

Multimedejske tehnologije

2. ciklus predavanja

prof.dr.sc. Sonja Grgić

Zavod za radiokomunikacije
C-zgrada, 11. kat

Sadržaj predavanja za 2. ciklus

- značajke ljudskog vizualnog sustava
- temeljni koncepti analognog i digitalnog videosignalna
- postupci i norme za kompresiju slike i videosignalna

Literatura:

Ze-Nian Li, Mark S. Drew, *Fundamentals of Multimedia*, Pearson Prentice Hall, 2004.

Laboratorijske vježbe i domaća zadaća

- tjedni predavanja za 2. ciklus
 - 31.03.-25.04.2008. (4 tjedna)
- laboratorijske vježbe
 - zadnji tjedan 2. ciklusa (21.- 25.04.2008.) + (28.04.2008. ?)
- prijedlog termina za laboratorijske vježbe
 - 22.04.2008. - od 10-13 sati
 - 23.04.2008. - od 13-16 sati
 - 24.04.2008. - od 10-13 sati

Laboratorijske vježbe i domaća zadaća

- laboratorijske vježbe održavat će se na 11. katu C-zgrade
- vježbe se izvode na računalima korištenjem odgovarajućih programskih sustava
- ukupan broj bodova koje se može ostvariti putem domaće zadaće i laboratorijskih vježbi u ovom ciklusu je 5
- na laboratorijske vježbe je potrebno doći:
 - pripremljen (proučiti upute za odgovarajuću vježbu)
 - s napisanom domaćom zadaćom

Laboratorijske vježbe i domaća zadaća

- domaća zadaća zadana je u uputama za laboratorijske vježbe i sastoji se od dva zadatka
 - domaća zadaća mora biti rukom pisana
- tijekom vježbi, asistenti će pregledati domaće zadaće te za njih dodijeliti bodove od 0 - 1
- nakon što obradi pojedinu vježbu, svaki student treba kolokvirati vježbu
 - kolokvij pokriva gradivo koje je vezano uz upute za dotičnu vježbu, domaću zadaću za tu vježbu te rad i rezultate dobivene na vježbi
- za rad na laboratorijskim vježbama u 2. ciklusu student može postići 0 - 4 boda

Laboratorijske vježbe i domaća zadaća

- pravo na nadoknadu laboratorijskih vježbi imaju studenti koji su opravdano izostali s vježbi
- studenti trebaju napisati molbu za nadoknadu u kojoj se navodi razlog izostanka
- ako je student bio bolestan potrebno je priložiti liječničku ispričnicu
- molbe je potrebno predati tajnici na Zavodu za elektroničke sustave i obradbu informacija (D-zgrada, 1. kat, soba D144)
- za drugi ciklus vježbi molba se treba predati najkasnije do 06.05.2008.

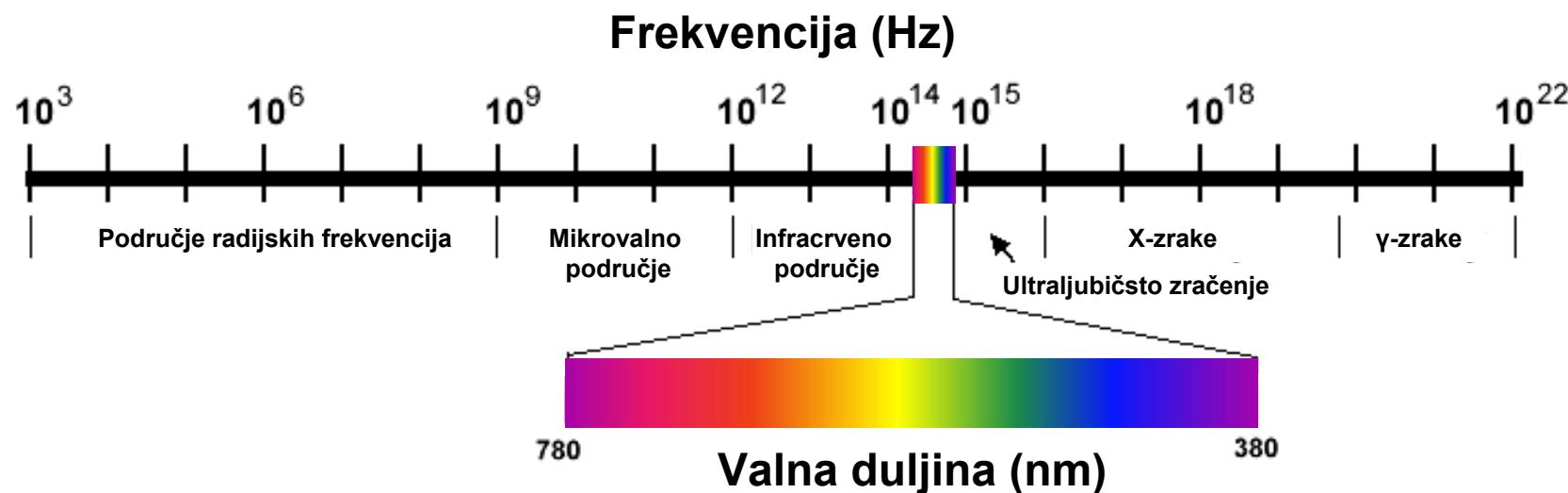
2. međuispit

- 2. međuispit sastoji se od 15 pitanja
 - svako pitanje ima 4 ponuđena odgovora
 - pitanja su podijeljena u dvije skupine:
 - 10 pitanja na koja točan odgovor donosi 1 bod
 - 5 pitanja na koja točan odgovor donosi 2 boda
 - netočan odgovor na pitanje donosi četvrtinu negativnog boda (-0,25)
 - pitanje bez odabranog odgovora donosi 0 bodova
- ukupan broj bodova koji se može ostvariti na 2. međuispitu je 20 bodova
- međuispit traje 90 minuta

Značajke ljudskog vizualnog sustava

Svjetlost

- podražaj koji izaziva osjet vida
- vidljiva svjetlost
 - elektromagnetsko (EM) zračenje koje se može detektirati ljudskim okom
 - područje valnih duljina: 380 - 780 nm
(frekvencijsko područje između 10¹⁴ - 10¹⁵ Hz)

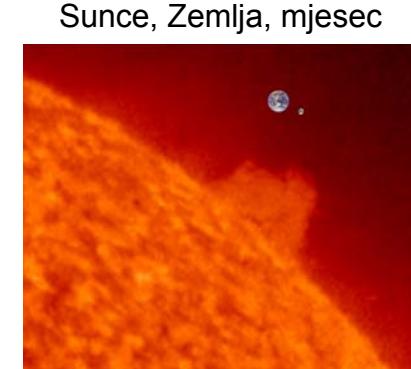
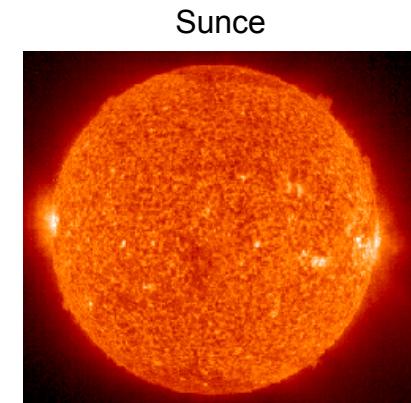
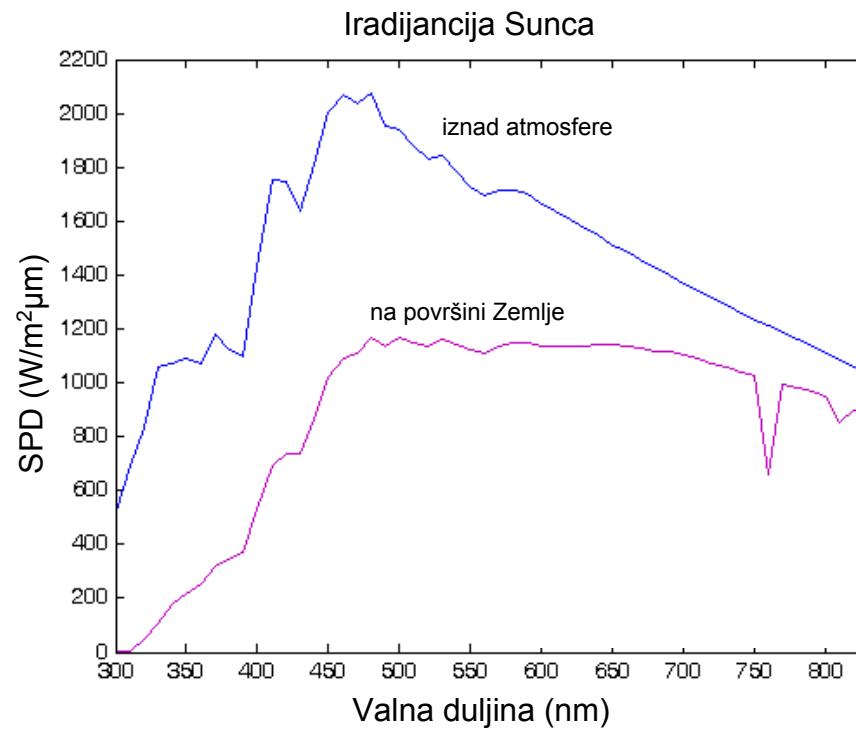


Svjetlost

- fizičke veličine koje određuju izvor svjetlosti su:
 - valna duljina (λ) izražena u nm
 - svjetlosni tok (*radiant flux*) ili izračena snaga (P) izražena u W
- izvori svjetlosti
 - **izravni** - stvaraju EM energiju: isijavanjem, izgaranjem, luminiscencijom
 - značajke su im određene preko spektralne raspodjele snage (SPD, *Spectral Power Distribution*)
 - SPD je u općem slučaju izračena snaga svjetlosti po jedinici valne duljine
 - relativna SPD dobiva se normaliziranjem SPD u odnosu na izračenu snagu na valnoj duljini 560 nm
 - **neizravni** - posreduju u prenošenju podražaja (**objekti**)
 - prenose, reflektiraju ili apsorbiraju svjetlost
 - refleksijska svojstava objekata određuje funkcija reflektancije $\rho(\lambda)$
 - $\rho(\lambda)$ je omjer snage svjetlosti reflektirane od površine objekta $P_r(\lambda)$ i snage upadne svjetlosti $P_i(\lambda)$ u određenom području valnih duljina
 - upadna snaga je snaga izračena od izravnog izvora svjetlosti

Bijela svjetlost

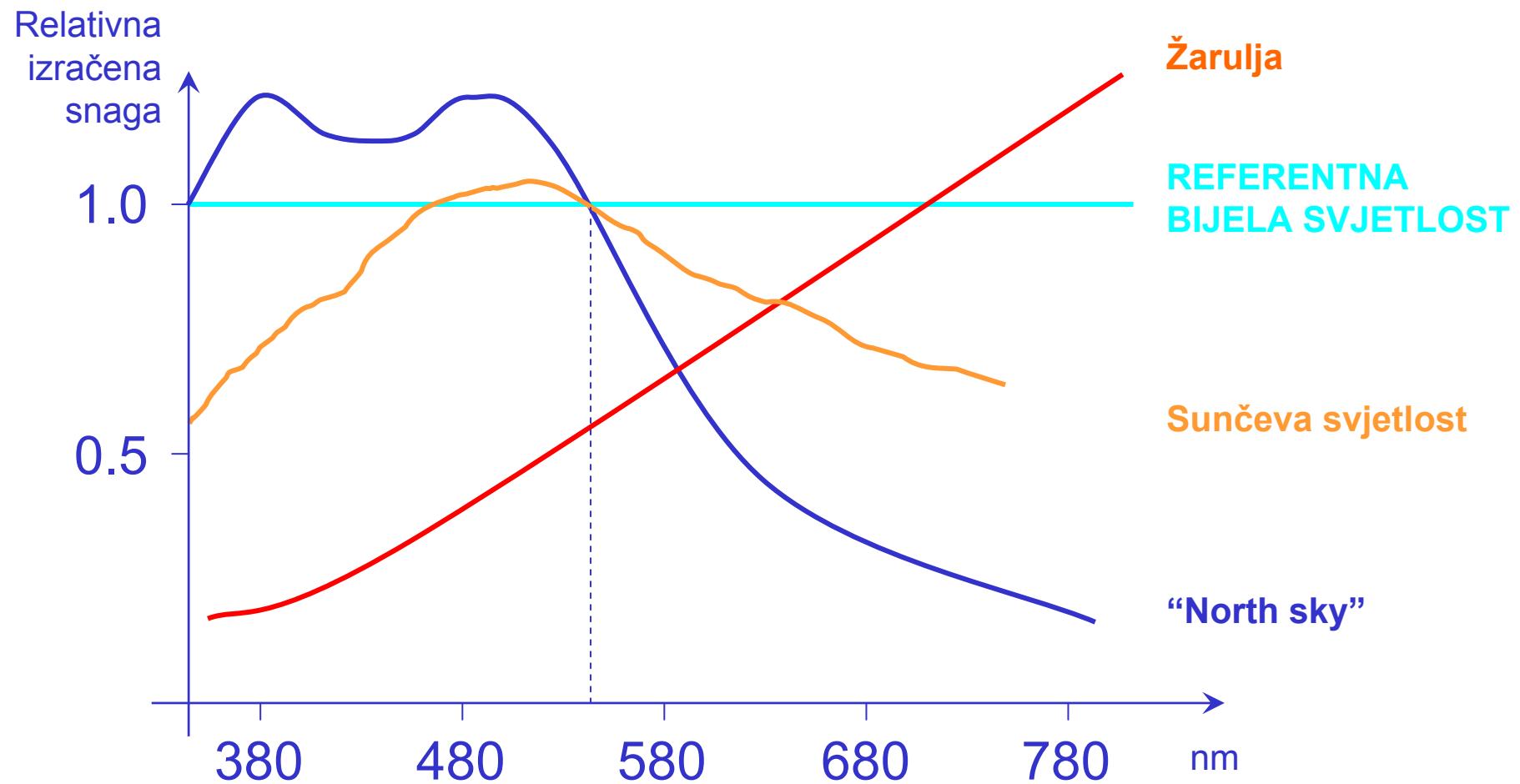
- bijela svjetlost je svjetlost koja se sastoji od mješavine valnih duljina koje pokrivaju cijeli spektar vidljive svjetlosti
- Sunce je izvor prirodne bijele svjetlosti



Napomena: SPD je ovom primjeru izražena je kao iradijacija ili ozračenje (izračena snaga koja pada na jedinicu površine ozračenog objekta - W/m^2) po jedinici valne duljine

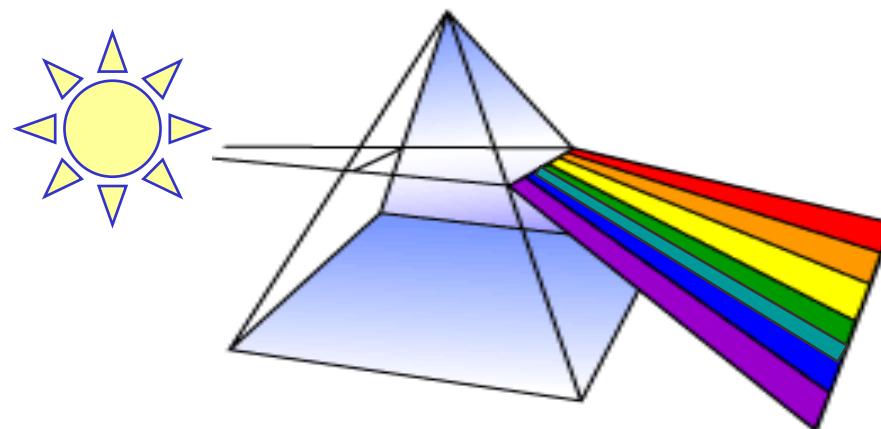
Bijela svjetlost

- usporedba SPD nekoliko izvora bijele svjetlosti



Bijela svjetlost

- razlaganjem bijele svjetlosti kroz prizmu dobiva se spektar bijele svjetlosti u kome postoji 7 dominantnih boja
 - boja svjetlosti je određena valnom duljinom
- zračenje svjetlosti određene valne duljine ili vrlo uskog područja valnih duljina ($\sim 5\text{-}10 \text{ nm}$) daje za rezultat tzv. SPEKTRALNE BOJE (monokromatske boje)
- NESPEKTRALNE BOJE su one koje ne postoje u spektru bijele svjetlosti, npr. crna, bijela, purpurna, smeđa



Bijela svjetlost

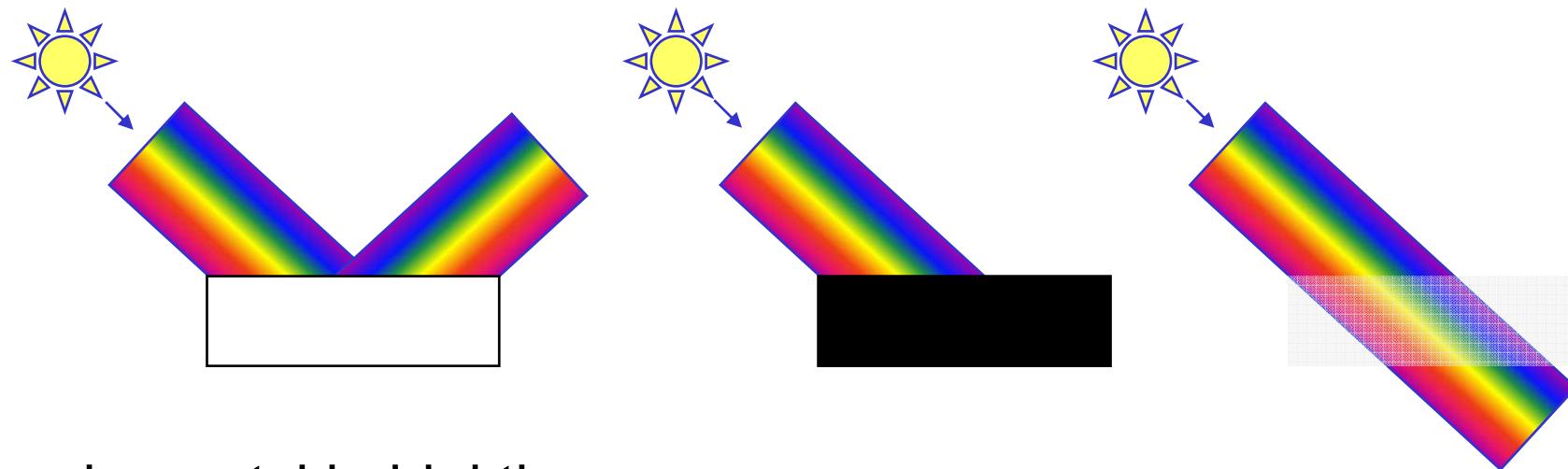
Valna duljina (nm)	Osjet boje
380 - 430	ljubičasta
430 - 470	plava
470 - 500	cijan (plavozelena)
500 - 560	zelena
560 - 590	žuta
590 - 605	narančasta
605 - 780	crvena

Objekti

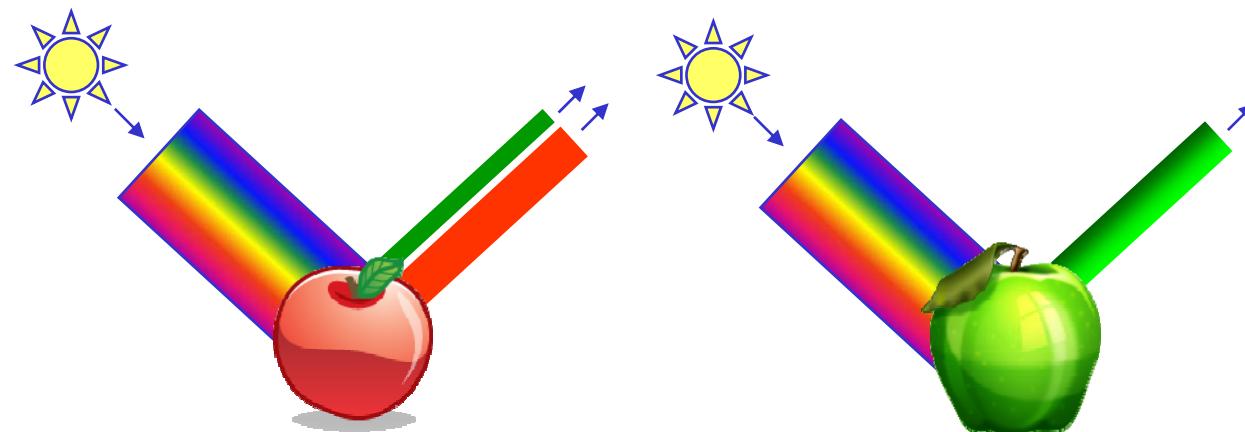
- podjela objekata
 - akromatski objekt
 - reflektira, apsorbira ili prenosi istu količinu svjetlosne energije na svim valnim duljinama
 - bijeli objekt - reflektira sve valne duljine
 - crni objekt - apsorbira sve valne duljine
 - prozirni objekt - prenosi sve valne duljine
 - kromatski objekt
 - selektivno izdvaja pojedinu valnu duljinu koja se više od ostalih reflektira, apsorbira ili prenosi
 - npr. crveni objekt reflektira crvenu svjetlost, a apsorbira svjetlost ostalih boja

Objekti

- akromatski objekti

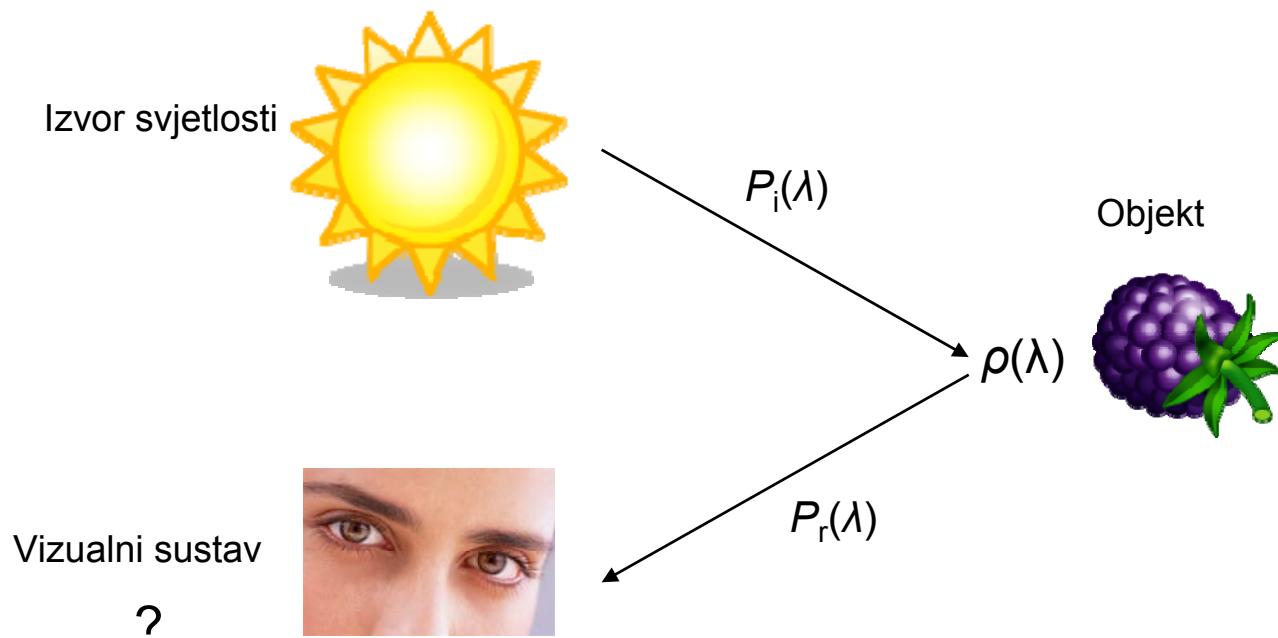


- kromatski objekti



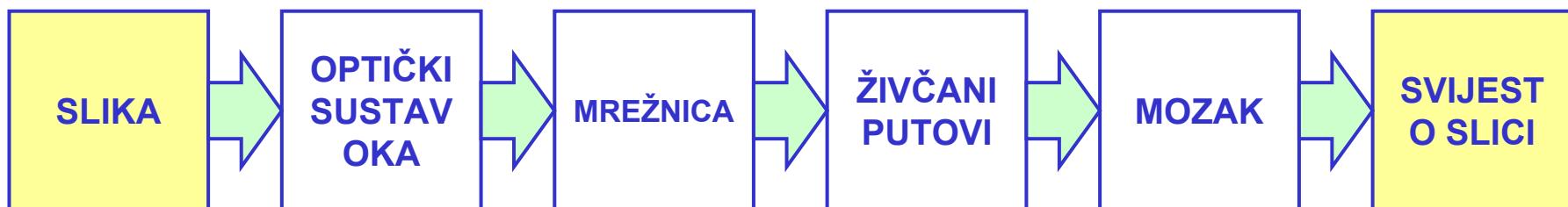
Doživljaj viđenog

- svjetlost reflektirana od objekta dolazi do oka u kome se nalaze fotoosjetljivi receptori
 - doživljaj boje promatranog objekta ovisi o osjetljivosti receptora u ovisnosti o valnoj duljini
- konačna slika viđenog stvara se u ljudskom mozgu

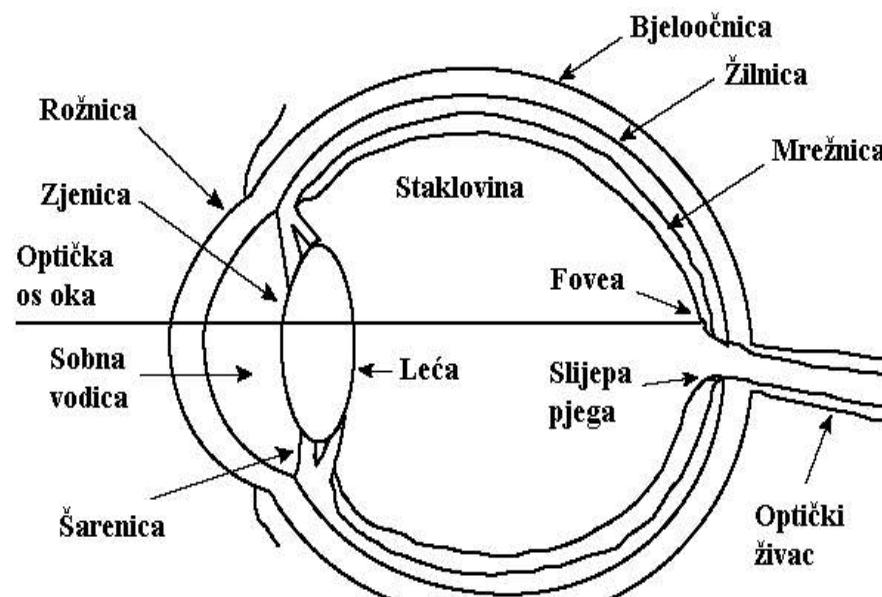
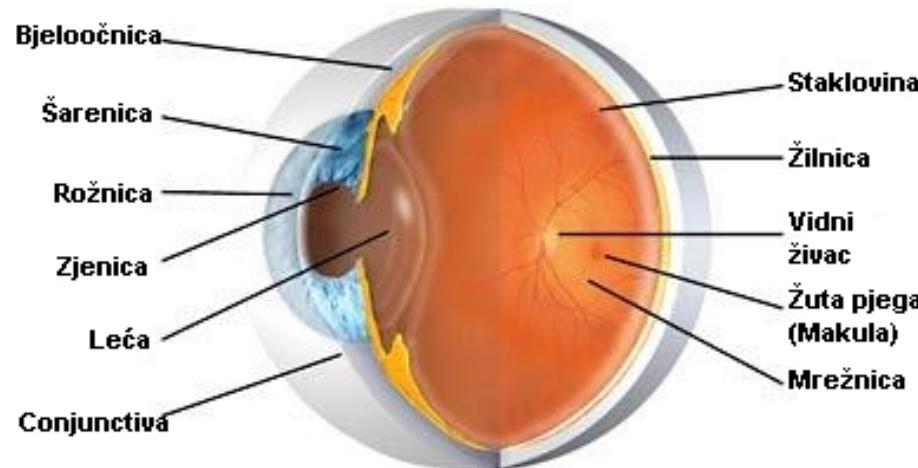


Doživljaj viđenog

- stvaranje doživljaja viđenog
 - svjetlost prolazi kroz optički sustav oka koji je fokusira na očnu pozadinu gdje se smještena mrežnica (retina)
 - u mrežnici se nalaze fotoosjetljivi receptori (štapići i čunjići) koji svjetlost pretvaraju u električne impulse
 - mrežnica je izravno povezana s mozgom
 - električni impulsi nastali u mrežnici se živčanim putovima prenose do mozga gdje se stvara svijest o viđenom

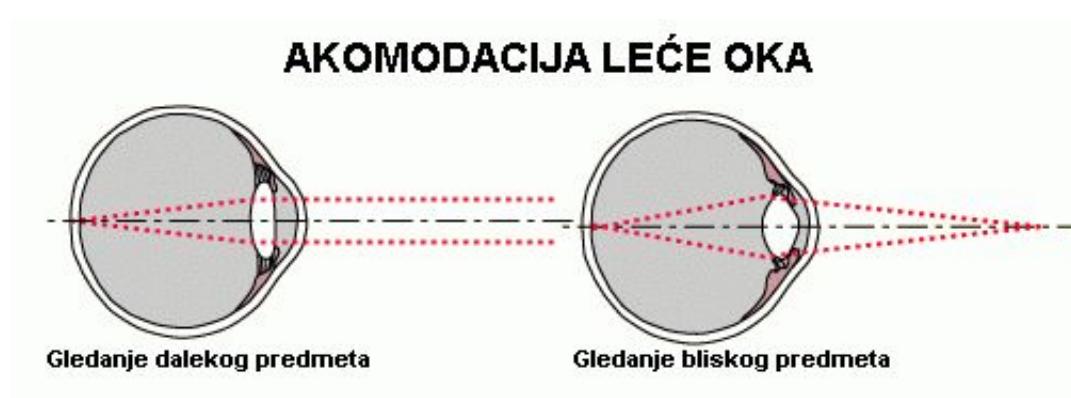


Grada oka



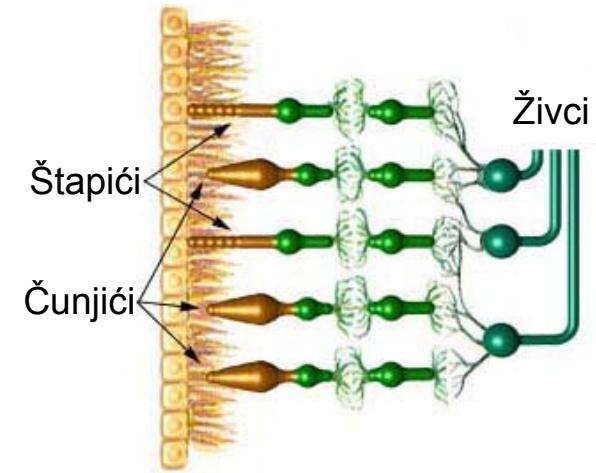
Gradja oka

- optički sustav oka
 - omogućava stvaranje jasne slike vanjskog svijeta u području fotoosjetljivih receptora mrežnice
 - sobna vodica, leća i staklovina služe kao refrakcijski optički mediji
 - omogućavaju lom svjetlosnih zraka u oku
 - leća ima sposobnost akomodacije
 - sposobnost prilagodbe udaljenosti objekta koji gleda, tako da na mrežnici nastaje uvijek oštra slika promatranog objekta
- <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/humanvision/accommodation/index.html>



Gradja oka

- fotoreceptori mrežnice
 - štapići (*rods*) i čunjići (*cones*)
 - štapići su dugi i tanki, čunjići su kraći i debli
 - sadrže kemijske tvari osjetljive na svjetlost
- čunjići i štapići nisu jednako osjetljivi na cijeli spektar vidljive svjetlosti
 - različite vrste monokromatskog svjetla podražuju ili čunjiće ili štapiće
 - čunjići su najosjetljiviji na svjetlost valne duljine od oko 550 nm (žutozeleno)
 - štapići su najosjetljiviji na svjetlost valne duljine od oko 500 nm (zeleno)
- do opažanja boja dolazi samo kad je svjetlosna jakost (jedinica: cd) ili luminancija (cd/m^2) dovoljno velika da bi se aktivirali čunjići



Grada oka

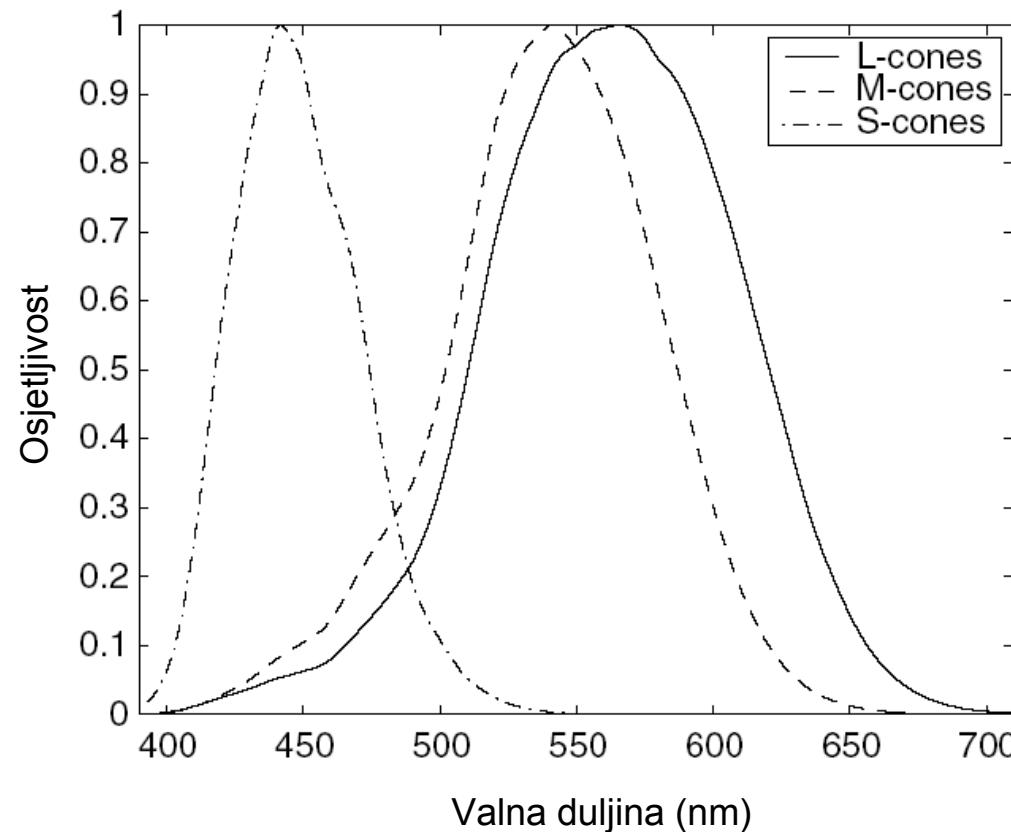
- štapići
 - osjetljivi na svjetlo i pri niskim razinama luminancije ispod $1\text{cd}/\text{m}^2$ ("noćno" gledanje ili skotopski vid)
 - mogu razlikovati samo promjene u luminanciji, a nisu osjetljivi na boju
 - svjetlosne podražaje koji podražuju jedino štapiće zapažamo tek kao različite tonove sive boje
- čunjići
 - doprinose osjetu i razlikovanju boja, a postaju aktivni pri višim razinama luminancije
 - kod razina luminancije između $1\text{cd}/\text{m}^2$ i $100\text{cd}/\text{m}^2$ aktivni su i štapići i čunjići (fotopski vid)
 - pri razinama luminancije većim od $100\text{ cd}/\text{m}^2$ štapići postaju zasićeni i aktivni su samo čunjići

Grada oka

- pretpostavlja se da mrežnica svakog oka sadrži
 - 100 milijuna štapića
 - 5 - 7 milijuna čunjića
- Ijudsko oko osjetljivije na promjene u luminanciji, nego na promjene u boji
- čunjići se po spektralnoj osjetljivosti dijele na tri skupine:
 - čunjići za osjet plave boje (S-cones)
 - čunjići za osjet zelene boje (M-cones)
 - čunjići za osjet crvene boje (L-cones)
- glavnina čunjića su čunjići za zelenu i crvenu boju
- čunjići za plavu boju čine manje od 10% ukupnog broja čunjića

Gradja oka

- spektralna osjetljivost čunjića u ovisnosti o valnoj duljini
 - za fino razlikovanje boja važno je preklapanje spektralnih krivulja

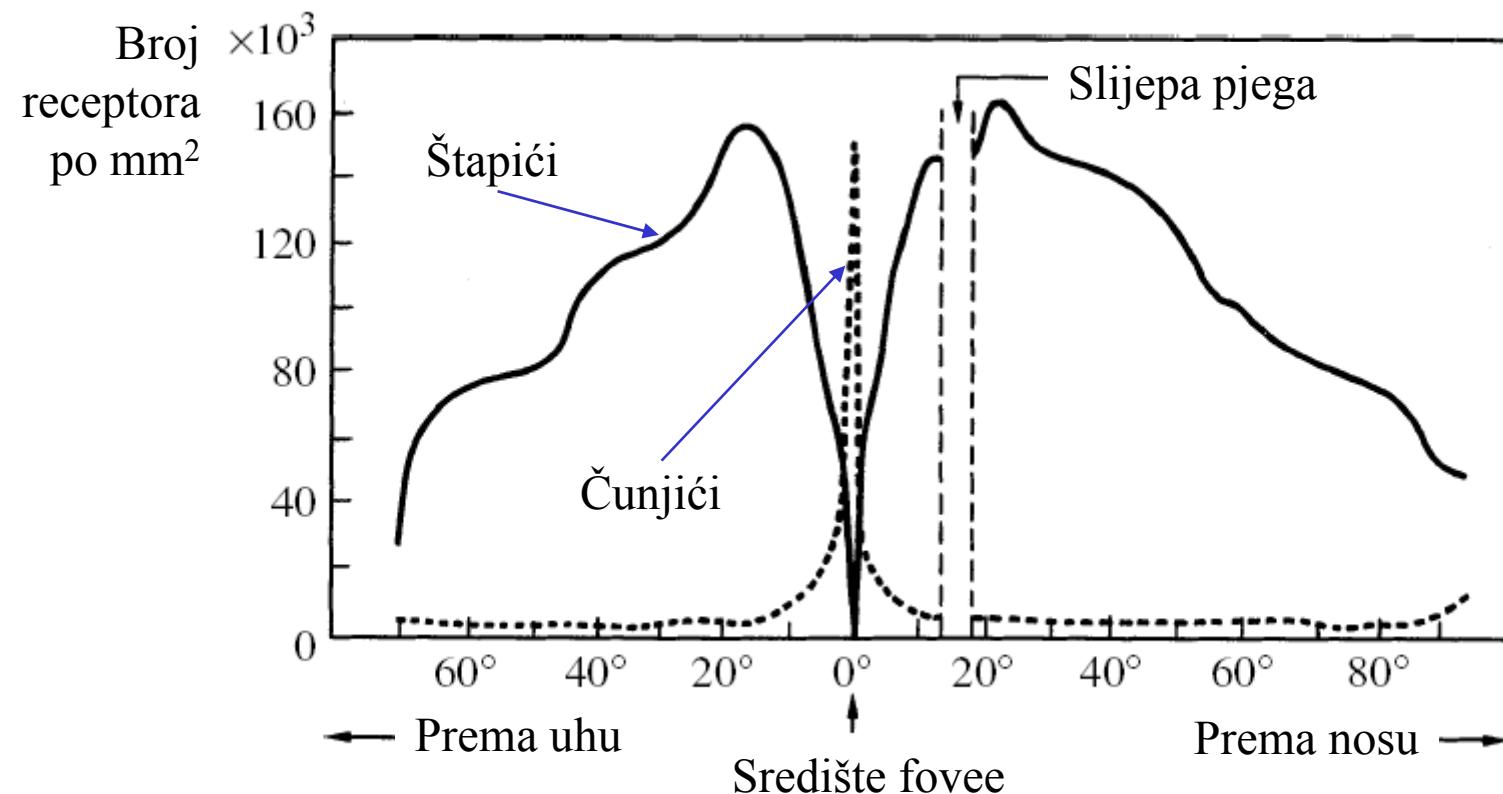


Grada oka

- gustoća čunjića i štapića se mijenja po površini mrežnice
 - žuta pjega (makula) je mala udubina u mrežnici (promjer: 2,5 - 3 mm) s najvećom koncentracijom čunjića
 - u središtu žute pjage je fovea (promjer 0,3 mm, zauzima 2° vidnog kuta) koja sadrži samo čunjiće
 - čunjići u fovei su heksagonalnog oblika i imaju promjer 1-3 µm
 - izvan fovee dominiraju štapići
 - veličina čunjića izvan fovee raste (promjer 5-10 µm), a prostor između njih je ispunjen štapićima
 - promjer štapića iznosi 1-5 µm
 - slijepa pjega je mjesto gdje se optički živac veže s okom
 - ne sadrži niti čunjiće niti štapiće
 - veličina i raspored fotoreceptora određuju maksimalnu prostornu rezoluciju ljudskog vizualnog sustava

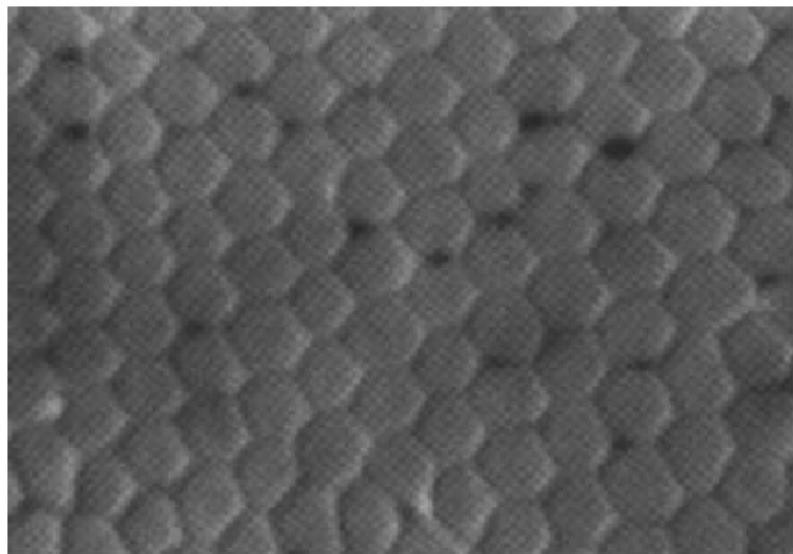
Gradja oka

- distribucija čunjića i štapića u mrežnici

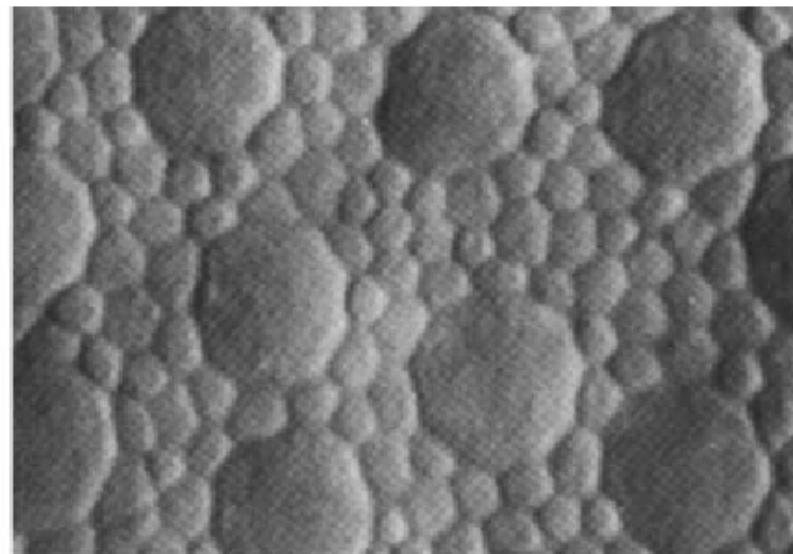


Gradja oka

- izgled fotoreceptora u mrežnici
(svaka slika prikazuje površinu $35 \times 25 \mu\text{m}^2$)



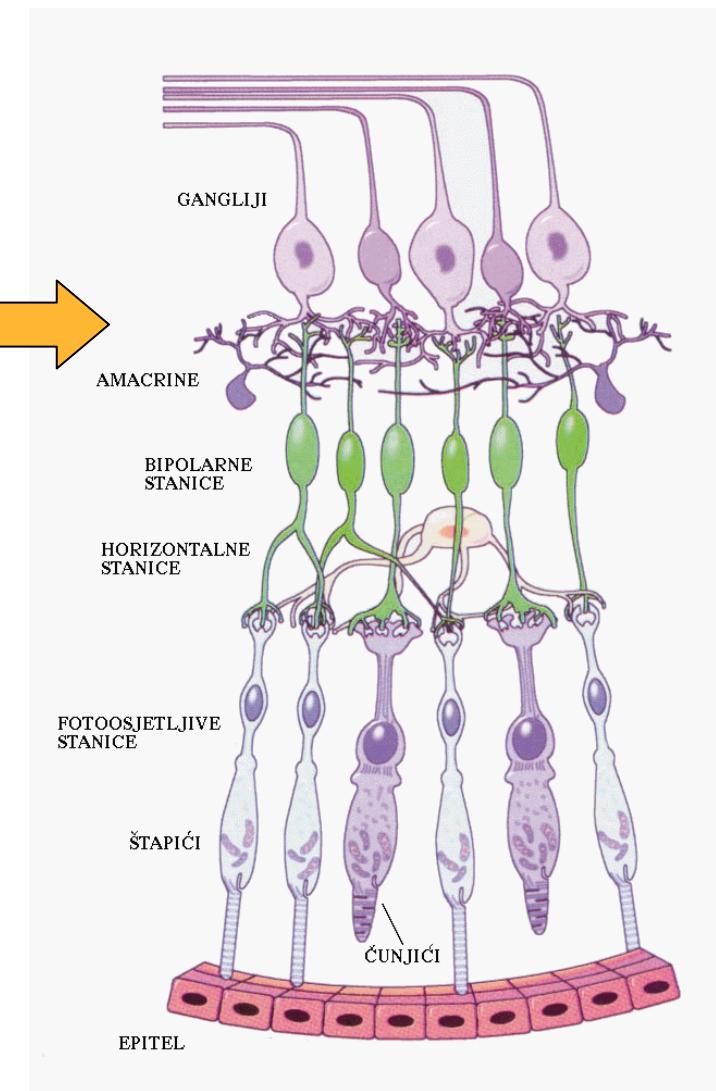
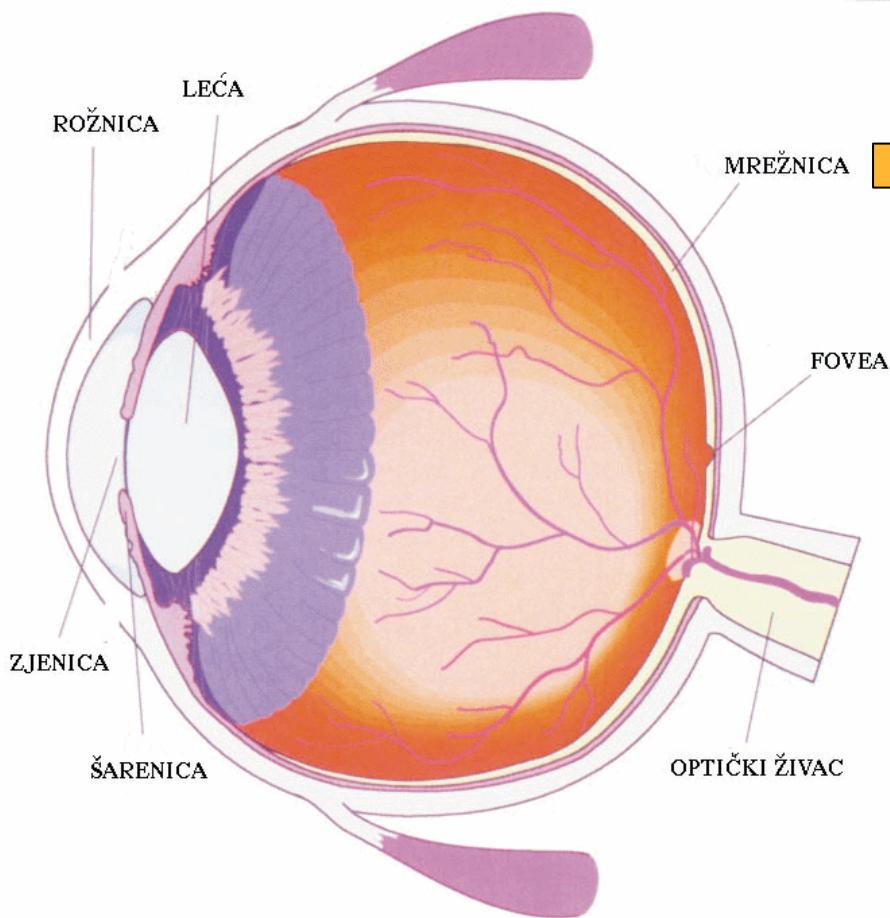
Središte mrežnice (fovea)



Područje izvan fovee

Gradja oka

- percepcijski sustav oka



Gradja oka

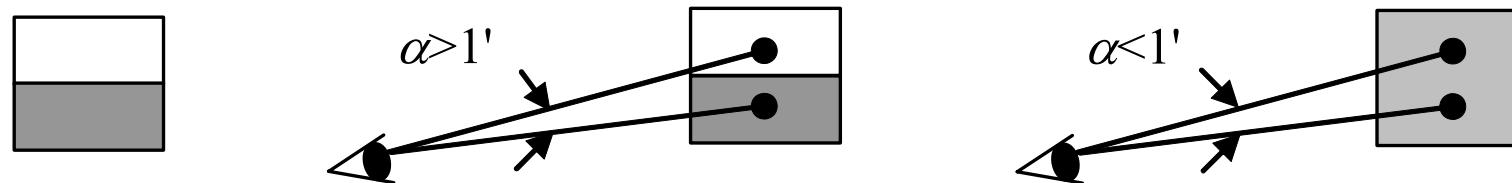
- pigmentirani epitel je vanjski sloj mrežnice gdje leže krajevi štapića i čunjića
 - apsorbira svjetlost koja nije apsorbirana u fotoreceptorma
- ganglijske i bipolarne stanice posreduju u prijenosu električnih signala od čunjića i štapića do mozga
 - optički živac je skup produljenja ganglijskih stanica koje vode do mozga gdje se nalazi kraj živčanog puta i stvara svijest o viđenom
 - unutar optičkog živca ima približno 800 000 živčanih niti
 - kako je ukupan broj štapića i čunjića preko 100 milijuna, svaki receptor nema svoj vlastiti put do višeg centra

Oštrina vida

- Ljudsko oko ima ograničenje u sposobnosti razabiranja sitnih detalja u slici koje je određeno oštrinom vida ili vizualnom oštrinom (visual acuity)
 - oštrina vida je sposobnost vida da razabere sitne detalje u slici
 - određuje se preko graničnog kuta oštrine vida
 - granični kut oštrine vida je najmanji kut pod kojim prosječno oko opaža razliku između dvije točke različite luminancije (vidi ih kao odvojene)
 - granični kut oštrine vida iznosi prosječno jednu kutnu minutu ($1' = 1/60^\circ$)

Oštrina vida

- granični kut oštine vida
 - ljudsko oko može razabrati (vidjeti odvojeno) dva susjedna detalja slike (točke ili linije) ukoliko je kut α pod kojim ih oko vidi jednak ili veći od jedne kutne minute
 - ako je kut pod kojim oko vidi dva detalja slike manji od jedne kutne minute, oko ne može razabrati dva detalja kao odvojene detalje, već ih vidi kao jedinstveno područje



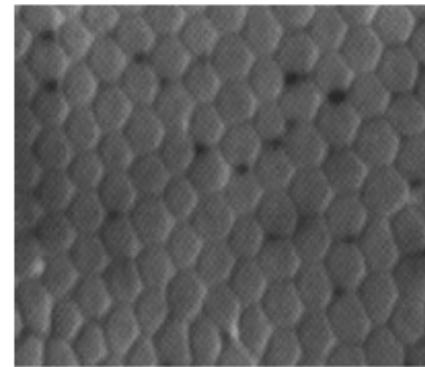
Oštrina vida

- granični kuta oštchine vida je određen veličinom čunjića u fovei mrežnice
 - fovea je područje najoštrijeg vida
 - čunjići tvore na mrežnici mozaik
 - da bi se dvije točke vidjele kao odvojene, svaka mora podražavati barem jedan čunjić između kojih treba ostati jedan nepodražen čunjić
 - na vizualnu oštrinu značajno utječe udaljenost promatranja i rasvjeta
 - promjenom udaljenosti mijenja se kut pod kojim oko vidi dva susjedna detalja u slici
 - pri visokim luminantnim razinama svi čunjići su aktivni
 - pri niskim luminantnim razinama samo najosjetljiviji čunjići su aktivni, što djeluje na smanjenje vizualne oštchine

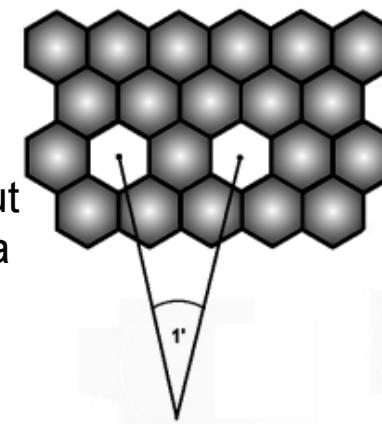
Oštrina vida

- granični kuta oštine vida

Raspored čunjića u fovei



Granični kut oštine vida



Stvaranje doživljaja viđenog

- fizološke, psihofizičke i psihološke zakonitosti nastanka osjeta vida specifične su za svakog čovjeka
- ne postoji jednoznačna veza između fizikalnih svojstava svjetlosti kao podražaja i doživljaja viđenog
- neizravna veza - standardni promatrač
 - rezultat eksperimentalnog ispitivanja svojstava ljudskog vizualnog sustava (osjetljivosti na svjetlost različitih valnih duljina) na velikom broju ljudi u strogo kontroliranim i ujednačenim uvjetima promatranja
 - prosječne vrijednosti utvrđene su kao standard koji određuje kako **fiktivni** standardni promatrač reagira na svjetlosne podražje

Stvaranje doživljaja viđenog

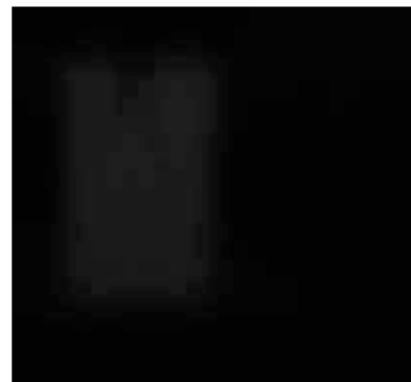
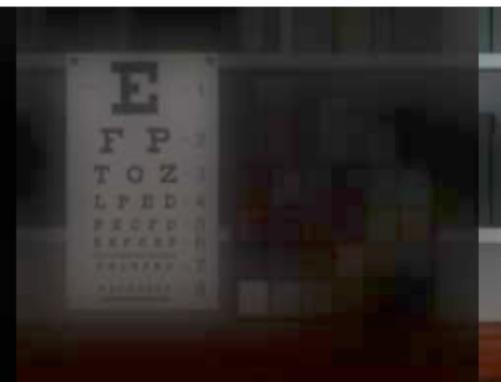
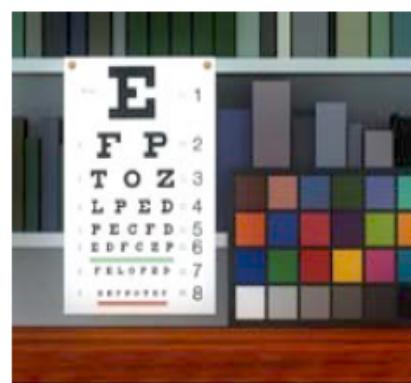
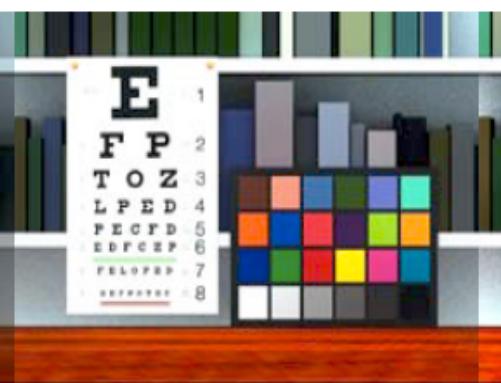
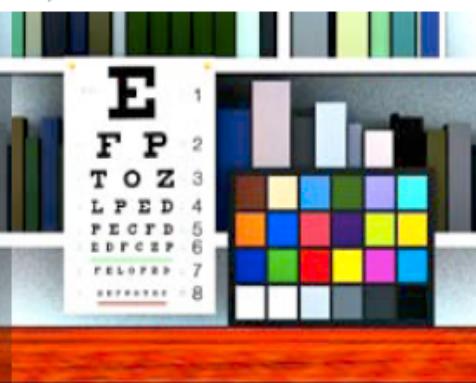
- stvaranje doživljaja viđenog temelji se na:
 - ① fizikalnim zakonitostima
 - stvaranje podražaja
 - ② fiziološkim zakonitostima
 - elektrokemijska aktivnost u živcima
 - ③ psihofizičkim zakonitostima
 - veza podražaja i odziva u svijesti
 - ④ psihološkim zakonitostima
 - svjesnost o viđenom

Stvaranje doživljaja viđenog

- identifikacija predmeta u normalnim se uvjetima promatranja provodi pomoću dvije informacije:
OBLIK i BOJA
 - ovise o značajkama svjetlosti koja osvjetljava predmet
 - na dnevnom svjetlu boje se prenose u velikom broju nijansi
 - u mraku oko razlikuje oblike, ali ne razlikuje boje
 - boja
 - nije svojstvo fizičkog svijeta već je psihički doživljaj izazvan fizikalnim uzrokom koji ovisi o fiziološkim procesima u organizmu i različitim psihološkim faktorima
 - u tehnici i stvarnom životu govori se o **boji svjetlosti** i o **boji predmeta**, iako se radi o **ODZIVU** boje koja nastaje u ljudskoj svijesti
 - isti predmet doživljava se u različitim bojama u ovisnosti o rasvjeti koja na njega pada
 - svjetlost jednakog spektralnog sastava izaziva različite doživljaje boje nekog predmeta kod različitih ljudi

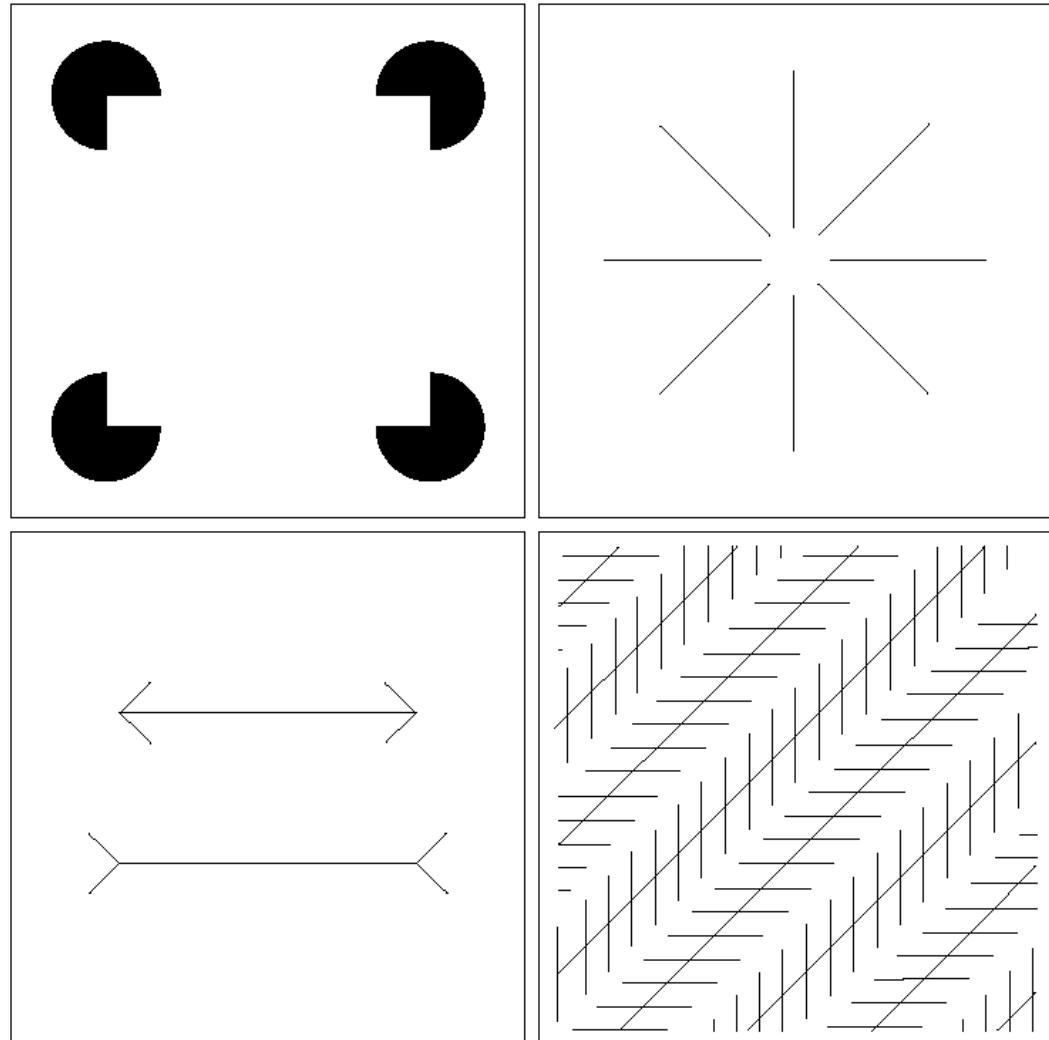
Stvaranje doživljaja viđenog

- doživljaj boje ovisi o rasvjeti

0.1 cd/m²1.0 cd/m²10 cd/m²100 cd/m²1000 cd/m²10,000 cd/m²

Stvaranje doživljaja viđenog

- optičke iluzije
 - vidimo boje, oblike i kretanja koji u slici fizički ne postoje
- više o optičkim iluzijama:
<http://www.michaelbach.de/ot/>

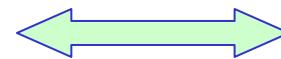


Veličine koje određuju boju

- boja kao subjektivni doživljaj
 - određuju je:

psihofizičke veličine

- dominantna valna duljina
- čistoća pobude
- luminancija

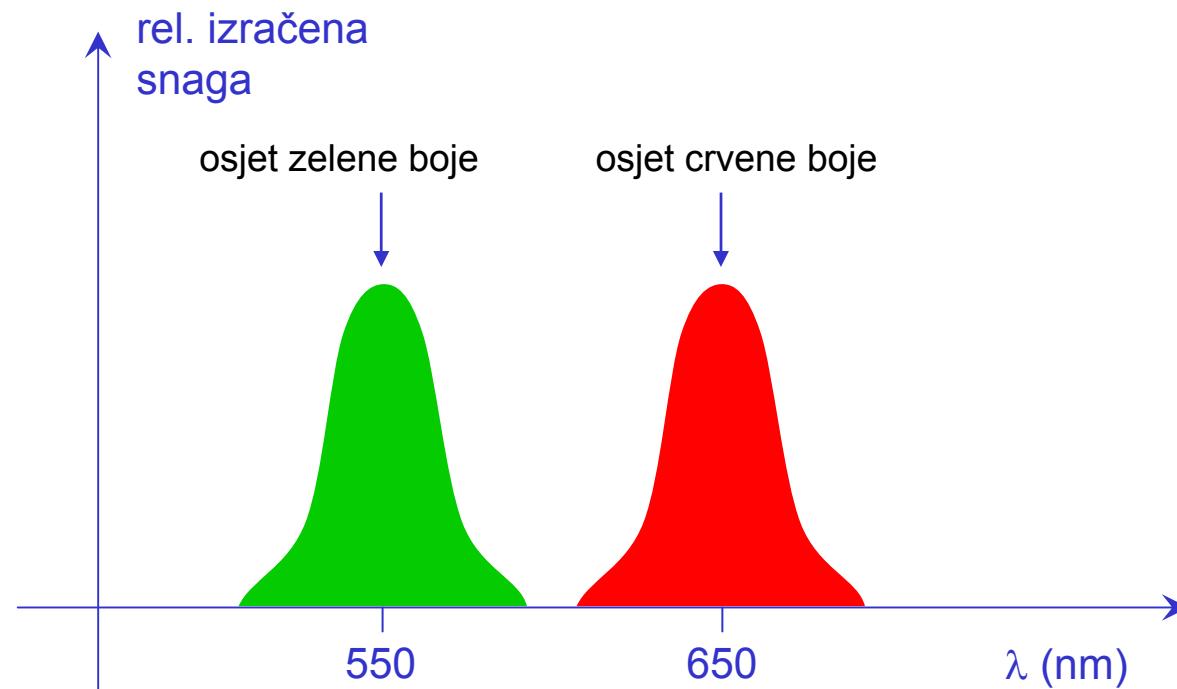


psihološke veličine

- ton boje
- zasićenje
- svjetlina

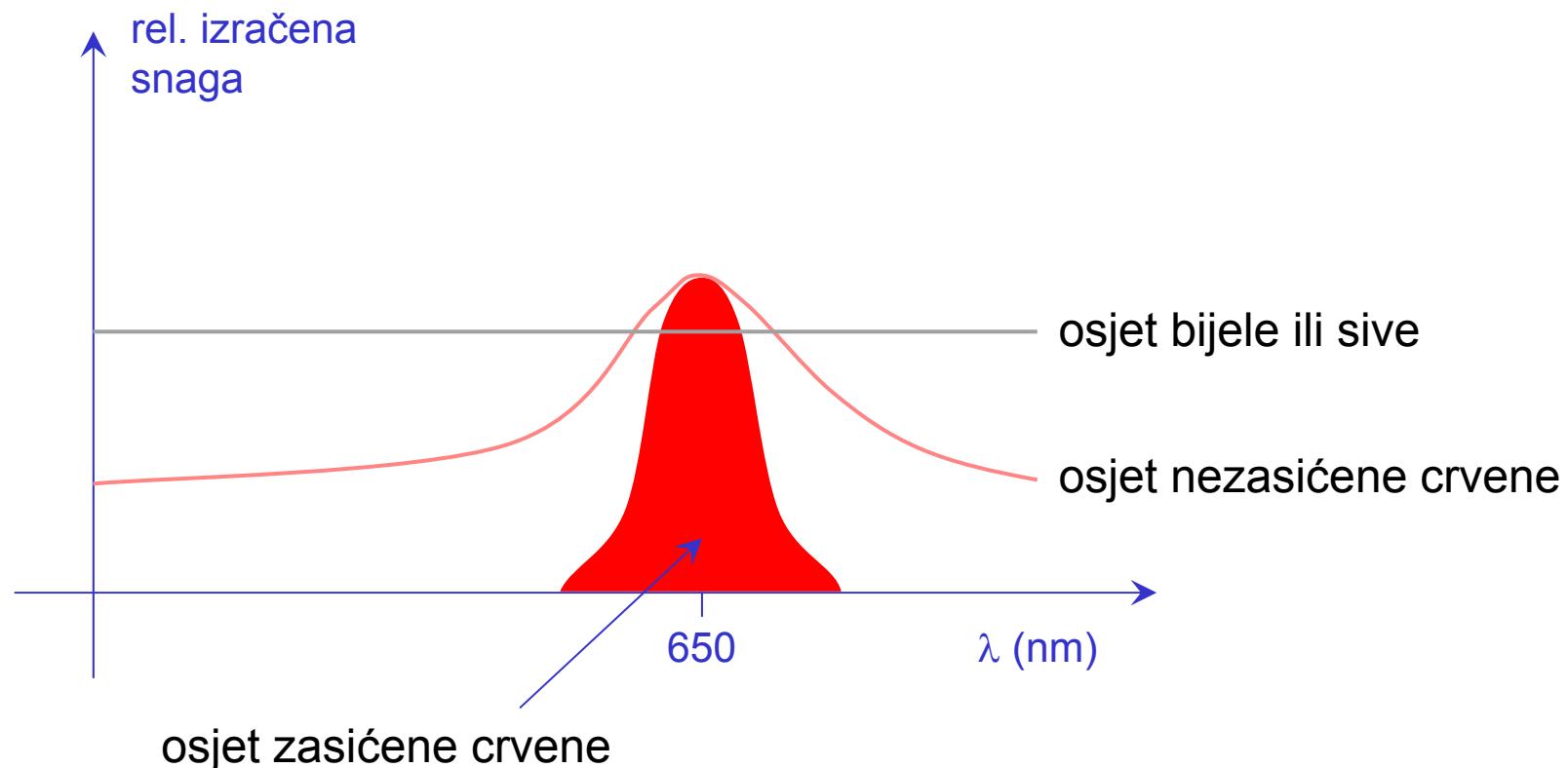
Veličine koje određuju boju

① dominantna valna duljina



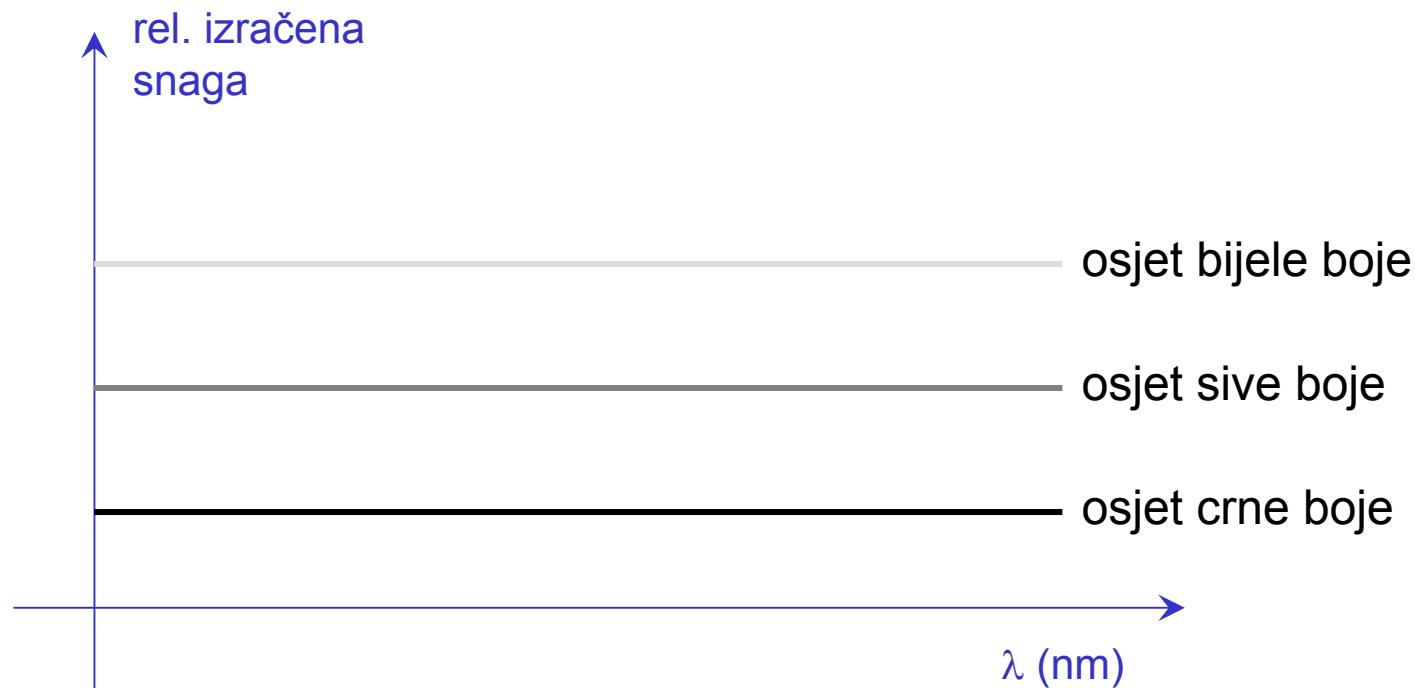
Veličine koje određuju boju

② čistoća pobude



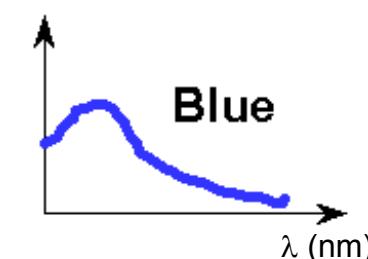
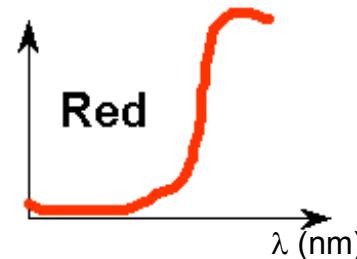
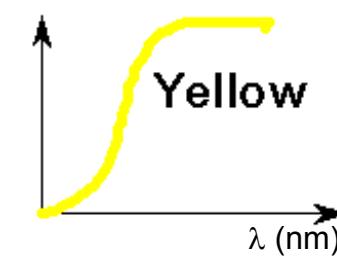
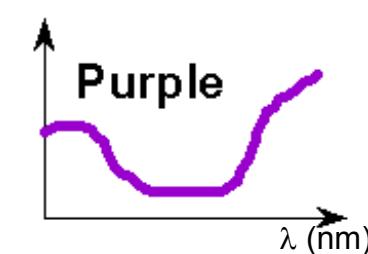
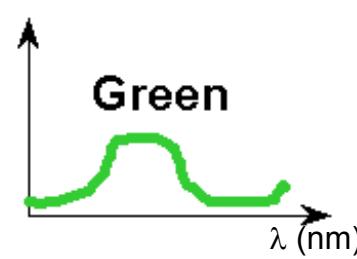
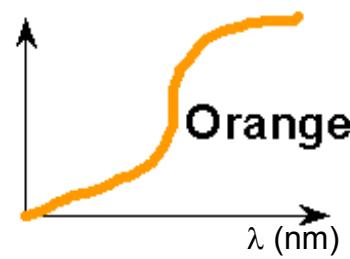
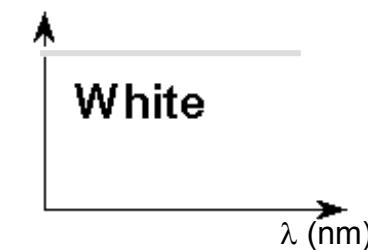
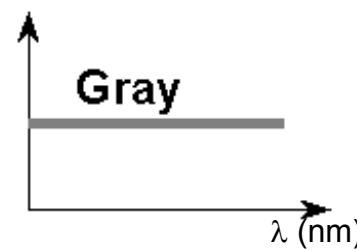
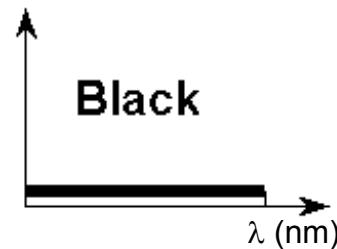
Veličine koje određuju boju

③ luminancija



Veličine koje određuju boju

- Primjeri:

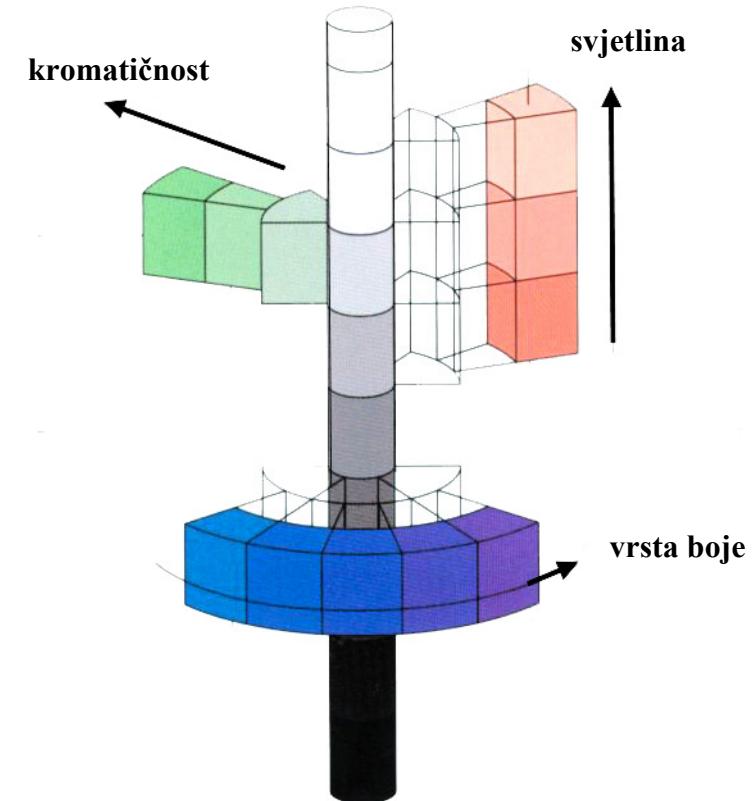
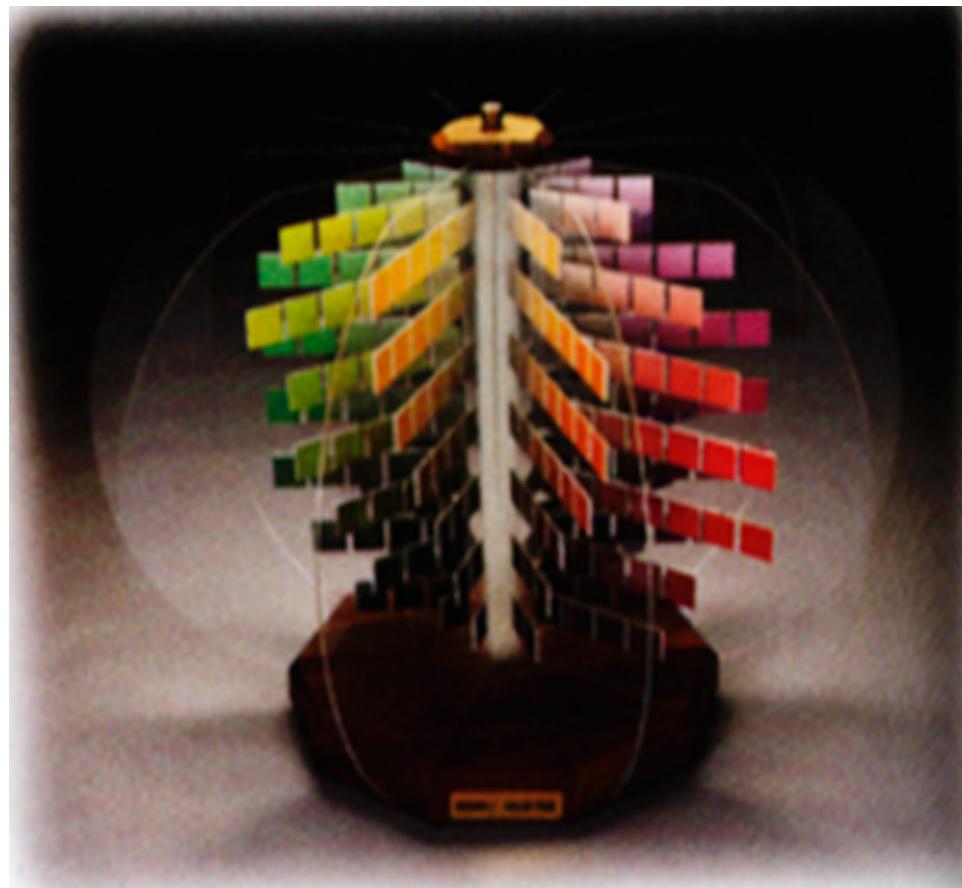


Veličine koje određuju boju

- Munsellov prostor boja
 - jedan od najpoznatijih prostora boja koji se zasniva na doživljaju (opažanju) boja
 - sadrži uzorke boja razmještene u Munsellovo stablo
 - položaj uzorka u stablu određuju tri brojčane vrijednosti: vrsta ili ton boje (*hue*), svjetlina (*lightness* ili *value*) i kromatičnost (*chroma*)
 - kromatičnost je razlika u odnosu na sivu boju za određenu vrstu boje i svjetlinu
 - osnovni princip ovog sustava je razmještanje uzorka boja, tako da susjedni uzorci maju jednaku vizualnu razliku
 - promatrač s normalnim vidom opaža jednaku razliku boja između susjednih uzorka, kojima su dvije, od tri dimenzije boje, iste
 - ovaj prostor boja nije idealno sferičan budući da dva susjedna uzorka nemaju istu kolorimetrijsku razliku u svim područjima

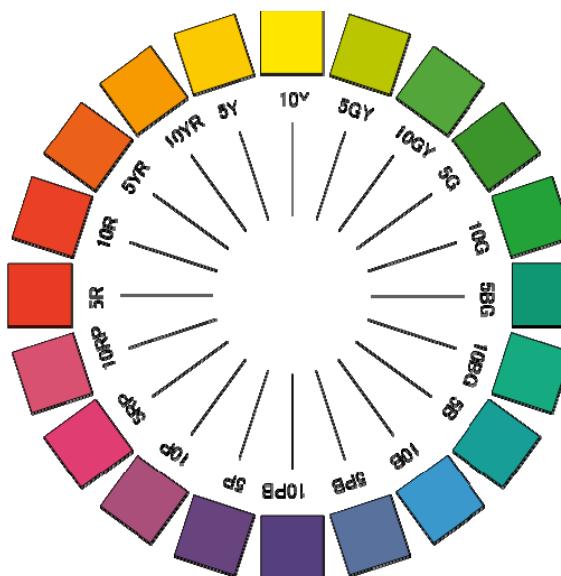
Veličine koje određuju boju

- Munsellov prostor boja



Veličine koje određuju boju

- svjetlina se mjeri po visini stabla od dna koje predstavlja čisto crno do vrha koji predstavlja čisto bijelo (0-crno, 10-bijelo)
- horizontalni presjek daje krug boja koji se dijeli na pet temeljnih vrsta boja: crvenu, žutu, zelenu, plavu i purpurnu
- na prijelazu između temeljnih boja definirano je i pet međuboja
- kromatičnost se mjeri kao udaljenost od središnje osi

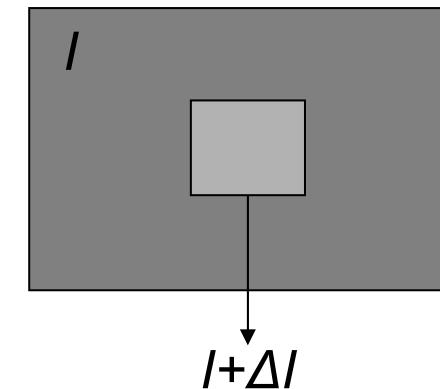


Osjetljivost na kontrast

- kontrast je razlika u svjetlini (ili boji) objekta u odnosu na ostale objekte i pozadinu u vidnom polju
 - I je luminancija pozadine
 - ΔI je promjena luminancije objekta u odnosu na pozadinu koja omogućava uočavanje tek zamjetljive razlike u svjetlini odnosu na I (ΔI je prag razlikovanja)
- percepcija luminancije slijedi Weberov zakon

$$\frac{\Delta I}{I} = k \quad k \text{ je konstanta}$$

- povezanost fizičkog svijeta i čovjekova psihičkog doživljaja tog svijeta nije linearna (s porastom intenziteta podražaja I potrebna je sve veća razlika ΔI da bi se proizvela zamjetljiva razlika)
- vizualni sustav osjetljiv je na kontrast (relativni odnos vizualnih podražaja), a ne na absolutni iznos luminancija
- ova pojava se naziva i adaptacija na svjetlost jer nam omogućava da svijet promatramo na sličan način bez obzira na velike promjene u rasvjeti (luminanciji) tijekom dana ili od mesta do mesta
- Weberov zakon ne vrijedi za vrlo niske i vrlo visoke rasvjete



Osjetljivost na kontrast

Izvorna slika

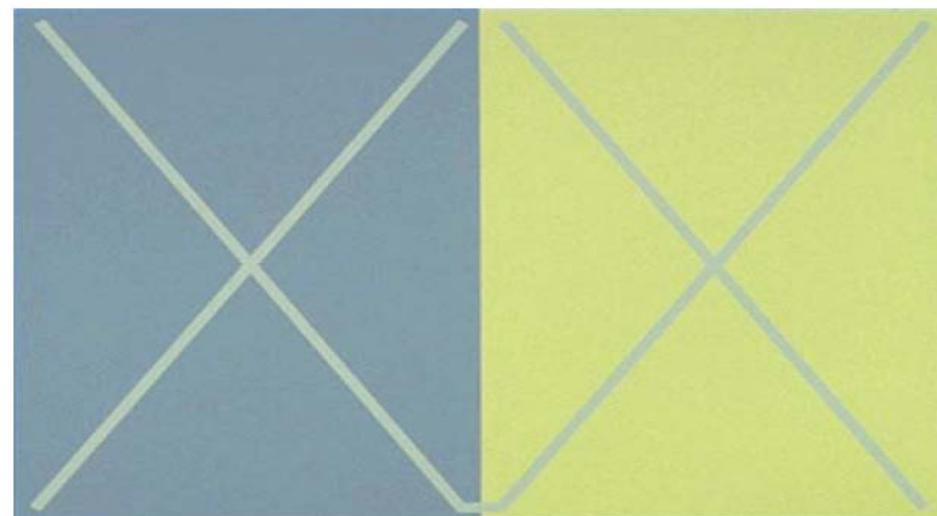


Smanjenje
kontrasta

Povećanje
kontrasta

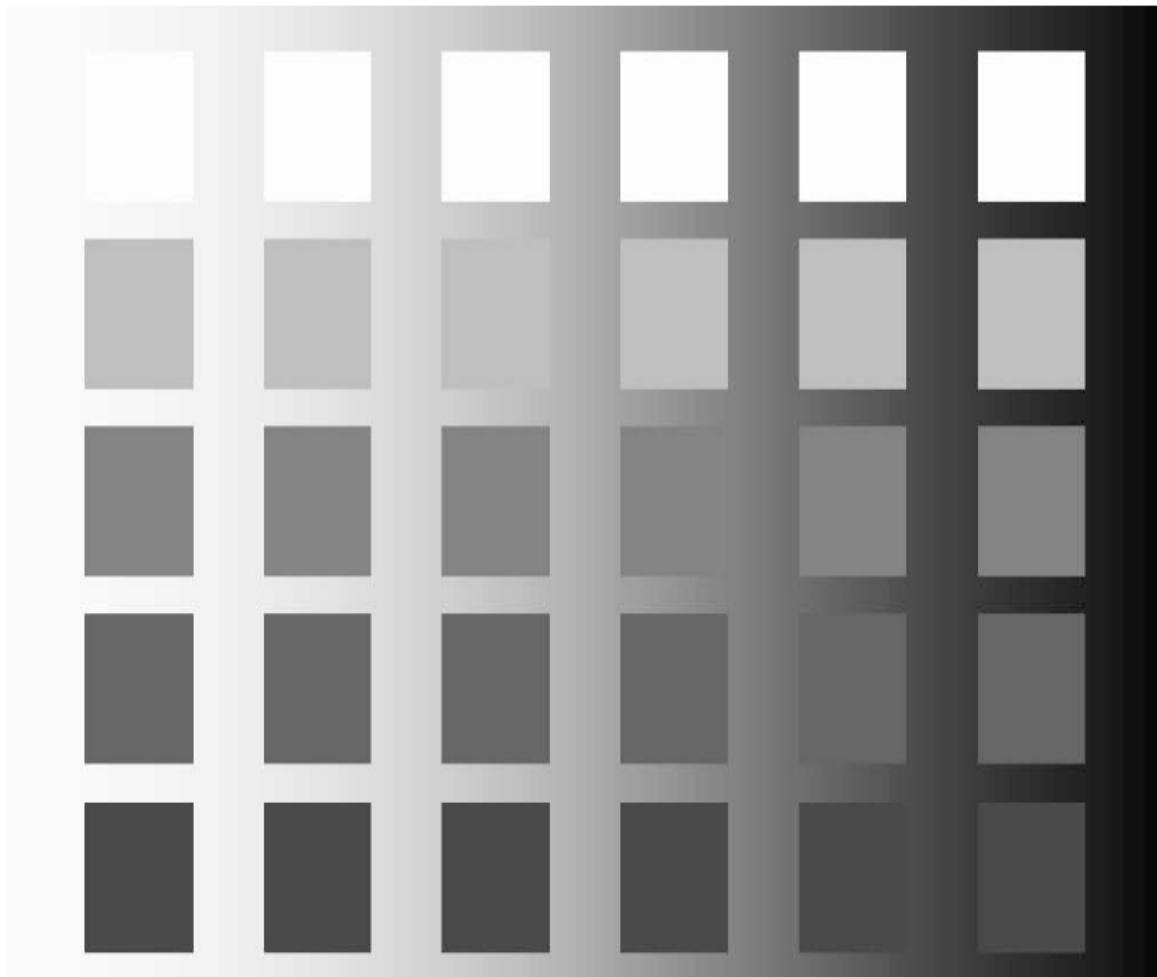
Osjetljivost na kontrast

- istodobni kontrast
 - objekt iste luminancije smješta se na tri pozadine različitih luminancija
 - promjena luminancije pozadine djeluje na promjenu doživljaja svjetline objekta
 - ista boja prikazana na tamnijoj i svjetlijoj pozadini izaziva različit doživljaj viđenog



Osjetljivost na kontrast

- svaki redak prikazuje istu razinu sivog - doživljaj svjetline mijenja se u ovisnosti o razini sivog pozadine

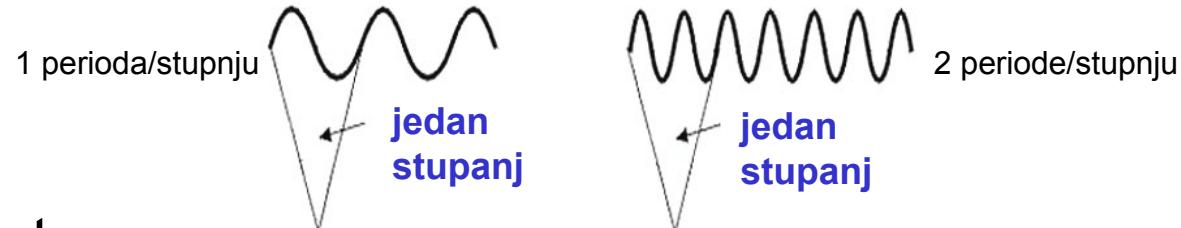


Osjetljivost na kontrast

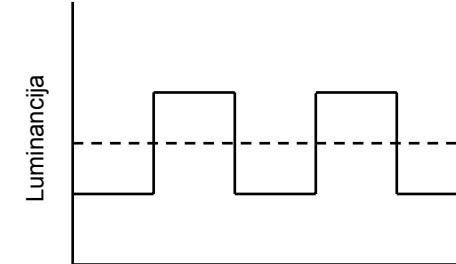
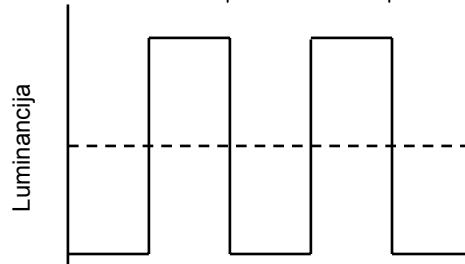
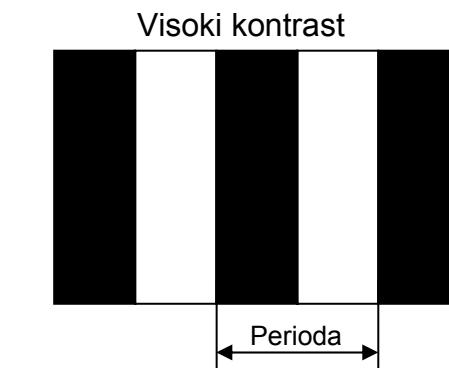
- mjera ograničenja u opažanju uzoraka niskog kontrasta
 - određuje koliko kontrast može biti mali, prije nego se uzorci stope s uniformnom pozadinom i postanu neraspoznatljivi
 - inverzna vrijednost praga opažanja uzorka
- funkcija osjetljivosti na kontrast
(CSF, *Contrast Sensitivity Function*)
 - prikazuje ovisnost osjetljivosti na kontrast ljudskog vizualnog sustava o prostornoj frekvenciji sadržanoj u vizualnom podražaju
 - prostorna frekvencija se izražava kao broj perioda sinusnog signala po stupnju vidnog kuta
 - osjetljivost je najveća za prostorne frekvencije 2-5 perioda/stupnju, a za veće i manje prostorne frekvencije se smanjuje
 - u visokofrekvencijskom području granična frekvencija iznosi 60 perioda/stupnju i određena je značajkama fotoreceptora u mrežnici

Osjetljivost na kontrast

- prostorna frekvencija

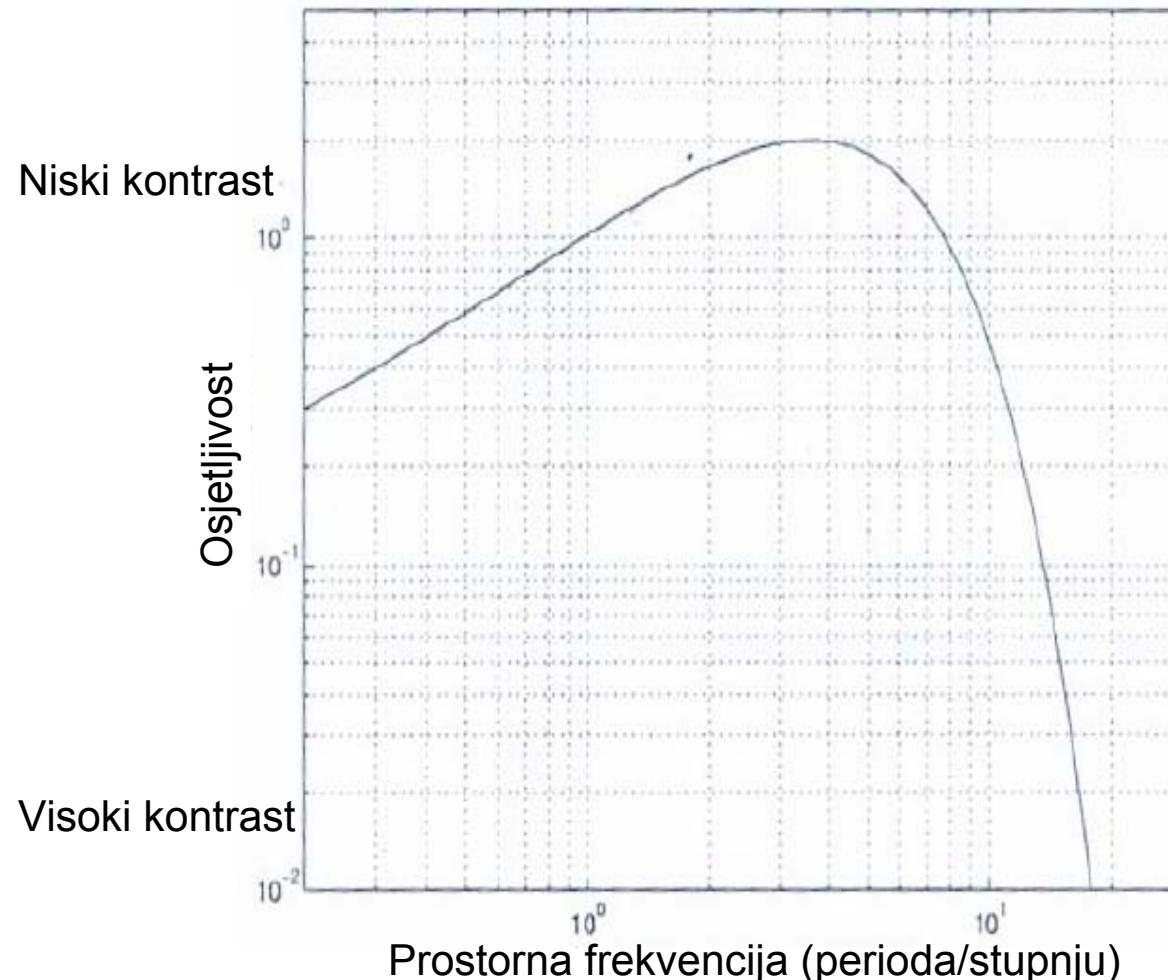


- promjena kontrasta



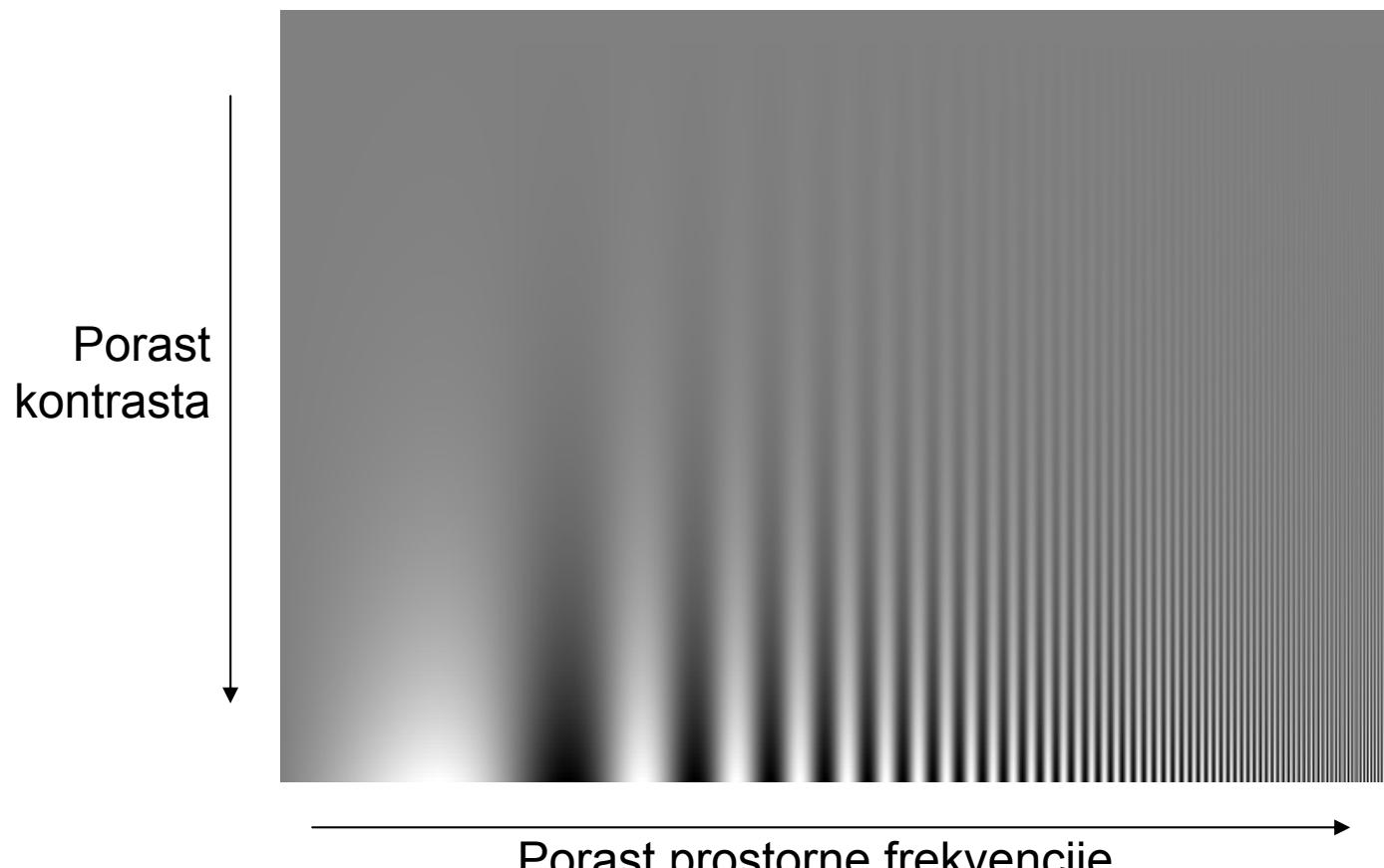
Osjetljivost na kontrast

- funkcija osjetljivosti na kontrast



Osjetljivost na kontrast

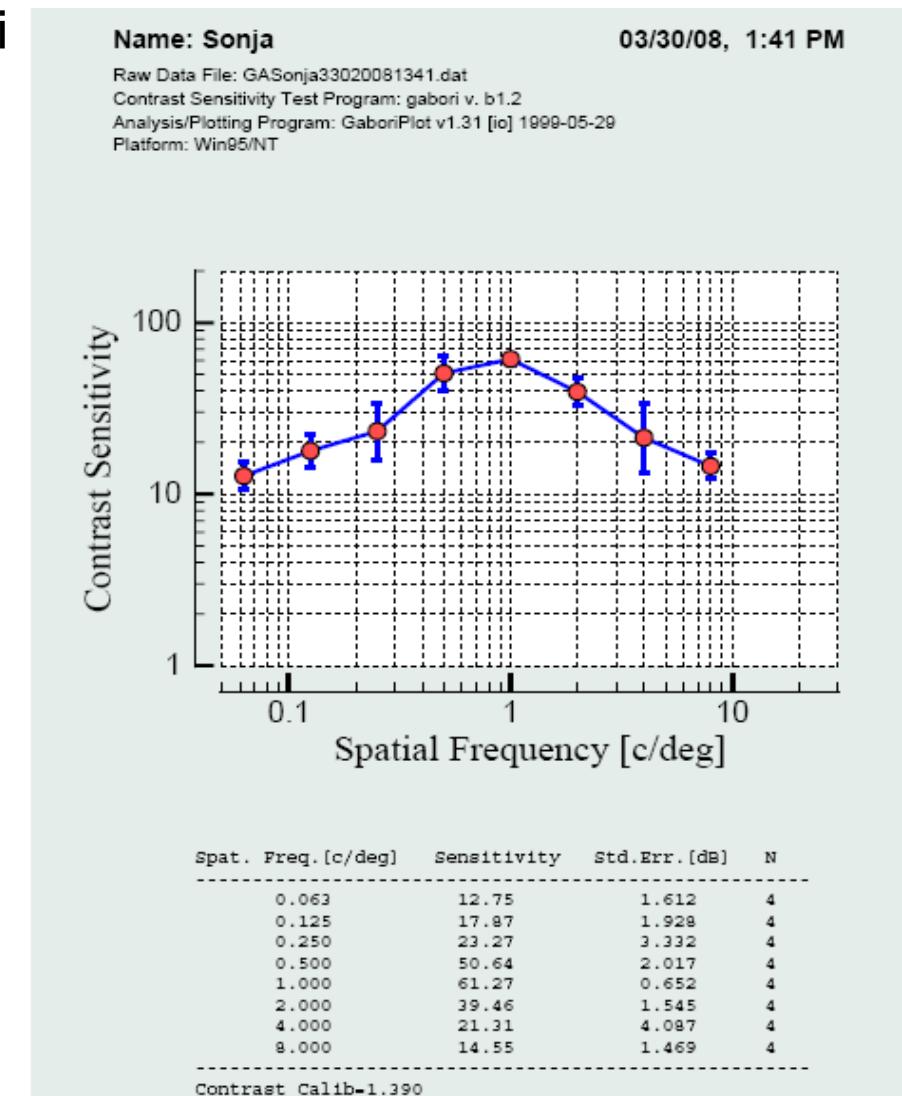
- karta za ispitivanje osjetljivosti na kontrast
(*Campbell-Robson contrast sensitivity chart*)
 - na karti se opaža oblik CSF



Osjetljivost na kontrast

- odredite vlastitu funkciju osjetljivosti na kontrast uz pomoć

<http://vision.psy.mq.edu.au/~peterw/csf1.html>

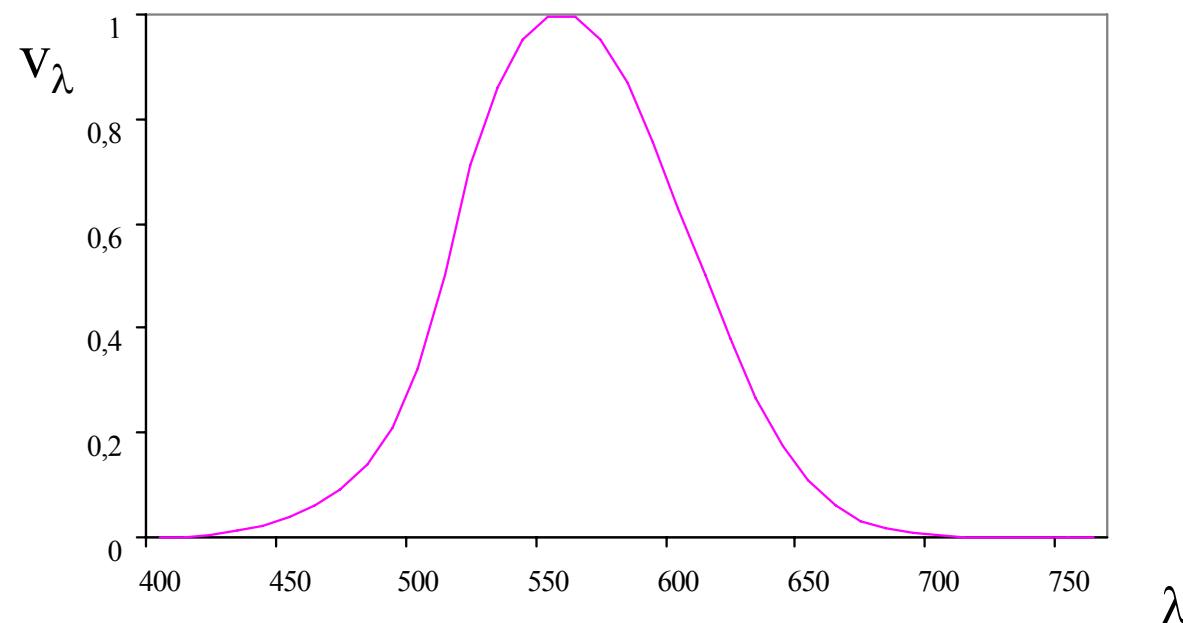


Krivulja luminoznosti

- ljudsko oko nije jednako osjetljivo na sve valne duljine svjetlosti
- krivulja luminoznosti (krivulja osjetljivosti ljudskog oka) uspostavlja vezu između izračene snage monokromatskih izvora svjetlosti i doživljaja svjetline u ovisnosti o valnoj duljini
 - rabi se izvor svjetlosti koji ima konstantnu izračenu snagu na svim valnim duljinama u području vidljive svjetlosti (bijela svjetlost)
 - ispituje se doživljaj svjetline u za intervale širine 10 nm u području 380-780 nm
 - Međunarodno povjerenstvo za rasvjetu (CIE, *Commission Internationale d'Éclairage*) je provelo niz takvih ispitivanja i 1921. godine utvrdilo oblik krivulje luminoznosti za standardnog promatrača (prosječna krivulja za 200 promatrača)

Krivulja luminoznosti

- krivulja luminoznosti (osjetljivosti ljudskog oka)
 - prikazuje relativnu luminoznost v_λ u ovisnosti o valnoj duljini
 - v_λ se određuje u odnosu na luminoznost valne duljine 555 nm koja izaziva najveću svjetlinu
 - relativna luminoznost na 555 nm jednaka je 1

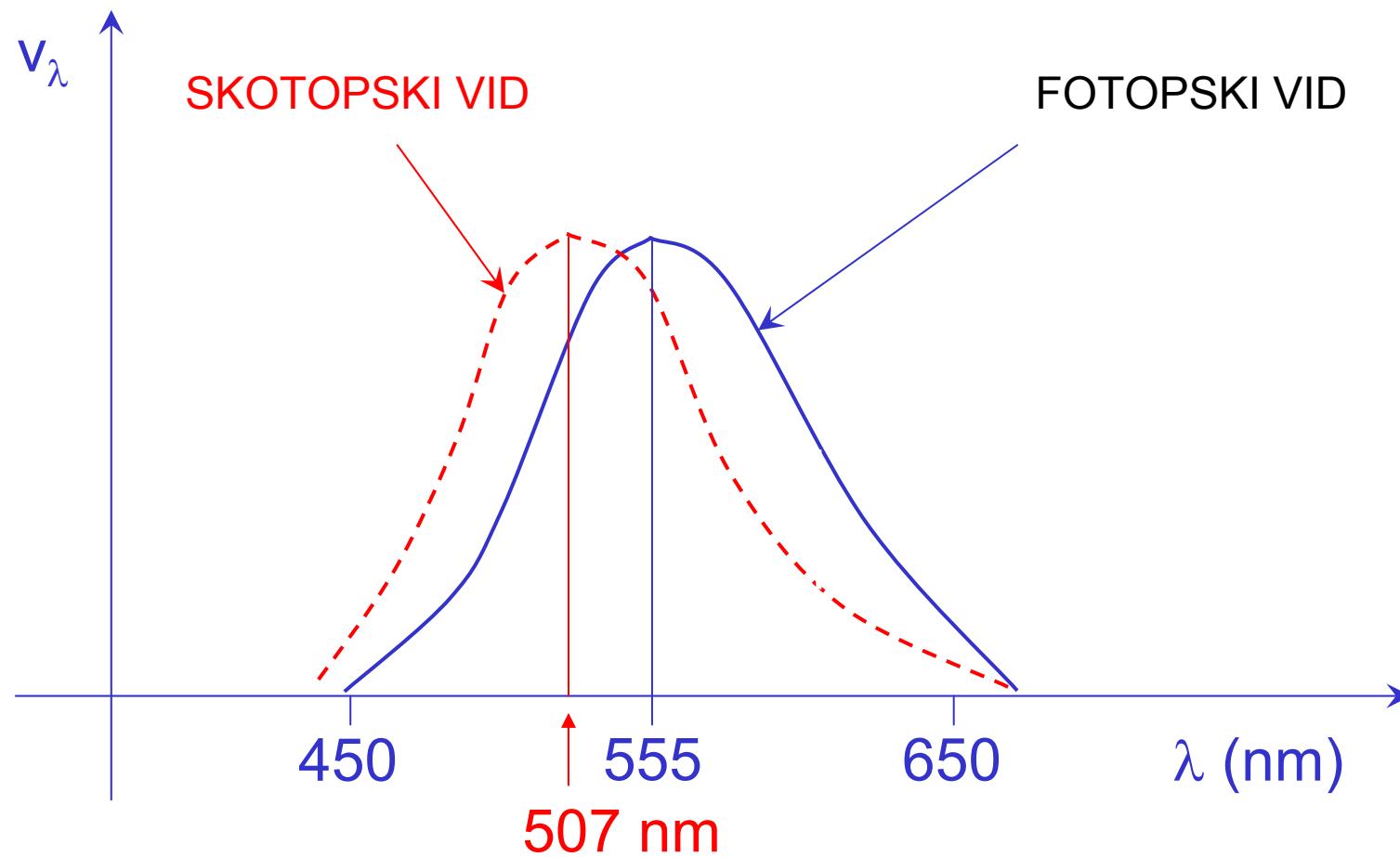


Krivulja luminoznosti

Purkinjeov fenomen

- oblik krivulje luminoznosti ovisi o stanju prilagođenja oka, tj. o razini osvjetljenja (rasvjete)
- u standardnoj krivulji luminoznosti aktivni su i čunjići i štapići
 - govorimo o tzv. FOTOPSKOM VIDU
- pri niskim razinama osvjetljenja (ispod 1 cd/m^2) aktivni su samo štapići i najveća svjetlina postiže se za $\lambda = 507 \text{ nm}$
 - govorimo o tzv. SKOTOPSKOM VIDU
 - krivulja luminoznosti pomiče se prema kraćim λ

Krivulja luminoznosti



Primarne boje

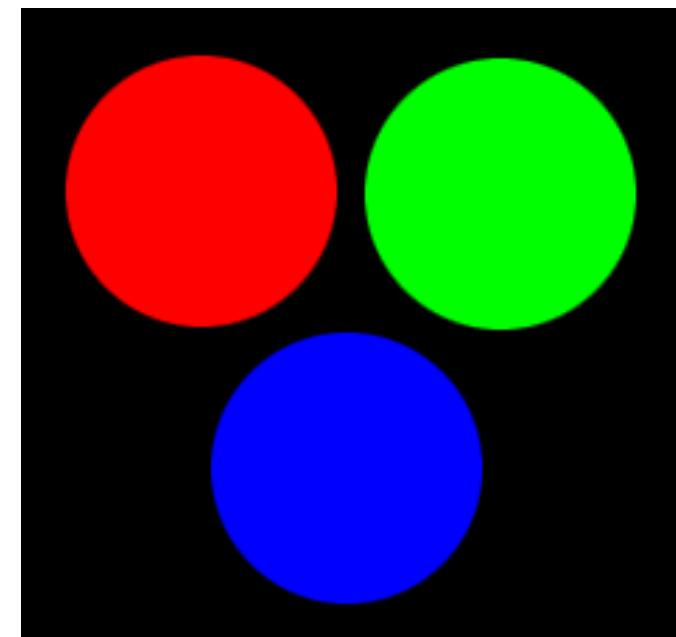
- oko
 - boje se proizvode djelovanjem tri vrste čunjića (za osjet zelene, crvene i plave boje)
 - vidljive boje razlažu se na tri komponente: crvenu, zelenu i plavu, a mozak interpretira tri primljene informacije postupkom zbrajanja
- pretpostavka: sve vidljive boje moguće je proizvesti miješanjem tri osnovne monokromatske boje (primarne boje ili primari) koje su pažljivo odabrane u spektru crvene, zelene i plave svjetlosti
- da bi se odabralo optimalni sustav od tri primarne boje proveden je od strane CIE veliki broj eksperimenata i usvojen je sustav tzv. CIE primara

CIE primari

- CIE primari
 - temeljni uvjet za odabir sustava triju primarnih boja je da zbroj dva primara ne daje treći primar
 - kao primarne boje odabrane su: crvena (R, Red), zelena (G, Green) i plava (B, Blue)
 - primarne boje definirane su valnom duljinom svjetlosti koja se dobije iz točno definiranog izvora svjetlosti uz primjenu odgovarajućeg filtra
 - $\lambda_R = 700 \text{ nm}$
 - $\lambda_G = 546,1 \text{ nm}$
 - $\lambda_B = 435,8 \text{ nm}$
- CIE primari se rabe kolorimetriji (mjerenu boja)
 - boje se proizvode aditivnim miješanjem tri primarne boje (R, G i B)
 - aditivno miješanje boja - miješanje obojenih svjetlosti
 - miješanjem primarnih boja mogu se postići sve ostale boje iz spektra bijele svjetlosti, ali i ostale boje kojih nema u spektru

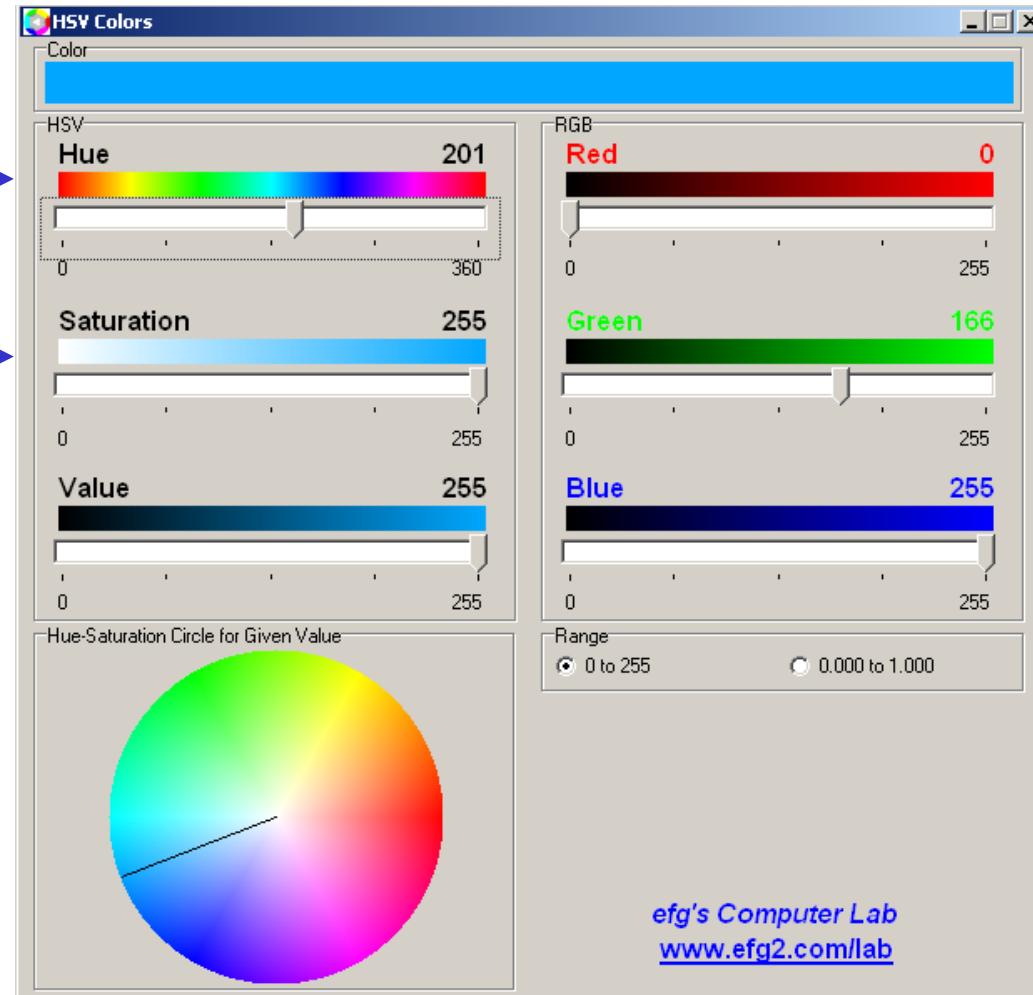
Aditivno miješanje boja

- aditivno miješanje boja
 - na mjestima gdje se primarne boje preklapaju oko doživljava fiktivnu boju koje nema u izvorima svjetlosti
 - R+G=žuta
 - R+B=purpurna
 - B+G=cijan
 - R+G+B=bijela
 - komplementarne boje
 - par boja čije aditivno miješanje daje bijelu boju
 - R+cijan=bijela
 - G+purpurna=bijela
 - B+žuta=bijela
 - stvaranje slike u boji u uređajima za prikazivanje slike temelji se na aditivnom miješanju boja



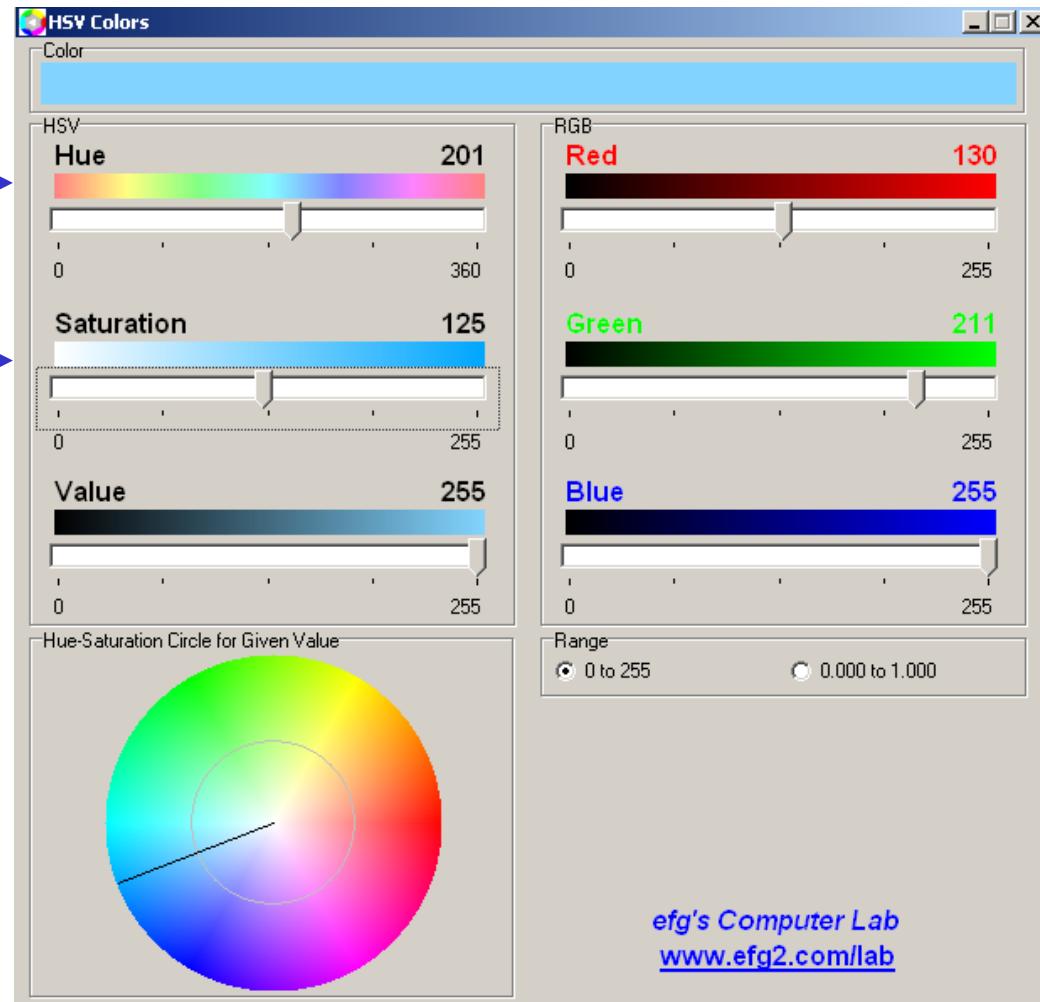
Aditivno miješanje boja

vrsta boje →
(201)
zasićenje →
(255)



Aditivno miješanje boja

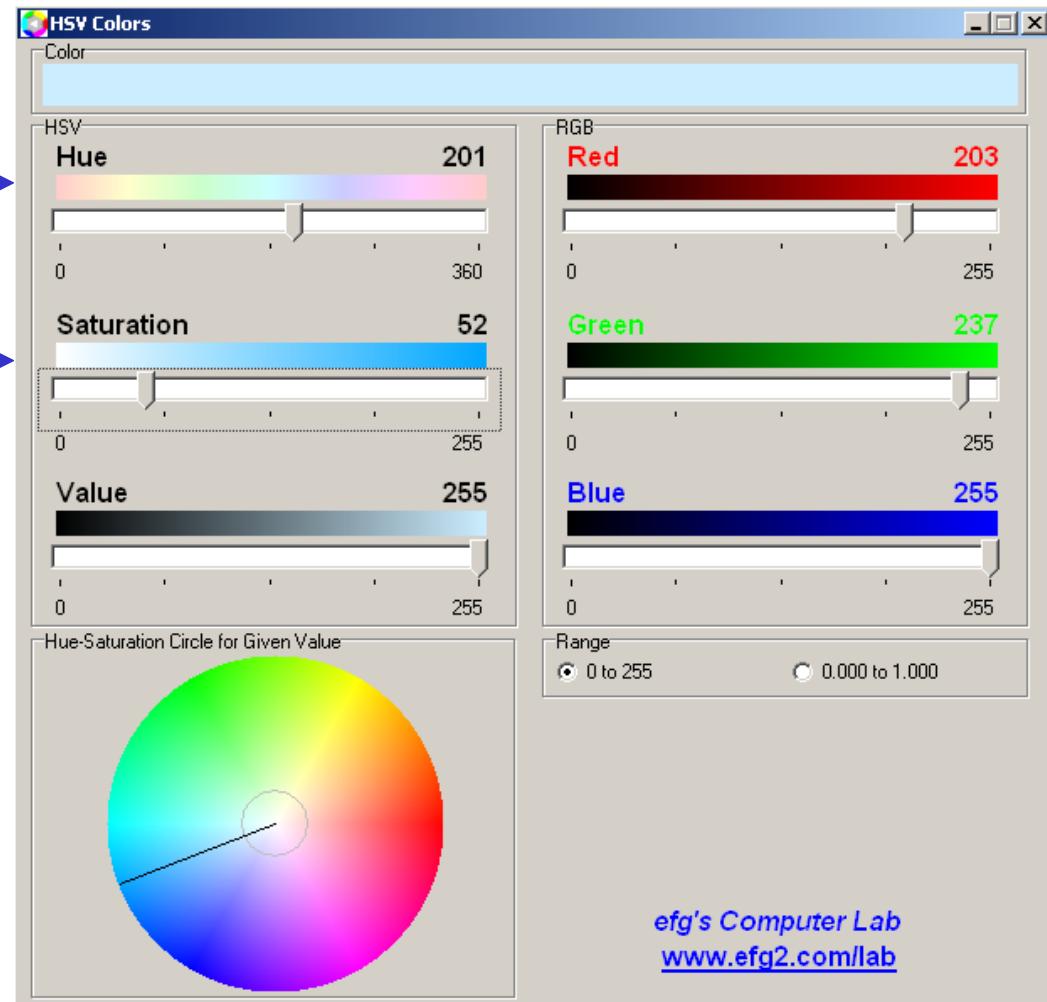
vrsta boje →
(201)
zasićenje →
(125)



vrijednosti
primarnih
boja za
aditivno
miješanje

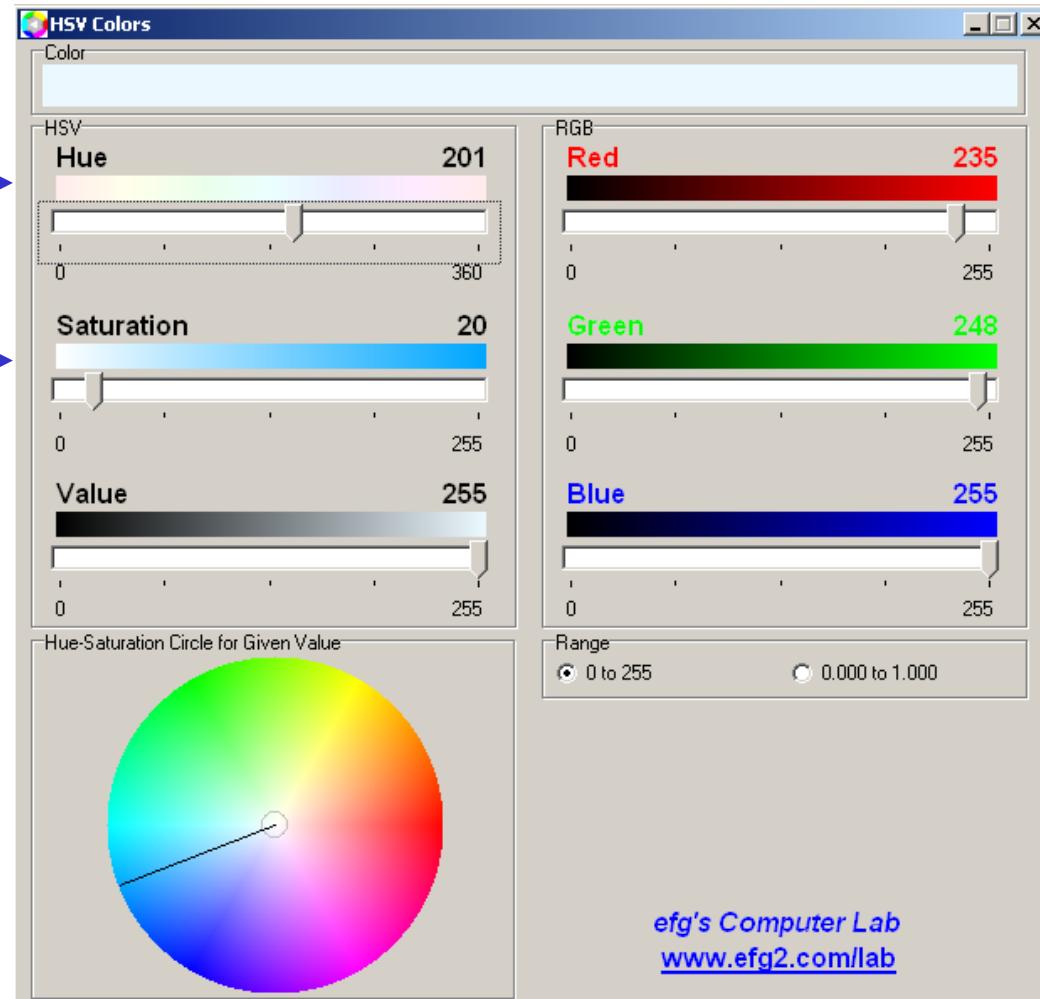
Aditivno miješanje boja

vrsta boje →
(201)
zasićenje →
(52)



Aditivno miješanje boja

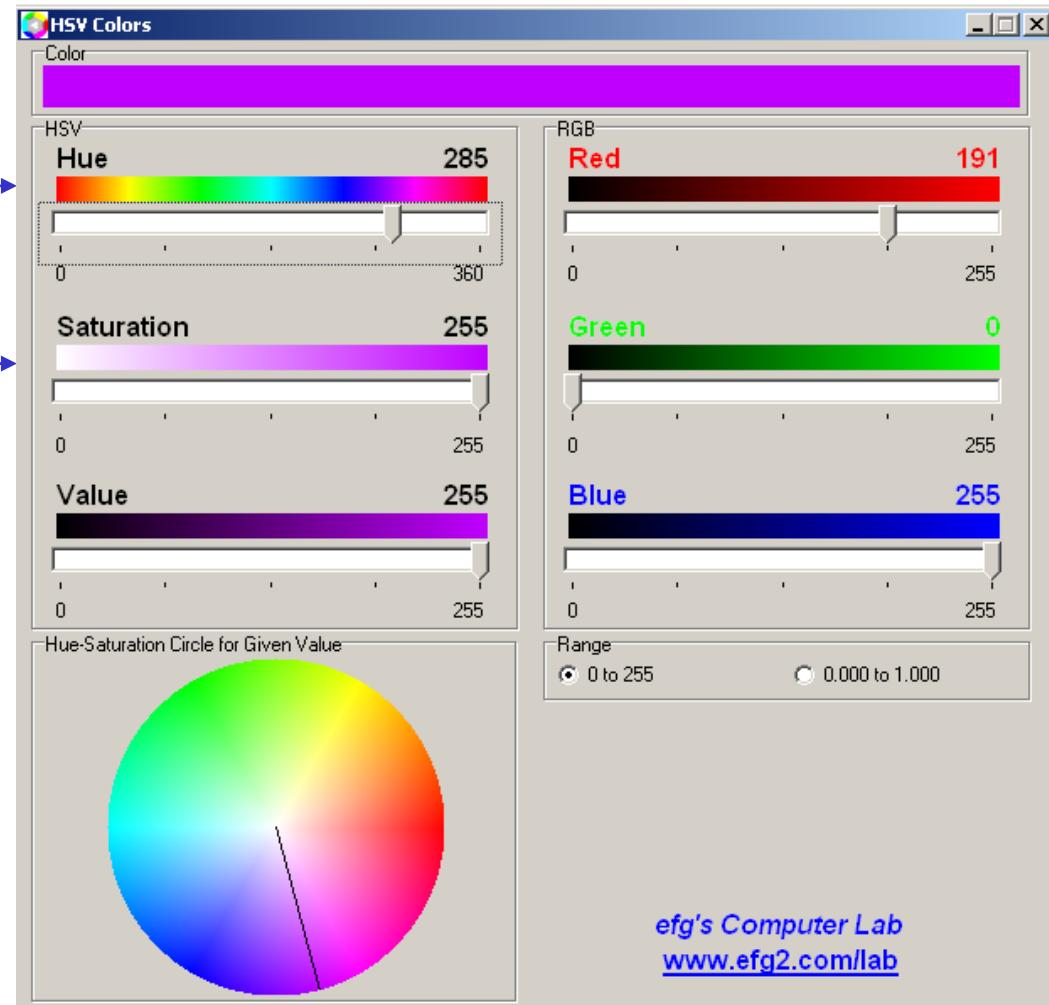
vrsta boje →
(201)
zasićenje →
(20)



vrijednosti
primarnih
boja za
aditivno
miješanje

Aditivno miješanje boja

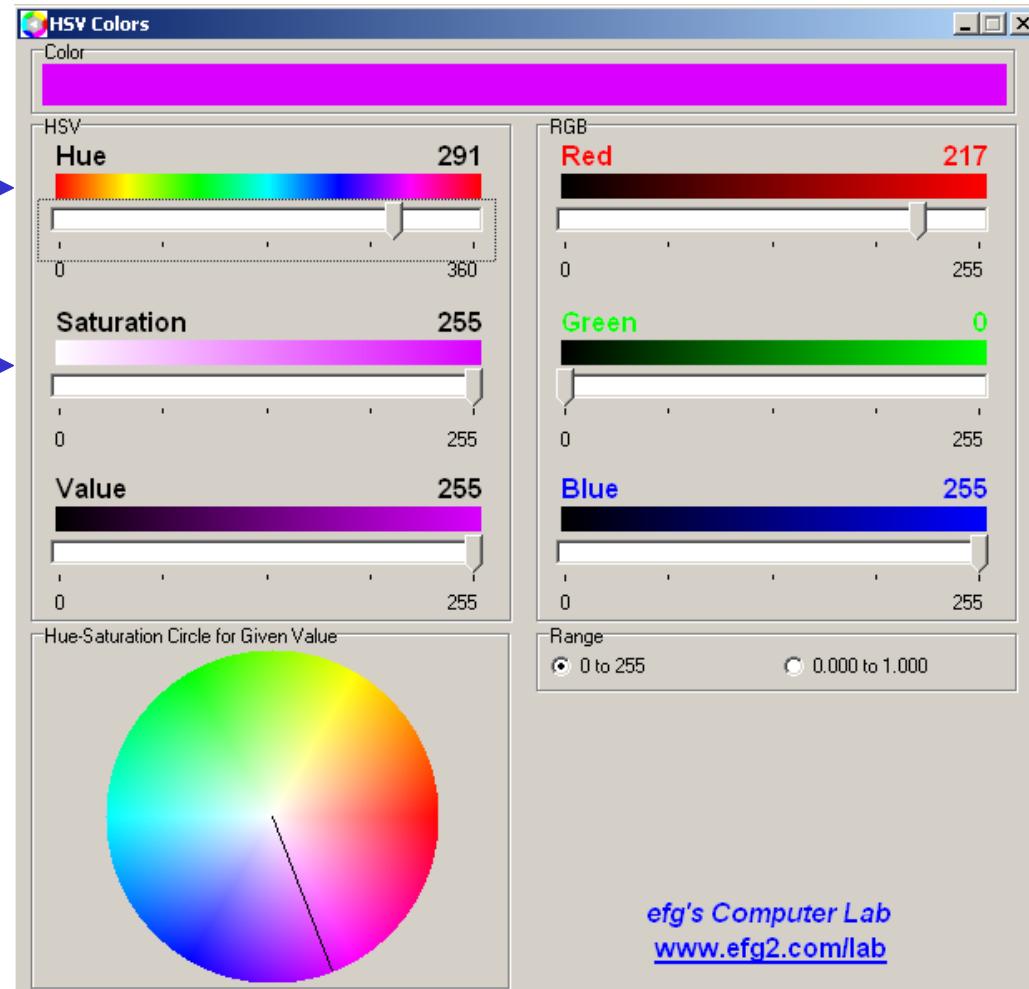
vrsta boje →
(285)
zasićenje →
(255)



vrijednosti
primarnih
boja za
aditivno
miješanje

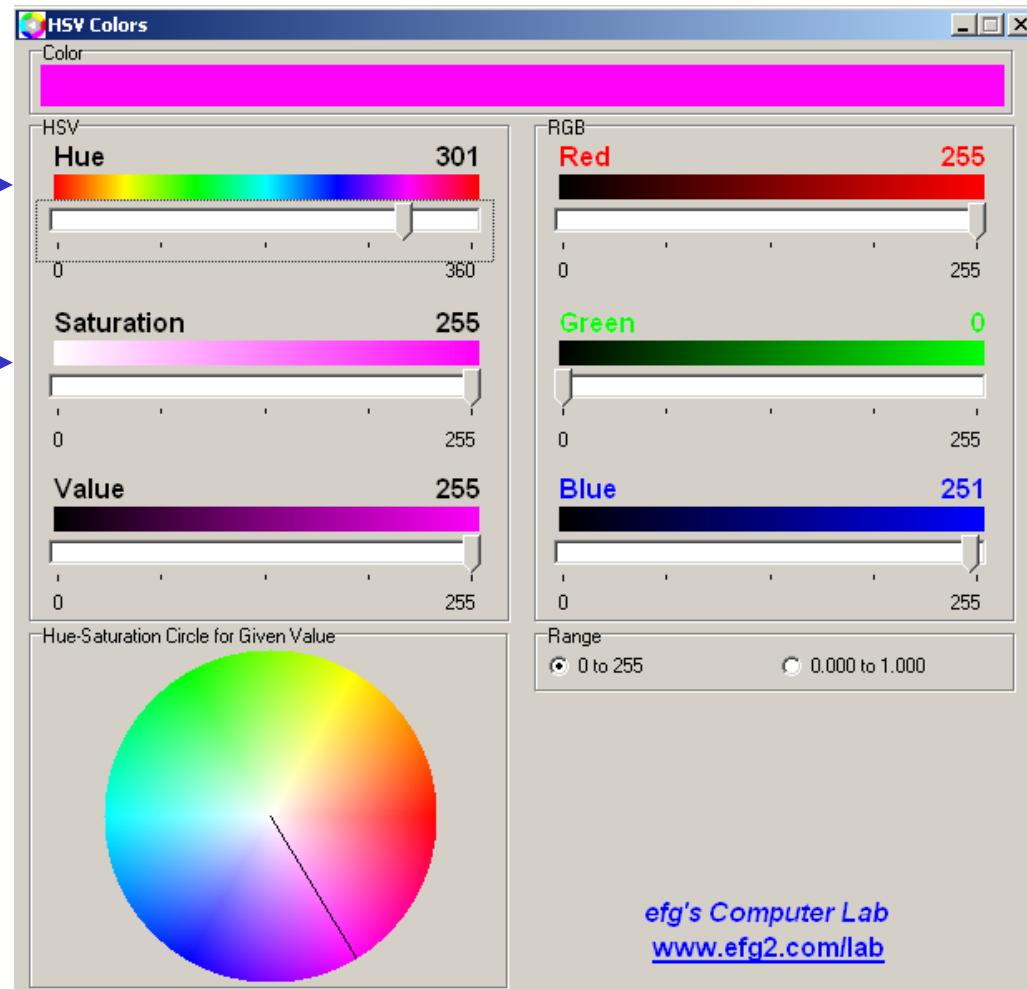
Aditivno miješanje boja

vrsta boje →
(291)
zasićenje →
(255)



Aditivno miješanje boja

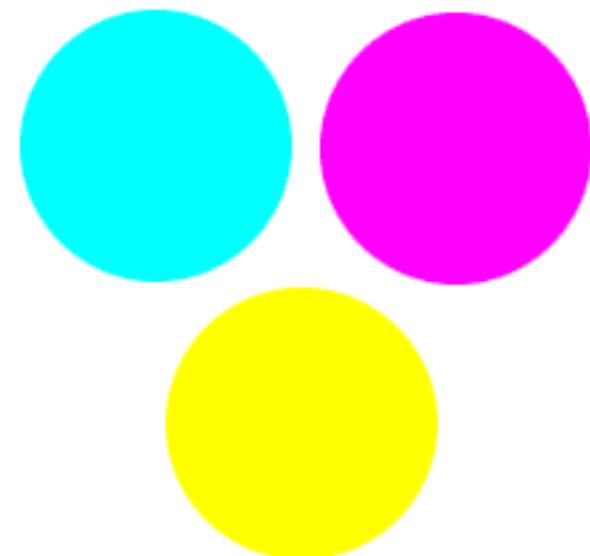
vrsta boje →
(301)
zasićenje →
(255)



vrijednosti
primarnih
boja za
aditivno
miješanje

Suptraktivno miješanje boja

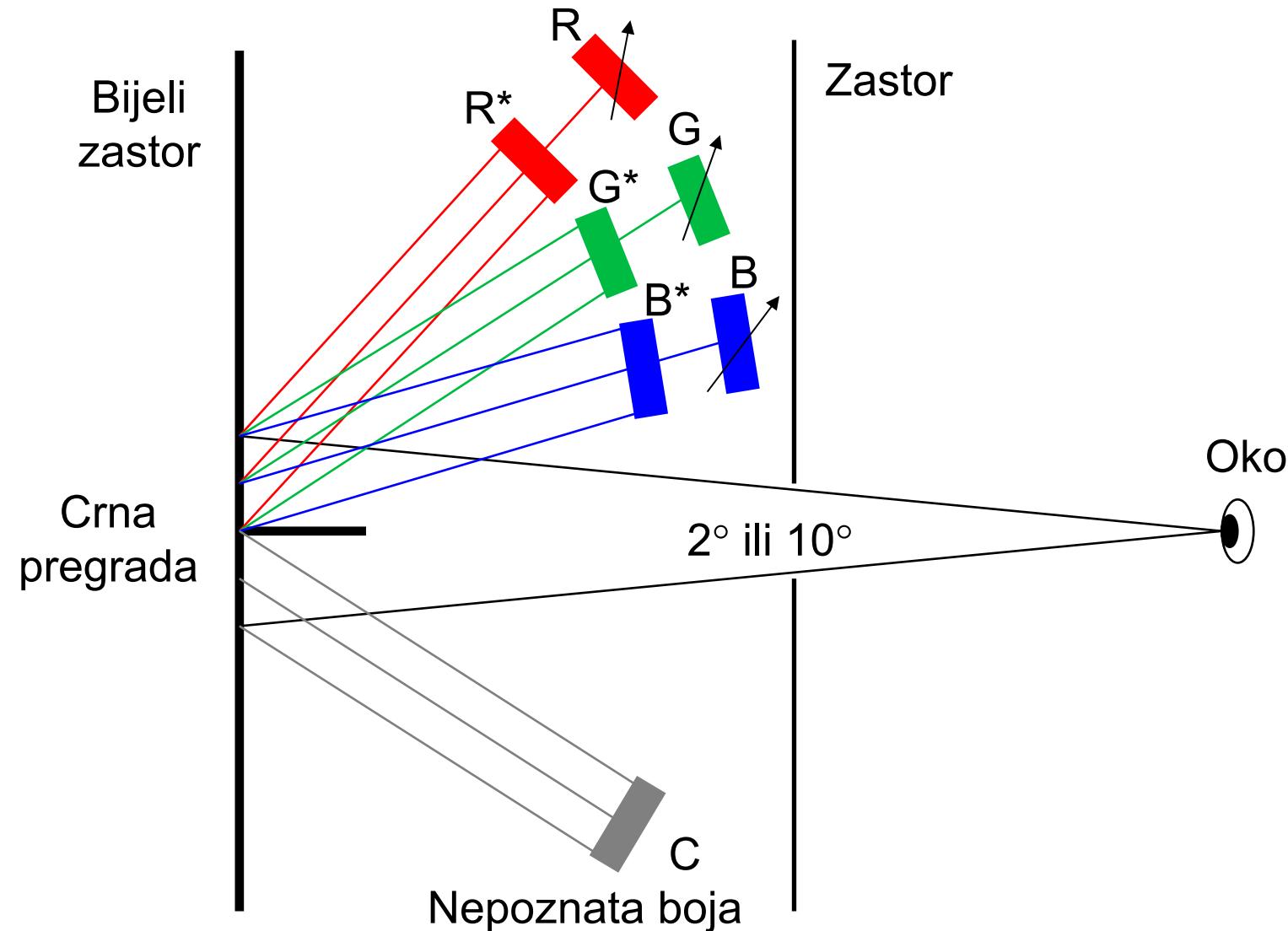
- suptraktivno miješanje boja
 - miješanje obojenih pigmenata
 - koristi se u slikarstvu
 - primarne boje su: cijan, purpurna i žuta
 - cijan+žuta=G
 - cijan+purpurna=B
 - purpurna+žuta=R
 - miješanjem triju suptraktivnih primara nastaje crno obojena površina



Kolorimetrija

- KOLORIMETRIJA - mjerjenje boja
 - osnova kolorimetrije je **uspoređivanje boja i određivanje fizikalnih podražaja** koji izazivaju jednake osjete tona boje i zasićenja
 - mjerjenje boja temelji se na uspoređivanju po jednakosti:
 - nepoznata spektralna boja iz spektra bijele svjetlosti uspoređuje se s bojom koja se dobije aditivnim miješanjem svjetlosti iz 3 izvora svjetlosti primarnih boja
 - u kolorimetriji se rabe CIE primari definirani preko valnih duljina svjetlosti primarnih boja (crvena (R)-700 nm, zelena (G)-546,1 nm, plava (B)-438,8)
- tropodražajni kolorimetar (aditivni kolorimetar)
 - uređaj pomoću kojeg se provodi uspoređivanje i izjednačenje boja
 - nepoznata boja (C) se uspoređuje s bojom koja nastaje miješanjem triju primarnih boja (R, G i B)
 - količine svake od triju primarnih boja se mogu podešavati kako bi se postiglo izjednačenje s nepoznatom bojom
 - na taj način se određuje količina primarnih boja u nepoznatoj boji

Kolorimetrija



Kolorimetrija

- za izjednačenje s nepoznatom bojom C treba uzeti:
 - R količinu crvenog primara R*
 - G količinu zelenog primara G*
 - B količinu plavog primara B*

$$C = R \cdot R^* + G \cdot G^* + B \cdot B^*$$

- R*, G*, B* - jedinične količine primara
- R, G, B - tropodražajne vrijednosti boje C
- za određivanje R*, G* i B* umjesto izvora svjetlosti nepoznate boje koristi se izvor svjetlosti koji izaziva doživljaj referentnog bijelog (W)
- regulacijom izvora svjetlosti za crvenu, zelenu i plavu boju mijenjaju se količine primara R, G i B dok se ne dobije referentno bijelo
- potrebna količina pojedinog primara u trenutku izjednačenja s referentnim bijelim uzima se kao njegova jedinična vrijednost ($R=1$, $G=1$, $B=1$; $W=1R^*+1G^*+1B^*$)
- jedinična količina primara može biti izražena u jedinicama svjetlosnog toka [lm], luminancije [cd/m^2] ili svjetlosne jakosti [cd]

Kolorimetrija

- izjednačenjem primara s nepoznatnom bojom C dobije se količina crvenog, zelenog i plavog primara u nepoznatoj boji

$$m = R + G + B$$

- m je ukupna tropodražajna vrijednost boje C
- ako se sa C^* označi jedinična količina boje C u $R^*G^*B^*$ sustavu, tada vrijedi

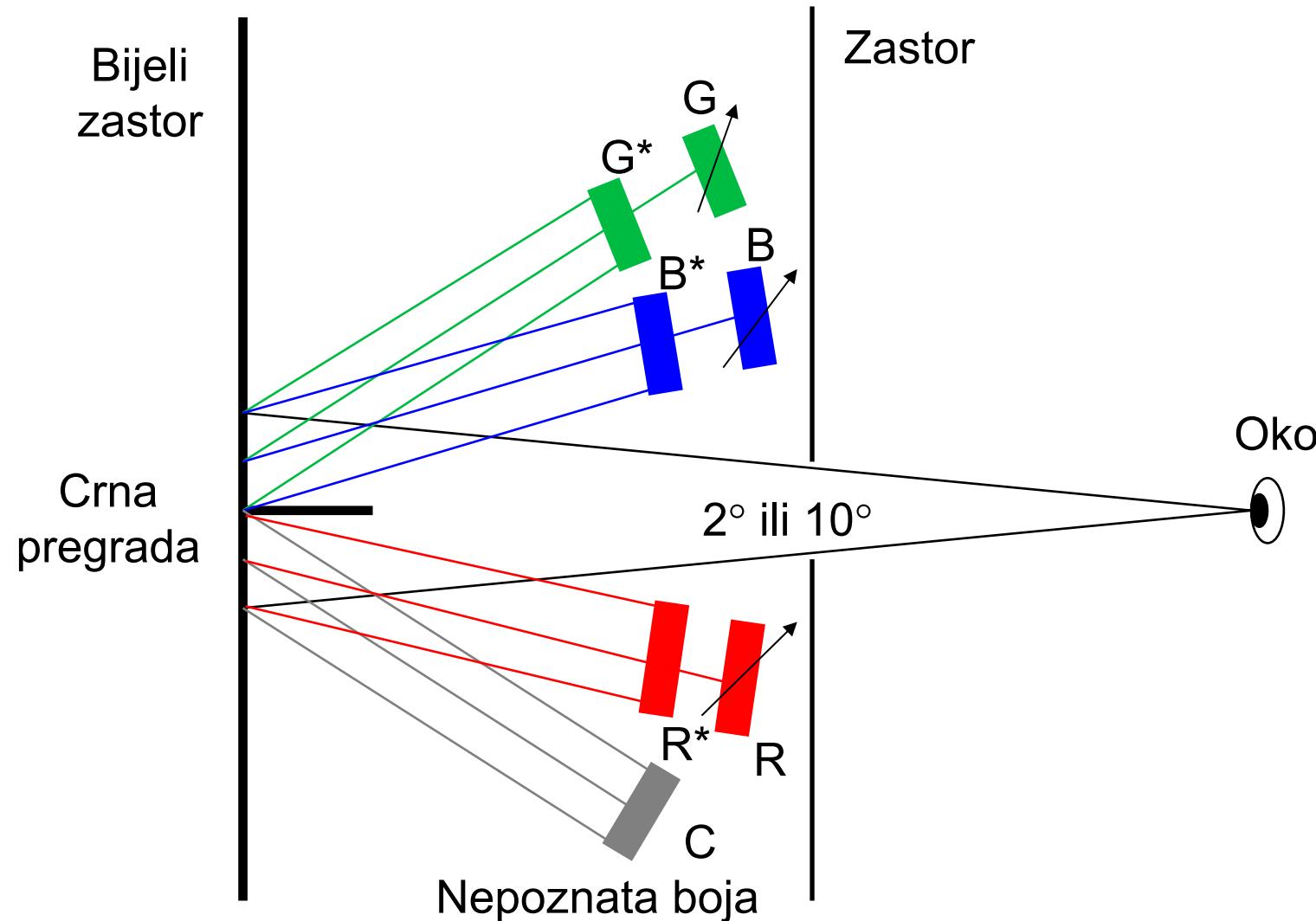
$$C = m \cdot C^* = R \cdot R^* + G \cdot G^* + B \cdot B^*$$

- R, G i B daju puno određenje boje samo ako se uz primare R^* , G^* i B^* definira i referentno bijelo: $W = m \cdot W^* = 1 \cdot R^* + 1 \cdot G^* + 1 \cdot B^*$
 - ukupna tropodražajna vrijednost za referentno bijelo iznosi $m=3$

Kolorimetrija

- nepoznata boja C može biti više zasićena od boje koju možemo dobiti miješanjem R*, G* i B* u kolorimetru
- u tom slučaju boju C osvjetlimo komplementarnim svjetлом
- jedan od primara prebacimo na stranu nepoznate boje (npr. RR*)
 - dodavanjem RR* boji C, boja C postaje manje zasićena te ju možemo izjednačiti s mješavinom preostalih komponenti
- tada vrijedi slijedeće:
$$\mathbf{C + R \cdot R^* = G \cdot G^* + B \cdot B^*}$$
$$\mathbf{C = G \cdot G^* + B \cdot B^* - R \cdot R^*}$$
- uvodi se pojam negativne količine boje

Kolorimetrija



Kolorimetrija

- jedinična jednadžba
 - nepoznata boja određena je preko tri parametra
 - ako želimo geometrijski prikazivati boje moramo koristiti prostorni koordinatni sustav
 - ako boje želimo prikazivati u dvodimenzijskom koordinatnom sustavu, nužno je trojne vrijednosti reducirati na dvije nezavisne veličine

$$C = m \cdot C^* = R \cdot R^* + G \cdot G^* + B \cdot B^* \quad / \quad m = R + G + B$$

$$1 \cdot C^* = \frac{R}{m} R^* + \frac{G}{m} G^* + \frac{B}{m} B^*$$

Kolorimetrija

- uvodimo oznake:

$$r = \frac{R}{m} = \frac{R}{R + G + B}$$

$$g = \frac{G}{m} = \frac{G}{R + G + B}$$

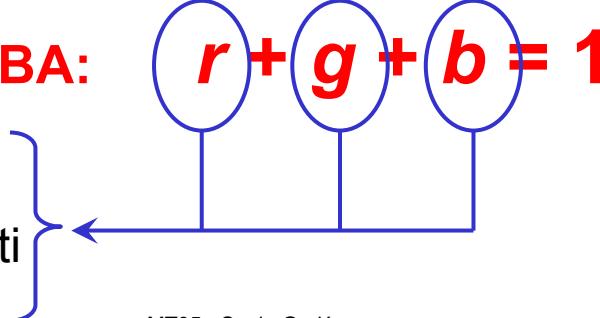
$$b = \frac{B}{m} = \frac{B}{R + G + B}$$

- sada slijedi:

$$1 \cdot C^* = r \cdot R^* + g \cdot G^* + b \cdot B^*$$

JEDINIČNA JEDNADŽBA: $r + g + b = 1$

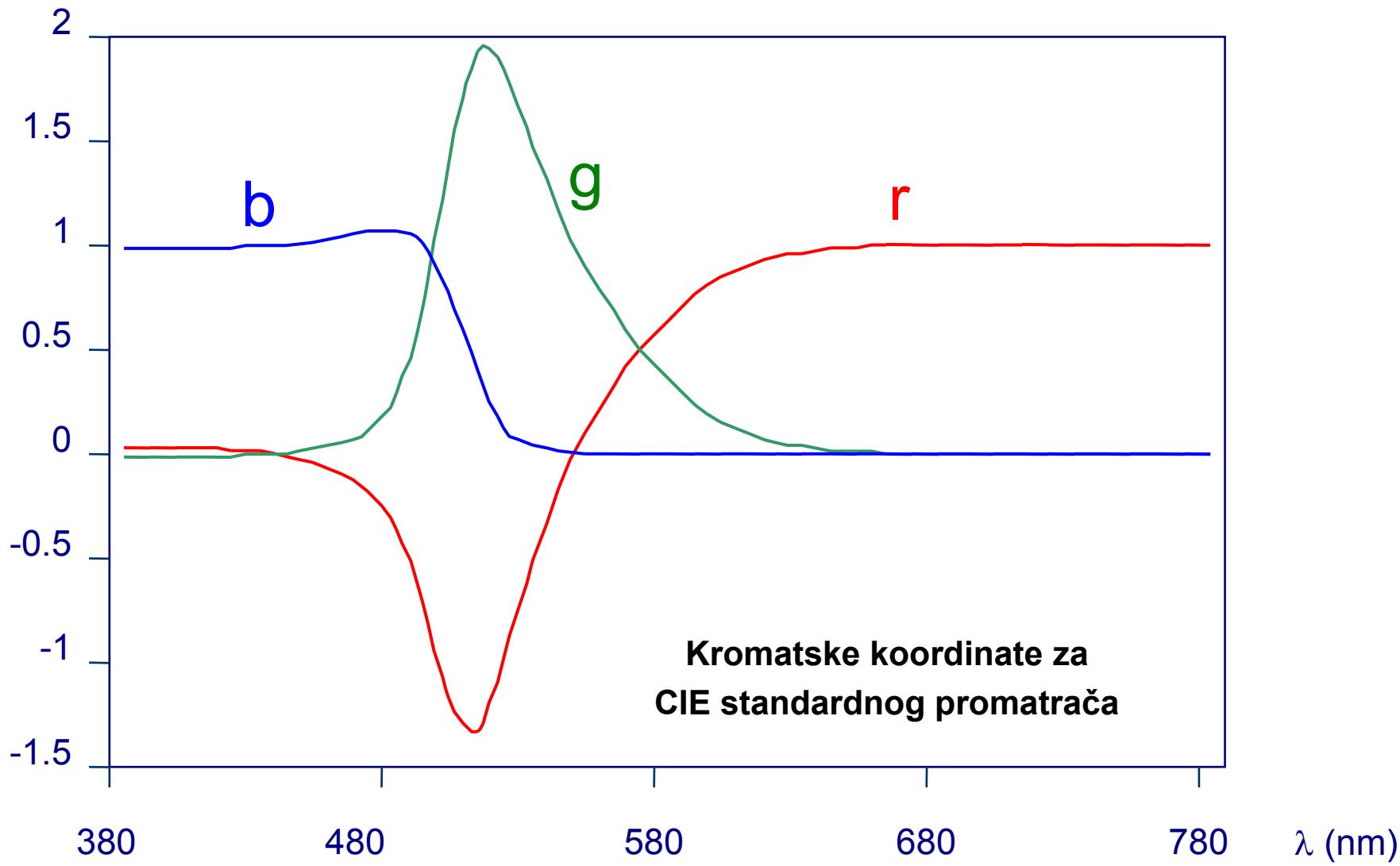
kromatske koordinate
ili trikromatski koeficijenti



Kolorimetrija

- u CIE eksperimentu iz 1931. godine kao nepoznate boje Corabile su se monokromatske spektralne boje
 - monokromatske spektralne boje nastaju podjelom spektra bijele svjetlosti na uske intervale valnih duljina (5 nm ili 10 nm)
 - svaki interval predstavlja jednu monokromatsku spektralnu boju
 - spektralne boje su maksimalno zasićene boje
 - ukoliko se eksperimentalno odrede vrijednosti R, G i B za spektralne boje, za ostale boje mogu se odrediti proračunima
- za svaku spektralnu boju eksperimentom se odrede R, G i B
 - iz R, G i B izračunaju se r , g i b
 - r , g i b se prikazuju u obliku tablica ili grafički
 - u području zelenoplavog izjednačenje se ne može postići s pozitivnim količinama primara R^* , G^* i B^* (r ima područje s negativnim vrijednostima)

Kolorimetrija



Kolorimetrija

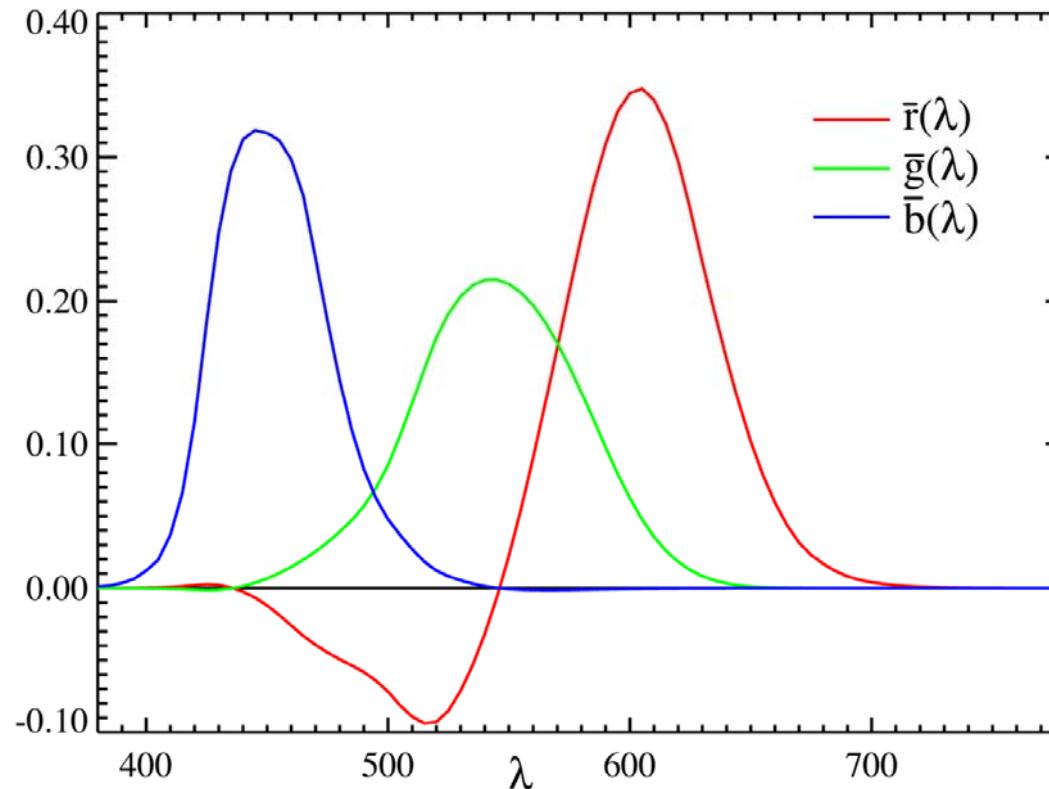
- spektralna boja C_λ koja ima izračenu snagu $P=1W$, označava se s: \overline{C}_λ
- R, G i B koordinate takve boje nazivaju se distribucijski koeficijenti i označavaju s: \overline{r} , \overline{g} i \overline{b}
- tada vrijedi

$$\overline{C}_\lambda = \overline{r} \cdot R^* + \overline{g} \cdot G^* + \overline{b} \cdot B^*$$

$$\overline{r} + \overline{g} + \overline{b} \neq 1$$

Kolorimetrija

- distribucijski koeficijenti određuju krivulje miješanja boja
 - proračunavaju se iz kromatskih koordinata
 - površine ispod krivulja su jednake



Kolorimetrija

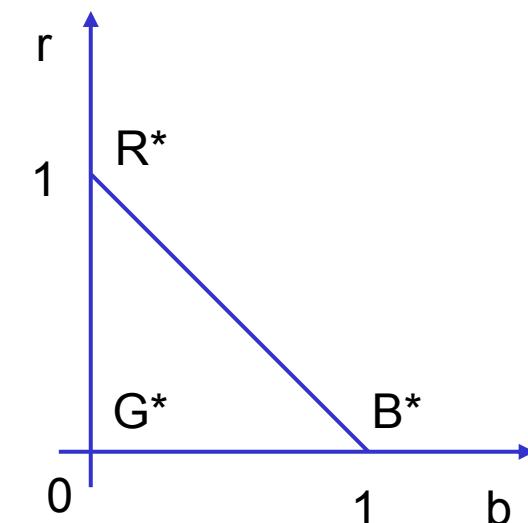
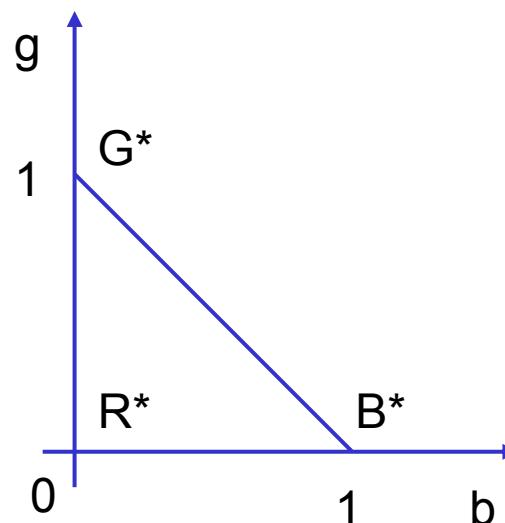
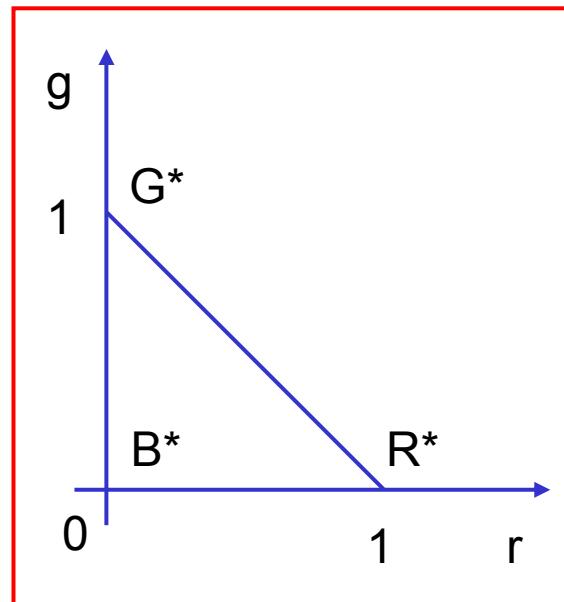
- tablica s kromatskim koordinatama i distribucijskim koeficijentima za CIE standardnog promatrača iz 1931. godine u RGB sustavu

CIE 1931 Standard Observer and *RGB* Coordinate Systems

Trichromatic coefficients			λ , nm	Distribution coefficients (equal-energy stimulus)		
r	g	b		\bar{r}	\bar{g}	\bar{b}
0.0272	-0.0115	0.9843	380	0.00003	-0.00001	0.00117
0.0263	-0.0114	0.9851	390	0.00010	-0.00004	0.00359
0.0247	-0.0112	0.9865	400	0.00030	-0.00014	0.01214
0.0225	-0.0109	0.9884	410	0.00084	-0.00041	0.03707
0.0181	-0.0094	0.9913	420	0.00211	-0.00110	0.11541
0.0088	-0.0048	0.9960	430	0.00218	-0.00119	0.24769
-0.0084	-0.0048	1.0036	440	-0.00261	0.00149	0.31228
-0.0390	0.0218	1.0172	450	-0.01213	0.00678	0.31670
-0.0909	0.0517	1.0392	460	-0.02608	0.01485	0.29821
-0.1821	0.1175	1.0646	470	-0.03933	0.02538	0.22991
-0.3667	0.2906	1.0761	480	-0.04939	0.03914	0.14494
-0.7150	0.6996	1.0154	490	-0.05814	0.05689	0.08257
-1.1685	1.3905	0.7780	500	-0.07173	0.08536	0.04776
-1.3371	1.9318	0.4053	510	-0.08901	0.12860	0.02698
-0.9830	1.8534	0.4296	520	0.09264	0.17468	0.01221
-0.5159	1.4761	0.0398	530	-0.07101	0.20317	0.00549
-0.1707	1.1628	0.0079	540	-0.03152	0.21466	0.00146
0.0974	0.9051	-0.0025	550	0.02279	0.21178	-0.00058
0.3164	0.6881	-0.0045	560	0.09060	0.49702	-0.00130
0.4973	0.5067	-0.0040	570	0.16768	0.17087	-0.00135
0.6449	0.3579	-0.0028	580	0.24526	0.13610	-0.00108
0.7617	0.2402	-0.0019	590	0.30928	0.09754	-0.00079
0.8475	0.1537	-0.0012	600	0.34429	0.06246	-0.00049
0.9059	0.0949	-0.0008	610	0.33971	0.03557	-0.00030
0.9425	0.0580	-0.0005	620	0.29708	0.01828	-0.00015
0.9649	0.0354	-0.0003	630	0.22677	0.00833	-0.00008
0.9797	0.0205	-0.0002	640	0.15968	0.00334	-0.00003
0.9888	0.0113	-0.0001	650	0.10167	0.00116	-0.00001
0.9940	0.0061	-0.0001	660	0.05932	0.00037	0.00000
0.9966	0.0035	0.0001	670	0.03149	0.00011	0.00000
0.9984	0.0016	0.0000	680	0.01687	0.00003	0.00000
0.9996	0.0004	0.0000	690	0.00819	0.00000	0.00000
1.0000	0.0000	0.0000	700	0.00410	0.00000	0.00000
1.0000	0.0000	0.0000	710	0.00210	0.00000	0.00000
1.0000	0.0000	0.0000	720	0.00105	0.00000	0.00000
1.0000	0.0000	0.0000	730	0.00052	0.00000	0.00000
1.0000	0.0000	0.0000	740	0.00025	0.00000	0.00000
1.0000	0.0000	0.0000	750	0.00012	0.00000	0.00000
1.0000	0.0000	0.0000	760	0.00006	0.00000	0.00000
1.0000	0.0000	0.0000	770	0.00003	0.00000	0.00000
1.0000	0.0000	0.0000	780	0.00000	0.00000	0.00000
Algebraic sum				1.89088	1.89107	1.88942

Kolorimetrija

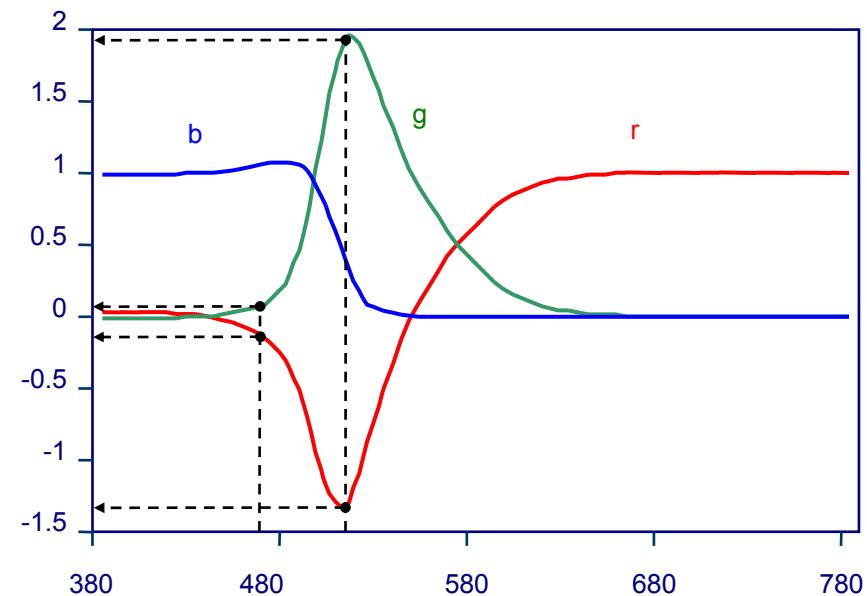
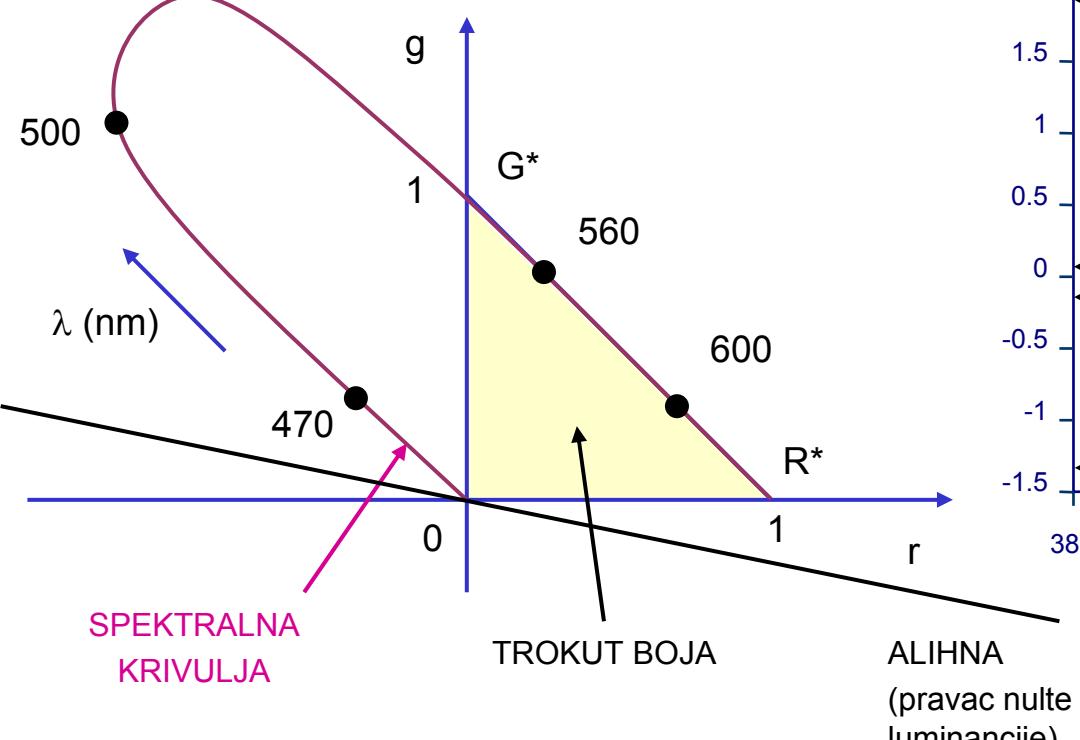
- s obzirom da vrijedi $r + g + b = 1$ dovoljno je znati dvije kromatske koordinate da bi odredili treću
- stoga postoje tri moguća pojednostavljena prikaza (rg prikaz se najčešće rabi)



Kolorimetrija

Spektralna krivulja

- kromatske koordinate za spektralne boje prikazane u rg-dijagramu kromatičnosti



Kolorimetrija

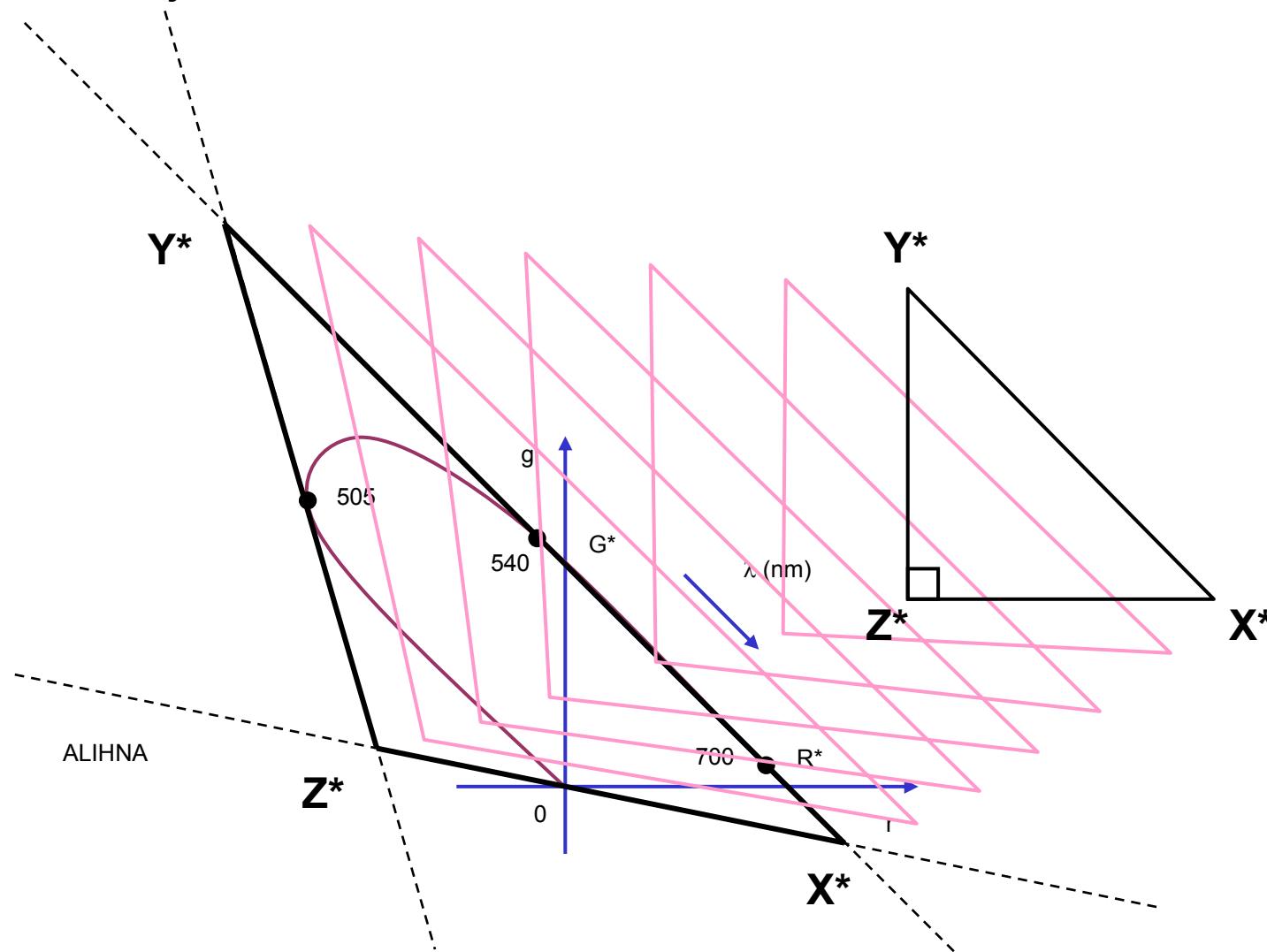
- loša strana RGB sustava za prikaz boja je ta da kromatske koordinate r , g i b imaju negativne vrijednosti, što proračune čini složenima
 - spektralna krivulja izlazi izvan trokuta boja
 - vrhovi trokuta boja određeni su jediničnim količinama primarnih boja (R^*, G^*, B^*)
 - boje koje se nalaze unutar trokuta boja mogu se prikazati pozitivnim količinama primara
- RGB sustav se transformira u XYZ sustav
 - X , Y , Z - nefizički (nepostojeći) primari (matematička apstrakcija koja olakšava proračune)
 - r , g i b kromatske koordinate transformiraju se u x , y i z kromatske koordinate
- svojstva XYZ sustava
 - spektralna krivulja leži unutar XYZ trokuta boja (sve boje mogu se prikazati pozitivnim količinama primara XYZ)
 - vrijede isti odnosi kao i u RGB sustavu:

$$C = m \cdot C^* = X \cdot X^* + Y \cdot Y^* + Z \cdot Z^* \quad m = X + Y + Z$$

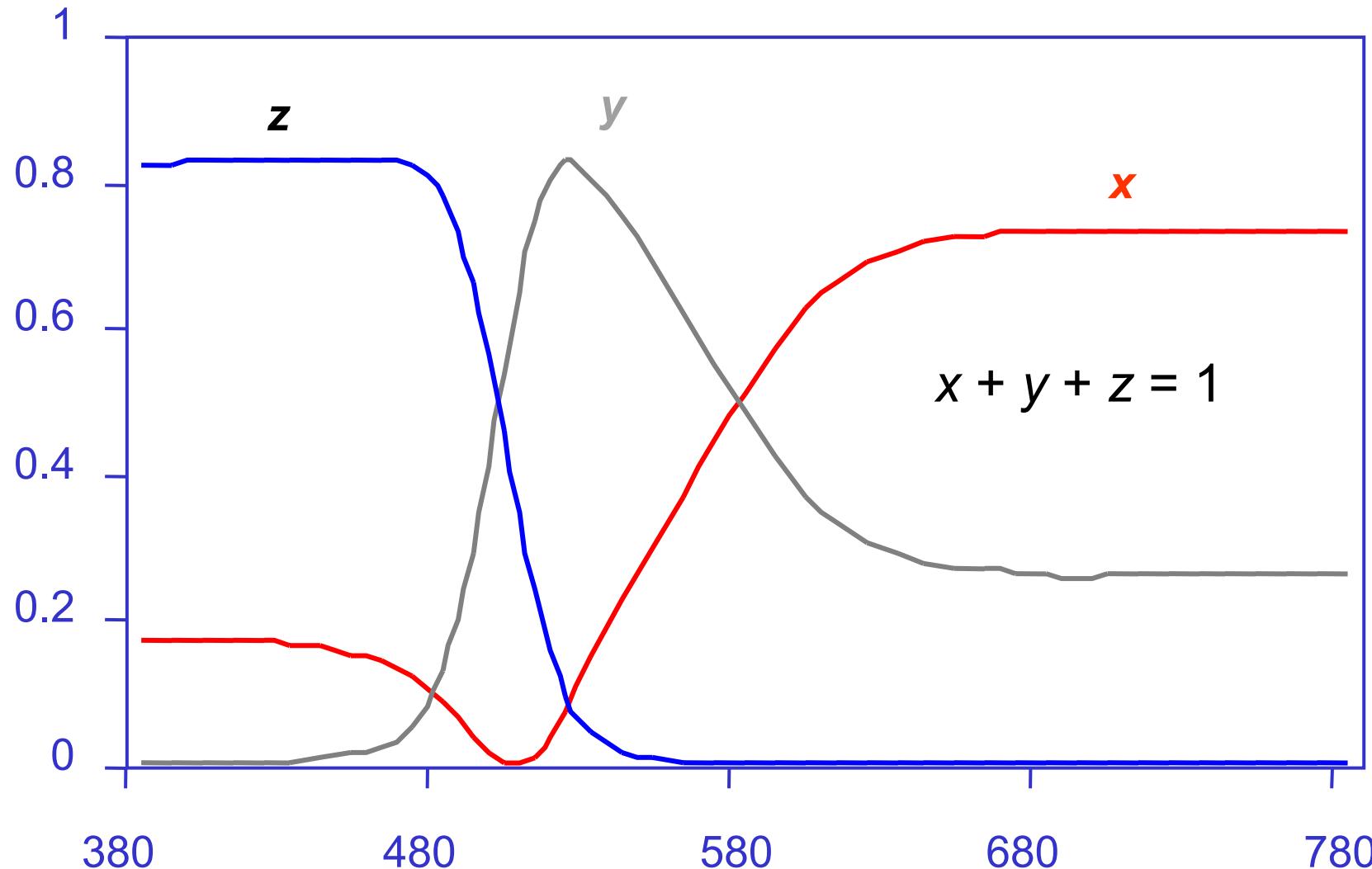
$$C^* = x \cdot X^* + y \cdot Y^* + z \cdot Z^* \quad x + y + z = 1$$

Kolorimetrija

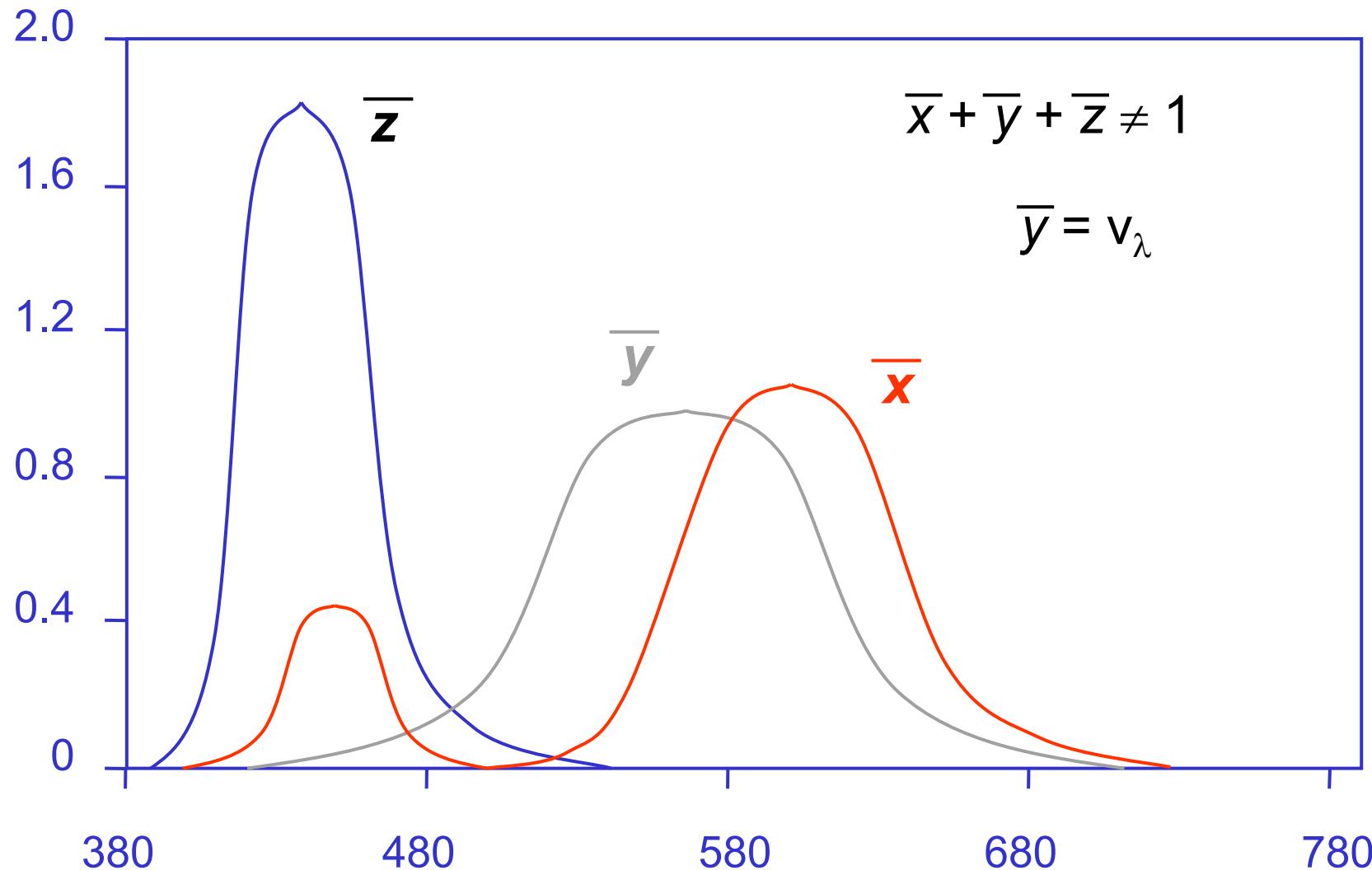
- konstrukcija XYZ sustava



Kolorimetrija



Kolorimetrija



Kolorimetrija

- tablica s kromatskim koordinatama i distribucijskim koeficijentima za CIE standardnog promatrača iz 1931. godine u XYZ sustavu

x	y	z	λ, nm	\bar{x}	\bar{y}	\bar{z}
0.1741	0.0050	0.8209	380	0.0014	0.0000	0.0065
0.1738	0.0049	0.8213	390	0.0042	0.0001	0.0201
0.1733	0.0048	0.8219	400	0.0143	0.0004	0.0679
0.1726	0.0048	0.8226	410	0.0435	0.0012	0.2074
0.1714	0.0051	0.8235	420	0.1344	0.0040	0.6456
0.1689	0.0069	0.8242	430	0.2839	0.0116	1.3856
0.1644	0.0109	0.8247	440	0.3483	0.0230	1.7471
0.1566	0.0177	0.8257	450	0.3362	0.0380	1.7724
0.1440	0.0297	0.8263	460	0.2908	0.0600	1.6692
0.1241	0.0578	0.8181	470	0.1954	0.0910	1.2876
0.0913	0.1327	0.7760	480	0.0956	0.1390	0.8130
0.0454	0.2950	0.6596	490	0.0320	0.2080	0.4652
0.0082	0.5384	0.4534	500	0.0049	0.3230	0.2720
0.0139	0.7502	0.2359	510	0.0093	0.5030	0.1582
0.0743	0.8338	0.0919	520	0.0633	0.7100	0.0782
0.1547	0.8059	0.0394	530	0.1655	0.8620	0.0422
0.2296	0.7543	0.0161	540	0.2904	0.9540	0.0203
0.3016	0.6923	0.0061	550	0.4334	0.9950	0.0087
0.3731	0.6245	0.0024	560	0.5945	0.9950	0.0039
0.4441	0.5547	0.0012	570	0.7621	0.9520	0.0021
0.5125	0.4866	0.0009	580	0.9163	0.8700	0.0017
0.5752	0.4242	0.0006	590	1.0263	0.7570	0.0011
0.6270	0.3725	0.0005	600	1.0622	0.6310	0.0008
0.6658	0.3340	0.0002	610	1.0026	0.5030	0.0003
0.6915	0.3083	0.0002	620	0.8544	0.3810	0.0002
0.7079	0.2920	0.0001	630	0.6424	0.2650	0.0000
0.7190	0.2809	0.0001	640	0.4479	0.1750	0.0000
0.7260	0.2740	0.0000	650	0.2835	0.1070	0.0000
0.7300	0.2700	0.0000	660	0.1649	0.0610	0.0000
0.7320	0.2680	0.0000	670	0.0874	0.0320	0.0000
0.7334	0.2666	0.0000	680	0.0468	0.0170	0.0000
0.7344	0.2656	0.0000	690	0.0227	0.0082	0.0000
0.7347	0.2653	0.0000	700	0.0114	0.0041	0.0000
0.7347	0.2653	0.0000	710	0.0058	0.0021	0.0000
0.7347	0.2653	0.0000	720	0.0029	0.0010	0.0000
0.7347	0.2653	0.0000	730	0.0014	0.0005	0.0000
0.7347	0.2653	0.0000	740	0.0007	0.0003	0.0000
0.7347	0.2653	0.0000	750	0.0003	0.0001	0.0000
0.7347	0.2653	0.0000	760	0.0002	0.0001	0.0000
0.7347	0.2653	0.0000	770	0.0001	0.0000	0.0000
0.7347	0.2653	0.0000	780	0.0000	0.0000	0.0000

Sum

10.6836

10.6857

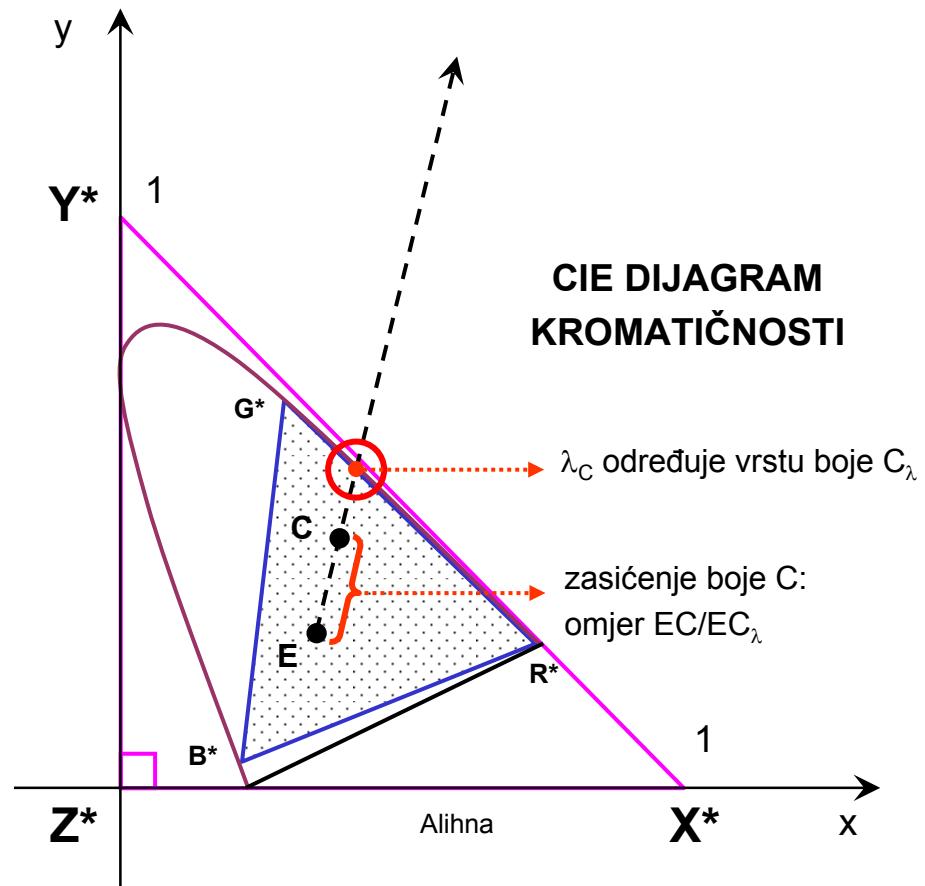
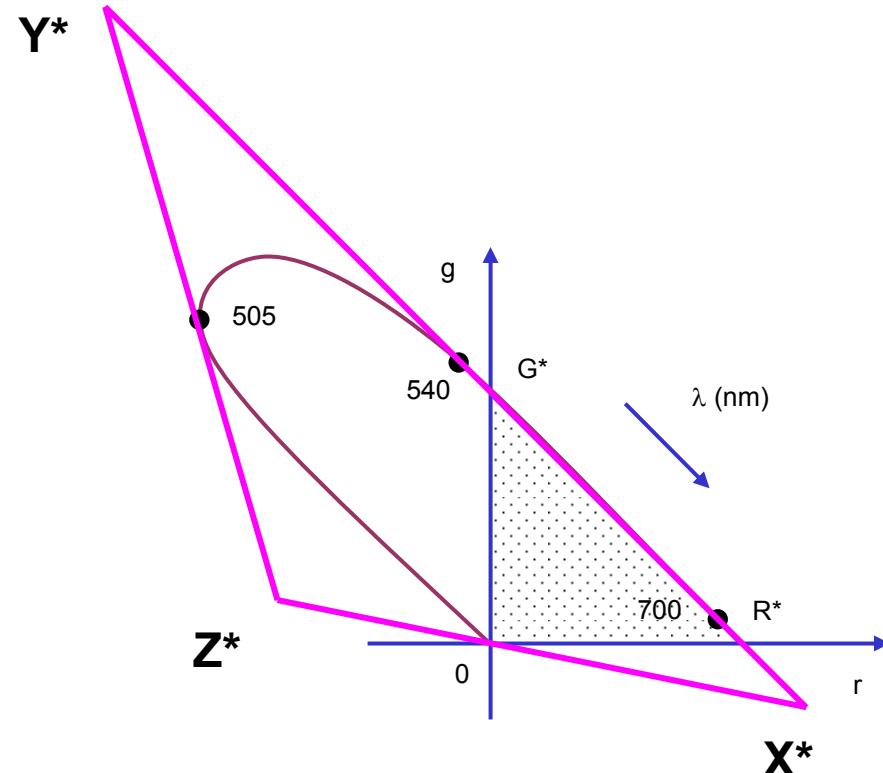
10.6770

© FER, ZRK

Kolorimetrija

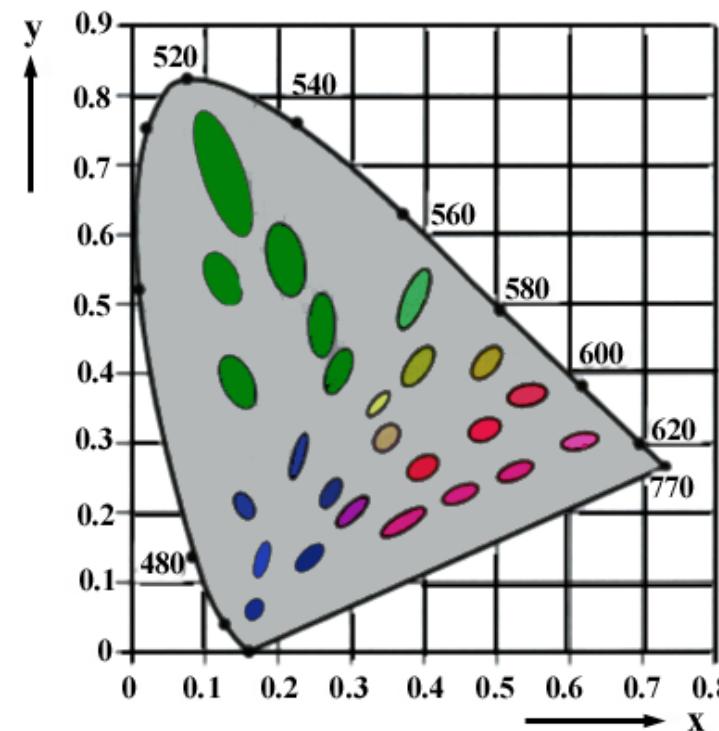
- CIE dijagram kromatičnosti dobiva se transformacijom rg-dijagrama kromatičnosti u xy-dijagram kromatičnosti u kome je XYZ trokut pravokutan
- potkovičasti dijagram naziv je za površinu omeđenu spektralnom krivuljom i ravnom linijom koja spaja rubove spektralne krivulje
- za nepoznatu boju C u potkovičastom dijagramu očitavaju se slijedeće vrijednosti:
 - **VRSTA (TON) BOJE**
 - određuje se tako da povučemo polupravac od točke referentnog bijelog (E) kroz nepoznatu boju (C)
 - na mjestu gdje polupravac siječe spektralnu krivulju očitavamo valnu duljinu λ_C pa time i vrstu boje C_λ
 - **ZASIĆENJE BOJE**
 - ovisi o duljini dužine EC
 - što je ta duljina veća, to je i zasićenje veće, odnosno, što je nepoznata boja bliže spektralnoj krivulji, to je njezino zasićenje veće

Kolorimetrija



Kolorimetrija

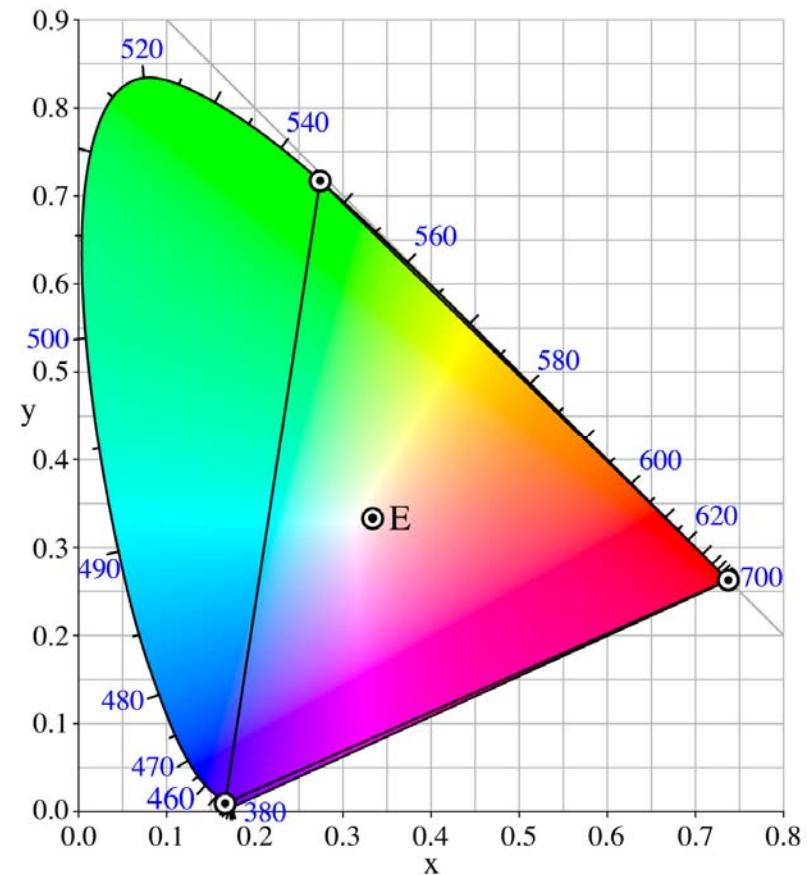
- nedostaci prikaza boja u CIE dijagramu kromatičnosti
 - percepcijska neujednačenost
 - površine istog doživljaja boje nisu jednake u svim dijelovima dijagrama (najveće su u području zelene boje, a najmanje u području plave)
 - dominantne valne duljine su nejednoliko raspoređene po obodu dijagrama



Kolorimetrija

RGB trokut boja u CIE dijagramu kromatičnosti

	x	y	z
R*	0,73	0,27	0
G*	0,27	0,72	0,01
B*	0,16	0,01	0,83

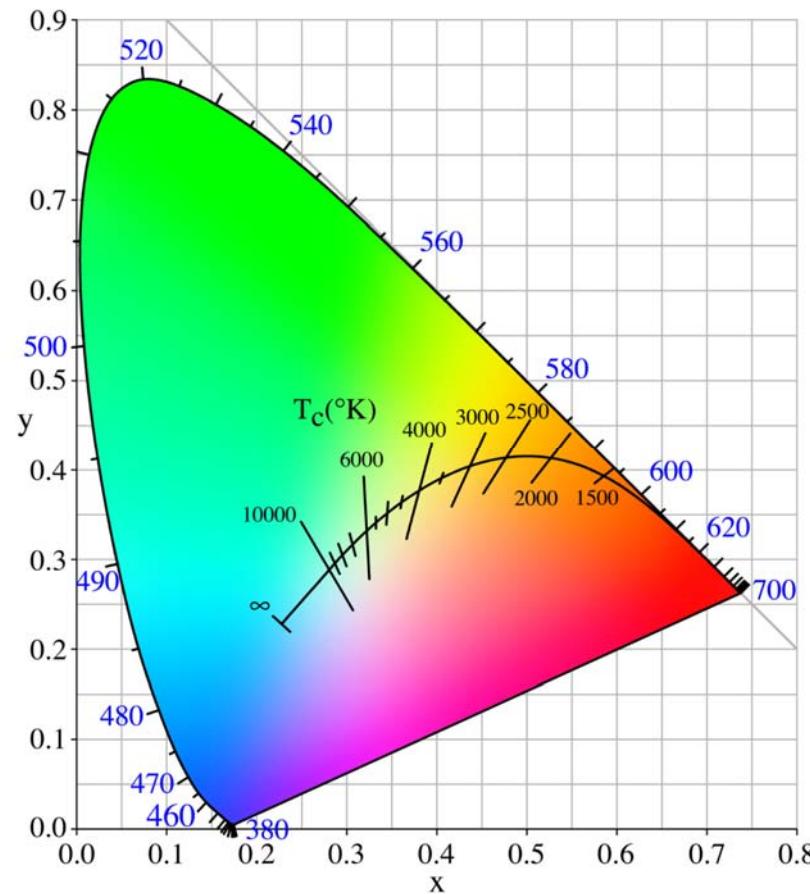


Kolorimetrija

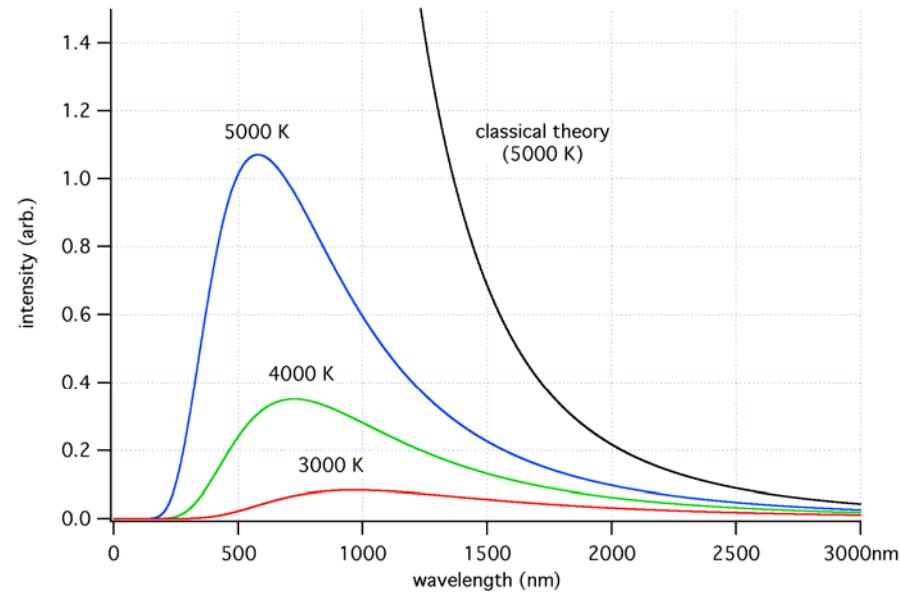
- sve veličine ovise o definiciji referentnog bijelog
- referentno bijelo se proizvodi uz standardne rasvjete tipa: E, A, B, C, D
 - standardne rasvjete se definiraju preko temperature boje
 - temperatura crnog tijela u K koje zagrijano na tu temperaturu daje određenu kromatičnost
 - boja koja nastaje zračenjem crnog tijela u području vidljive svjetlosti opisuje se preko kromatskih koordinata koje se mogu ucrtati u dijagram kromatičnosti
 - kromatske koordinate boja koje nastaju kao rezultat zračenja crnog tijela na različitim temperaturama leže na krivulji koja se naziva Planckova krivulja
 - spektralna raspodjela snage zračenja crnog tijela pri određenoj temperaturi mijenja se promjenom valne duljine u području vidljive svjetlosti

Kolorimetrija

- Planckova krivulja

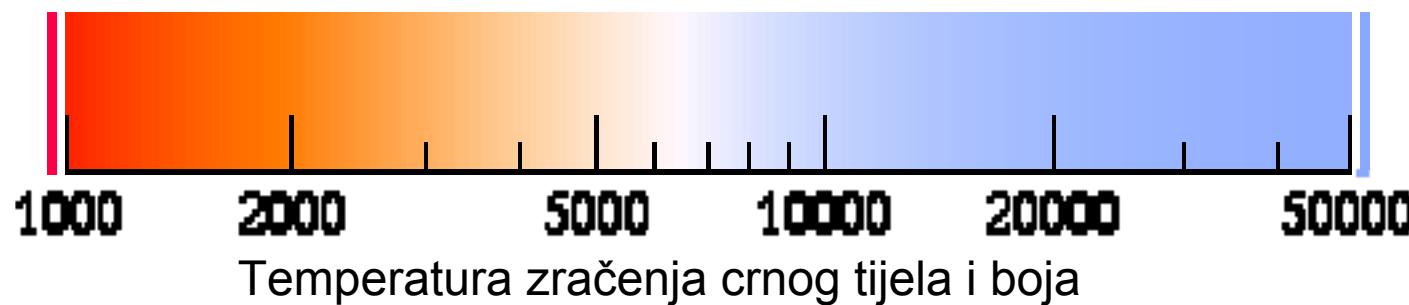


- Spektralna raspodjela snage zračenja crnog tijela



Kolorimetrija

- primjeri izvora svjetlosti s različitim temperaturama boje
 - 1700 K: šibica
 - 1850 K: svijeća
 - 2800 K: žarulja
 - 3400 K: studijska rasvjeta
 - 4100 K: mjesecina
 - 5000 K: danje svjetlo
 - 5500 K: danje svjetlo ljeti u podne
 - 6420 K: neonska rasvjeta



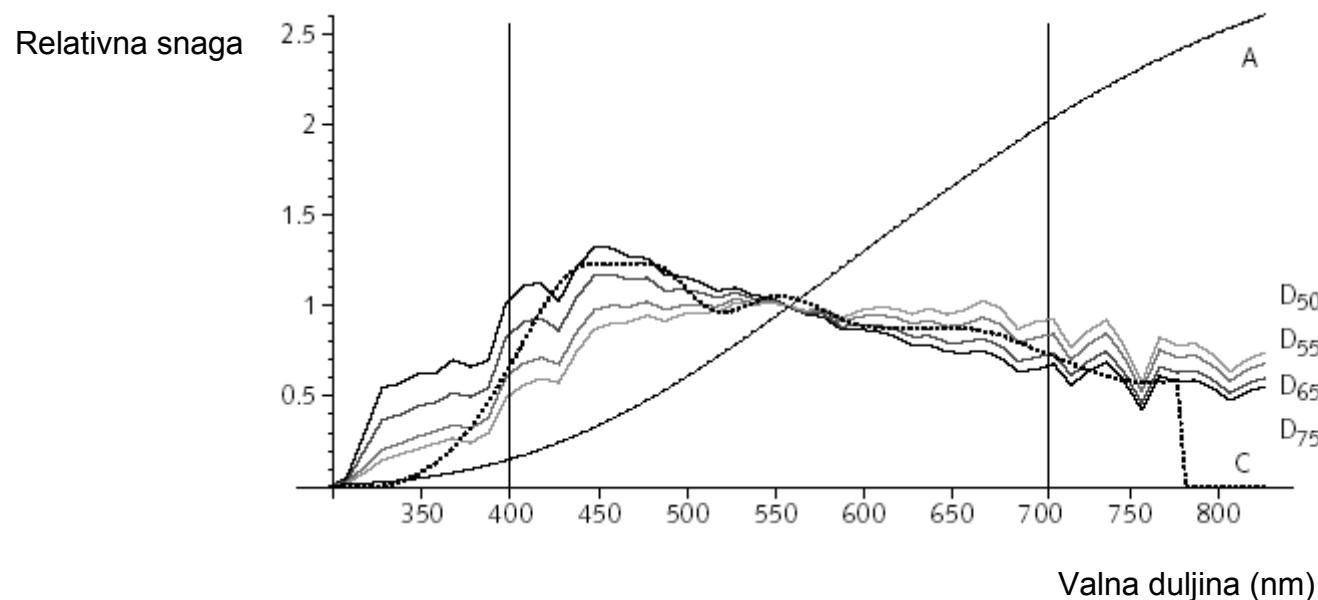
Kolorimetrija

- standardne rasvjete (*illuminant*)

Naziv	Temperatura boje [K]	CIE kromatske koordinate (1931.)	
		x_w	y_w
Illuminant A	2856	0,4757	0,40745
Illuminant B	4874	0,34842	0,35161
Illuminant C	6774	0,31006	0,31616
Illuminant D65	6504	0,3127	0,3291
Illuminant D65	6504	0,312713	0,329016
Direct Sunlight	5335	0,3362	0,3502
Light from overcast sky	6500	0,3134	0,3275
Light from north sky on a 45-degree plane	10000	0,2773	0,2934
Illuminant E	5400	1/3	1/3

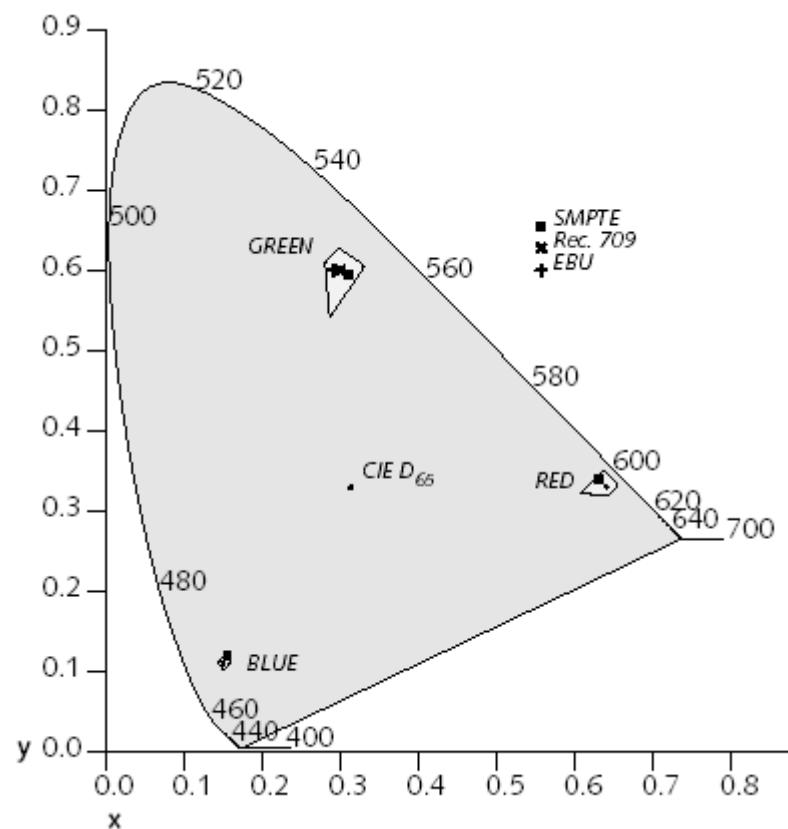
Kolorimetrija

- spektralna raspodjela zračenja CIE standardnih rasvjeta



Kolorimetrija

- primjer primjene dijagrama kromatičnosti
 - usporedba raspona boja koje mogu prikazati uređaji za prikazivanje slike s različito definiranim primarnim bojama



NTSC primari (bijelo-C)

R:	$x_r=0.67$	$y_r=0.33$
G:	$x_g=0.21$	$y_g=0.71$
B:	$x_b=0.14$	$y_b=0.08$

SMPTE primari (bijelo-D65)

R:	$x_r=0.630$	$y_r=0.340$
G:	$x_g=0.310$	$y_g=0.595$
B:	$x_b=0.155$	$y_b=0.070$

EBU primari (bijelo-D65)

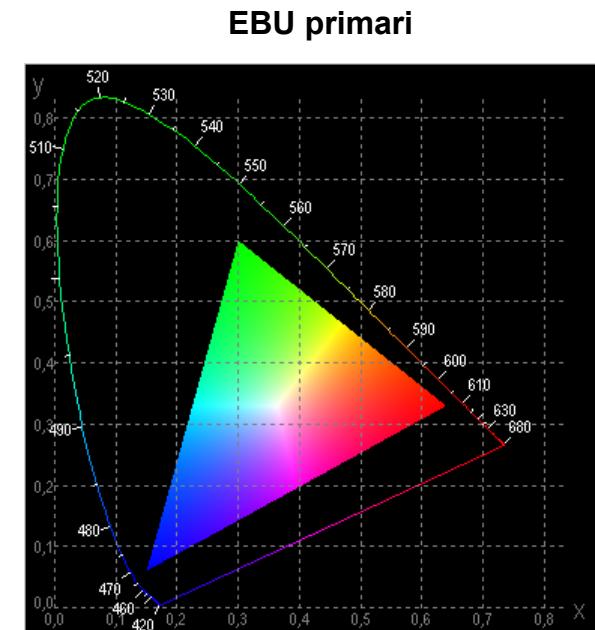
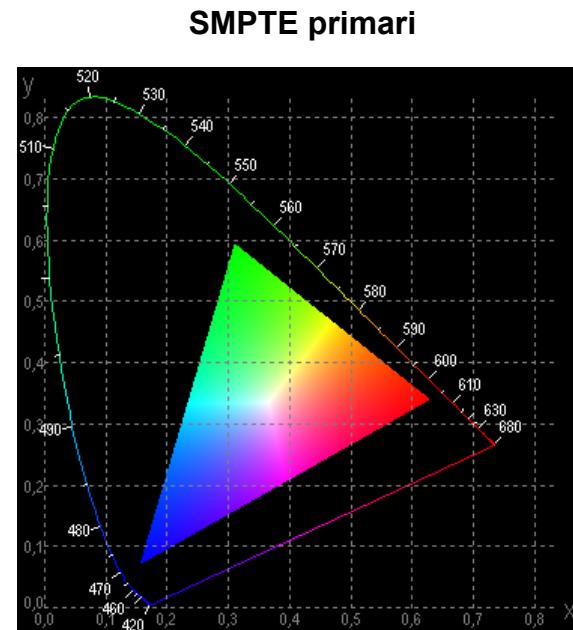
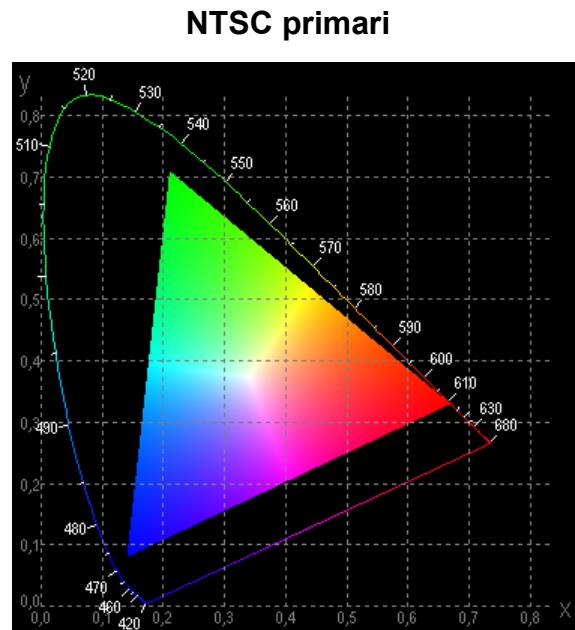
R:	$x_r=0.64$	$y_r=0.33$
G:	$x_g=0.29$	$y_g=0.60$
B:	$x_b=0.15$	$y_b=0.06$

ITU-R BT.709 primari (bijelo-D65)

R:	$x_r=0.64$	$y_r=0.33$
G:	$x_g=0.30$	$y_g=0.60$
B:	$x_b=0.15$	$y_b=0.06$

Kolorimetrija

- prikaz trokuta boja za različite vrste primara u dijagramu kromatičnosti
 - veća površina trokuta boja znači da je moguće prikazati veći broj boja

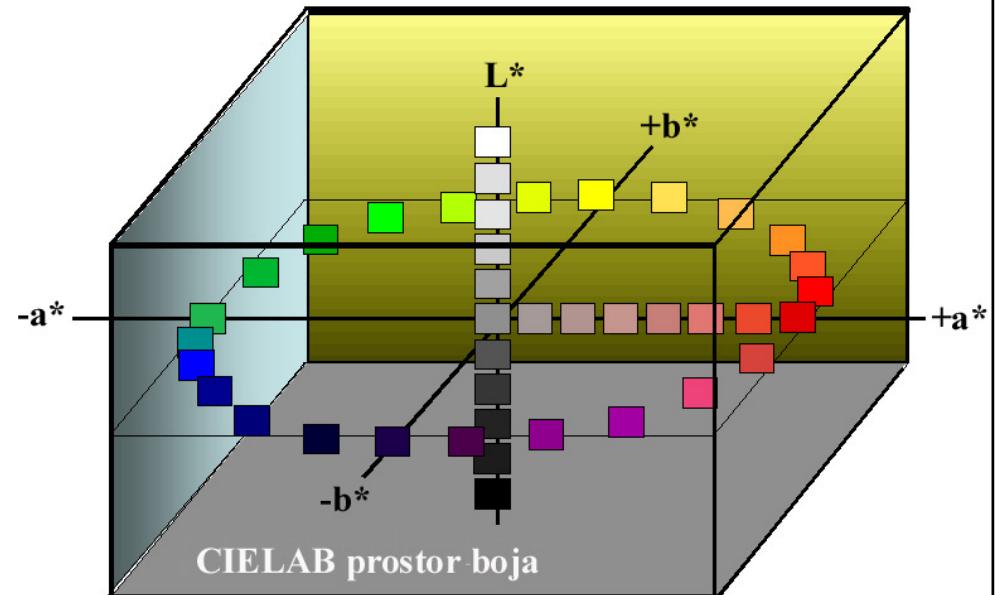


Kolorimetrija

- XYZ prostor boja nije percepcijski jednolik i nije izravno povezan s psihofizičkim doživljajem boje
- CIE XYZ sustav iz 1931. transformiran je 1976. godine u CIE L*a*b* (CIELAB) prostor boja
 - L*- relativna svjetlina (*lightness*) - mijenja se od 0 (crno) do 100 (bijelo)
 - a* - crveno-zelena os
 - b* - žuto-plava os
 - uzorci s $a^* = b^* = 0$ su akromatski
 - CIELAB prostor boja je sličan Munsellovom prostoru boja
- L*, a* i b* se određuju iz tropodražajnih vrijednosti XYZ
 - $L^* = 116(Y/Y_n)^{1/3} - 16$
 - $a^* = 500[(X/X_n)^{1/3} - (Y/Y_n)^{1/3}]$
 - $b^* = 200[(Y/Y_n)^{1/3} - (Z/Z_n)^{1/3}]$
 - X_n , Y_n i Z_n su tropodražajne vrijednosti referentnog bijelog

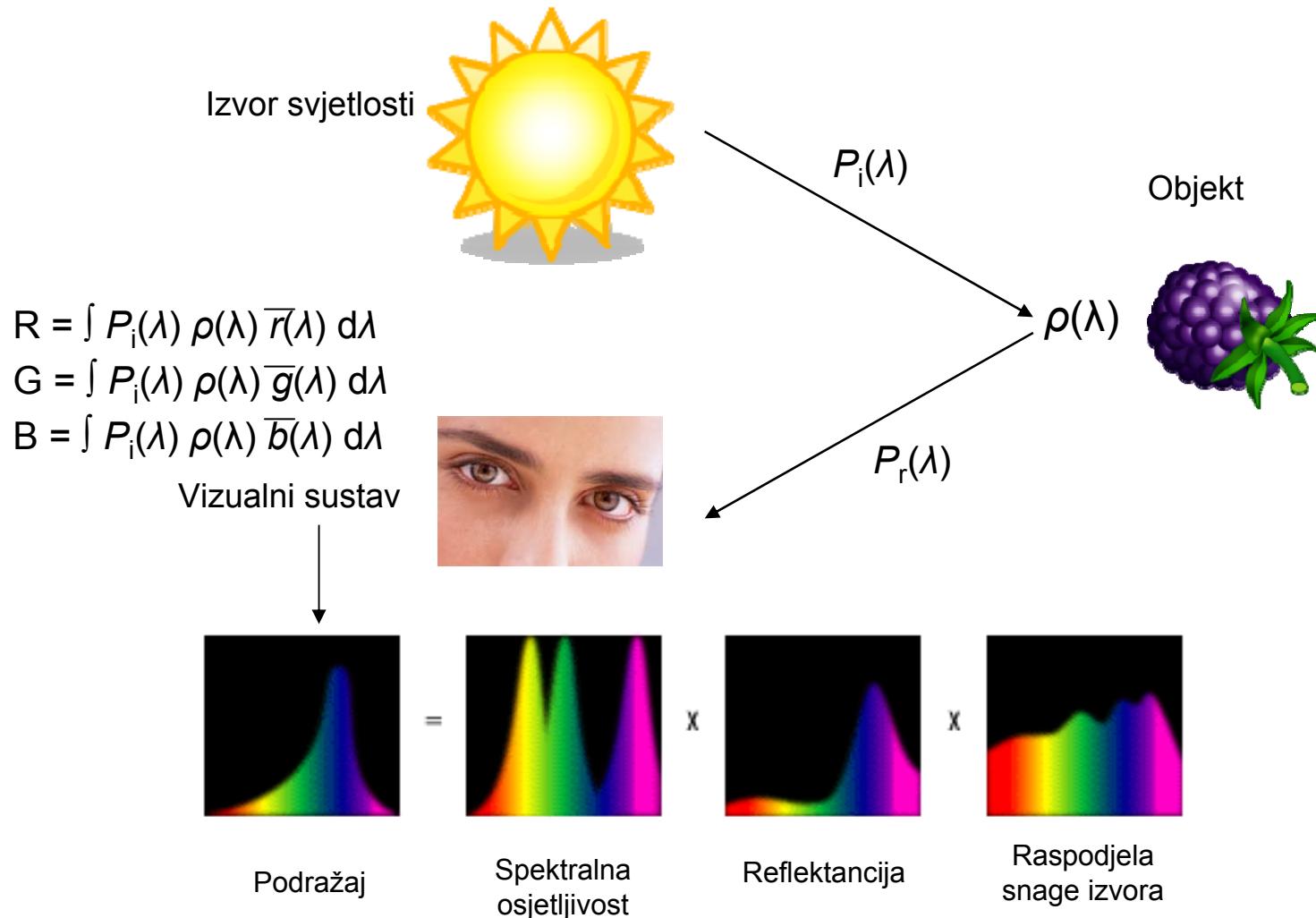
Kolorimetrija

- CIE L*a*b* prostor boja
 - relativna svjetlina se mijenja po vertikali
 - $L^*=0$ predstavlja crnu boju, a $L^*=100$ bijelu
 - zasićenje se povećava udaljavanjem boje od akromatske osi i približavanjem rubu prostora
- CIELAB prostor boja ima bolju vizualnu ujednačenost od CIE dijagrama kromatičnosti
 - geometrijska udaljenost između boja se bolje podudara sa kolorimetrijskim razlikama



Kolorimetrija

- doživljaj boje objekta



Kolorimetrija

- reflektancija objekta i doživljaj boje objekta
http://www.cs.rit.edu/~ncs/color/a_spectr.html
- položaj boja u dijagramu kromatičnosti
http://www.cs.rit.edu/~ncs/color/a_chroma.html
- izjednačenje boja
http://www.cs.rit.edu/~ncs/color/a_game.html