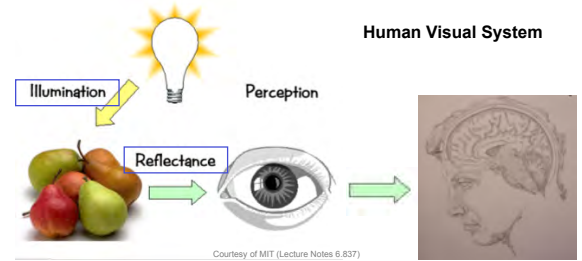


# Kolor w grafice komputerowej

Radosław Mantiuk

## Kolor == barwa

Kolor -> wrażenie **percepcyjne** wywołane przez światło



- Oko jest sensorem i wstępnie przetwarza informacje.
- Obraz powstaje w mózgu.
- Światło jest wiązką fal elektromagnetycznych.

## Interakcja światło <-> materiał

Rodzaje interakcji materiału ze światłem:

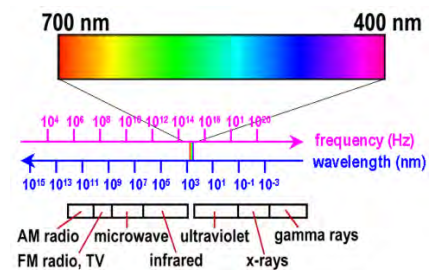
- **absorbacja** światła (ang. absorption) i transmisja światła (ang. transmission), załamania światła (ang. refraction) na granicy ośrodków,
- **rozproszenie** światła (ang. scattering, diffuse reflection) oraz odbicie światła (ang. reflection, specular reflection),
- **emisja** światła (ang. emission),
- **fluorescencja** (ang. fluorescence) - reemisja światła o większych długościach fali, fosforescencja (ang. phosphorescence) - reemisja światła przez określony czas

Znajomość własności absorbcyjnych i rozpraszających materiału pozwala przewidzieć jego kolor.

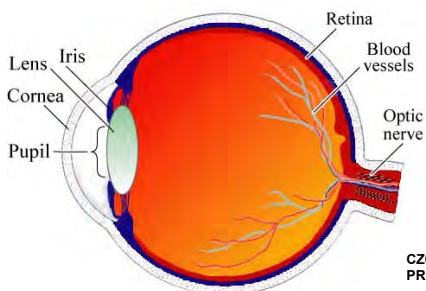
**perfect reflecting diffuser** - powierzchnia, która nie absorbuje ani nie transmituje światła, a jedynie odbija światło rozpraszając je w wszystkich kierunkach z takim samym natężeniem bez względu na sposób (kierunek) oświetlenia powierzchni

## Fala świetlna

Zakres widzialny fali elektromagnetycznej



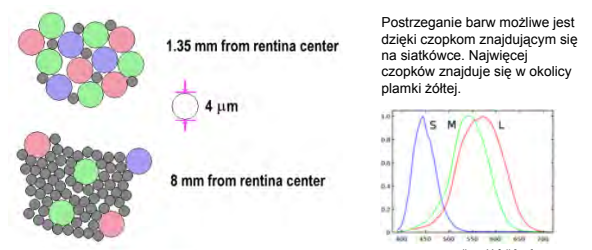
## Budowa oka człowieka



**CZOPKI** (ang. cones)  
**PRĘCIKI** (ang. rods)

## Czopki i pręciki

**czopki** - widzenie barwne w pełnym świetle (czułe na małe zmiany kontrastu)  
**pręciki** - widzenie zmierzchowe (retinen) (czułe na małe zmiany luminancji)



Czopki mogą być typu M, L bądź S. Różnią się od siebie czułością na określone długości fal świetlnych. Odpowiadają kolorom RGB.  
U ludzi z wadami postrzegania kolorów nie występują dane rodzaje czopków.

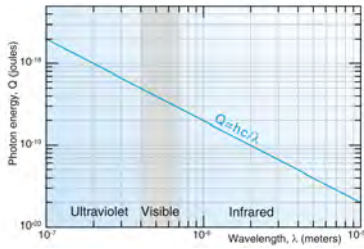
Pictures courtesy of MIT (Lecture Notes 6.837)

## Energia promieniowania elektromagnetycznego

Jednostki **radiometryczne** - pomiar fali elektromagnetycznej

Energia wyrażana w [J].  
 $c = 2.998 \times 10^8$  [m/s]  
 $h = 6.623 \times 10^{-34}$  [Js]

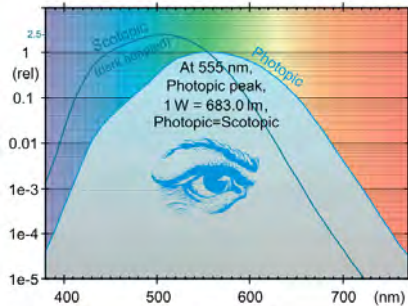
$$Q = hc / \lambda$$



## Jednostki fotometryczne: Konwersja

Uwzględnienie czułości oka na różne długości fal świetlnych.

**luminancja = f( długość fali ) \* radiancja**  
**1 watt at 555 nm = 683.0 lumens**



## Jednostki fotometryczne

### SI photometry units

Quantity	Symbol	SI unit	Abbr.	Notes
Luminous energy	$Q_v$	lumen second	lm·s	units are sometimes called <i>talbots</i>
Luminous flux	$F_v$	lumen (= cd·sr)	lm	also called <i>luminous power</i>
Luminous intensity	$I_v$	candela (= lm/sr)	cd	an SI base unit
Luminance	$L_v$	candela per square metre	cd/m <sup>2</sup>	units are sometimes called <i>nits</i>
Illuminance	$E_v$	lux (= lm/m <sup>2</sup> )	lx	Used for light <i>incident</i> on a surface
Luminous emittance	$M_v$	lux (= lm/m <sup>2</sup> )	lx	Used for light <i>emitted</i> from a surface
Luminous efficacy		lumen per watt	lm/W	ratio of luminous flux to <i>radiant flux</i> ; maximum possible is 683.002 lm/W

## Jednostki radiometryczne

Quantity	Symbol	SI unit	Abbr.	Notes
Radiant energy	$Q$	joule	J	energy
Radiant flux	$\Phi$	watt	W	radiant energy per unit time, also called <i>radiant power</i>
Radiant intensity	$I$	watt per steradian	W·sr <sup>-1</sup>	power per unit solid angle
Radiance	$L$	watt per steradian per square metre	W·sr <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup>	power per unit solid angle per unit <i>projected source area</i> . Sometimes confusingly called "intensity".
Irradiance	$E$	watt per square metre	W·m <sup>-2</sup>	power incident on a surface. Sometimes confusingly called "intensity".
Radiant exitance / Radiant emittance	$M$	watt per square metre	W·m <sup>-2</sup>	power emitted from a surface.
Radiosity	$J$ or $J_s$	watt per square metre	W·m <sup>-2</sup>	emitted plus reflected power leaving a surface

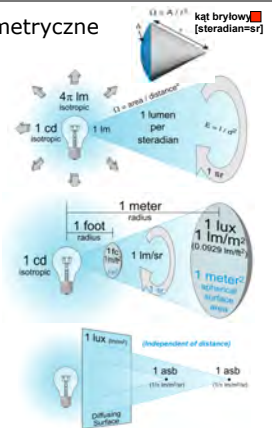
## Jednostki fotometryczne

**lumen [lm]** - moc promieniowania (energia emitowana w określonym czasie) emitowanego przez punktowe źródło światła  
 $dF = I \cdot d\Omega$

**candela [cd = lm/sr]** - intensywność promieniowania (ang. **intensity**), liczba lumenów emitowana przez punktowe źródło światła w danym kącie bryłowym  
 $dF = I \cdot d\Omega$

**lux [lx = lm/m<sup>2</sup>]** - emisja (ang. **emittance**), liczba lumenów emitowana przez źródło światła o danej powierzchni, **iluminacja** (ang. **illuminance**) to miara energii oświetlającej daną powierzchnię (ze wszystkich kierunków)  
 $dF = E \cdot dA$

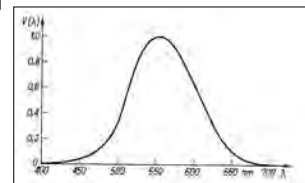
**nit [cd/m<sup>2</sup> = lm/(m<sup>2</sup>·sr)]** - luminancja (ang. **luminance**), liczba lumenów emitowana przez źródło światła o określonej powierzchni w danym kącie bryłowym lub miara energii docierającej do powierzchni z danego kąta bryłowego  
 $dF = B \cdot dS \cdot \cos\theta \cdot d\Omega$



## Miara ilości światła

**jaskrawość (B)** (ang. **brightness**) - miara wrażenia wzrokowego mówiąca czy powierzchnia emituje więcej, czy mniej światła

**jasność (Y)** (ang. **luminance**) - moc promieniowania wychodzącego z danej powierzchni w danym kierunku, wyrażona w jednostkach uwzględniających czułość oka dla różnych długości fali [cd/m<sup>2</sup>]



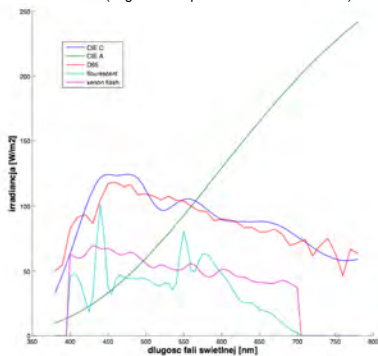
spectral sensitivity function

**lightness (L\*)** - luminancja z uwzględnieniem wrażenia percepcyjnego

$$L^* = 116 \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^3 - 16; \quad 0.008856 < \frac{Y}{Y_n}$$

## Widmowy rozkład energetyczny

(ang. SPD - Spectral Power Distribution)



$$M_\lambda = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial A \partial \lambda}$$

**widmowy rozkład energetyczny** - moc fali (ang. radiant flux) wychodzącej z danej powierzchni, liczona dla różnych długości fali

## Kolorymetria (ang. Colorimetry)

Dziedzina wiedzy i techniki zajmująca się badaniem kolorów widzianych przez człowieka.

**opis barwy za pomocą superpozycji trzech barw podstawowych** (ang. tristimulus colorimetry)

- punkt bieli (temperatura bieli)
- gama barw
- barwy podstawowe
- przestrzeń barw (sRGB, XYZ, L\*a\*b\*)

**Profile kolorów + CMS** (ang. Color Management System)

**Metameryzm** – zjawisko polegające na nie rozróżnieniu przez człowieka dwóch kolorów (źródeł światła) o różnym SPD

## Definiowanie barw

Podstawowa definicja barwy - SPD

- **definiowanie 3 wartości numerycznych, które odpowiadają danemu SPD**
  - przykładowe przestrzenie kolorów (ang. color space): CIE XYZ, CIE L\*u\*v\*, CIE L\*a\*b\*
- **color order system** - zestaw próbek kolorów, każda próbka odpowiada danemu SPD
  - np. **Munsell system**
- **w jakich proporcjach zmieszać różnokolorowe tusze, aby otrzymać dane SPD**
  - np. **PANTONE system**

## Cechy barwy

- **cechy barwy**

ilościowa -> **jasność** (ang. **luminance**) - natężenie światła na siatkówce

jakościowe

**nasycenie** (ang. **saturation**) - różnica pomiędzy danym kolorem i kolorem szarym

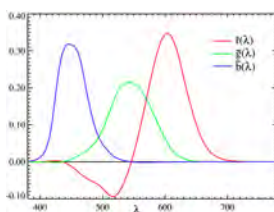
**odcień** (ang. **hue**) - "kolor" barwy

- barwy **monochromatyczne** (tęcza, pryzmat)
- barwy **achromatyczne** (szare, o zerowym nasyceniu)
- barwy **chromatyczne**

## Przestrzeń barw: CIE RGB (1)

**funkcje dopasowania barw** (ang. **color-matching functions**) - jaka ilość każdej z trzech barw podstawowych jest potrzebna do dopasowania wszystkich długości fal w widmie widzialnym

$$Q_\lambda = \bar{r}(\lambda) \cdot R + \bar{g}(\lambda) \cdot G + \bar{b}(\lambda) \cdot B$$



Ujemne wartości R. Trudności z uzyskaniem stabilnych barw podstawowych na monitorach.

**R,G,B - barwy podstawowe**

700 nm (red)  
546.1 nm (green)  
435.8 nm (blue)

Funkcje dopasowania barw dla barw CIE RGB - wyznaczone eksperymentalnie CIE 1964 standard observer

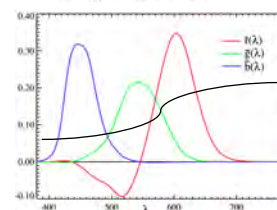
## CIE RGB (2)

Obliczenie wartości R, G i B dla koloru I (podanego poprzez rozkład spektralny).

$$R = \int_0^{\infty} I(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda$$

$$G = \int_0^{\infty} I(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda$$

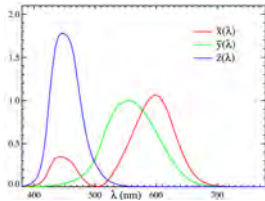
$$B = \int_0^{\infty} I(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda$$



## Funkcje dopasowania barw CIE XYZ

Funkcje dopasowania barw dla barw CIE XYZ (CIE 1931 standard observer) (CIE Międzynarodowa Komisja Oświetlenia).

### Przestrzeń koloru CIE XYZ



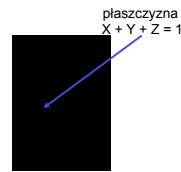
- XYZ - kolory podstawowe (ang. color primaries)
- Y odpowiada luminancji.
- Brak ujemnych wartości.
- XYZ kolory teoretyczne (nie można ich wygenerować na monitorze).
- $x = y = z = 1/3$  (punkt bieli)
- liniowa transformacja pomiędzy RGB i XYZ

$$Q_\lambda = \bar{x}(\lambda) \cdot X + \bar{y}(\lambda) \cdot Y + \bar{z}(\lambda) \cdot Z$$

$$X = \int_{380}^{830} Q_\lambda \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad Y = \int_{380}^{830} Q_\lambda \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad Z = \int_{380}^{830} Q_\lambda \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

## Wykres chromatyczności CIE

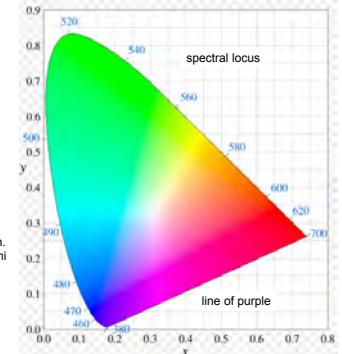
(ang. chromaticity diagram)



- Wszystkie barwy widziane przez człowieka.
- Barwy monochromatyczne na brzegach.
- Odlegość kartezjańska między punktami na wykresie to różnica między barwami (ale nie w sensie percepcyjnym).
- Barwy pośrednie leżą na linii łączącej barwy bazowe.

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

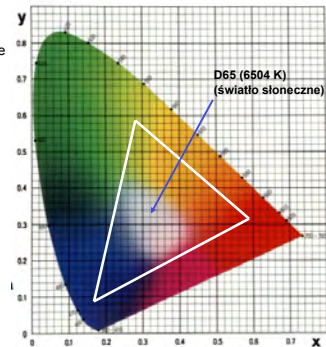
$$z = 1 - x - y$$



wykres chromatyczności to rzut płaszczyzny  $X + Y + Z = 1$  na płaszczyznę xy

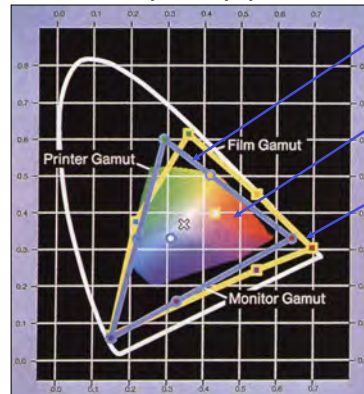
## Gama barw (ang. color gamut)

Trzy barwy podstawowe tworzą trójkąt wyznaczający barwy możliwe do uzyskania w danej gamie barw.



Pictures courtesy of MIT (Lecture Notes 6.837)

## Przykłady przestrzeni kolorów



(ang. color spaces)

**addytywne - RGB**  
Red, Green, Blue

**substraktywne - CMYK**  
Cyan, Magenta, Yellow  
K - poprawa kontrastu

**addytywne - YUV**  
Y - luminancja  
U, V - chrominancja  
liniowe przekształcenie układu RGB (4:2:2 rejestracja)

**inne modele barw (liniowe i nieliniowe):**  
HSV, HLS, YIQ (NTSC), YCbCr, RGyB, CIE LUV, CIE LAB, TekHVC

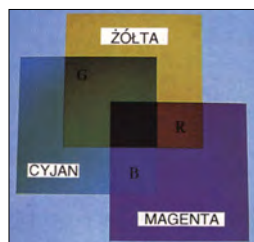
## Przestrzeń koloru

**przestrzeń koloru** - wyodrębniony podzbiór trójwymiarowego systemu współrzędnych barw, w którym leżą wszystkie barwy z określonej **gamy barw**

- wygodne zdefiniowanie barwy w obrębie danej gamy barw
- modele związane ze sprzętem: RGB - monitory, YUV - telewizja, CMYK - druk



model barw **addytywne**



model barw **substraktywne**

## Adaptacja do chromatyczności





## Punkt bieli (ang. white point)(1)

Kolor najjaśniejszego obiektu na scenie (np. źródła światła).  
Względem tego koloru obliczane są pozostałe kolory na scenie.

Kolor wybranego białego obiektu znajdującego się na danej scenie.

- W **przestrzeniach addytywnych** SPD przyporządkowane równym wartościom kolorów podstawowych,
- w **przestrzeniach subtraktywnych** SPD źródła światła wyrażone przez SPD powierzchni.

- Nie ma jednoznacznej definicji koloru białego.
- Jeżeli wybrany biały obiekt ma własności idealnie odbijające, kolor punktu bieli jest taki sam jak kolor źródła światła.
- Punkt bieli definiuje się jako  $Y_{xy}$  lub jako **temperaturę punktu bieli** (np. D65 - 6504K).

## Temperatura koloru (ang. color temperature)

SPD obiektu (ang. black body radiator) rozgrzanego do określonej temperatury.

- 1700 K: Match flame
- 1850 K: Candle
- 2800 K: Tungsten lamp (incandescent lightbulb)
- 3350 K: Studio "CP" light
- 3400 K: Studio lamps, photofloods, etc...
- 4100 K: Moonlight
- 5000 K: Typical warm daylight
- 5500-6000 K: Typical cool daylight, electronic flash (can vary between manufacturers)
- 6420 K: Xenon arc lamp
- 6500 K: Daylight\*
- 9300 K: TV screen (analog) screen (analog)

D65 ->

**Dostosowanie punktu bieli** (ang. **white balancing**) - zmiana koloru punktu bieli powodująca zmianę koloru pikseli obrazu (transformację przestrzeni kolorów).

## Transformacja przestrzeni koloru (1)

Konwersja pomiędzy liniowymi przestrzeniami kolorów (np. CIE XYZ i CIE RGB) polega na wymnożeniu koloru przez macierz transformacji (3x3).

Do przekształcenia konieczna jest znajomość bezwzględnego koloru punktu bieli oraz bezwzględnego koloru trzech barw podstawowych.

Równanie konwersji dla kolorów podstawowych RGB i standardowego punktu bieli (BT.709).

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

$\downarrow$                        $\downarrow$                        $\downarrow$   
 R                      G                      B

## Transformacja przestrzeni koloru (2)

Równanie konwersji dla dowolnych kolorów podstawowych R ( $x_R, y_R, z_R$ ), G ( $x_G, y_G, z_G$ ), B ( $x_B, y_B, z_B$ ) i dowolnego punktu bieli ( $X_w, Y_w, Z_w$ ).

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_R S_R & x_G S_G & x_B S_B \\ y_R S_R & y_G S_G & y_B S_B \\ z_R S_R & z_G S_G & z_B S_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad * \text{Luminance}$$

Obliczenie **S** - szukanie współczynników, które po wymnożeniu przez barwy podstawowe dadzą punkt bieli.

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_R S_R & x_G S_G & x_B S_B \\ y_R S_R & y_G S_G & y_B S_B \\ z_R S_R & z_G S_G & z_B S_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \longrightarrow \quad \begin{aligned} X_w &= x_R S_R + x_G S_G + x_B S_B \\ Y_w &= y_R S_R + y_G S_G + y_B S_B \\ Z_w &= z_R S_R + z_G S_G + z_B S_B \end{aligned}$$

## Transformacja przestrzeni koloru (3)

Obliczenie współczynników uwzględniających położenie punktu bieli.

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_r & x_g & x_b \\ y_r & y_g & y_b \\ z_r & z_g & z_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}$$

Color primaries

$$\begin{aligned} D &= (x_r - x_b)(y_g - y_b) - (y_r - y_b)(x_g - x_b) \\ U &= (x_w - x_b)(y_g - y_b) - (y_w - y_b)(x_g - x_b) \\ V &= (x_r - x_b)(y_w - y_b) - (y_r - y_b)(x_w - x_b) \\ u &= U/D \\ v &= V/D \\ w &= 1 - u - v \end{aligned}$$

## Korelacja pomiędzy kanałami koloru

W naturalnych obrazach pomiędzy kanałami RGB występuje duża korelacja (jeżeli jedna ze składowych ma duże wartości pozostałe też będą takie miały).

Korelacje można zmniejszyć konwertując kolor do przestrzeni przeciwstawnych kolorów (ang. **color opponent space**):

- **luminacja**,
- **red-green**,
- **yellow-blue**.

$$RGB \rightarrow YC_B C_R$$

Konwersja wykorzystywana np. do kompresji JPEG. Kanał Y jest najważniejszy (pod względem percepcyjnym), dlatego można mocniej kompresować kanały chrominancji.

## Profile ICC: Color Management System



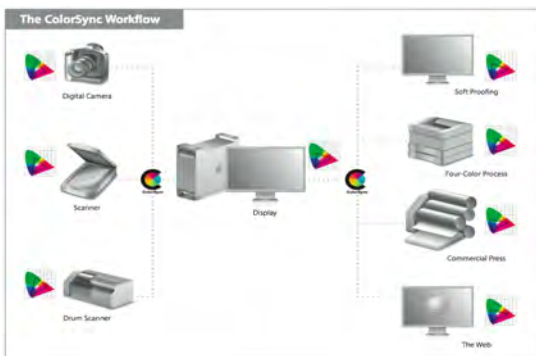
**Kolorymetr**  
Pomiar krzywej gamma (dla składowych koloru RGB), punktu bieli, punktu czerni, kolorów podstawowych RGB.

## Profile ICC: Kalibracja monitora

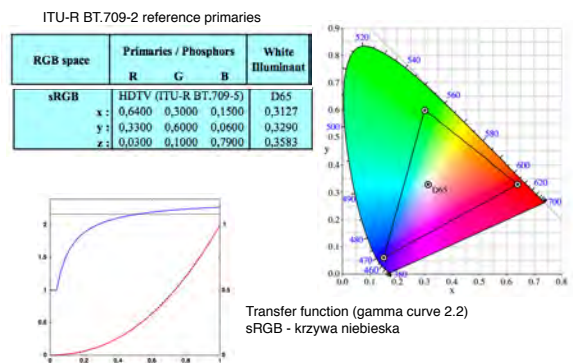
**Kalibracja** - pomiar parametrów monitora i wykorzystanie tych parametrów do rozszerzenia zakresu jasności, kontrastów oraz kolorów.



## Profile ICC: CMS



## Profil koloru - Model sRGB



## Profil sRGB – konwersja krzywej gamma

przestrzeń liniowa -> sRGB

$$V = \begin{cases} 12.92v & v \leq 0.0031308 \\ 1.055v^{1/2.4} - 0.055 & v > 0.0031308 \end{cases}$$

sRGB -> przestrzeń liniowa

$$v = \begin{cases} V/12.92 & V \leq 0.04045 \\ ((V + 0.055)/1.055)^{2.4} & V > 0.04045 \end{cases}$$

## Profile ICC (2)

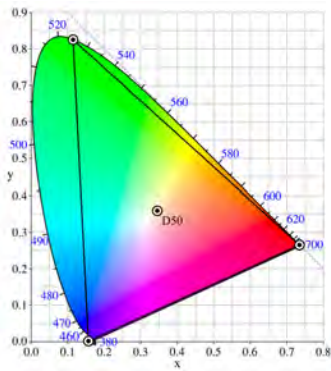
Konwersja:

- koloru z uwzględnieniem punktu bieli
- uwzględnienie funkcji transferującej (krzywej gamma)

**Gamut mapping** - konwersja koloru z jednej przestrzeni barw do innej przestrzeni barw

**Rendering intent** (perceptual, relative colorimetric, absolute colorimetric, saturation) sposób w jaki przeprowadzana jest konwersja

## Adobe Wide Gamut RGB Color Space



## Model CIE L\*a\*b\* (1)

Opracowany z myślą o pomiarze różnic między kolorami. Pomiar różnicy w CIE Lab polega na obliczeniu odległości euklidesowej pomiędzy poszczególnymi parametrami modelu.  
**Przeźreń koloru jednorodna percepcyjnie.**

L\* - jasność (ciemny - jasny)  
a\* - czerwono-zielony ( = 0 dla barw achromatycznych)  
b\* - żółto-niebieski ( = 0 dla barw achromatycznych)

$(L, a, b) = f(X, Y, Z, X_0, Y_0, Z_0)$ ,  
gdzie  $(X_0, Y_0, Z_0)$  to biały kolor odniesienia.

Pomiar różnicy między kolorami:

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2}$$



## Model CIE L\*a\*b\* (2)

CIE Lab nie jest przestrzenią idealnie jednorodną pod względem percepcyjnym (dla a i b występują dość znaczne odchylenia).

Wady modelu CIE Lab:

- modyfikacja transformacji von Kries' a - spadek dokładności (niewłaściwe modelowanie adaptacji chromatycznej),
- brak możliwości pomiaru efektów zależnych od zmiany luminancji (np. efektu Hunt' a),
- nie uwzględnia wpływu tła (ang. background) i otoczenia (ang. surround),
- brak szacowania brightness i colorfulness

## Model CMYK

Stosowany w technologiach poligraficznych i fotograficznych.

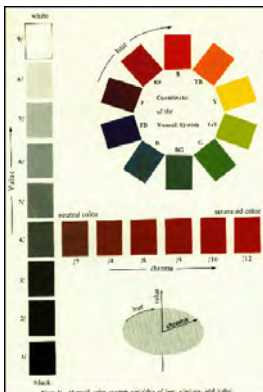
C - cyan  
M - magenta  
Y - yellow  
K - black

**Konwersja RGB -> CMYK**

C = 1.0 - R - Kb  
M = 1.0 - G - Kb  
Y = 1.0 - B - Kb  
K = Kb

$Kb = \min\{1.0 - R, 1.0 - G, 1.0 - B\}$

## Munsell Color System



- Kolor opisywany wartościami H V/C (Hue, Value, Chroma).
- Wartości wyskalowane w **przestrzeni percepcyjnej** (podziałka jednorodna w sensie percepcyjnym).
- Value == Lightness

Niejednorodny cylinder; wzdłuż osi symetrii Lightness (10 poziomów), wzdłuż obwodu przekroju Hue (5 kolorów podstawowych i 5 pośrednich), od osi na zewnątrz w płaszczyźnie przekroju Chroma (różna liczba poziomów w zależności od Lightness).



Professor Albert H. Munsell, *Munsell Book of Color*

## Definiowanie barw



PANTONE Matching System