

10. FIZIKALNA OPTIKA

10.1. UVOD

Do sada smo u svojim promatranjima svjetlosnih pojava samu svjetlost predočavali zrakama koje izlaze iz izvora svjetlosti te se šire homogenim prozirnim sredstvom kao pravci. Također su se zrake lomile na granici dvaju prozirnih sredstava i odbijale na zrcalima. Znači da smo se služili:

- modelom zrake svjetlosti
- zakonima pravocrtnog širenja
- zakonima odbijanja i loma svjetlosti

Taj dio optike se zove geometrijska optika.

No ta geometrijska optika ne može protumačiti optičke pojave poput difrakcije ili ogiba, interferencije i polarizacije jer se za njih mora uzeti u obzir priroda svjetlosti, odn. pripisati svjetlosti određena svojstva.

Time se bavi FIZIKALNA OPTIKA.

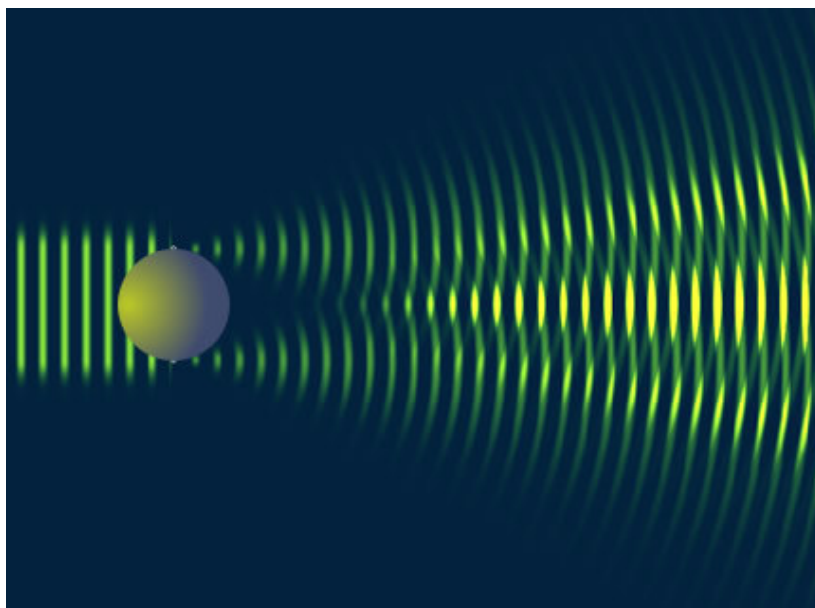
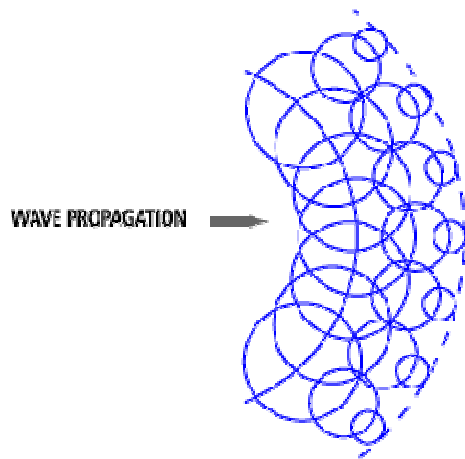
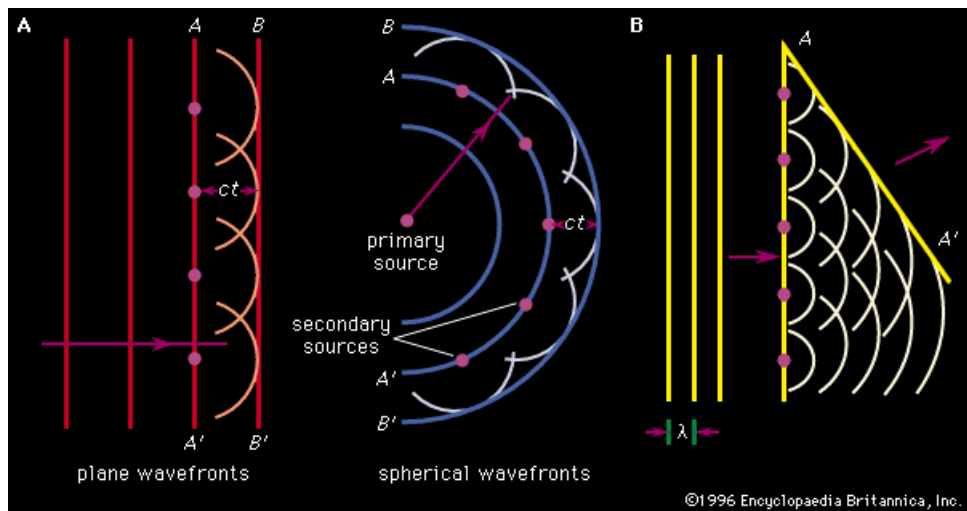
Još u Newtonovo doba postojale su dvije pretpostavke o prirodi svjetlosti:

- prva da je svjetlost struja čestica (korpuskularna teorija)
- druga da je svjetlost valna pojava (undulatorna teorija)

Prema korpuskularnoj teoriji čestice svjetlosti izlijeću iz izvora i onda velikom brzinom putuju kroz prozirna sredstva tako da su staze zapravo pravci, odnosno zrake svjetlosti. Razmišljanja vezana za korpuskularnu teoriju svjetlosti iznio je Isaac Newton u svom djelu Optics (tiskano tek 1704.). Newtonov suvremenik Robert Hooke je zastupao valnu teoriju svjetlosti, koju je razvio Huygens. Prema njemu je točka koja svijetli, potresala sredstvo kojim su se nakon toga širili valovi svjetlosti. Širenje valova je Christiaan Huygens zamislio tako da je svaka točka u fronti vala izvor novog elementarnog vala koji se širi u smjeru napredovanja vala.

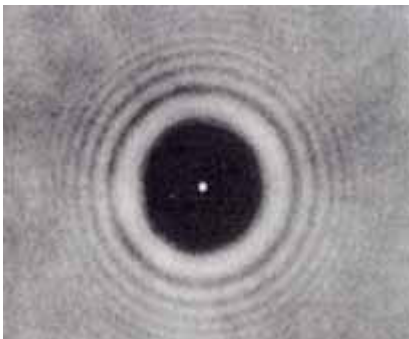
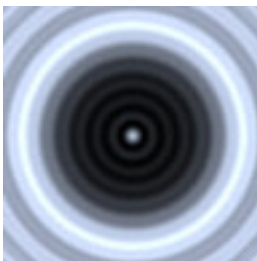
http://www.walter-fendt.de/ph14cr/huygenspr_cr.htm

Nova valna fronta nastaje kao ovojnica (anvelopa) elementarnih valova.



Valnu teoriju je usavršio Thomas Young pretpostavkom da pobude u valu slijede jedna drugu u pravilnim razmacima (kao npr. brijeg i dol vala na površini vode). Valnu teoriju svjetlosti je potvrdila i pojava ogiba zbog kojeg svjetlost ipak može „obići ugao“. Augustin Jean Fresnel je matematički razradio valnu teoriju svjetlosti. Pomoću nje je Simeon Denis Poisson izračunao da bi se u sredini sjene, koju baca neprozirna kugla kad je rasvijetlimo svjetlošću iz točkastog izvora, trebala pojaviti svijetla točka. Unatoč tome što se taj rezultat činio apsurdnim, Francois Jean Dominique Arago je izveo pokus prema Poissonovoj zamisli i potvrdio Poissonov rezultat proračuna.

Izvest ćemo taj pokus tako što ćemo običnim okom motriti ogib svjetlosti koji je karakteristična pojava za sve valove. Pokus je poznat pod nazivom POISSONOVA SVIJETLA MRLJA i njime je potvrđena valna priroda svjetlosti.



<http://demonstrations.wolfram.com/PoissonSpot/>

Znači, geometrijska optika ustupa mjesto fizikalnoj optici, to jest valnoj prirodi svjetlosti kad su dimenzije uređaja i objekata na koje svjetlost naizlazi usporedive s valnom duljinom svjetlosti.

Promatrat ćemo svjetlost kao elektromagnetski val koji se širi kroz prostor brzinom koja je jednaka brzini svjetlosti c .

Električna komponenta EM vala zadovoljava valnu jednadžbu:

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{ako se val širi u smjeru } x\text{-osi})$$

Rješenje je: $\vec{E}(t, x) = \vec{E}_0 \cos(\omega t - kx)$ (može i sinusna funkcija)

Gdje je:

ω - kružna frekvencija	$\omega = 2\pi\nu$
\vec{E}_0 - vektor amplitude	
k - iznos valnog vektora \vec{k}	$k = 2\pi / \lambda$

Valni vektor ima samo komponentu u smjeru x -osi, to jest u smjeru gibanja EM vala:

$$k_x = k = 2\pi / \lambda$$

U valnoj jednadžbi imamo monokromatski (jedna frekvencija ν), progresivni, transverzalni val (električno polje je okomito na smjer širenja vala).

Brzina svjetlosti je onda: $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

U sredstvu indeksa loma n brzina svjetlosti je: $v = c / n$

Valnu jednadžbu zadovoljava i magnetsko polje oblika: $\vec{B}(t, x) = \vec{B}_0 \cos(\omega t - kx)$

Amplitude električnog i magnetskog polja su vezane relacijom: $|\vec{B}_0| = |\vec{E}_0| / c$

Magnetsko polje je okomito na električno polje i na smjer širenja vala.

Mi ćemo svjetlosne pojave opisivati pomoću električnog polja (uglavnom u skalarnom obliku) znajući da u svakom trenutku možemo konstruirati odgovarajući vektor magnetskog polja.

10.2. INTERFERENCIJA SVJETLOSTI

INTERFERENCIJA SVJETLOSTI nastaje kad se 2 ili više valova nađu u istoj točki prostora i onda superponiraju:

- KONSTRUKTIVNA INTERFERENCIJA nastaje kad se valovi superpozicijom pojačavaju
- DESTRUKTIVNA INTERFERENCIJA nastaje kad se valovi superpozicijom poništavaju

10.2.1. KOHERENTNI IZVORI

Da bi došlo do konstruktivne interferencije valova svjetlosti, razlika faza između dva vala mora biti vremenska konstanta, to jest nepromjenjiva u vremenu. Isti valovi znači da imaju iste frekvencije i amplitude.

Izvori svjetlosti koji daju takve valove svjetlosti se zovu KOHERENTNI IZVORI, a svjetlost je koherentna.

SLIKA: Superpozicija dvaju valova – Horvat: Fizika 2, sl. 9.1. str. 9-3

Neka u točku prostora P u nekom trenutku t_0 istovremeno dođu 2 vala:

$\vec{E}_1(t_0, x_1)$ i $\vec{E}_2(t_0, x_2)$, i u toj točki se superponiraju.

Skalarno pisano:

$$E_1(t_0, x_1) = E_0 \cos(\omega t_0 - k_1 x_1) = E_0 \cos\left[\omega\left(t_0 - \frac{k_1 x_1}{\omega}\right)\right] = E_0 \cos\left[\omega\left(t_0 - \frac{x_1}{\lambda_1 v}\right)\right] =$$
$$E_0 \cos\left[\omega\left(t_0 - \frac{x_1}{v_1}\right)\right] = E_0 \cos\left[\omega\left(t_0 - \frac{n_1 x_1}{c}\right)\right]$$

Analogno za E_2 :

$$E_2(t_0, x_2) = E_0 \cos\left[\omega\left(t_0 - \frac{n_2 x_2}{c}\right)\right]$$

Progresivni val $E_1(t, x_1)$ je do mjesta x putovao kroz sredstvo indeksa loma n_1 , a $E_2(t, x_2)$ kroz sredstvo indeksa loma n_2 .

Kod Fermatovog principa u geometrijskoj optici smo uveli OPTIČKI PUT $L = n l_{AB}$ (n je indeks loma sredstva).

Rezultantni val:

$$E(t_0, x) = E_1(t_0, x_1) + E_2(t_0, x_2) = E_0 \cos \left[\omega \left(t_0 - \frac{n_1 x_1}{c} \right) \right] + E_0 \cos \left[\omega \left(t_0 - \frac{n_2 x_2}{c} \right) \right] =$$

$$\left[2E_0 \cos \left(\frac{\omega}{2c} (n_1 x_1 - n_2 x_2) \right) \right] \cos \left(\omega t_0 - \frac{\omega}{2c} (n_1 x_1 + n_2 x_2) \right)$$

U uglatoj zagradi u zadnjem redu imamo amplitudu resultantnog vala – ovisi o razlici faza φ dva vala.

$$\varphi = \left[\left(\frac{\omega}{c} (n_1 x_1 - n_2 x_2) \right) \right] = \left(\frac{2\pi}{\lambda} (n_1 x_1 - n_2 x_2) \right) = \frac{2\pi}{\lambda} \delta \quad (*)$$

$$\delta = \text{optička razlika hoda} = \text{razlici optičkih putova} = n_1 x_1 - n_2 x_2 = L_1 - L_2$$

Ako oba vala prolaze istim sredstvom, optička razlika hoda jednaka je geometrijskoj razlici hoda Δ pomnoženoj s indeksom loma sredstva n :

$$\delta = n(x_1 - x_2) = n\Delta$$

Amplituda resultantnog vala:

$$E_{0r} = \left[2E_0 \cos \left(\frac{\omega}{2c} (n_1 x_1 - n_2 x_2) \right) \right] = 2E_0 \cos \frac{\varphi}{2} \quad \text{ovisi o optičkoj razlici hoda}$$

Maksimalno pojačanje svjetlosnih valova – maksimum intenziteta.

Potpuno poništenje svjetlosnih valova – minimum intenziteta.

Općenito intenzitet vala ovisi o kvadratu amplitude vala:

- 4 puta veći intenzitet ako je amplituda maksimalna, to jest: $\cos \frac{\varphi}{2} = 1$
- potpuno poništenje ako je: $\cos \frac{\varphi}{2} = 0$

Ako možemo dobiti svjetlost za koju je razlika faza φ jednaka (*) ne samo u t_0 već uvijek, to jest ako taj φ ne ovisi o vremenu, onda su izvori tih valova KOHERENTNI.

U točki P imamo interferenciju valova svjetlosti iz koherentnih izvora. Ako izvori nisu koherentni, resultantni intenzitet bit će jednak zbroju vadrata amplituda E_0 .

10.2.2. KONSTRUKT. I DESTRUKT. INTERFERENCIJA

$$\cos \frac{\varphi}{2} = \pm 1 \quad \text{Kad je intenzitet } I \text{ maksimalan}$$

$$\cos \frac{\varphi}{2} = 0 \quad \text{Kad je intenzitet } I \text{ minimalan}$$

Intenzitet I je proporcionalan kvadratu amplitude, to jest ovisi o $\cos^2 \frac{\varphi}{2}$.

MAKSIMALNI INTENZITET

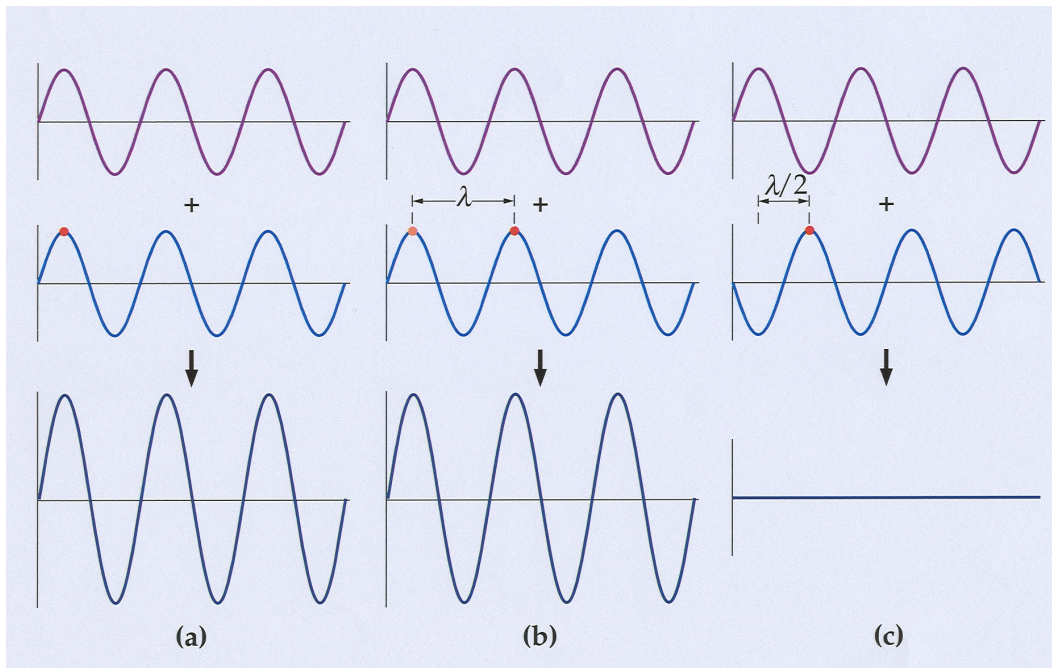
$$\cos \frac{\varphi}{2} = \pm 1 \quad \text{kad je } \frac{\varphi}{2} = m\pi, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots \text{ cjelobrojni višekratnik od } \pi$$

$$\delta_{\max} = m\lambda$$

MINIMALNI INTENZITET

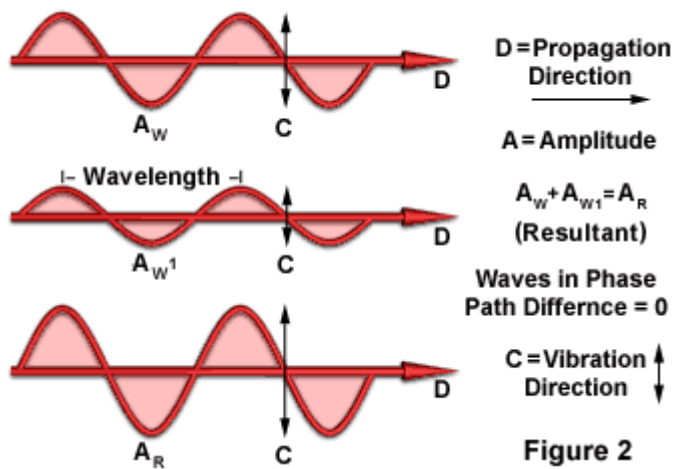
$$\cos \frac{\varphi}{2} = 0 \quad \text{kad je } \frac{\varphi}{2} = (2m+1)\pi/2, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$$

$$\delta_{\min} = (2m+1)\lambda/2$$

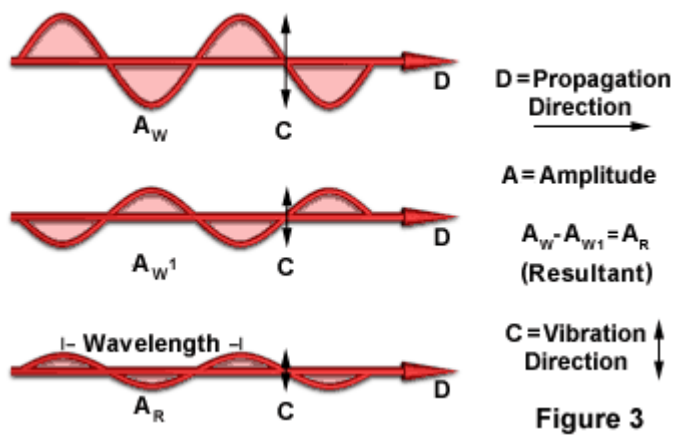


<http://www.olympusmicro.com/primer/java/interference/index.html>

Constructive Interference

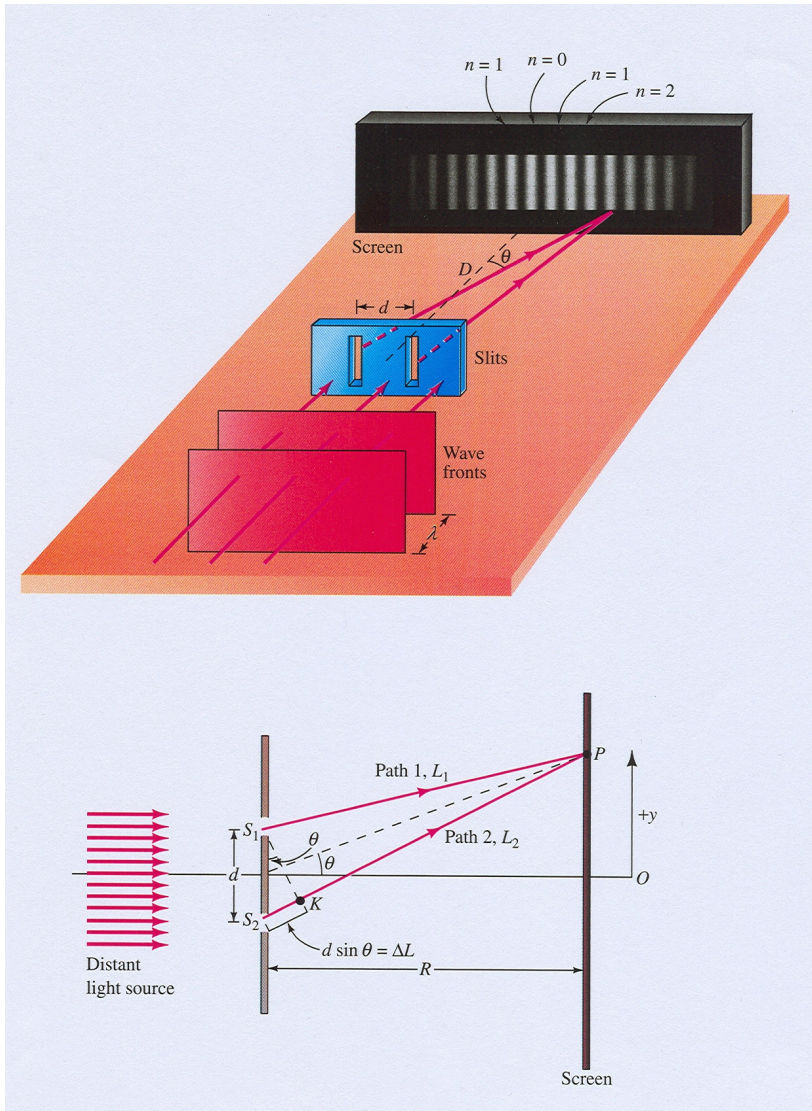


Destructive Interference



10.3. YOUNGOV POKUS

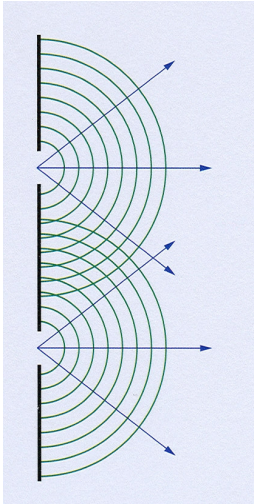
SLIKA: Youngov pokus na dvije pukotine, Horvat: Fizika 2, sl. 9.2, str. 9-4



Youngov pokus na dvije pukotine:

Problem dobivanja koherentnih izvora svjetlosti Young je riješio postavivši monokromatski izvor svjetlosti (frekvencije ν) na nekoj udaljenosti od zaslona s 2 pukotine.

Po Huygensovom principu svaka je pukotina postala izvor valova, odnosno dobili smo 2 koherentna izvora svjetlosti jer su valovi nastali u njima zapravo došli iz jednog izvora. Time je ispunjen uvjet koherentnih izvora da bi uopće moglo doći do interferencije.



Interferencijske pojave se promatraju na zastoru udaljenom D od zaslona s pukotinama (D je reda veličine nekoliko metara). d je razmak između pukotina (reda veličine 10^{-4} m). U točki P promatramo interferencijske pojave, a ona je udaljena y od mjesta gdje simetrala 2 pukotine probada zastor (točka O).

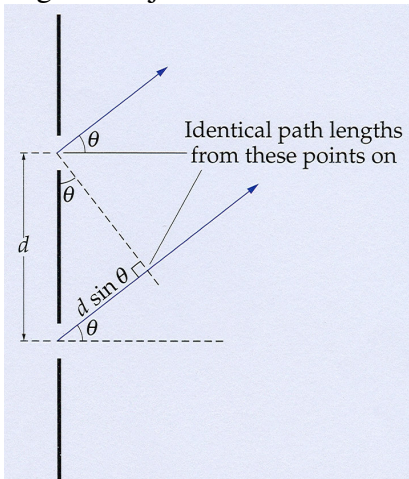
Rezultanta u točki P je:

$$E_P = \left[2E_0 \cos\left(\frac{\omega}{2c}(n_1x_1 - n_2x_2)\right) \right] \cos\left(\omega t_0 - \frac{\omega}{2c}(n_1x_1 + n_2x_2)\right)$$

S obzirom da obje zrake, odnosno oba vala prolaze kroz isto sredstvo, to jest zrak, onda pišemo $n_1 = n_2 = n \approx 1$.

Optička razlika hoda u Youngovom pokusu = geometrijskoj razlici hoda:
 $\delta = n(x_1 - x_2) = \Delta$

Iz geometrije slike imamo: $\Delta = d \sin \theta$ = geometrijska razlika hoda.



Kut θ je kut pod kojim vidimo P iz smjera pukotina.

Maksimum u P: $d \sin \theta_m = m\lambda$ $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$

Minimum u P: $d \sin \theta_m = (2m + 1)\lambda/2$ $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$

Maksimum i minimum ovise o položaju točke P, to jest o y:

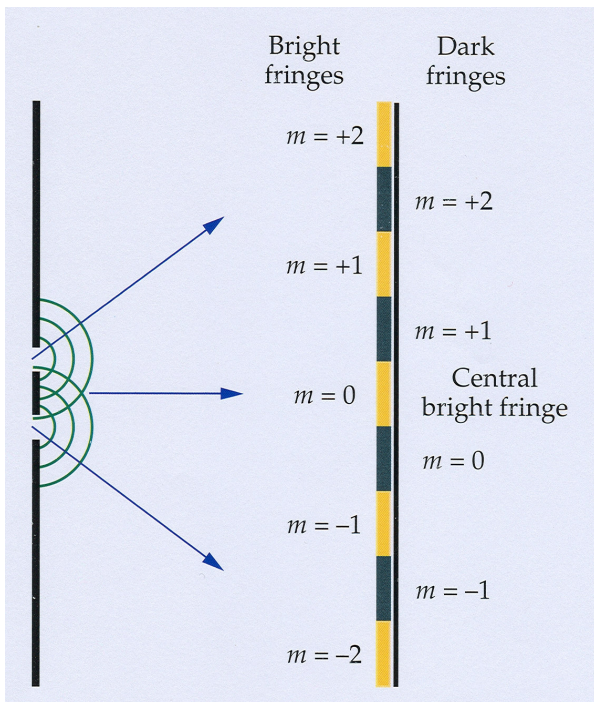
$\tan \theta = y/D$, odnosno za mali θ je $\tan \theta \approx \sin \theta \approx \theta$

Slijedi: $\Delta/d \approx y/D$

Položaji maksimuma: $y_{\max} = m \frac{\lambda D}{d}$ $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$

Položaji minimuma: $y_{\min} = (2m + 1) \frac{\lambda D}{2d}$ $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$

Maksimumi su jednoliko razmaknuti i ne ovise o kutu, to jest: $\Delta y_{\max} = \frac{\lambda D}{d}$



http://www.walter-fendt.de/ph14cr/doubleslit_cr.htm

INTENZITET KOD YOUNGOVOG POKUSA

Intenzitet je energija koju val prenese u jedinici vremena kroz jediničnu površinu [W/m^2].

Intenzitet je proporcionalan kvadratu elongacije, koja je proporcionalna 1/2 kvadrata amplitude.

1/2 dolazi od srednje vrijednosti \sin^2 ili \cos^2 .

$$I_0 \propto \frac{1}{2} E_0^2$$

$$I \propto E_0^2 = (2E_0)^2 \cos^2\left(\frac{\varphi}{2}\right)$$

Ako je maksimalni intenzitet I_0 , onda je intenzitet svjetlosti iz koherentnih izvora:

$$\begin{aligned} I_{koh} &= I_0 \cos^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) = I_0 \cos^2\left(\frac{1}{2} \frac{2\pi}{\lambda} \delta\right) = \left[I_0 \cos^2\left(\frac{\pi}{\lambda} (n_1 x_1 - n_2 x_2)\right) \right] = I_0 \cos^2\left(\frac{\pi \Delta}{\lambda}\right) = \\ &= I_0 \cos^2\left(\frac{\pi d \sin \theta}{\lambda}\right) \end{aligned}$$

Gdje je:

- razlika faza $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta$
- optička razlika hoda $\delta = |n_1 x_1 - n_2 x_2|$
- geometrijska razlika hoda $\Delta = |x_1 - x_2| = d \sin \theta$

SLIKA: Ovisnost intenziteta u Youngovom pokusu o y , $y = \frac{\lambda \sin \theta}{d}$, maksimumi na $\pm \pi, \pm 2\pi, \dots$, Horvat: Fizika 2, sl. 9.3, str. 9-7

<http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/interference/doubleslit/>

