

Fizika 2

Fizikalna optika

2009/10



Optika..definicija

Optika, u širem smislu, je dio fizike koji proučava elektromagnetske valove; njihova svojstva i pojave. Elektromagnetski valovi ili (elektromagnetsko zračenje) predstavljaju najzastupljeniju skupinu valova u prirodi (radiovalovi, mikrovalovi, toplinsko i ultraljubičasto zračenje, X-zrake..).

Optika, u užem smislu, proučava onaj dio elm. zračenja koje djeluje na mrežnicu ljudskog oka stvarajući osjet vida. Taj dio elektromagnetskog zračenja nazivamo svjetlošću koji predstavlja uski interval valnih duljina; od oko 380 do 780 nm. **Zato možemo reći da je optika nauka o svjetlosti i svjetlosnim pojavama.**

Što je svjetlost; što je priroda svjetlosti...?

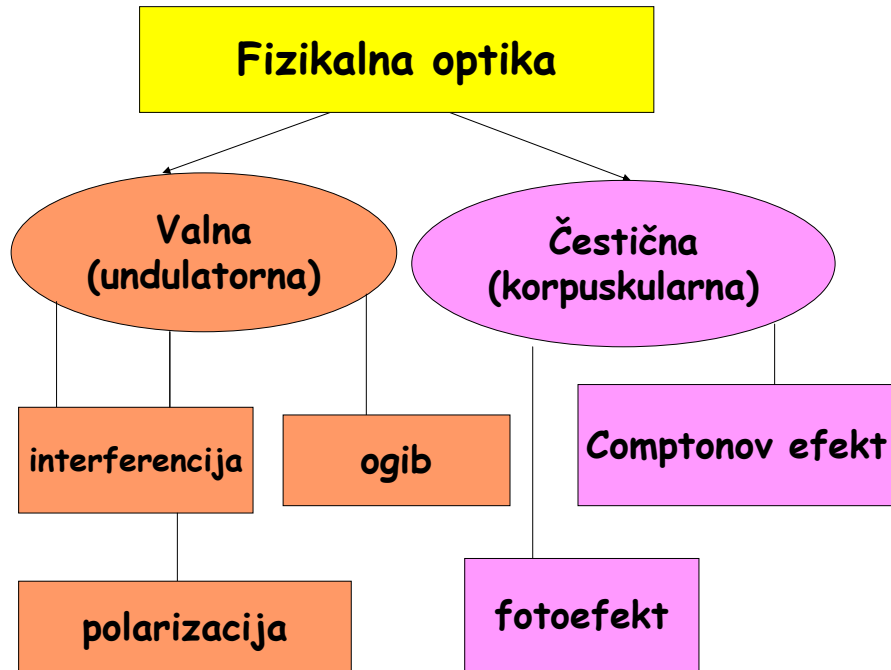
U geometrijskoj optici:

Svjetlost je pravocrtna pojava određene brzine u nekom sredstvu (optičkom sredstvu).

U fizikalnoj optici:

Svjetlost se očituje ili kao val ili kao "čestica", foton. Ovakvo svojstvo "dvostruke" pojavnosti nazivamo dualnom prirodom svjetlosti.

U ovom dijelu optike veliki doprinos dali su **Christiaan Huygens** (valna optika) i **Isaac Newton** (ideja o čestičnoj prirodi) u 17. i 18. stoljeću. Ideju o čestičnoj prirodi svjetlosti, fotonu, dovršio je **Albert Einstein** tek početkom 20. stoljeća; 1905. godine.



Pioneers in Visible Light Physics



Sir Isaac Newton
(1642-1727)



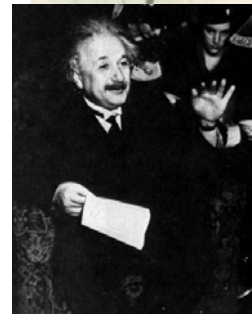
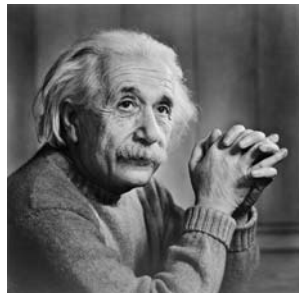
Christiaan Huygens
(1629-1695)

Figure 2



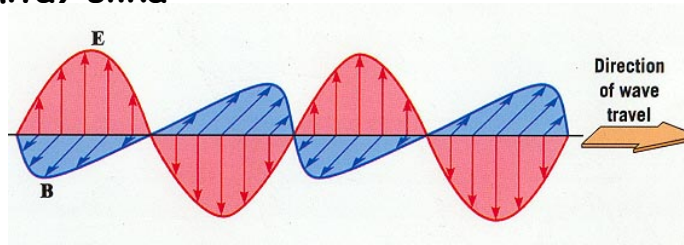
A. Einstein

- .. s jedrilicom
- .. s lulom
- .. s fizikom



....u valnoj optici

Svjetlost je elektromagnetski val, koji predstavlja istodobno širenje električnog, **E**, i magnetskog polja, **H**, u prostor. Ta dva polja su međusobno okomita: slika:

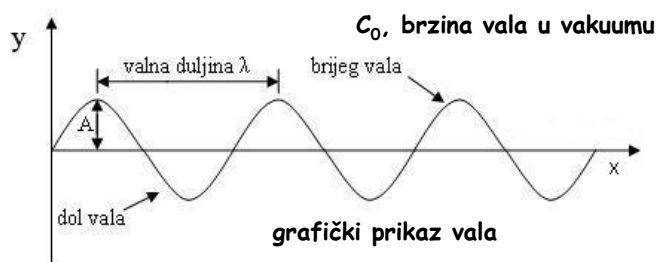


Brzina elektromagnetskog vala (svjetlosti) c_0 , u vakuumu iznosi: $c_0 = 299\,792,458 \text{ km/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

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

Osnovne karakteristike vala:

- valna duljina, λ (nm, $1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$)
 - perioda, T (s)
 - frekvencija, f ili ν (s^{-1} , ili Hz)
- (sjetimo se relacije: $c_0=\lambda \cdot \nu$ *, zašto?)



* $c_0 = \Delta s / \Delta t = \lambda / T = \lambda \cdot \nu$... jednačba za brzinu kod jednolikog gibanja duž pravca

....u čestičnoj prirodi svjetlosti

Svjetlost je foton ("čestica"), čija energija je proporcionalna frekvenciji, f , i naziva se kvant svjetlosti:

$$E = h \cdot f,$$

gdje je h Planckova konstanta koja iznosi $6,626 \cdot 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$.

Dokaz za čestičnu prirodu svjetlosti je **pojava fotoelektričnog efekta**. Objašnjenje ove pojave a time i kvantne (čestične) prirode svjetlosti dao je A. Einstein 1905. godine za što je 1921. dobio Nobelovu nagradu.

Intervali valnih duljina, frekvencija i energija za pojedine boje (šare) u vidljivom dijelu elektromagnetskog spektra pojedinih boja (šara).

boja	$\lambda(\text{nm})$	$\Delta\lambda(\text{nm})$	$f(10^{14} \text{ Hz}^*)$	$E(\text{eV}^{**})$
ljubičasta	380-440	60	7,9-6,8	3,27-2,82
plava	440-490	50		
zelena	490-570	80		
žuta	570-590	20		
narandžasta	590-620	30		
crvena	620-780	60	4,8-3,8	1,99-1,57

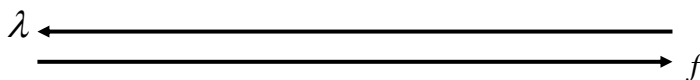
* $1\text{Hz}=1\text{s}^{-1}$

** $1\text{eV}=1,6\cdot 10^{-19} \text{ J}$

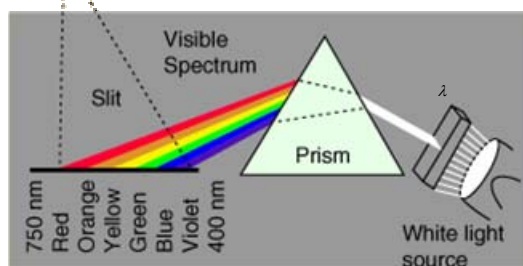
ispunimo u tablici vrijednosti za frekvencije i energije koje nedostaju

Vidljiva svjetlost (visible light)

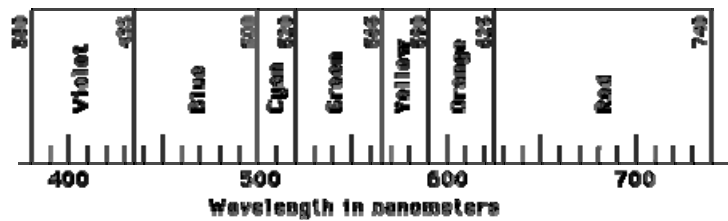
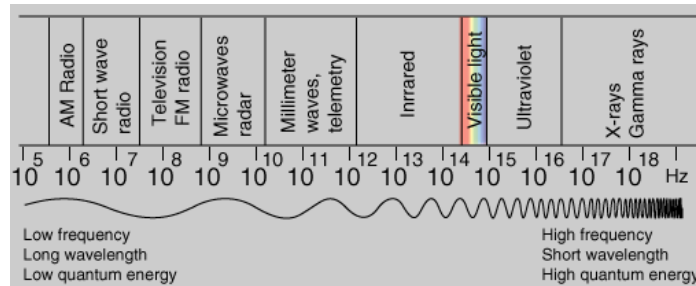
- Područje frekvencije: $(4 - 7.5) \times 10^{14} \text{ Hz}$
- Područje valnih duljina: $(750 - 400) \text{ nm}$
- Energije kvanata svjetlosti: $(1.65 - 3.1) \text{ eV}$



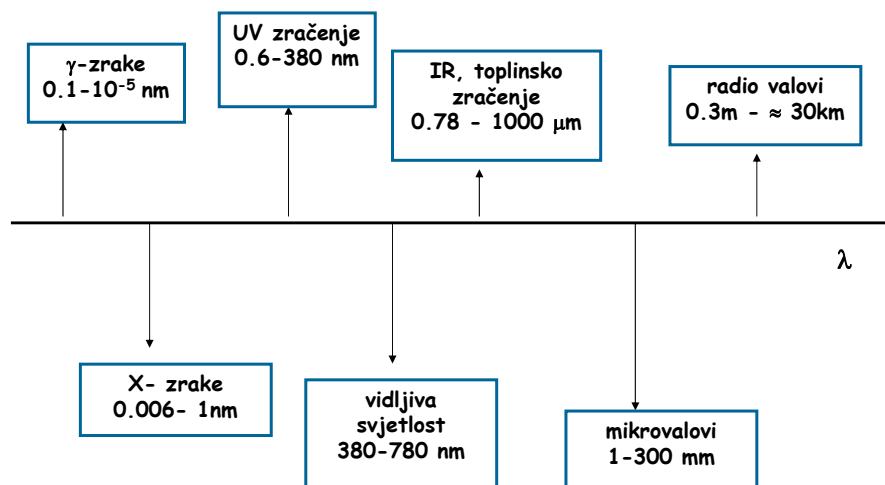
Radio	Far IR, Micro-wave	IR	UV	x-ray γ-ray
-------	-----------------------	----	----	----------------



Spektar elektromagnetskih valova; vidljiva svjetlost



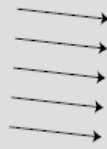
Područja elektromagnetskih valova



što
je
dakle

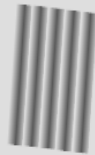
S
V
J
E
T
L
O
S
T
?

ray model



Advantage: Simplicity.

wave model



Advantage: Color is described naturally in terms of wavelength. Required in order to explain the interaction of light with material objects of sizes comparable to or smaller than a wavelength of light.

particle model



Required in order to explain the interaction of light with individual atoms. At the atomic level, it becomes apparent that a beam of light has a certain graininess to it.

....naučili smo jedan dio u

- geometrijskoj optici

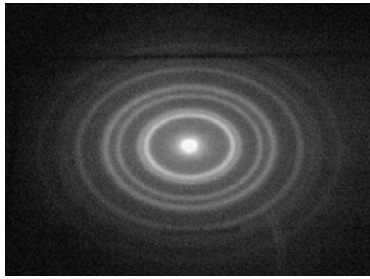
....a o valu i čestici učimo sada u

- fizikalnoj optici

Pojave koje ćemo učiti u fizikalnoj optici:

- **Valna optika**
 - interferencija
 - uređaji za interferenciju
 - ogib (difrakcija)
 - uređaji za ogib
- **Čestična (korpuskularna) optika**
 - fotoelektrični efekt

- Interferencija

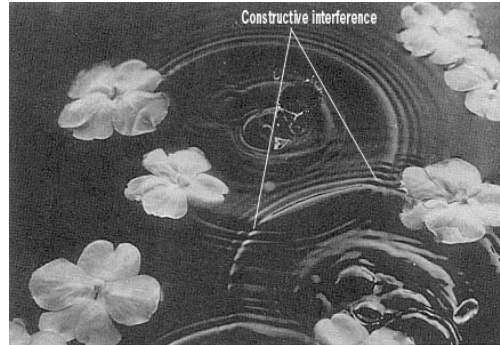


Interferencija valova (te i svjetlosnih valova) je svojstvo algebarskog zbrajanja (pojačavanja i poništavanja) dva ili više vala.

a)

Na slici je prikazan val na vodi iz jednog izvora a), i iz dva izvora b).

Općenito možemo reći: ako se dva vala, šireći se iz različitih izvora svjetlosti, sastanu u nekoj točki prostora oni se superponiraju ili zbrajaju dajući svjetlu ili tamnu prugu.



b)

Osnovni uvjet potreban za konstruktivnu interferenciju (zbrajanje dva ili više vala; svjetla pruga u valovima vidljive svjetlosti) i destruktivnu interferenciju (potpuno poništenje dva ili više vala; tamna pruga u valovima vidljive svjetlosti) je:

valovi moraju biti potpuno isti-koherentni, što znači da moraju imati iste valne duljine i iste amplitude

$$\lambda_1 = \lambda_2, A_1 = A_2.$$



svjetiljka

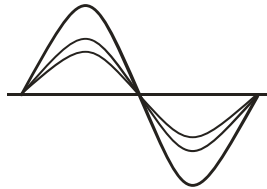
nekoherentna svjetlost



svjetiljka

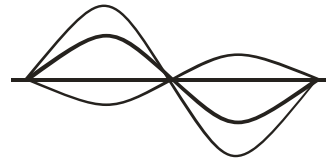
koherentna svjetlost

Ako su valovi koherentni, tada zbrajanjem mogu dati konstruktivnu ili destruktivnu interferenciju:



Razlika putova za konstruktivnu interferenciju:

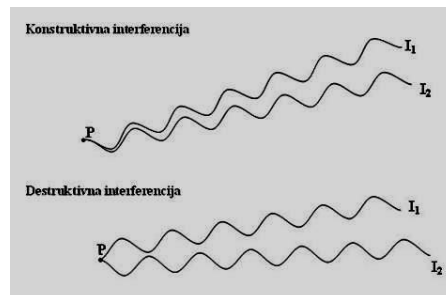
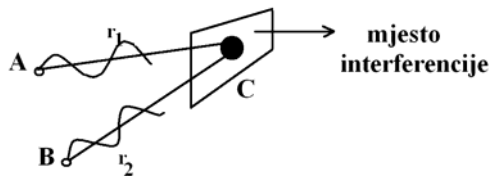
$$\Delta x = k\lambda \quad k = 0, 1, 2, \dots$$



Razlika putova za destruktivnu interferenciju:

$$\Delta x = (2k - 1) \frac{\lambda}{2} \quad k = 1, 2, \dots$$

Prostorna smještenost koherentnih valova i mjesto susreta u točkama P

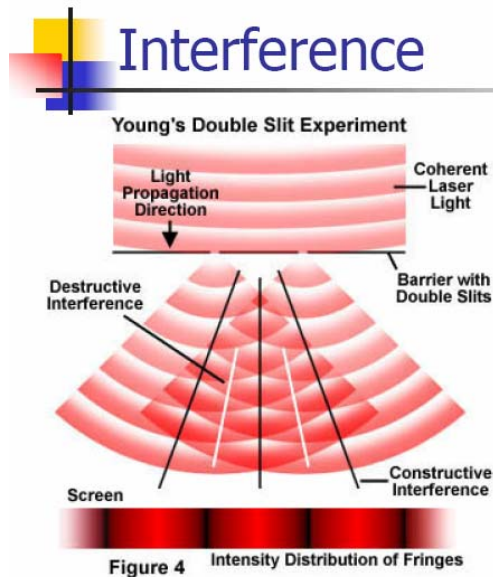


Thomas Young



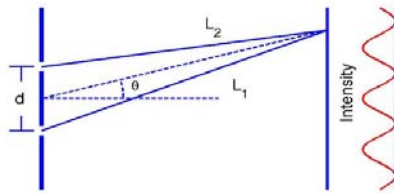
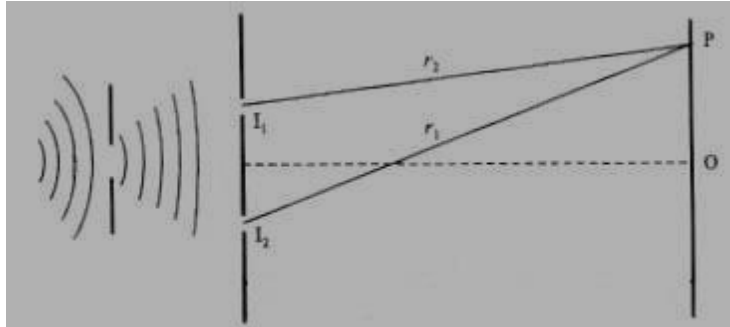
Thomas Young (1773- 1829.) bio je engleski znanstvenik, čiji doprinos je velik u području optike (svjetlost, proces vida), mehanika, energetika..

U ovom izlaganju: valna priroda svjetlosti, interferencija, pokus na dvije uske pukotine; **double slit experiment, 1801.**, kojim je potvrđena valna priroda svjetlosti.



- 1801 T. Young: **double slit exp.**
- Ripple effect
- Constructive
 - Bright Zones
- Destructive
 - Dark zones

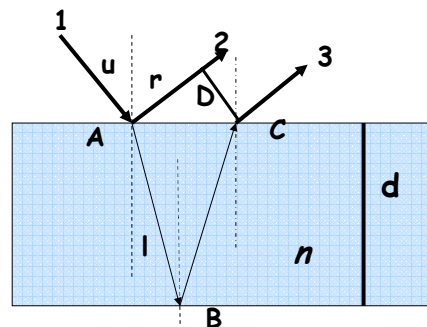
Young-ov pokus na dvije pukotine



Iz geometrije uređaja:

Kuta α , udaljenosti zastora od pukotina, rednog broja i položaja svijetle ili tamne pruge mogu su dobiti relacije za valnu duljinu svjetlosti.

Interferencija na tankim listićima



Razlika puteva zraka svjetlosti je:

$$\Delta x = 2\overline{AB} \cdot n - \overline{AD} = 2nd \cos l$$

$\Delta x = (2k - 1) \frac{\lambda}{2}$

$\Delta x = k\lambda$

svjetlo

tama

Jednadžba vala i interferencija

INTERFERENCIJA SVJETLOŠTI

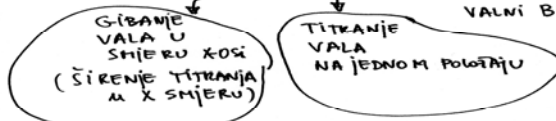
(1)

ZBRAJANJE (SUPERPOZICIJA) 2 ILI VIŠE KOHERENTNIH VALOVA.
 KOHERENTNI VALOVI: FREKVENCIJA ISTA, A RAZLIKA U FAZI NEOVISNA O VREMENU (KONSTANTNA)

JEDNAĐBA ELEKTROMAGN. VALA:

$$E = E_0 \cos(Kx - \omega t); \quad K = \frac{2\pi}{\lambda}$$

VALNI BROJ



ZBRAJAMO 2 KOHERENTNA VALA:

$$E_1 = E_0 \cos(Kr_1 - \omega t)$$

$$E_2 = E_0 \cos(Kr_2 - \omega t)$$

$$E_{uk}(C) = E_1 + E_2 = E_0 [\cos(Kr_1 - \omega t) + \cos(Kr_2 - \omega t)]$$

SLIKA: MJEŠTO INTERFER.

$$|r_1 - r_2| = \Delta r \quad *$$

$$Kr_1 - Kr_2 = \Delta \varphi \quad **$$

* $\Delta r \rightarrow$ RAZLIKA PUTEVA
 ** $\Delta \varphi \rightarrow$ " - U FAZI (KUTEVA) } VEZA: $\Delta \varphi = K \Delta r = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r$

JEDNOSTAVAN NAČIN VEZE $\Delta\varphi$, Δt : (2)

$$\left. \begin{array}{l} \Delta\varphi \rightarrow 2\pi \\ \Delta t \rightarrow \lambda \end{array} \right\} \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{2\pi}{\lambda} \Rightarrow \Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta t$$

ZBRAJAMO VALOVE ELEKTR. POLJA UZ TRANSFORMACIJU:

$$\cos\alpha + \cos\beta = 2 \cos \frac{\alpha+\beta}{2} \cdot \cos \frac{\alpha-\beta}{2}$$

$$\Rightarrow E_{uk} = \underbrace{2E_0 \cos \frac{k(r_1-r_2)}{2}}_{\text{AMPLITUDA ZBRANJENOG VALA}} \cdot \underbrace{\cos \left[\frac{k(r_1-r_2)}{2} - \omega t \right]}_{\text{OBLIK TITANJA u [C]}} \rightarrow \text{ISTA FREKVENCIJA} \rightarrow \text{FAZA } \frac{k(r_1-r_2)}{2}$$

$$A = 2E_0 \cos \frac{k(r_1-r_2)}{2}$$

$$\downarrow A = A_{\max} \text{ za: } \frac{k(r_1-r_2)}{2} = k\pi \Rightarrow \Delta t = \frac{2k\pi}{k} = 2k\pi \cdot \frac{\lambda}{2\pi}$$

$$\downarrow A = A_{\min} \text{ za: } \frac{k(r_1-r_2)}{2} = (2k-1) \frac{\pi}{2} \quad \Delta t = k\lambda \quad k = 0, 1, 2$$

$$\frac{k(r_1-r_2)}{2} = (2k-1) \frac{\pi}{2}$$

$$\Delta t = (2k-1) \cdot \pi \cdot \frac{\lambda}{2\pi} \Rightarrow \Delta t = (2k-1) \frac{\lambda}{2} \quad k = 1, 2, \dots$$

INTENZITET INTERFERIRANOG VALA (3)

jedn. intenziteta VALA:

$$I = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} A^2; \quad I \propto A^2$$

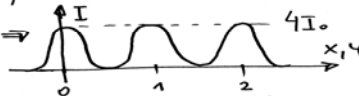
$$\text{uz: } A = 2E_0 \cos \frac{k(r_1-r_2)}{2} = 2E_0 \cos \frac{\varphi}{2}; \quad \varphi = k\Delta t$$

$$\Rightarrow I = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \cdot 4E_0^2 \cos^2 \frac{\varphi}{2}$$

Ako je INTENZITET POJEDINOG VALA:

$$I_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} E_0^2$$

$$\Rightarrow I = 4I_0 \cos^2 \frac{\varphi}{2}$$



intenziteti krajnjih **MAKSIMUMA** isti i iznose:

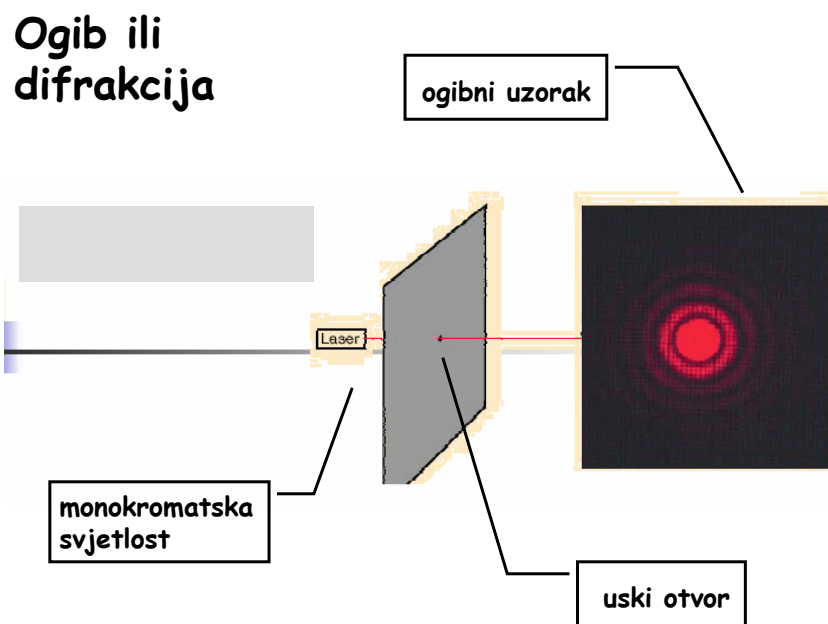
$$4I_0$$

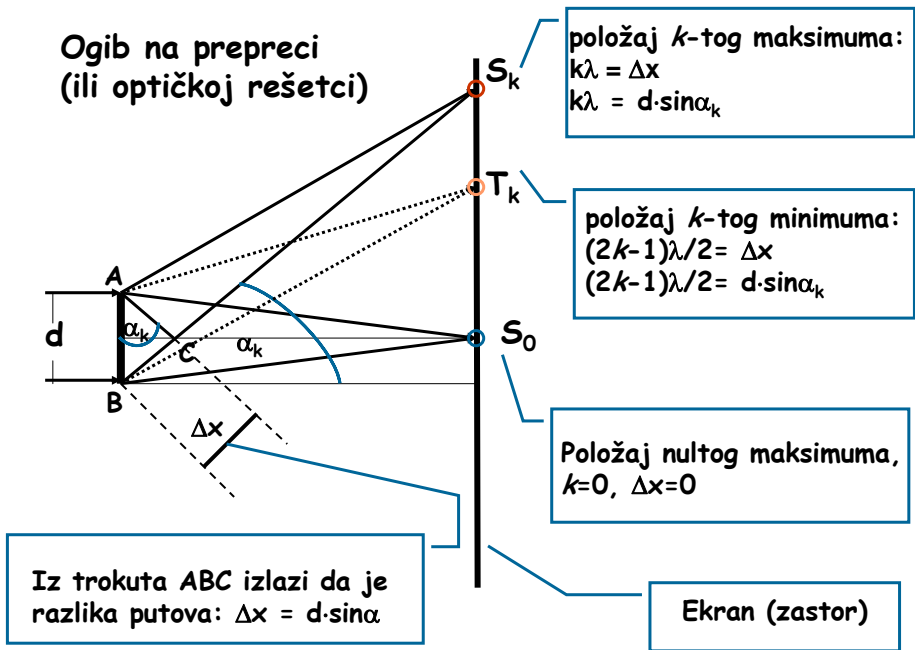
POWEZAJI \rightarrow MAKSIMUMA: $\frac{\varphi}{2} = k\pi$
 $\Delta t = k\lambda$

\rightarrow MINIMUMA:

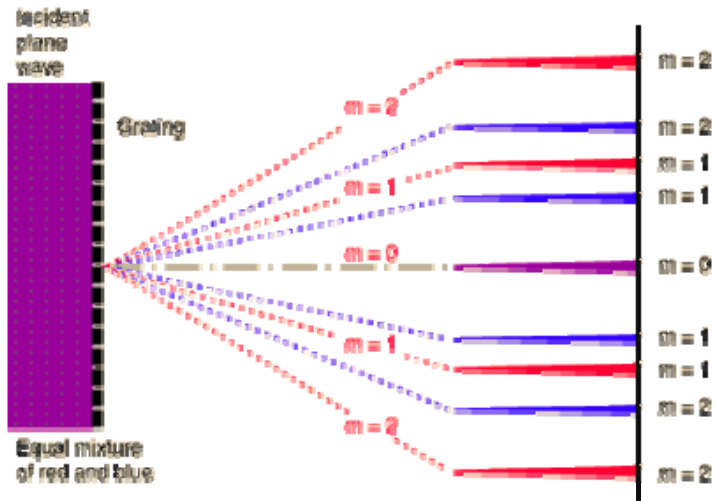
$$\frac{\varphi}{2} = (2k-1) \frac{\pi}{2}; \quad \Delta t = (2k-1) \frac{\lambda}{2}$$

- Ogib





Optička mrežica (rešetka)



Primjer ogiba
na optičkom mrežici:
compact disc



Staze (tracks) tvrdih diskova (compact disc) djeluju kao optičke rešetke. Različitim kutom ogiba pojedinih boja odvajaju se neke boje iz područja vidljive (bijele) svjetlosti. Staze su odvojene oko $1,6 \mu\text{m}$, što odgovara broju oko 625 staza po milimetru; što odgovara uobičajenim laboratorijskim rešetkama. Iz uvjeta za položaje maksimuma možemo izračunati da je

$$d \cdot \sin \alpha = k\lambda$$

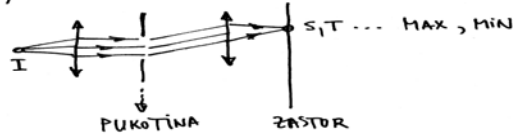
broj maksimuma za crvenu boju 2, te da se prvi maksimum promatra pod kutom oko 22° .

Jednadžba vala i ogib

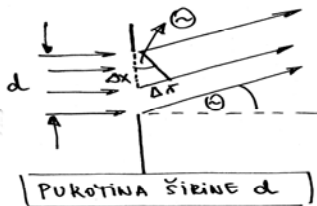
4.

OGIB SVJETLOSTI (DIFRAKCIJA)

- a) FRESNEL ... PUKOTINA KUGLASTI VAL
- b) FRAUNHOFER ... PUKOTINA .. RAVNI VAL



UVJET ZA MAX. ili MIN. DOBIJE SE ZBRAJANJEM VALOVA ELEKTRIČNOG POLJA IZ ČITAVOG SNOPA (INTEGRIRANJE)



$$\begin{aligned} \Delta r &= dx \cdot \sin \theta \\ \Delta \varphi &= K dx \sin \theta \\ \text{ili } d\varphi &= K dx \sin \theta; \quad K = \frac{2\pi}{\lambda} \end{aligned}$$

Elementarni dio električnog polja:

$$dE_{elem} = E_0 \frac{dx}{d} \cos(\varphi + \omega t)$$

$$E_{uc}(P) = \int_0^d \frac{E_0}{d} \cos(\varphi + \omega t) dx$$

5.

NAKON INTEGRIRANJA,

i SUPSTITUCIJE: $\cos(\omega t + \varphi) = \text{Re}(e^{i(\omega t + \varphi)})$

DOBITAMO UKUPNO ELEKTRIČNO POLJE U TOČKI P:

$$E_{uc}(P) = E_0 e^{i\omega t} \frac{e^{iKd \sin \theta} - 1}{i K \sin \theta \cdot d}$$

Intenzitet u točki P:

$$I = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} E \cdot E^*$$

NAKON MNOŽENJA:

$$E_{uc}(P) \cdot E_{uc}^*(P) = E_0^2 e^{-i\omega t} \frac{e^{-iKd \sin \theta} - 1}{-i K d \sin \theta \cdot d}$$

dobivamo IZRAZ ZA Intenzitet:

$$I = I_0 \frac{\sin^2 \left(\frac{K d \sin \theta}{2} \right)}{\left(\frac{K d \sin \theta}{2} \right)^2}$$

MA Ksinomi: $d = \frac{\lambda}{2}, 3 \frac{\lambda}{2}, \dots (2k-1) \frac{\lambda}{2}$

$$\frac{K d \sin \theta}{2} = (2k-1) \frac{\pi}{2}; \text{ uz } K = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\Rightarrow (2k-1) \frac{\lambda}{2} = d \sin \theta; \quad d \cdot \sin \theta = \Delta r$$

MINIMUMI: $\alpha = 0, \pi, 2\pi \dots k\pi$

(6)

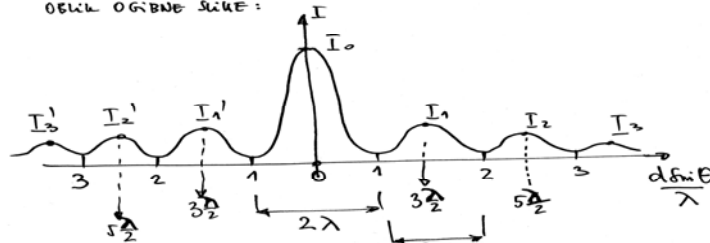
$$\frac{K d \sin \theta}{2} = k\pi; \text{ uz } K = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\rightarrow \boxed{k\lambda = d \sin \theta}; \quad d \sin \theta = \Delta r$$

Ali, za $\alpha = 0 \Rightarrow \lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{\sin^2 \alpha}{\alpha^2} \rightarrow 1$

4 za $\theta = 0 \rightarrow$ MAXIMUM 0-tog REDA

ODLUK OGIBNE SINE:



ŠIRINA 0-tog MAXIMUMA $\rightarrow 2\lambda$
 ŠIRINE OSTALIH MAXIMUMA $\rightarrow \lambda$

ODNOSI MAXIMUMA:

(7)

$$I = I_0 \frac{\sin^2 \frac{K d \sin \theta}{2}}{\left(\frac{K d \sin \theta}{2}\right)^2}$$

$$I_1 = I_0 \frac{\sin^2 \frac{3\pi}{2}}{\left(\frac{3\pi}{2}\right)^2} = \frac{I_0}{\left(\frac{3\pi}{2}\right)^2}$$

$$I_2 = \frac{I_0}{\left(\frac{5\pi}{2}\right)^2} \quad ; \quad I_3 = \frac{I_0}{\left(\frac{7\pi}{2}\right)^2} \quad ; \quad I_4 = \frac{I_0}{\left(\frac{9\pi}{2}\right)^2}$$

$$\Rightarrow I_0, \frac{I_0}{22,2} \quad ; \quad \frac{I_0}{61,7} \quad ; \quad \frac{I_0}{120}$$

$\nearrow I_1 \quad \nearrow I_2 \quad \nearrow I_3$

INTENZITETI BRZO OPADAJU ...
(NAGLO)

- Čestična (korpuskularna) priroda svjetlosti; fotoni svjetlosti

fotoelektrični efekt

Light shining on clean sodium metal in a vacuum

Electrons ejected from the surface

Sodium metal

objašnjenje \Rightarrow

Light photons

Electrons ejected from the surface

Sodium metal

Photon energy

$E = hv$

explains the experiment and shows that light behaves like particles.

$E = hv$

frequency of radiation, sometimes written as ν giving expression $E = h\nu$.

Quantum energy of a photon.

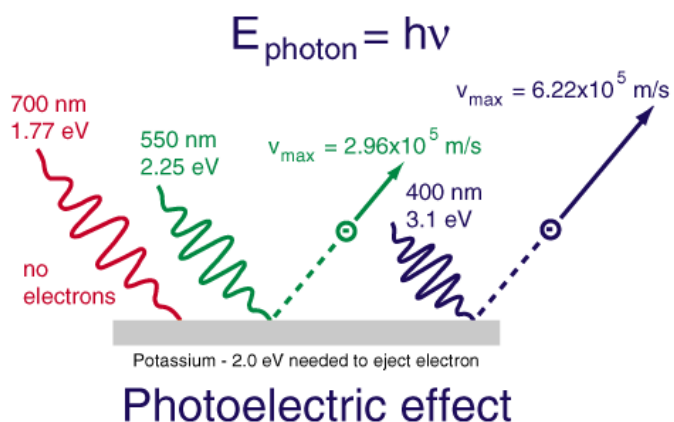
$h = \text{Planck's constant} = 6.626 \times 10^{-34} \text{ Joule}\cdot\text{sec} = 4.136 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$

jednadžba fotoefekta

$$E_f = W_{izl} + E_{kin, maks}$$

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda_{gr}} + eU$$

shema fotoefekta



-energiju izlazećih elektrona možemo mjeriti zakočnim naponom

Elektroni izlijeću iz tanke metalne folije pod utjecajem nekih dijelova vidljive (i UV) svjetlosti odvojenih disperzijom na prizmi

