

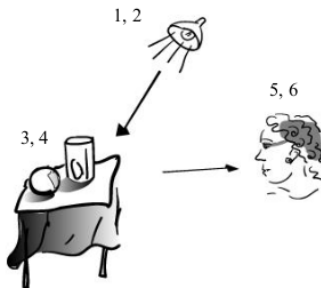
Računarska grafika

Boje

Vesna Marinković

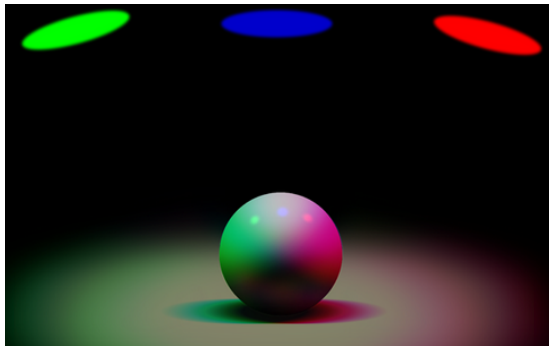
Faktori koji utiču na simuliranje osvetljene scene

- 1 pozicija i tip izvora svetla
- 2 intenzitet i nijansa svetla
- 3 geometrija objekata na sceni
- 4 materijali od kojih su objekti
- 5 lokacija posmatrača, odnosno kamere
- 6 čovekov vizualni sistem



Šta sve utiče na boju objekta?

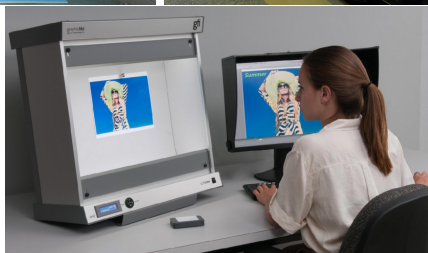
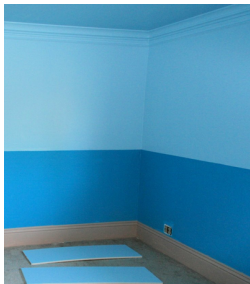
- Boja objekta ne zavisi samo od samog objekta već i od izvora svetla koji ga obasjava, od boje okoline i čovekovog vizualnog sistema



Čovekov vizualni sistem

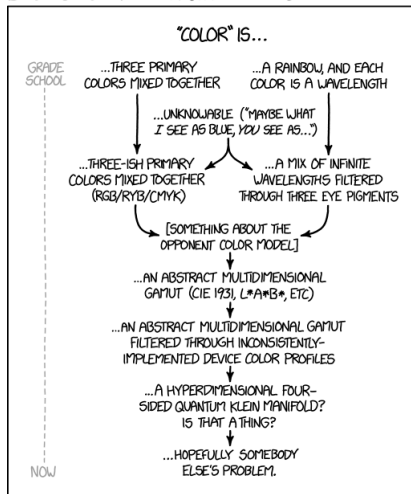
- Čovekov vizualni sistem je deo grafičke protočne obrade
- Način na koji se vizualna informacija sadržana u slici doživljava i interpretira igra važnu ulogu
- Čovekov vizualni sistem je jako složen

Zašto je potrebno da pričamo o bojama?



Šta je boja?

EVOLUTION OF MY UNDERSTANDING OF COLOR OVER TIME:



Šta je boja?

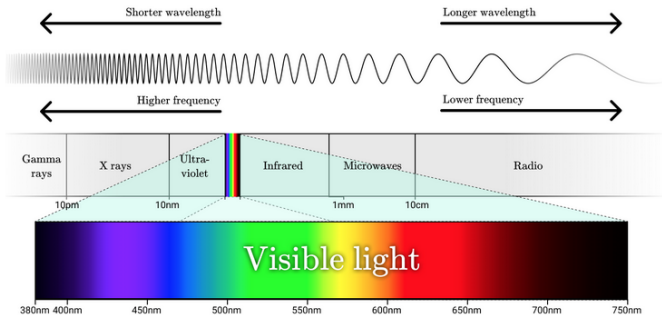
- Boja je **subjektivno** iskustvo koje stvara naš um i predstavlja **interpretaciju** fizičkog sveta
- Percepcija boje proizilazi od dve osnovne komponente:
 - 1 **fizička svojstva sveta** oko nas
 - elektromagnetni talasi interaguju sa materijalima i dospevaju do oka
 - fotoreceptori (štapići i čepići) registruju fotone, koji se konvertuju u elektrohemijske signale, koje dalje obrađuje mozak
 - 2 **fiziološka interpretacija signala** koje primaju receptori
 - mnogo manje razumljiva i prilično složena obrada višeg nivoa – mi razumemo kako funkcioniše oko, ali ne sasvim kako funkcioniše mozak
 - veoma zavisna od prethodih iskustava i asocijacija na objekte
- Obe komponente su važne za razumevanje naše percepcije boje

Zašto izučavati boju u kontekstu računarske grafike?

- Estetika: izbor odgovarajućih boja za korisnički interfejs, uparivanje garderobe,...
- Razumevanje kolor modela kojima korisnici jednostavno vrše odabir boje: npr. šta znači neka RGB trojka vrednosti
- Razumevanje ograničenja kolor modela: zašto neke boje ne mogu da se odštampaju na papiru, kako se konvertuju boje između različitih medijuma

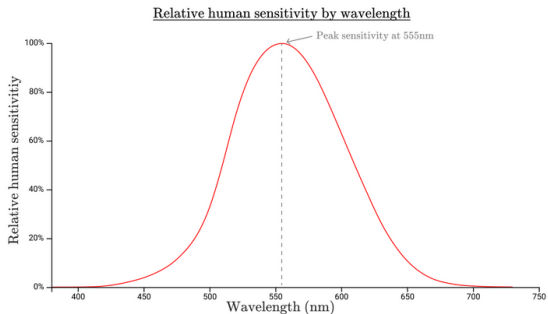
Vidljiva svetlost

- Svetlost je oblik elektromagnetnog zračenja
- Vidljiva svetlost ima talasnu dužinu između 380 i 750 nanometara

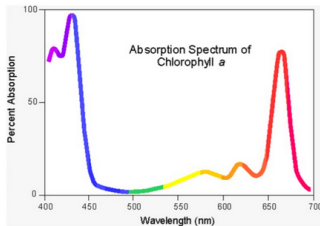
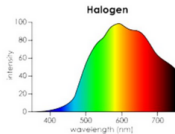
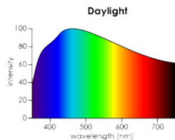


Vidljiva svetlost

- Čovekovo oko nije jednako osetljivo na zračenje svih talasnih dužina

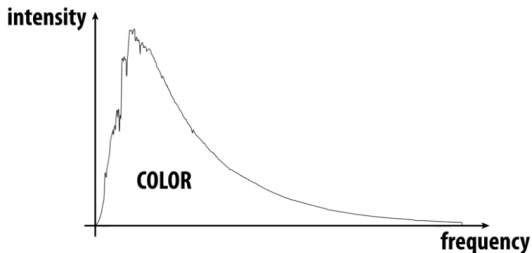


Spektri emisije i apsorpcije



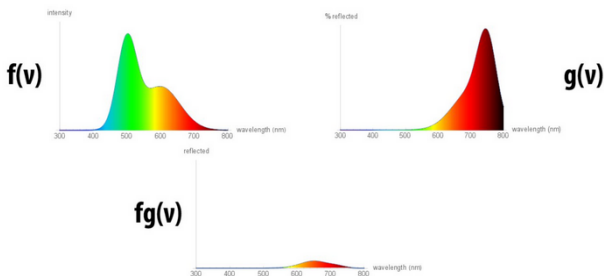
- Boje možemo da predstavimo preko emisionih spektara ili preko apsorpcionih spektara
- **Emisioni spektar:** za svaku talasnu dužinu zadaje koliko se svetlosti proizvelo (zagrevanjem, fuzijom,...)
- **Apsorpcioni spektar:** za svaku talasnu dužinu zadaje procenat svetlosti te talasne dužine koji se apsorbuje ako se obasja belom svetlošću

Fundamentalni opis boje



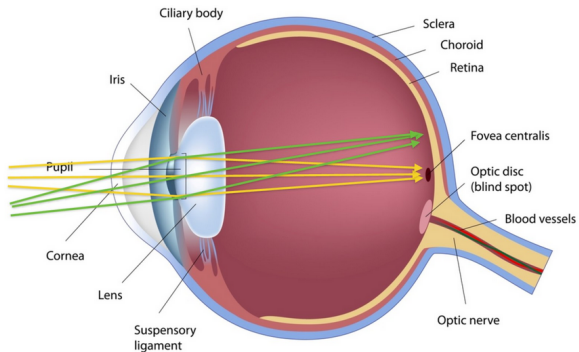
- Boja je intenzitet ili apsorpcija kao funkcija frekvencija
- Sve ostalo je pogodna aproksimacija!

Interakcija emisije i refleksije



- Kako interaguju emisija i apsorpcija?
- Izvor svetla ima emisijski spektar $f(\mu)$, μ - frekvencija
- Površ ima spektar refleksije $g(\mu)$ (refleksija kao komplement apsorpcije)
- Rezultujući intenzitet je proizvod $f(\mu)g(\mu)$ za svaku od frekvencija

Optika oka



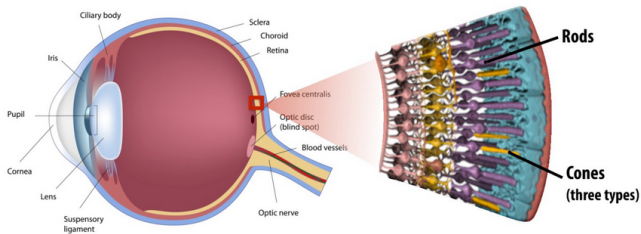
- Na koji način elektromagnetno zračenje iz datog opsega talasnih dužina ljudi doživljavaju kao određenu boju?

Preuzeto sa slajdova Univerziteta Carnegie Melone

Reagovanje fotosenzora (oka, kamere,...)

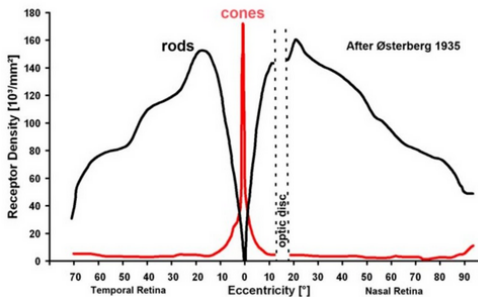
- Ulaz u fotosenzor: svetlo
 - raspodela elektromagnetnog zračenja duž talasnih dužina: $\Phi(\lambda)$
- Izlaz iz fotosenzora: odgovor – broj
 - kodiran kao npr. električni signal
- Funkcija spektralnog odgovora – $f(\lambda)$
 - osetljivost senzora na svetlost neke talasne dužine
 - veće vrednosti $f(\lambda)$ odgovaraju efikasnijem senzoru
- Ukupan odgovor fotosenzora: $R = \int_{\lambda} \Phi(\lambda)f(\lambda)d\lambda$

Fotoreceptori oka



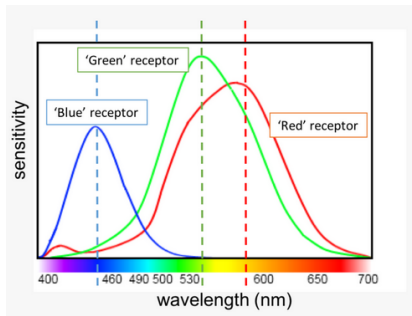
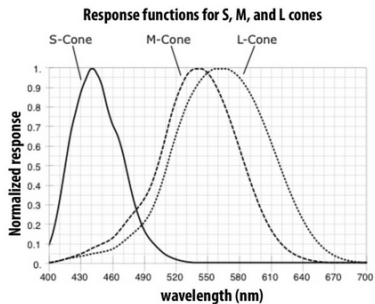
- **Štapićaste ćelije – štapići** (eng. rods) su primarni receptori u mračnim uslovima (ima ih oko 120 miliona); osetljivi su na **intenzitet**
- **Kupaste ćelije – čepići** (eng. cones) su primarni receptori u uslovima jakog osvetljenja (ima ih oko 6-7 miliona); razlikuju **boju svetlosti**
- Pošto receptora prve vrste ima mnogo više, oko je **mного bolje u razlikovanju intenziteta, nego u razlikovanju boja**
- “Colors are only symbols. Reality is to be found in luminance alone... When I run out of blue, I use red.” (Pablo Picasso)

Gustina receptora u mrežnjači



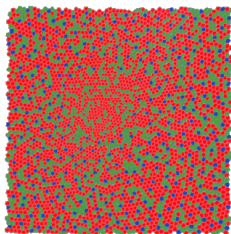
- Najveća gustina čepića (i najmanja gustina štapića) je u centralnoj jami mrežnjače (fovea centralis)
- Najbolje razlikovanje boja je u centru oblasti koju posmatramo
- Tamo gde se nalazi optički nerv, postoji slepa tačka

Spektralni odgovor čepića



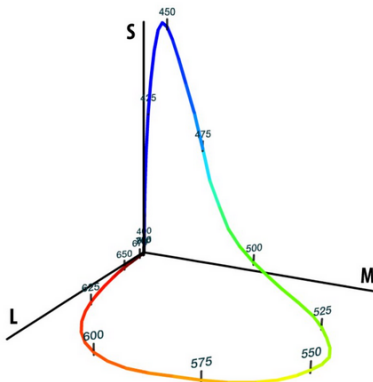
- Postoje tri tipa čepića: S, M i L
- Svaki od njih je osetljiv na različit opseg talasnih dužina vidljive svetlosti (na kratke, srednje, odnosno duge talasne dužine, koje grubo odgovaraju plavoj, zelenoj i crvenoj boji)
- Zato je uobičajeno boju zadati putem tri vrednosti

“Mozaik” čepića



- Neravnomerna raspodela tipova čepića u oku: 64% su tipa L, 32% su tipa M, a samo 4% su tipa S (L-crvena, M-zelena, S-plava)

Odgovor S, M i L čepića na monohromatsku svetlost

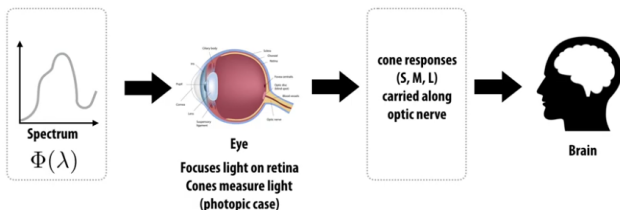


- Odgovor čepića na monohromatsku svetlost određene talasne dužine vizualizovan u vidu tačaka u 3D prostoru

Čovekov vizualni sistem

- Čovekovo oko ne može da meri spektar dolazeće svetlosti; slično, mozak ne prima spektar kao informaciju od oka
- Oko meri vrednosti S, M i L koje su rezultat integracije dolazećeg spektra u odnosu na funkciju odziva S, M i L čepića:

$$S = \int_{\lambda} \Phi(\lambda)S(\lambda)d\lambda, M = \int_{\lambda} \Phi(\lambda)M(\lambda)d\lambda, L = \int_{\lambda} \Phi(\lambda)L(\lambda)d\lambda$$
- Da li je moguće da dva različita spektra daju istu broju, tj. da dve različite funkcije imaju istu površinu ispod grafika?



Metameri

- **Metameri** su dva različita spektra koja se integrišu u isti (S,M,L) odgovor – isti fizički odgovor u oku
- Postojanje metamera može biti kritično za reprodukciju boja: ne moramo reprodukovati baš isti spektar iz realnog života da bismo proizveli **opaženu** boju na monitoru (ili parčetu papira, ili...)

Prostori boja i kolor modeli



- Na koji način možemo jednostavnije kodirati boje?
- Postoji veliki broj načina zadavanja boja
- Interesuje nas kako zadati boju iz nekog prostora boja korišćenjem određenog kolor modela
- **Prostor boja** je kao slikarska paleta: pun opseg boja između kojih možemo da biramo
- **Kolor model** je način zadavanja konkretne boje iz prostora boja: npr. nazivom ili RGB trojkom vrednosti



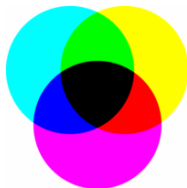
- oker
- (204,119,34)

Modeli obojene svetlosti

- Postoji više modela za opisivanje obojene svetlosti
- Skoro svi modeli za opisivanje svetlosti zasnovani su na nekim **trima nezavisnim karakteristikama**
- Često se crvena, zelena i plava boja nazivaju **primarnim bojama** što se tumači na sledeći način:
 - ove boje se ne mogu napraviti na osnovu ostalih
 - sve ostale boje mogu se napraviti pomoću njih
- Mnoge boje se mogu napraviti korišćenjem ove tri boje, ali ne sve!
- Da bi se “pokrile” sve moguće vizuelne percepcije boja, bilo bi potrebno dodati **beskonačno mnogo primarnih boja** za sve moguće vrednosti monospektralne svetlosti

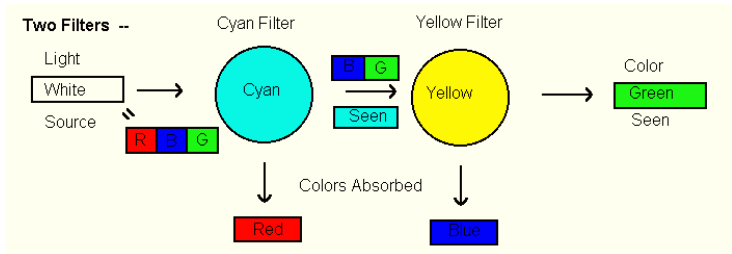
Mešanje svetlosti vs. mešanje farbi

- Različito se meša svetlost od toga kako se mešaju farbe (pigmenti)
 - ako uperimo crveno i zeleno svetlo na reflektujući komad belog papira, reflektovana svetlost deluje žuto – **aditivno mešanje boja**
 - ako naneseemo crvenu i zelenu farbu na parče belog papira, apsorbirala bi se sva svetlost osim one koju doživljavamo kao crvenu, odnosno zelenu i dobili bismo braon boju – **subtraktivno mešanje boja**
- Farbe se ponašaju kao **filter** između posmatrača i izvora svetlosti (površina koja reflektuje svetlost)



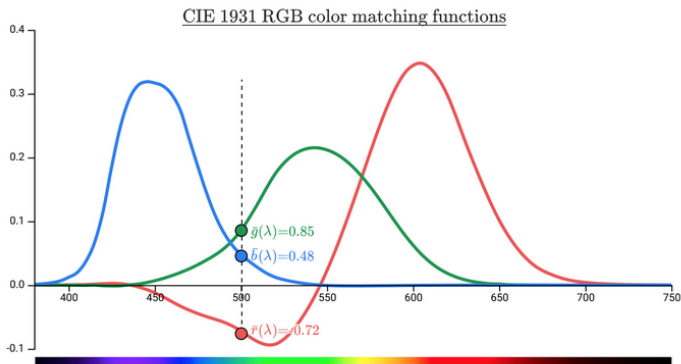
Mešanje svetlosti vs. mešanje farbi

- Postavimo cijan (mešavina plave i zelene) i žuti (mešavina crvene i zelene) celofan ispred izvora bele svetlosti
 - propušta se bela svetlost (mešavina crvene, plave i zelene svetlosti)
 - prvi celofan se ponaša kao filter i apsorbuje iz svetlosti bele boje sve boje osim cijan (dakle crvenu boju)
 - svetlost koju propušta prvi celofan je cijan boje
 - drugi celofan apsorbuje iz propuštene svetlosti cijan boje sve boje osim žute (dakle plavu boju)
 - drugi celofan propušta svetlost zelene boje



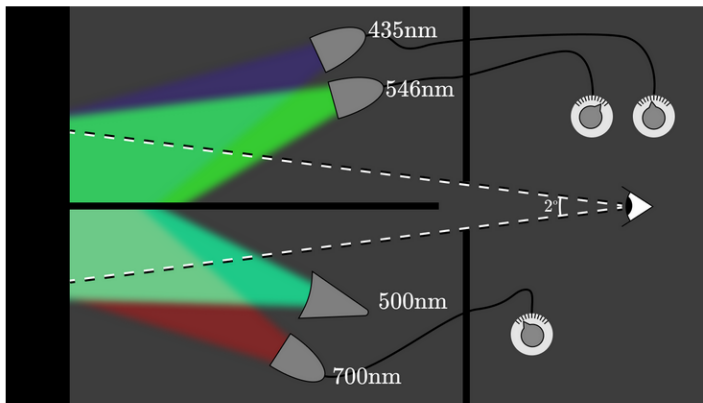
Modeli obojene svetlosti

- Za svaku talasnu dužinu zadaje se količina crvene, zelene i plave svetlosti koju treba pomešati da bi se proizvela senzacija jednaka svetlosti talasne dužine λ iz vidljivog dela spektra



Modeli obojene svetlosti

- Za mnoge vrednosti talasne dužine, bar jedan koeficijent je negativan, što ukazuje na nemogućnost da se ove boje proizvedu mešanjem crvene, zelene i plave boje



CIE prostor boja

- 1931. Međunarodna komisija o osvetljenju (CIE) definisala je tri standardne primitive koje se nazivaju **X**, **Y** i **Z**, sa svojstvom da trougao sa ova tri temena uključuje sve boje vidljive čoveku
- Ove primitive imaju **negativne** regione u svom spektru, tj. vrednosti koje ne odgovaraju fizički ostvarivim izvorima svetlosti
- Funkcije koje odgovaraju bojama za **X**, **Y** i **Z** su nenegativne, te se sve boje mogu predstaviti kao nenegativne linearne kombinacije primitiva: $T = X\mathbf{X} + Y\mathbf{Y} + Z\mathbf{Z}$
- **Y** primitiva je izabrana tako da odgovara intenzitetu svetla

CIE hromatičnost

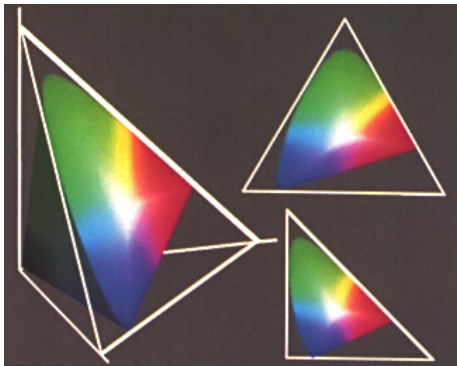
- Moguće je za datu boju dobiti vrednosti koje zavise samo od dominantne talasne dužine (boje) i zasićenosti, a koje su nezavisne od ukupne sjajnosti, deljenjem sa $X + Y + Z$:

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

- Ako se duplira dolazno svetlo, duplira se i svaka od vrednosti X , Y i Z , ali i suma $X + Y + Z$, pa koeficijenti x , y , z ostaju nepromenjeni
- Važi $x + y + z = 1$, te ako znamo x i y možemo izračunati z
- Stoga se skup boja **nezavisnih od intenziteta** može nacrtati samo u Oxy ravni i kao rezultat dobija se **CIE dijagram obojenosti**

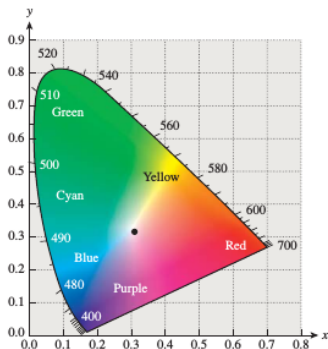
Različiti pogledi na ravan $x + y + z = 1$ u CIE prostoru

- Levo: ravan $x + y + z = 1$ umetnuta u CIE prostor
- Gore-desno: pogled upravno na ravan $x + y + z = 1$
- Dole-desno: projekcija ravni $x + y + z = 1$ na ravan $z = 0$ – ova projekcija odgovara dijagramu obojenosti (hromatičnosti)



CIE dijagram obojenosti

- Dijagram ima oblik potkovice
- Granica se sastoji od boja koje odgovaraju monospektralnoj svetlosti date talasne dužine, prikazanim u nanometrima
- Tačke na duži koja povezuje početak i kraj spektralnih tačaka su nespektralne: predstavljaju mešavinu dve monohromatske boje



CIE dijagram obojenosti

- Blizu centra “potkovice” (blizu tačke sa koordinatama $x = y = z = 1/3$) nalazi se **izvor svetlosti C** koji predstavlja standardnu referencu za “belo” na dnevnoj svetlosti
- Boje koje su povezane intenzitetom se ne prikazuju (na primer braon boja je narandžasto-crvena za malu vrednost intenziteta)
- Postoji beskonačan broj ravni koje se projektuju na ravan $X + Y + Z = 1$ čije se sve boje razlikuju, te ovo nije paleta sa svim bojama
- X i Y su izabrani tako da dijagram bude tangentan na x i y osu

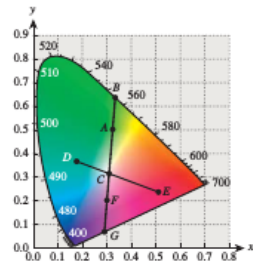
CIE dijagram obojenosti

- Primetimo da ako znamo x i y možemo izračunati z kao $1 - x - y$, ali nam ovo ne omogućava da povratimo vrednosti X , Y i Z
- Za to obično koristimo i vrednost intenziteta Y te vrednosti računamo na sledeći način:

$$X = \frac{x}{y}Y, \quad Y = Y, \quad Z = \frac{1 - x - y}{y}Y$$

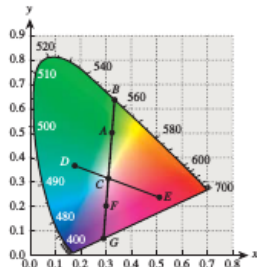
Primene CIE dijagrama obojenosti

- Za definisanje **komplementarnih boja**
- Boje su komplementarne ako se njihovim kombinovanjem može dobiti izvor svetlosti C (npr. D i E)
- Ako se zahteva da mešavina bude pola-pola onda neke boje nemaju komplementarne



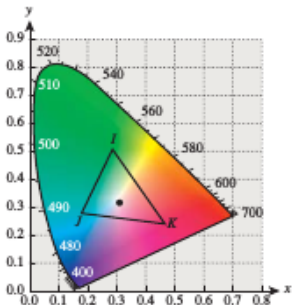
Primene CIE dijagrama obojenosti

- Za definisanje **energetske čistoće**, tj. zasićenosti tačke
- Tačka A se može predstaviti kombinovanjem tačke C sa čisto-spektralnom bojom B
- Energetska čistoća tačke A jednaka je količniku dužina duži AC i BC
- Proširujemo definiciju: energetska čistoća tačke C je 0
- Zrak iz C kroz F seče granicu "potkovice" u **nespektralnoj** tački – možemo razmatrati energetske čistoće i za ovakve tačke



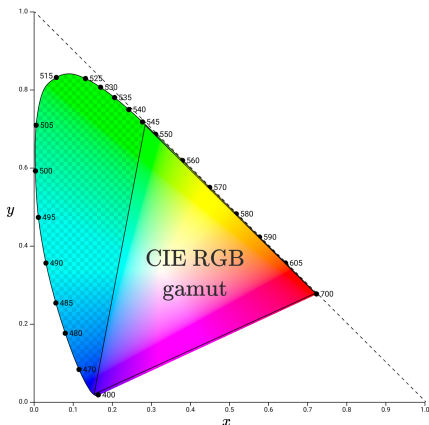
Primene CIE dijagrama obojenosti

- Za utvrđivanje **opsega** boja koje je moguće proizvesti
- Uređaj koji može da proizvede dve boje, može takođe da proizvede (podešavanjem količine svake od njih) i hromatografske vrednosti koje su konveksne kombinacije ove dve boje
- Slično važi i za tri tačke: sve boje u trouglu IJK mogu se dobiti mešanjem boja I , J i K



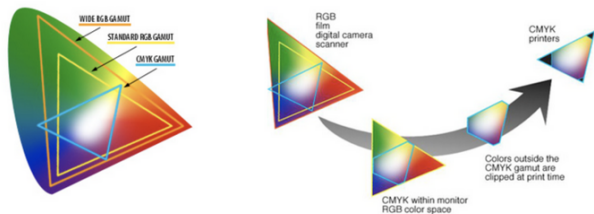
CIE RGB opseg

- Opseg boja koje je moguće prikazati kao kombinaciju crvene, zelene i plave boje



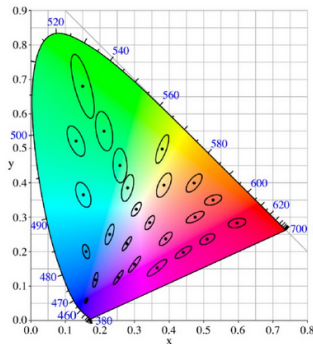
Opsezi boja

- Smanjeni opseg boja koje je moguće odštampati u odnosu na opseg boja koje je moguće prikazati na ekranu sugerira da verna reprodukcija štampanjem mora da koristi redukovani opseg boja na ekranu



Oštrina percepcije boja

- Čovekovo oko može razlikovati oko 7 miliona boja kada se uzorci postave jedan do drugog (eng. JND, just noticeable difference)
- Pored opsega vidljivih boja, možemo se pitati i koliko je oko osetljivo na promene boja?
- Svaka od elipsi na slici (MacAdam elipse) odgovara regionu boja koje nisu razlučive od strane čovekovog oka

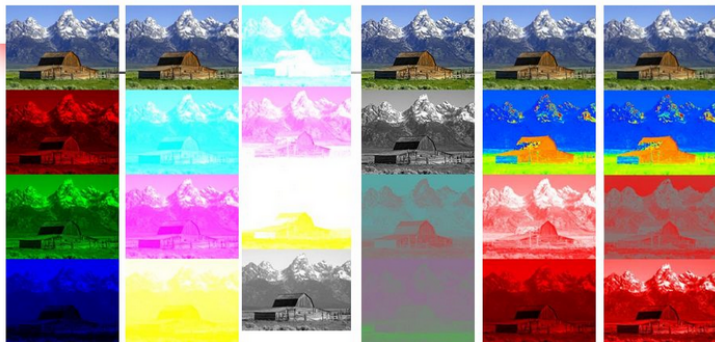


Osnovni kolor modeli

- Postoji veliki broj kolor modela za opis boja koje različiti uređaji mogu da proizvedu
- Svi kolor modeli su **ograničeni**, tj. mogu da opišu boje do određenog intenziteta, što odgovara fizičkim karakteristikama uređaja
- Izbor kolor modela može biti motivisan jednostavnošću (RGB model), intuitivnim korišćenjem (HSV i HLS model) ili određenim inženjerskim interesom (YIQ i CMY model)
- Kolor model za rastersku grafiku se zadaje 3D koordinatnim sistemom i podoblašću oblasti svih vidljivih boja
- Svrha kolor modela je da omogući **jednostavno adresiranje boja** iz nekog skupa

Kolor modeli

- Najčešće korišćeni modeli su
 - RGB, HSV i HLS (za monitore)
 - YIQ (za TV kolor sistem)
 - CMY i CMYK (za štampačke uređaje)



RGB

CMY

CMYK

YIQ

HSV

HSL

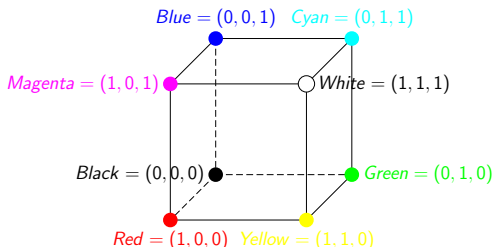
Konverzije između raznih kolor modela

- Konverzija između kolor modela u opštem slučaju ne mora da ima smisla
 - Primer: konverzija boja sa ultrasjajnog ekrana u CMY
- Prilikom stvaranja slike u računarskoj grafici poželjno je čuvati sliku bez gubitaka sa svim bitnim informacijama, da bi je bilo moguće kasnije konvertovati u neki drugi format

RGB kolor model

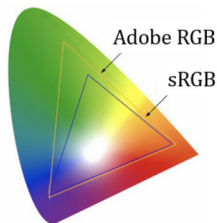
- Jedinična kocka sa temenima:

- crvena (1,0,0)
- zeleni (0,1,0)
- plava (0,0,1)



- Sive nijanse se nalaze duž glavne dijagonale
- Pomeranjem sa dijagonale dobijaju se sve zasićenije boje

RGB kolor model

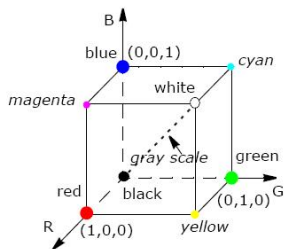


- RGB opsezi boja se razlikuju:
 - od ekrana do ekrana
 - od kompanije do kompanije – Adobe RGB - veći prostor, trenutno standard za digitalnu fotografiju; sRGB (HP/Microsoft) - manje boja, ali sasvim dovoljno za najčešće upotrebe na ekranu i webu, podskup boja najčešće dostupan na ekranima

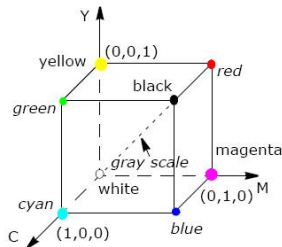
CMY i CMYK kolor model

- Jedinična kocka sa temenima za cijan, magenta, žutu boju
- Boje se opisuju kao mešavine cijan, magenta i žute boje

a) RGB



b) CMY



- Jednačina prelaska sa RGB komponenti na CMY komponente:

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

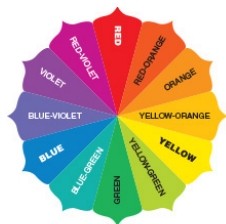
CMY i CMYK kolor model

- Koristi se za ink-jet štampače koji nanose pigment na papir; mastilo reflektuje jedan deo primljene svetlosti, a apsorbuje drugi deo
- Cijan mastilo apsorbuje crveno svetlo, a reflektuje plavo i zeleno; magenta apsorbuje zeleno svetlo; žuto mastilo apsorbuje plavo svetlo
- Kada se pomešaju dva mastila, svetlost koja se reflektuje je ona koju ne apsorbuje nijedna od njih
- Boje su određene onim što se oduzima od bele svetlosti, a ne onome što se dodaje crnilu
- U koordinatnom početku je bela boja umesto crne
- Boja (1, 1, 1) nije u stvarnosti crna, jer mešavina cijan, magente i žute boje ne uspeva da apsorbuje svu svetlost, stoga štampači često imaju i četvrto mastilo – crno (u oznaci K)

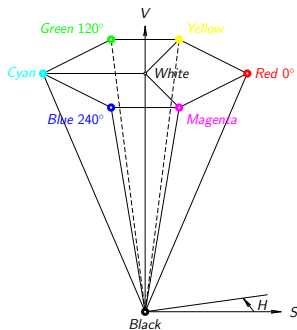
RGB kolor model – nedostaci

- RGB kolor model nije najpogodniji jer individualne komponente ovog modela ne odgovaraju našim perceptivnim karakteristikama poput:
 - koja je nijansa boje
 - koliko je boja svetla
 - koliko je zasićena, i slično
- Prilikom prelaza iz crvene u narandžastu boju malim povećanjem zelene komponente, boja postaje i svetlija, a ono što bismo mi želeli jeste da samo izmenimo njenu nijansu
- Postoje dva intuitivnija modela: HSV i HLS

HSV kolor model

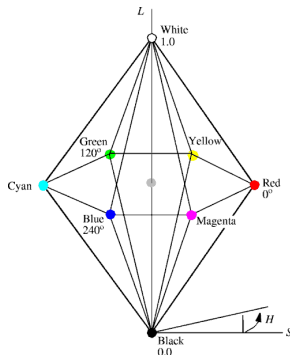


HSV kolor model



- Podskup cilindričnog koordinatnog sistema oblika šestostrane piramide
- Komponente HSV kolor modela:
 - **nijansa** (hue) – karakteriše boju: zelena, crvena,... ($0^\circ - 360^\circ$)
 - **zasićenost** (saturation) – karakteriše koliko je boja “čista”, koliko se razlikuje od sive istog intenziteta ($0 - 1$)
 - **sjajnost** (value, brightness) – percipiran intenzitet objekta ($0 - 1$)

HLS kolor model



- HLS model ima kao komponentu koliko je boja **svetla** (lightness)
- Dvostruka šestostrana piramida
- Maksimalno zasićene boje su za $S = 1, L = 0.5$
- Postoje jednostavne formule za preračunavanje HSV u RGB komponente i obratno

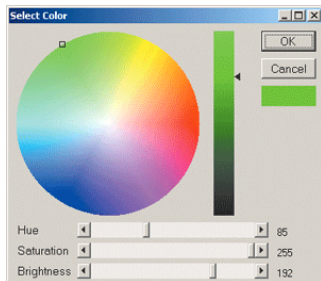
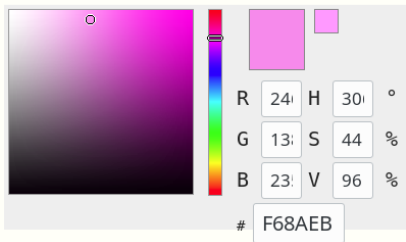
Interpolacija boja

- Potrebna npr. kod Guroovog senčenja ili antialiasing tehnika
- Boja dobijena kao rezultat interpolacije **zavisiće od kolor modela** u kom se interpolacija vrši
- Linearnom prelazu između vrednosti u jednom modelu ne odgovara nužno linearni prelaz između odgovarajućih vrednosti u drugom modelu
- Primer: interpolacija crvene i zelene boje sa težinama 0.5 u RGB i HSV modelu ne daje isti rezultat:
 - RGB: *crvena* = (1, 0, 0), *zelena* = (0, 1, 0), $m = (0.5, 0.5, 0)$, $HSV(m) = (60, 1, 0.5)$
 - HSV: *crvena* = (0, 1, 1), *zelena* = (120, 1, 1), $m_1 = (60, 1, 1)$
- Problem je posebno važan kada se interpoliraju vrednosti koje nisu bliske

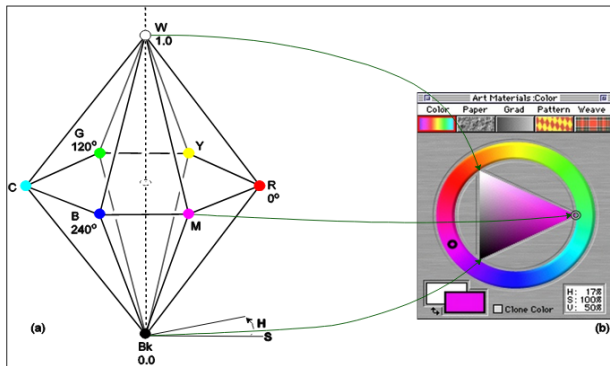
Interaktivno biranje boja

- Ne postoji jedinstveni sistem zadavanja boja koji je najpogodniji svim korisnicima
- Mnogi programi omogućavaju korisniku da izabere boju korišćenjem različitih dijaloga za odabir boje (color picker)

RGB color picker



Interaktivno biranje boja



Korišćenje boja

- Treba voditi računa da kombinacija više boja bude što skladnija
- Mogući su različiti optički efekti



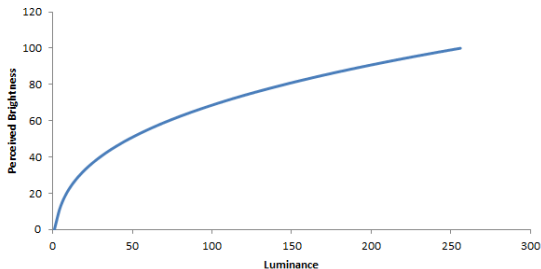
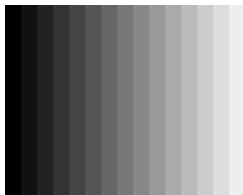
- Redukcija boja - svođenje ukupnog broja boja na unapred zadat broj (pogodno odabranih) boja

Monohromatska svetlost

- **Monohromatska**, odnosno **monospektralna svetlost**, je svetlost tačno jedne talasne dužine ili uskog pojasa talasnih dužina
- Jedino svojstvo monohromatske svetlosti je **kvantitet svetlosti**
- Kvantitet svetlosti može biti razmatran kao:
 - fizički pojam energije – **intenzitet**
 - psihološki fenomen percipiranog intenziteta – **sjajnost**
- Crno-beli monitor može da proizvede mnogo različitih intenziteta svetlosti na poziciji jednog piksela, dok štampači mogu da proizvedu samo dva intenziteta boje (crna i bela)
- Razvijene su tehnike koje omogućavaju ovakvim uređajima da simuliraju dodatne nivoe intenziteta

Izbor intenziteta

- Želimo da predstavimo 256 intenziteta na skali od 0 do 1, tako da ljudskom oku raspodela intenziteta deluje ravnomerno
- Ljudsko oko je osetljivo na **odnose intenziteta**, a ne na apsolutne intenzitete svetlosti



- Da bismo dobili jednake korake u sjajnosti, intenzitet ne treba da bude opisan linearnom skalom, već logaritamskom

Izbor intenziteta

- Da bi se odredilo 256 intenziteta počev od I_0 pa do 1.0 potrebno je da postoji vrednost r koja odražava odnos dva susedna intenziteta:

$$I_0 = I_0, I_1 = rI_0, I_2 = rI_1 = r^2I_0, \dots, I_{255} = r^{255}I_0 = 1$$

$$r = (1/I_0)^{1/255}, I_j = r^j I_0 = I_0^{(255-j)/255}$$

- U opštem slučaju za n intenziteta važi:

$$r = (1/I_0)^{1/n}, I_j = r^j I_0 = I_0^{(n-j)/n}$$

- Minimalni intenzitet I_0 je za monitore obično negde između $1/200$ i $1/700$ maksimalnog intenziteta

Minimum intenziteta za monohromatsku sliku

- Koliki broj intenziteta je dovoljan da bi se reprodukovala crno-bela slika bez “skokova” na prelazu sa jednog intenziteta na drugi?
- Ljudsko oko može da razlikuje susedne površine za koje je odnos intenziteta veći od 1.01, te r treba da bude jednako 1.01 ili manje
- Minimum intenziteta koji daju prihvatljivu monohromatsku sliku je za većinu uređaja jednak 64

Gama korekcija

- Prikazivanje opisanih intenziteta boja na starim CRT monitorima nije bilo trivijalno i zavisi od konkretnog izlaznog uređaja
- Transformacija napona V elektronskog zraka u intenzitet svetlosti Y je **nelinearna**
- Intenzitet Y koji CRT emituje je proporcionalan sa V^γ , $\gamma \approx 2.5$
- Eksponent γ naziva se **gama** i smatra se merilom nelinearnosti uređaja za prikaz
- Često se koriste unapred izračunate vrednosti za određivanje napona tj. vrednosti za jedan piksel: korišćenje ovakvih unapred izračunatih tabela se naziva **gama korekcija**
- Ovo se ne odnosi na moderne LCD ekrane, kod kojih intenzitet svetla linearno zavisi od ulaza, ali se odnosi na npr. senzore kamera

Materijal za dalje čitanje

- Više o fizici svetlosti može se pročitati na:
“Color: From Hexcodes to Eyeballs
<http://jamie-wong.com/post/color/>”