

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**



**ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ**

(2018-2019)

*ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ*

*ΑΣΚΗΣΗ 25-ΤΟΜΟΣ II*

*ΣΥΜΒΟΛΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ*

Ονοματεπώνυμο : Χρήστος Τσούφης

A.M. : 03117176

Ομάδα : Δ7

Αριθμός Καταλόγου: 361

Ομάδα με : Ασημίνα Φούντα, Θεόδωρο Χατζηγεωργίου

Διεξαγωγή άσκησης : 28/3/2019

Υπεύθυνος εργαστηρίου : Σοφία Θύμη

## Σκοπός

Στόχος της άσκησης είναι η κατανόηση των βασικών εννοιών της κυματικής οπτικής, μέσω της παρατήρησης φαινομένων που ερμηνεύονται με την κυματική θεωρία του φωτός. Ειδικότερα, εξετάζονται εικόνες συμβολής-περίθλασης μονοχρωματικής δέσμης λείζερ από απλές, διπλές και πολλαπλές σχισμές, καθώς και από οπτικά φράγματα στα οποία προσδιορίζονται επιπλέον παράμετροι και τέλος, μια εφαρμογή στην πολυχρωματική ακτινοβολία.

## Θεωρία

Δίνονται τα αποτελέσματα μόνο των θεωρητικών υπολογισμών και αξίζει να σημειωθεί ότι η οθόνη παρατήρησης των φαινομένων συμβολής και περίθλασης είναι σε πολύ μεγάλη απόσταση σε σχέση με τις διαστάσεις των πηγών και των αποστάσεων μεταξύ αυτών.

### Συμβολή του φωτός από δύο σύμφωνες σημειακές πηγές

Η διαίρεση του μετώπου κύματος σύμφωνης μονοχρωματικής δέσμης με δύο πανομοιότυπες σχισμές S1, S2 πολύ μικρού εύρους σε απόσταση  $d$  μεταξύ τους, προσπίπτει σε ασυνέχεια δύο σχισμών και δημιουργεί δύο δευτερογενείς πηγές σφαιρικών κυμάτων στις σχισμές, σύμφωνες μεταξύ τους και με ίδια συχνότητα. Παρατηρείται στην οθόνη η εικόνα εναλλασσόμενων φωτεινών και σκοτεινών κροσσών, λόγω της υπέρθεσης των δύο σφαιρικών κυμάτων.

Όταν τα δύο κύματα είναι σε φάση προκύπτει ενισχυτική συμβολή (φωτεινοί κροσσοί), ενώ όταν είναι σε αντίθετη φάση προκύπτει αναιρετική συμβολή - απόσβεση (σκοτεινοί κροσσοί). Για να είναι σύμφωνες οι δύο πηγές πρέπει η απόσταση  $d$  των δύο σχισμών της ασυνέχειας να είναι πολύ μικρή. Αν ισχύει ότι  $d \ll r$ , τότε ονομάζεται περίθλαση Fraunhofer και προκύπτουν οι εξής συνθήκες:

οι φωτεινοί κροσσοί βρίσκονται σε απόσταση:  $y \approx \frac{r}{d} * m * \lambda$  από το κέντρο συμμετρίας (1)

και οι σκοτεινοί κροσσοί σε απόσταση:  $y \approx \frac{r}{d} * (m + \frac{1}{2}) * \lambda$  από το κέντρο συμμετρίας (2)

όπου  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κροσσών (φωτεινών ή σκοτεινών) είναι:  $\Delta y \approx \frac{r}{d} * \lambda$  (3)

### Περίθλαση από μια σχισμή

Επίπεδο μέτωπο κύματος σύμφωνης μονοχρωματικής δέσμης προσπίπτει σε ασυνέχεια με μια λεπτή σχισμή εύρους  $D$  και τότε προκύπτει η περίπτωση της περίθλασης. Σύμφωνα με την αρχή του Huygens, τα σημεία κατά μήκος της σχισμής γίνονται δευτερογενείς πηγές σφαιρικών κυμάτων ίδιας συχνότητας τα οποία διαδίδονται από τη σχισμή. Τα κύματα αυτά φτάνουν στην οθόνη με επίπεδα κύματα αφού η απόσταση σχισμής-τοίχου είναι πολύ μεγαλύτερη από το εύρος  $D$  της σχισμής (περίθλαση Fraunhofer). Έτσι το πλάτος του ηλεκτρικού πεδίου σε ένα τυχόν σημείο της οθόνης παρατήρησης προκύπτει από την υπέρθεση όλων των στοιχειωδών κυμάτων που δημιουργούνται έτσι ώστε να παρατηρούνται φαινόμενα συμβολής, με αποτέλεσμα τη δημιουργία φωτεινών και σκοτεινών κροσσών περίθλασης. Λόγω συμμετρίας στο κέντρο της εικόνας, παρατηρείται ενισχυτική συμβολή και σχηματίζεται ο κεντρικός κροσσός περίθλασης. Ισχύει ότι:  $n * \lambda = D * \sin \theta$ ,  $n = \pm 1, \pm 2, \dots$

Οι σκοτεινοί κροσσοί έχουν απόσταση:  $x_n = \frac{r}{D} n \lambda$ , για  $r \gg x$  από το κέντρο συμμετρίας. (4)

Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σκοτεινών κροσσών είναι:  $\Delta x = \frac{r}{D} \lambda$  (5)

Το γραμμικό εύρος του κεντρικού φωτεινού κροσσού είναι:  $W\pi = x_{n2} - x_{n1} = \frac{2r\lambda}{D}$  (6)

Ο αριθμός των σκοτεινών κροσσών  $n_{σκ}$  που μπορούν να παρατηρηθούν εκατέρωθεν του κεντρικού φωτεινού κροσσού φράσσεται από τη σχέση:  $n_{σκ} \leq \frac{D}{\lambda}$  (7)

#### Συμβολή-περίθλαση από δύο ή περισσότερες σχισμές

Θεωρώντας δύο παράλληλες σχισμές πεπερασμένου εύρους  $D$ , σε μικρή απόσταση  $d$ , με  $r \gg d \gg D$  τότε ισχύει ότι το επίπεδο μέτωπο κύματος μονοχρωματικής δέσμης που προσπίπτει σε ασυνέχεια με δύο ή περισσότερες παράλληλες σχισμές προκαλεί στην οθόνη ένα συνδυασμό των φαινομένων συμβολής και περίθλασης.

Συγκεκριμένα, από κάθε σχισμή προκύπτουν κροσσοί περίθλασης και από την υπέρθεση των κυμάτων των σχισμών προκύπτουν κροσσοί συμβολής. Οι κροσσοί περίθλασης είναι πλατύτεροι με αποτέλεσμα κάθε ένας από αυτούς να περιέχει πολύ πιο λεπτούς κροσσούς συμβολής, ο αριθμός των οποίων εξαρτάται από το λόγο  $d/D$ . Για περισσότερες από δύο σχισμές, παρατηρούνται επίσης δευτερεύοντες φωτεινοί κροσσοί ο οποίοι δημιουργούνται από τη συμβολή κυμάτων μη διαδοχικών σχισμών.

Οι κύριοι φωτεινοί κροσσοί βρίσκονται, όπως και πριν, στις θέσεις:  $y \approx \frac{r}{d} m \lambda$ ,  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  (8)

Το εύρος των κύριων φωτεινών κροσσών συμβολής είναι:  $W\sigma = \frac{2r\lambda}{Nd}$  (9)

#### Οπτικά φράγματα

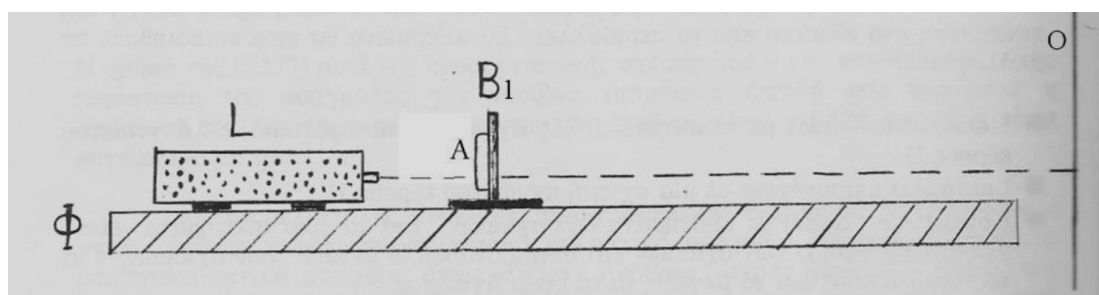
Ένα οπτικό φράγμα αποτελείται από πολλές πυκνές και παράλληλες σχισμές και το εύρος τους  $D$ , είναι πολύ μικρό σε σχέση με το  $\lambda$ . Όταν η μονοχρωματική δέσμη λείζερ προσπίπτει σε αυτό, παρατηρούνται λεπτοί και έντονοι κύριοι κροσσοί συμβολής αλλά και δευτερεύοντες κροσσοί που έχουν πολύ μικρότερη ένταση και τέλος, η περίθλαση από κάθε σχισμή εκφυλίζεται σε σχεδόν σταθερή φωτεινή ένταση. Μια τέτοια συστοιχία ονομάζεται οπτικό ή περιθλαστικό φράγμα.

Η πυκνότητα των σχισμών είναι:  $N_0 = \frac{1}{d}$  (10)

Επίσης, ισχύουν οι σχέσεις:  $m \lambda N_0 = \sin \theta$  (11)

Και  $\sin \theta = y / (r^2 + y^2)$  (12)

#### Πειραματική διάταξη – Εξαρτήματα



Τα εξαρτήματα που την αποτελούν είναι:

- Λέιζερ, μονοχρωματική δέσμη μήκους κύματος  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ , χρώματος κόκκινου. (L)
- Ευθύγραμμος μεταλλικός φορέας μήκους περίπου 1 m. (Φ)
- Μαγνητική βάση, στηρίζει οπτικά στοιχεία και εξαρτήματα και συγκρατείται στον μεταλλικό φορέα. (B1)
- Πηγή λευκού φωτός.
- Οπτικά στοιχεία-εξαρτήματα (ασυνέχειες με σχισμές και οπτικά φράγματα). (A)
- χαρτί μιλιμετρέ τοποθετημένο στον τοίχο που λειτουργεί σαν βαθμονομημένη οθόνη. (O)

### Εκτέλεση

#### Προετοιμασία της πειραματικής διάταξης

Αφού συναρμολογηθεί η πιο πάνω διάταξη, τοποθετείται στον μεταλλικό φορέα το λέιζερ και, σε μικρή απόσταση από αυτό, μια μεταλλική βάση. Πάνω στον τοίχο, τοποθετείται το χαρτί μιλιμετρέ σε απόσταση μεγαλύτερη του 1 m από την βάση. Πάνω στην βάση, προσαρμόζεται η ασυνέχεια με τις απλές σχισμές, ανάβει το λέιζερ και παρατηρείται στην οθόνη η εικόνα περίθλασης. Με μικρές εγκάρσιες μετατοπίσεις της ασυνέχειας γίνεται προσπάθεια μεγιστοποίησης της έντασης του φαινομένου και να δίνεται προσοχή ώστε η δέσμη να προσπίπτει κάθετα στην οθόνη.

#### Περίθλαση από μία σχισμή

1. Με μετρική ταινία μετράται η απόσταση  $r$  μεταξύ ασυνέχειας και οθόνης.

Προκύπτει ότι:  $r = 1310 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$

Παρατήρηση: Η μετρητική ταινία είναι αναλογικό όργανο, άρα το σφάλμα της μέτρησης θα ισούται με το μισό της ελάχιστης υποδιαίρεσης. Η ταινία υποδιαιρείται σε mm, άρα θα ισχύει ότι το σφάλμα είναι 0.5mm. Επειδή, όμως, η μέτρηση έγινε και στα δύο άκρα της ταινίας θα είναι διπλάσιο σφάλμα, δηλαδή  $\delta r = 1 \text{ mm}$ .

2. Γίνεται μέτρηση στην οθόνη της απόστασης μεταξύ του  $n^{\text{ov}}$  σκοτεινού κροσσού και του κέντρου της εικόνας,  $x_n$ , και το εύρος του κεντρικού φωτεινού κροσσού,  $W\pi$ .

Για τις μετρήσεις επιλέχθηκε  $n = 1$  ώστε το  $x_n$  να είναι μετρήσιμο.

Οι μετρήσεις έγιναν με χάρακα, ο οποίος είναι αναλογικό όργανο και υποδιαιρείται σε mm. Άρα, όπως και στην μετρητική ταινία που προαναφέρθηκε, το συνολικό σφάλμα του χάρακα είναι 1 mm. Τα σφάλματα κατά τις μετρήσεις είναι  $\delta x_1 = 1 \text{ mm}$  και  $\delta W\pi = 1 \text{ mm}$ .

Για τον υπολογισμό των  $x_n$  και  $W\pi$  θα χρησιμοποιηθούν οι τύποι (4) και (6), αντίστοιχα.

Θεωρείται ότι το μήκος κύματος  $\lambda$  του λέιζερ έχει αμελητέο σφάλμα και η απόσταση  $r$ , που μετρήθηκε στο προηγούμενο ερώτημα έχει σφάλμα  $\delta r = 1 \text{ mm}$ .

Τα σφάλματα κατά τον υπολογισμό βρίσκονται από τους εξής τύπους:

$$\delta x_n = \left( \frac{\partial x_n}{\partial r} \right) \delta r = \frac{n\lambda}{D} \delta r = \frac{n\lambda}{D}$$
$$\delta W\pi = \left( \frac{\partial W\pi}{\partial r} \right) \delta r = \frac{2\lambda}{D} \delta r = \frac{2\lambda}{D}$$

Ο πίνακας που προκύπτει είναι ο εξής:

A/A	D(mm)	$x_n$ (mm) μέτρηση	$x_n$ (mm) υπολογισμός	Wπ(mm) μέτρηση	Wπ(mm) υπολογισμός
1	0,02	$45 \pm 1$	$41 \pm 0,03$	$80 \pm 1$	$83 \pm 0,06$
2	0,04	$19 \pm 1$	$21 \pm 0,02$	$35 \pm 1$	$41 \pm 0,03$
3	0,08	$10 \pm 1$	$10 \pm 0,01$	$18 \pm 1$	$21 \pm 0,02$
4	0,16	$4 \pm 1$	$5 \pm 0,01$	$10 \pm 1$	$10 \pm 0,01$

Παρατήρηση: εν γένει, οι τιμές που μετρήθηκαν και οι τιμές που υπολογίστηκαν είναι αρκετά κοντά, αλλά έχουν κάποιες αποκλίσεις γεγονός που οφείλεται σε συστηματικά και τυχαία σφάλματα, όπως σφάλμα στην ανάγνωση, δυσκολία ανάγνωσης λόγω φωτισμού και σφάλμα χάρακα ή μετροταινίας.

3. Με εύρος σχισμής  $D = 0.08 \text{ mm}$ , μετρήθηκαν 38 σκοτεινούς κροσσούς από την μία πλευρά (την πάνω) του κεντρικού φωτεινού κροσσού. Άρα εκατέρωθεν υπάρχουν:  $n_{\sigma\kappa} = 38 \cdot 2 = 76$

Σύμφωνα με την θεωρία ισχύει:  $n_{\sigma\kappa} \leq \frac{D}{\lambda} = \frac{0,08 \text{ mm}}{632,8 \cdot 10^{-6} \text{ mm}} \Rightarrow n_{\sigma\kappa} \leq 126$

Άρα ο αριθμός που μετρήθηκε είναι εντός του ορίου. Όπως ήταν αναμενόμενο ήταν ανέφικτο να μετρηθούν τόσοι πολλοί κροσσοί γιατί από ένα σημείο και μετά η ένταση άρχισε να φθίνει.

4. Γίνεται προσαρμογή στην βάση ασυνέχειας με σχισμή αγνώστου εύρους. Με τον χάρακα μετράται στην οθόνη η απόσταση  $x_n$  κάποιου σκοτεινού κροσσού (επιλογή  $n=3$ ) και προκύπτει ότι:

$$x_3 = 60 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$$

Τα σφάλματα κατά τις μετρήσεις είναι ίδια με πριν:  $\delta r = 1 \text{ mm}$ ,  $\delta_{x3} = 1 \text{ mm}$

Χρησιμοποιώντας τον τύπο (4) υπολογίζεται το άγνωστο εύρος  $D$  ως εξής:

$$D = \frac{rn\lambda}{x_3} = \frac{1310 \cdot 3 \cdot 632,8 \cdot 10^{-6}}{60} \Rightarrow D = 0,040$$

Το σφάλμα κατά τον υπολογισμό υπολογίζεται ως εξής:

$$\delta D = \frac{rn\lambda}{x_n} \sqrt{\left(\frac{\delta r}{r}\right)^2 + \left(\frac{\delta x_n}{x_n}\right)^2} \Rightarrow \delta D = 0,001$$

Άρα,  $D = 0,04 \pm 0,0007$

#### Συμβολή – περίθλαση από δύο ή περισσότερες σχισμές

1. Γίνεται προσαρμογή στην βάση η ασυνέχεια με τα συστήματα των δύο σχισμών. Μετράται στην οθόνη η απόσταση μεταξύ του  $m^{\text{ου}}$  φωτεινού κροσσού συμβολής και του κέντρου της εικόνας,  $y_m$ , και το γραμμικό εύρος του κεντρικού φωτεινού κροσσού περίθλασης,  $W\pi$ .

Για τις μετρήσεις επιλέχθηκε  $m = 1$  ώστε το  $y_m$  να είναι μετρήσιμο.

Όπως και πριν, τα σφάλματα κατά τις μετρήσεις είναι  $\delta_{y1} = 1 \text{ mm}$  και  $\delta W\pi = 1 \text{ mm}$ , το μήκος κύματος  $\lambda$  του λέιζερ θεωρείται αμελητέο σφάλμα και η απόσταση  $r$  έχει σφάλμα  $\delta r = 1 \text{ mm}$ .

Για τον υπολογισμό των  $y_m$  και  $W\pi$  θα χρησιμοποιηθούν οι τύποι (1) και (6), αντίστοιχα.

Τα σφάλματα κατά τον υπολογισμό βρίσκονται από τους εξής τύπους:

$$\delta y_m = \left(\frac{\partial y_m}{\partial r}\right) \delta r = \frac{m\lambda}{d} \delta r = \frac{n\lambda}{d}$$

$$\delta W\pi = \left(\frac{\partial W\pi}{\partial r}\right) \delta r = \frac{2\lambda}{D} \delta r = \frac{2\lambda}{D}$$

Ο πίνακας που προκύπτει είναι ο εξής:

A/A	d(mm)	y <sub>m</sub> (mm) μέτρηση	y <sub>m</sub> (mm) υπολογισμός	D(mm)	Wπ(mm) μέτρηση	Wπ(mm) υπολογισμός
1	0,250	3 ± 1	3,3 ± 0,003	0,04	40 ± 1	41 ± 0,03
2	0,500	1,5 ± 1	1,7 ± 0,001	0,04	40 ± 1	41 ± 0,016
3	0,250	4 ± 1	3,3 ± 0,003	0,08	22 ± 1	20,7 ± 0,03
4	0,500	2 ± 1	1,7 ± 0,001	0,08	20 ± 1	20,7 ± 0,016

Παρατήρηση: οι τιμές που μετρήθηκαν και οι τιμές που υπολογίστηκαν είναι αρκετά κοντά, αλλά έχουν μικρές αποκλίσεις μέσα στα όρια των σφαλμάτων γεγονός που οφείλεται σε συστηματικά και τυχαία σφάλματα, όπως σφάλμα στην ανάγνωση, δυσκολία ανάγνωσης λόγω φωτισμού και σφάλμα χάρακα ή μετροταινίας.

2. Γίνεται προσαρμογή στην βάση ασυνέχειας συστήματος με άγνωστα d και D. Με τον χάρακα μετράται στην οθόνη η απόσταση y<sub>m</sub> κάποιου φωτεινού κροσσού συμβολής (επιλογή m = 3) και το γραμμικό εύρος του κεντρικού φωτεινού κροσσού περίθλασης, Wπ και προκύπτει:

$$y_3 = 10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}, W\pi = 20 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$$

Τα σφάλματα κατά τις μετρήσεις είναι ίδια με πριν:  $\delta r = 1 \text{ mm}$ ,  $\delta y_3 = 1 \text{ mm}$ ,  $\delta W\pi = 1 \text{ mm}$

Χρησιμοποιώντας τους τύπους (1) και (6) υπολογίζονται τα άγνωστα d και D ως εξής:

$$d = \frac{rm\lambda}{y^3} = \frac{1310 * 3 * 632,8 * 10^{-6}}{10} \Rightarrow d = 0,25$$

$$D = \frac{2r\lambda}{W\pi} = \frac{1310 * 2 * 632,8 * 10^{-6}}{20} \Rightarrow D = 0,083$$

Τα σφάλματα κατά τον υπολογισμό προκύπτουν από τους εξής τύπους:

$$\delta d = \frac{rm\lambda}{y^3} \sqrt{\left(\frac{\delta r}{r}\right)^2 + \left(\frac{\delta y_3}{y_3}\right)^2} \Rightarrow \delta d = 0,025$$

$$\delta D = \frac{2r\lambda}{W\pi} \sqrt{\left(\frac{\delta r}{r}\right)^2 + \left(\frac{\delta W\pi}{W\pi}\right)^2} \Rightarrow \delta D = 0,004$$

Άρα,  $d = 0,25 \pm 0,025$  και  $D = 0,083 \pm 0,004$  οπότε αντιστοιχούν σε  $d = 0,28 \text{ mm}$  και  $D = 0,09 \text{ mm}$ .

$$\text{Επομένως, } \rho = \frac{d}{D} = 3,1 \text{ με } \delta \rho = \frac{d}{D} \sqrt{\left(\frac{\delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\delta D}{D}\right)^2} = 3,1 \sqrt{\left(\frac{0,025}{0,25}\right)^2 + \left(\frac{0,004}{0,083}\right)^2} \approx 0,4$$

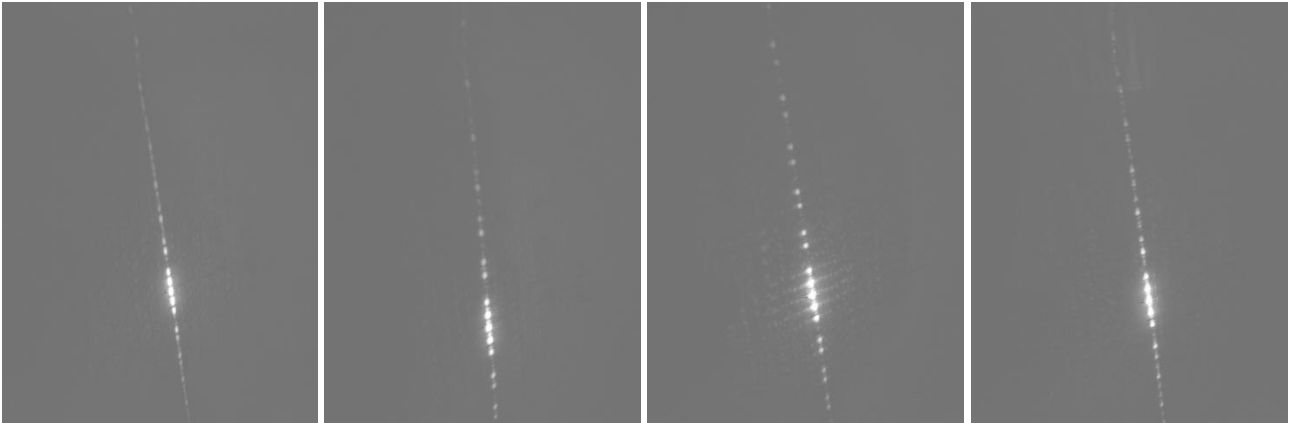
δηλ.  $\rho = 3,1 \pm 0,4$

3. Μετά την προσαρμογή στην βάση της ασυνέχειας με συστήματα πολλαπλών σχισμών με το ίδιο D, και κάνοντας χρήση ασυνέχειας με 2, 3, 4 και 5 σχισμές, παρατηρεί κανείς στην οθόνη τις εικόνες συμβολής – περίθλασης, ξεκινώντας από το σύστημα 2 σχισμών και καταλήγοντας στο σύστημα 5 σχισμών. Εξάγονται τα παρακάτω πορίσματα:

- Παρατηρούνται λεπτότεροι κροσσοί συμβολής στο εσωτερικό των φωτεινών κροσσών περίθλασης, τόσο κύριοι, όσο και δευτερεύοντες.
- Αφού δεν αλλάζει το D, δεν αλλάζει η θέση και το εύρος των κροσσών περίθλασης.
- Το πλήθος και η θέση των κύριων φωτεινών κροσσών συμβολής παραμένουν σταθερά.

- Όσο αυξάνεται το πλήθος των σχισμών μειώνεται το πλάτος των κύριων φωτεινών κροσσών συμβολής και ταυτόχρονα αυξάνεται η ευκρίνεια και η φωτεινότητά τους.
- Για το σύστημα 2 σχισμών οι δευτερεύοντες φωτεινοί κροσσοί συμβολής απουσιάζουν εντελώς. Αντιθέτως, υπάρχουν στα συστήματα 3, 4 και 5 σχισμών λόγω της συμβολής κυμάτων από ζευγάρια σχισμών απόστασης  $2d$ ,  $3d$ ,  $4d$  και  $5d$  και παρατηρούνται τα εξής:
  - έχουν μικρότερη φωτεινότητα σε σύγκριση με τους κύριους κροσσούς
  - αυξάνονται ανάλογα με το πλήθος των σχισμών
  - όσο αυξάνεται το πλήθος των σχισμών, τόσο εξασθενεί η φωτεινότητά τους

#### Φωτογραφίες:



#### Οπτικό φράγμα

1. Το οπτικό φράγμα προσαρμόζεται στη βάση και με τον χάρακα μετράται στην οθόνη η απόσταση  $y_m$  του φωτεινού κροσσού που επιλέχθηκε από το κέντρο της οθόνης (επιλογή  $m = 1$ ). Προκύπτει ότι:

$$y_1 = 472 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$$

Χρησιμοποιώντας τους τύπους (11) και (12) υπολογίζεται η πυκνότητα των σχισμών του

$$\text{φράγματος, } N_0: N_0 = \frac{\frac{y_1}{\sqrt{r^2 + y_1^2}}}{m\lambda} \Rightarrow N_0 = 535,7 \frac{\text{σχισμές}}{\text{mm}}$$

Τα σφάλματα υπολογίζονται ως εξής (με  $\delta r = 1 \text{ mm}$ ,  $\delta y_1 = 1 \text{ mm}$ ):

$$\delta N_0 = \sqrt{\left(\frac{r^2}{\lambda \sqrt{r^2 + y_1^2}} \delta y_1\right)^2 + \left(-\frac{ry_1}{\lambda \sqrt{r^2 + y_1^2}} \delta r\right)^2} \Rightarrow \delta N_0 = 1,07 \frac{\text{σχισμές}}{\text{mm}}$$

$$\text{Άρα, } N_0 = 535,7 \pm 1,07 \frac{\text{σχισμές}}{\text{mm}}$$

#### Φωτογραφίες:

