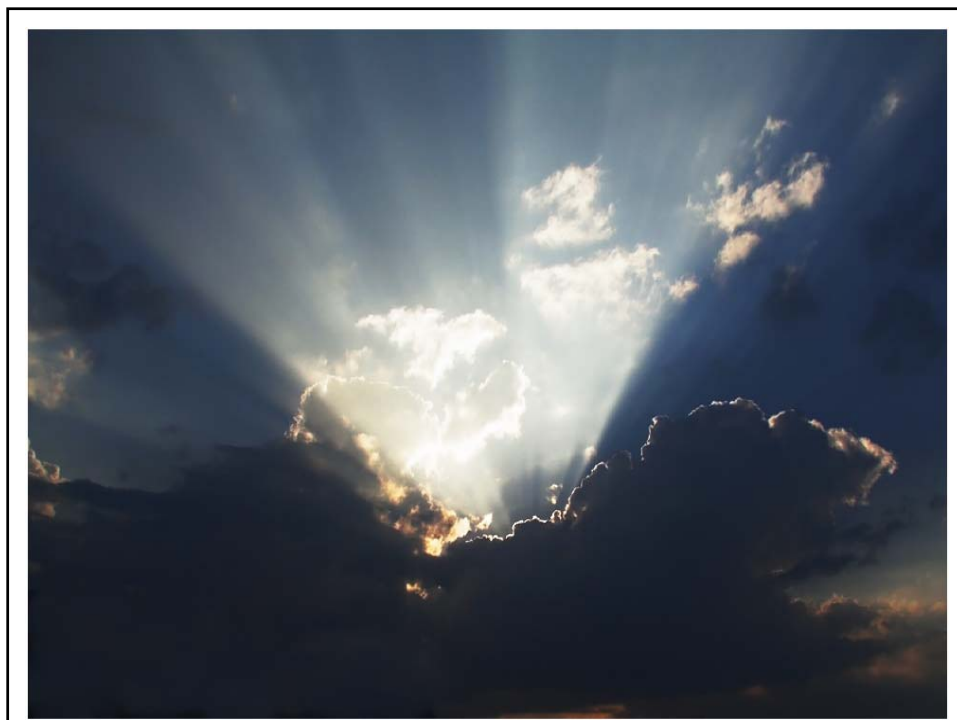


Fizika 2

Optika: Geometrijska Fizikalna

2007/08



Svjetlost je...

Svjetlost je ono što čini objekte oko nas vidljivima

Svjetlost je jedini izvor boje

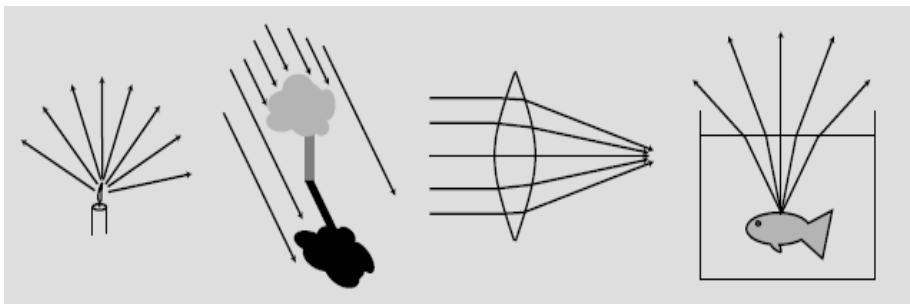
Svjetlost je energija

Svjetlost je i val i čestica

Svjetlost putuje i međudjeluje s materijom

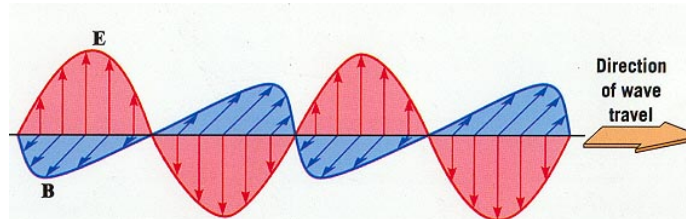
...u geometrijskoj optici:

- svjetlost se širi pravocrtno
- brzina svjetlosti u nekom optičkom sredstvu je konstantna



....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:

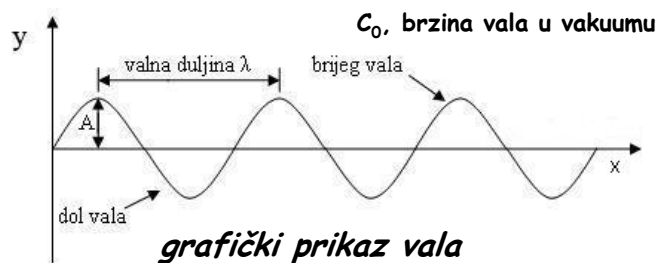


Brzina elm. vala (svjetlosti) c_0 , u vakuumu iznosi:
 $c_0 = 299\,792,458 \text{ km/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

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

Osnovne karakteristike vala:

- valna duljina, λ (m, $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$)
 - 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:

$$E=h \cdot f,$$

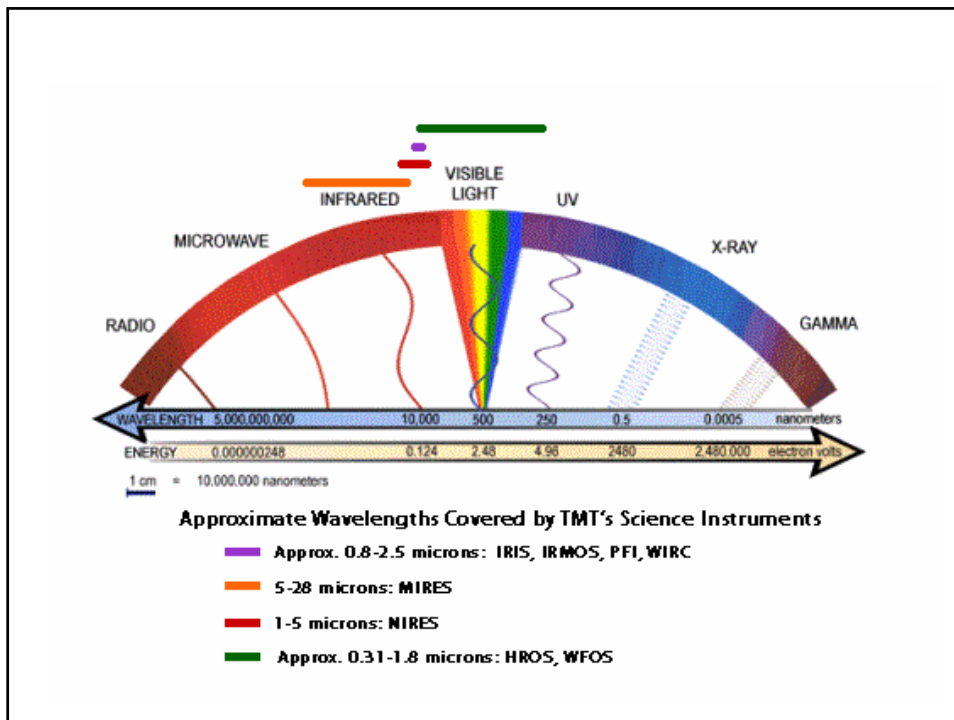
gdje je h Planckova konstanta koja iznosi $6,626 \cdot 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$.

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.

WAVELENGTH AND ENERGY OF THE VISIBLE SPECTRUM COLORS

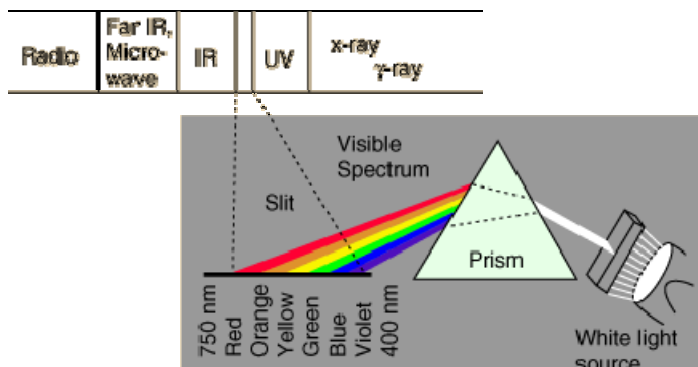
COLOUR	WAVELENGTH	ENERGY
Red	700 nm	1.771 eV
Reddish orange	650 nm	1.909 eV
Orange	600 nm	2.067 eV
Yellow	580 nm	2.138 eV
Yellowish green	550 nm	2.254 eV
Green	500 nm	2.480 eV
Blue	450 nm	2.765 eV
Violet	400 nm	3.100 eV

Source: Kurt Nassau, [Experimenting with Color](#)



Vidljiva svjetlost (visible light)

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

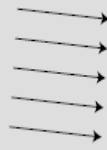


što
je
dakle

S
V
J
E
T
L
O
S
T

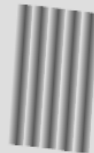
?

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.

....naučit ćemo o tome u:

- geometrijskoj optici
- fizikalnoj (valnoj i čestičnoj) optici

...s pripadnim pojavama i zakonitostima koji danas objašnjavaju svjetlost.

Geometrijska optika

- zakoni geometrijske optike
- jednoznačno preslikavanje; Gaussova optika
- refleksija svjetlosti:
ravna zrcala, sferna zrcala
- lom svjetlosti:
ravni sistemi (ravni dioptrar)
sferni sistemi (sferni dioptrar, tanka leća, debela leća, fotoaparatar, sistem leća, mikroskop)

Geometrijska optika:

u ovom dijelu optike svjetlost se proučava kao pravocrtna pojava koja se širi brzinom $c_0 = 299,792,458 \text{ m/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ u vakuumu.

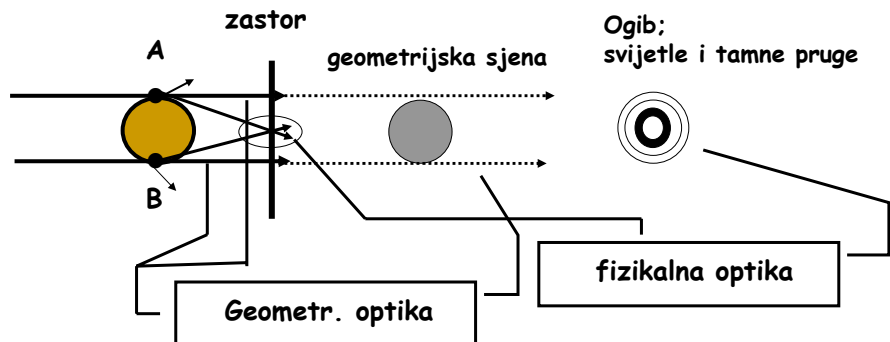
Svojstva svjetlosti objašnjena u:
zakonima geometrijske optike

Primjena svojstava svjetlosti koristi se u:
procesu preslikavanja

- ravni sistemi (ravni dioptrar, planparalelna ploča, prizma)
- leća, sistem leća
- optički instrumenti (fotoaparatar, mikroskop)

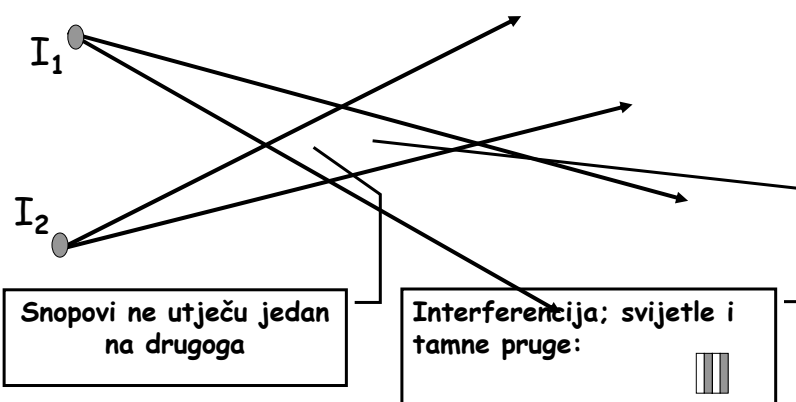
Zakoni geometrijske optike

1. Zakon pravocrtnog širenja svjetlosti



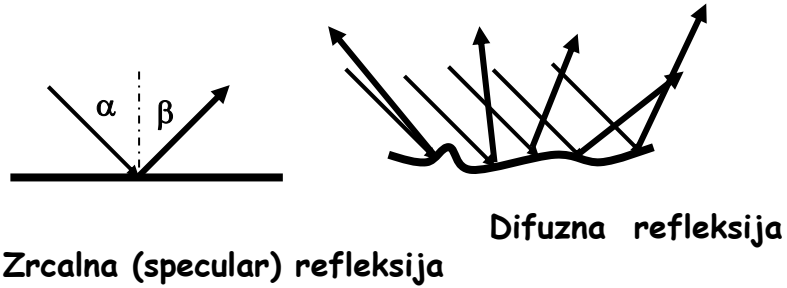
Zakoni geometrijske optike

2. Zakon nezavisnosti širenja snopova svjetlosti



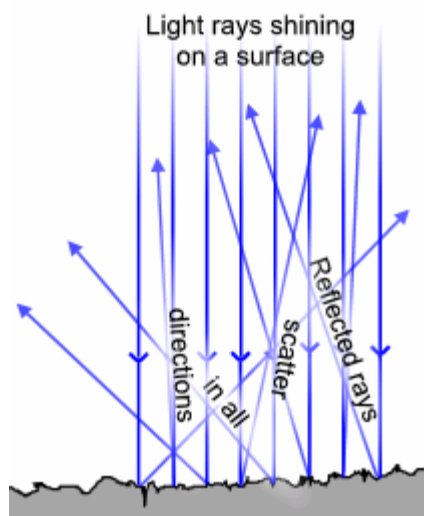
Zakoni geometrijske optike

3. Zakon refleksije, $\alpha = \beta$



Difuzna refleksija;

http://en.wikipedia.org/wiki/Diffuse_reflection



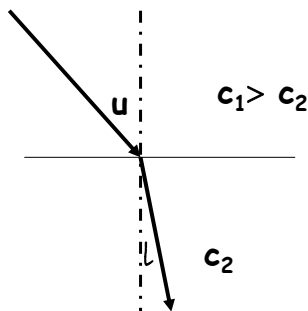
Zakoni geometrijske optike

4. Zakon loma:

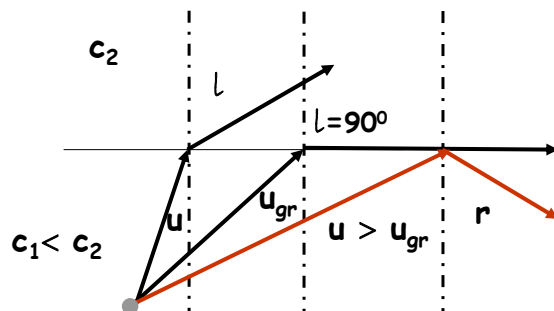
(Snell-Descartes-ov zakon)

$$\frac{\sin u}{\sin l} = \frac{n_2}{n_1}$$

Lom svjetlosti iz optički rjeđeg
u optički gušće sredstvo



Lom svjetlosti iz optički
gušćeg u optički rjeđe sredstvo



Totalna refleksija

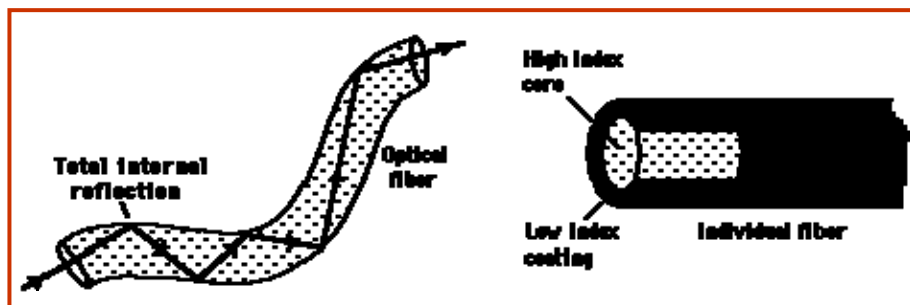
Kada se svjetlost lomi iz optički gušćeg u optički rjeđe sredstvo, može se pojaviti totalna refleksija. Ona nastaje u slučaju kada je kut upada veći od graničnog kuta; slika u prethodnom slide-u.

Zakon loma u slučaju graničnog loma glasi:

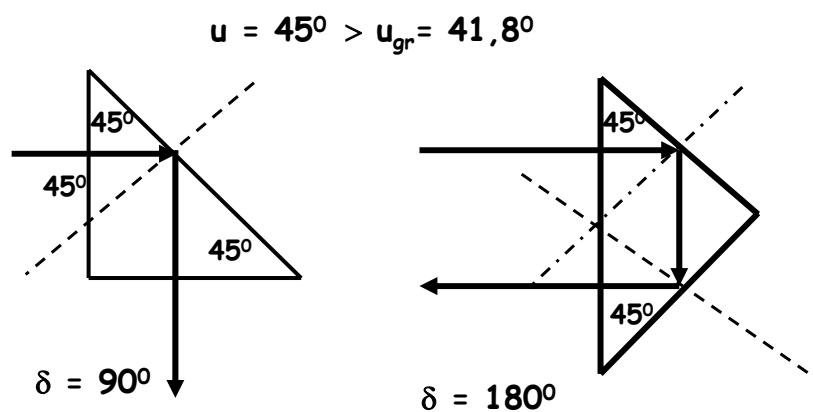
$$\frac{\sin u_{gr}}{\sin 90^0} = \frac{1}{n_{sredstva}} \Rightarrow \sin u_{gr} = \frac{1}{n_{sr}}$$

pa je zadnji oblik jednadžbe ujedno i jednadžba graničnog kuta, koji određuje pojavu **totalne refleksije**.

Primjena totalne refleksije: optička vlakna



Primjena totalne refleksije: prizme



Lom svjetlosti na realnim optičkim sistemima

Optički sistemi najčešće nisu idealni, što znači da sistem kod kojeg promatramo lom svjetlosti pokazuje i djelomično svojstvo refleksije.

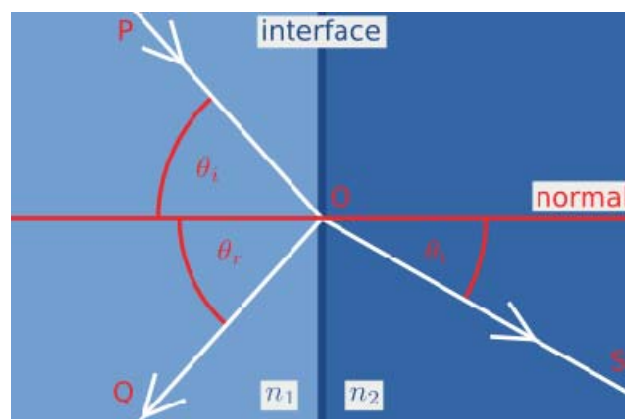
Faktori refleksije, R , i transmisije, T , definirani su kao omjeri reflektiranog, Φ_R , (ili transmitiranog, Φ_T) toka svjetlosti i ulaznog toka svjetlosti, Φ_0 .

$$R = \frac{\Phi_R}{\Phi_0}$$

$$T = \frac{\Phi_T}{\Phi_0}$$

oba faktora su bezdimenzionalne veličine

Realne prozirne plohe- istodobni djelomični lom i refleksija



Svjetlost koja nailazi na granicu između dva realna medija (optička sredstva, n_1 i n_2) djelomično se lomi i djelomično reflektira

Fresnel-ove jednačbe -
ovisnost faktora refleksije i transmisije o
indeksu loma optičkih sredstava

Augustin-Jean Fresnel (1788 - 1827), bio je francuski fizičar koji je dao veliki doprinos u području optike; posebno valne optike.



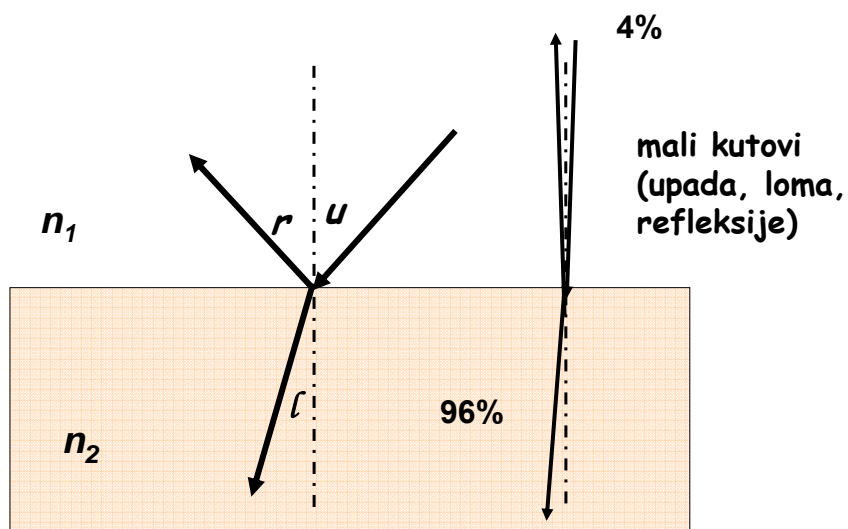
- Refleksija i lom svjetlosti
- Interferencija svjetlosti (Fresnelova zrcala)

Fresnel je pokazao: faktori refleksije, R , i transmisije, T , ovise o indeksu loma na slijedeći način (uz pretpostavku nepolariziranih zraka svjetlosti koje upadaju pod malim upadnim kutovima na granicu medija, što znači da svjetlost upada gotovo okomito na površinu):

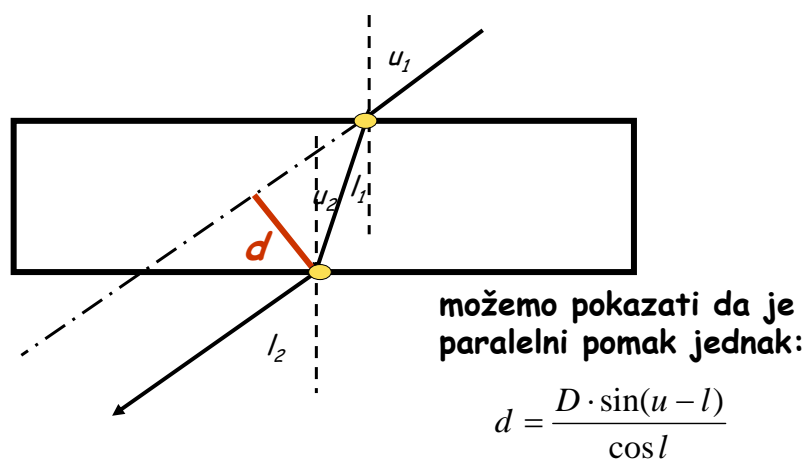
$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad T = 1 - R = \frac{4n_1n_2}{(n_1 + n_2)^2}$$

Ako je prvo optičko sredstvo zrak (vakuum): $n_1=1$, a drugo optičko sredstvo staklo: $n_2=1,5$, tada je faktor refleksije $R=4\%$ a transmisije $T=96\%$; provjerite.

djelomičan lom i refleksija; nastavak

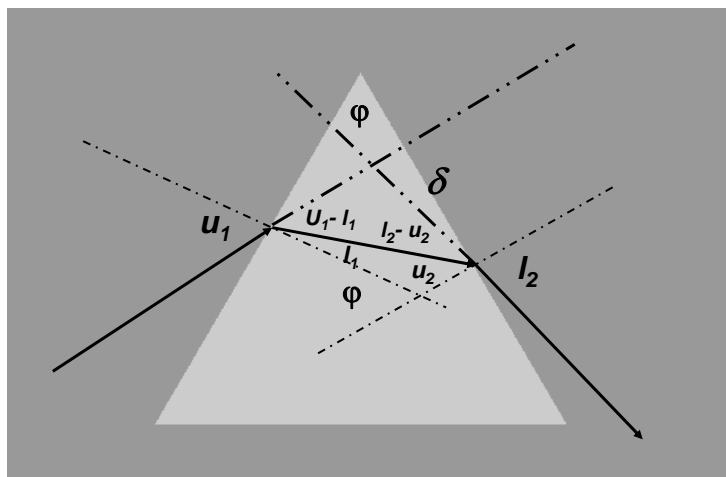


lom svjetlosti na planparalelnoj ploči - paralelni pomak, d

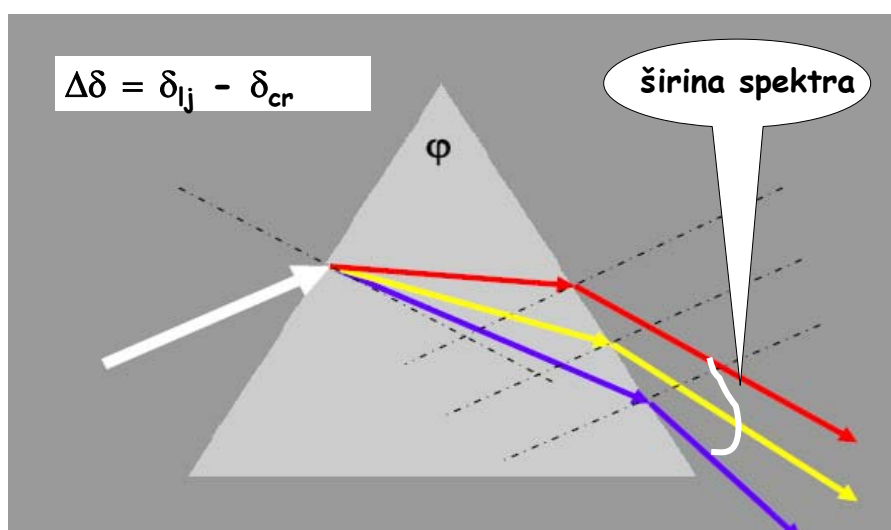


Lom svjetlosti na prizmi;
 iz geometrije loma svjetlosti može se pokazati da je kut devijacije (skretanja) ulazne zrake svjetlosti jednak:

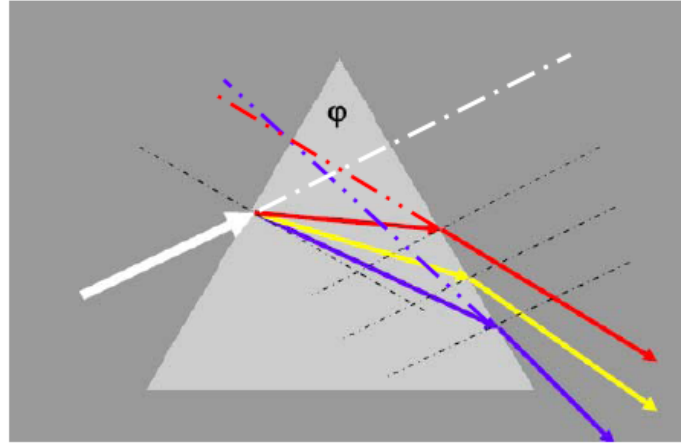
$$\delta = u_1 + l_2 - \varphi$$



Prizma-disperzija svjetlosti



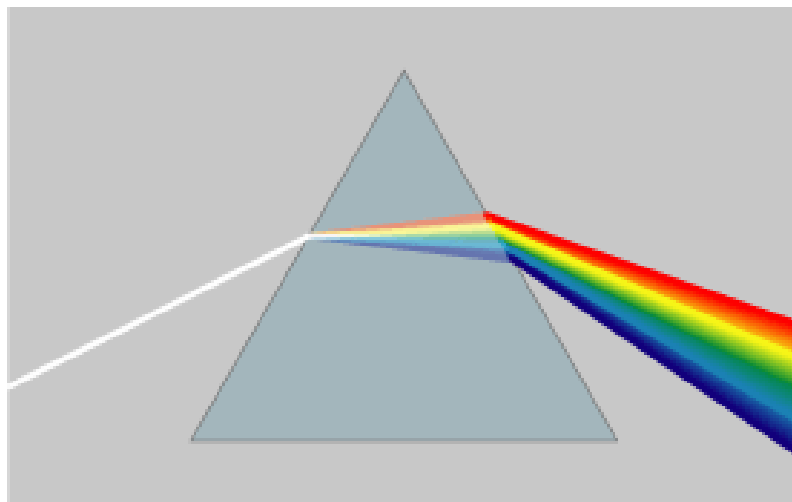
Prizma- kutovi devijacije za krajnje linije spektra (plava i crvena linija)



$$\delta_{pl} > \delta_{cr} \text{ slika...}$$

Dispersion:

http://en.wikipedia.org/wiki/Dispersion_%28optics%29





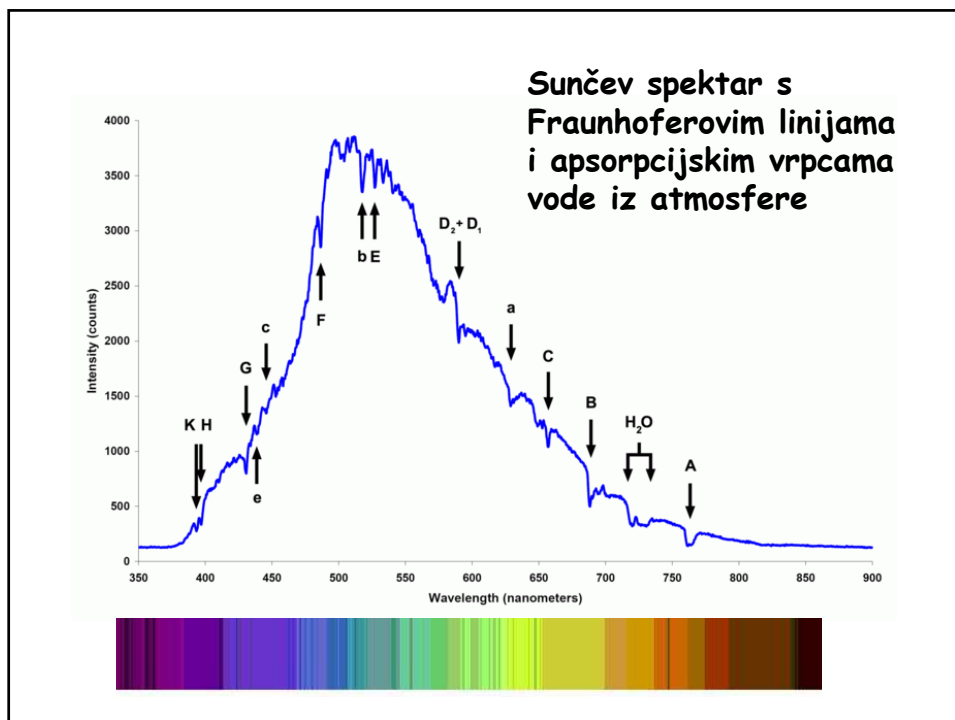
Sunčev spektar

Joseph von Fraunhofer (1787- 1826)

bio je njemački optičar. Poznat je po otkriću tamnih apsorpcionih linija, nazvanim Fraunhoferovim linijama, u sunčevom spektru. Uz to je izradio posebna optička stakla i akromate (sistemi za ispravljanje kromatske aberacije) potrebna za gradnju teleskopa.



http://en.wikipedia.org/wiki/Joseph_von_Fraunhofer



Tablica apsorpcionih Fraunhoferovih linija i pripadnih elemeneta;
valne duljine u nm

Element	Wavel	Element	Wavele
<u>O</u> ₂	898.76	Fe	495.76
<u>O</u> ₂	822.69	H β	486.13
<u>O</u> ₂	759.37	Fe	466.81
<u>O</u> ₂	686.71	Fe	438.35
<u>H</u> α	656.28	H γ	434.04
<u>O</u> ₂	627.66	Fe	430.79
<u>Na</u>	589.59	<u>Ca</u>	430.77
<u>Na</u>	588.99	H δ	410.17

<u>He</u>	587.56	<u>Ca</u> ⁺	396.84
<u>Hg</u>	546.07	<u>Ca</u> ⁺	393.36
<u>Fe</u>	527.03	Fe	382.04
<u>Mg</u>	518.36	Fe	358.12
<u>Mg</u>	517.27	<u>Ti</u> ⁺	336.11
Fe	516.89	Fe	302.10
Fe	516.75	<u>Ni</u>	299.44
<u>Mg</u>	516.73		

Preslikavanje

Preslikavanje u geometrijskoj optici je proces u kojem se svakoj točki predmeta, (P), jednoznačno pridružuje jedna točka slike, (S), pomoću optičkog sistema, (OS), koji točke slike stvara optičkom obradom (*refleksijom ili lomom*) svjetlosnih zraka.

U preslikavanju je, dakle, prisutna veza između:

$$P - OS - S,$$

za koju ćemo pokazati da se može opisati jednoznačnom relacijom; jednačbom konjugacije ili, jednostavnije, jednačbom leće,

Preslikavanje..nastavak

Jednoznačno preslikavanje omogućeno je dijelom geometrijske optike koju je definirao Gauss, pa taj dio nazivamo **Gaussovom optikom**.

Uvjeti jednoznačnog preslikavanja zahtijevaju idealna svojstva optičkih sistema i svjetlosnih snopova koji s njima interagiraju; jer jedino takva svojstva omogućuju jednostavan matematički zapis i jednoznačno preslikavanje.



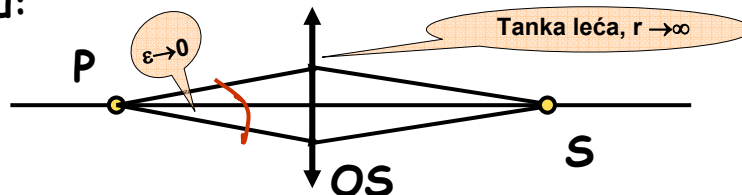
Johann Carl Friedrich Gauss (1777 - 1855), bio je njemački matematičar i znanstvenik, koji je dao veliki doprinos u matematici (analiza, diferencijalne jednačbe) i fizici (elektrostatika, optika, astronomija); ponekad je nazivan i "princem matematičara"

Gaussovi uvjeti su definirani:

a) Optički sistemi (zrcala, leće) moraju biti male zakrivljenosti, $r \rightarrow \infty$, što znači gotovo ravni sistemi; tanke leće,

b) Snopovi svjetlosti moraju biti uski, čiji otvori snopa (kut snopa, ε) moraju težiti prema nuli; $\varepsilon \rightarrow 0$.

Gornji uvjeti mogu se jednostavnim crtežom prikazati na način, kojeg uvijek moramo imati na umu:



Tanke leće; jednađba preslikavanja:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}, \text{ gdje je desna strana jednađbe}$$

recipročna vrijednost žarišne udaljenosti, f , koja predstavlja jakost optičkog sistema, J :

$$J = \frac{1}{f(m)} \text{ dpt} .$$

Žarišna udaljenost povezana je geometrijom leće i optičkim sredstvom na način:

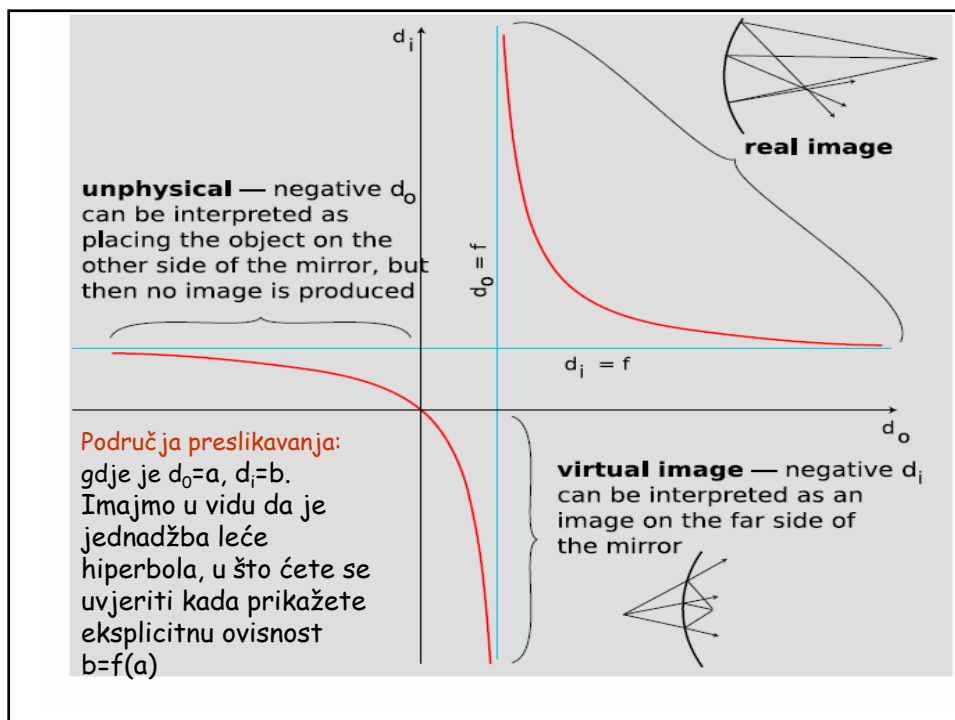
$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

Linearno povećanje definirano je kao omjer veličine slike, y' , i predmeta, y :

$$p = \frac{y'}{y} = -\frac{b}{a} = \frac{f}{f-a}, \text{ gdje su zadnja dva}$$

izraza izvedena iz preslikavanja. Ti izrazi pokazuju da povećanja ovise o optičkom sistemu, f , poziciji predmeta u odnosu na leću, a , o kojoj je ovisna i pozicija slike, b .

Predznaci optičkih veličina: a , b i f definirani su u **fizikalnoj konvenciji** optičkih veličina procesa preslikavanja; *vježbe iz fizike!*

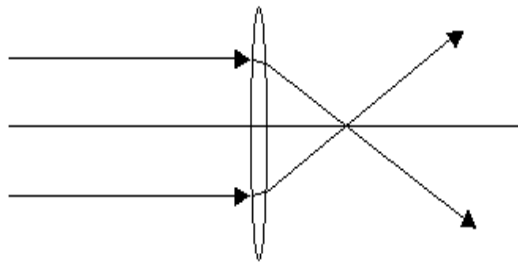


geometrijska optika; preslikavanje na lećama

+ leća

Case 1 – Object at Infinity

predmet je u ∞ , paralelan
snop zraka svjetlosti



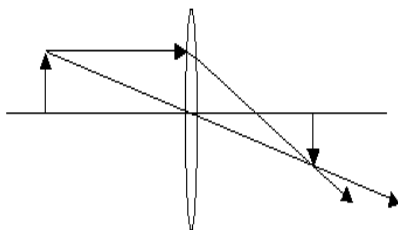
Image

- Real
- Point
- Located at the focal point
- On the opposite side of the lens

geometrijska optika; preslikavanje na lećama

sabirna leća;
predmet izvan 2f

Case 2 – Object beyond 2F



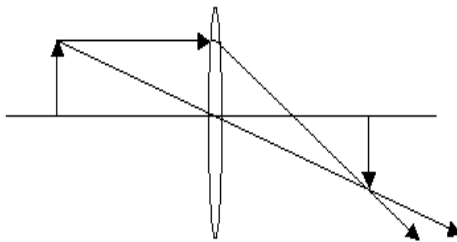
Image

- Real
- Inverted
- Located between F and 2F
- On the opposite side of the lens
- Smaller than object

geometrijska optika; preslikavanje na lećama

sabirna leća;
predmet je u $2f$

Case 3 – Object at $2F$



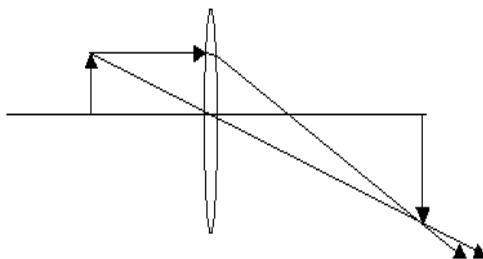
Image

- Real
- Inverted
- Located at $2F$
- On the opposite side of the lens
- Same Size as object

geometrijska optika; preslikavanje na lećama

sabirna leća;
predmet je unutar $2f$

Case 4 – Object between F and $2F$



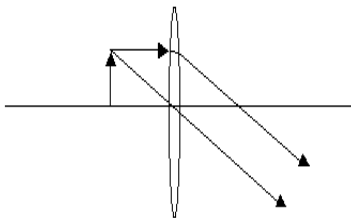
Image

- Real
- Inverted
- Located beyond $2F$
- On the opposite side of the lens
- Magnified

geometrijska optika; preslikavanje na lećama

sabirna leća;
predmet je u F, slika u ∞

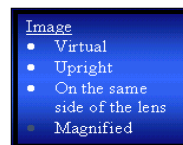
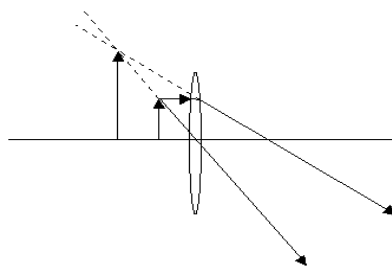
Case 5 – Object at F



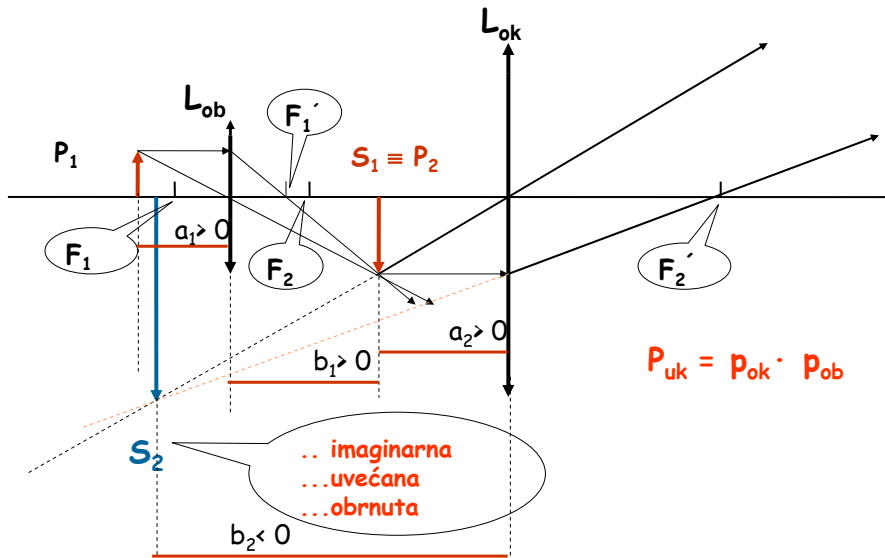
geometrijska optika; preslikavanje na lećama

sabirna leća; predmet je
unutar F i leće

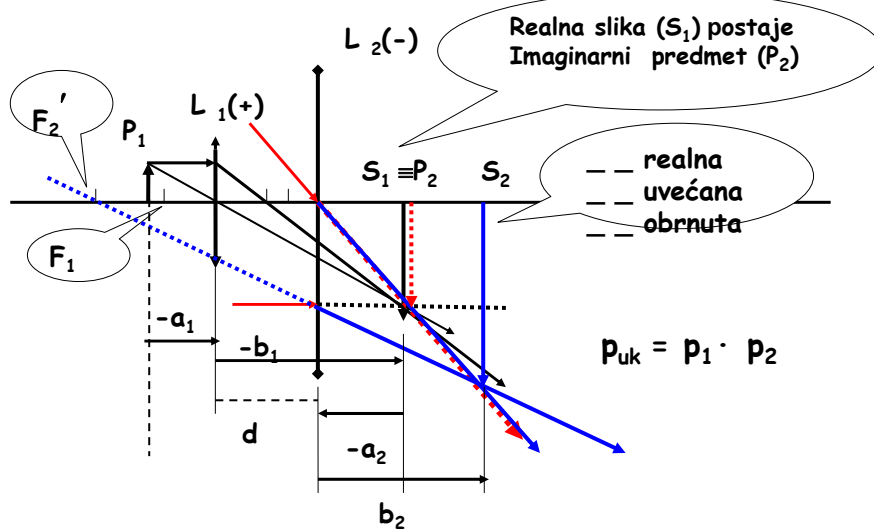
Case 6 – Object between F and the lens



Nastajanje slike u mikroskopu



Sistem leća: divergentna leća daje realnu sliku



Pogreške kod leća

Uvjeti u kojima nastaju pogreške:

- a) Debele leće; zaobljeni sistemi ($r \rightarrow$ konačno)
- b) Široki snop svjetlosti se koristi kod preslikavanja ($\varepsilon \neq 0$)

Gore navedeni uvjeti se realno koriste u radu optičkih instrumenata; oni dovode do pogrešaka u preslikavanju, koje moramo upoznati i znati kako se ispravljaju.

Vrste porešaka:

A) Sferna aberacija; uzrokovana konačnom (najčešće velikom) zaobljenošću leća.

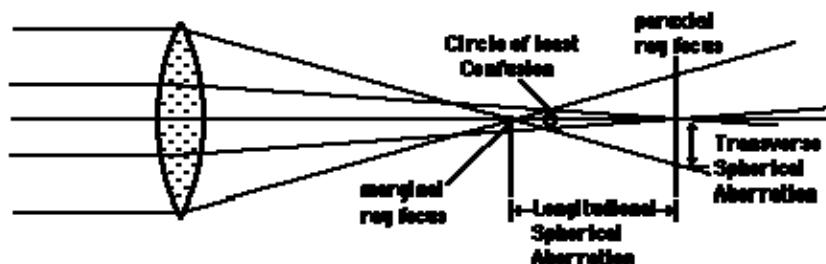
Pretpostavka: na optičke sisteme nailazi monokromatska svjetlost

B) Kromatska aberacija; uzrokovana ulaskom vidljive svjetlosti i nastajanjem disperzije svjetlosti na optičkim sistemima.

Obje (glavne) vrste pogrešaka **uklanjaju se sistemima leća** koje zadovoljavaju uvjete koje se približavaju jednoznačnom preslikavanju.

Sferna aberacija

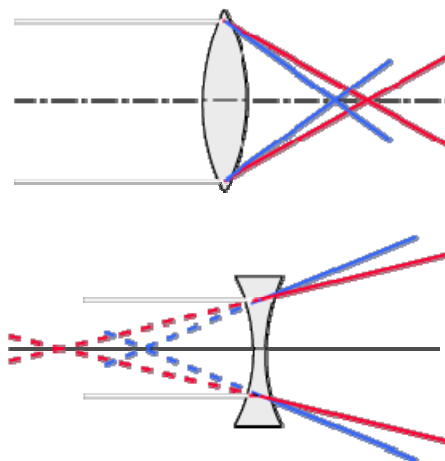
Širok paralelan snop zraka svjetlosti nailazi na debelu leću; sve zrake se nakon loma ne sastaju u žarištu slike nego stvaraju više žarišta stvarajući pogrešku longitudinalne aberacije koju mjerimo duž optičke osi.



kromatska aberacija-

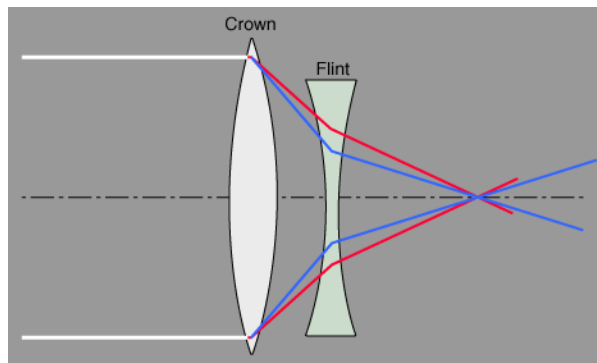
Pogreška koja se javlja prolazom vidljive ("bijele") svjetlosti kroz leću u procesu preslikavanja;

uzrok pogreške je **dispersija svjetlosti**.



Slike koje nastaju radi te pogreške su obojene onom bojom čiji lom je dominantan u ravnini u kojoj promatramo sliku.

Ispravljanje kromatske aberacije: akromatski dublet se izrađuje na način da šalje rubne dijelove spektra u jednu točku (plavu i crvenu boju); pogreška za žarište znatno je manja, (slika)



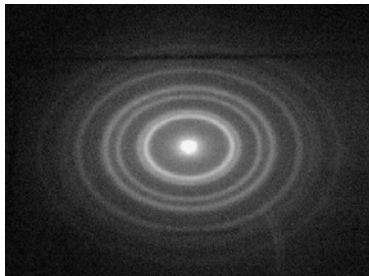
Dublet se sastoji od:
jače (+) leće
slabije
disperzivne moći
(krunsko staklo) i
slabije (-) leće
jače disperzivne
moći (flint staklo)

- **Fizikalna optika**

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

Fizikalna optika

- Interferencija
- Ogib

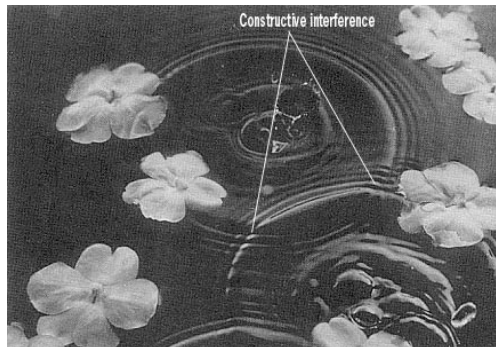


Interferencija valova (i svjetlosnih valova) je svojstvo algebarskog zbrajanja (pojačavanja i poništavanja) dva ili više vala.

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.

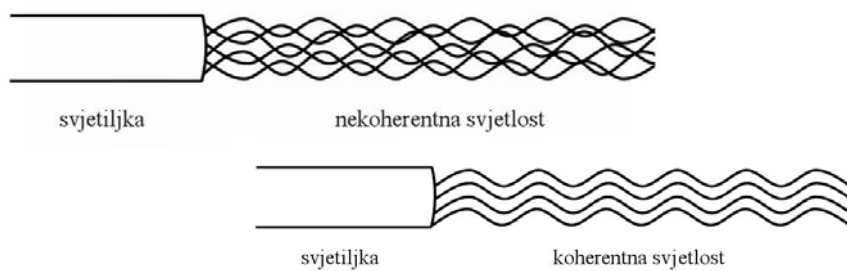


b)

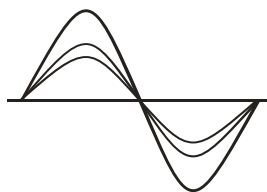
Osnovni uvjet potreban za konstruktivnu interferenciju (zbrajanje dva ili više vala; svjetla pruga u valovima vidljive svjetlosti) i destruktivnu interferenciju (potpuno poništenje dva ili više vala; tamna pruga u valovima vidljive svjetlosti) je:

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

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

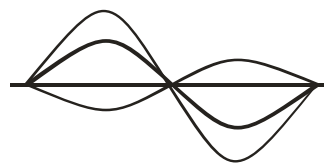


Ako su valovi koherentni, tada zbrajanjem mogu dati konstruktivnu ili destruktivnu interferenciju:



Razlika putova za konstruktivnu interferenciju:

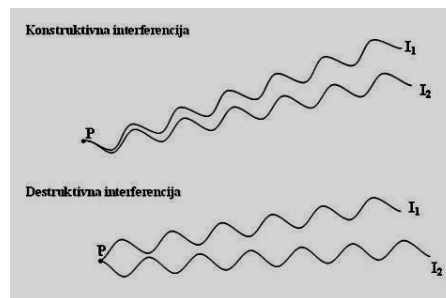
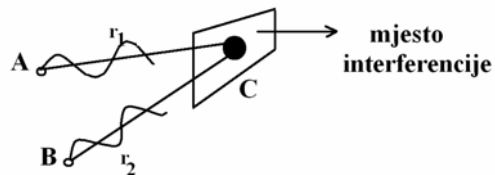
$$\Delta x = k\lambda \quad k = 0, 1, 2, \dots$$



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



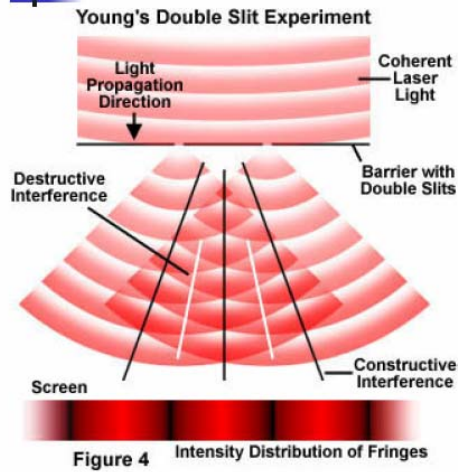
Thomas Young



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

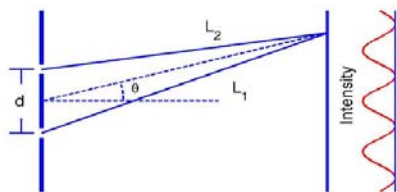
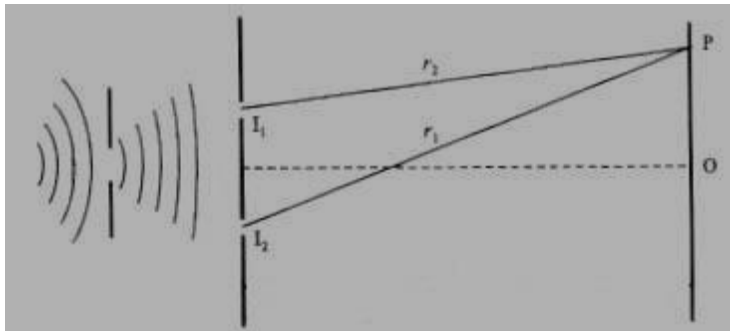
U ovom izlaganju: valna priroda svjetlosti, interferencija, pokus na dvije uske pukotine; **double slit experiment, 1801.**, kojim je potvrđena valna priroda svjetlosti.

Interference



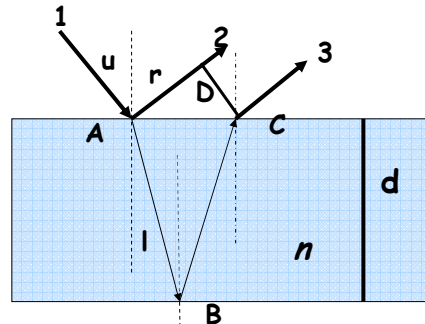
- 1801 T. Young: double slit exp.
- Ripple effect
- Constructive
 - Bright Zones
- Destructive
 - Dark zones

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 putova zraka svjetlosti je:

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

svjetlo

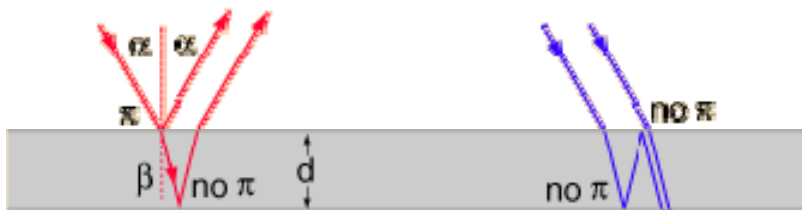
$$\Delta x = (2k - 1) \frac{\lambda}{2}$$

$$\Delta x = k\lambda$$

tama

α = angle of incidence

λ_r = wavelength for maximum reflection



d = film thickness

λ_t = wavelength for maximum transmission

$$2nd \cos \beta = (m - \frac{1}{2}) \lambda_r$$

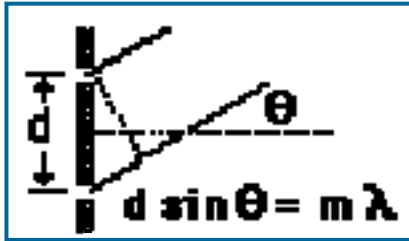
Maximum reflection

$$2nd \cos \beta = m \lambda_t$$

Maximum transmission

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>

Geometrija promatranja maksimuma i minimuma:

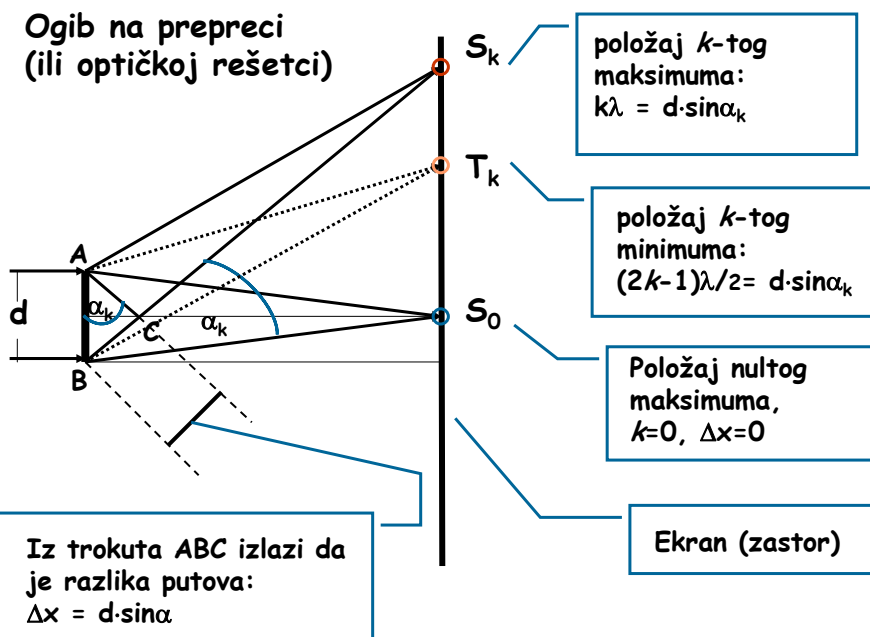


$$d \cdot \sin \alpha = k \lambda$$

$$d \cdot \sin \alpha = (2k - 1) \frac{\lambda}{2}$$

U jednadžbama za položaje ogibnih maksimuma ili minimuma m ili k predstavljaju redni broj maksimuma ili minimuma, α je kut pod kojim se promatraju svijetle (ili tamne) pruge, a d je konstanta optičke rešetke.

Ogib na prepreci (ili optičkoj rešetci)



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

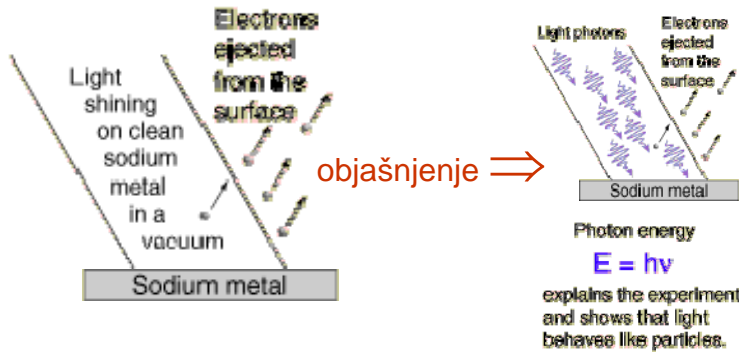
$$d \cdot \sin \alpha = k\lambda$$

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

Fizikalna optika

- čestična(korpuskularna)
priroda svjetlosti, fotoni svjetlosti

fotoelektrični efekt



$$E = h\nu$$

frequency of radiation, sometimes written as f giving expression $E = hf$.

Quantum energy of a photon.

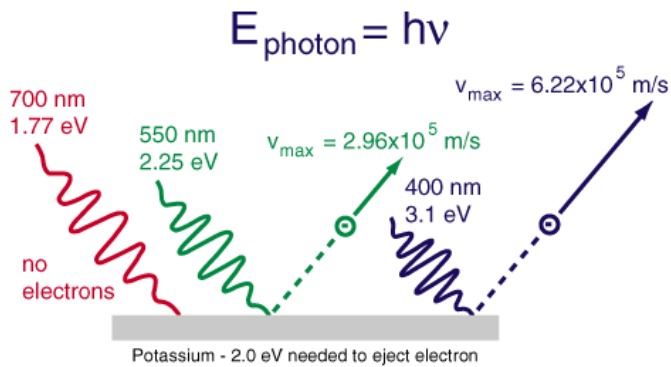
$h = \text{Planck's constant} = 6.626 \times 10^{-34} \text{ Joule}\cdot\text{sec} = 4.136 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$

jednadžba fotoefekta

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

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

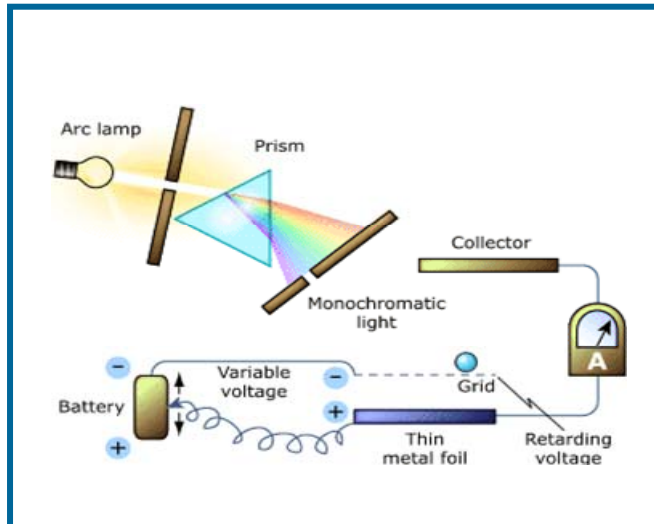
shema fotoefekta



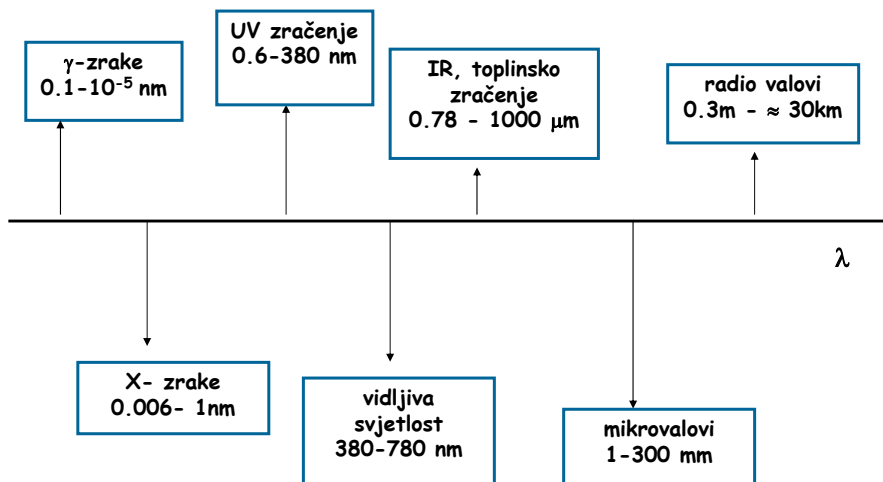
Photoelectric effect

-energiju izlazećih elektrona
možemo mjeriti zakočnim naponom

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



Područja elektromagnetskih valova



**Hvala na pažnji, ali...
ima još**