

Κεφάλαιο 34

Κυματική Φύση του Φωτός; Συμβολή

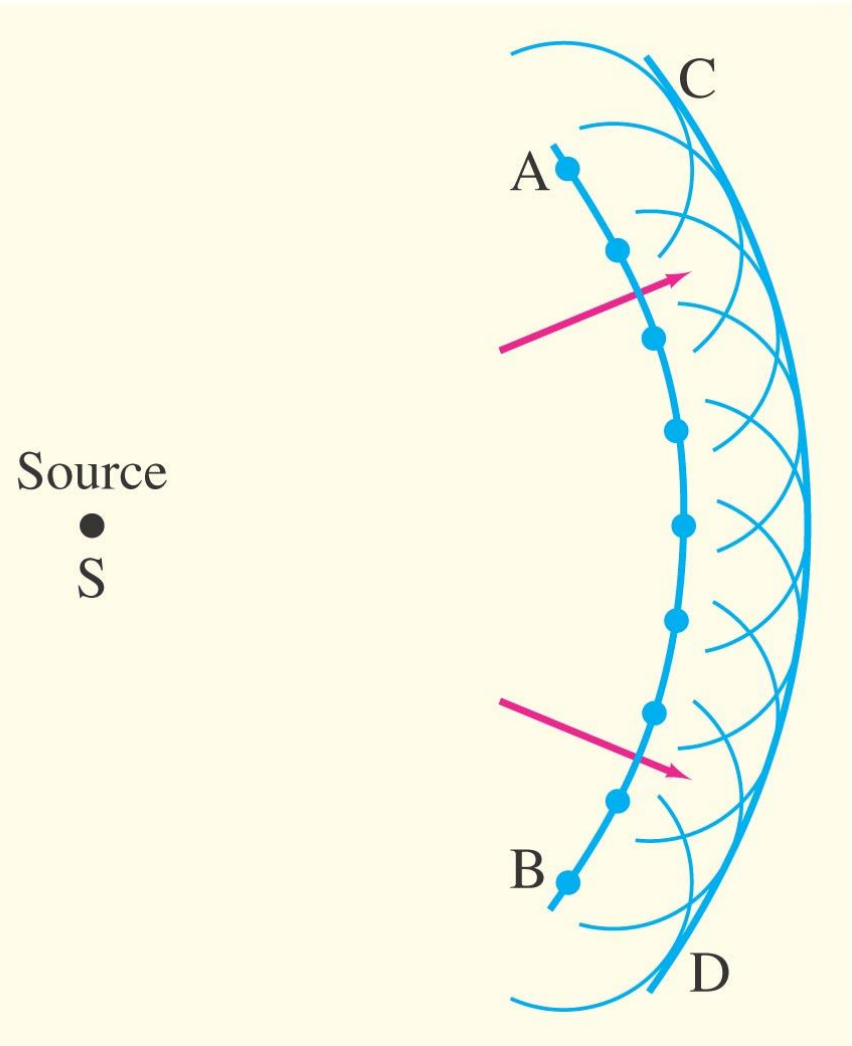


Κεφάλαιο 34

- Κύματα και σωματίδια-Διάθλαση και η αρχή του Huygens
- Συμβολή-Το πείραμα του Young-διπλή σχισμή.
- Η ένταση του αποτελέσματος της συμβολής της διπλής σχισμής.
- Συμβολή λεπτών υμενίων
- Το συμβολόμετρο του Michelson

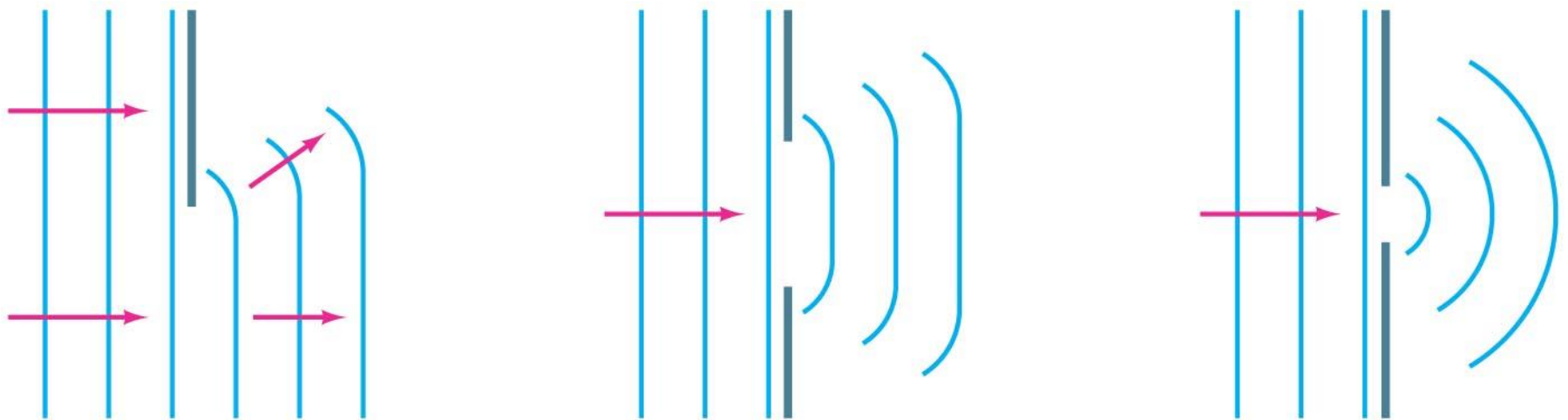
34-1 Η αρχή του Huygens

Η αρχή του Huygens :
κάθε σημείο του
μετώπου ενός κύματος
συμπεριφέρεται σαν
πηγή κύματος. Το
συνολικό μέτωπο είναι
εφαπτόμενο στα
επιμέρους μέτωπα που
δημιουργεί κάθε
σημείο.

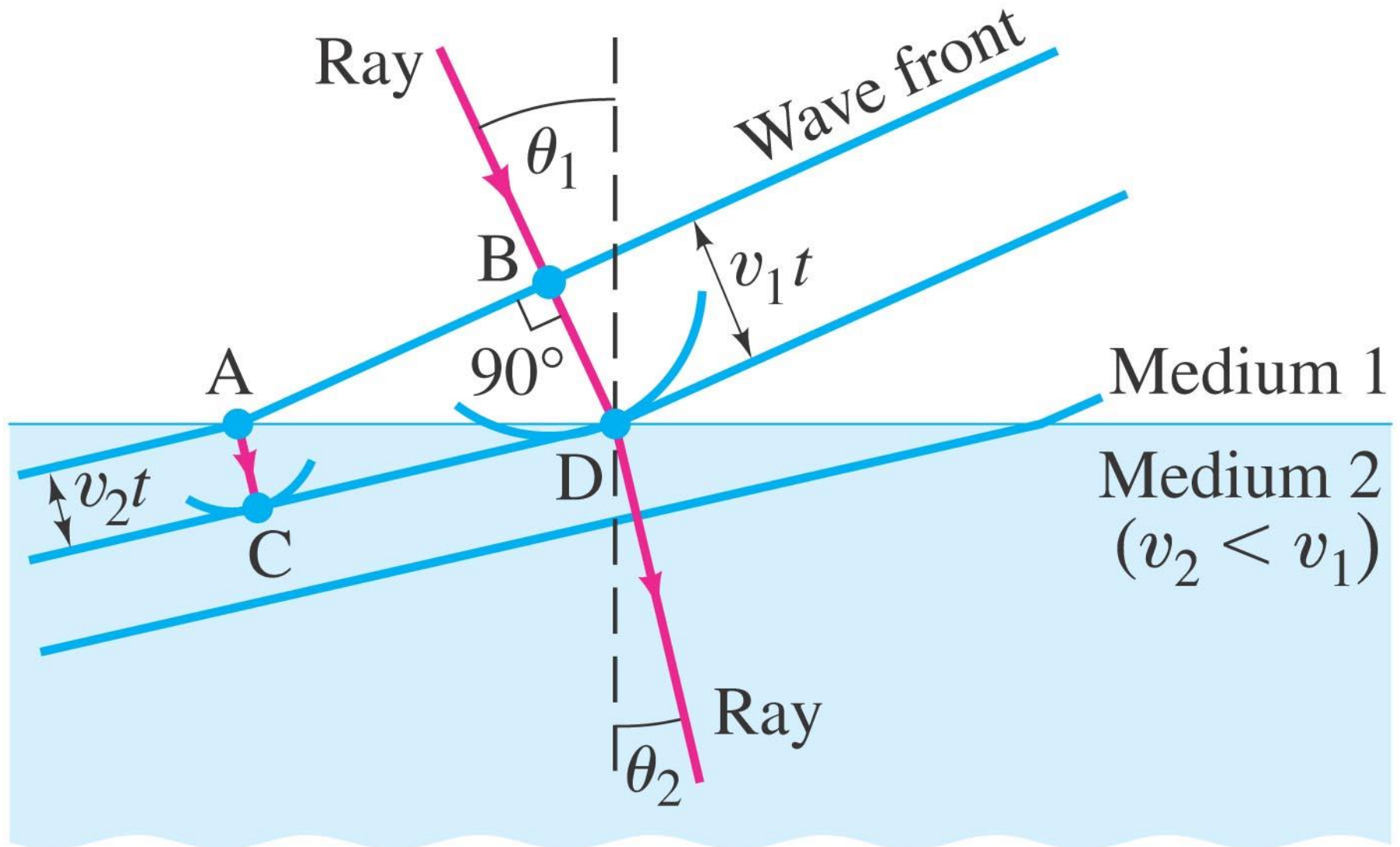


34-1 Η αρχή του Huygens

Η αρχή του Huygens είναι σύμφωνη με το φαινόμενο της διάθλασης



34-2 Η αρχή του Huygens



34-2 Η αρχή του Huygens

Η αρχή του Huygens εξηγεί και το φαινόμενο της **διάθλασης**.

Τα δευτερογενή μέτωπα διαδίδονται πιο αργά σε υλικά με μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης.

Αυτό έχει σαν συνέπεια να «κάμπτεται» το μέτωπο του κύματος με αποτέλεσμα η ακτίνα να «στρίβει» (αλλάζει διεύθυνση).

34-2 Η αρχή του Huygens – Νόμος Διάθλασης

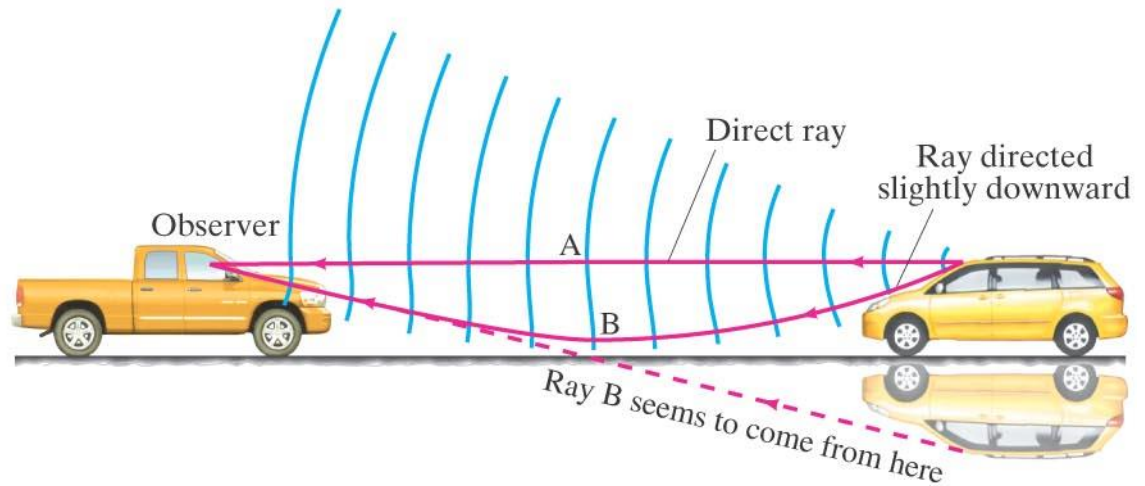
Όταν το φως περνάει μέσα από υλικά η **συχνότητα του φωτός δεν μεταβάλλεται** αλλάζει
όμως το μήκος κύματος:

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{v_2 t}{v_1 t} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{n_1}{n_2}.$$

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{n}.$$

34-2 Η αρχή του Huygens – Νόμος Διάθλασης

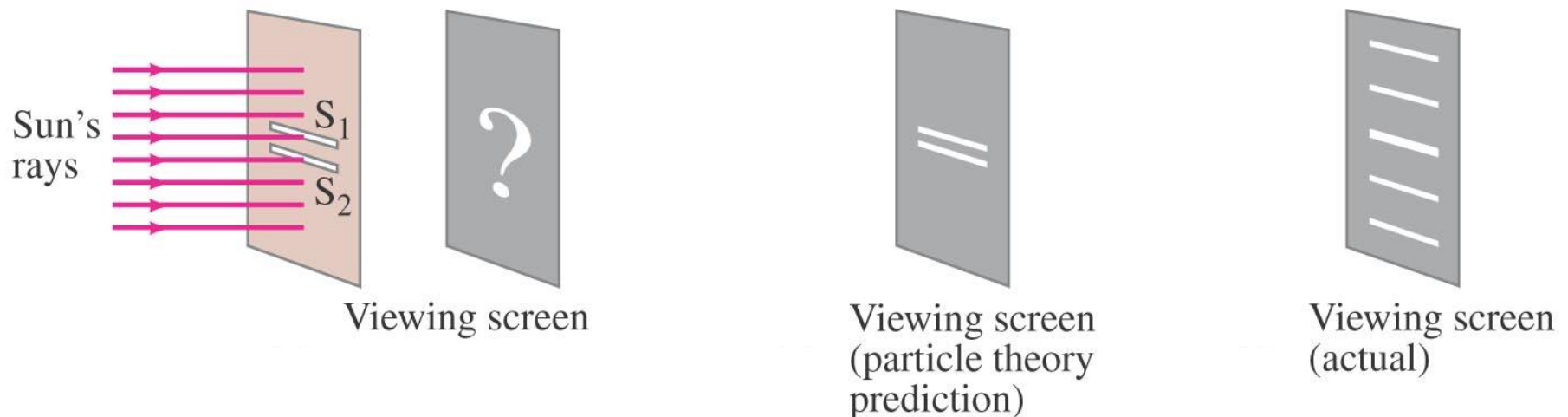
Οι οπτασίες της ασφάλτου οφείλονται στην μεταβολή του δείκτη διάθλασης του αέρα καθώς αυτός θερμαίνεται.



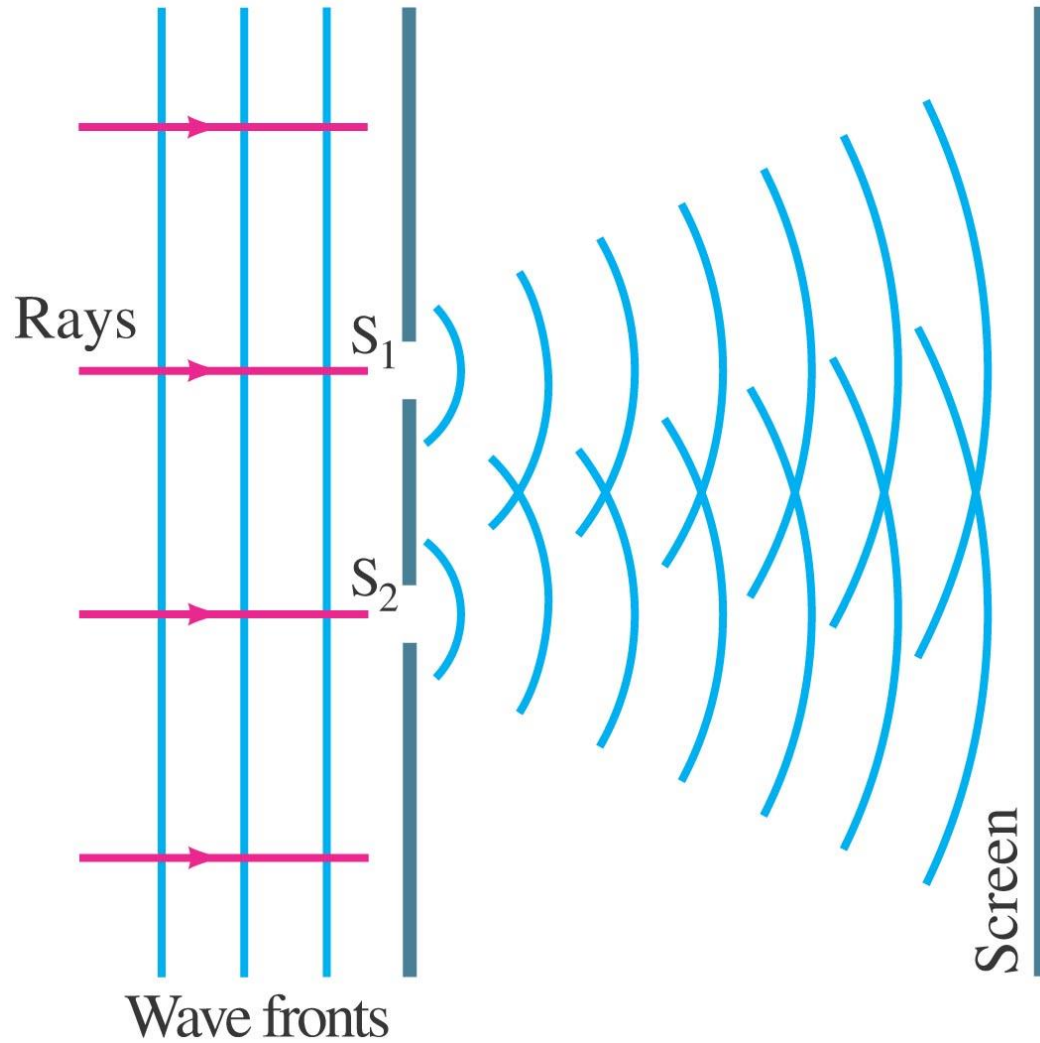
34-3 Συμβολή-Πείραμα Young

Η κυματική φύση του φωτός θα οδηγήσει σε φαινόμενα συμβολής.

Ένα πείραμα που επιβεβαιώνει την κυματική φύση του φωτός είναι το πείραμα Young:



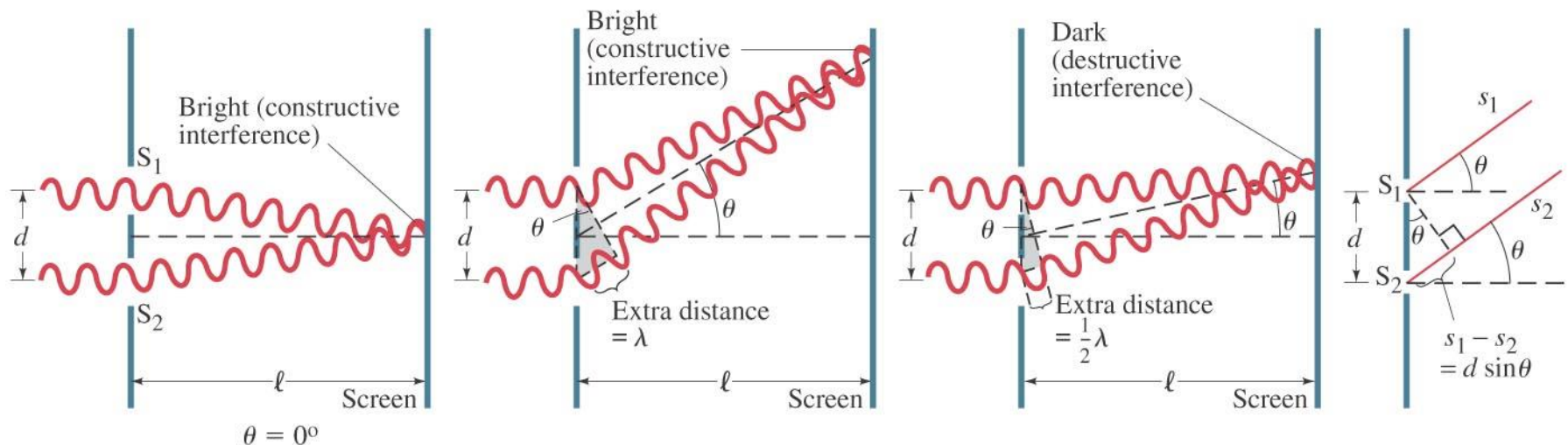
34-3 Συμβολή-Πείραμα Young



34-3 Συμβολή-Πείραμα Young

Η αιτία της συμβολής έγκειται στο γεγονός τα σημεία της οθόνης «ανίχνευσης», δεν ισαπέχουν από τις δύο σχισμές.

Κατά συνέπεια τα κύματα από τις δύο πηγές μπορεί να συμβάλουν εποικοδομητικά (φωτεινά σημεία) ή καταστρεπτικά (σκοτεινά σημεία)



34-3 Συμβολή-Πείραμα Young

Από την γεωμετρία του πειράματος βρίσκουμε:

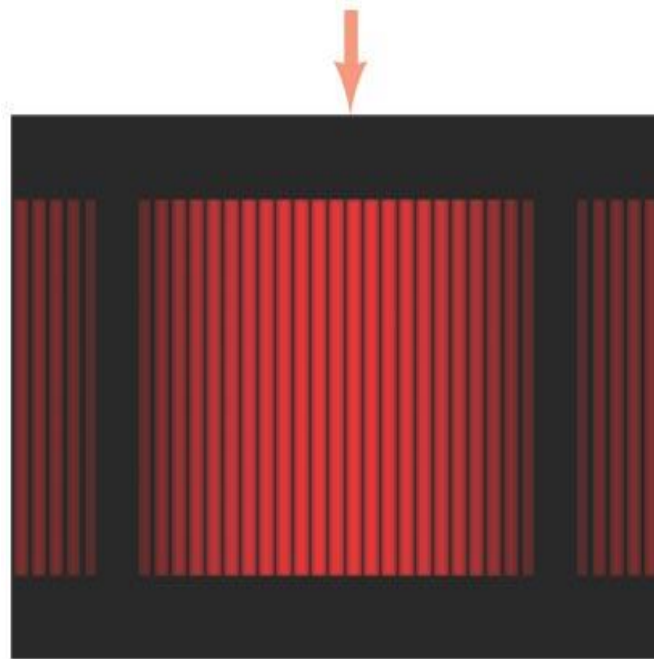
$$d \sin \theta = m\lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots. \quad \left[\begin{array}{c} \text{constructive} \\ \text{interference} \\ \text{(bright)} \end{array} \right]$$

και

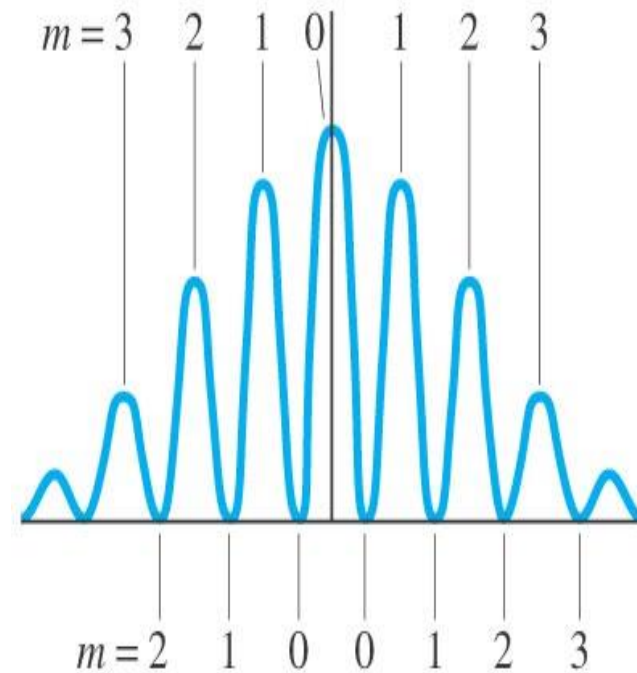
$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots. \quad \left[\begin{array}{c} \text{destructive} \\ \text{interference} \\ \text{(dark)} \end{array} \right]$$

34-3 Συμβολή-Πείραμα Young

Μεταξύ των κορυφών και κοιλάδων η ένταση του φωτός μεταβάλλεται «ομαλά».



Constructive interference



Destructive interference

34-3 Συμβολή-Πείραμα Young

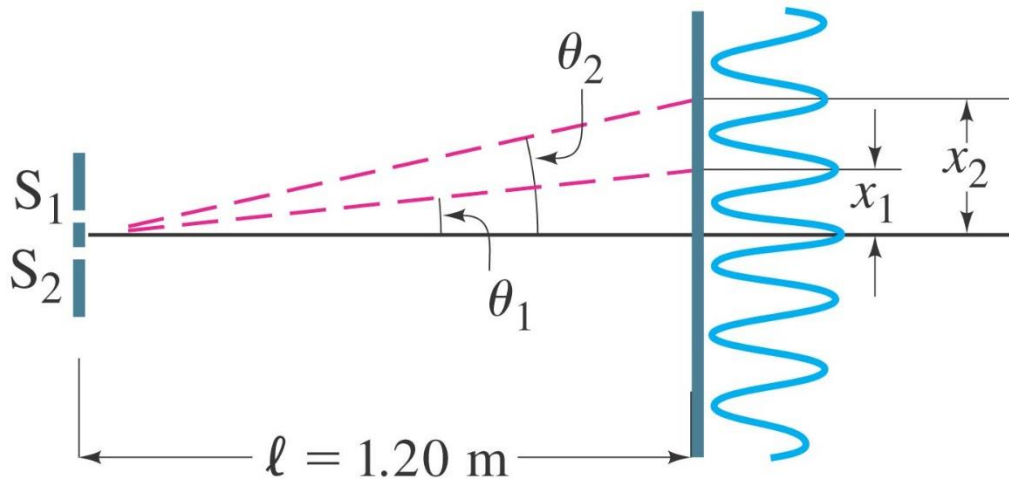
(a) Είναι άπειρα τα σκοτεινά και φωτεινά σημεία της οθόνης στο πείραμα Young;

(b) Οι αποστάσεις μεταξύ φωτεινών και σκοτεινών σημείων είναι σταθερή;

- a. ΟΧΙ, επειδή το $\sin \theta \leq 1$, η μέγιστη τιμή του m είναι ίση με το πλησιέστερο ακέραιο στο λόγο d/λ .
- b. Οι αποστάσεις αυξάνουν με την γωνία θ .

34-3 Συμβολή-Πείραμα Young

Δύο σχισμές απέχουν 0.100 mm και 1.20 m από την οθόνη ανίχνευσης. Για φως με μήκος κύματος $\lambda = 500 \text{ nm}$ βρείτε την απόσταση των κροσσών συμβολής (φωτεινών και σκοτεινών σημείων) στην οθόνη.



APPROACH The angular position of bright (constructive interference) fringes is found using Eq. 34–2a. The distance between the first two fringes (say) can be found using right triangles as shown in Fig. 34–10.

SOLUTION Given $d = 0.100 \text{ mm} = 1.00 \times 10^{-4} \text{ m}$, $\lambda = 500 \times 10^{-9} \text{ m}$, and $\ell = 1.20 \text{ m}$, the first-order fringe ($m = 1$) occurs at an angle θ given by

$$\sin \theta_1 = \frac{m\lambda}{d} = \frac{(1)(500 \times 10^{-9} \text{ m})}{1.00 \times 10^{-4} \text{ m}} = 5.00 \times 10^{-3}.$$

This is a very small angle, so we can take $\sin \theta \approx \theta$, with θ in radians. The first-order fringe will occur a distance x_1 above the center of the screen (see Fig. 34–10), given by $x_1/\ell = \tan \theta_1 \approx \theta_1$, so

$$x_1 \approx \ell\theta_1 = (1.20 \text{ m})(5.00 \times 10^{-3}) = 6.00 \text{ mm}.$$

The second-order fringe ($m = 2$) will occur at

$$x_2 \approx \ell\theta_2 = \ell \frac{2\lambda}{d} = 12.0 \text{ mm}$$

above the center, and so on. Thus the lower order fringes are 6.00 mm apart.

NOTE The spacing between fringes is essentially uniform until the approximation $\sin \theta \approx \theta$ is no longer valid.

34-3 Συμβολή-Πείραμα Young

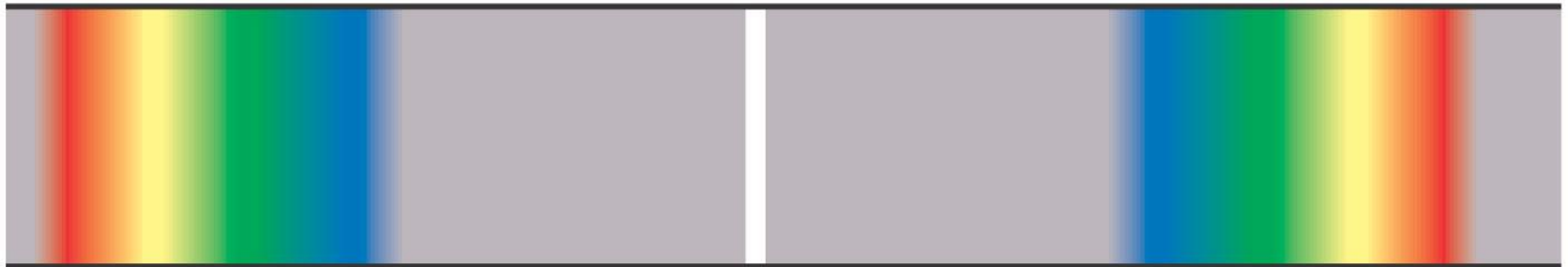
(a) Εάν στο προηγούμενο παράδειγμα το μήκος κύματος γίνει 700 nm, πως αλλάζουν οι κροσσοί συμβολής; (b) Εάν το μήκος κύματος παραμείνει το ίδιο αλλά η απόσταση μεταξύ των σχισμών αυξηθεί τι θα συμβεί τώρα;

RESPONSE (a) When λ increases in Eq. 34-2a but d stays the same, then the angle θ for bright fringes increases and the interference pattern spreads out. (b) Increasing the slit spacing d reduces θ for each order, so the lines are closer together.

34-3 Συμβολή-Πείραμα Young

Βλέπουμε ότι για λευκό φως, με εξαίρεση τον κεντρικό κροσσό, όλοι οι άλλοι κροσσοί περιέχουν τα χρώματα της ίριδος.

White



← 2.0 mm →

← 3.5 mm →

34-3 Συμβολή-Πείραμα Young

Λευκό φως περνάει από σχισμές με απόσταση 0.50 mm μεταξύ τους και αναλύεται σε οθόνη που βρίσκεται σε απόσταση 2.5 m από τις σχισμές. Η πρώτη τάξη κροσσό μοιάζει με ουράνιο τόξο με το μωβ και το κόκκινο στις δύο άκρες. Το μωβ και το κόκκινο απέχουν 2.0 mm και 3.5 mm αντίστοιχα από τον λευκό κεντρικό κροσσό. Βρείτε τα μήκη κύματος των δύο χρωμάτων.

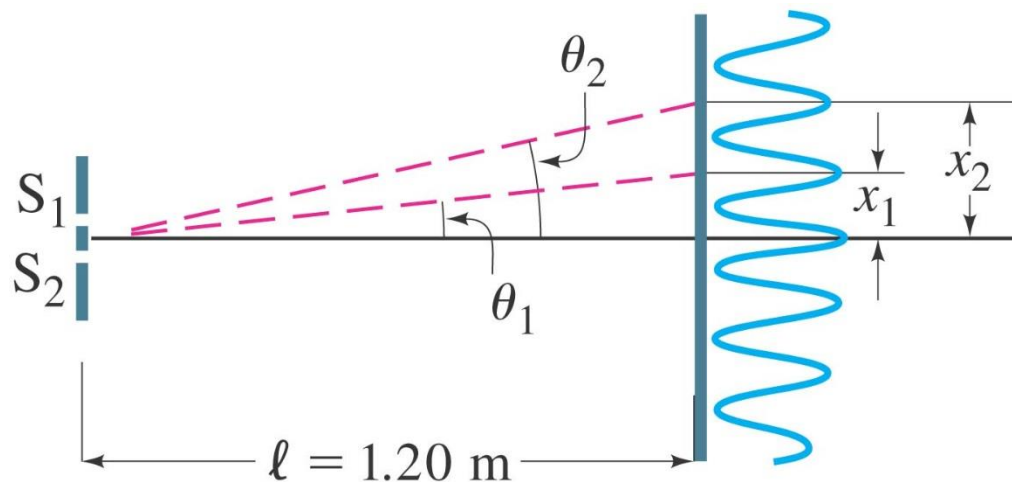
APPROACH We find the angles for violet and red light from the distances given and the diagram of Fig. 34–10. Then we use Eq. 34–2a to obtain the wavelengths. Because 3.5 mm is much less than 2.5 m, we can use the small-angle approximation.

SOLUTION We use Eq. 34–2a with $m = 1$ and $\sin \theta \approx \tan \theta \approx \theta$. Then for violet light, $x = 2.0$ mm, so (see also Fig. 34–10)

$$\lambda = \frac{d \sin \theta}{m} \approx \frac{d \theta}{m} \approx \frac{d}{m} \frac{x}{\ell} = \left(\frac{5.0 \times 10^{-4} \text{ m}}{1} \right) \left(\frac{2.0 \times 10^{-3} \text{ m}}{2.5 \text{ m}} \right) = 4.0 \times 10^{-7} \text{ m},$$

or 400 nm. For red light, $x = 3.5$ mm, so

$$\lambda = \frac{d}{m} \frac{x}{\ell} = \left(\frac{5.0 \times 10^{-4} \text{ m}}{1} \right) \left(\frac{3.5 \times 10^{-3} \text{ m}}{2.5 \text{ m}} \right) = 7.0 \times 10^{-7} \text{ m} = 700 \text{ nm}.$$



34-4 Ένταση των κροσσών Συμβολής

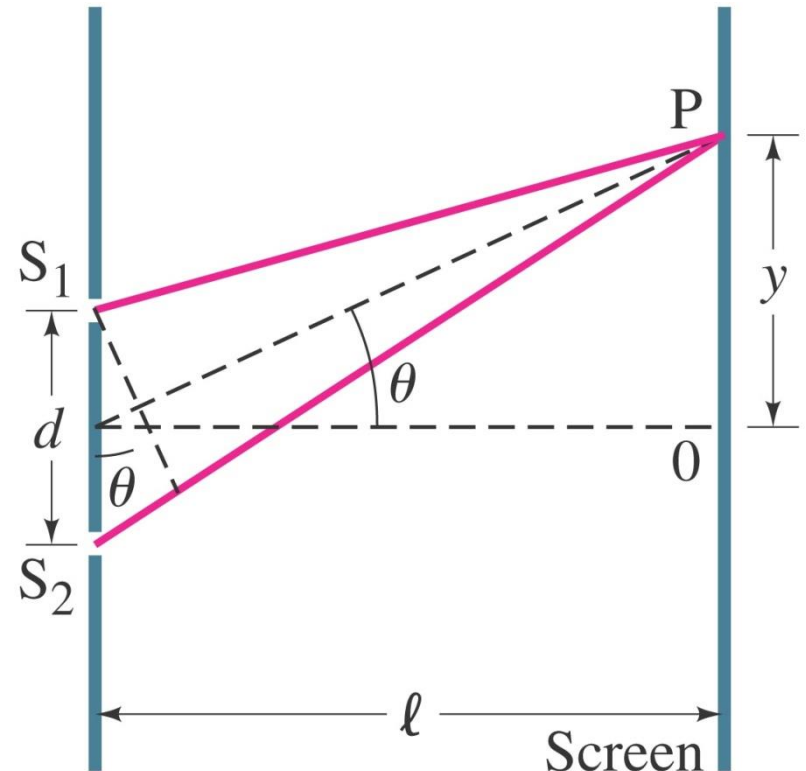
Το ηλεκτρικό πεδίο στο σημείο P δίδεται από τις σχέσεις

$$E_1 = E_{10} \sin \omega t$$

$$E_2 = E_{20} \sin(\omega t + \delta)$$

όπου

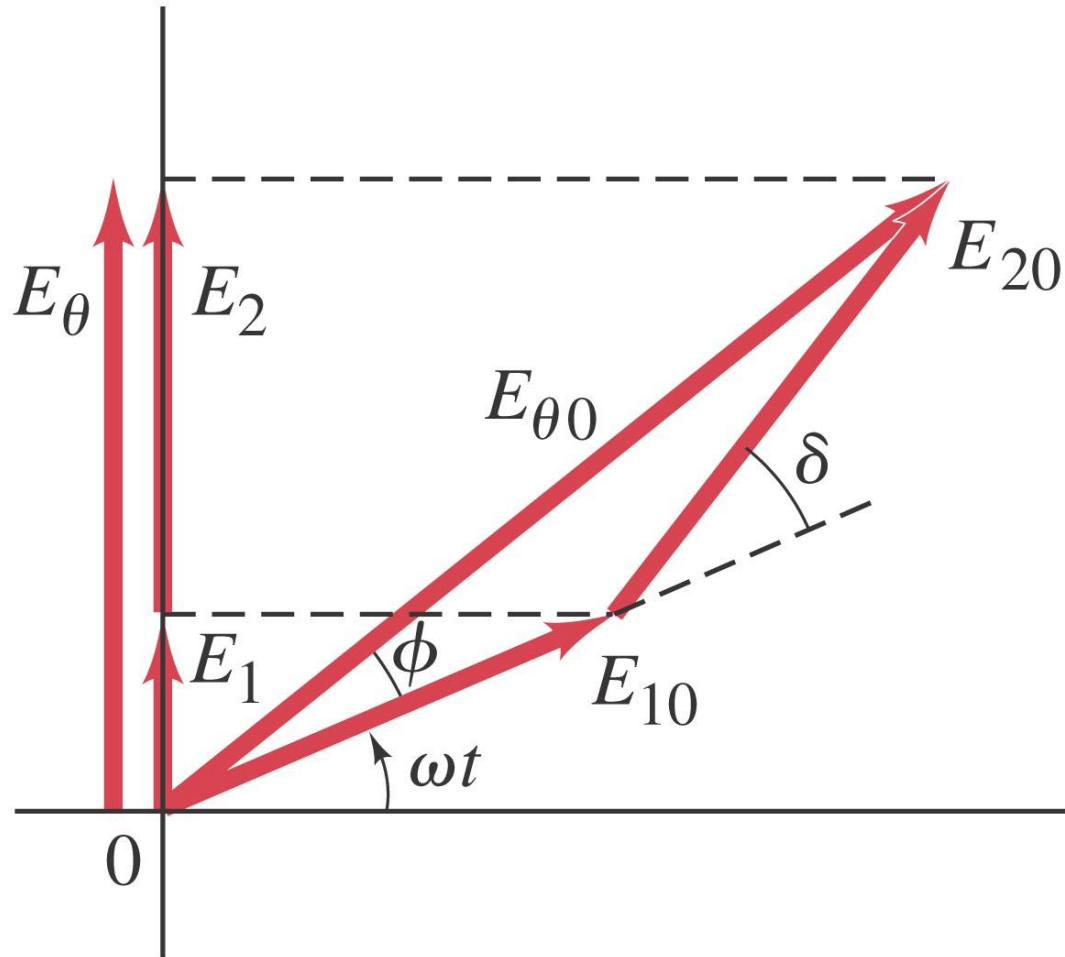
$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta.$$



34-4 Ένταση των κροσσών Συμβολής

Το διανυσματικό άθροισμα των δύο πεδίων μας δίνει (όταν $E_{10} = E_{20}$):

$$E_{\theta} = 2E_0 \cos \frac{\delta}{2} \sin \left(\omega t + \frac{\delta}{2} \right).$$



34-4 Ένταση των κροσσών Συμβολής

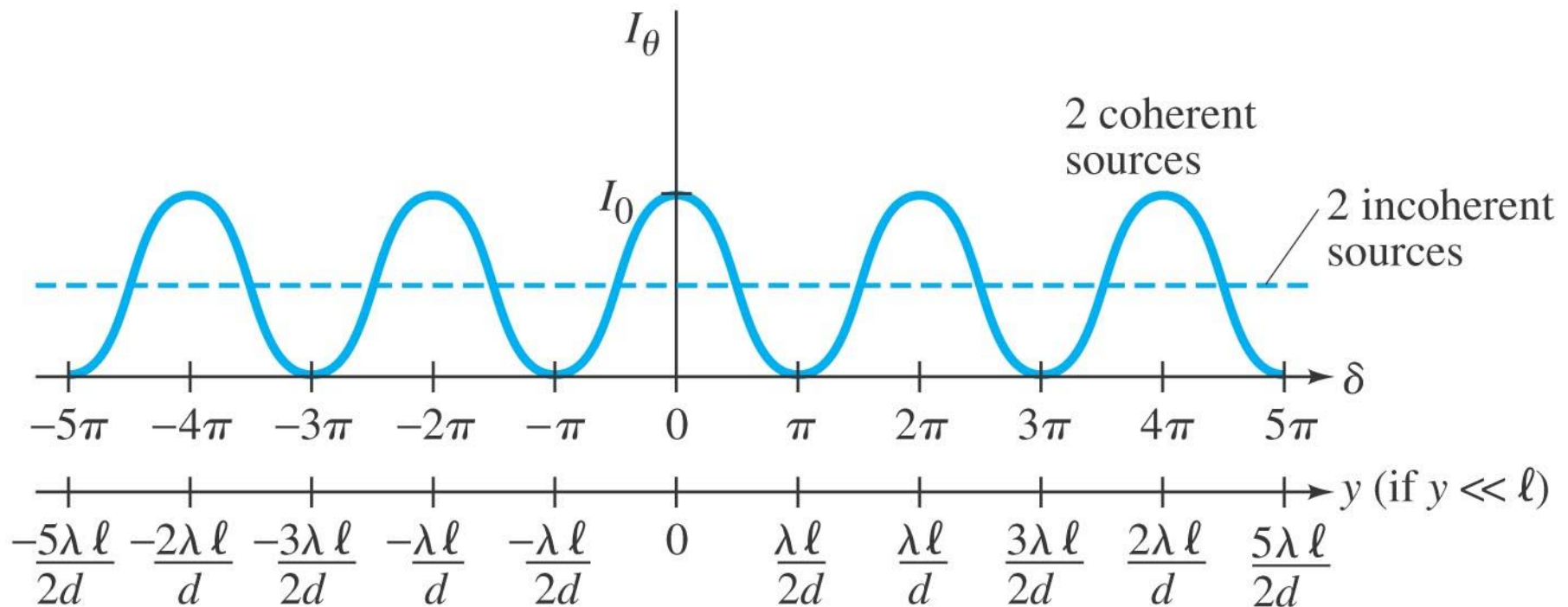
Η μέση ένταση είναι ανάλογη του τετραγώνου του πεδίου:

$$\begin{aligned} I_{\theta} &= I_0 \cos^2 \frac{\delta}{2} \\ &= I_0 \cos^2 \left(\frac{\pi d \sin \theta}{\lambda} \right) \end{aligned}$$

$$I_{\theta} = I_0 \left[\cos \left(\frac{\pi d}{\lambda \ell} y \right) \right]^2. \quad [y \ll \ell, d \ll \ell]$$

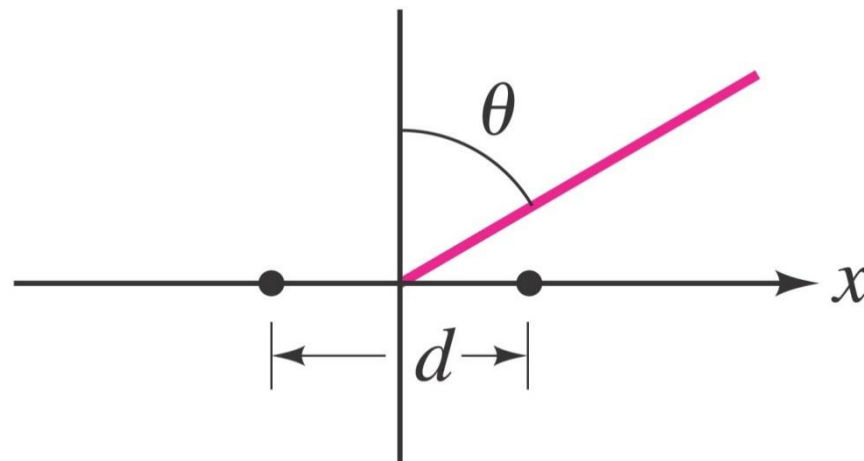
34-4 Ένταση των κροσμών Συμβολής

Το σχήμα δείχνει την εξάρτηση της έντασης από την γωνία.



34-4 Ένταση των κροσσών Συμβολής

Δύο κεραίες ραδιοφώνου απέχουν μεταξύ τους d . Εκπέμπουν σε συμφωνία (ίδια σταθερή φάση) ακτινοβολία με ένταση I_0 και μήκος κύματος λ . (a) Βρείτε την ένταση σαν συνάρτηση της γωνίας θ για μεγάλες αποστάσεις από τις κεραίες. (b) Για $d = \lambda$, βρείτε το I και βρείτε τις κατευθύνσεις όπου έχουμε μέγιστη με ελάχιστη ένταση. (c) Επαναλάβετε το (b) για $d = \lambda/2$.



APPROACH This setup is similar to Young's double-slit experiment.

SOLUTION (a) Points of constructive and destructive interference are still given by Eqs. 34-2a and b, and the net intensity as a function of θ is given by Eq. 34-6. (b) We let $d = \lambda$ in Eq. 34-6, and find for the intensity,

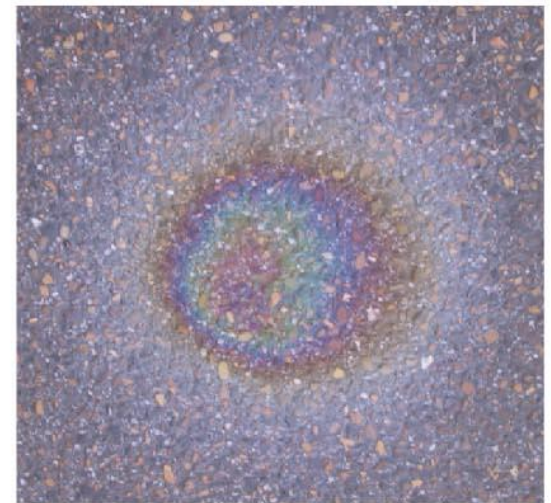
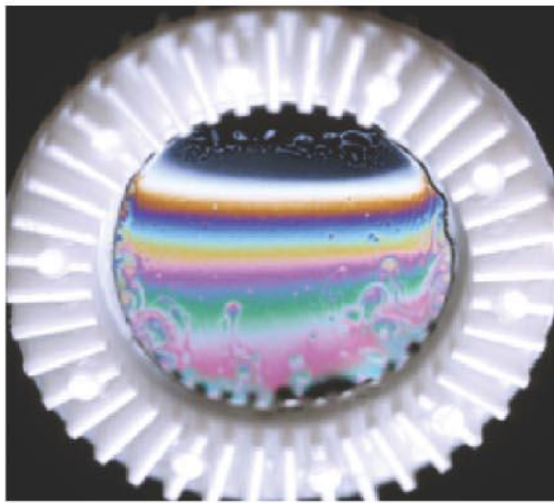
$$I = I_0 \cos^2(\pi \sin \theta).$$

I is a maximum, equal to I_0 , when $\sin \theta = 0, 1,$ or -1 , meaning $\theta = 0, 90^\circ, 180^\circ,$ and 270° . I is zero when $\sin \theta = \frac{1}{2}$ and $-\frac{1}{2}$, for which $\theta = 30^\circ, 150^\circ, 210^\circ,$ and 330° .

(c) For $d = \lambda/2$, I is maximized for $\theta = 0$ and 180° , and minimized for 90° and 270° .

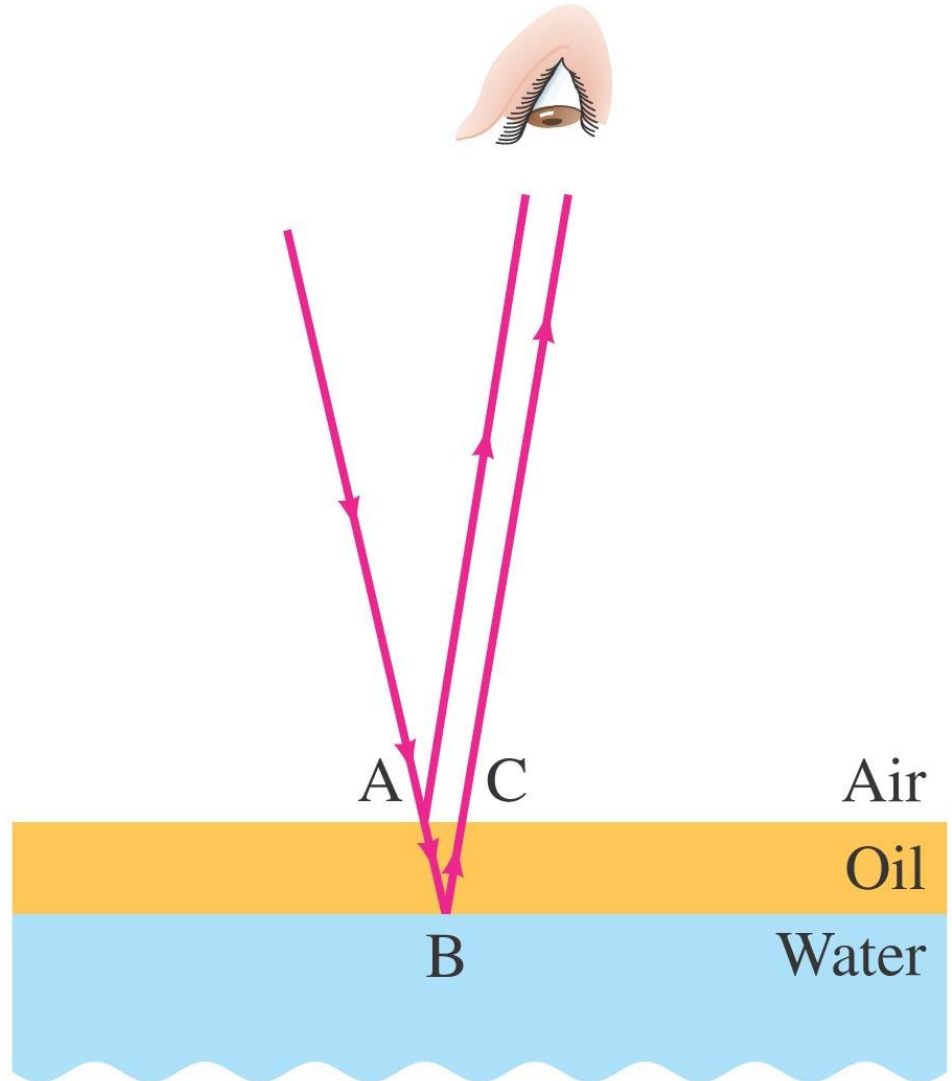
34-5 Συμβολή λεπτών Υμενίων

Όταν πάνω σε μια επιφάνεια υπάρχει ένα πολύ λεπτό στρώμα (υμένιο) κάποιου υλικού, το πάχος του οποίου είναι της τάξης μεγέθους του μήκους κύματος της ακτινοβολίας, τότε η «ανάκλαση» από τις δύο επιφάνειες του υμενίου μπορεί να οδηγήσει σε συμβολή. Το φαινόμενο αυτό είναι εμφανές σε σαπουνόφουσκες και σε κηλίδες από πετρέλαιο.



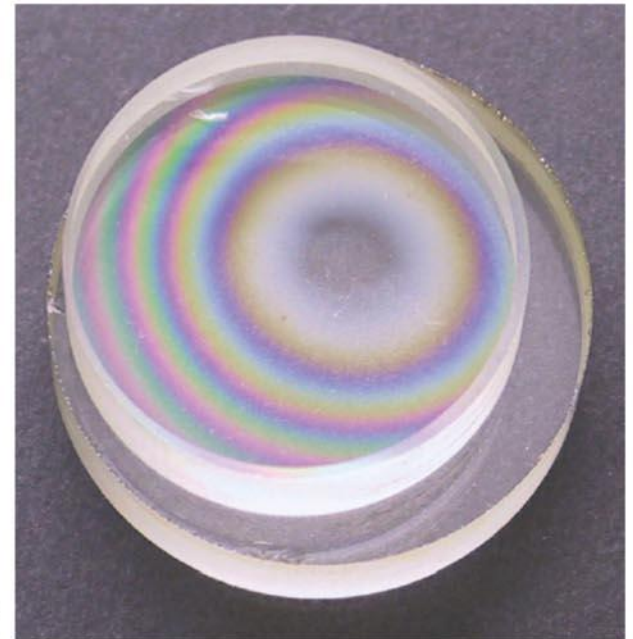
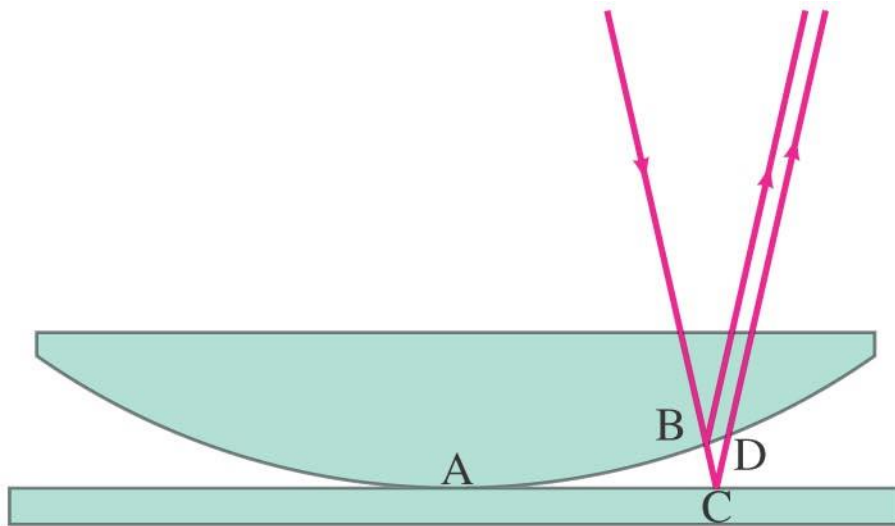
34-5 Συμβολή λεπτών Υμενίων

Το μήκος κύματος στο λάδι και στον αέρα θα είναι διαφορετικό και ανακλάσεις από τα σημεία A και B δυνητικά μπορεί να προκαλέσουν μεταβολή στην φάση της ανακλώμενης ακτινοβολίας.



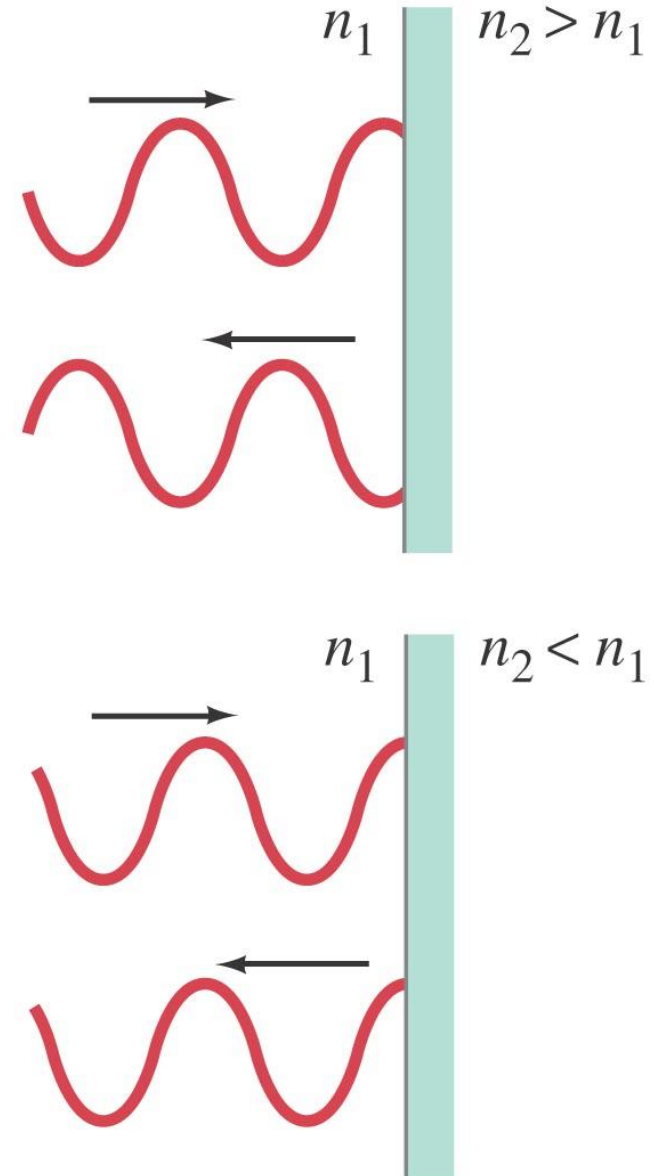
34-5 Συμβολή λεπτών Υμενίων

Δακτυλίδια του Newton: η διάταξη το σχήματος δημιουργεί κροσσούς συμβολής.



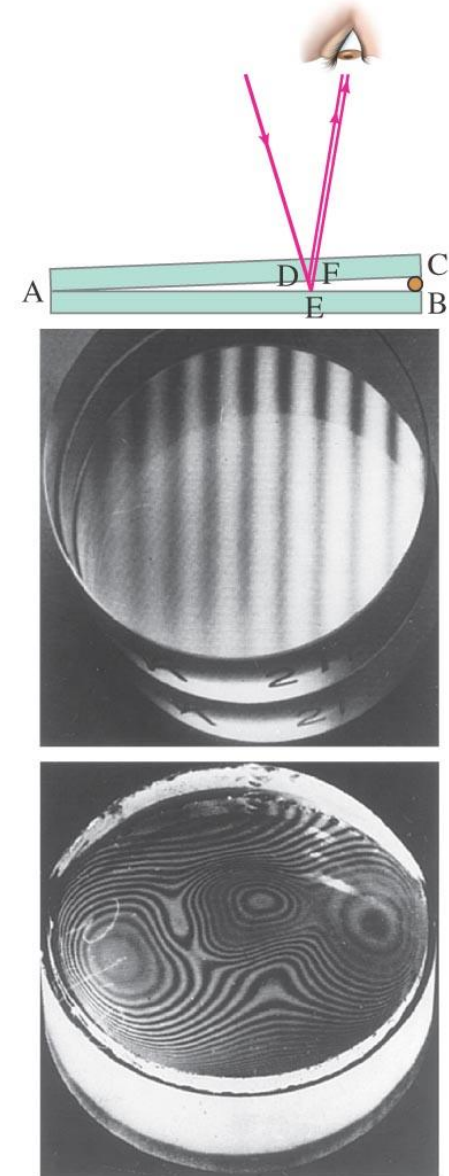
34-5 Συμβολή λεπτών Υμενίων

Μια δέσμη φωτός που ανακλάται από υλικό με δείκτη διάθλασης μεγαλύτερο από το μέσο διάδοσης, υπόκεινται σε αλλαγή φάσης κατά 180° ή $\frac{1}{2}$ κύκλο.



34-5 Συμβολή λεπτών Υμενίων

Ένα λεπτό σύρμα διαμέτρου $7.35 \times 10^{-3} \text{ mm}$ τοποθετείτε μεταξύ δύο επίπεδων παραθύρων από γυαλί. Φως στα 600 nm πέφτει κάθετα πάνω στα παράθυρα και δημιουργεί ένα σχηματισμό σκοτεινών και φωτεινών ταινιών. Πόσες ταινίες σχηματίζονται; Δίπλα στο σύρμα η πρώτη ταινία θα είναι σκοτεινή ή φωτεινή;



APPROACH We need to consider two effects: (1) path differences for rays reflecting from the two close surfaces (thin wedge of air between the two glass plates), and (2) the $\frac{1}{2}$ -cycle phase change at the lower surface (point E in Fig. 34–20a), where rays in air can enter glass. Because of the phase change at the lower surface, there will be a dark band (no reflection) when the path difference is $0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda$, and so on. Since the light rays are perpendicular to the plates, the extra path length equals $2t$, where t is the thickness of the air gap at any point.

SOLUTION Dark bands will occur where

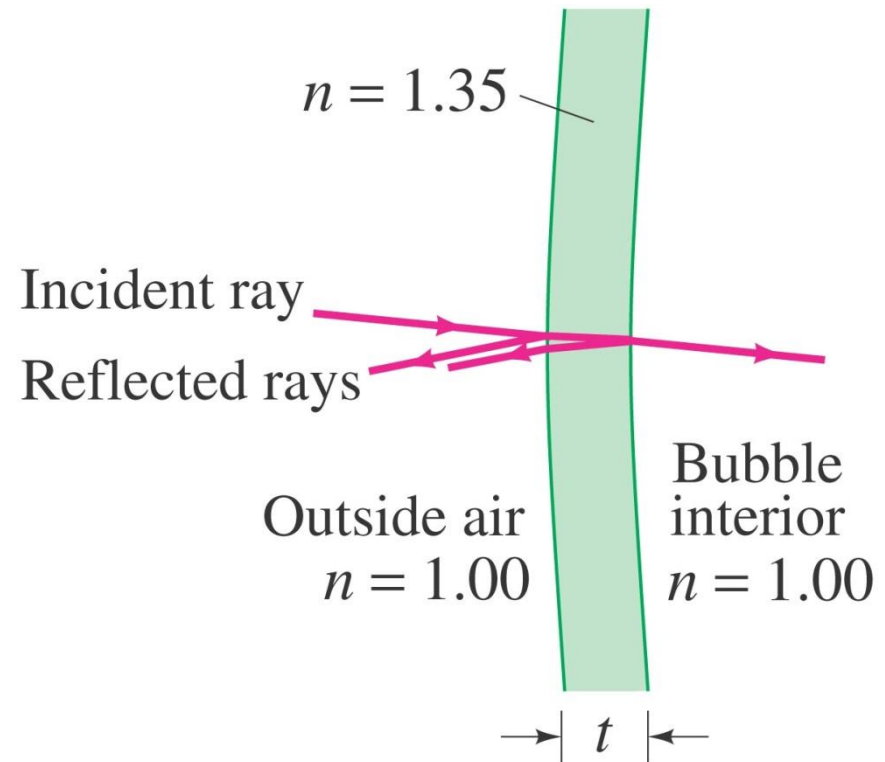
$$2t = m\lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

Bright bands occur when $2t = (m + \frac{1}{2})\lambda$, where m is an integer. At the position of the wire, $t = 7.35 \times 10^{-6}$ m. At this point there will be $2t/\lambda = (2)(7.35 \times 10^{-6} \text{ m})/(6.00 \times 10^{-7} \text{ m}) = 24.5$ wavelengths. This is a “half integer,” so the area next to the wire will be bright. There will be a total of 25 dark lines along the plates, corresponding to path lengths of $0\lambda, 1\lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots, 24\lambda$, including the one at the point of contact A ($m = 0$). Between them, there will be 24 bright lines plus the one at the end, or 25.

NOTE The bright and dark bands will be straight only if the glass plates are extremely flat. If they are not, the pattern is uneven, as in Fig. 34–20c. Thus we see a very precise way of testing a glass surface for flatness. Spherical lens surfaces can be tested for precision by placing the lens on a flat glass surface and observing Newton’s rings (Fig. 34–18b) for perfect circularity.

34-5 Συμβολή λεπτών Υμενίων

Μια σαπουνόφουσκα εμφανίζεται πράσινη ($\lambda = 540 \text{ nm}$). Εάν ο δείκτης διάθλασης είναι $n = 1.35$ ποιο είναι το ελάχιστο πάχος της σαπουνόφουσκας;



APPROACH Assume the light is reflected perpendicularly from the point on a spherical surface nearest the viewer, Fig. 34–21. The light rays also reflect from the inner surface of the soap bubble film as shown. The path difference of these two reflected rays is $2t$, where t is the thickness of the soap film. Light reflected from the first (outer) surface undergoes a 180° phase change (index of refraction of soap is greater than that of air), whereas reflection at the second (inner) surface does not. To determine the thickness t for an interference maximum, we must use the wavelength of light in the soap ($n = 1.35$).

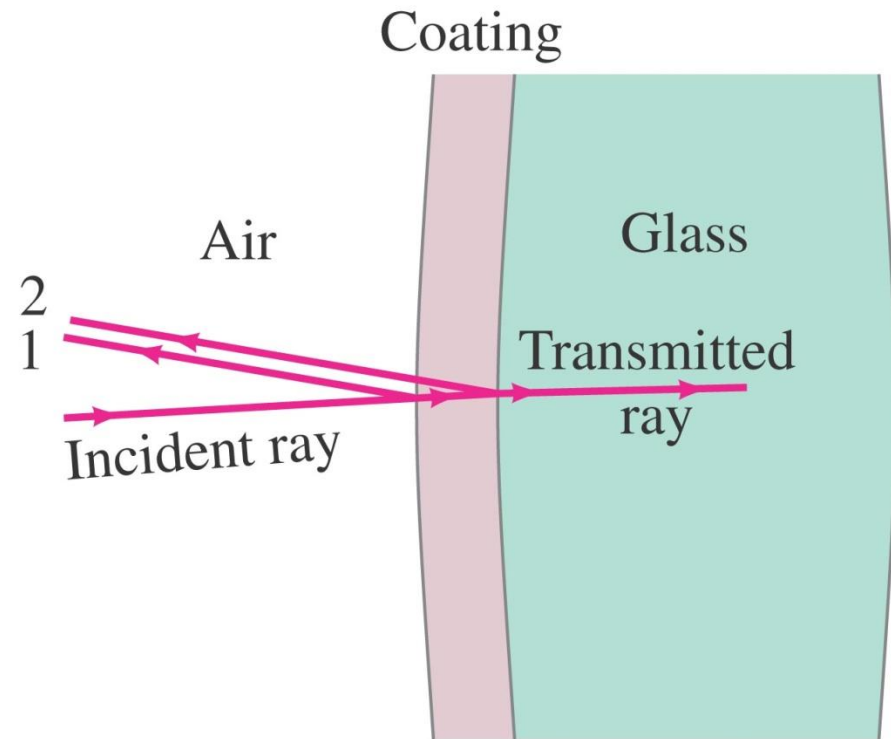
SOLUTION The 180° phase change at only one surface is equivalent to a $\frac{1}{2}\lambda$ path difference. Therefore, green light is bright when the minimum path difference equals $\frac{1}{2}\lambda_n$. Thus, $2t = \lambda/2n$, so

$$t = \frac{\lambda}{4n} = \frac{(540 \text{ nm})}{(4)(1.35)} = 100 \text{ nm}.$$

This is the smallest thickness; but the green color is more likely to be seen at the *next* thickness that gives constructive interference, $2t = 3\lambda/2n$, because other colors would be more fully cancelled by destructive interference. The more likely thickness is $3\lambda/4n = 300 \text{ nm}$, or even $5\lambda/4n = 500 \text{ nm}$. Note that green is seen in air, so $\lambda = 540 \text{ nm}$ (not λ/n).

34-5 Συμβολή λεπτών Υμενίων

Πόσο είναι το πάχος μιας επικάλυψης ενός οπτικού στοιχείου από MgF_2 με $n = 1.38$ σχεδιασμένο ώστε να ελαχιστοποιεί κάθετες ανακλάσεις κοντά στα 550 nm ; Το υπόστρωμα είναι γυαλί με $n = 1.50$.



SOLUTION

- 1. Interference effects.** Consider two rays reflected from the front and rear surfaces of the coating on the lens as shown in Fig. 34–23. The rays are drawn not quite perpendicular to the lens so we can see each of them. These two reflected rays will interfere with each other.
- 2. Constructive interference.** We want to eliminate reflected light, so we do not consider constructive interference.
- 3. Destructive interference.** To eliminate reflection, we want reflected rays 1 and 2 to be $\frac{1}{2}$ cycle out of phase with each other so that they destructively interfere. The phase difference is due to the path difference $2t$ traveled by ray 2, as well as any phase change in either ray due to reflection.
- 4. Reflection phase shift.** Rays 1 and 2 *both* undergo a change of phase by $\frac{1}{2}$ cycle when they reflect from the coating's front and rear surfaces, respectively (at both surfaces the index of refraction increases). Thus there is no net change in phase due to the reflections. The net phase difference will be due to the extra path $2t$ taken by ray 2 in the coating, where $n = 1.38$. We want $2t$ to equal $\frac{1}{2}\lambda_n$ so that destructive interference occurs, where $\lambda_n = \lambda/n$ is the wavelength in the coating. With $2t = \lambda_n/2 = \lambda/2n$, then

$$t = \frac{\lambda_n}{4} = \frac{\lambda}{4n} = \frac{(550 \text{ nm})}{(4)(1.38)} = 99.6 \text{ nm}.$$

NOTE We could have set $2t = (m + \frac{1}{2})\lambda_n$, where m is an integer. The smallest thickness ($m = 0$) is usually chosen because destructive interference will occur over the widest angle.

NOTE Complete destructive interference occurs only for the given wavelength of visible light. Longer and shorter wavelengths will have only partial cancellation.

34-6 Συμβολόμετρο Michelson

Το συμβολόμετρο Michelson βασίζεται σε ένα διαχωριστή δέσμης (beam splitter), που έχει την ιδιότητα να ανακλά περίπου το 50% της δέσμης και να περνάει το υπόλοιπο.

