

Računarska grafika
(2OER7O02)

Boje u računarskoj grafici

Predavanja



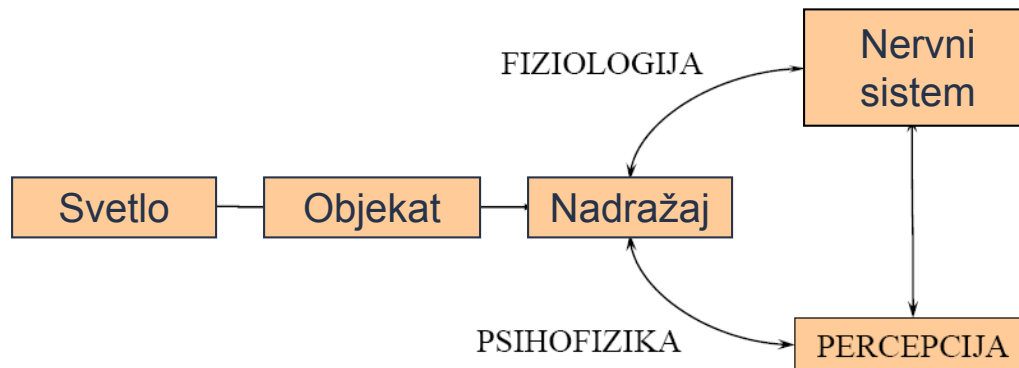
Boje

- Formiranje prikaza u boji je integralni deo savremene računarske grafike. Boja je vrlo složen koncept koji objedinjuje **fiziku**, **fiziologiju**, **psihologiju**, **umetnost** i **grafički dizajn**.
- Boja objekta ne zavisi samo od tog objekta već i od izvora svetlosti kojom se obasjava, boje okruženja, i konačno od čovekovog čula vida. Takođe, objekti mogu da reflektuju svetlost, ili ga propuštaju (staklo), a neki emituju. Sve ovo utiče na to kako mi doživljavamo boju.



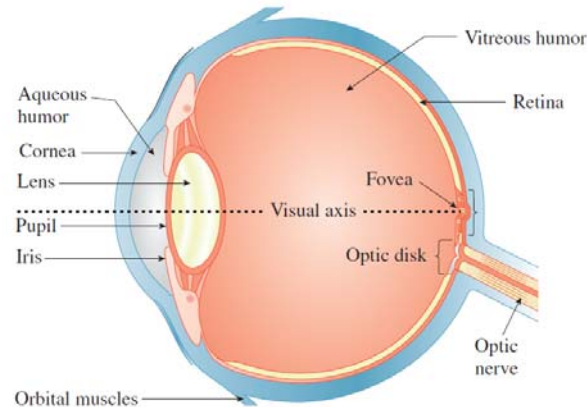
Boja - definicija

- **Boja** je osećaj koji se stvara kada se svetlost detektovana pomoću **mrežnjače (retine)** u oku interpretira u mozgu.
- Osećaj boje je biološki osećaj.



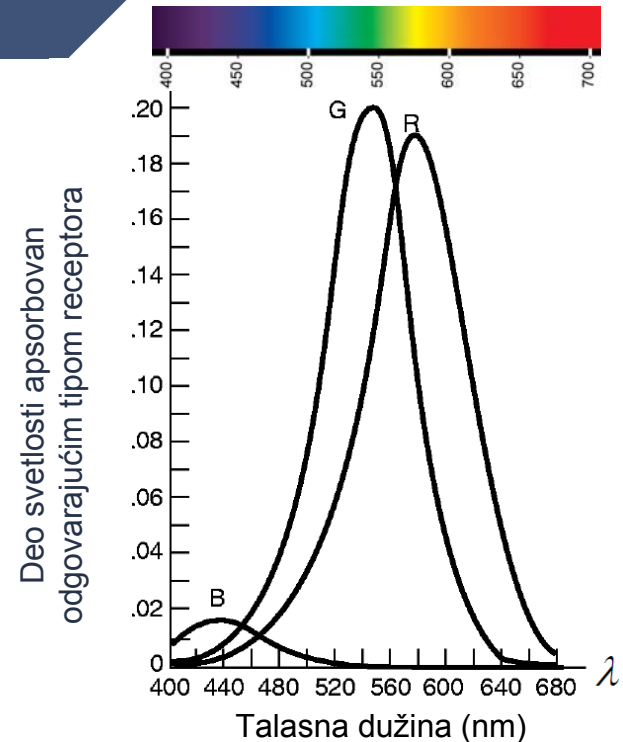
Oko

- Svetlost ulazi u oko kroz zenicu, prolazi kroz sočivo i providno želatinozno tkivo (humor), i dolazi do mrežnjače (retine) gde se nalaze dve vrste fotoreceptora osetljivih na svetlost:
 - ▷ Štapići - 10 miliona
 - ▷ Čepići - 6.5 miliona



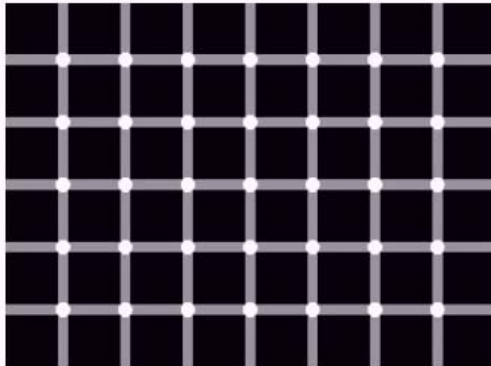
Teorija tri stimulusa

- Teorija **tri stimulusa** zasniva se na pretpostavci da na mrežnjači postoje tri tipa foto-receptora osjetljivih na boje (čepića), svaki sa maksimumom osjetljivosti u određenom delu spektra (plavom, zelenom i crvenom).
- Eksperimentima su dobijene funkcije spektralnog odziva (prikazane na slici), sa maksimuma na:
 - ▷ 440nm – za plavu boju,
 - ▷ 545nm – za zelenu boju i
 - ▷ 580nm – za crvenu boju.

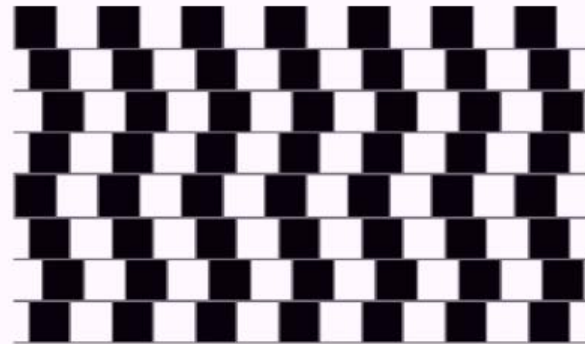


Nesavršenost oka

- Nedostatak jedne vrste čepića - **daltonizam**.
- Nesavršenost oka:



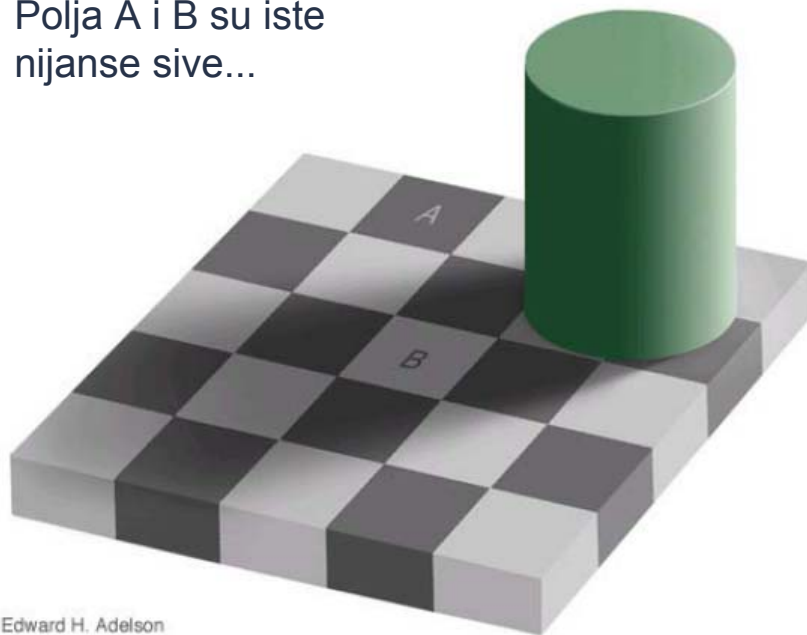
Koliko ima crnih tačaka?



Da li su linije paralelne?

Nesavršenost oka

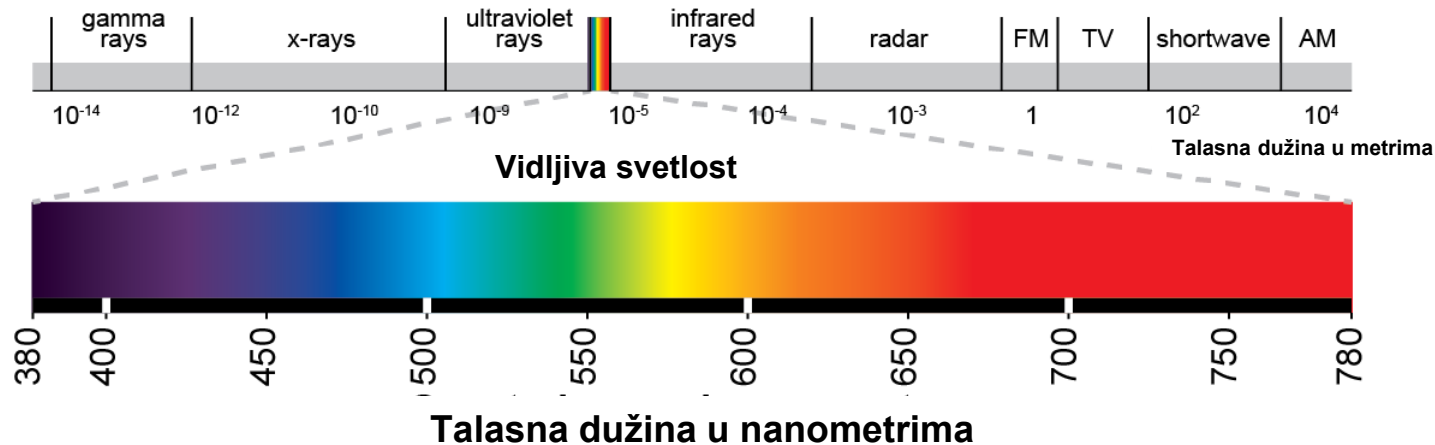
Polja A i B su iste
nijanse sive...



Edward H. Adelson

Svetlost

- Svetlost je elektromagnetno zračenje
- Vidljivi spektar je od 400 – 700 nm

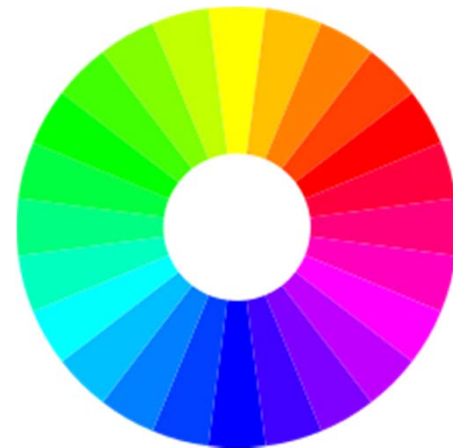


Svetlost

- Bezbojna (monohromatska)
- Obojena (hromatska)

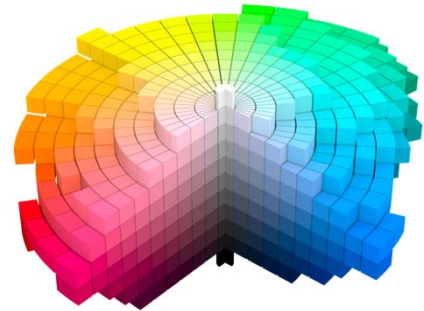
Percepcija boja

- Vizuelne senzacije uzrokovane obojenom svetlošću su mnogo bogatije nego one uzrokovane monohromatskom.
- Diskusija o percepciji boje obično uključuje sledeće veličine:
 1. Nijansa - **hue**
 2. Zasićenost - **saturation**
 3. Svetlinu - **lightness**
 4. Sjajnost – **brightness**
- **Nijansa (hue)** – stepen u kome stimulus može da se opiše kao sličan ili različit u odnosu na stimulse označene kao „jedinstvene nijanse“ (crvena, zelena, plava, žuta).

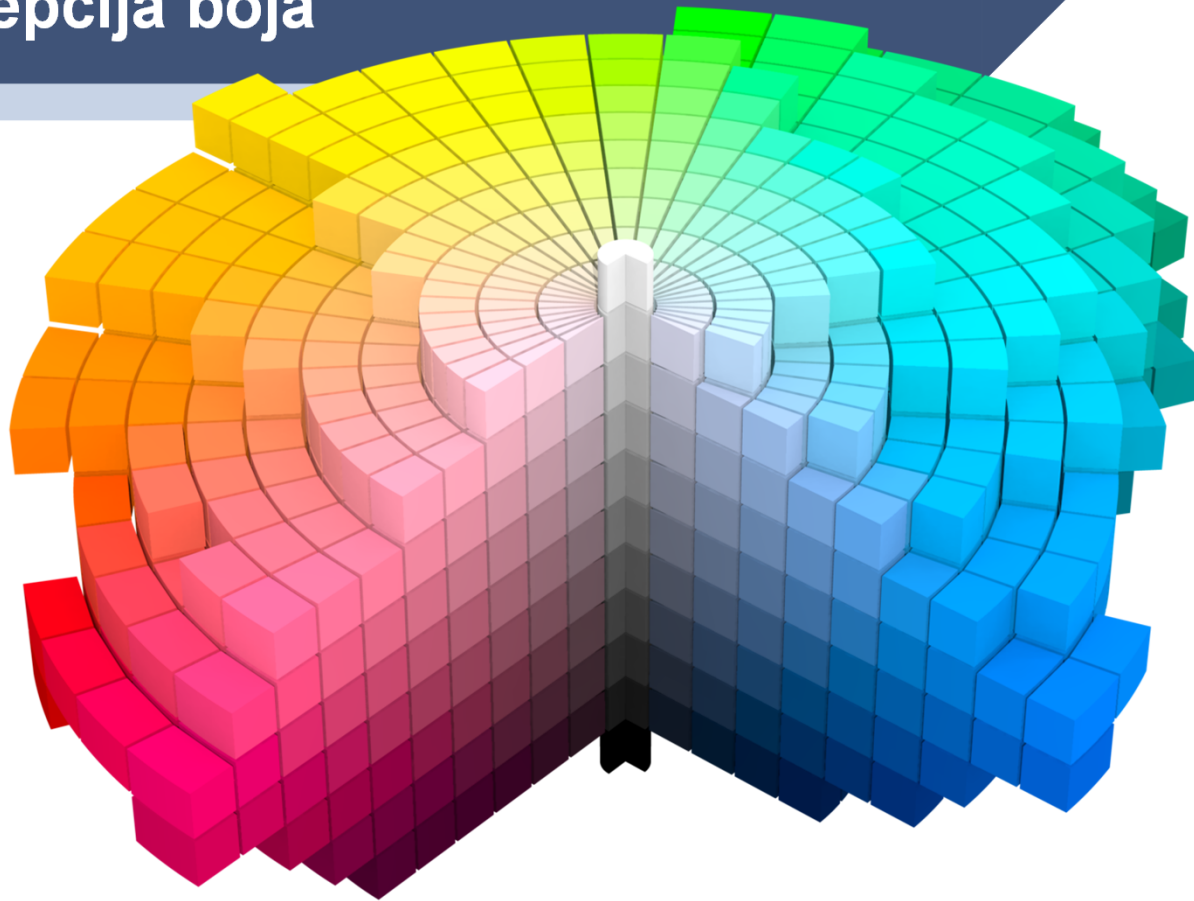


Percepcija boja

- **Zasićenost (saturation)** - koliko je boja daleko od sive istog intenziteta. (Crvena je visoko zasićena boja, a roze je relativno nezasićena. Sve pastelne boje su realativno nezasićene.)
- **Svetlina (lightness)** – Vizuelna percepcija osvetljenosti. (Nivo bele/crne boje u pigmentu ili nivo refleksije. Zavisí od modela boja, obično bela predstavlja maksimalnu svetlinu, crna minimalnu, a potpuno zasićena boja je na 0.5.)
- **Sjajnost (brightness)** - se koristi umesto svetline da bi se označio osećaj intenziteta vizuelne senzacije predmeta koji emituje svetlost. (Da li emituje više ili manje svetlosti.)



Percepcija boja

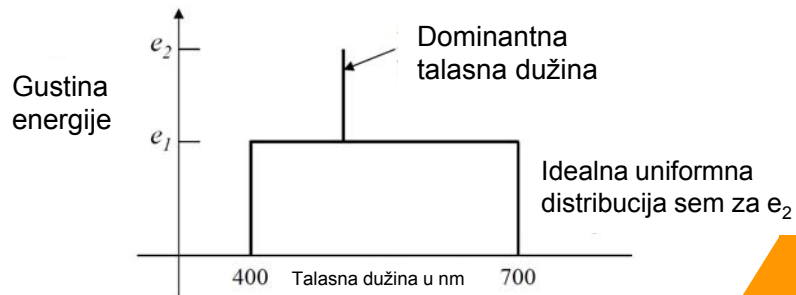


Merenje boja

- Postoje različite metode za definisanje (merenje) boja, kao npr:
 - ▷ **poređenje sa standardnim uzorcima** (predefinisane palete sa kojima se upoređuje tekuća boja pod istim (standardnim) osvetljenjem),
 - ▷ **mešanjem pigmenata** (standard u umetnosti):
 - ▷ čisti pigment (boja),
 - ▷ tint (dodavanje belog pigmenata),
 - ▷ senka (dodavanje crnog pigmenata),
 - ▷ ton (dodavanje i belog i crnog pigmenata)

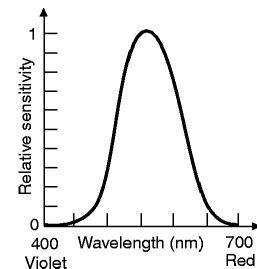
Merenje boja

- Prethodne metode su subjektivne (čovjek procenjuje), zavise od osvetljenja, veličine uzorka i boje okruženja.
- Potreban je objektivni i kvantitativni pristup u definisanju boja.
- Time se bavi grana fizike koja se naziva **kolorimetrija**, Ova disciplina se zasniva na sledećim ključnim pojmovima:
 1. **Dominantna talasna dužina**
 2. **Čistoća eksitacije**
 3. **Osvetljenost (*luminance*)**



Merenje boja

- **Dominantna talasna dužina** je talasna dužina boje koju vidimo kada gledamo u svetlo i odgovara percepciji **nijanse**.
- **Čistoća eksitacije** odgovara **zasićenju** boje. Čistoća eksitacije obojene svetlosti je proporcionalna čistoći svetla dominantne talasne dužine i belom svetlu potrebnom za definisanje konkretne boje. Ako je $e_1=e_2$, čistoća eksitacije je 0, a ako je $e_2=0$, onda je 100%.
- **Osvetljenost** je količina ili **intenzitet** svetlosti. Osvetljenost je integral proizvoda spektralne distribucije energije i funkcije svetlosne efikasnosti.
- Potpuno čista boja je 100% zasićena i stoga ne sadrži belu svetlost. Sve ostale boje koje imaju zasićenje između 0 i 100% imaju i belu komponentu svetlosti. Bela boja i sve nijanse sive su 100% nezasićene. Sive boje ne sadrže boju bilo koje dominantne talasne dužine.

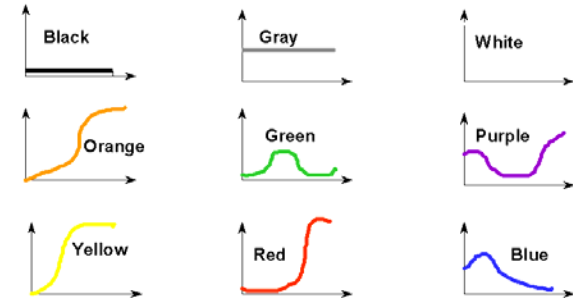


Funkcija svetlosne efikasnosti

Merenje boja

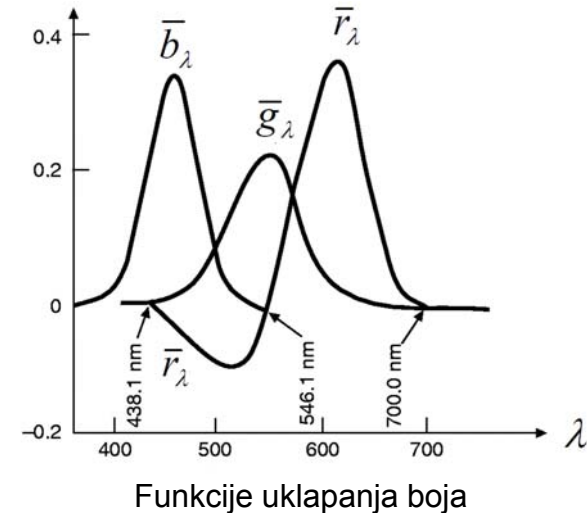
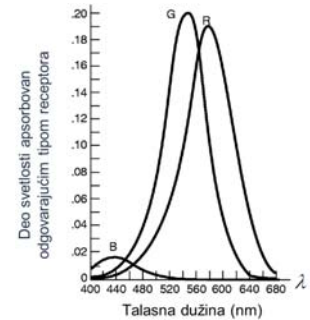
- Korespondencija između **perceptivnih** i **kolorimetrijskih** termina data je sa:

- ▷ Nijansa - Dominantna talasna dužina
- ▷ Zasićenje - Čistoća eksitacije
- ▷ Svetlina (reflektujući objekti) - Osvetljenost
- ▷ Sjajnost (svetleći objekti) - Osvetljenost



Kolorimetrija i teorija tri stimulusa

- Teorija tri stimulusa je vrlo intuitivna i odgovara ideji da se boje mogu dobiti kao pozitivna težinska suma tri komponente – crvene, zelene i plave (koje se često nazivaju **primarima**).
- Količina crvene, zelene i plave svetlosti potrebne da prosečan posmatrač prepozna boju konstantne osvetljenosti, za sve vrednosti dominantnih talasnih dužina u vidljivom delu spektra, prikazana je na slici desno.
- Postojanje negativnih vrednosti ukazuje na to da se sabiranjem „primara“ ne mogu dobiti sve boje.
- To ne znači da ovaj model nije dobar, u protivnom ga ne bismo koristili već decenijama, već da ima određena ograničenja.



Modeli boja

- **Model boja** je apstraktni matematički model koji opisuje boje preko n -torki numeričkih vrednosti.
- Zbog svega prethodno navedenog, to su najčešće uređene trojke (ili četvorke).
- Skup svih boja često se naziva **prostorom boja**, pa se numeričke vrednosti mogu posmatrati kao koordinate u tom prostoru.

Modeli boja

- CIE
- RGB
- CMY
- CMYK
- YIQ
- HSV (HSB)
- HLS

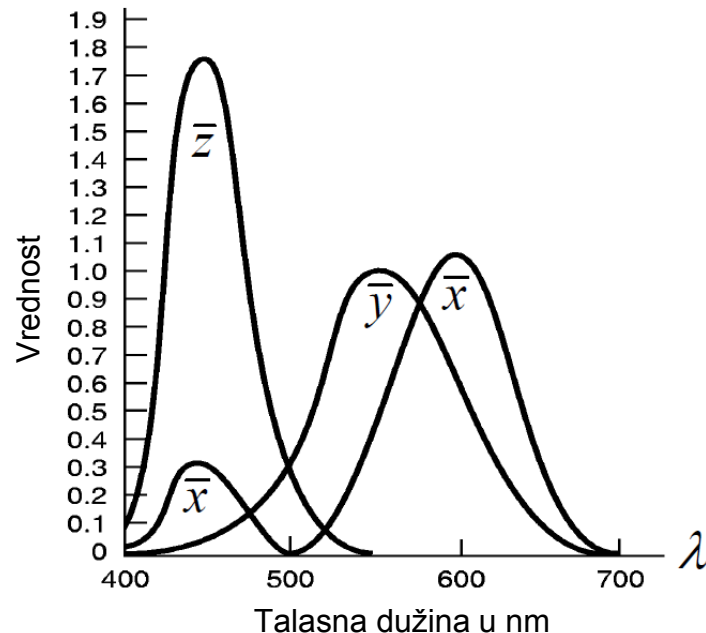
CIE model

- Definisanje boje izvora svetlosti korišćenjem mešanja tri „primara“ je poželjan pristup, ali težine ne smeju biti negativne.
- *Commission Internationale de l'Eclairage* (CIE) je 1931. godine je definisala tri standardna primara, nazvana **X**, **Y** i **Z**.
- Odgovarajuće funkcije uklapanja boja x_λ , y_λ i z_λ su uvek pozitivne i mogu se dobiti sve boje u vidljivom delu spektra.

CIE model

- **Funkcije uklapanja boja** x_λ , y_λ i z_λ nisu spektralne distribucije komponenata \mathbf{X} , \mathbf{Y} i \mathbf{Z} , već pomoćne funkcije koje definišu koliko \mathbf{X} , \mathbf{Y} i \mathbf{Z} treba „pomešati“ da bi se dobila odgovarajuća boja.
- y_λ odgovara funkciji svetlosne efikasnosti
- z_λ je kvazi-plava (S komponenta LMS modela)

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.910\,20 & -1.112\,12 & 0.201\,91 \\ 0.370\,95 & 0.629\,05 & 0 \\ 0 & 0 & 1.000\,00 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix}_{\text{HPE}}$$



CIE model

- X, Y i Z se računa na osnovu distribucije spektralne energije $P(\lambda)$ i funkcija uklapanja boja (x_λ , y_λ i z_λ) po sledećim formulama:

$$X = k \int P(\lambda) \cdot \bar{x}_\lambda d\lambda$$

$$Y = k \int P(\lambda) \cdot \bar{y}_\lambda d\lambda$$

$$Z = k \int P(\lambda) \cdot \bar{z}_\lambda d\lambda$$

- Konstanta k

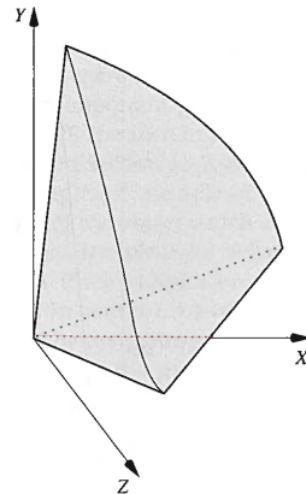
- ▷ za izvore svetlosti iznosi 680 lm/W
- ▷ Za reflektujuće objekte se bira tako da bela boja (P_w) ima $Y=100$ (tj. maksimalnu vrednost)

$$k = \frac{100}{\int P_w(\lambda) \cdot \bar{y}_\lambda d\lambda}$$

CIE model

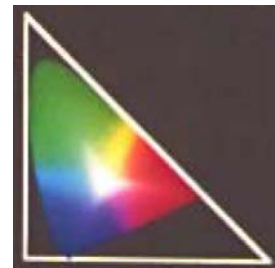
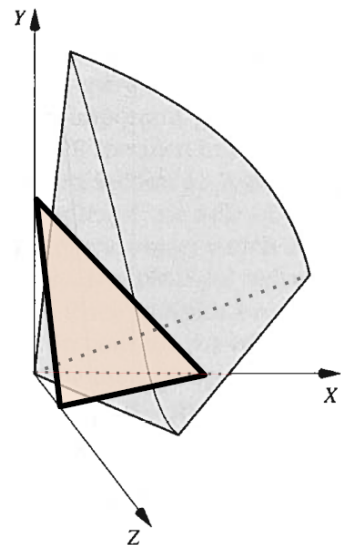
- Zapremina XYZ prostora svih vidljivih boja ima oblik nepravilne kupe, sa vrhom u koordinatnom početku, u potpunosti je u prvom oktantu i zatvorena glatkom krivom.
- Neka su (X, Y, Z) koordinate boje **B** (tj. dodeljene težine dodeljene CIE primarima da odgovaraju boji **B**)
 - ▷ $\mathbf{B} = X\mathbf{X} + Y\mathbf{Y} + Z\mathbf{Z}$
- **Hromatičnost** (*chromaticity*), koja zavisi samo od dominantne talasne dužine i zasićenosti (ali ne od količine energije, tj. osvetljaja), dobija se normalizacijom koordinata

- ▷ $x = \frac{X}{X+Y+Z}, y = \frac{Y}{X+Y+Z}, z = \frac{Z}{X+Y+Z},$

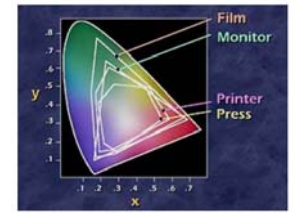


CIE model

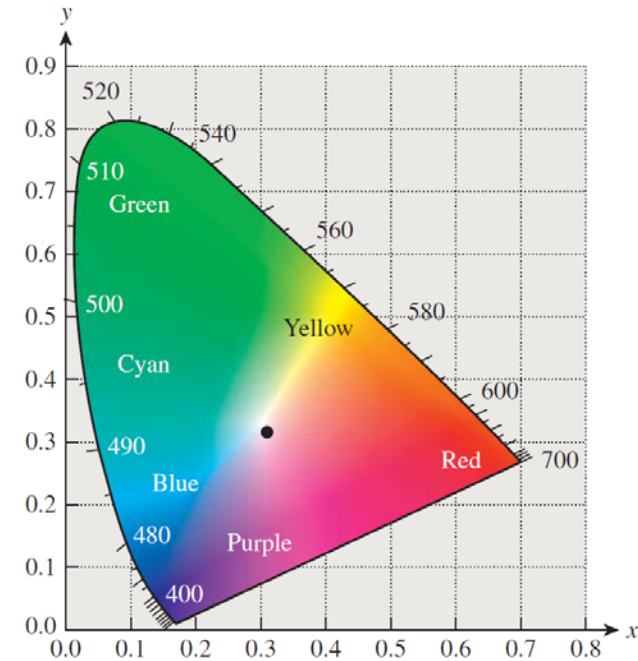
- $x + y + z = 1$
- x, y i z su na ravni $X + Y + Z = 1$
- Ortografska projekcija te ravni poznata je kao CIE dijagram hromatičnosti
- Ako znamo x i y , z je lako izračunati
 - ▷ $z = 1 - x - y$
- Nemoguća je rekonstrukcija (X, Y, Z) na osnovu (x, y) . Zato se u definiciji boje dodaje još jedna komponenta, obično Y (osvetljaj). Na osnovu (x, y, Y) računa se (X, Y, Z) po formulama:
 - ▷ $X = \frac{x}{y}Y, Y = Y, Z = \frac{1-x-y}{y}Y$



CIE model

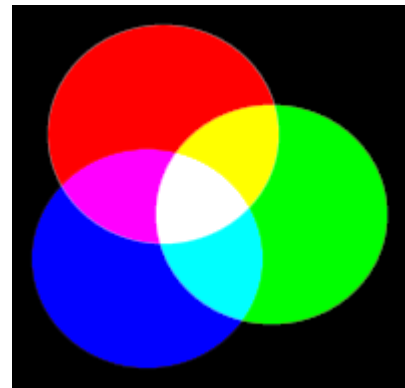
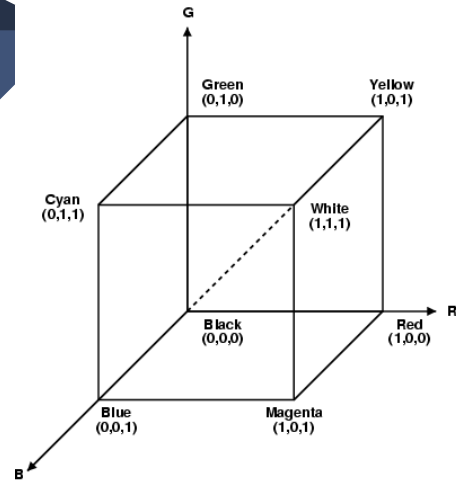


- CIE dijagrama hromatičnosti predstavlja sve vidljive boje.
- 100% spektralno čiste boje nalaze se na zakrivljenom obodu dijagrama.
- Bela boja nalazi se u centru dijagrama (približno na $x = y = z = 1/3$).
- **Gamut** predstavlja opseg boja koje uređaj može prikazati (deo CIE dijagrama hromatičnosti). Obično predstavlja zatvorenu oblast definisanu primarnim bojama tog uređaja.
- CIE model se često koristi za transformaciju boja iz jednog u drugi prostor.

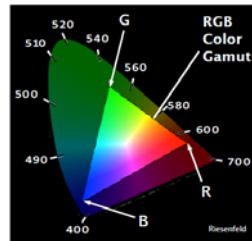


RGB model

- **Red-Green-Blue** model je dobio naziv po svojim primarima
- 3D koordinatni sistem boja, najčešće predstavljen jediničnom kockom u Dekartovom pravougaonom koordinatnom sistemu
- Jednostavna specifikacija boja unutar datog gamuta
- Ne može se koristiti za specifikaciju svih vidljivih boja
- Hardverski orijentisani model zastupljen kod monitora
- Spada u grupu **aditivnih modela** (modela izvora svetlosti), jer se primari sabiraju da bi se dobio rezultujući efekat.



RGB model

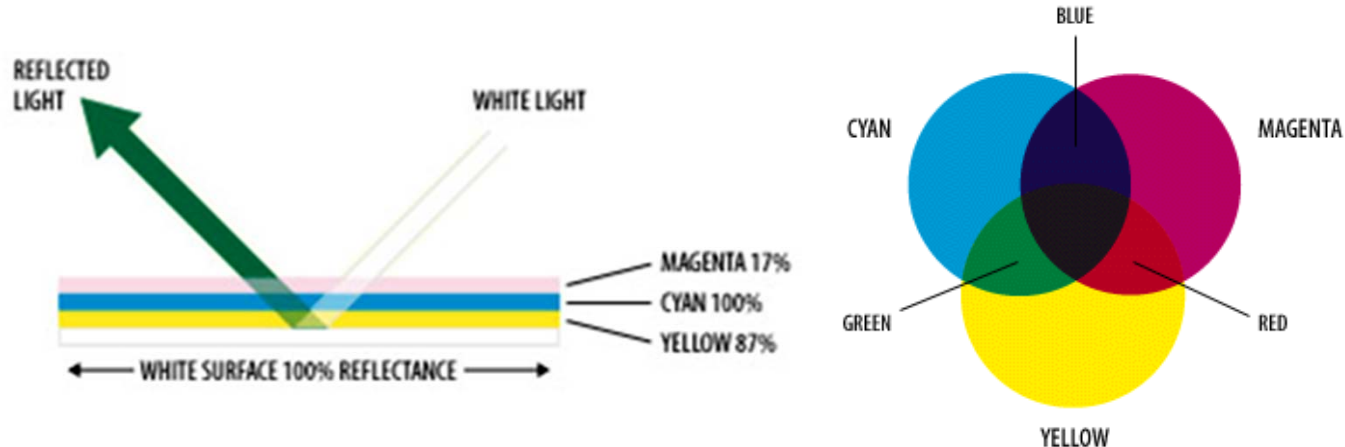


- Gamut obuhvaćen RGB modelom zavisi od hromatskih karakteristika uređaja (karakteristika upotrebljenog fosfora ili LED ćelija).
- Da bi smo boju prikazanu na jednom monitoru preveli u boju drugog, moraju se prvo odrediti transformacione matrice M_1 i M_2 svakog od datih RGB prostora u (CIE) XYZ prostor.
- Konverzija prvog u drugi RGB prostor definisana je matricom transformacije $M_2^{-1}M_1$
- Matrični oblik transformacije RGB u XYZ prostor ima sledeći oblik:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Xr & Xg & Xb \\ Yr & Yg & Yb \\ Zr & Zg & Zb \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

CMY Model

CMY (Cian-Magenta-Yellow). Ove boje su komplementi crvene, zelene i plave. Model pripada grupi **subtraktivnih** modela (model pigmenata). U prethodnom modelu su se boje dobijale tako što su se dodavale crnoj boji, a sada se boje dobijaju tako što se oduzimaju od bele boje. Ovaj model se koristi za uređaje koji štampaju po beloj podlozi.

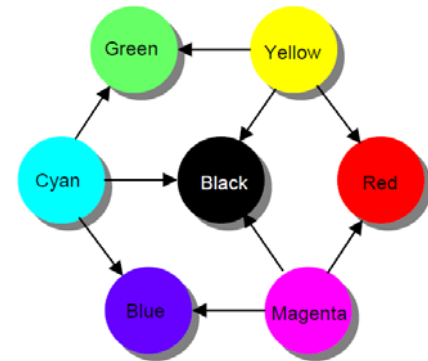


RGB – CMY konverzija

- Na primer, *cian* oduzima crvenu boju od bele svetlosti. Dakle, ako znamo da je bela svetlost jednaka $R + G + B$, onda možemo definisati cian boju kao: $R + G + B - R = G + B$.
- *Magenta* oduzima zelenu, žuta oduzima plavu!
- Konverzija između ova dva modela se obavlja na sledeći način:

$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix}$$



RGB–CMY relacija boja

CMYK Model

- **CMYK** je model izveden iz CMY modela. K je oznaka za crnu. Transformacije kojima se prelazi sa CMY na CMYK su sledeće:

$$K = \min (C,M,Y)$$

$$C = C - K$$

$$M = M - K$$

$$Y = Y - K$$

YIQ Model

- Ovaj model se koristi u komercijalnoj televiziji i stoga je usko vezan za rastersku grafiku. YIQ je prekodiran RGB radi efikasnije transmisije i zbog kompatibilnosti sa crno-belim televizorima.
- Y je oznaka za osvetljenje, a ne za žutu boju. Ovo je zapravo Y koordinata kod CIE modela.
- Na crno-belim monitorima se priključuje samo Y komponenta. Kod monitora u boji koristi se i I i Q.

RGB –YIQ konverzija

- Veličine u prvoj vrsti ukazuju na relativni značaj crvene i zelene, a na vrlo mali značaj plave u osvetljaju (brightness).

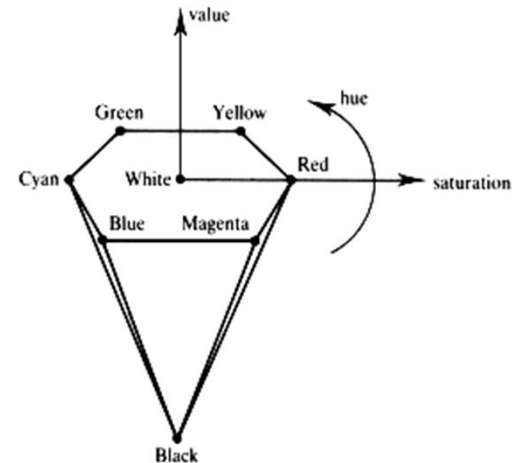
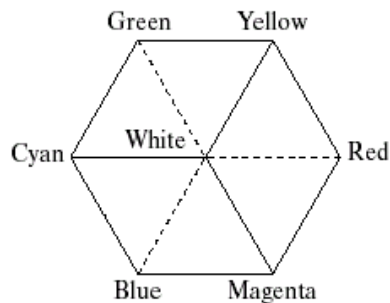
$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.275 & -0.321 \\ 0.212 & -0.523 & 0.311 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

RGB –YIQ konverzija

- Specificiranje boja YIQ modelom rešava potencijalni problem sa materijalom koji je pripremljen za televiziju. Dve različite boje prikazane strana po strana na kolor monitoru pojaviće se kao različite, ali kada se konvertuju u YIQ i gledaju na monohromatskom monitoru, mogu se pojaviti kao iste. Ovaj problem se može izbeći specificiranjem ove dve boje sa različitim Y vrednostima u prostoru YIQ.
- Ovo je moguće jer YIQ model koristi dva svojstva našeg čula vida. Prvo je to da je naše čulo mnogo osetljivije na promenu svetla nego na promenu zasićenosti i nijanse. Upravo zbog ovoga se više bitova koristi za kodiranje Y koordinate a manje za ostale dve.
- Drugo, objekti koji prekrivaju relativno malu površinu mogu biti prikazani sa jednom umesto sa dve koordinate boje. Ove tromosti našeg čula iskorišćene su u standardizaciji ovog sistema, te se Y koordinati daje 4Mhz, I koordinati 1.5Mhz, a Q koordinati samo 0.6Mhz.

HSV (HSB) Model

- **HSV (Hue-Saturation-Value)** ili **HSB (Hue-Saturation-Brightness)**.
- RGB, CMY, CMYK i YIQ modeli su hardverski orijentisani. Nasuprot njima, HSV (HSB) je korisnički orijentisan. Zasnovan je na intuitivnom osećaju umetnika za tintu, senku i ton. Koordinatni sistem je cilindričan tj. model je definisan u heksakonusu.



HSV (HSB) Model

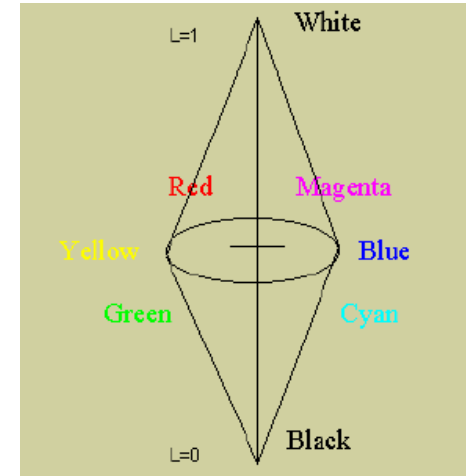
- Vrh heksakonusa odgovara $V=1$, koji sadrži relativno svetle boje. Boje u ravni $V=1$ se ne osećaju sa istom sjajnošću.
- Nijansa (Hue) se meri uglom u odnosu na vertikalnu osu pri čemu je crvena na 0, zelena na 120 itd...Komplementarne boje su pomerene za 180 stepeni.
- Vrednost S je između 0 na centralnoj liniji (V osi) i 1 na stranama heksakonusa. Zasićenje se meri kao relativno u odnosu na gamu boje predstavljene ovim modelom, koji je ustvari podskup celog dijagrama CIE hromatičnosti. Stoga zasićenje 100% u ovom modelu je manje od 100% eksitacione čistoće.

HSV (HSB) Model

- Heksakonus je visine 1 po V osi sa vrhom u koordinatnom početku. Vrh je crne boje i ima V komponentu jednaku nuli. U ovoj tački vrednosti S i H su irelevantne. Tačka sa S=0, V=1 je bela. Vrednost za V između 0 i 1 kada je S=0 su sive. Kada je S=0, vrednost H je **irelevantna**. Kada je S različito od nule, H je **RELEVANTNO**. Na primer: slabo crvena je na H=0, S=1, V=1. Zaista, bilo koja boja sa V=1, S=1 odgovara situaciji kada umetnik koristi malo pigmenata kada počinje da meša boje. Dodavanje belog pigmenta odgovara menjanju S (bez promene V). Senke se kreiraju smanjivanjem V (pri S=1). Tonovi se kreiraju smanjivanjem i S i V. Naravno promena H odgovara izboru siromašnog pigmenta sa kojim se startuje.

HLS Model

- **HLS (Hue-Lightness-Saturation)**
- HLS model boja je definisan u cilindričnom prostoru duple šestouglaone piramide (dupog heksakona). U stvari, mi HLS predstavljamo kao deformaciju HSV, gde je bela boja podignuta da bi se formirao gornji heksakon od ravni $V=1$.
- Svetlina je 0 za crno (na vrhu donje piramide) do 1 za belo (na vrhu gornje piramide).



PITANJA

