

Kratka povijest shvaćanja svjetlosti

- u Staroj Grčkoj

- * Pitagora (VI./V. st. pr. Kr.): iz očiju onog koji gleda izlaze zrake
- * Demokrit (V./IV. st. pr. Kr.): tijela emitiraju magičnu supstanciju, svoje kopije
- * Platon (V./IV. st. pr. Kr.): kombinacija Pitagorinog i Demokritovog shvaćanja

- u Srednjem Vijeku

- * u IX./X. st. Alkindi i Alkazen opovrgavaju shvaćanje o emisiji
- * u XII. st. u Italiji slučajno izumljena leća
- * u XV. st. Giambattista della Porta, Leonardo da Vinci, Rene Descartes, Galileo Galilei, Johannes Kepler objasnili što radi leća, konstruirali optičke uređaje

- nakon Srednjeg Vijeka

- * Isaac Newton (1642.-1726.) i Christiaan Huygens (1629.-1695.) raspravljaju o naravi svjetlosti: je li korpuskularna ili valna?

Kratka povijest shvaćanja svjetlosti

- u XVIII. i XIX. st.

- * Augustin-Jean Fresnel i Thomas Young eksperimentalno opazili difrakciju, odbacili Newtonovu korpuskularnu teoriju
- * James Clerk Maxwell formulirao jednačbe elektromagnetizma, Heinrich Rudolf Hertz verificira princip emisije s antene

- u XX. st.

- * kvantna fizika objašnjava dualnost vala i čestice
- * izum holografije
- * izum lasera
- * razvoj optičkih aplikacija u računalstvu, komunikacijama, temeljnim znanostima, medicini, proizvodnji, zabavi

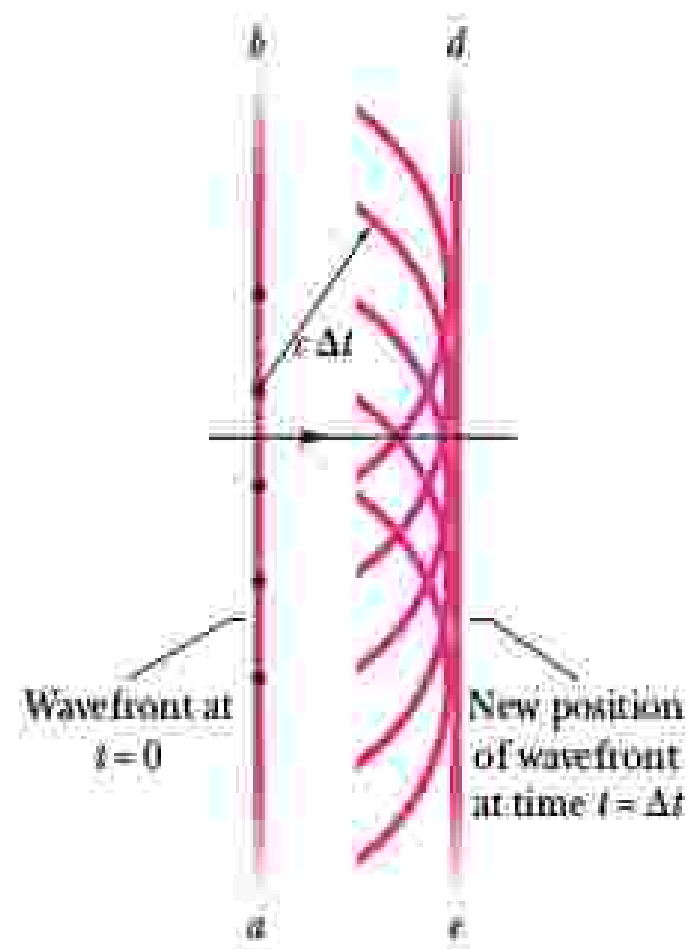
Optička interferencija

- interferencija valova svjetlosti = optička interferencija
- za razumjevanje osnova optičke interferencije potrebna nam je valna slika svjetlosti
- u prirodi: interferencijom reflektiranih valova nastaje plava boja krila leptira, iridescentna pera na repu pauna, boje na tankim filmovima, ...



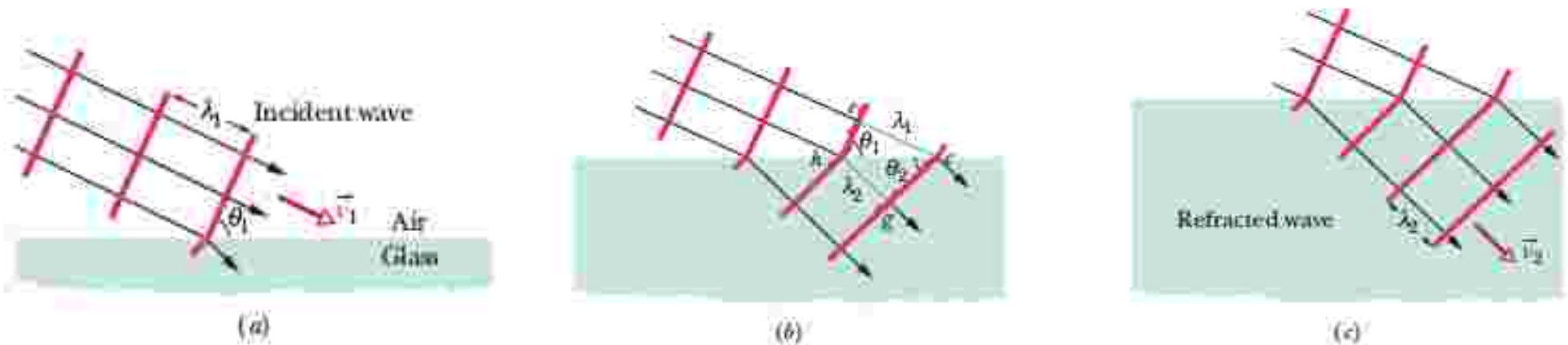
Huygensov princip

- 1678. Christian Huygens matematički opisao zakone odbijanja i loma kao valne pojave te dao fizikalni smisao indeksu loma
- Sve točke na valnoj fronti su točkasti izvori sekundarnih sferičnih valova. Nakon vremena t novi položaj valne fronte bit će na površini tangencijalnoj na sekundarne valove.
- pomoću ove Huygensove konstrukcije možemo pronaći gdje će se valna fronta nalaziti u budućnosti



Huygensov princip – zakon loma ili refrakcije

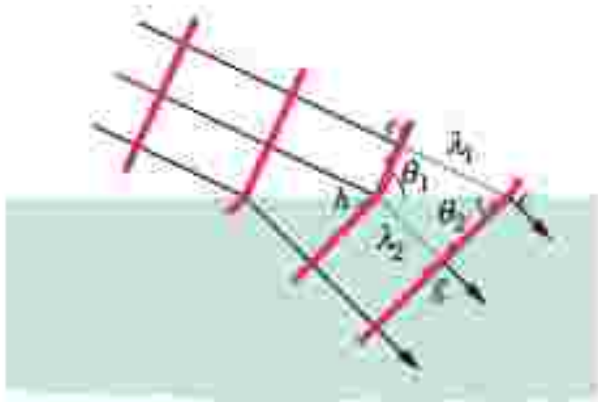
- refrakcija ravnog vala na ravnoj razmeđi između zraka i vode
- lom ili refrakcija svjetlosti se zbiva na površini, dajući novi smjer propagacije svjetlosnom valu



- izjednačavajući vrijeme putovanja od točke e do točke c sa vremenom putovanja od točke h do točke g dobivamo:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

Huygensov princip – zakon loma ili refrakcije



$$\sin \theta_1 = \frac{\lambda_1}{hc}$$

$$\sin \theta_2 = \frac{\lambda_2}{hc}$$

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

- indeks refrakcije medija:

$$n = \frac{c}{v}$$

- kad imamo dva medija:

$$n_1 = \frac{c}{v_1}$$

$$n_2 = \frac{c}{v_2}$$

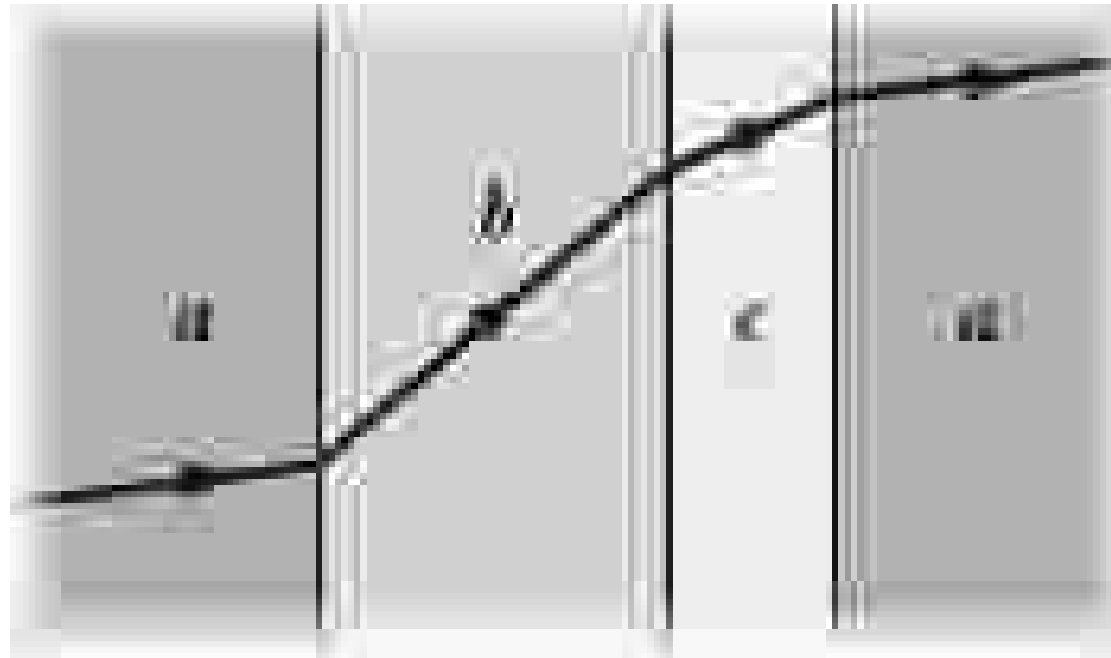
$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

- zakon loma ili refrakcije:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

Huygensov princip – kratko pitanje

Zraka monokromatske svjetlosti putuje preko paralelnih površina, kao što je prikazano na slici, iz materijala *a*, kroz slojeve materijala *b* i *c*, te onda ponovo u materijal *a*. Poredaj materijale po iznosu brzine svjetlosti u njima, počevši od najvećeg.



Valna duljina i indeks refrakcije

- valna duljina svjetlosti se mijenja kad se mijenja brzina svjetlosti, kao što se to događa kad svjetlost prijeđe iz jednog medija u drugi
- brzina svjetlosti u mediju ovisi o indeksu refrakcije medija
- dakle, valna duljina svjetlosti u mediju ovisi o indeksu refrakcije medija

- valna duljina svjetlosti u mediju s indeksom refrakcije n :

$$\lambda_n = \lambda \frac{v}{c}$$

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

- frekvencija svjetlosti u mediju s indeksom refrakcije n :

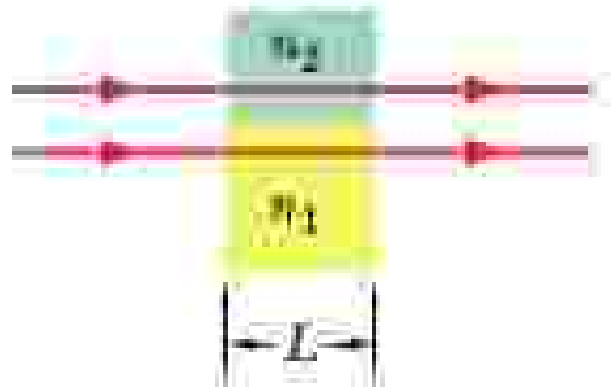
$$f_n = \frac{v}{\lambda_n}$$

$$f_n = \frac{cn}{\lambda/n} = \frac{c}{\lambda} = f$$

- iako su valna duljina i indeks refrakcije u mediju različiti nego u vakuumu, frekvencija svjetlosti u mediju ista je kao i u vakuumu

Valna duljina i indeks refrakcije

- dva vala u zraku imaju jednaku valnu duljinu i u fazi su
- jedan val putuje medijem 1, a drugi medijem 2
- kad ti valovi izađu iz medija na zrak, ponovo će im valna duljina biti jednaka, no budući da su im valne duljine bile različite u mediju 1 i mediju 2 mogu imati različite faze



- broj valnih duljina u mediju 1: $N_1 = \frac{L}{\lambda_{n1}} = \frac{Ln_1}{\lambda}$

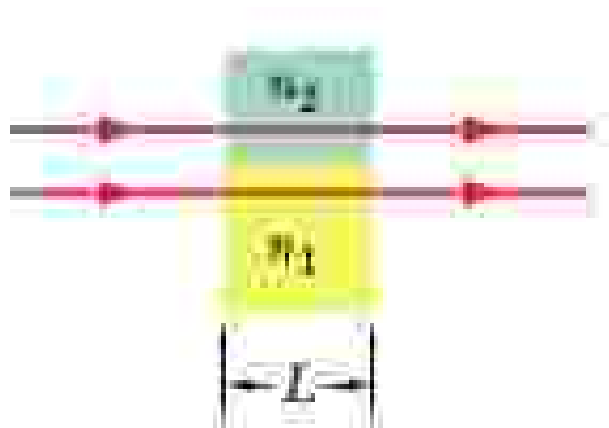
- broj valnih duljina u mediju 2: $N_2 = \frac{L}{\lambda_{n2}} = \frac{Ln_2}{\lambda}$

- fazna razlika između valova: $N_2 - N_1 = \frac{Ln_2}{\lambda} - \frac{Ln_1}{\lambda} = \frac{L}{\lambda}(n_2 - n_1)$

Valna duljina i indeks refrakcije – kratko pitanje

Dva vala svjetlosti, čije zrake su prikazane na slici, imaju jednaku valnu duljinu, jednaku amplitudu, te su na početku u fazi.

- Ako je 7.60 valnih duljina stalo u duljinu gornjeg materijala, a 5.50 valnih duljina u donju, koji materijal ima veći indeks refrakcije?
- Ako zrake svjetlosti nisu sasvim paralelne, tako da se susreću u točki na udaljenom zaslonu, hoće li interferencija na tom udaljenom zaslonu rezultirati najsvjetlijim, najtamnijim ili srednjim osvjetljenjem?



Duga i optička interferencija

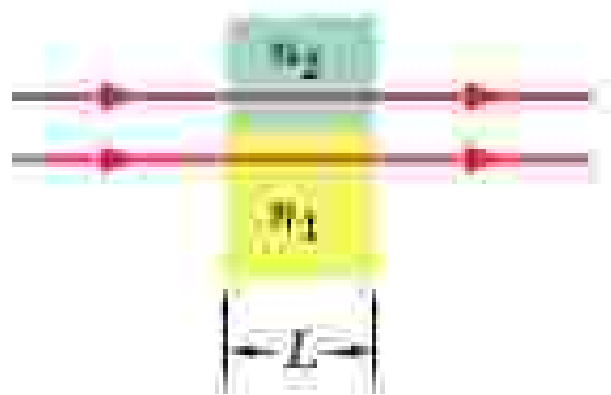
- valovi bijele svjetlosti ulaze u kišnu kap duž cijele njezine strane okrenute Suncu
- različiti valovi putovat će različitim putevima unutar kapi, a to znači da će valovi izaći iz kapi s različitim fazama
- pri nekim kutevima izlazna svjetlost će biti u fazi i dati konstruktivnu interferenciju
- dugine boje su rezultat takve konstruktivne interferencije u smjeru u kojem promatrač gleda u dugu
- valovi svjetlosti koji izlaze u drugim smjerovima iz kišnih kapi imaju različite faze, nisu svijetli i ne zamjećujemo ih
- ispod primarne duge može se vidjeti bljeđe, obojene, lukove, nastale od valova svjetlosti koji su izašli iz kapi s približno istom fazom



Valna duljina i indeks refrakcije – primjer

Dva vala svjetlosti, čije zrake su prikazane na slici, imaju jednaku valnu duljinu 550 nm prije ulaska u medij 1 i medij 2. Imaju i jednake amplitude i jednake faze. Medij 1 je zrak, a medij 2 je prozirni plastični sloj koji ima $n=1.6$ i debljinu $2.6\mu\text{m}$.

- Kolika je razlika faza izlaznih valova u valnim duljinama, radijanima i stupnjevima? Kolika je njihova efektivna fazna razlika u valnim duljinama?
- Ako su se valovi susreli u točki na udaljenom zaslonu, koju vrstu interferencije bi stvorili?



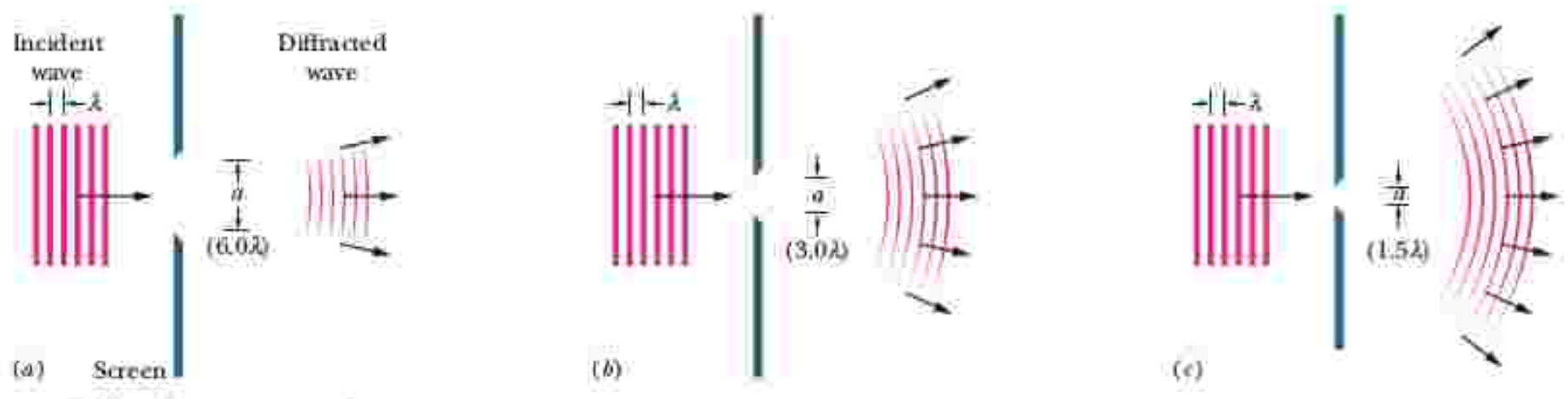
Difrakcija valova

- primjer difrakcije: fotografija vodenih valova koji se šire naokolo prošavši kroz mali procjep



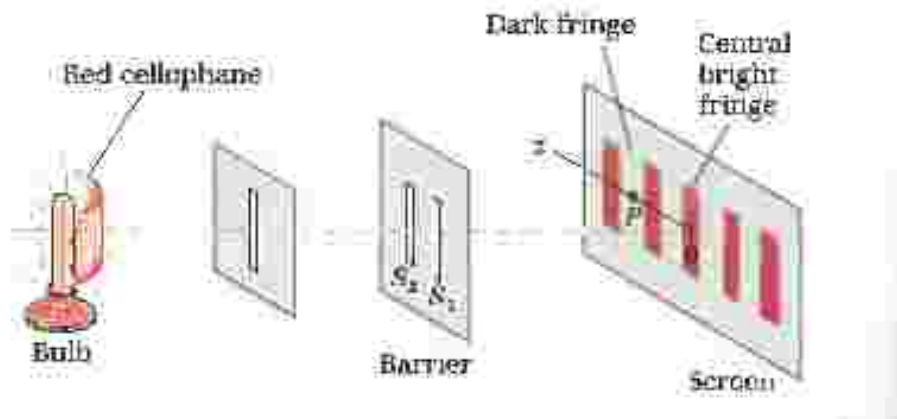
Difrakcija valova

- ako val naiđe na barijeru koja ima otvor dimenzija usporedivih s valnom duljinom, dio vala koji prođe kroz otvor širi se kroz prostor iza barijere



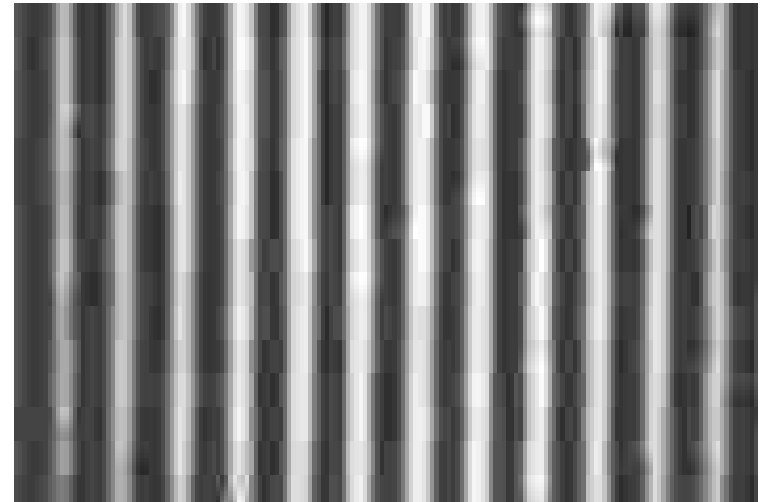
Youngov eksperiment s dva procjepa

- 1801. Thomas Young je eksperimentalno dokazao da je svjetlost val
- monokromatska svjetlost prolazi kroz kolimirajući procjep i onda kroz dva paralelna procjepa, S_1 i S_2 , nakon čega pristiže na zaslon



- na zaslonu se pojavljuju svijetle i tamne pruge, tzv. interferentne pruge

- tamne pruge su posljedica destruktivne, a svijetle pruge konstruktivne interferencije



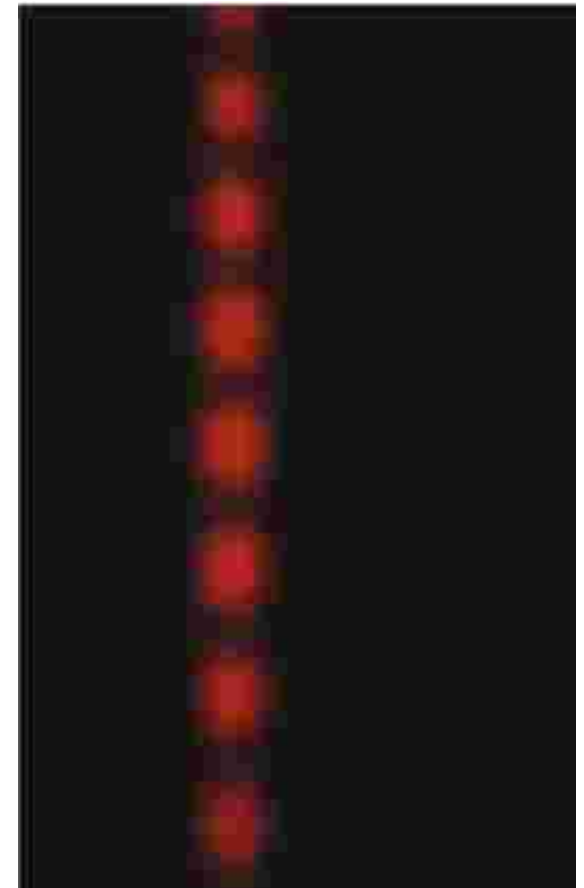
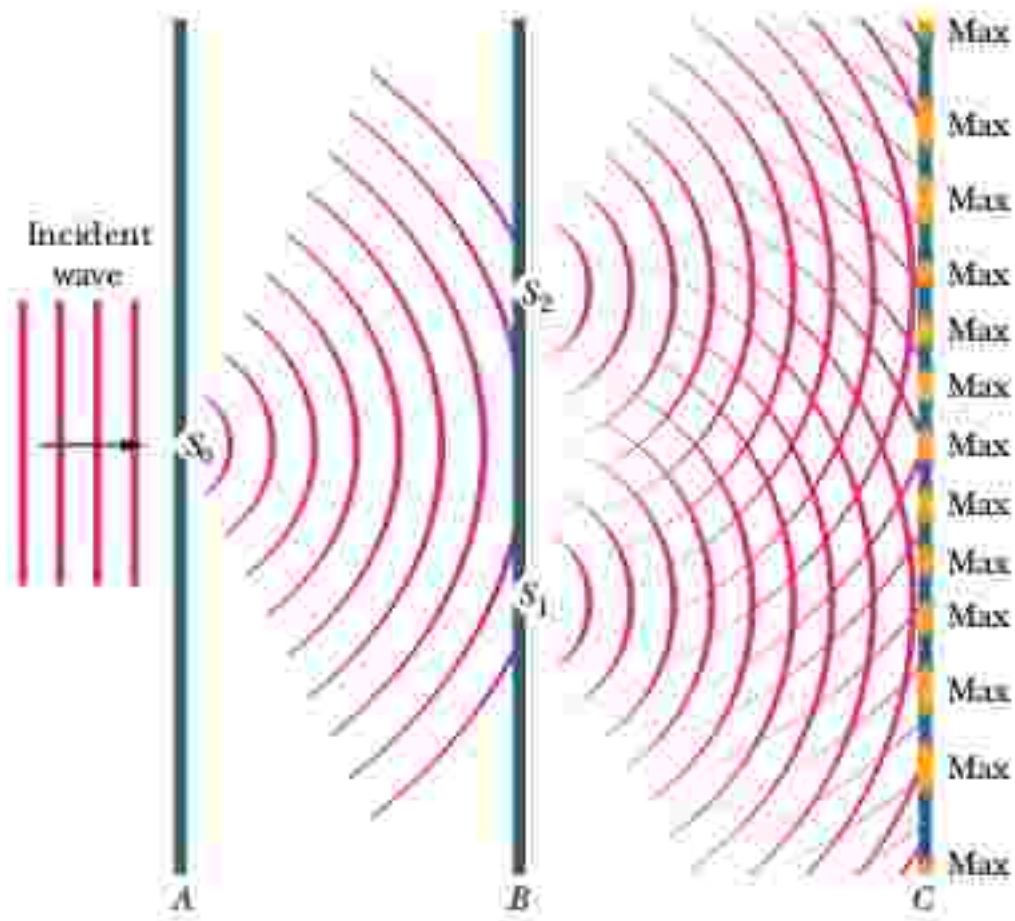
Interferencija

- primjer efekta interferencije iz dvaju izvora valova (iste valne duljine) na vodi



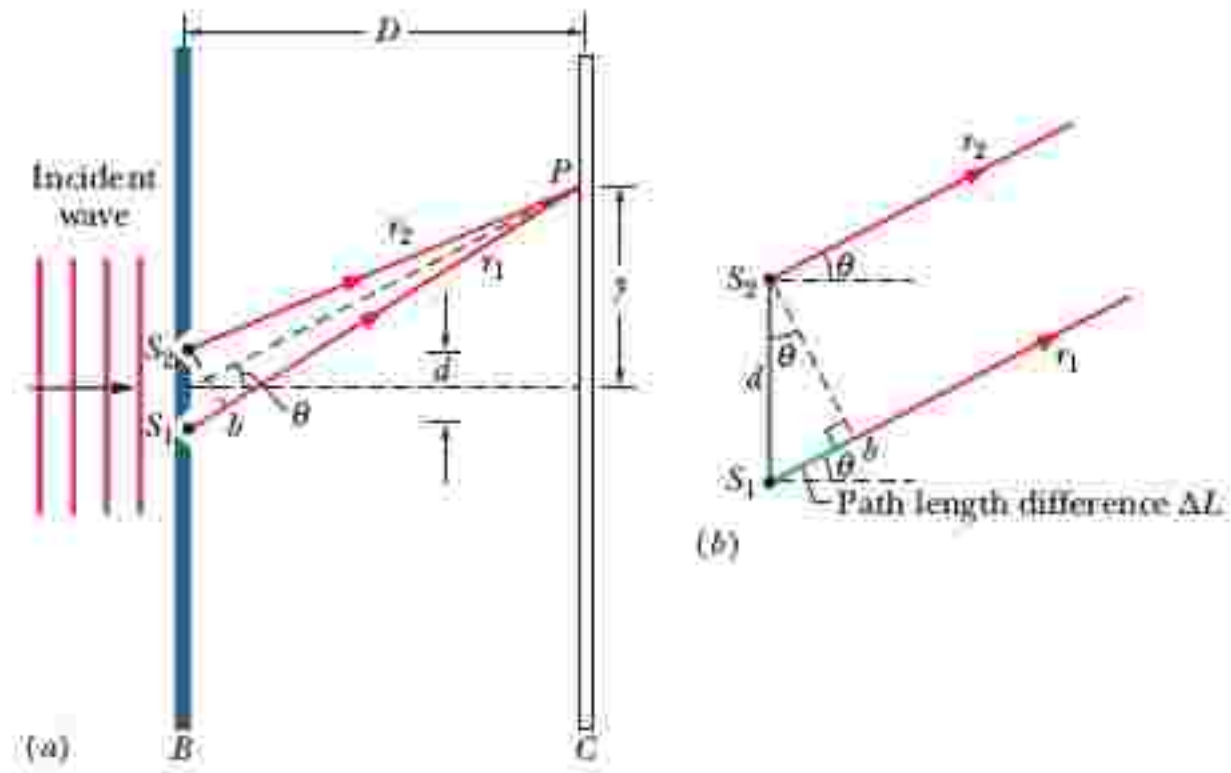
Youngov eksperiment s dva procjepa

- valovi svjetlosti koji izlaze iz dviju pukotina preklapaju se i formiraju interferentni uzorak



Određivanje položaja interferentnih pruga

- razlika u fazi između dvaju valova može se promijeniti ako valovi prolaze putevima različite duljine



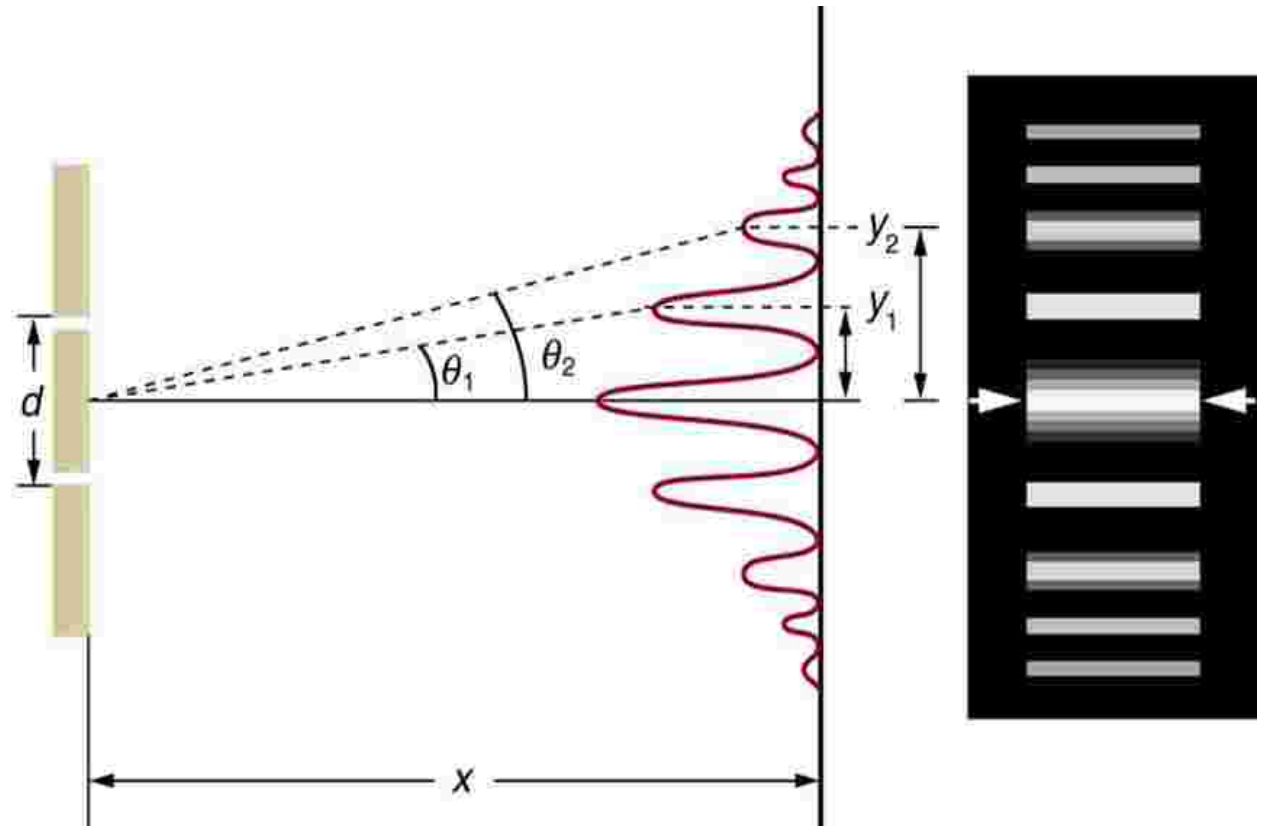
- na zaslonu se pojavljuje slika koja je određena razlikom duljine putova, ΔL

Određivanje položaja interferentnih pruga

- razlika duljine putova: $\Delta L = d \sin \theta$

- za svijetle pruge: $d \sin \theta = m\lambda$, for $m = 0, 1, 2, \dots$

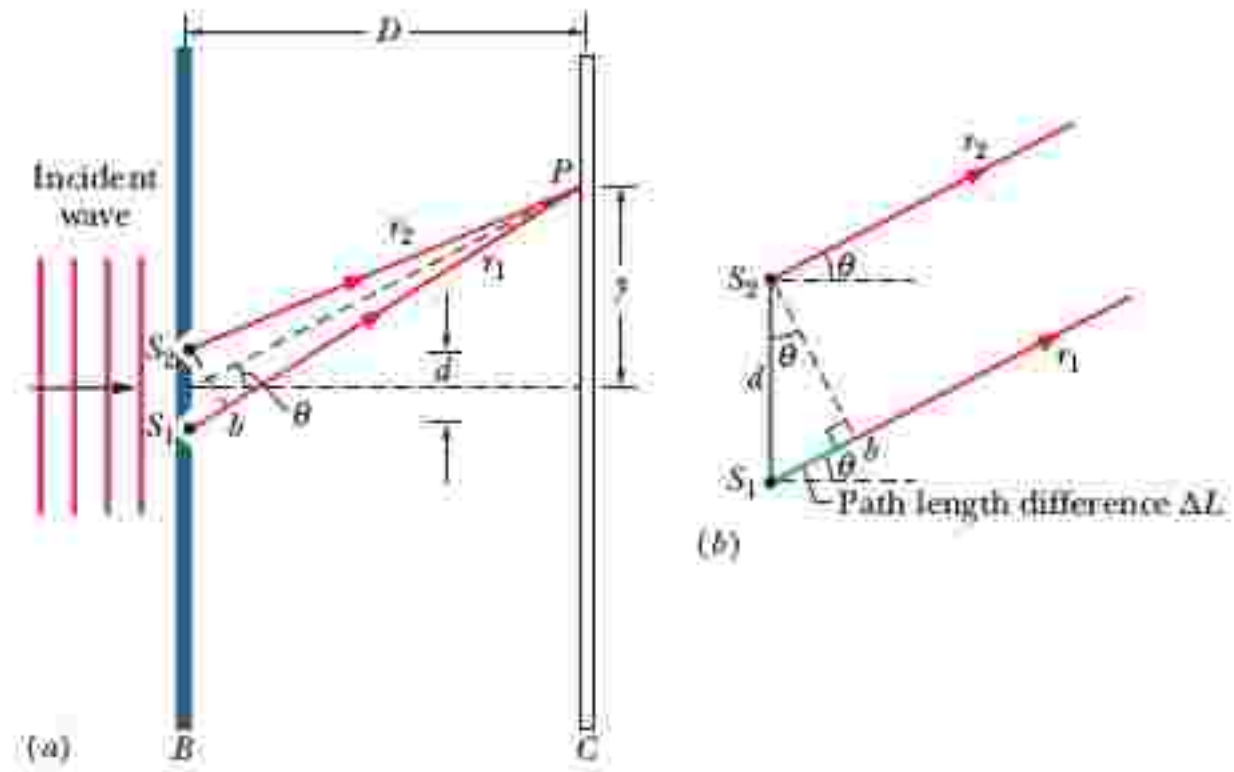
- za tamne pruge: $d \sin \theta = (m + \frac{1}{2})\lambda$, for $m = 0, 1, 2, \dots$



Određivanje položaja interferentnih pruga – kratko pitanje

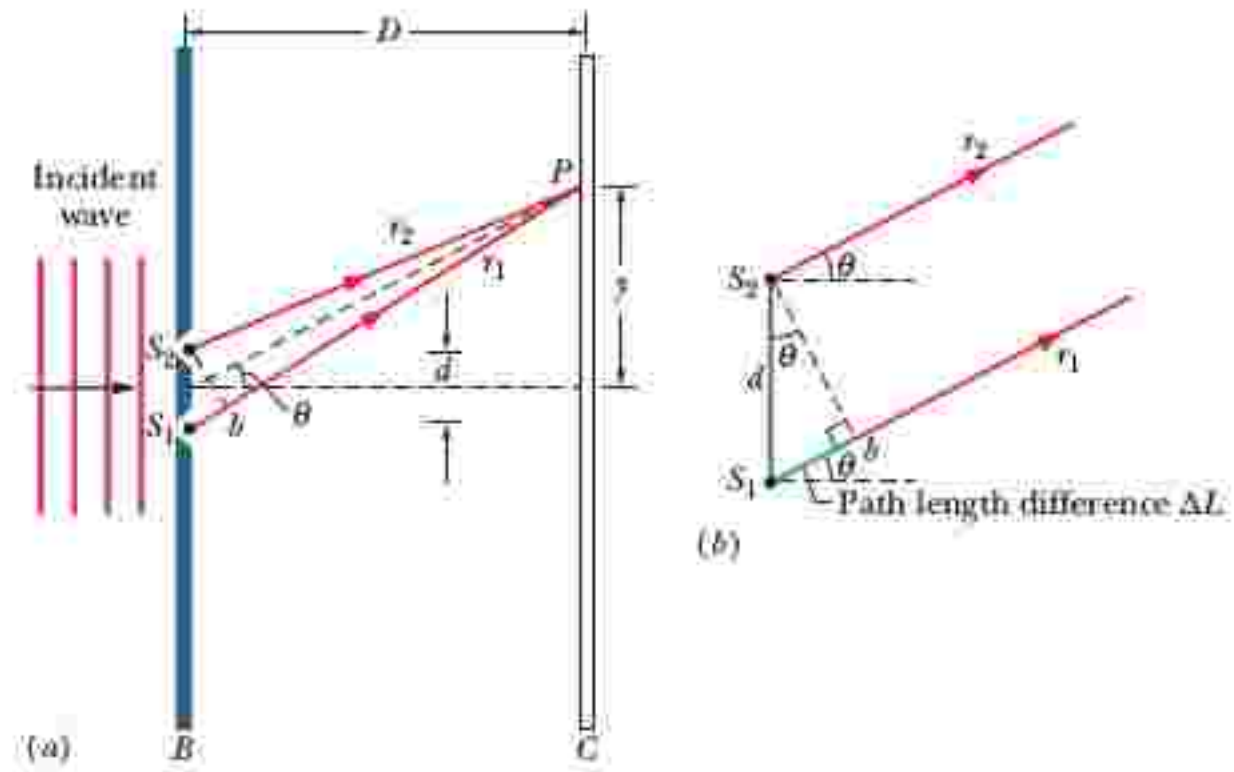
Kolika je razlika duljine putova izražena kao višekratnik valne duljine te kolika je razlika faza izražena u valnim duljinama za dvije zrake ako je točka P:

- a) treći maksimum sa strane;
- b) treći minimum?



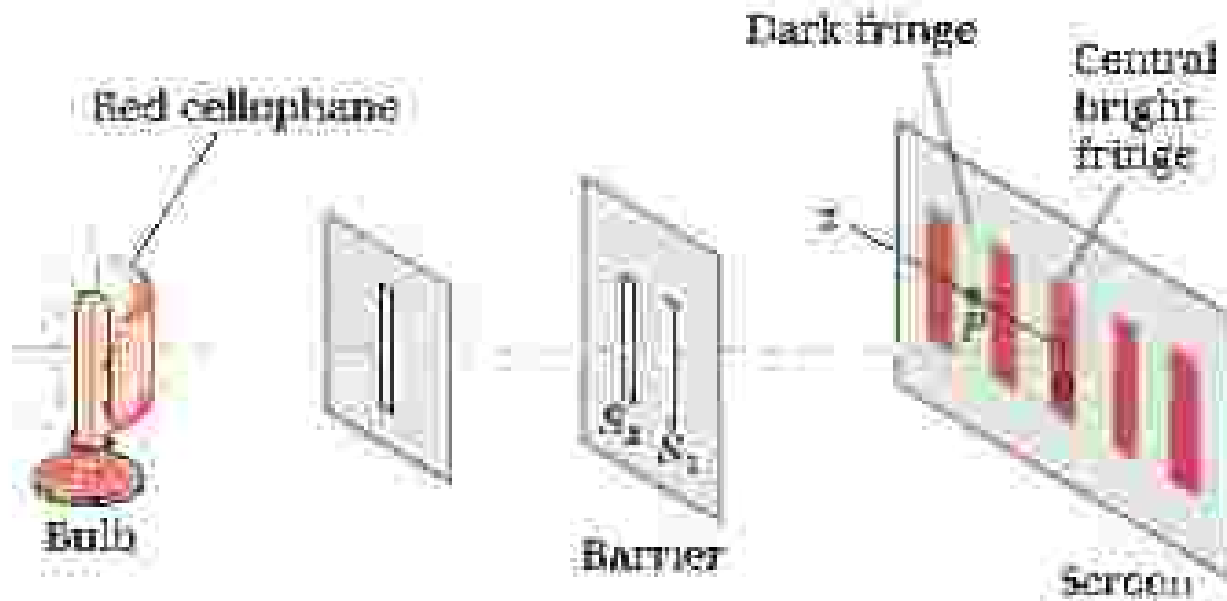
Određivanje položaja interferentnih pruga – primjer

Kolika je udaljenost dvaju susjednih maksimuma pored središta interferentnog uzorka? Valna duljina svjetlosti je $\lambda=546$ nm, razmak između pukotona $d=0.12$ mm, a razmak između pukotine i zaslona $D=55$ cm. Pretpostavite da je kut θ mali, tako da je moguće približenje $\theta \approx \tan(\theta)$, gdje je θ izražen u radijanima.



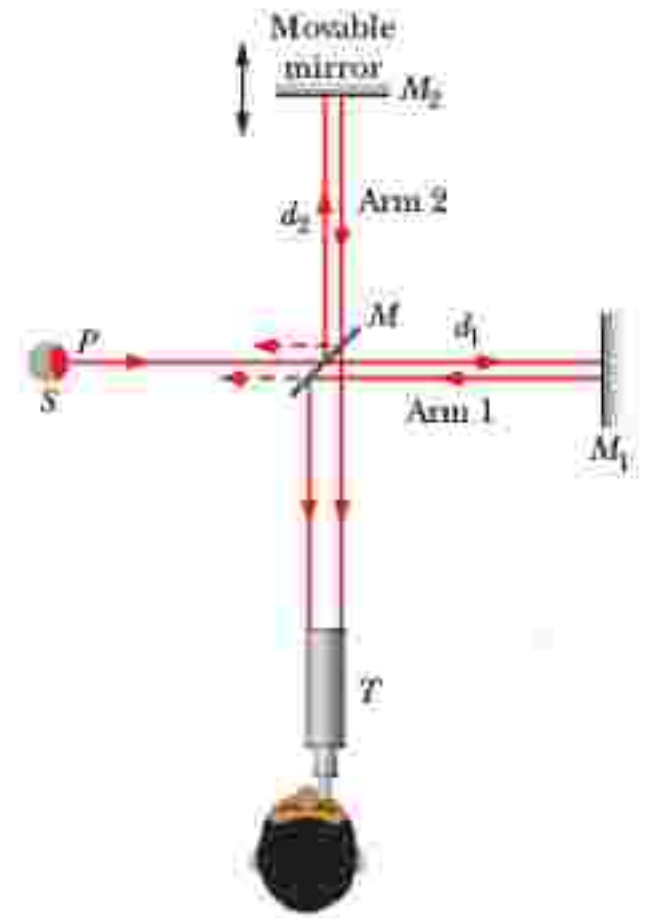
Koherencija

- ako valovi koji izlaze iz dvaju izvora zadržavaju konstantnu razliku u fazi, ta dva izvora nazivamo koherentnima
- samo koherentni izvori mogu stvoriti stabilne interferentne pruge
- u Youngovom eksperimentu s dva procjepa su valovi koji dolaze s procjepa S_1 i S_2 koherentni zato jer dolaze iz istog primarnog izvora



Michelsonov interferometar

- uređaj koji koristi efekte valne interferencije u mjerenjima nazivamo interferometrom
- snop monokromatske svjetlosti iz izvora S dolazi na ogledalo M koje je postavljeno pod kutom od 45° prema smjeru snopa
- ogledalo M točno pola ulaznog snopa reflektira, a pola transmitira
- dakle, pola ulaznog snopa je usmjereno prema pomičnom, M_2 , a druga polovica prema fiksnom ogledalu, M_1
- ta dva ogledala, pomično i fiksno, reflektiraju snopove natrag na prvo ogledalo, M, gdje se snopovi ponovo reflektiraju i transmitiraju
- valovi koji uđu u teleskop T stvaraju interferentni uzorak
- mijenjajući duljinu puta jednog od snopova možemo točno izraziti udaljenosti preko valne duljine svjetlosti



Holografija

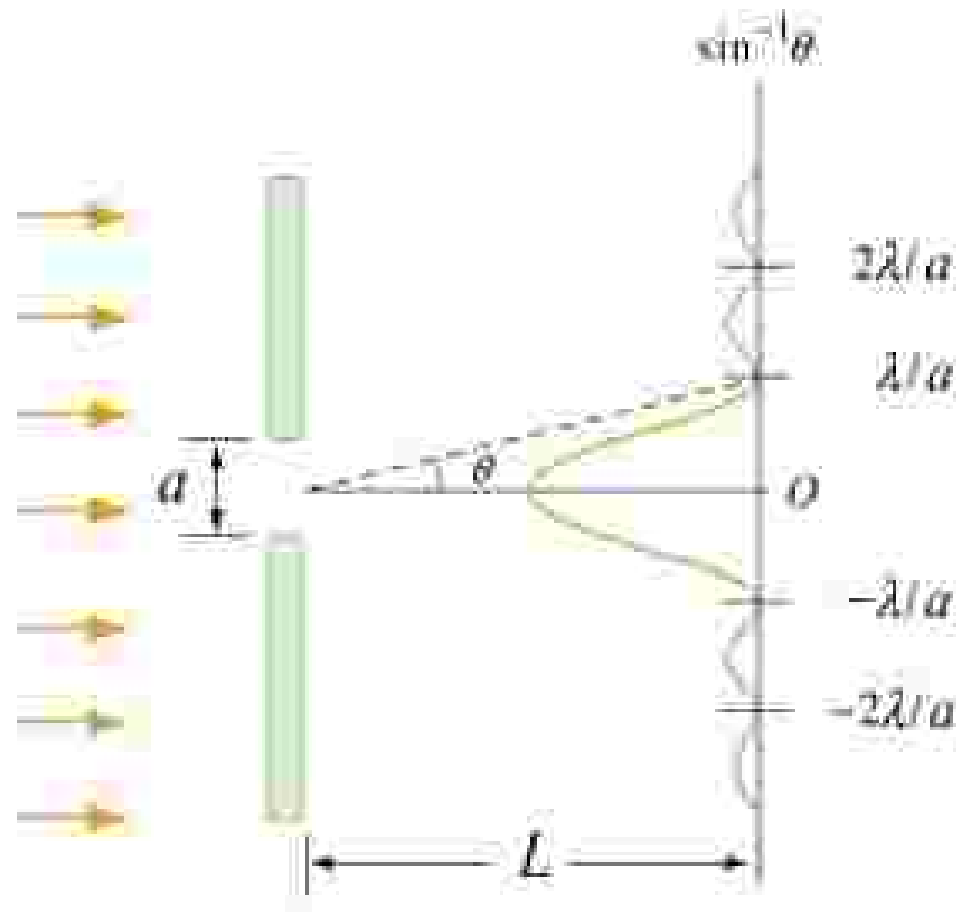
- tehnika za stvaranje trodimenzionalnih slika koja koristi interferenciju svjetlosnih valova



Difrakcija kroz jednu pukotinu

- valovi koji prolaze kroz dugu tanku pukotinu širine a stvaraju difrakcijski uzorak koji ima središnji maksimum i druge maksimume razdvojene minimumima, koji se nalaze na kutovima θ od središnje osi

$$a \sin \theta = m\lambda \quad \text{for } m = 1, 2, 3, \dots$$



Difrakcija kroz jednu pukotinu - primjer

Pukotina širine a obasjana je bijelom svjetlošću.

- a) Za koju vrijednost a će se prvi minimum crvene svjetlosti valne duljine $\lambda=650$ nm pojaviti na $\theta=15^\circ$?
- b) Kolika je valna duljina λ' svjetlosti čiji prvi postranični difrakcijski maksimum se pojavljuje upravo na $\theta=15^\circ$?

Difrakcija kroz kružni otvor

- difrakcija kroz kružni otvor ili leću polumjera d stvara središnji maksimum i koncentrične minimume i maksimume

- prvi minimum na kutu θ dan je sa: $\sin \theta = 1.22 \frac{\lambda}{d}$

- **Rayleighov kriterij razlučivosti**: dva objekta su razlučiva ako je središnji difrakcijski maksimum jednog na prvom minimumu drugog. Kutna separacija mora tada biti najmanje:

$$\theta_R = 1.22 \frac{\lambda}{d}$$

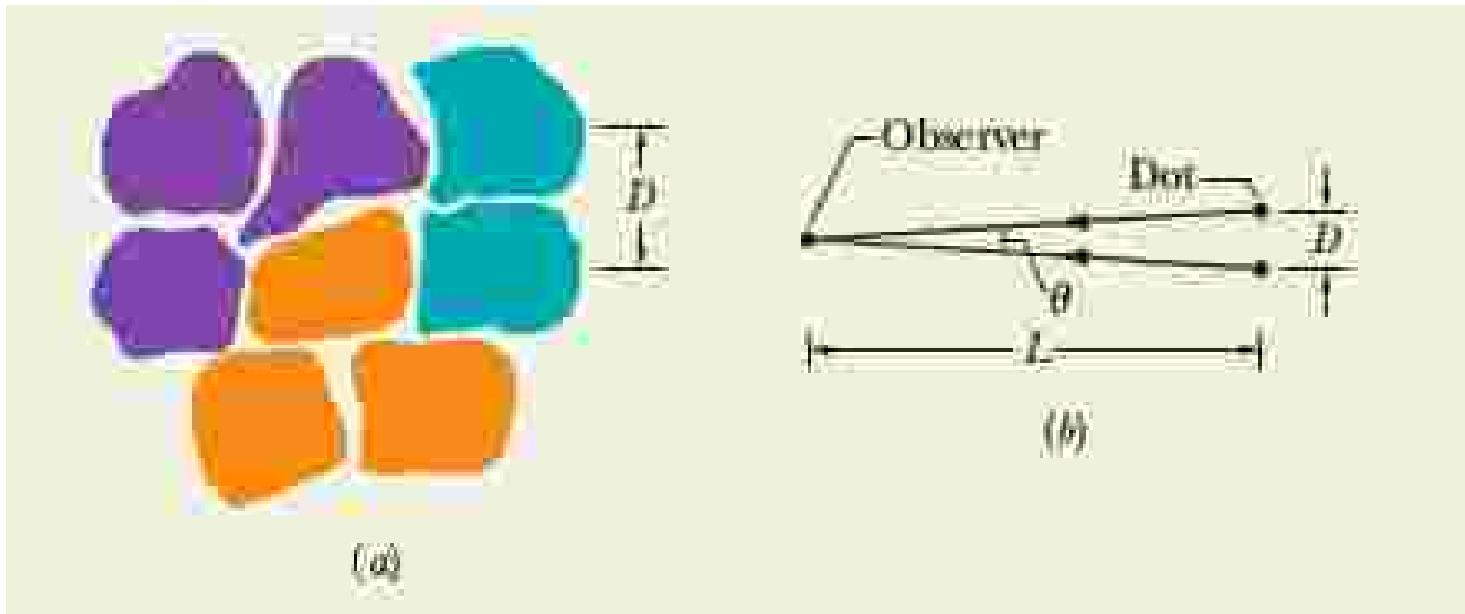


Razlučivost ljudskog vida



Razlučivost ljudskog vida - primjer

Na skici ispod je prikazana reprezentacija točaka boje s pointilističke slike. Pretpostavite da je prosječan razmak između točaka $D=2$ mm. Pretpostavite da je promjer pupile u oku jednaka $d=1.5$ mm i da je najmanja kutna separacija među točkama koju možete razlučiti dana Rayleighovim kriterijem. Na kojoj najmanjoj udaljenosti L nećete moći razlučiti pojedinačne točke?



Difrakcijska rešetka

- niz pukotina koje se koristi da bi se razdvojilo upadni val na komponente razdvajajući i prikazujući njihove difrakcijske maksimume
- difrakcija s N pukotina rezultira linijama na kutovima θ takvim da:

$$d \sin \theta = m\lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

- poluširina linije je: $\Delta\theta_{hw} = \frac{\lambda}{Nd \cos \theta}$

- disperzija je: $D = \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} = \frac{m}{d \cos \theta}$

- moć razlučivanja: $R = \frac{\lambda_{avg}}{\Delta\lambda} = Nm$

Difrakcija X-zračenja

- pravilna rešetka atoma u kristalu je trodimenzionalna rešetka za valove malih valnih duljina, poput X-zračenja
- atomi su u ravninama, razmaknutim za d
- difrakcijski maksimumi pojavljuju se ako ulazni smjer vala i valna duljina zračenja λ zadovoljavaju Braggov zakon:

$$2d \sin \theta = m\lambda, \quad \text{for } m = 1, 2, 3, \dots$$

