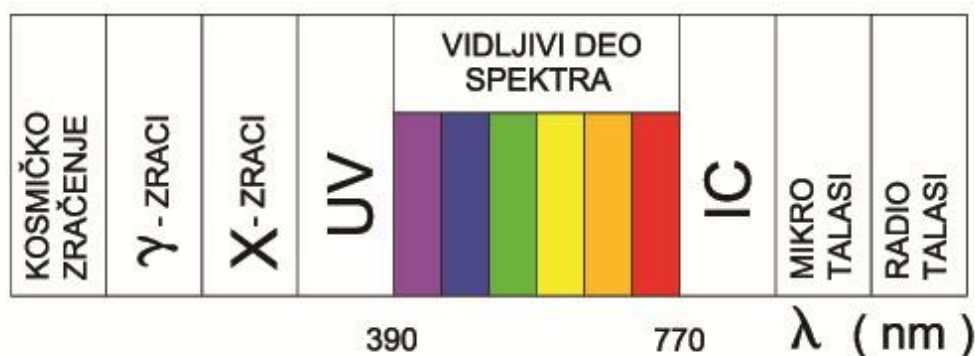


## 1. GEOMETRIJSKA OPTIKA

### 1.1 Priroda svetlosti

Svetlost je deo elektromagnetnog spektra (Slika 1.1).



Slika 1.1 – Spektar elektromagnetnog zračenja

Osnovne karakteristike svih elektromagnetnih zračenja su da:

- prenose energiju
- imaju konstantnu brzinu prostiranja u vakuumu (vazduhu) od  $3 \cdot 10^8$  m/s (brzina svetlosti)

Prema Plankovom zakonu ( $E = h\nu$ ) energija fotona direktno zavisi od frekvencije svetlosti ( $\nu$ ). U ovoj jednačini  $h$  predstavlja Plankovu konstantu i iznosi  $6,624 \cdot 10^{-34}$  J·s.

Razlikujemo tri zone elektromagnetnog spektra:

I) MALU ENERGIJU imaju fotoni koji odgovaraju dalekim IC zracima, mikro talasima, radio talasima (veliko  $\lambda$  tj. malo  $\nu$ ).

- Zbog male energije fotona, kvantna svojstva ove svetlosti su neznatna i kažemo da ovi zraci ispoljavaju pretežno talasna svojstva.

II) VIDLJIVA SVETLOST – energija fotona je veća i zato kažemo da zraci vidljive svetlosti ispoljavaju istovremeno i talasna i korpuskularna svojstva.

III) VELIKU ENERGIJU imaju fotoni koji odgovaraju rengenskim zracima i zraci koje emitiju radioaktivni elementi (malo  $\lambda$  tj. veliko  $\nu$ ) – izražena korpuskularna svojstva.

Pošto smo već SVETLOST definisali kao prostiranje elektromagnetnih talasa svih dužina, nameće se zaključak:

# BIOMEDICINSKA FOTONIKA

## SVETLOST POSEDUJE ISTOVREMENO I KORPUSKULARNA I TALASNA SVOJSTVA.

Zato će se kurs BIOMEDICINSKA FOTONIKA baviti najpre osnovnim svojstvima svetlosti sa gledišta njenog pravolinijskog prostiranja – GEOMETRIJSKA OPTIKA, a zatim i talasnom i elektromagnetnom prirodom svetlosti.

### 1.2 Domen geometrijske optike

Geometrijska optika je grana fizike koja se bavi proučavanjem ponašanja i osobina zraka svetlosti.

### 1.3 Optički sistem

Optički sistem se sastoji od niza optičkih elemenata kao što su: sočiva, prizme, ogledala, plan-paralelne ploče i klinovi koji su projektovani tako da, pomoću prelamanja i odbijanja svetlosti, obave tačno definisane optičke zadatke.

OKO, kao optički sistem, se sastoji od sočiva (rožnjače i očnog sočiva) koje je "priroda projektovala" tako da, pomoću prelamanja svetlosti, formiraju lik na mrežnjači.

### 1.4 Optički materijali

Optički materijali su svi materijali koji propuštaju optičko zračenje (UV, vidljivo, IC). Optički materijali mogu imati bilo koje agregatno stanje: tečno, čvrsto ili gasovito. Optičke komponente se najčešće proizvode od bezbojnog i obojenog stakla, kvarca ili plastike.

Osnovne osobine optičkog stakla su:

#### 1) INDEKS PRELAMANJA

$$n = c / v$$

odnos brzine svetlosti u vakuumu ( $c = 3 \cdot 10^8$  m/s) i brzine svetlosti u posmatranoj sredini.

$$n > 1 \quad \text{i} \quad n = f(\lambda)$$

#### 2) DISPERZIJA – Prelamanje svetlosti zavisi od talasne dužine. Disperzija se definiše kao razlika indeksa prelamanja za dve karakteristične talasne dužine : F i C linije spektra ( $n_F - n_C$ )

# BIOMEDICINSKA FOTONIKA

- F linija (486,1 nm) – PLAVA
- C linija (656,3 nm) – CRVENA

3) ABEOV BROJ – Odnos indeksa prelamanja i disperzije.

$$v = (n_d - 1) / (n_F - n_C)$$

- d linija (587,1 nm) – ŽUTA

Veći Abeov broj označava ravnomernije prelamanje na svim talasnim dužinama.

4) TRANSMISIJA – Odnos energije koja prođe kroz optički sistem i ukupne ulazne energije (%)

## 1.5 Definicija talasnog fronta i zraka svetlosti

Tačkasti izvor svetla (A) emituje svetlosne talase sfernog oblika (kao bačen kamen na površini vode) kao što je prikazano na Slici 1.3.

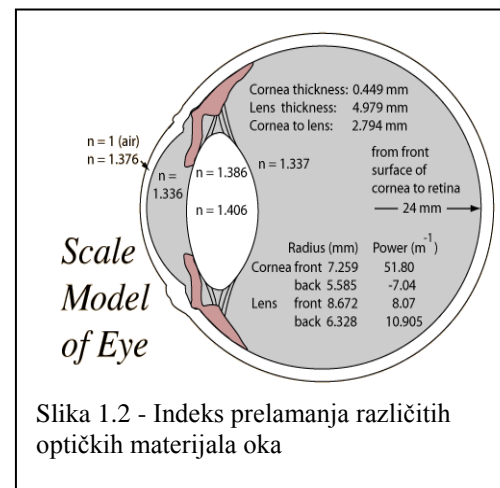
Radius krivine talasnog fronta raste kako se talasni front udaljava od tačkastog izvora zračenja i takav talasni front nazivamo sfernim talasom. Na dovoljno velikom rastojanju od tačkastog izvora svetlosti radius krivine talasnog fronta može se smatrati beskonačno velikim i takav talasni front se naziva ravnim talasom.

Ako se prati putanja jedne tačke (nosioca svetlosne energije) na površini talasnog fronta, za vreme njegovog prostiranja A, A1, A2 ... An, može se uočiti da tačka putuje po jednoj pravoj liniji koju nazivamo zrak svetlosti. Ta prava linija predstavlja normalu na ravan talasnog fronta.

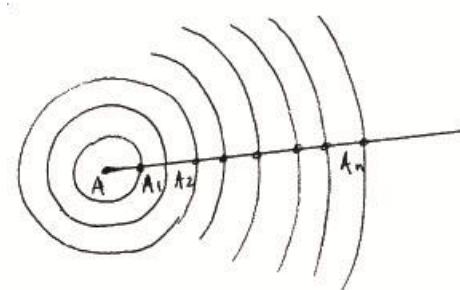
Svaka tačka posmatranog predmeta je tačkasti izvor svetlosti koja emituje svetlosne talase. U geometrijskoj optici svetlosne talase ćemo predstavljati pravim linijama, tj. zracima svetlosti.

Ako se predmet nalazi dovoljno daleko (za oko je to preko 6m), rekli smo da će svaka tačka emitovati ravne talase. Za tačke predmeta koje se nalaze na optičkoj osi oka to će biti snop paralelnih zraka koji su paralelni osi. Za tačke predmeta van optičke ose to će biti snop paralelnih zraka pod nekim uglom u odnosu na osu, kao na Slici 1.4.

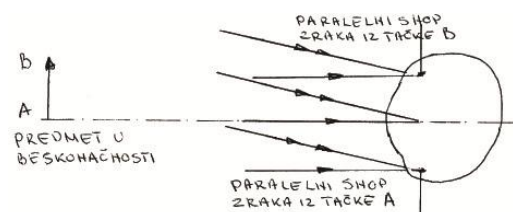
Ako se predmet nalazi na konačnom rastojanju svaka njegova tačka će emitovati sferične talase, pa će i ulazni snopovi svetlosnih zraka za oko biti kosi (konični) kao na Slici 1.5.



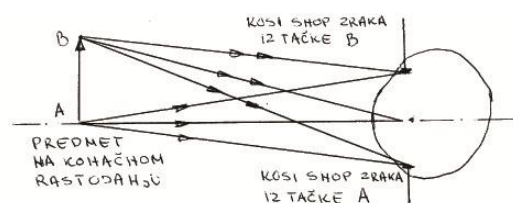
Slika 1.2 - Indeks prelamanja različitih optičkih materijala oka



Slika 1.3 – Prostiranje svetlosnih talasa i zraka svetlosti



Slika 1.4 – Prostiranje svetlosti iz tačaka beskonačno udaljenog predmeta.



Slika 1.5 – Prostiranje svetlosti iz tačaka predmeta na konačnom rastojanju

# BIOMEDICINSKA FOTONIKA

## 1.6 Indeks prelamanja

Rekli smo da je brzina prostiranja svetlosnih talasa u vakuumu (vazduhu) oko  $3 \cdot 10^8$  m/s. U gasovima, tečnostima i čvrstim telima brzina svetlosti je manja od brzine svetlosti u vakuumu.

Odnos brzine svetlosti u vakuumu prema brzini svetlosti u posmatranoj optičkoj sredini naziva se indeks prelamanja i definiše se jednačinom

$$n = c / v$$

gde su:

n – indeks prelamanja

c – brzina svetlosti

v – brzina svetlosti u posmatranoj sredini

Po definiciji, indeks prelamanja za vazduh je  $n = 1$ .

Indeks prelamanja je karakteristika svakog pojedinačnog optičkog materijala. Po definiciji to je broj koji je veći od 1 i pokazuje za koliko je manja brzina prostiranja svetlosti u posmatranom materijalu od brzine svetlosti u vakuumu.

Sočiva za naočare i kontaktna sočiva se izrađuju od različitih optičkih materijala sa različitim indeksima prelamanja.

- $n_{\text{VAZDUH}} = 1$
- $n_{\text{OPTIČKE SREDINE}} > 1$
- $n_{\text{(KONTAKTNA SOČIVA)}} = 1,3 \div 1,5$
- $n_{\text{(SOČIVA ZA NAOČARE)}} = \text{do } 1,9$  (titan)

Oko kao optički instrument je sastavljeno od različitih optičkih sredina: rožnjača, očna vodica, očno sočivo i staklasto telo. Svaki od ovih optičkih materijala ima svoj indeks prelamanja (primer: rožnjača ima  $n = 1.376$ , očna vodica  $n = 1.336$ , sočivo ima  $n = 1.386$  (na periferiji) i  $n = 1.406$  (u centru sočiva), staklasto telo ima  $n = 1.337$ ).

## 1.7 Paraksijalna ili Gausova optika

Pojednostavljeno izučavanje geometrijske optike kao i karakteristika optičkih sistema omogućeno je uvođenjem paraksijalne ili Gausove aproksimacije. Naime, pretpostavka je da svi zraci leže blizu ose optičkog sistema i da sa osom zaklapaju male uglove.

# BIOMEDICINSKA FOTONIKA

U izučavanju oka kao optičkog sistema ova aproksimacija je apsolutno prihvatljiva jer je ulazni otvor (zenica) malih dimenzija, a i vidno polje oka je malo.

## 1.8 Osnovni zakoni geometrijske optike

Na granici razdvajanja dve optičke sredine svetlosni zraci podležu prelamanju (refrakciji) ili odbijanju (refleksiji).

### 1.8.1 Zakon prelamanja (refrakcije)

DIOPTER je površina koja razdvaja dve optičke sredine različitih indeksa prelamanja  $n$  i  $n'$ .

Zakon prelamanja:

$$n \sin \alpha = n' \sin \alpha'$$

gde su:

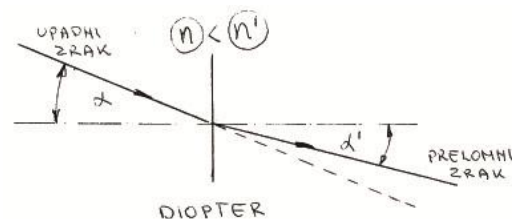
$n$  i  $n'$  – indeksi prelamanja optičkih sredina razdvojenih dioptrom

$\alpha$  – ugao upadnog zraka u odnosu na normalu  $N$

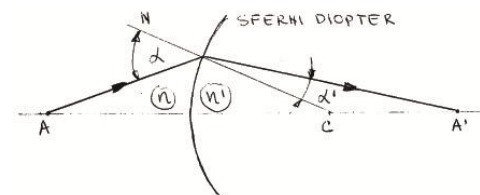
$\alpha'$  – ugao prelomnog zraka u odnosu na normalu  $N$

Ako zrak prolazi iz optički ređe sredine (manji indeks prelamanja) u optički gušću sredinu (veći indeks prelamanja), kao na Slici 1.6, onda će se on prelomiti pod manjim uglom u odnosu na normalu  $N$ . Kažemo, prelomiće se "ka normalu", i obrnuto, pri prelasku zraka u optički ređu sredinu, on će se prelomati "od normale".

Za kurs "optika u oftalmologiji" najinteresantniji je slučaj prelamanja zraka na sferičnoj površini (Slika 1.7)



Slika 1.6 - Zakon prelamanja



Slika 1.7 – Prelamanje zraka na sferičnoj površini

### 1.8.2 Zakon odbijanja (refleksije)

U ovom slučaju diopter je reflektujuća površina (na primer ogledalo).

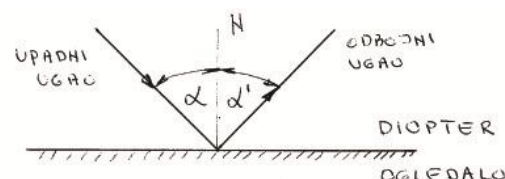
Zakon odbijanja:

$$\alpha = \alpha'$$

gde su:

$\alpha$  i  $\alpha'$  – upadni i odbojni ugao u odnosu na normalu  $N$

– Upadni i odbojni ugao su jednaki i leže u istoj ravni (Slika 1.8).



Slika 1.8 – Zakon odbijanja zraka

# BIOMEDICINSKA FOTONIKA

## 1.8.3. Difuzno odbijanje

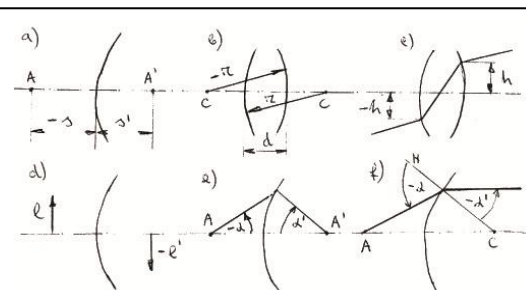
Za razliku od refleksije na glatkim površinama (ogledalo) postoji i difuzno odbijanje pri kome se svetlost reflektuje manje više ravnomerno na sve strane. Takve površine nazivamo **MUTNE** ili **MAT**.

Maksimum odbijanja je ipak u pravcu ugla koji odgovara odbijanju sa ogledalom.

## 1.9 Konvencije u optici

U razmatranju geometrijske optike usvojicemo neke pojmove i konvencije:

- Ako su centri sfernih optičkih površina postavljeni na nekoj pravoj liniji takav optički sistem se naziva centrirani optički sistem.
- Prava koja povezuje sve centre sfernih optičkih površina naziva se optička osa sistema.
- Sva razmatranja, crteži i šeme rade se pod pretpostavkom da se svetlost prostire sa leva na desno.
- Za svaku graničnu optičku površinu ili optički sistem vezana su dva optička prostora:
  - optički prostor ispred granične površine ili optičkog sistema naziva se prostor predmeta;
  - optički prostor iza granične površine ili optičkog sistema naziva se prostor lika.
- U prostoru predmeta koristicemo, za razna obeležavanja, slovne oznake kao što su  $A, b, \alpha \dots$  a u prostoru lika slovne oznake sa znakom "prim", kao što su  $A', b', \alpha' \dots$



Slika 1.9 – Konvencija zraka

### **1.9.1 Konvencije zraka**

U optici se uvode sledeće konvencije znaka prikazane na Slici 1.9:

- Linearni odsecci na osi sistema su pozitivni ako je smer njihovog prostiranja od granične površine u pravcu prostiranja svetlosti. U suprotnom slučaju linearni odsecci su negativni.
- Poluprečnik krivine jedne sferne površine je pozitivan ako se centar krivine nalazi desno od površine, a negativan ako se nalazi levo od površine.
  - Debljina sočiva i drugih optičkih elemenata kao i vazdušnih rastojanja između prelomnih površina, uvek su pozitivne.
- i d) Visina preseka zraka sa graničnom površinom, kao i veličina predmeta i veličina lika, su pozitivne ako se nalaze iznad optičke ose, a negativne ako se nalaze ispod optičke ose.

# BIOMEDICINSKA FOTONIKA

e) Ugao zraka sa optičkom osom je pozitivan ako je za njegovo poklapanje neophodno optičku osu okrenuti u smeru kretanja kazaljke na satu (za ugao manji od  $90^\circ$ ), a negativan ako je potrebno optičku osu okretati suprotno od kretanja kazaljke na satu (za ugao manji od  $90^\circ$ ).

f) Ugao između zraka i normale na površini u tački upada zraka (upadni i prelomni ugao) je pozitivan ako je za poklapanje normale sa zrakom potrebno normalu okretati u smeru kazaljke na satu (za ugao manji od  $90^\circ$ ), odnosno negativan ako je potrebno normalu zaokretati u suprotnom smeru od kretanja kazaljke na satu (za ugao manji od  $90^\circ$ ).

## 2. IDEALAN OPTIČKI SISTEM

### 2.1 Pojam idealnog optičkog sistema

Idealni optički sistem formira lik tako da svakoj tački predmeta (A) odgovara samo jedna tačka lika (A'). Ove dve tačke se nazivaju (konjugovanim) spregnutim tačkama. Po analogiji razlikujemo i spregnute zrake ili spregnute ravni i slično.

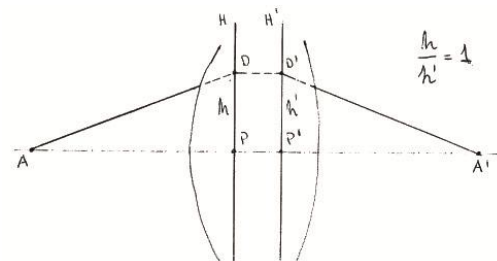
### 2.2 Osnovne (kardinalne) tačke idealnog optičkog sistema

Poseban značaj u proučavanju idealnog optičkog sistema imaju tri para tačaka, koje se nalaze na optičkoj osi svakog centriranog optičkog sistema i to su: par glavnih tačaka, par žižnih tačaka i par čvornih tačaka.

#### 2.2.1 Glavne tačke i glavne ravni

Par spregnutih ravni, normalnih na optičku osu sistema u kojima je odnos veličine predmeta i lika jednak jedinici nazivaju se glavne ravni. Položaj ovih ravni zavisi od konfiguracije optičkog sistema. U najvećem broju realnih optičkih sistema glavne ravni se nalaza unutar optičkog sistema (Slika 2.1).

- Glavna ravan koja se nalazi u prostoru predmeta, naziva se prednja glavna ravan H. Njena tačka preseka sa osom je prednja glavna tačka P.
- Glavna ravan koja se nalazi u prostoru lika, naziva se zadnja glavna ravan H'. Njena tačka preseka sa osom je zadnja glavna tačka P'.
- Ako bilo koji zrak, ili njegov produžetak, pri ulazu u optički sistem, seče glavnu ravan u tački D, na visini h od optičke ose sistema, posle izlaska, on ili njegov produžetak seći će



Slika 2.1 – Glavne ravni i glavne tačke



# BIOMEDICINSKA FOTONIKA

glavnu ravan u tački  $D'$  na visini  $h'$  ( $h = h'$ ) od optičke ose sistema. Ova važna osobina glavnih ravni ima veliki značaj za određivanje putanje zraka kroz optički sistem.

## 2.2.2 Žižne tačke i žižne ravni

Rekli smo da će svaka svetla tačka, koja se nalazi u beskonačnosti, u prostoru predmeta, na osi sistema, emitovati snop paralelnih zraka koji su paralelni osi (Slika 2.2). Posle prelamanja ovaj snop će se skupiti u jednu tačku na optičkoj osi, koju nazivamo zadnja žižna tačka ili skraćeno zadnja žiža  $F'$ .

Ravan koja sadrži ovu tačku i normalna je na osu, naziva se zadnja žižna ravan.

Rastojanje duž optičke ose od zadnje glavne ravni do zadnje žižne tačke, je zadnja žižna dužina  $f'$ .

Žižna tačka je optički spregnuta sa beskonačno udaljenom tačkom.

Ako zamislimo da paralelni snop zraka dolazi sa desna na levo, po analogiji možemo definisati prednju žižnu tačku ili skraćeno prednju žižu  $F$ , prednju žižnu ravan i prednju žižnu dužinu  $-f$ .

Ako posmatramo snop paralelnih zraka koji potiču od beskonačno udaljene tačke  $B$  predmeta, ali van optičke ose, njoj spregnuta tačka  $B'$  će biti u zadnjoj žižnoj ravni (Slika 2.3).

## 2.2.3 Čvorne (nodalne) tačke i čvorne (nodalne) ravni

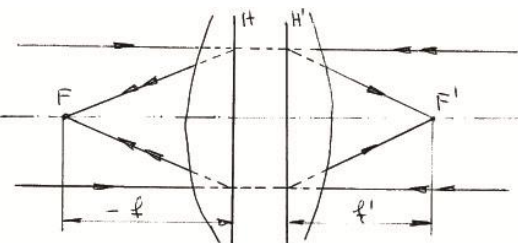
Čvorne (nodalne) tačke  $N$  i  $N'$  su tačke na osi optičkog sistema.

Ako bilo koji upadni zrak, ili njegov produžetak, pri ulazu u optički sistem, prolazi kroz prednju čvornu tačku  $N$  pod uglom  $\beta$ , onda izlazni zrak ili njegov produžetak iz optičkog sistema izlazi iz zadnje čvorne tačke  $N'$  pod uglom  $\beta'$ , pri čemu je  $\beta = \beta'$  (Slika 2.4).

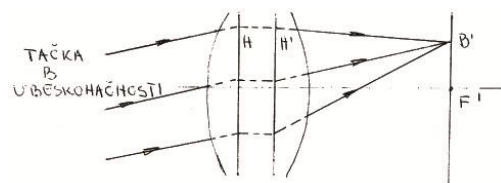
Ravni koje prolaze kroz čvorne tačke, a normalne su na optičku osu su: prednja čvorna (nodalna) ravan i zadnja čvorna (nodalna) ravan.

Rezime: osnovne (kardinalne) tačke jednog optičkog sistema su:  $F$  i  $F'$ ,  $P$  i  $P'$  i  $N$  i  $N'$  (Slika 2.5).

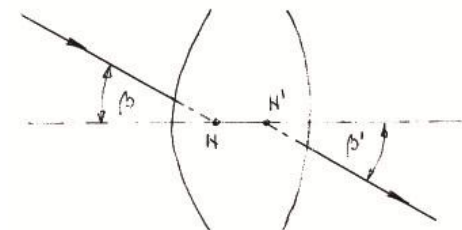
Glavne tačke  $H$  i  $H'$  kao i nodalne tačke  $N$  i  $N'$  su spregnute tačke što znači da je  $H'$  lik tačke  $H$ , a  $N'$  lik tačke  $N$ . Ove tačke nemaju kliničku primenu, ali imaju veliki značaj u



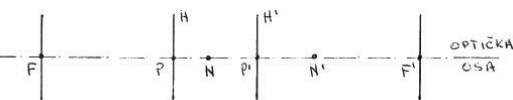
Slika 2.2 – Žižne ravni i žižne tačke



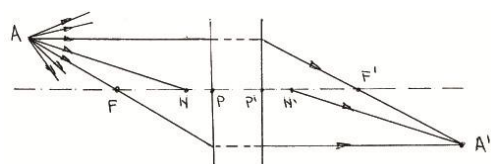
Slika 2.3 – Lik beskonačno udaljene tačke van optičke ose.



Slika 2.4 – Čvorne tačke i čvorne ravni



Slika 2.5 – Osnovne (kardinalne) tačke i ravni optičkog sistema.



Slika 2.6 – Hod zraka kroz kardinalne tačke.



## BIOMEDICINSKA FOTONIKA

geometrijskoj optici pri crtanju hoda zraka kroz optički sistem, pa tako i u određivanju položaja i veličine lika (Slika 2.6).

Položaj kardinalnih tačaka isključivo zavisi od konstruktivnih karakteristika optičkog sistema.

Na Slici 2.7 dat je položaj tačaka u oku za slučaj kada oko ne akomodira.

### 2.3 Osnovne relacije predmet – lik u geometrijskoj optici

U ovom poglavlju biće izvedene jednačine koje povezuju predmet i lik.

Optički sistem je predstavljen glavnin ravnima H i H'. Predmet je duž AB dužine y i on je normalan na optičku osu. Optički sistem stvara lik, takođe duž A'B', dužine y', koja je normalna na optičku osu (Slika 2.8). Optička sredina u prostoru predmeta ima indeks prelamanja  $n$ , a u prostoru lika  $n'$ .

Lik AB (njegovu veličinu i položaj) možemo odrediti konstruktivno. Tačku B' dobijamo prateći dva ulazna zraka. Zrak (1) u sistem ulazi paralelno sa optičkom osom. Njegov izlazni zrak prolazi kroz zadnju žižu F'. Zrak (2) u sistem ulazi kroz prednju žižu F. Njegov izlazni zrak prolazi paralelno optičkoj osi.

U preseku ova dva izlazna zraka nalazi se tačka lika B'. Tačka lika A' se nalazi na normali iz B' u preseku sa optičkom osom. Sistem ima prednju žižnu dužinu  $f$  i zadnju žižnu dužinu  $f'$ .

Položaj predmeta u odnosu na prednju žižu određen je koordinatom z, a u odnosu na prednju glavnu ravan koordinatom s. Obe ove veličine, kao i prednja žižna dužina  $f$  su negativnog znaka zato što je smer njihovog prostiranja od prednje glavne ravni na levo (suprotno smeru prostiranja svetlosti).

Položaj lika u odnosu na zadnju žižu određen je koordinatom z', a u odnosu na zadnju glavnu ravan koordinatom s'. Sada su ove koordinate kao i zadnje žižno rastojanje  $f'$  pozitivnog znaka.

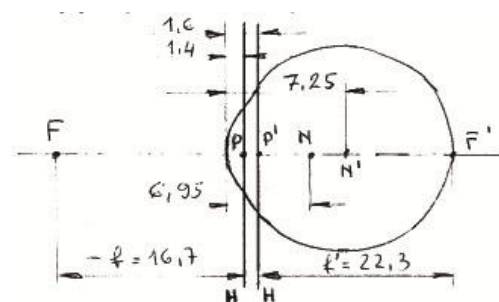
Položaj lika i predmeta određen je Njutnovim formulama (koje nećemo izvoditi) koje glase:

$$z \cdot z' = f \cdot f'$$

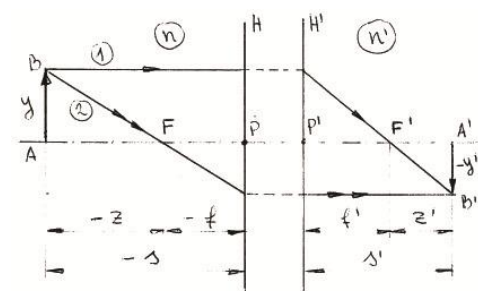
ili

$$(f' / s') + (f / s) = 1$$

Ako se optički sistem nalazi u vazduhu, tada je  $n = n' = 1$  što znači da su prednje i zadnje žižno rastojanja jednaki, tj.  $f = -f'$ .



Slika 2.7 – Kardinalne tačke oka u stanju dezakomodacije



Slika 2.8 – Osnovne relacije između predmeta i lika

# BIOMEDICINSKA FOTONIKA

Tada Njutnove formula dobijaju oblik:

$$z \cdot z' = -f'^2 \quad \text{I} \quad (1/s') - (1/s) = 1/f'$$

Ove formule ćemo koristiti kad budemo razmatrali formiranje lika kroz sočivo za naočare ili kontaktno sočivo (pre nego što se stavi na oko).

## 2.4 Uvećanje optičkog sistema

Uvećanje optičkog sistema je odnos veličine lika  $y'$  i predmeta  $y$ .

$$\beta = y' / y$$

Negativna vrednost uvećanja znači da se lik u odnosu na predmet nalazi sa suprotne strane optičke ose. Kažemo lik je obrnut, kao na Slici 2.8.

## 2.5 Optička moć (snaga)

Možemo zaključiti da je jedna od osnovnih karakteristika optičkog sistema njegova žižna daljina  $f'$ .

- Ako je žižna daljina u prostoru lika  $f'$  pozitivna, kažemo da je sistem pozitivan, tj. konvergentan. Takav sistem sabira (konvergira) svetlosne zrake.

Primer: pozitivno sočivo (Slika 2.9).

Za ovakvo sočivo kažemo da je pozitivno ili sabirno ili konvergentno. Ono je deblje u sredini nego na krajevima.

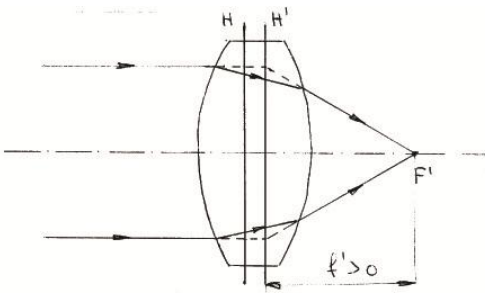
- Ako je žižna daljina u prostoru lika  $f'$  negativna, kažemo da je sistem negativan, tj. divergentan. Takav sistem rasipa (divergira) svetlosne zrake.

Primer: negativno sočivo (Slika 2.10).

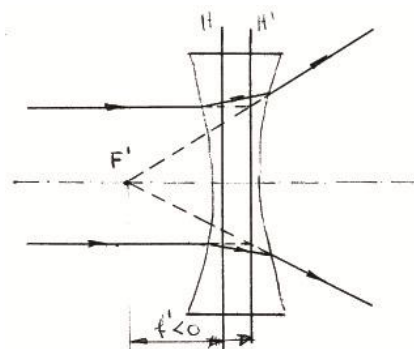
Za ovakvo sočivo kažemo da je negativno ili rasipno ili divergentno. Ono je tanje u sredini nego na krajevima.

- Žižna daljina optičkog sistema, odnosno njena recipročna vrednost, predstavlja meru optičke moći tog sistema. Često se koristi i termin optička snaga ili jednostavno dioptriya.

- Dioptriya je jedinica za izražavanje optičke moći sistema i obeležavamo je sa D, a optičku moć sa P (engleski Power).



Slika 2.9 – Pozitivno sočivo



Slika 2.10 – Negativno sočivo

# BIOMEDICINSKA FOTONIKA

Dioptriya se definiše kao recipročna vrednost žižne daljine, izražene u metrima, za optički sistem u vazduhu.

$$D = 1 / f' \text{ [m]},$$
$$\text{odnosno } D = 100 / f' \text{ [cm]},$$
$$\text{odnosno } D = 1000 / f' \text{ [mm]}.$$

Ovo znači da će jedno pozitivno sočivo, koje ima žižnu daljinu od 1m (100 cm, 1000 mm) imati optičku moć ( $P = +1D$ ) od plus (+) jedne dioptrije ili jedno negativno sočivo koje ima žižnu daljinu od 0.5m (50 cm, 500 mm) imati optičku moć ( $P = -2D$ ) od minus (-) dve dioptrije.

## 2.5.1 Optička moć sfernog dioptera

Sferni diopter smo definisali kao sfernu površinu poluprečnika  $r$ , koja razdvaja dve optičke sredine indeksa prelamanja  $n_1$  i  $n_2$  (Slika 2.11).

Po zakonu prelamanja  $n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2$  doći će do prelamanja zraka svetlosti. Mera tog prelamanja je optička moć sfernog dioptera. Izračunava se po formuli

$$P = (n_2 - n_1) / r \quad [D]$$

Napomena: rezultat se izražava u dioptrijama ako je poluprečnik krivine u metrima [m].

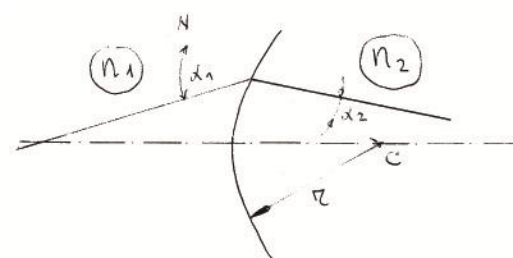
PRIMER: Izračunati optičku moć prednje površine rožnjače oka

Rožnjača oka je sferna površina poluprečnika krivine  $r = 7.8$  mm. Ispred rožnjače je vazduh  $n = 1$ , a rožnjača je po sastavu providna materija indeksa prelamanja  $n = 1.377$  (Slika 2.12).

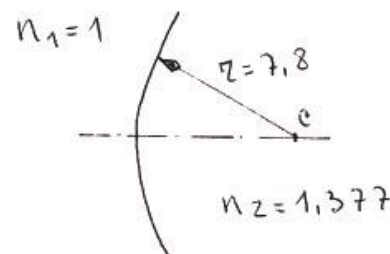
$$P = (n_2 - n_1) / r = (1.377 - 1) / 7.8 \cdot 10^{-3} = + 48.3D$$

Kažemo da je optička moć prednje površine rožnjače  $+ 48.3D$ . Kasnije ćemo videti da u ukupnoj optičkoj moći oka, kao optičkog sistema, upravo ova površina ima najviše udela.

U oftalmološkoj praksi, naručiti za potrebe fitovanja kontaktnih sočiva, srećemo se sa merenjem keratometrije rožnjače. Keratometar je uređaj koji precizno meri zakrivljenost rožnjače i rezultat dobijamo ili kao poluprečnik krivine u milimetrima [mm] ili kao optičku moć u dioptrijama [D].



Slika 2.11 – Optička moć sfernog dioptera



Slika 2.12 – Optička moć prednje površine rožnjače

## 2.5.2 Optička moć sočiva

Sočivo je optički element koji se sastoji od dva dioptera poluprečnika krivina  $r_1$  i  $r_2$ , čija je debljina  $d$ , a napravljeno je od optičkog materijala indeksa prelamanja  $n$  (Slika 2.13).

Neka se sočivo nalazi u prostoru tako da je ispred njega optička sredina indeksa prelamanja  $n_1$ , a iza njega optička sredina indeksa prelamanja  $n_2$ .

Optička moć sočiva se izračunava po formuli:

$$P = P_1 + P_2 - drP_1P_2$$

gde su:

$$P_1 - \text{optička moć prvog dioptera } P_1 = (n - n_1) / r_1$$

$$P_2 - \text{optička moć drugog dioptera } P_2 = (n_2 - n) / r_2$$

$$dr - \text{redukovana debljina } dr = d / n$$

- Ako se sočivo nalazi u vazduhu ( $n = n_2 = 1$ ) i ako njegovu debljinu u centru  $d$  možemo zanemariti (kao što je to slučaj kod kontaktnih sočiva) onda dobijamo formulu za izračunavanje optičke moći, tzv. "tankog sočiva".

$$P = P_1 + P_2 - drP_1P_2$$

$$P = (n - 1) / r_1 + (1 - n) / r_2$$

$$P = (n - 1)(1/r_1 - 1/r_2)$$

Možemo zaključiti da optička moć tankog sočiva zavisi od poluprečnika njegovih krivina i materijala od koga je napravljeno, odnosno indeksa prelamanja.

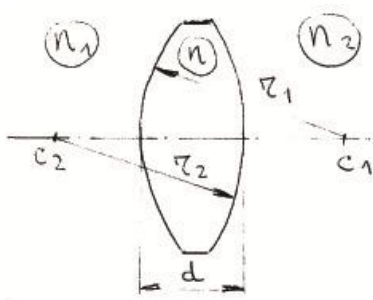
PRIMER: Izračunati optičku moć kontaktnog sočiva čiji su konstruktivni parametri dati na Slici 2.14.

Primenićemo formulu za tanko sočivo u vazduhu.

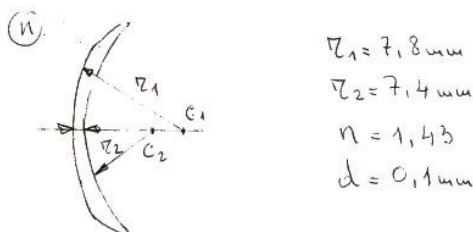
$$P = (n - 1) (1/r_1 - 1/r_2) = (1.43 - 1) (1/7.8 \cdot 10^{-3} - 1/7.4 \cdot 10^{-3})$$

$$P = 0.43 (128.2 - 135.14) = - 0.43 \cdot 6.93 = - 3D$$

- Treba zapaziti da je  $r_1 > r_2$  što znači da je ovo sočivo negativno (divergentno). Izračunavanje optičke moći ( $P = - 3D$ ) je to i potvrdilo.



Slika 2.13 – Optička moć sočiva



Slika 2.14 – Optička moć kontaktnog sočiva

## BIOMEDICINSKA FOTONIKA

PRIMER: Izračunati optičku moć rožnjače.

Rožnjaču možemo posmatrati kao sočivo ispred koga je vazduh, a iza njega je očna vodica (Slika 2.15).

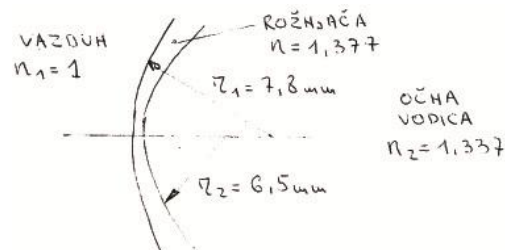
Primenićemo formulu za tanko sočivo ( $d_r = 0$ ), ali sada imamo sočivo koje ima vazduh ispred, a očnu vodicu iza.

$$P = P_1 + P_2$$

$$P = (n - n_1)/r_1 + (n_2 - n)/r_2$$

$$P = (1.377 - 1)/7.8 \cdot 10^{-3} + (1.337 - 1.377)/6.5 \cdot 10^{-3}$$

$$P = 48.3 - 6.2 \sim +42D$$



Slika 2.15 – Optička moć rožnjače.

Kažemo da rožnjača ima optičku moć od +42D.

- Na prvi pogled čini se da smo dobili nelogičan rezultat. Ako pogledamo poluprečnike krivina prednje i zadnje strane rožnjače ( $r_1$  i  $r_2$ ) konstatovaćemo da je  $r_1 > r_2$  što bi značilo da je rožnjača negativno sočivo i da bi optička moć trebala da bude negativna. To bi bilo tačno kada bi se rožnjača nalazila kompletno u vazduhu.

Ako pogledamo prethodni proračun, možemo zaključiti da je optička moć rožnjače  $P$  zbir optičke moći prednje površine  $P_1 = +48.3D$  i optičke moći zadnje površine  $P_2 = -6.2D$ .

**ZAKLJUČAK:** Rožnjača je optički element koji je po svojoj geometriji rasipno sočivo. Međutim, zbog rasporeda indeksa prelamanja (vazduh: rožnjača: očna vodica) rožnjača je sabirno sočivo optičke moći približno +42D.

### 2.5.3 Optička moć optičkog sistema

Optičku moć bilo kog optičkog sistema pa i sočiva, možemo izračunati ako poznamo njegovu prednju ili zadnju žižnu dužinu ( $f$  ili  $f'$ ) i to po formuli:

$$P = n_2 / f' = -n_1 / f$$

gde su  $n_1$  i  $n_2$  indeksi prelamanja ispred i iza optičkog sistema.

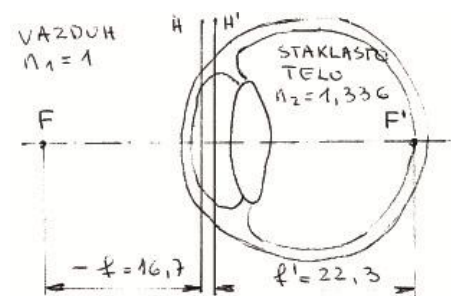
PRIMER: Optička moć oka kao optičkog sistema (Slika 2.16).

$$P = n_2 / f' = 1.336 / 22.3 \cdot 10^{-3} = +60D$$

$$P = -n_1 / f = -1 / -16.7 \cdot 10^{-3} = +60D$$

- Za oko kažemo da ima optičku moć od +60D.

### 2.6 Akomodacija oka



Slika 2.16 – Optička moć oka

## BIOMEDICINSKA FOTONIKA

Ponovićemo Njutnovu formulu koja određuje odnos predmet-lik u geometrijskoj optici.

$$(f' / s') + (f / s) = 1$$

Ovo znači da, u određenom optičkom sistemu, čija su žižna rastojanja  $f$  i  $f'$  konstantna, svakom položaju predmeta ( $s$ ) odgovara samo jedan položaj lika ( $s'$ ).

PRIMER: Ako se predmet nalazi u beskonačnosti onda je  $s = \infty$  pa je  $f / s = 0$ . Iz Njutnove formule dobijamo da je  $s' = f'$  što znači da će se lik formirati u zadnjoj žiži  $F'$ . To potvrđuje definiciju zadnje žiže.

PRIMER: Gde će se formirati lik u oku ako se predmet nalazi na 1m udaljenosti? Ako primenimo Njutnovu formulu za poznate parametre oka:  $f' = 22,3\text{mm}$ ,  $f = 16,7\text{mm}$ ,  $s = 1\text{m} = 1.000\text{mm}$ .

$$22,3 / s' + 16,7/1.000 = 1$$

$$22,3 / s' = 0,9833$$

$$s' = 22,6\text{mm}$$

Ako se zadnja žiža nalazi u žutoj mrlji (emetropno oko), ovo znači da će se lik ovog predmeta naći na 0,3mm iza žute mrlje ( $22,6 - 22,3 = 0,3$ ).

– Šta treba uraditi pa da lik ovog predmeta bude u žutoj mrlji?

Optički sistem oka bi morao imati veću optičku moć (veću od 60D) kako bi zrake koji potiču od predmeta više skrenuo. To oko postiže akomodacijom. Kako?

Kontrakcijom cilkularnog (cilijarnog) mišića oka, dolazi do promene zakrivljenosti prednje i zadnje površine očnog sočiva, čime se povećava njegova optička moć, a time i optička moć celog oka. Refleksno, cilijarni mišić obavlja ovu funkciju tačno onoliko za koliko je potrebno dodati plus snage u zavisnosti gde se nalazi posmatrani predmet. Jasno je da oko mora više akomodirati što je predmet bliži oku.

– U stanju dezakomodacije (nema akomodacije) prednja strana očnog sočiva je manje zakrivljena ( $r_1 = 10\text{mm}$ ) od zadnje ( $r_2 = 6\text{mm}$ ). Pri maksimalnoj akomodaciji zakrivljenost prednje površine sočiva značajno se povećava (do  $r_1 = 5,3\text{mm}$ ) dok se zadnja samo neznatno menja (do  $r_2 = 5,3\text{mm}$ ). Sočivo na taj način postaje deblje (za oko 0,4mm) i u celini se pomera minimalno prema napred.

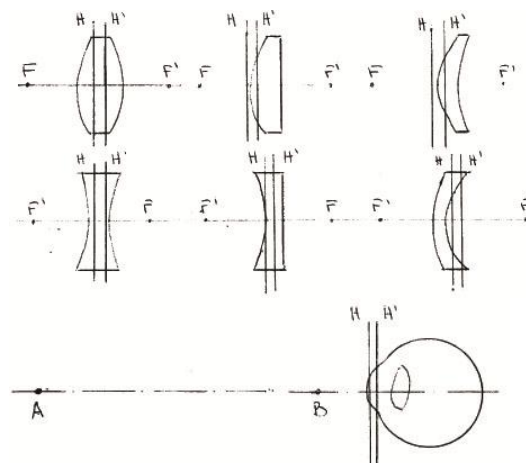
## BIOMEDICINSKA FOTONIKA

Kod dece, uzrasta oko 8 godina, pojačanje refrakcije očnog sočiva iznosi i 13-14D. Na taj način, sočivo povećava svoju moć prelamanja sa +20D na čak +34D pri maksimalnoj akomodaciji. Na taj način, dete može oštro da vidi i predmete na 7-8 cm ispred oka.

Sa godinama života, mogućnost akomodacije opada tako da u proseku, sa 45 godina starosti, obim akomodacije opada na ispod 4D. Zato ljudi u ovoj dobi ne mogu da vide oštro predmete koji su bliži od 25-30cm, tj. oni postaju **PREZBIOPI**. Sa daljim starenjem i smanjivanjem obima akomodacije, svaki finiji rad na blizinu postaje nemoguć bez dodatne plus korekcije naočarima ili kontaktnim sočivima.

### 2.6.1 Daleka i bliska tačka

- Najudaljenija tačka u prostoru, čiji se lik jasno vidi na mrežnjači, pri potpunoj dezakomodaciji, zove se daleka tačka oka (A) (Slika 2.17). Za emetropno oko tačka A je u beskonačnosti.
- Najbliža tačka u prostoru, čiji se lik jasno vidi na mrežnjači pri najvećoj mogućoj akomodaciji, zove se bliska tačka oka (B).
- Širina ili obim akomodacije je rastojanje između bliske i daleke tačke oka, izraženo u dioptrijama i to definiše granicu akomodacije oka



Slika 2.17 – Akomodacija oka