

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 36

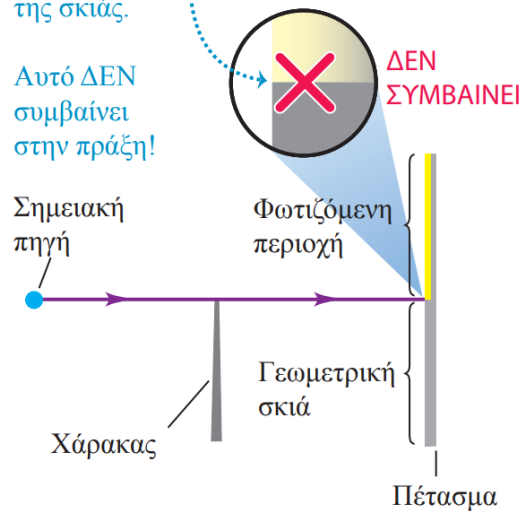
ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ

ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ FRESNEL και FRAUNHOFER

36.1 Σημειακή πηγή φωτός φωτίζει έναν χάρακα.

Η Γεωμετρική Οπτική προβλέπει ότι στην περίπτωση αυτή θα σχηματιστεί ένα σαφές όριο μεταξύ της φωτιζόμενης περιοχής και της σκιάς.

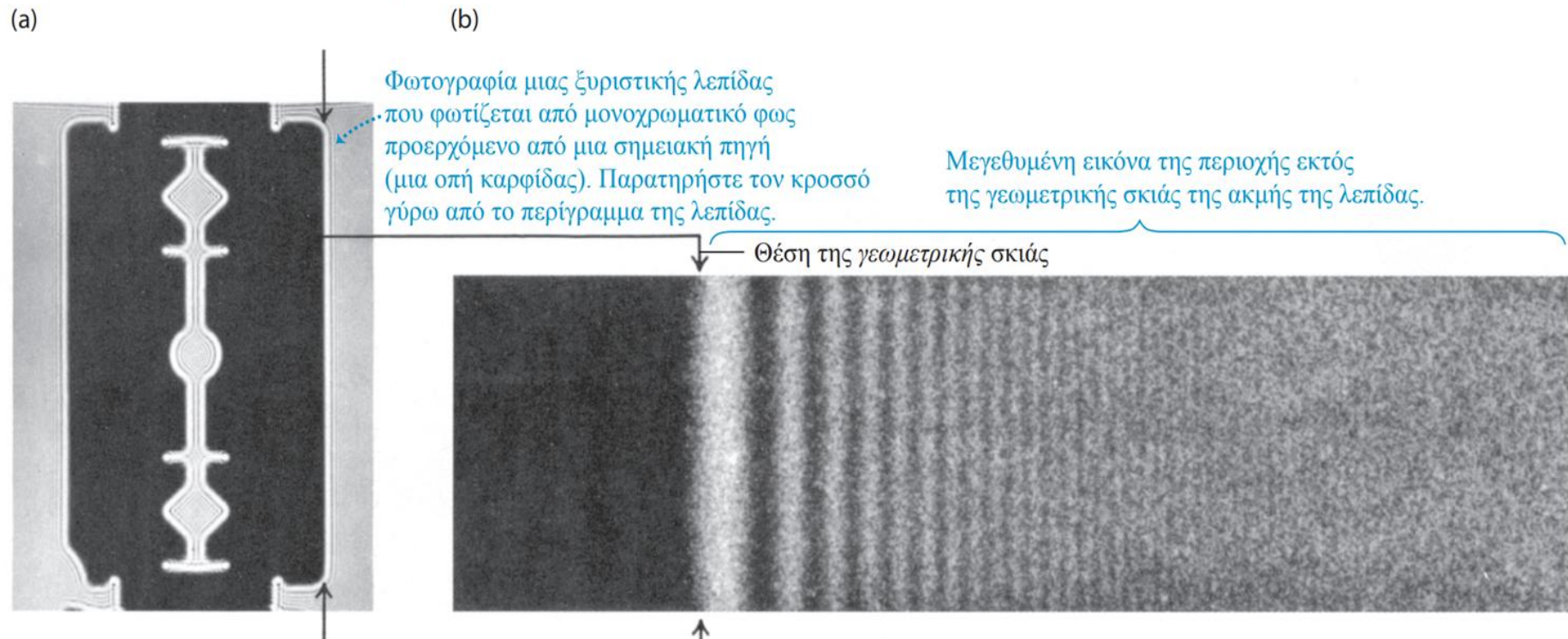
Αυτό ΔΕΝ συμβαίνει στην πράξη!



- Η θέση της γεωμετρικής σκιάς της ακμής της λεπίδας υποδεικνύεται με βέλη. Η περιοχή εκτός της γεωμετρικής σκιάς πλαισιώνεται από εναλλασσόμενες φωτεινές και σκοτεινές ταινίες.

Σύμφωνα με τη Γεωμετρική Οπτική, όταν ένα αδιαφανές αντικείμενο τοποθετηθεί μεταξύ μιας σημειακής φωτεινής πηγής και ενός πετάσματος, όπως στο Σχ. 36.1, η σκιά του αντικειμένου σχηματίζει μια τέλεια οξεία γραμμή. Δεν προσπίπτει καθόλου φως στο πέτασμα σε σημεία μέσα στη σκιά, ενώ η εκτός σκιάς περιοχή φωτίζεται σχεδόν ομοιόμορφα. Όπως όμως διαπιστώσαμε στο Κεφ. 35, η κυματική φύση του φωτός προκαλεί φαινόμενα που δεν μπορούν να εξηγηθούν μέσω της Γεωμετρικής Οπτικής. Μια σημαντική κατηγορία τέτοιων φαινομένων λαμβάνει χώρα όταν το φως προσπίπτει σε ένα εμπόδιο που περιλαμβάνει κάποιο μικρό άνοιγμα ή ακμή. Οι εικόνες συμβολής που σχηματίζονται στην περίπτωση αυτή αναφέρονται υπό τον όρο **περίθλαση**.

36.2 Ένα παράδειγμα περίθλασης.



Περίθλαση και Αρχή του Huygens

Για να αναλύσουμε τις εικόνες περίθλασης, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την **αρχή του Huygens**. Η αρχή αυτή αναφέρει ότι κάθε σημείο ενός μετώπου κύματος μπορεί να θεωρηθεί ως πηγή δευτερογενών κυματίων. Αυτά εξαπλώνονται προς όλες τις διευθύνσεις με ταχύτητα ίση με την ταχύτητα διάδοσης του κύματος. Η θέση του μετώπου κύματος για κάθε μεταγενέστερη χρονική στιγμή είναι η περιβάλλουσα των δευτερογενών κυματίων εκείνη τη χρονική στιγμή. Για την εύρεση της συνολικής μετατόπισης σε οποιοδήποτε σημείο χρησιμοποιούμε την αρχή της επαλληλίας για να συνθέσουμε όλες τις μεμονωμένες μετατοπίσεις που παράγονται από αυτά τα δευτερογενή κυμάτια.

Στο Σχ. 36.1 τόσο η σημειακή πηγή όσο και το πέτασμα βρίσκονται σχετικά κοντά στο εμπόδιο που σχηματίζει την εικόνα περίθλασης. Η περίπτωση αυτή αναφέρεται ως περίθλαση κοντινού πεδίου ή **περίθλαση Fresnel** (από το όνομα του Γάλλου επιστήμονα Augustin Jean Fresnel - Αγκουστέν Ζαν Φρενέλ, 1788-1827). Αντίθετα, χρησιμοποιούμε τον όρο **περίθλαση Fraunhofer** (από το όνομα του Γερμανού Φυσικού Joseph von Fraunhofer - Γιόζεφ φον Φραουνχόφερ, 1787-1826) για περιπτώσεις στις οποίες η πηγή, το εμπόδιο και το πέτασμα είναι αρκετά απομακρυσμένα μεταξύ τους, έτσι ώστε να μπορούμε να θεωρήσουμε ότι όλες οι ευθείες γραμμές από την πηγή προς το εμπόδιο είναι παράλληλες, καθώς επίσης και ότι όλες οι ευθείες γραμμές από το εμπόδιο προς κάθε συγκεκριμένο σημείο του πετάσματος είναι παράλληλες.

Η περίθλαση περιγράφεται μερικές φορές ως «η κάμψη του φωτός γύρω από ένα εμπόδιο».
Εντούτοις, η διαδικασία που προκαλεί τα φαινόμενα περίθλασης ενυπάρχει στη διάδοση κάθε κύματος

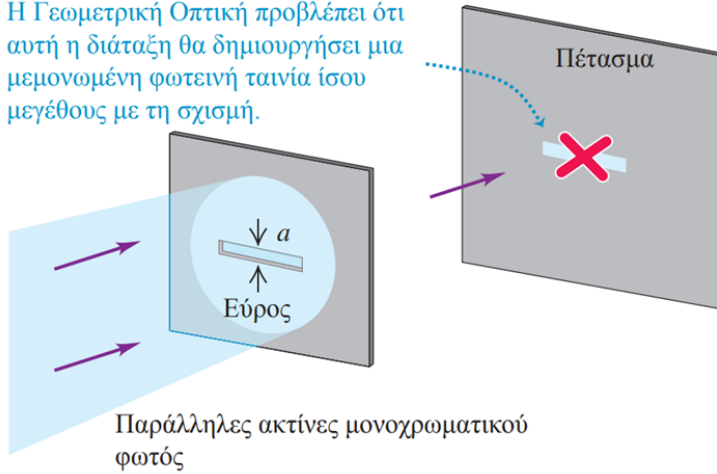
Τέλος, τονίζουμε ότι δεν υπάρχει καμία θεμελιώδης διαφορά ανάμεσα στη συμβολή και την περίθλαση. Στο Κεφ. 35 χρησιμοποιήσαμε τον όρο συμβολή για φαινόμενα που περιλαμβάνουν κύματα από μικρό αριθμό πηγών, συνήθως δύο. Η περίθλαση περιλαμβάνει συνήθως μια συνεχή κατανομή κυματίων του Huygens από όλη την επιφάνεια ενός μικρού ανοίγματος ή από έναν πολύ μεγάλο αριθμό πηγών ή ανοιγμάτων. Παρ' όλα αυτά όμως, τόσο η συμβολή όσο και η περίθλαση είναι συνέπειες της επαλληλίας και της αρχής του Huygens.

ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ ΑΠΟ ΜΙΑ ΑΠΛΗ ΣΧΙΣΜΗ

36.3 (a) Η «σκιά» μιας οριζόντιας σχισμής, όπως λανθασμένα προβλέπεται από τη Γεωμετρική Οπτική. (b) Μια οριζόντια σχισμή παράγει στην πραγματικότητα μία εικόνα περίθλασης. Για σαφήνεια, το εύρος της σχισμής έχει παρασταθεί πολύ μεγαλύτερο.

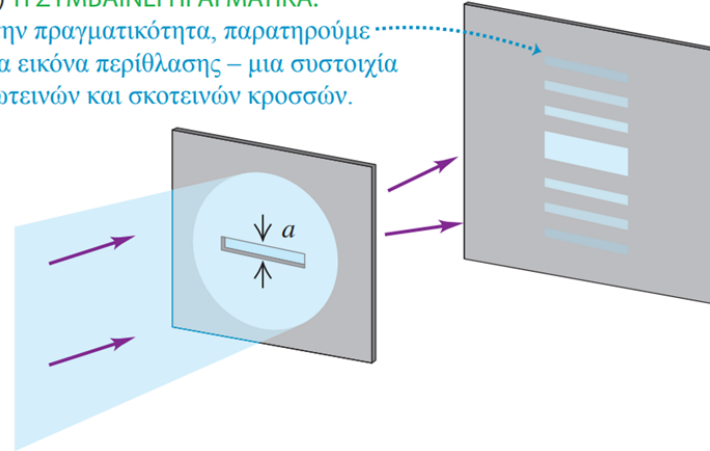
(a) **ΠΡΟΒΛΕΠΟΜΕΝΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ:**

Η Γεωμετρική Οπτική προβλέπει ότι αυτή η διάταξη θα δημιουργήσει μια μεμονωμένη φωτεινή ταινία ίσου μεγέθους με τη σχισμή.



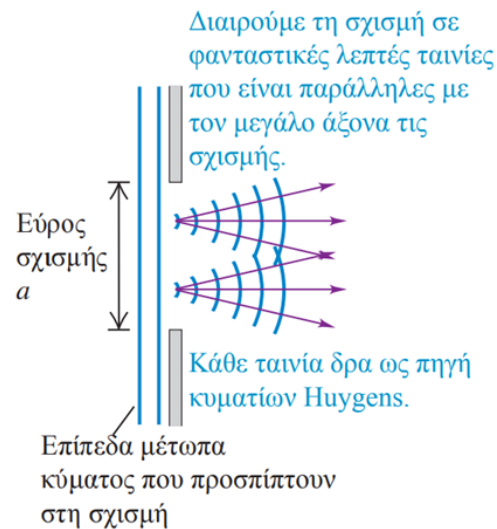
(b) **ΤΙ ΣΥΜΒΑΙΝΕΙ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ:**

Στην πραγματικότητα, παρατηρούμε μια εικόνα περίθλασης – μια συστοιχία φωτεινών και σκοτεινών κροσσών.

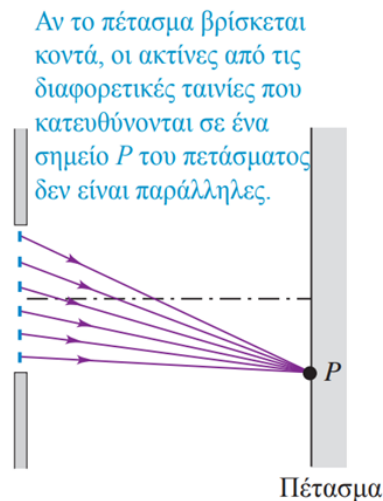


36.4 Περίθλαση από μια απλή ορθογώνια σχισμή. Οι μεγάλες πλευρές της σχισμής είναι κάθετες στο σχήμα.

(a) Μία σχισμή ως πηγή κυματίων

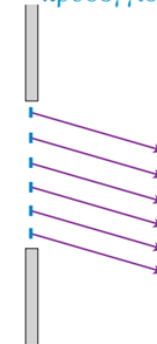


(b) Περίθλαση Fresnel (κοντινού πεδίου)



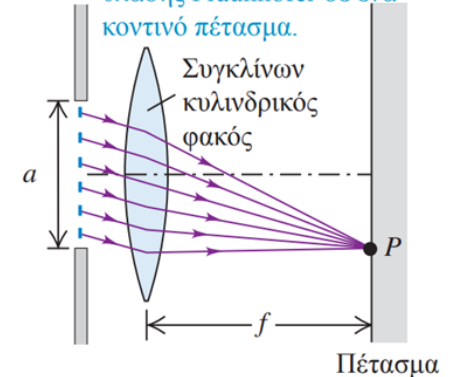
(c) Περίθλαση Fraunhofer (μακρινού πεδίου)

Αν το πέτασμα βρίσκεται μακριά, οι ακτίνες στο σημείο P είναι κατά προσέγγιση παράλληλες.



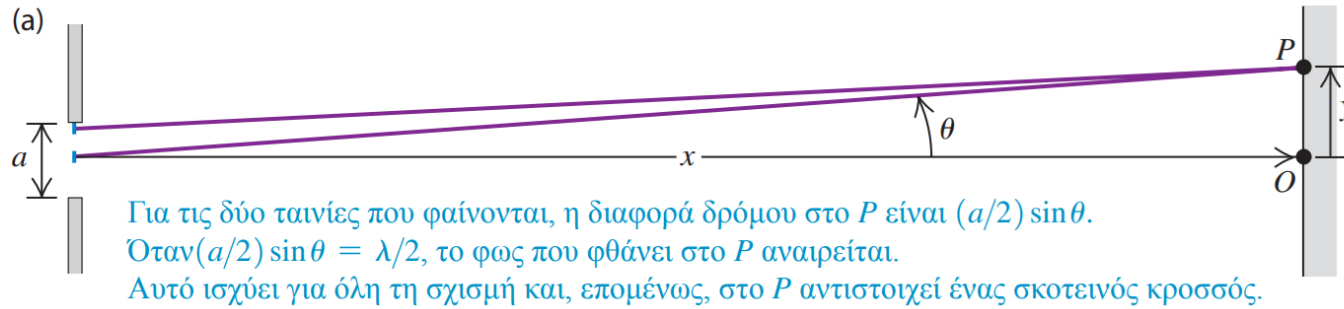
(d) Απεικόνιση περίθλασης Fraunhofer

Ένας συγκλίνων φακός απεικονίζει την εικόνα περίθλασης Fraunhofer σε ένα κοντινό πέτασμα.

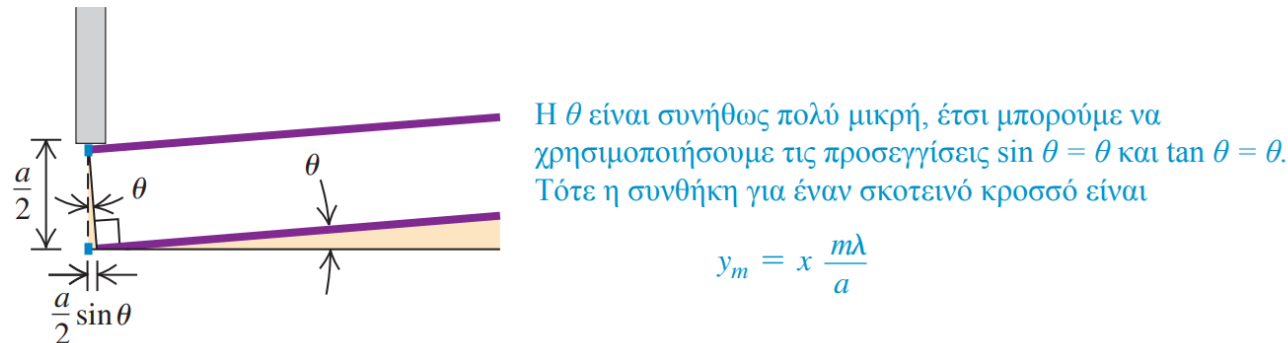


ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ ΑΠΟ ΜΙΑ ΑΠΛΗ ΣΧΙΣΜΗ

36.5 Πλάγια όψη μιας οριζόντιας σχισμής. Όταν η απόσταση x της σχισμής από το πέτασμα είναι πολύ μεγαλύτερη από το εύρος της σχισμής a , οι ακτίνες που εκκινούν από σημεία της σχισμής που απέχουν μεταξύ τους απόσταση $a/2$ μπορούν να θεωρηθούν παράλληλες.



(b) Μεγέθυνση του πάνω μισού της σχισμής.



Η συνθήκη για ένα σκοτεινό κροσσό είναι

Γωνία που σχηματίζει η γραμμή από το κέντρο της σχισμής
έως τον m -οστό σκοτεινό κροσσό στο πέτασμα

Σκοτεινοί κροσσοί, περίθλαση από απλή σχισμή:

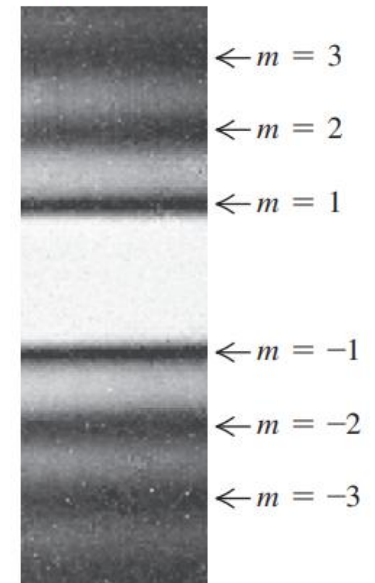
$$\sin \theta = \frac{m\lambda}{a} \quad (m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (36.2)$$

Εύρος σχισμής Μήκος κύματος

Αν η κάθετη απόσταση της m -οστής σκοτεινής ταινίας από το κέντρο της εικόνας είναι y_m τότε
 $\tan \vartheta = y_m/x$.

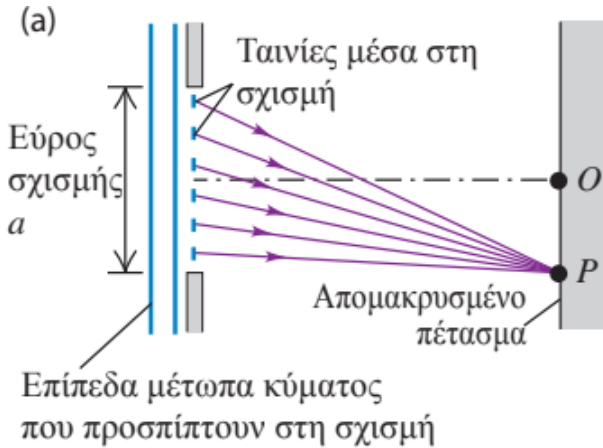
$$y_m = x \frac{m\lambda}{a} \quad (\text{για } y_m \ll x)$$

36.6 Φωτογραφία της εικόνας περίθλασης Fraunhofer μιας απλής οριζόντιας σχισμής.

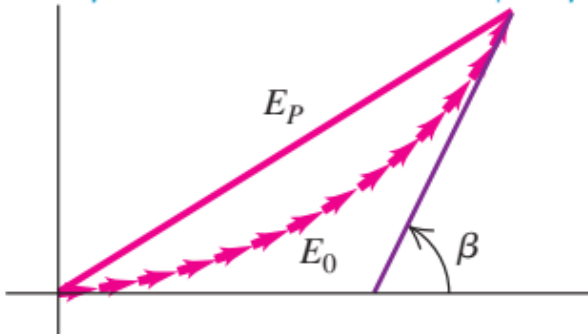


ΕΝΤΑΣΗ ΣΤΗΝ ΕΙΚΟΝΑ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗΣ ΤΗΣ ΑΠΛΗΣ ΣΧΙΣΜΗΣ

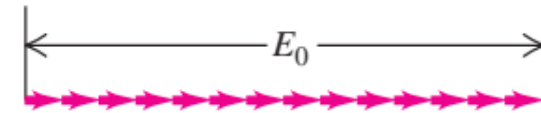
36.8 Χρήση των διαγραμμάτων των διανυσμάτων φάσης (φασόρων) για τον υπολογισμό του πλάτους του ηλεκτρικού πεδίου E στην περίθλαση από απλή σχισμή. Κάθε φάσορας παριστάνει το πεδίο E από μία ταινία μέσα στη σχισμή.



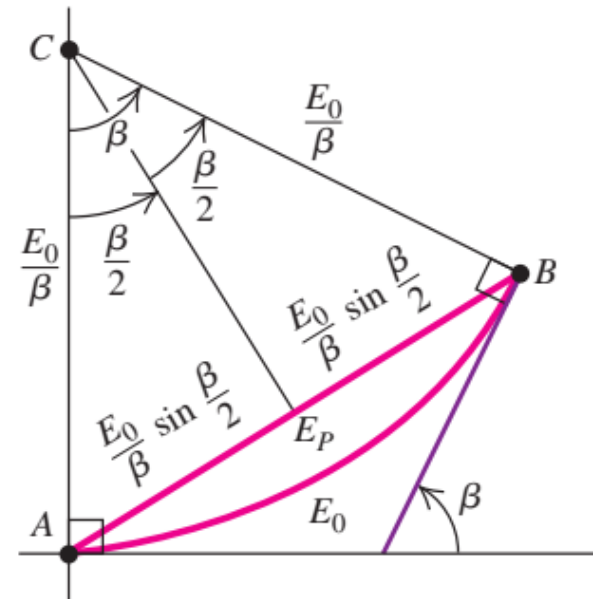
(c) Διάγραμμα διανυσμάτων φάσης σε ένα σημείο της εικόνας περίθλασης που βρίσκεται πολύ κοντά στο κέντρο· β = ολική διαφορά φάσης μεταξύ του πρώτου και του τελευταίου φάσορα.



(b) Στο κέντρο της εικόνας περίθλασης (σημείο O) οι φάσορες από όλες τις ταινίες μέσα στη σχισμή είναι σε φάση.



(d) Όπως στο (c), αλλά στο όριο όπου η σχισμή υποδιαιρείται σε άπειρο πλήθος ταινιών.



Φανταζόμαστε ένα επίπεδο μέτωπο κύματος στη σχισμή, υποδιαιρεμένο σε έναν μεγάλο αριθμό ταινιών. Υπερθέτουμε τις συνεισφορές των κυματίων Huygens από όλες τις ταινίες σε ένα σημείο P ενός μακρινού πετάσματος και υπό γωνία θ , μετρούμενη από την κάθετο στο επίπεδο της σχισμής (Σχ. 36.8a).

Για να πραγματοποιήσουμε την υπέρθεση αυτή, αναπαριστούμε το ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενο πεδίο E κάθε ταινίας με έναν φάσορα. Το μέτρο του διανυσματικού αθροίσματος των φασόρων σε κάθε σημείο P είναι το πλάτος E_P του συνολικού πεδίου E στο σημείο αυτό. Η ένταση στο P είναι ανάλογη του E_P^2 .

ΕΝΤΑΣΗ ΣΤΗΝ ΕΙΚΟΝΑ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗΣ ΤΗΣ ΑΠΛΗΣ ΣΧΙΣΜΗΣ

Μπορούμε να φανταστούμε τη διαίρεση της σχισμής σε όλο και λεπτότερες ταινίες. Στο όριο που ο αριθμός των ταινιών τείνει στο άπειρο και αυτές γίνονται απείρως λεπτές, το καμπύλο ίχνος των φασόρων καθίσταται ένα τόξο περιφέρειας κύκλου (Σχ. 36.8d), με μήκος τόξου ίσο με το μήκος E_0 του Σχ. 36.8b. Το συνιστάμενο πλάτος E_P του ηλεκτρικού πεδίου στο P ισούται με τη χορδή AB , που είναι $2(E_0/\beta) \sin(\beta/2)$. (Σημειώστε ότι η β θα πρέπει να εκφραστεί σε ακτίνια!)

$$E_P = E_0 \frac{\sin(\beta/2)}{\beta/2} \quad (\text{κατανομή πλάτους στην περίθλαση από απλή σχισμή}) \quad \text{όπου} \quad \beta = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta$$

Η ένταση σε κάθε σημείο του πετάσματος είναι ανάλογη προς το τετράγωνο του πλάτους που δίνεται από την Εξ. (36.4). Αν I_0 είναι η ένταση στην ευθεία εμπρός διεύθυνση, όπου $\vartheta = 0$ και $\beta = 0$, τότε η ένταση I σε κάθε σημείο είναι:

$$I = I_0 \left[\frac{\sin(\beta/2)}{\beta/2} \right]^2 \quad (\text{κατανομή έντασης στην περίθλαση από απλή σχισμή}) \quad (36.5)$$

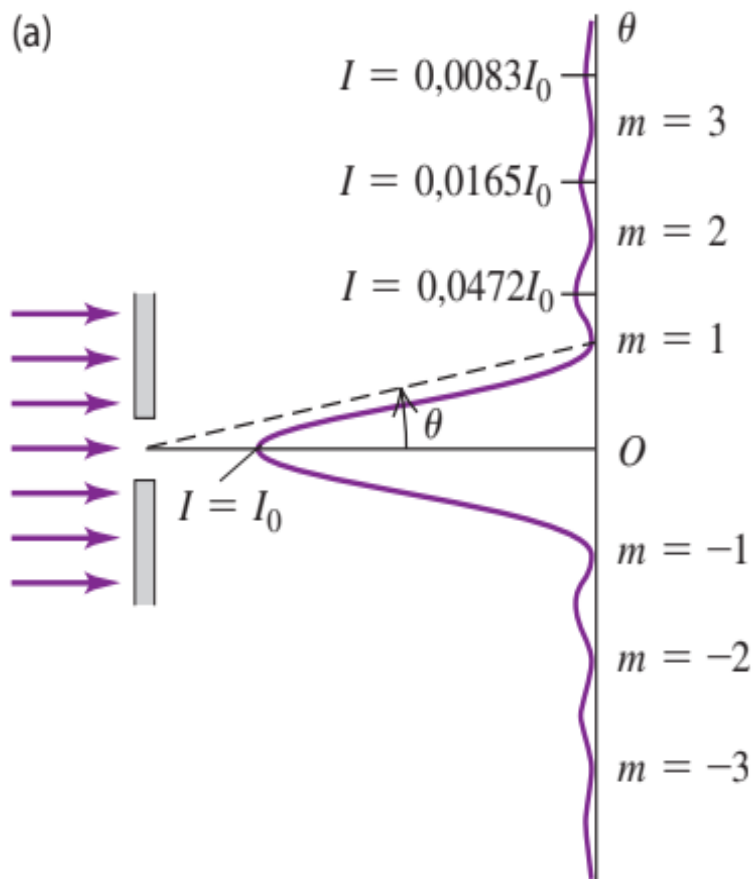
Γωνία που σχηματίζει η γραμμή από το κέντρο της σχισμής στο σημείο του πετάσματος

Ένταση στη περίθλαση από απλή σχισμή

$$I = I_0 \left\{ \frac{\sin [\pi a (\sin \theta) / \lambda]}{\pi a (\sin \theta) / \lambda} \right\}^2 \quad (36.7)$$

Ένταση για $\theta = 0$ Εύρος της σχισμής Μήκος κύματος

ΕΝΤΑΣΗ ΣΤΗΝ ΕΙΚΟΝΑ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗΣ ΤΗΣ ΑΠΛΗΣ ΣΧΙΣΜΗΣ



36.9 (a) Κατανομή της έντασης συναρτήσει της γωνίας για την περίθλαση από απλή σχισμή. Οι τιμές του δείκτη m για τα ελάχιστα της έντασης δίνονται από την Εξ. (36.8). Το μεγαλύτερο ποσοστό της κυματικής ισχύος καταλαμβάνει την κεντρική κορυφή έντασης (μεταξύ των ελαχίστων $m = 1$ και $m = -1$).

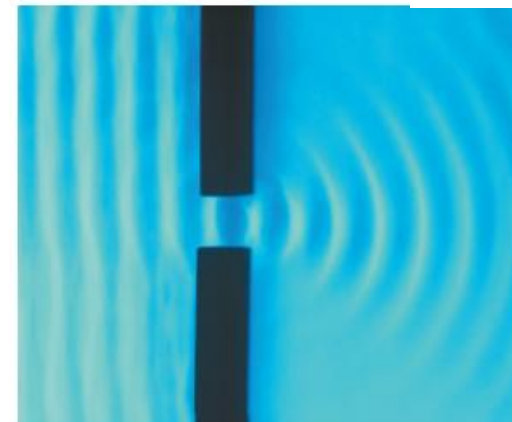
Οι σκοτεινοί κροσσοί στην εικόνα περίθλασης αφορούν τις θέσεις όπου $I = 0$. Αυτό συμβαίνει σε θέσεις όπου μηδενίζεται ο αριθμητής της Εξ. (36.5), δηλαδή όταν:

$$\sin \theta = \frac{m\lambda}{a} \quad (m = \pm 1, \pm 2, \dots)$$

Η εξισ. 36.5 δίνει απροδιόριστη τιμή όταν $\theta \rightarrow 0$. Χρησιμοποιώντας τον κανόνα του L'Hôpital. Βρίσκουμε ότι για $\theta = 0$, είναι $I = I_0$, που είναι το αναμενόμενο αποτέλεσμα.

(b) Αυτά τα υδάτινα κύματα που διέρχονται μέσα από ένα μικρό άνοιγμα συμπεριφέρονται ακριβώς όπως τα φωτεινά κύματα κατά την περίθλασή τους από μια απλή σχισμή. Διακρίνονται μόνο τα περιθλώμενα κύματα εντός της κεντρικής κορυφής έντασης· τα κύματα σε μεγαλύτερες γωνίες είναι πολύ αμυδρά και δεν διακρίνονται.

(b)



Μέγιστα Έντασης στην Εικόνα Περίθλασης από Απλή σχισμή

Μπορούμε επίσης να χρησιμοποιήσουμε την Εξ. (36.5) για να υπολογίσουμε τις θέσεις των κορυφών, ή των μεγίστων έντασης, καθώς και τις εντάσεις στις κορυφές αυτές. Αυτό δεν είναι τόσο απλό όσο ίσως φαίνεται. Θα αναμέναμε πιθανόν να εμφανίζονται οι κορυφές στα σημεία όπου:

$$\beta \approx \pm (2m + 1)\pi \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (36.9)$$

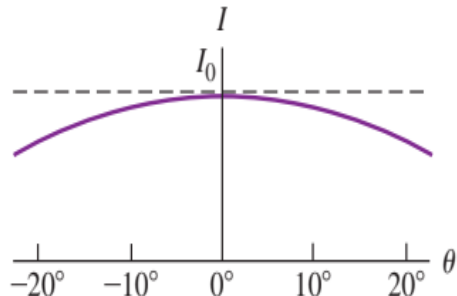
Αυτό είναι μόνο κατά προσέγγιση ορθό επειδή, εξαιτίας του παράγοντα $(\beta/2)^2$ στον παρονομαστή της Εξ. (36.5). Αν παραγωγίσουμε την Εξ. (36.5) ως προς β και μηδενίσουμε την παράγωγο αυτή ώστε να βρούμε τα μέγιστα και τα ελάχιστα, καταλήγουμε σε μια υπερβατική εξίσωση που μπορεί να λυθεί μόνο αριθμητικά. Στην πραγματικότητα, δεν υπάρχει μέγιστο κοντά στην τιμή $\beta = \pm\pi$. Για την εύρεση των εντάσεων των πλευρικών μεγίστων αντικαθιστούμε αυτές τις τιμές της β στην Εξ. (36.5). Οι πραγματικές εντάσεις των πλευρικών μεγίστων φαίνονται στο Σχ.36.9.

Εύρος της Εικόνας Περίθλασης από Απλή Σχισμή

36.10 Η εικόνα περίθλασης από απλή σχισμή εξαρτάται από τον λόγο του εύρους της σχισμής a προς το μήκος κύματος λ .

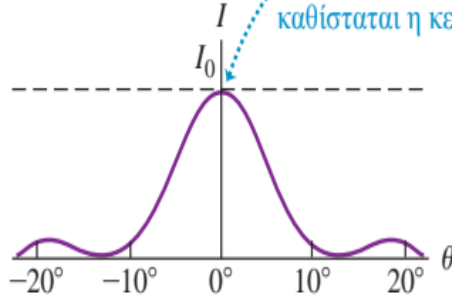
(a) $a = \lambda$

Όταν το εύρος της σχισμής είναι ίσο ή μικρότερο του μήκους κύματος, τότε σχηματίζεται μόνο ένα διευρυμένο μέγιστο.

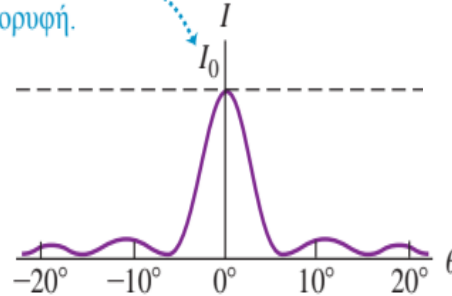


(b) $a = 5\lambda$

Όσο διευρύνεται η σχισμή (ή όσο ελαττώνεται το μήκος κύματος) τόσο στενότερη και οξύτερη καθίσταται η κεντρική κορυφή.



(c) $a = 8\lambda$



Οι εντάσεις αυτές μειώνονται ταχύτατα, όπως φαίνεται και από το Σχ. 36.9a. Η ένταση ακόμη και των πρώτων πλευρικών μεγίστων είναι μικρότερη του 5 % της έντασης του κεντρικού μεγίστου.

$$\theta_1 = \frac{\lambda}{a}$$

Αυτή η τιμή χαρακτηρίζει το εύρος (γωνιακή έκταση) του κεντρικού μεγίστου· παρατηρούμε ότι αυτό είναι αντιστρόφως ανάλογο του εύρους της σχισμής a .

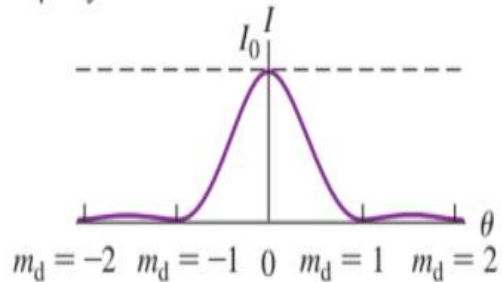
ΠΟΛΛΑΠΛΕΣ ΣΧΙΣΜΕΣ

Δύο Σχισμές Πεπερασμένου Εύρους

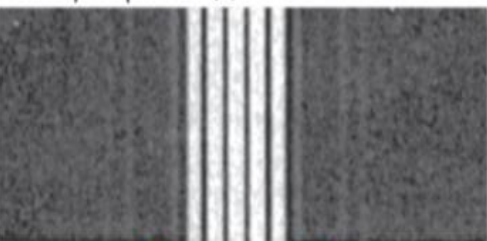
Αν οι σχισμές έχουν πεπερασμένο εύρος, τότε οι κορυφές της εικόνας συμβολής δύο σχισμών διαμορφώνονται από την εικόνα περίθλασης μιας απλής σχισμής, που είναι χαρακτηριστική του εύρους της κάθε σχισμής. Η έκφραση για την ένταση που παρουσιάζεται στο Σχ. 36.12c είναι ανάλογη προς το γινόμενο των εκφράσεων για τη διπλή και την απλή σχισμή, Εξ. (35.10) και Εξ. (36.5):

36.12 Εύρεση της έντασης του προτύπου δύο σχισμών πεπερασμένου εύρους.

(a) Εικόνα περίθλασης μίας σχισμής εύρους a

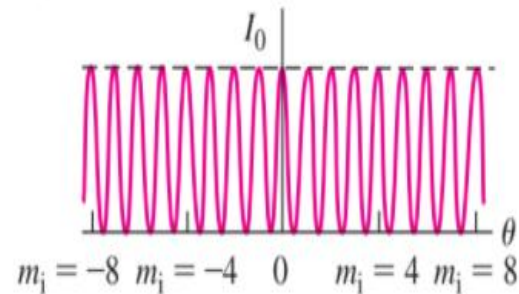


(d) Φωτογραφία της εικόνας που υπολογίστηκε στο (c)

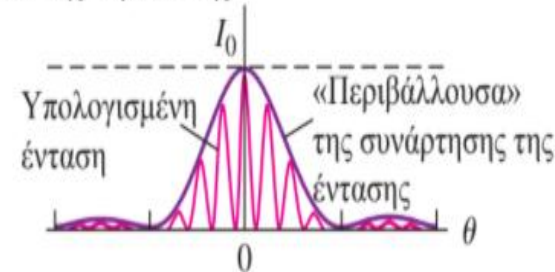


Για $d = 4a$, λείπει κάθε τέταρτο πλευρικό μέγιστο συμβολής ($m_i = \pm 4, \pm 8, \dots$).

(b) Εικόνα συμβολής δύο λεπτών σχισμών που βρίσκονται σε απόσταση d μεταξύ τους, η οποία είναι τέσσερις φορές μεγαλύτερη του εύρους των σχισμών στο (a)



(c) Υπολογισμένη ένταση του προτύπου δύο σχισμών εύρους a που απέχουν μεταξύ τους απόσταση $d = 4a$, λαμβάνοντας υπόψη τόσο το φαινόμενο της συμβολής όσο και αυτό της περίθλασης



$$I = I_0 \cos^2 \frac{\phi}{2} \left[\frac{\sin(\beta/2)}{\beta/2} \right]^2$$

όπου, όπως και πριν,

$$\phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta \quad \beta = \frac{2\pi a}{\lambda} \sin \theta$$

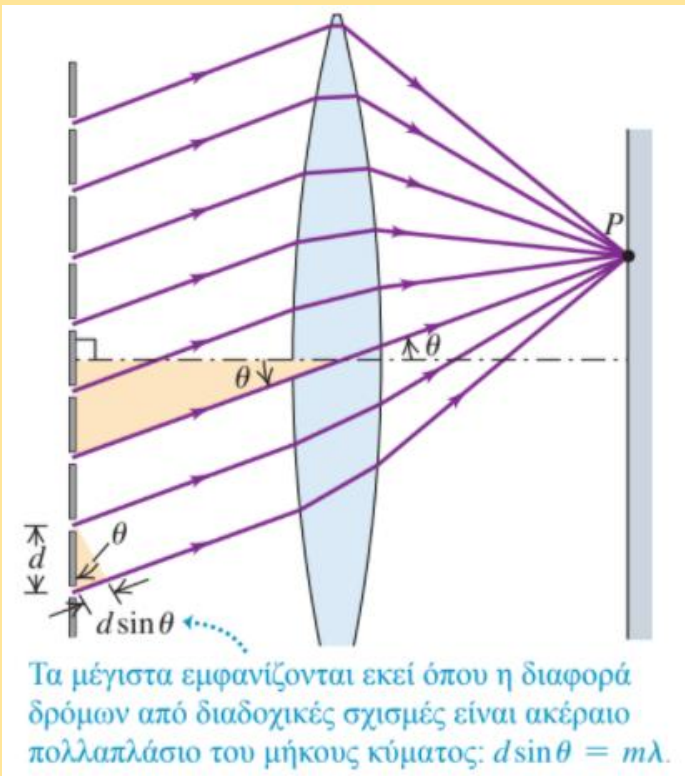
Στο Σχ. 36.12c κάθε τέταρτο πλευρικό μέγιστο συμβολής απουσιάζει διότι αυτά τα μέγιστα συμβολής ($m_i = \pm 4, \pm 8, \dots$) συμπίπτουν με τα ελάχιστα περίθλασης ($m_d = \pm 1, \pm 2, \dots$). Θα υπάρχουν «απόντα» μέγιστα όποτε η d είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του a .

Όσο λεπτότερες είναι οι σχισμές τόσο πιο διευρυμένη είναι η εικόνα περίθλασης της απλής σχισμής (όπως στο Σχ. 36.10) και τόσο μικρότερη είναι η ελάττωση της έντασης από το ένα μέγιστο συμβολής στο επόμενο.

Πολλές Σχισμές

Το Σχ. 36.13 δείχνει μια συστοιχία (παράταξη) από οκτώ λεπτές σχισμές ενώ η απόσταση μεταξύ διαδοχικών σχισμών είναι d , ανά δύο μεταξύ τους. Ενισχυτική συμβολή συμβαίνει για ακτίνες που σχηματίζουν γωνία θ με την κάθετο στη συστοιχία και φθάνουν στο σημείο P , όταν η διαφορά δρόμου από δύο διαδοχικές σχισμές ως το σημείο αυτό είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος: $d \sin \theta = m\lambda$ ($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$)

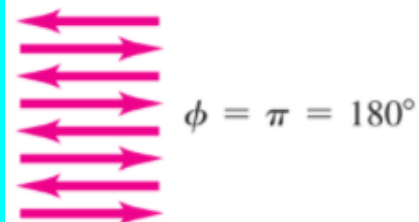
Αυτό σημαίνει ότι εμφανίζεται ενίσχυση όταν η διαφορά φάσης φ στο σημείο P για το φως από διαδοχικές σχισμές είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του 2π . Δηλαδή τα μέγιστα στην εικόνα εμφανίζονται στις ίδιες θέσεις που εμφανίζονται τα μέγιστα της εικόνας συμβολής των **δύο** σχισμών με την ίδια απόσταση μεταξύ τους. Το τι συμβαίνει όμως στον χώρο μεταξύ των μεγίστων είναι διαφορετικό στην περίπτωση των πολλαπλών σχισμών.



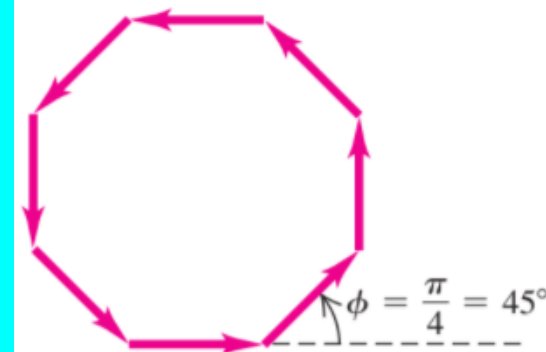
36.13 Περίθλαση από πολλαπλές σχισμές. Εδώ χρησιμοποιείται ένας φακός για να μας δώσει μια εικόνα Fraunhofer σε ένα γειτονικό πέτασμα, όπως στο Σχ. 36.4d.

36.14 Διαγράμματα φασόρων για φως που διέρχεται μέσα από οκτώ λεπτές σχισμές. Μέγιστα έντασης εμφανίζονται όταν η διαφορά φάσης είναι $\varphi = 0, 2\pi, 4\pi, \dots$. Μεταξύ των μεγίστων για $\varphi = 0$ και $\varphi = 2\pi$ υπάρχουν επτά ελάχιστα, που αντιστοιχούν στις τιμές $\varphi = \pi/4, \pi/2, 3\pi/4, \pi, 5\pi/4, 3\pi/2$ και $7\pi/4$. Μπορείτε να σχεδιάσετε τα αντίστοιχα διαγράμματα φασόρων για τα υπόλοιπα ελάχιστα;

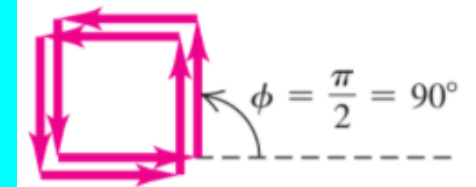
(a) Διάγραμμα φασόρων για $\phi = \pi$



(b) Διάγραμμα φασόρων για $\phi = \frac{\pi}{4}$



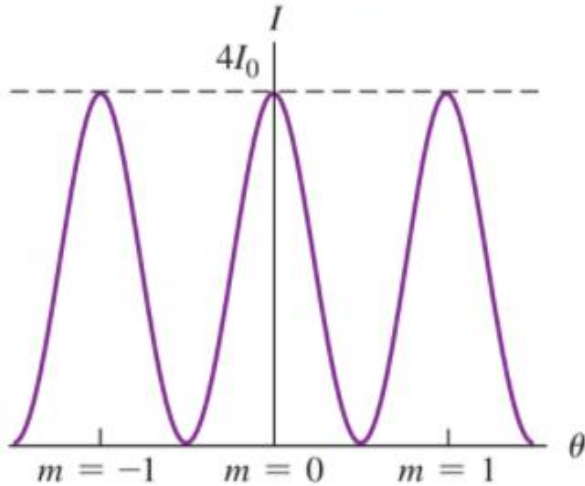
(c) Διάγραμμα φασόρων για $\phi = \frac{\pi}{2}$



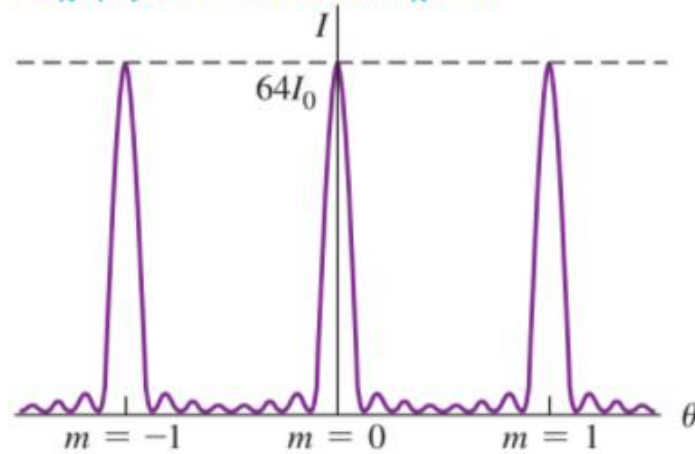
Πολλές Σχισμές

36.15 Εικόνες συμβολής για N πολύ λεπτές σχισμές σε ίση απόσταση μεταξύ τους ανά δύο. (a) Δύο σχισμές. (b) Οκτώ σχισμές. (c) Δεκαέξι σχισμές. Οι κλίμακες των κατακόρυφων αξόνων είναι διαφορετικές σε κάθε διάγραμμα· η μέγιστη ένταση είναι I_0 για μια απλή σχισμή και $N^2 I_0$ για N σχισμές. Το εύρος κάθε κορυφής είναι ανάλογο του $1/N$.

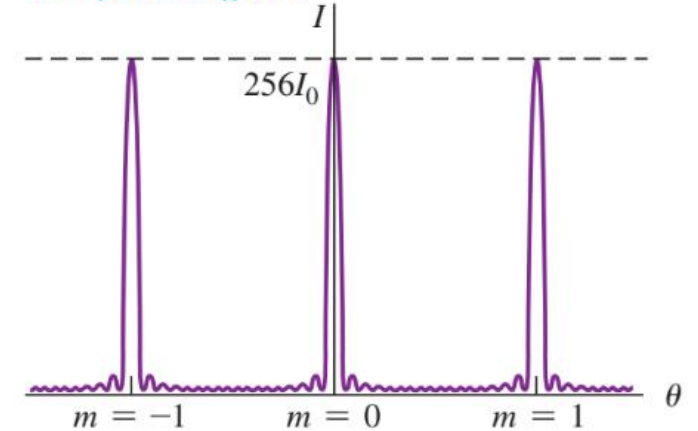
(a) $N = 2$: Δύο σχισμές παράγουν ένα ελάχιστο ανάμεσα σε δύο διαδοχικά μέγιστα.



(b) $N = 8$: Οκτώ σχισμές παράγουν ισχυρότερα και στενότερα μέγιστα στις ίδιες θέσεις, τα οποία διαχωρίζονται από επτά ελάχιστα.



(c) $N = 16$: Για δεκαέξι σχισμές, τα μέγιστα είναι ακόμη πιο ισχυρά και πιο στενά, με περισσότερα ενδιάμεσα ελάχιστα.



Τα κύρια μέγιστα της έντασης για πολλαπλές σχισμές σχηματίζονται στις ίδιες διευθύνσεις όπως και στην εικόνα συμβολής δύο σχισμών.

Απόσταση μεταξύ των σχισμών
Μέγιστα έντασης, πολλαπλές σχισμές: $d \sin \theta = m\lambda$ (36.13)
Μήκος κύματος
($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$)
Γωνία που σχηματίζει ο m -οστός φωτεινός κροσσός στο πέτασμα με την κάθετο στην παράταξη των σχισμών.

ΤΟ ΦΡΑΓΜΑ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗΣ

Μια συστοιχία (παράταξη) ενός μεγάλου αριθμού παράλληλων σχισμών του ίδιου πλάτους a και με σταθερή απόσταση d μεταξύ των κέντρων δύο διαδοχικών σχισμών ονομάζεται **φράγμα περίθλασης**.

Σε ένα φράγμα, ό,τι ως τώρα ονομάζαμε σχισμές αναφέρονται συχνά ως χαραγές ή ως γραμμές.

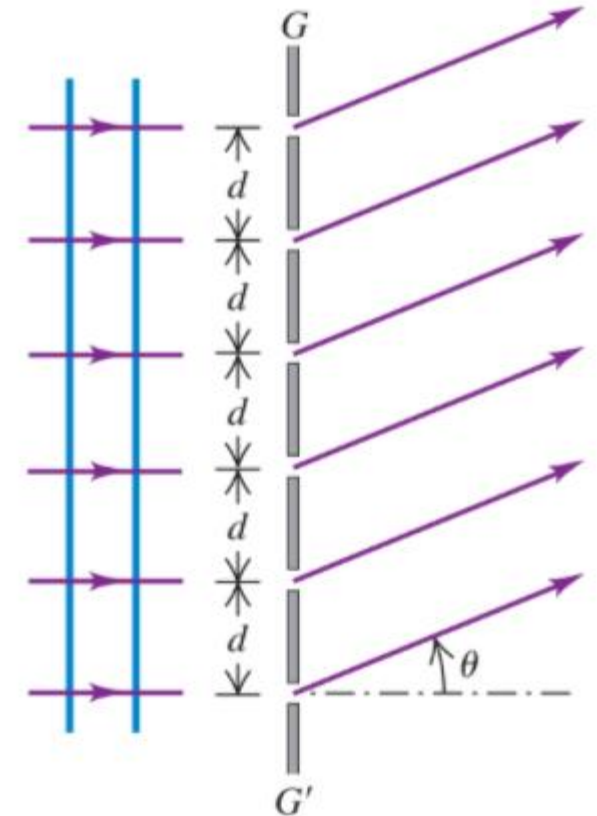
Στο Σχ. 36.16, η GG' είναι μια τομή ενός φράγματος διέλευσης· οι σχισμές είναι κάθετες στο επίπεδο της σελίδας και η εικόνα συμβολής σχηματίζεται από το φως που διέρχεται μέσα από τις σχισμές.

Απόσταση μεταξύ των σχισμών
Μέγιστα έντασης, πολλαπλές σχισμές: $d \sin \theta = m\lambda$ (36.13)
Μήκος κύματος
($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$)
Γωνία που σχηματίζει ο m -οστός φωτεινός κροσσός στο πέτασμα με την κάθετο στην παράταξη των σχισμών.

Όταν ένα φράγμα που περιέχει εκατοντάδες ή χιλιάδες σχισμές φωτίζεται από μια παράλληλη δέσμη μονοχρωματικού φωτός, η εικόνα συμβολής είναι μια σειρά από οξείες, έντονες γραμμές σε γωνίες που καθορίζονται από την Εξ. (36.13). Οι γραμμές για $m = \pm 1$ ονομάζονται γραμμές πρώτης τάξης, οι γραμμές για $m = \pm 2$ ονομάζονται γραμμές δεύτερης τάξης κ.ο.κ.

Σε ένα **ανακλαστικό φράγμα**, η διάταξη των ισαπεχουσών γραμμών που παρουσιάζεται στο Σχ. 36.16 αντικαθίσταται από μια διάταξη από ισαπέχουσες προεξοχές ή χαραγές (αύλακες) πάνω σε μια ανακλαστική επιφάνεια.

36.16 Τμήμα ενός φράγματος περίθλασης διέλευσης. Η απόσταση μεταξύ των κέντρων δύο διαδοχικών σχισμών είναι d .



Η απόσταση d μεταξύ των κέντρων δύο διαδοχικών σχισμών ονομάζεται *σταθερά του φράγματος*.

Φασματογράφοι Φράγματος

Τα φράγματα περίθλασης χρησιμοποιούνται ευρέως για τη μέτρηση του φάσματος του φωτός που εκπέμπεται από μία πηγή, διαδικασία η οποία ονομάζεται **φασματοσκοπία** ή **φασματομετρία**. Το φως που προσπίπτει σε ένα φράγμα με γνωστή σταθερά αναλύεται σε ένα φάσμα. Στη συνέχεια, μετρούνται οι γωνίες παρέκκλισης των μεγίστων και χρησιμοποιείται η Εξ. (36.13) για τον υπολογισμό του μήκους κύματος με μεγάλη ακρίβεια.

Εργαστηριακά πειράματα δείχνουν ότι διαφορετικοί τύποι ατόμων και ιόντων απορροφούν φως διαφορετικών μηκών κύματος. Συγκρίνοντας αυτά τα εργαστηριακά αποτελέσματα με τα μήκη κύματος των γραμμών απορρόφησης του ηλιακού φάσματος, οι αστρονόμοι μπορούν να εξαγουν συμπεράσματα για τη χημική σύνθεση της ατμόσφαιρας του Ήλιου. Η ίδια τεχνική χρησιμοποιείται για τη χημική ανάλυση γαλαξιών που απέχουν εκατομμύρια έτη φωτός.

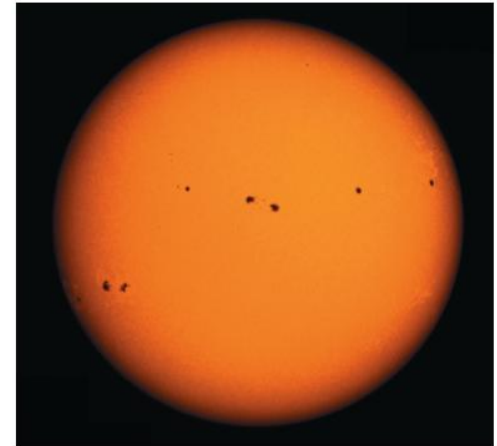
Η ελάχιστη διαφορά μηκών κύματος $\Delta\lambda$ που είναι δυνατόν να γίνει διακριτή από ένα φασματόμετρο περιγράφεται από τη χρωματική διακριτική ικανότητα R ,

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = Nm \quad \text{Χρωματική διακριτική ικανότητα} \quad (36.15)$$

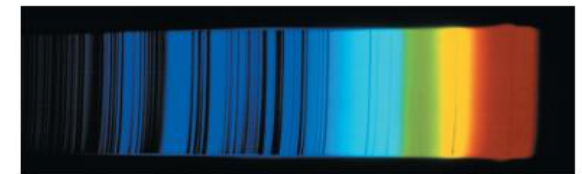
Όσο περισσότερες είναι οι γραμμές N του φράγματος τόσο καλύτερη είναι η διακριτικότητα στο παρατηρούμενο φάσμα· επίσης, όσο μεγαλύτερη είναι η τάξη m του μεγίστου της εικόνας περίθλασης που χρησιμοποιούμε τόσο καλύτερη είναι η διακριτικότητα.

36.18 (a) Φωτογραφία του Ήλιου στο ορατό φως. (b) Ηλιακό φως που έχει υποστεί ανάλυση σε φάσμα από ένα φράγμα περίθλασης. Συγκεκριμένα μήκη κύματος του ηλιακού φωτός απορροφώνται καθώς αυτό διέρχεται μέσα από την ηλιακή ατμόσφαιρα, αφήνοντας σκοτεινές γραμμές στο φάσμα.

(a)

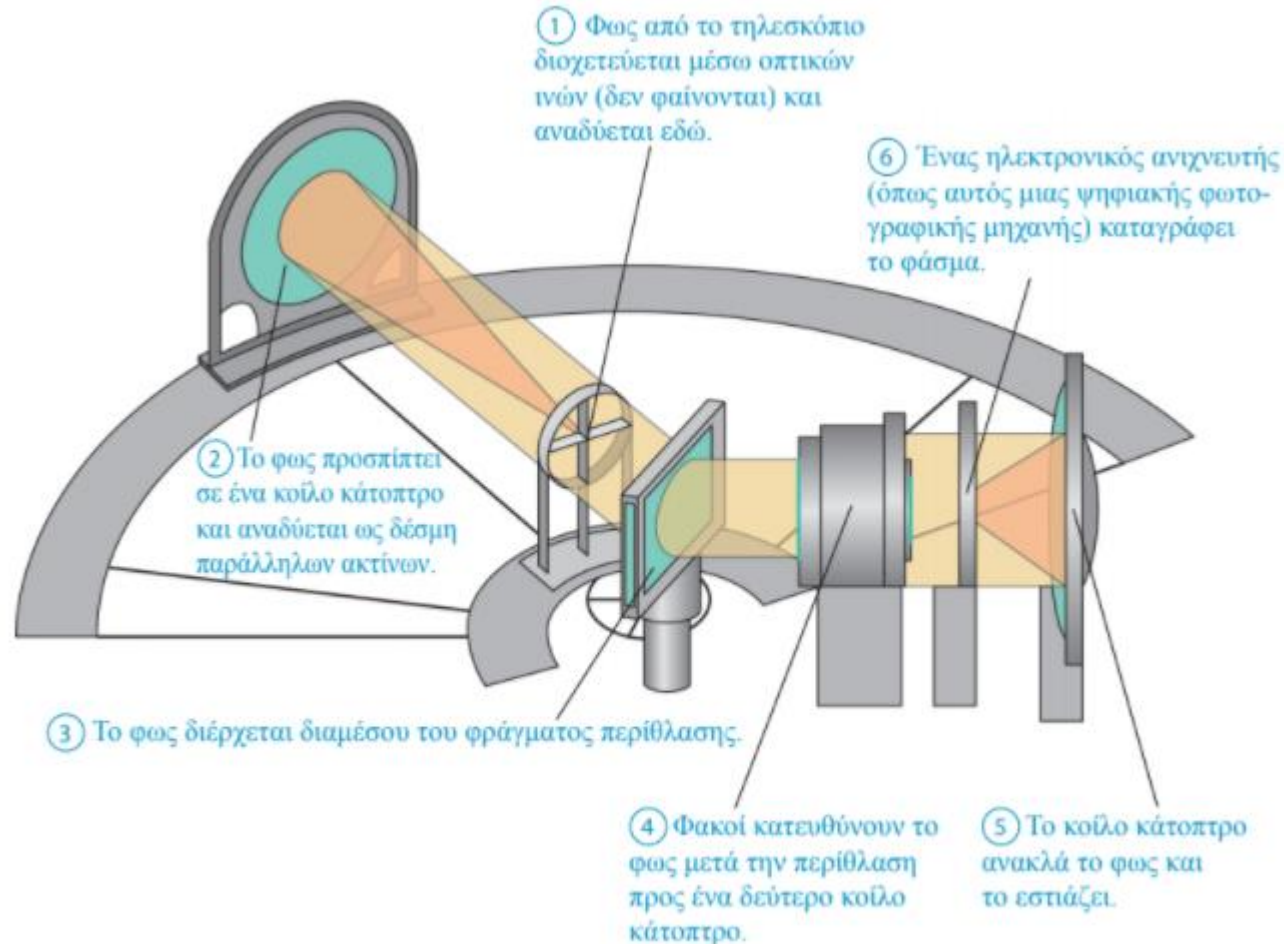


(b)



Φασματογράφος με φράγμα περίθλασης

36.19 Σχηματικό διάγραμμα ενός φασματογράφου με φράγμα περίθλασης για αστρονομική χρήση. Παρατηρήστε ότι το φως δεν προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια του φράγματος, οπότε οι θέσεις των μεγίστων έντασης δίνονται από μια κάπως διαφορετική σχέση από αυτής της Εξ. (36.13).



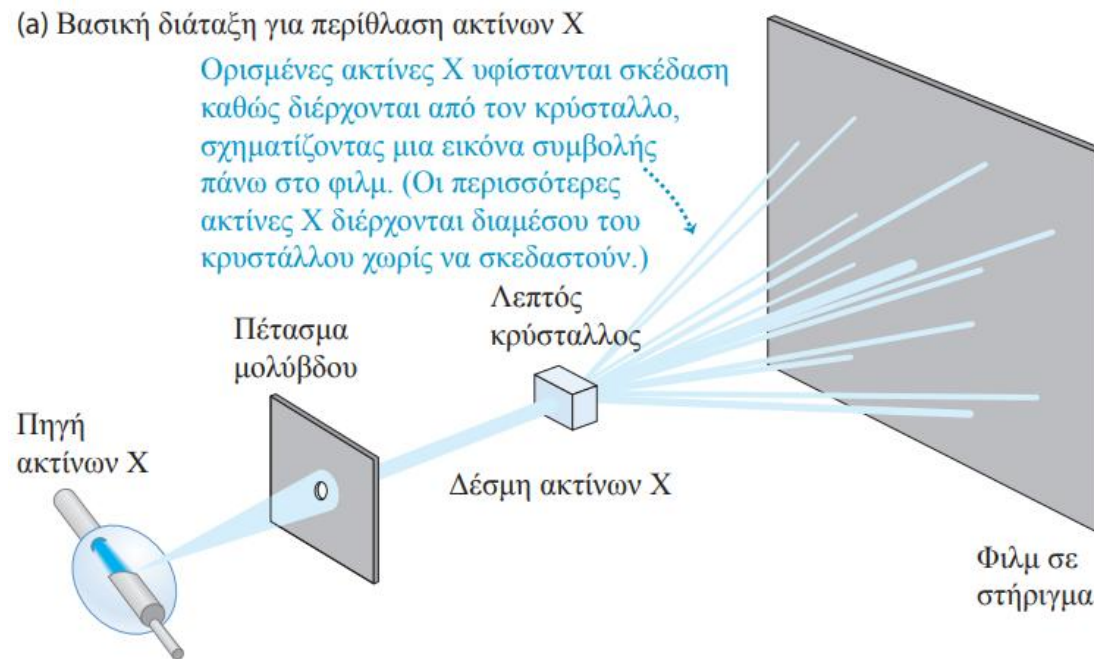
BIO Εφαρμογή Εφαρμογή Ανίχνευση DNA με Περίθλαση Τα φράγματα περίθλασης χρησιμοποιούνται σε μια συνηθισμένη διάταξη εργαστηριακού εξοπλισμού που είναι γνωστή ως φασματοφωτόμετρο. Το φως που διέρχεται από ένα φράγμα περίθλασης διαχωρίζεται στα μήκη κύματος που το απαρτίζουν. Μια σχισμή χρησιμοποιείται για την αποκοπή όλων των μηκών κύματος εκτός από μια πολύ στενή περιοχή αυτών, παράγοντας μια δέσμη σχεδόν τέλει μονοχρωματικού φωτός. Στη συνέχεια, η διάταξη μετρά πόσο από αυτό το φως απορροφάται από ένα διάλυμα βιολογικών μορίων. Για παράδειγμα, ο δειγματοφρέας της εικόνας περιέχει ένα διάλυμα DNA, το οποίο είναι διαφανές στο ορατό φως αλλά απορροφά ισχυρά το υπεριώδες φως με μήκος κύματος ακριβώς 260 nm. Επομένως, φωτίζοντας το δείγμα με φως 260 nm και μετρώντας την ποσότητα που απορροφάται, μπορούμε να προσδιορίσουμε τη συγκέντρωση του DNA στο διάλυμα.



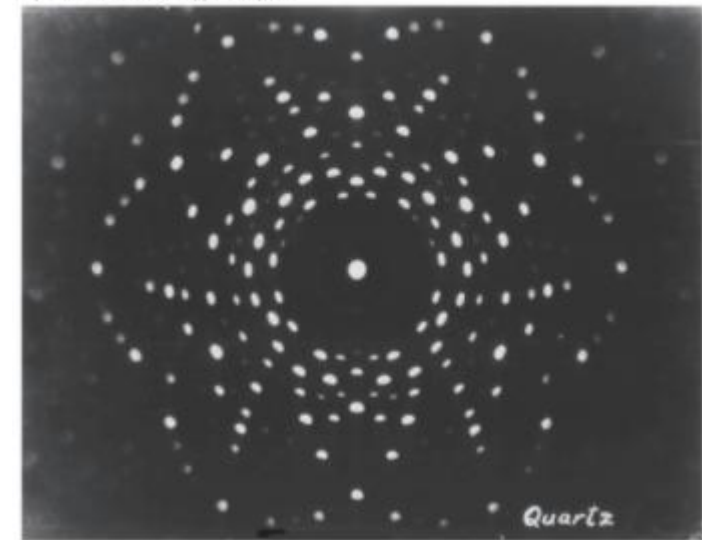
ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ

Τα πρώτα **πειράματα περίθλασης ακτίνων Χ** πραγματοποιήθηκαν το 1912 από τους Friederich (Φρίντριχ), Knipping (Κνίπινγκ) και φον Λάουε, χρησιμοποιώντας την πειραματική διάταξη που παρουσιάζεται στο Σχ. 36.20α.

36.20 (α) Ένα πείραμα περίθλασης ακτίνων Χ. (b) Εικόνα περίθλασης (ή εικόνα Laue) που σχηματίζεται από δέσμη ακτίνων Χ που προσπίπτει σε λεπτό δείγμα κρυσταλλικού χαλαζία.



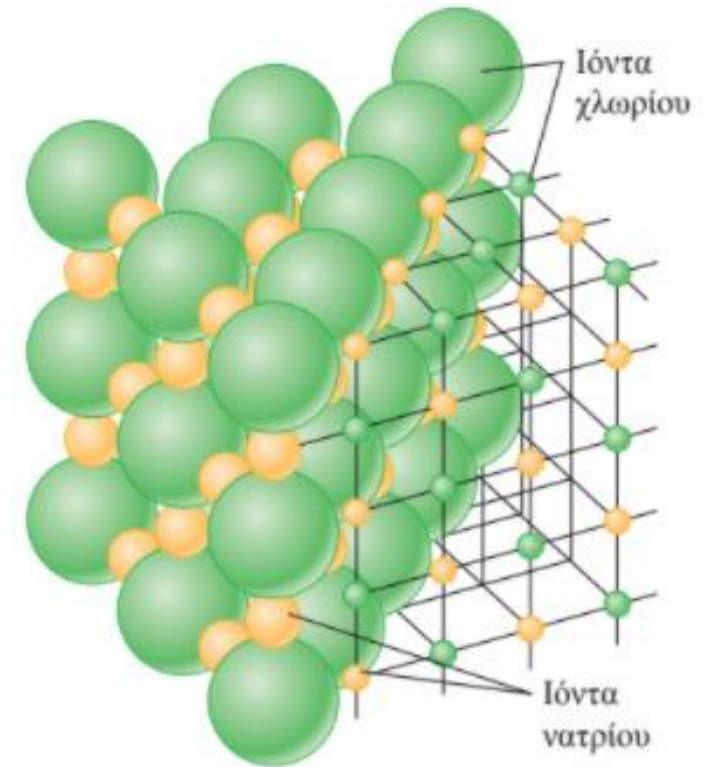
(b) Εικόνα περίθλασης Laue από ένα λεπτό δείγμα κρυσταλλικού χαλαζία.



ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ ΑΚΤΙΝΩΝ Χ

Οι σκεδαζόμενες ακτίνες Χ *πράγματι* σχημάτισαν μια εικόνα συμβολής, την οποία αποτύπωσαν σε ένα φωτογραφικό φιλμ. Το Σχ. 36.20b εμφανίζει τη φωτογραφία μιας τέτοιας εικόνας. Τα πειράματα αυτά επιβεβαίωσαν ότι οι ακτίνες Χ είναι κύματα, ή ότι τουλάχιστον έχουν κυματικές ιδιότητες, καθώς επίσης και ότι τα άτομα σε ένα κρύσταλλο είναι διευθετημένα σε μια κανονική διάταξη (Σχ. 36.21). Έκτοτε, έχει αποδειχθεί ότι η περίθλαση ακτίνων Χ αποτελεί ανεκτίμητο ερευνητικό εργαλείο τόσο για τη μέτρηση του μήκους κύματος των ακτίνων Χ όσο και για τη μελέτη της δομής των κρυστάλλων και περίπλοκων μορίων.

36.21 Μοντέλο της διάταξης των ιόντων σε έναν κρύσταλλο NaCl (επιτραπέζιο αλάτι). Η απόσταση μεταξύ παρακείμενων ατόμων είναι 0,282 nm. (Στην πράξη, υπάρχει μια μικρή αλληλεπικάλυψη των ηλεκτρονιακών νεφών των ατόμων).

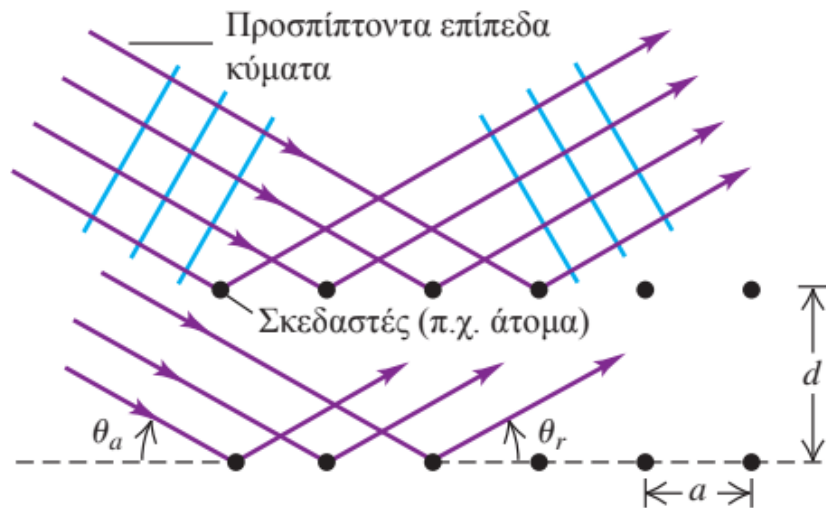


Ένα Απλό Μοντέλο της Περίθλασης Ακτίνων Χ

Για την καλύτερη κατανόηση της περίθλασης ακτίνων Χ, θεωρούμε κατ' αρχάς τη δισδιάστατη διάταξη σκέδασης του Σχ. 36.22a, όπου ένα επίπεδο κύμα προσπίπτει σε μια ορθογώνια συστοιχία (παράταξη) κέντρων σκέδασης.

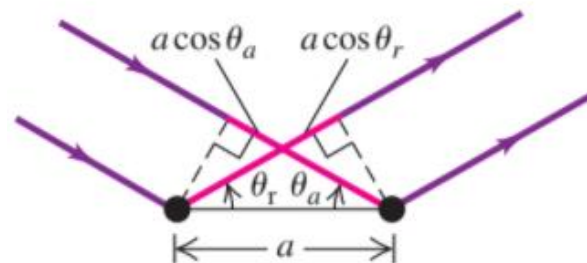
36.22 Δισδιάστατο μοντέλο σκέδασης από μια ορθογώνια συστοιχία (παράταξη). Η απόσταση μεταξύ διαδοχικών ατόμων σε μια οριζόντια γραμμή είναι a · η απόσταση μεταξύ διαδοχικών γραμμών είναι d . Οι γωνίες στο (b) μετρώνται από την επιφάνεια της συστοιχίας και όχι από την κάθετό της.

(a) Σκέδαση κυμάτων από ορθογώνια συστοιχία

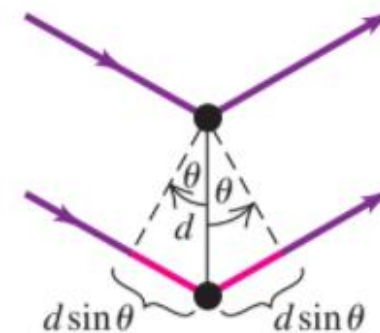


(b) Σκέδαση από διαδοχικά άτομα σε μια σειρά

Η συμβολή κυμάτων από διαδοχικά άτομα σε μια σειρά είναι ενισχυτική αν τα μήκη των δρόμων $a \cos \theta_a$ και $a \cos \theta_r$ είναι ίσα, δηλαδή η γωνία πρόσπτωσης θ_a είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης (σκέδασης) θ_r .



(c) Σκέδαση από άτομα σε διαδοχικές σειρές
Η συμβολή κυμάτων από άτομα σε διαδοχικές σειρές είναι ενισχυτική όταν η διαφορά δρόμου $2d \sin \theta$ είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος, όπως στην Εξ. (36.16).



Συνθήκη Bragg για ενισχυτική συμβολή από δισδιάστατη συστοιχία:

Απόσταση μεταξύ διαδοχικών σειρών στη διάταξη

$$2d \sin \theta = m\lambda$$

Μήκος κύματος
($m = 1, 2, 3, \dots$)

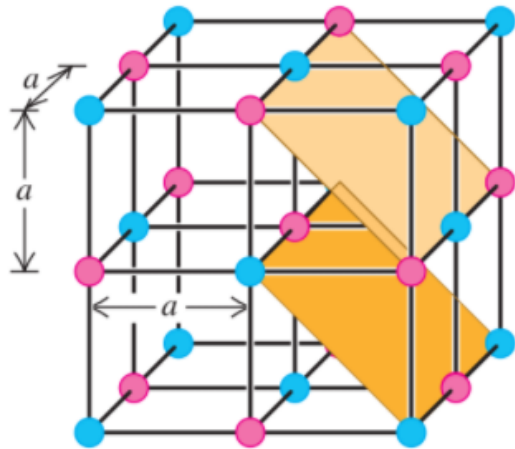
(36.16)

Γωνία που σχηματίζει ο m -οστός φωτεινός κροσσός στην οθόνη με την επιφάνεια της συστοιχίας

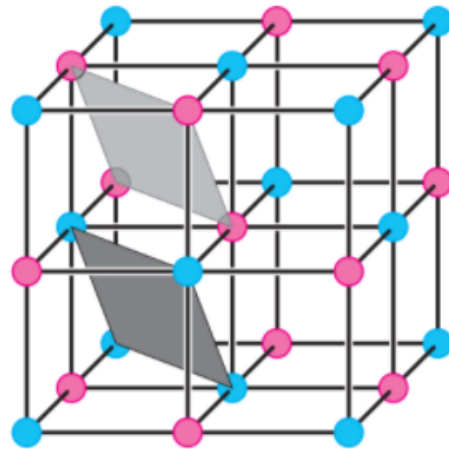
Ένα Απλό Μοντέλο της Περίθλασης Ακτίνων Χ

Μπορούμε να επεκτείνουμε την ανάλυση αυτή και σε μια τρισδιάστατη συστοιχία (πλέγμα) θεωρώντας **επίπεδα σκεδαστών** αντί για σειρές τους. Το Σχ. 36.23 δείχνει δύο διαφορετικές ομάδες παράλληλων επιπέδων που καλύπτουν το σύνολο των σκεδαστών.

(a) Η απόσταση μεταξύ των επιπέδων είναι $d = a/\sqrt{2}$.



(b) Η απόσταση μεταξύ των επιπέδων είναι $d = a/\sqrt{3}$.

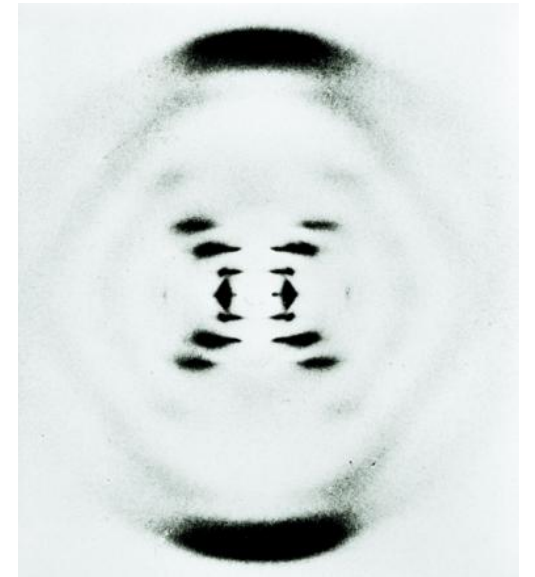


36.23 Ένας κυβικός κρύσταλλος και δύο διαφορετικές οικογένειες κρυσταλλικών επιπέδων. Επιπλέον, υπάρχουν τρεις οικογένειες επιπέδων που είναι παράλληλες με τις έδρες του κύβου, στις οποίες η απόσταση μεταξύ των επιπέδων είναι $d = a$.

Κύματα προερχόμενα από όλους τους σκεδαστές ενός επιπέδου συμβάλλουν ενισχυτικά εάν οι γωνίες πρόσπτωσης και σκέδασης είναι ίσες. Υπάρχει επίσης ενισχυτική συμβολή μεταξύ επιπέδων όταν ικανοποιείται η Εξ. (36.16), όπου d είναι τώρα η απόσταση μεταξύ διαδοχικών επιπέδων. Επειδή υπάρχουν πολλές διαφορετικές ομάδες παράλληλων επιπέδων, υπάρχουν επίσης πολλές τιμές της d και πολλές ομάδες γωνιών που δίνουν ενισχυτική συμβολή για το σύνολο του κρυσταλλικού πλέγματος. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **ανάκλαση Bragg**.

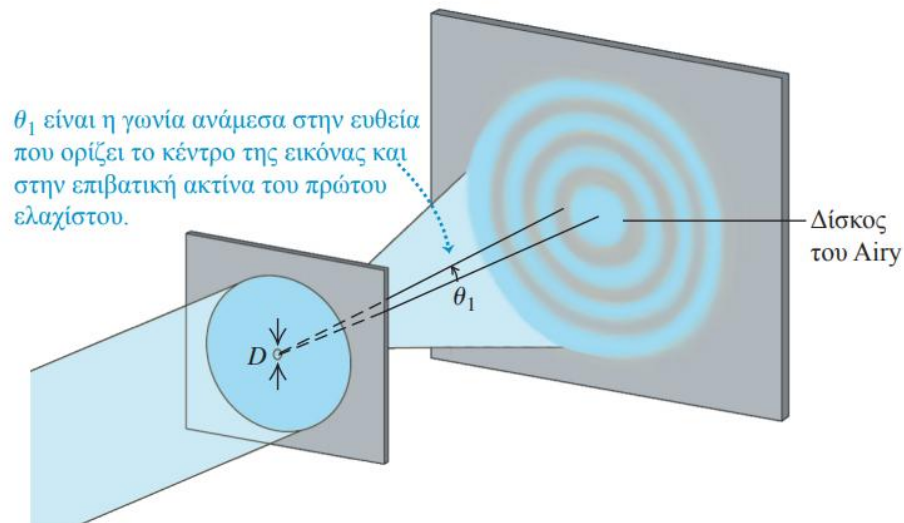
ΠΡΟΣΟΧΗ Η ανάκλαση Bragg είναι στην πραγματικότητα συμβολή Bragg. Οι ανακλάσεις από διάφορα επίπεδα εμφανίζουν απόλυτη αναλογία με τα φαινόμενα συμβολής σε λεπτά υμένα

36.24 Η Βρετανίδα επιστήμονας Rosalind Franklin (Ρόζαλιντ Φράνκλιν) παρήγαγε αυτήν την καινοτόμο εικόνα περίθλασης ακτίνων Χ του DNA το 1953. Οι διασταυρούμενοι σκοτεινοί κροσσοί έδωσαν την πρώτη ένδειξη για την ελικοειδή δομή του μορίου του DNA.



ΚΥΚΛΙΚΑ ΑΝΟΙΓΜΑΤΑ ΚΑΙ ΔΙΑΚΡΙΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ

Ένα άνοιγμα οποιουδήποτε σχήματος σχηματίζει και αυτό μια εικόνα περίθλασης. Η εικόνα περίθλασης που σχηματίζεται από ένα κυκλικό άνοιγμα έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον εξαιτίας του ρόλου που παίζει στον περιορισμό της διακριτικής ισχύος ενός οπτικού οργάνου, δηλαδή στην ικανότητά του να διακρίνει μικρές λεπτομέρειες.



36.25 Εικόνα περίθλασης που σχηματίζεται από κυκλικό άνοιγμα διαμέτρου D . Η εικόνα αποτελείται από μια κεντρική φωτεινή κηλίδα και εναλλασσόμενους σκοτεινούς και φωτεινούς δακτυλίους. Στο σχήμα σημειώνεται η γωνιακή ακτίνα θ_1 του πρώτου σκοτεινού δακτυλίου. (Το διάγραμμα αυτό δεν έχει σχεδιαστεί υπό κλίμακα.)

Γωνιακή ακτίνα του πρώτου σκοτεινού δακτυλίου = γωνιακή ακτίνα του δίσκου Airy
Περίθλαση από κυκλικό άνοιγμα:

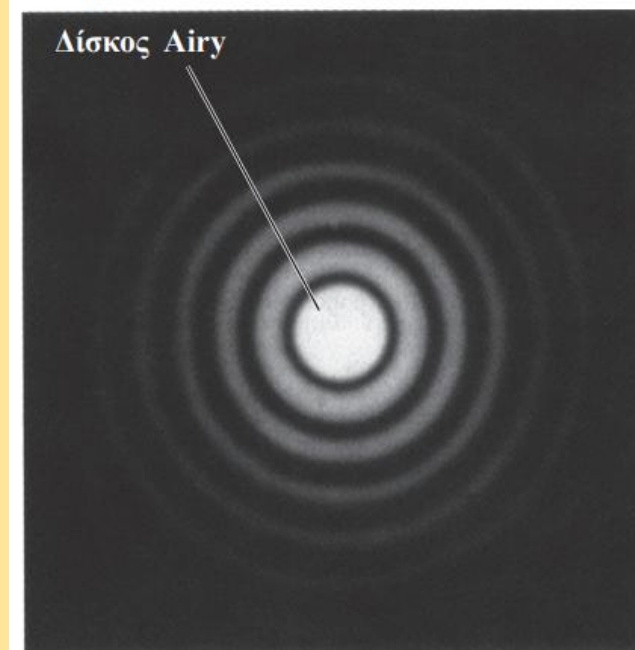
$$\sin \theta_1 = 1,22 \frac{\lambda}{D} \quad (36.17)$$

Μήκος κύματος
Διάμετρος ανοίγματος

Οι γωνιακές ακτίνες των δύο επόμενων σκοτεινών δακτυλίων δίνονται από τις σχέσεις

$$\sin \theta_2 = 2,23 \frac{\lambda}{D} \quad \sin \theta_3 = 3,24 \frac{\lambda}{D} \quad (36.18)$$

36.26 Φωτογραφία της εικόνας περίθλασης που σχηματίζεται από ένα κυκλικό άνοιγμα.



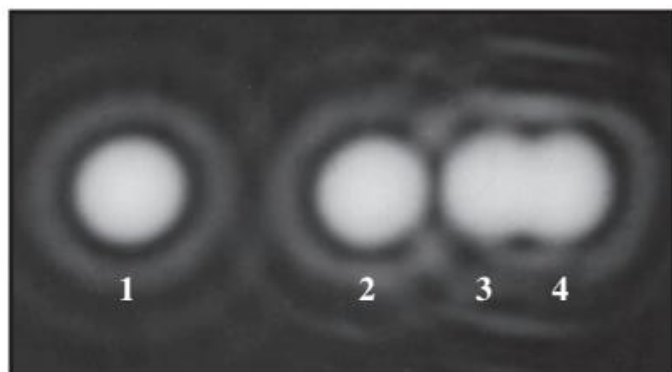
Η κεντρική φωτεινή κηλίδα ονομάζεται **δίσκος Airy**

Περίθλαση και Σχηματισμός Ειδώλου

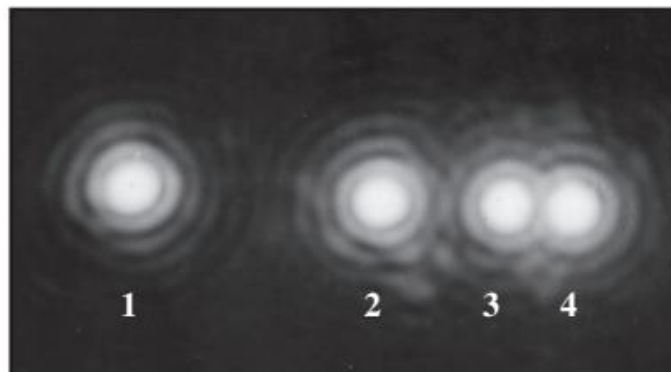
Η περίθλαση έχει σημαντικές επιπτώσεις κατά τον σχηματισμό ειδώλων από φακούς και κάτοπτρα. Αν πρόκειται για δύο σημειακά αντικείμενα, τα είδωλά τους δεν είναι δύο σημεία αλλά δύο εικόνες περίθλασης. Αν τα αντικείμενα απέχουν μικρή απόσταση μεταξύ τους, οι εικόνες περίθλασής τους αλληλεπικαλύπτονται. Ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο κριτήριο διάκρισης δύο σημειακών αντικειμένων, προτάθηκε από τον Lord Rayleigh (Λόρδος Ρέιλι, 1842- 1919) και ονομάζεται κριτήριο Rayleigh: τα αντικείμενα είναι μόλις διακριτά (αυτό σημαίνει ότι είναι διαχωρίσιμα) αν το κέντρο της μιας εικόνας περίθλασης συμπίπτει με το πρώτο ελάχιστο της άλλης. Στην περίπτωση αυτή, η γωνιακή απόσταση των κέντρων των ειδώλων δίνεται από την Εξ. (36.17).

36.27 Εικόνες περίθλασης τεσσάρων πολύ μικρών («σημειακών») πηγών φωτός. Οι φωτογραφίες ελήφθησαν με τη χρήση ενός κυκλικού ανοίγματος (διάφραγμα) τοποθετημένου μπροστά από τον φακό εστίασης. (a) Το άνοιγμα είναι τόσο μικρό, ώστε οι εικόνες των πηγών 3 και 4 να αλληλεπικαλύπτονται και μόλις να διακρίνονται με βάση το **κριτήριο Rayleigh**. Αν αυξηθεί το μέγεθος του ανοίγματος τότε μειώνεται το μέγεθος των εικόνων περίθλασης, όπως φαίνεται στις φωτογραφίες (b) και (c).

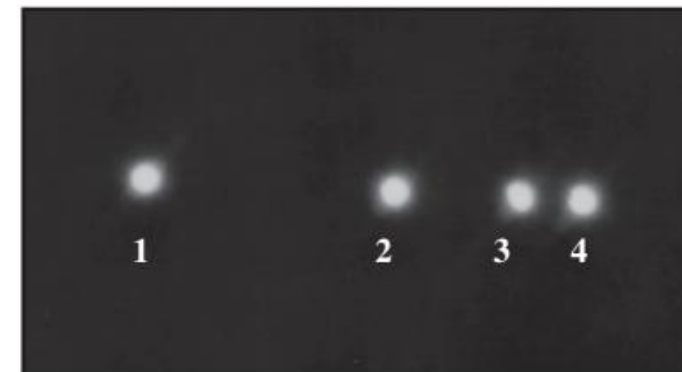
(a) Μικρό διάφραγμα



(b) Μεσαίο διάφραγμα



(c) Μεγάλο διάφραγμα



Η ελάχιστη απόσταση δύο αντικειμένων, τα οποία είναι μόλις διακριτά από ένα οπτικό όργανο, ονομάζεται **διακριτικό όριο** του οργάνου. Όσο μικρότερο είναι το διακριτικό όριο τόσο μεγαλύτερη είναι η διακριτική ικανότητα ή **διακριτική ισχύς** του οργάνου. Η περίθλαση καθορίζει τα ανώτατα όρια διακριτικότητας των φακών. Το κριτήριο Rayleigh συνδυαζόμενο με την Εξ. (36.17) δείχνει ότι η διακριτική ικανότητα (διακριτική ισχύς) βελτιώνεται με την αύξηση της διαμέτρου· επίσης, βελτιώνεται για μικρότερα μήκη κύματος.

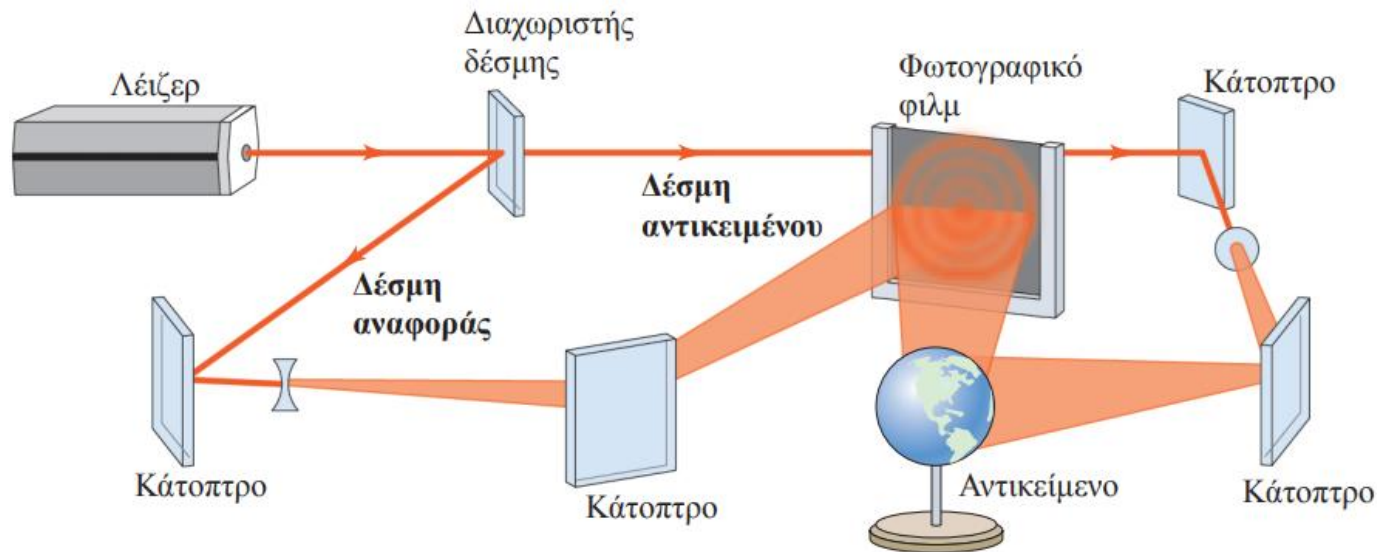
ΟΛΟΓΡΑΦΙΑ

Η **ολογραφία** είναι μια τεχνική καταγραφής και αναπαραγωγής του ειδώλου ενός αντικειμένου με την εφαρμογή φαινομένων συμβολής. Σε αντιδιαστολή με τη δισδιάστατη εικόνα που καταγράφεται σε μια κανονική φωτογραφία ή σε ένα σύστημα τηλεόρασης, μια ολογραφική εικόνα είναι πραγματικά τρισδιάστατη.

Το Σχ. 36.28 δείχνει τη βασική διαδικασία κατασκευής ενός ολογράμματος και τον τρόπο παρατήρησής του.

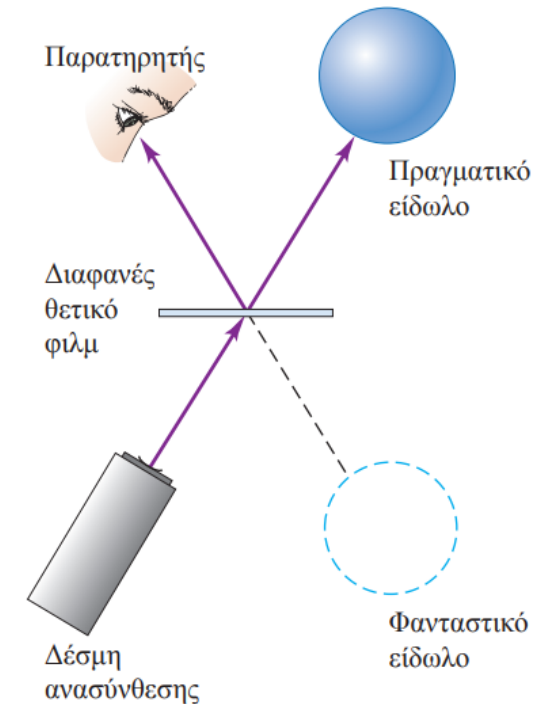
36.28 (α) Ένα ολόγραμμα είναι η καταγραφή σε φωτογραφικό φιλμ της εικόνας συμβολής που σχηματίζεται από φως προερχόμενο από τη σύμφωνη πηγή και από φως σκεδαζόμενο από το αντικείμενο.

(α) Καταγραφή ολογράμματος



(β) Ο σχηματισμός των ειδώλων επιτυγχάνεται αν διέλθει φως διαμέσου του ολογράμματος. Ο παρατηρητής βλέπει το φανταστικό είδωλο που σχηματίζεται πίσω από το ολόγραμμα.

(β) Παρατήρηση ολογράμματος



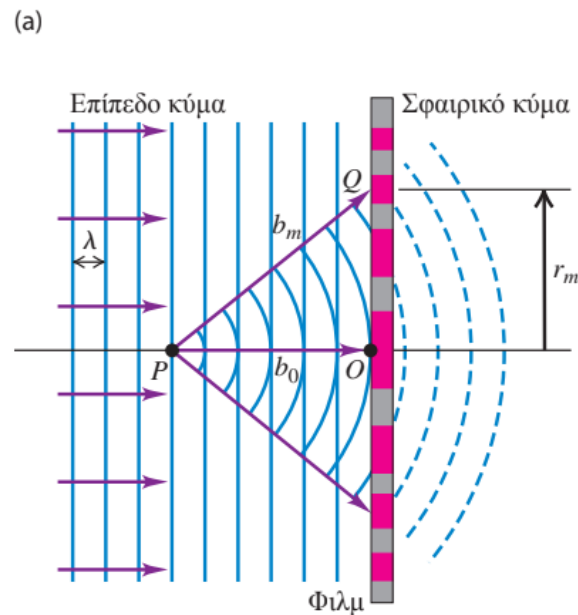
Ολογραφία και Εικόνες Συμβολής

Θεωρήστε την εικόνα συμβολής που σχηματίζεται σε φωτογραφικό αρνητικό φιλμ από την υπέρθεση ενός προσπίπτοντος επίπεδου κύματος και ενός σφαιρικού κύματος, όπως φαίνεται στο Σχ. 36.29a. Το σφαιρικό κύμα προέρχεται από μια σημειακή πηγή P σε απόσταση b_0 από το φιλμ· το P ίσως είναι στην πράξη ένα μικρό αντικείμενο που σκεδάζει μέρος του προσπίπτοντος επίπεδου κύματος.

Η εικόνα συμβολής συνίσταται από μια σειρά ομόκεντρων φωτεινών κυκλικών κροσσών με ακτίνες που δίνονται από την Εξ. (36.21).

$$r_m = \sqrt{2m\lambda b_0} \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (36.21)$$

36.29 (a) Ενισχυτική συμβολή του επίπεδου και του σφαιρικού κύματος λαμβάνει χώρα στο επίπεδο του φιλμ σε κάθε σημείο Q για το οποίο η απόσταση b_m από το σημείο P είναι μεγαλύτερη από την απόσταση b_0 από το P έως το σημείο O κατά ένα ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος, $m\lambda$. Για το σημείο Q που φαίνεται στο σχήμα, είναι $m = 2$.



36.29 (b) Αν ένα επίπεδο κύμα προσπέσει στη διάφανη θετική εκτύπωση του εμφανισμένου φιλμ, τότε το περιθλώμενο κύμα συνίσταται από ένα κύμα που συγκλίνει προς το σημείο P' και στη συνέχεια αποκλίνει καθώς και από ένα αποκλινόν κύμα που φαίνεται ότι προέρχεται από το σημείο P . Τα κύματα αυτά σχηματίζουν αντίστοιχα το πραγματικό και το φανταστικό είδωλο.

