κάθε φωτόνιο, να προσδιορίσουμε τη σχισμή από την οποία πέρασε, τότε δεν θα μπορέσουμε να παρατηρήσουμε φαινόμενα συμβολής. Έτσι τη στιγμή που θα έχουμε αποδείξει τη σωματιδιακή φύση του φωτός, με το να προσδιορίσουμε τη σχισμή, την ίδια στιγμή θα έχουμε καταστρέψει την κυματική του φύση και τότε δεν θα συμπεριφέρεται ως κύμα, αλλά ως σωματίδιο.

Όμως, όσο ο προσδιορισμός της σχισμής από την οποία πέρασε το κάθε φωτόνιο παραμένει ως εικασία, το φως θα μας αποκαλύπτει την κυματική του φύση και επομένως θα βλέπουμε φαινόμενα συμβολής. Η επιλογή είναι δική μας. Σε κάθε περίπτωση δεν μπορούμε να έχουμε και τα δυο.

3. Πειραματική διαδικασία

Εικόνα 2. *Πειραματική διάταξη*

Η διάταξη που θα χρησιμοποιήσουμε φαίνεται στην Εικόνα 2 και αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία:

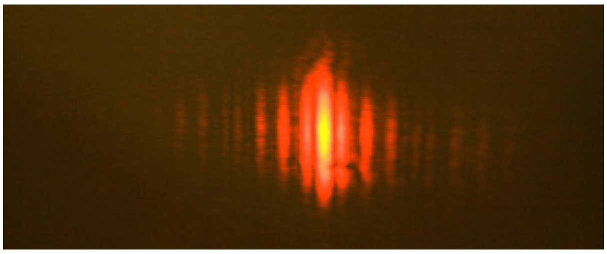
- Οπτική τράπεζα
- Laser He-Ne 1.0mW, 220 V AC
- Ενισχυτή μετρήσεων
- Διάταξη πλευρικής μετατόπισης
- Φακούς +20 και +100 mm
- Διάφραγμα διπλής σχισμής
- Φωτοστοιχείο
- Πέτασμα
- Ψηφιακό πολύμετρο

Θα στήσουμε την πειραματική διάταξη όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2, τοποθετώντας τα στοιχεία με την εξής σειρά: laser, φακός +20, φακός +100, διάφραγμα διπλής σχισμής, διάταξη πλευρικής μετατόπισης (επάνω της τοποθετείται το φωτοστοιχείο).

Το σύστημα των δυο φακών θα δημιουργήσει μια παράλληλη και διευρυμένη δέσμη του Laser, η οποία θα πρέπει να στοχεύει στο κέντρο του φωτοστοιχείου. Το laser και ο ενισχυτής μετρήσεων θα πρέπει να τεθούν σε λειτουργία τουλάχιστον 15 λεπτά πριν από την έναρξη των μετρήσεων για να ελαχιστοποιήσουμε τις διακυμάνσεις της έντασης της ακτινοβολίας. Το φωτοστοιχείο θα συνδεθεί στην είσοδο 10^4 Ω του ενισχυτή μετρήσεων (συντελεστής ενίσχυσης $10^3 – 10^5$).

Αφού ευθυγραμμίσουμε τη δέσμη του laser, τοποθετούμε στην πορεία της το διάφραγμα που φέρει τη διπλή σχισμή και σε μακρινή απόσταση παρατηρούμε (αρχικά επάνω σε ένα πέτασμα) τους κροσσούς συμβολής (Εικόνα 3).

Για να πάρουμε την κατανομή της έντασης της ακτινοβολίας (δηλαδή I = f(x)) κατά μήκος των κροσσών, θα ευθυγραμμίσουμε το κέντρο του φωτοστοιχείου με το ένα



Εικόνα 3. *Απεικόνιση συμβολής διπλής σχισμής. Παρατηρείστε πως η περίθλαση διαμορφώνει κατά πλάτος την κατανομή της έντασης των μεγίστων συμβολής.*

άκρο της απεικόνισης και κατόπιν, στρέφοντας τον κοχλία που βρίσκεται επάνω στη διάταξη πλευρικής μετατόπισης, θα πραγματοποιούμε μετρήσεις ανά 0.2 mm έως ό-του διατρέξουμε όλο το μήκος των κροσσών.

Ένας άλλος τρόπος για τη λήψη της κατανομής της έντασης είναι να χρησιμοποιή-σουμε ένα καταγραφέα x-y ή μια ccd κάμερα. Το διάγραμμα του Σχήματος 10 πραγ-ματοποιήθηκε με χρήση ccd κάμερας και ειδικού λογισμικού εισαγωγής των δεδομέ-νων σε Η/Υ.

Στο **Παράρτημα 1** παραθέτουμε τον τρόπο που υπολογίζουμε εκείνα τα μέγιστα συμ-βολής που δεν εμφανίζονται κατά την κατανομή της έντασης. Στο ίδιο παράρτημα αναλύουμε και τον τρόπο προσδιορισμού του πλήθους των μεγίστων συμβολής που παρουσιάζονται ανάμεσα σε δυο ελάχιστα περίθλασης.

4. Ερωτήσεις κατανόησης

(θα πρέπει να απαντηθούν και να παραδοθούν στον επιβλέποντα καθηγητή πριν την πραγματοποίηση του πειράματος)

Τι επιπτώσεις θα έχει στην απεικόνιση συμβολής η σταδιακή αύξηση της απόστασης d μεταξύ των δυο σχισμών;

Που οφείλεται το φαινόμενο στο οποίο παρατηρείται εξαφάνιση συγκεκριμένων με-γίστων συμβολής;

Αν ο κροσσός συμβολής (μέγιστο) 4ης τάξης λείπει από την απεικόνιση, ποια θα εί-ναι η σχέση μεταξύ των a και d;

Αν το εύρος a των σχισμών είναι πάρα πολύ μικρό, πως θα διαμορφωθεί η απεικόνιση της συμβολής;

Χρησιμοποιώντας μια διπλή σχισμή γνωστού d, περιγράψτε ένα υποθετικό πείραμα όπου θα μπορούσαμε να προσδιορίσουμε το μήκος κύματος λ της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο επίπεδο των σχισμών.

5. Εργασίες

1. Πραγματοποιούμε τη διάταξη της Εικόνας 2, όπως περιγράψαμε στην πειραματική διαδικασία και ρυθμίζουμε τις θέσεις των δυο φακών ώστε να δούμε επάνω σε πέτασμα καθαρούς κροσσούς.

2. Αφαιρούμε το πέτασμα και ακριβώς στην ίδια θέση τοποθετούμε το φωτοστοιχείο που βρίσκεται επάνω στη διάταξη πλευρικής μετατόπισης. Ρυθμίζουμε ώστε το κέντρο του φωτοστοιχείου να ευθυγραμμίζεται με το ένα άκρο της απεικόνισης.

3. Καταγράφουμε την απόσταση L μεταξύ φωτοστοιχείου και διαφράγματος που εμπεριέχει τη διπλή σχισμή.

4. Στρέφουμε τον κοχλία ανά 0.2 mm και καταγράφουμε τις αντίστοιχες τιμές της τάσης V που εμφανίζονται στο ψηφιακό πολύμετρο στον Πίνακα 2. (Σημείωση: οι τιμές της τάσης προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις μεταβολές της έντασης I)

5. Πραγματοποιούμε το διάγραμμα I = f(x), όπου x η μετατόπιση του φωτοστοιχείου, κατά μήκος των κροσσών.

6. Επάνω στο διάγραμμα I = f(x) προσδιορίζουμε τα μέγιστα συμβολής για m = 1, 2, 3, 4 (Σχήμα 10) και υπολογίζουμε τις αποστάσεις τους από το κεντρικό μέγιστο x_0 (δηλαδή υπολογίζουμε τις τιμές x_1, x_2, x_3, x_4).

7. Από τη σχέση (8) υπολογίζουμε, για κάθε x, την τιμή της απόστασης d μεταξύ των σχισμών. Συγκρίνουμε τις τιμές d με την τιμή που δίνει ο κατασκευαστής. Ποια πειραματική τιμή την προσεγγίζει περισσότερο;

8. Στο ίδιο διάγραμμα προσδιορίζουμε το πρώτο ελάχιστο περίθλασης (n = 1) και υπολογίζουμε την απόστασή του y_1 από τον κεντρικό κροσσό (Σχήμα 10).

9. Από τη σχέση (11) και για $\sin\theta = y_1/L$ υπολογίζουμε το εύρος a των σχισμών.

10. Βάσει των τιμών a και d που υπολογίσαμε πειραματικά, ποιες τάξεις κροσσών (συμβολής) δεν περιμένουμε να εμφανιστούν στο διάγραμμα I = f(x);

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Εργαστηριακές Ασκήσεις L_2 & L_3. Γ. Μήτσου
2. Εργαστηριακές Ασκήσεις Οπτικής, Οπτοηλεκτρονικής & Laser με Στοιχεία Θεωρίας. Α. Ανδριτσάκης. Γ. Μήτσου. Δ. Μελιτσιώτης, Τόμος Ι (Εκδόσεις Λύχνος, Αθήνα 2005)
3. Fundamentals of Optics by F. Jenkins and H. White
4. Optics by E. Hecht
5. Optics for Scientists and Engineers by Serway
6. Κ. Δ. Αλεξόπουλου. Οπτική

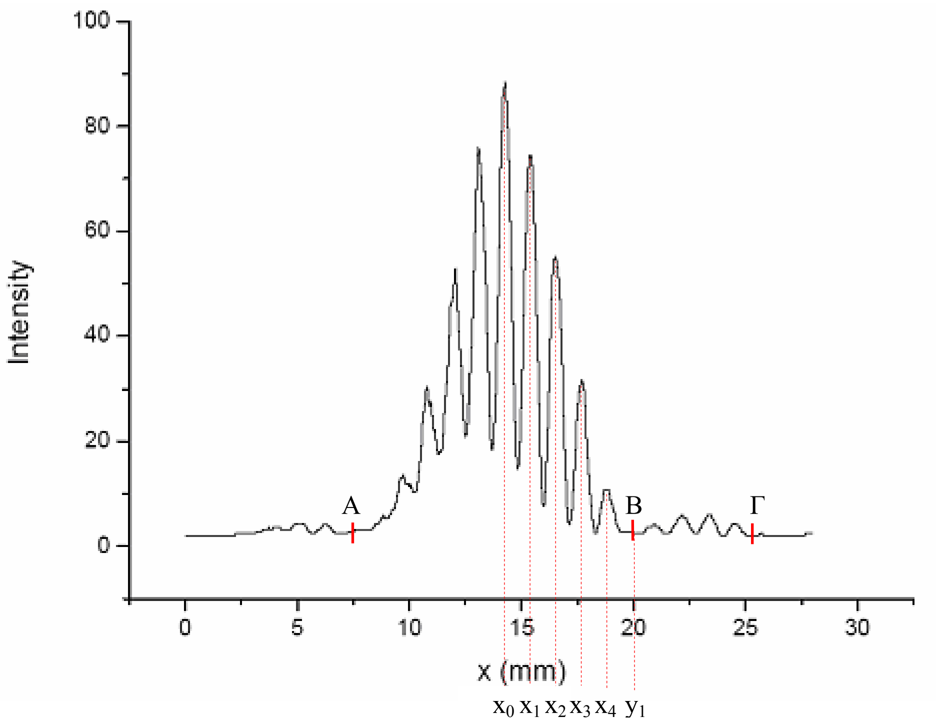
Πίνακας 2

L = ……… (cm) a = ….. (mm) d = ……. (mm)			
Μετακίνηση x (mm)	V (volts)	Μετακίνηση x (mm)	V (volts)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

1.1 Προσδιορισμός μεγίστων συμβολής που θα λείψουν από την απεικόνιση

Στο Σχήμα 10 παρουσιάζεται η κατανομή της έντασης όπως αυτή διαμορφώνεται σ' ένα μακρινό επίπεδο παρατήρησης, όταν μονοχρωματικό φως προσπέσει σε διάταξη διπλής σχισμής ίδιου εύρους a.



Σχήμα 10. *Η ένταση I ως συνάρτηση της απόστασης x στην περίπτωση διπλής σχισμής (το διάγραμμα προέρχεται από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Φυσικής ΙΙΙ του ΤΕΙ Αθήνας).*

Αν θεωρήσουμε την περίπτωση μιας μόνο σχισμής, τότε τα ελάχιστα (σκοτεινοί κροσσοί περίθλασης) θα εμφανιστούν σε γωνίες θ_n που προσδιορίζει η σχέση (11), ενώ το κεντρικό μέγιστο θα βρίσκεται στη διεύθυνση $\theta_n = 0$ (n = 0).

$a \sin\theta_n = n\lambda$ $(n = \pm1, \pm2, \pm3, \ldots)$ $\rightarrow$ **ελάχιστα περίθλασης** (11)

Στην περίπτωση διπλής σχισμής τα μέγιστα (φωτεινοί κροσσοί συμβολής) θα εμφανιστούν σε γωνίες που ικανοποιούν τη σχέση (12).

$d \sin\theta_m = m\lambda$ $(m = 0, \pm1, \pm2, \pm3, \ldots)$ $\rightarrow$ **μέγιστα συμβολής** (12)

όπου d είναι η απόσταση μεταξύ των δυο σχισμών

Όταν για την ίδια τιμή θ οι τιμές a και d ικανοποιούν ταυτόχρονα τις σχέσεις (11) και (12), η θέση των μεγίστων συμβολής και των ελαχίστων περίθλασης είναι η ίδια. Διαιρώντας (12)/(11) έχουμε:

$$\frac{d\sin\theta}{a\sin\theta}=\frac{m\lambda}{n\lambda}\Rightarrow\frac{d}{a}=\frac{m}{n} \qquad (13)$$

Αν για παράδειγμα d = 0.5 mm και a = 0.1 mm, τότε από την τελευταία σχέση θα έχουμε $\frac{0.5}{0.1}=\frac{m}{n}=5\Rightarrow m=5n$ και επομένως:

Για n = 1⇒ m = 5. Αυτό σημαίνει ότι ο κροσσός συμβολής 5ης τάξης (μέγιστο) θα συμπέσει με τον κροσσό περίθλασης 1ης τάξης (ελάχιστο) και θα εξαφανιστεί.

Κατά τον ίδιο τρόπο, αν n = 2, 3, 4, …. , θα εξαφανιστούν και οι κροσσοί συμβολής τάξης m = 10**,** 15, 20, ….

Σημείωση: Ο λόγος d/a θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος της μονάδας (d/a > 1). Η περίπτωση όπου d/a < 1, έχει ως φυσικό επακόλουθο το να παρουσιάζεται το εύρος των σχισμών μεγαλύτερο από τη μεταξύ τους απόσταση (αδύνατον).

1.2 Προσδιορισμός πλήθους μεγίστων συμβολής που εμφανίζονται ανάμεσα σε δυο ελάχιστα περίθλασης (ή πλήθος μεγίστων συμβολής που εμπεριέχονται σε μέγιστα περίθλασης)

α. πλήθος μεγίστων συμβολής που εμπεριέχονται στο κεντρικό μέγιστο περίθλασης

Ο λόγος 2λ/a μας δίνει την απόσταση μεταξύ των δυο ελαχίστων περίθλασης στα σημεία Α και Β ή το εύρος του κεντρικού κροσσού περίθλασης (Σχήμα 10). Όμως η απόσταση μεταξύ δυο μεγίστων συμβολής δίνεται από το λόγο λ/d.

Το πηλίκο (2λ/a)/(λ/d) θα μας δώσει το πλήθος των μεγίστων συμβολής που βρίσκονται μέσα στον κεντρικό κροσσό.

Για παράδειγμα, αν έχουμε d/a = 5, τότε (2λ/a)/(λ/d) =2d/a = 2x5 = 10. Δηλαδή, στον κεντρικό κροσσό θα βρεθούν 10 μέγιστα συμβολής.

β. πλήθος μεγίστων συμβολής που εμπεριέχονται στα πλευρικά (δευτερογενή) μέγιστα περίθλασης

Η απόσταση μεταξύ δυο δευτερογενών ελαχίστων περίθλασης (π.χ μεταξύ του 1^{ου} και του 2^{ου} – σημεία Β και Γ στο Σχήμα 10) ή το εύρος των δευτερογενών μεγίστων περίθλασης, δίνεται από το λόγο λ/a και επομένως το πλήθος των μεγίστων συμβολής που θα βρεθούν μέσα σ’ ένα τέτοιο κροσσό δίνεται από το πηλίκο d/a.