

Wykład 2

Modele kolorów

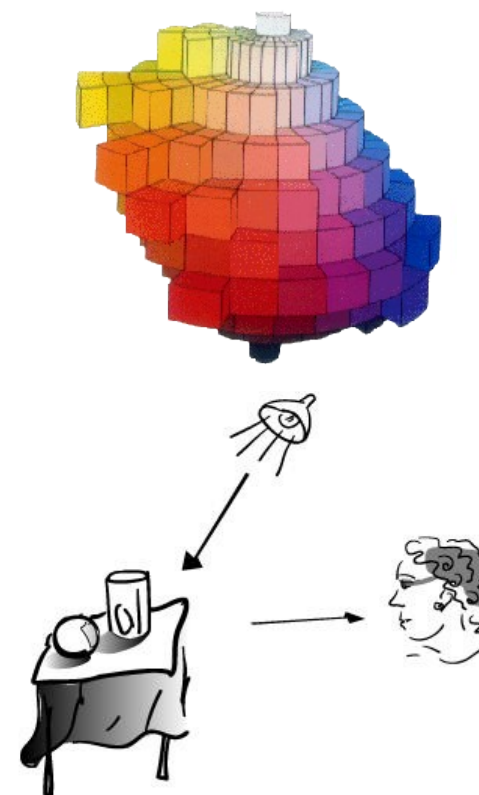
dr Marcin Denkowski

AGENDA

- Co to jest światło?
- Jak postrzegamy kolor?
- Cyfrowa reprezentacja
- Model RGB
- Komisja CIE
- Model XYZ
- Modele $L^*a^*b^*$, $L^*u^*v^*$
- Modele HSV, HSL, etc.

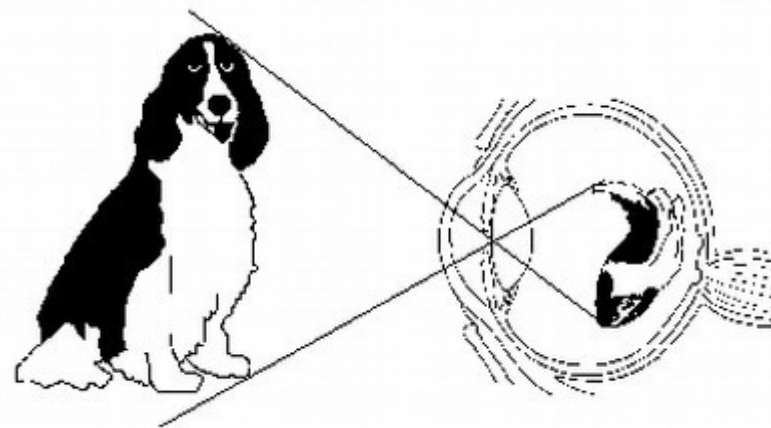
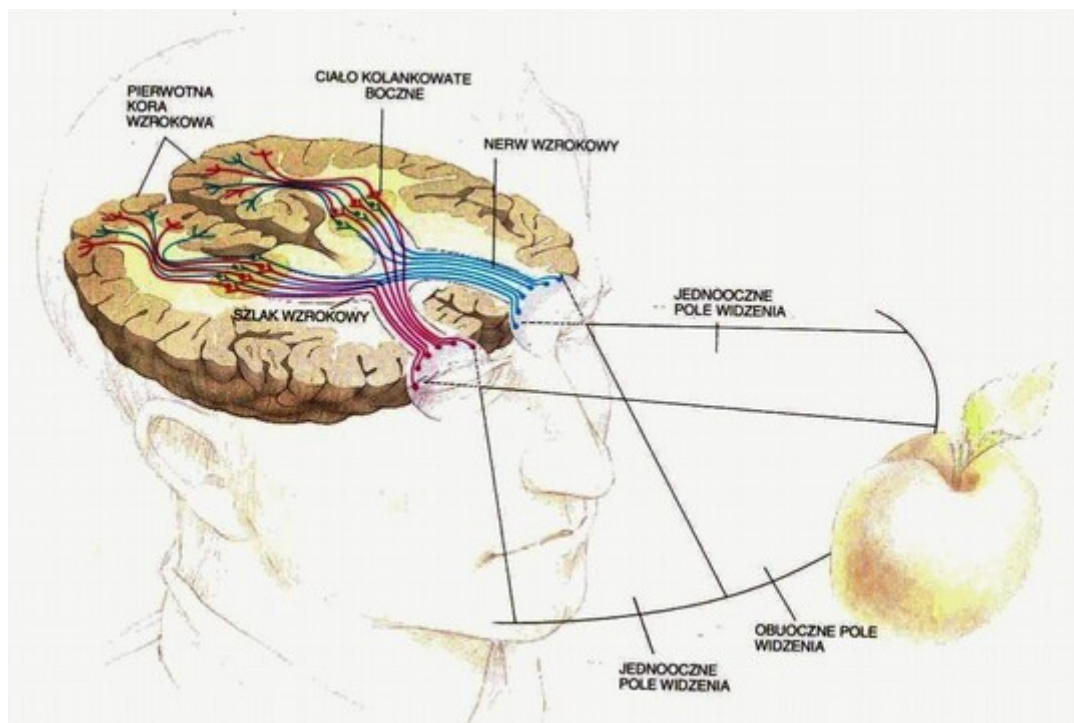
PROBLEM KOŁORU

- Skomplikowany temat – fizyka, fizjologia, psychologia, sztuka
- Wiele teorii, technik, norm
- Brak jednolitej teorii ludzkiej percepcji
- Kolor przedmiotu zależy nie tylko od samego obiektu, ale także źródła światła oświetlającego, koloru otaczającej obszar, oraz ludzkiego układu wizualnego (oko/mózg)
- Niektóre obiekty odbijają/rozpraszają światło, a inne przepuszczają światło
- Powierzchnia, która odzwierciedla wyłącznie czyste niebieskie światło oświetlone czystym czerwonym wydaje się czarna
- Czyste zielone światło oglądane przez szybę, która transmituje tylko czysty czerwony wydaje się również czarna



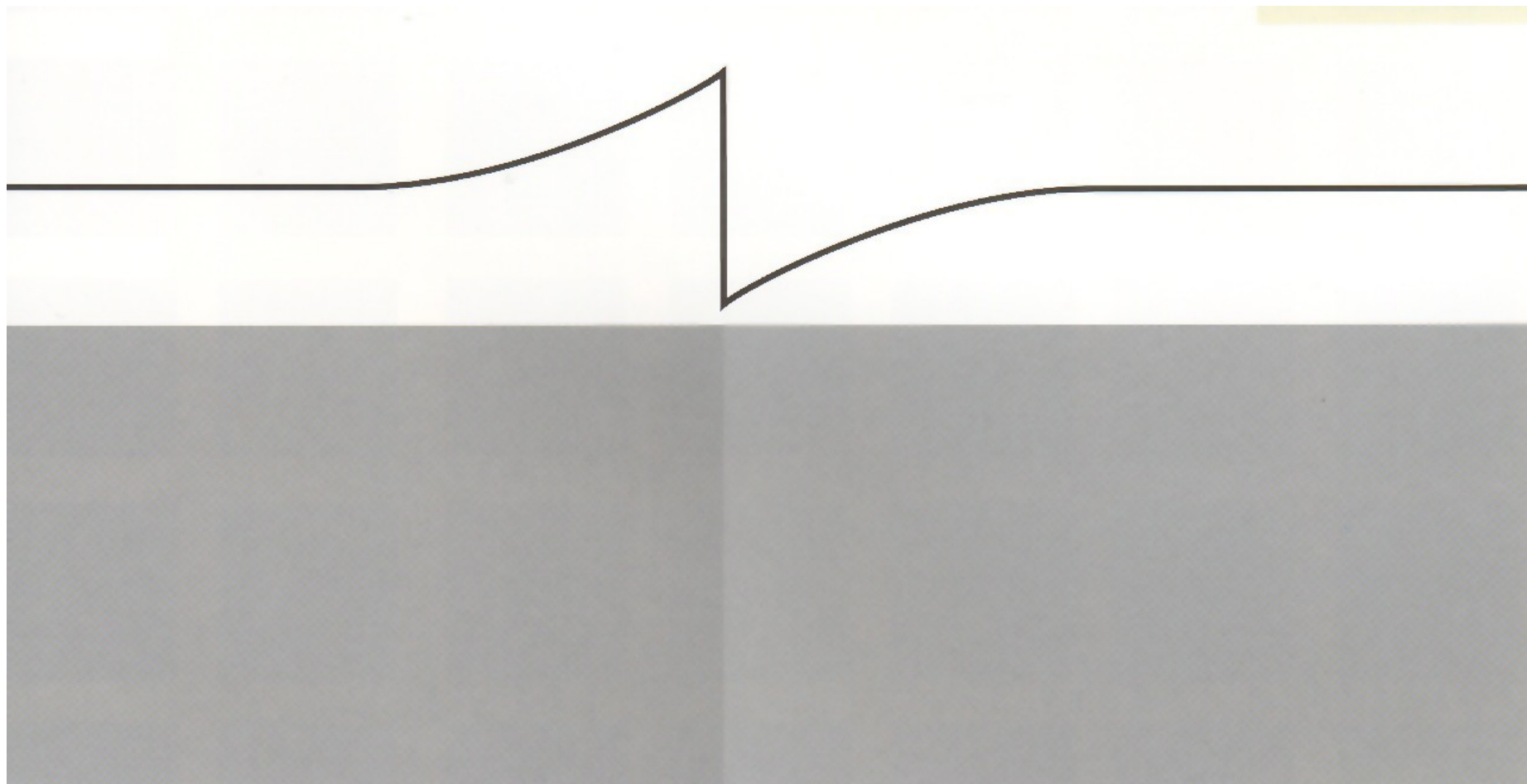
ZMYŚŁ WZROKU

- Zmysł wzroku to nie tylko oczy
- Cały mechanizm rozpoznawania i interpretowania
- Większa wrażliwość na kształt niż kolor
- Postrzeganie danego przedmiotu zmienia się w zależności od oświetlenia i otoczenia

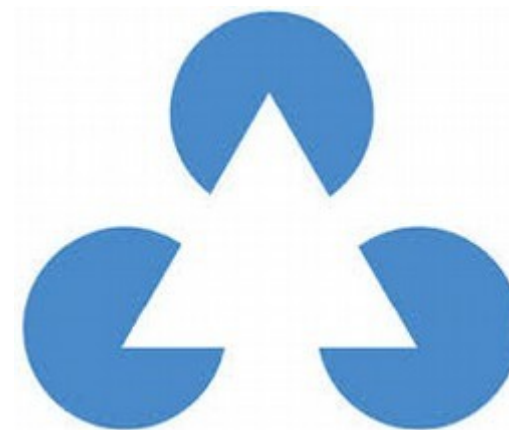
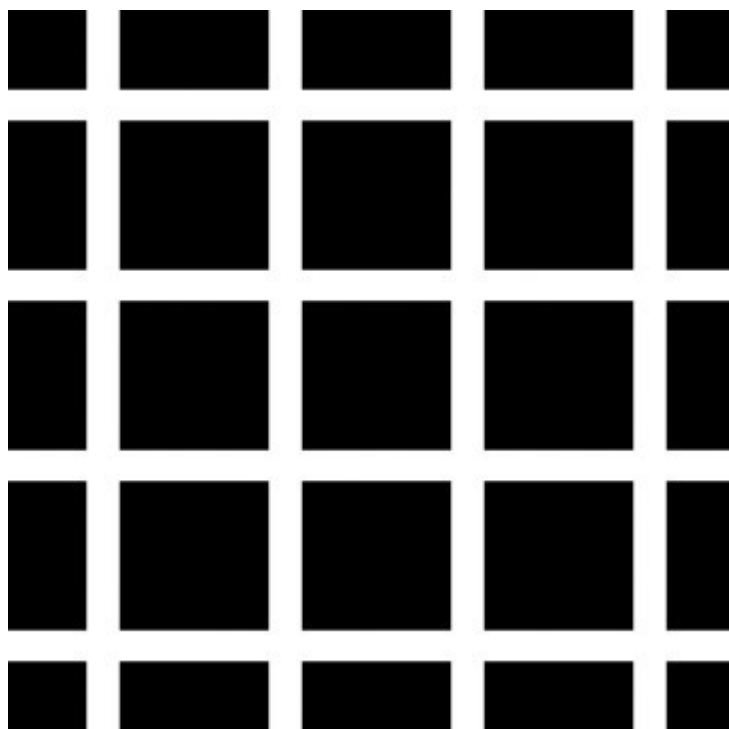


ILUZJE

- Widzimy tylko kontrast na krawędzi
- Nie widzimy gradientu



KRATA HERMANNA





This is the same gray as the center of the **O** in **OFF**



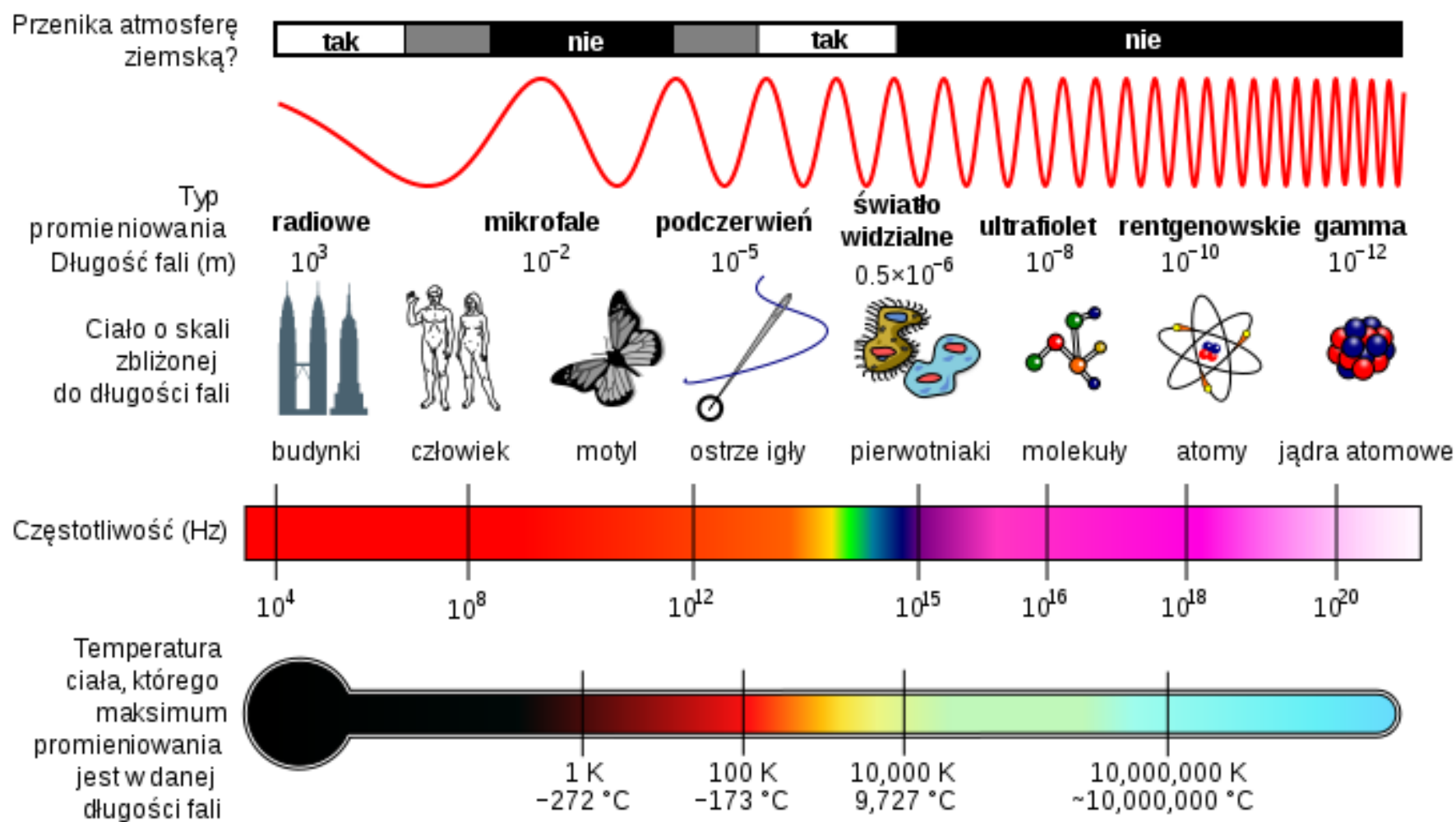
This is the same gray as the top part of the **S** in **GLOVES**

ODWZOROWYWANIE KOLORÓW

- Jak odwzorowywać kolory?
 - przez nazwy
 - przez wzorniki RAL, PANTONE
 - Mansell system
 - pigmentami
- W jakich warunkach?



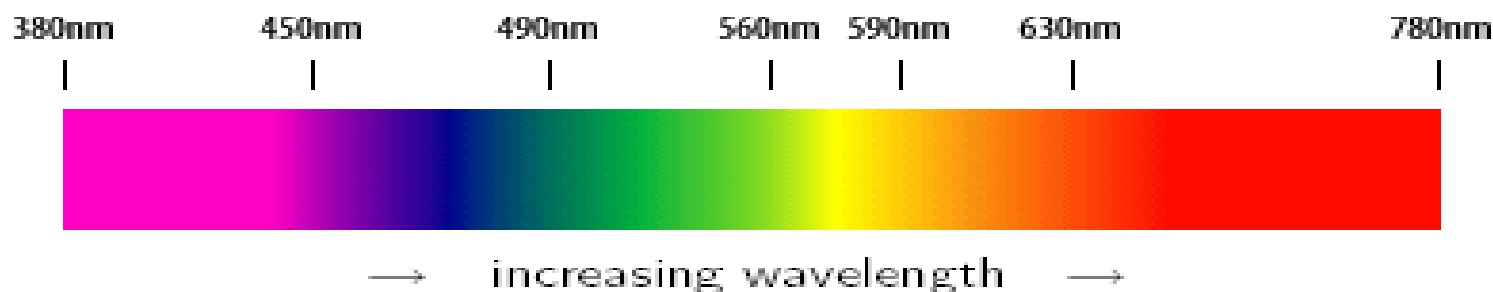
FALA ELEKTROMAGNETYCZNA



Źródło: wikipedia

ZAKRES WIDZIALNY

Część widzialna widma EM (dla człowieka) rozciąga się:
400 nm (fiolet) – 700 nm (czerwień).



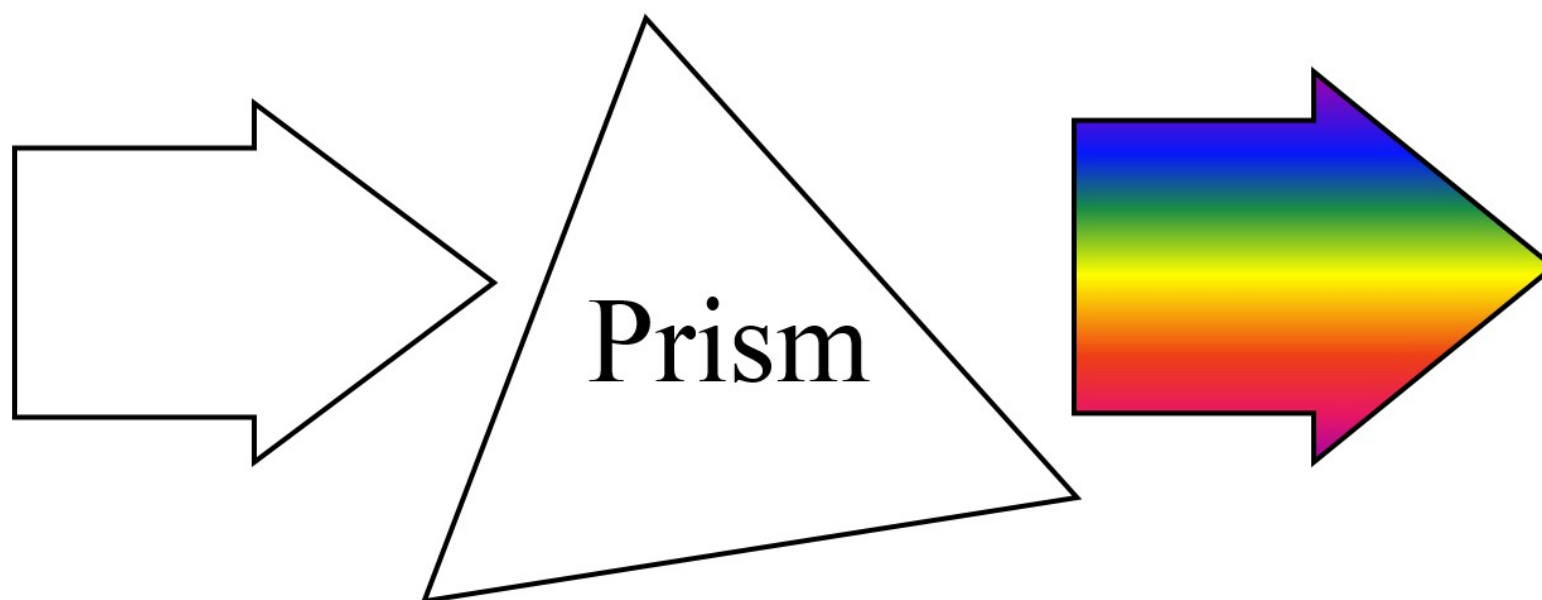
- Parametrami światła są długość fali (λ) i częstość (f).
Prędkość światła c w próżni wynosi około 3×10^8 m/sek.

$$\text{prędkość światła} = \text{długość fali} * \text{częstość}$$
$$c = \lambda f$$

- Prędkość światła w materiale jest mniejsza niż w próżni, współczynnik załamania (ang. index of refraction) materiału jest to stosunek prędkości światła w próżni do prędkości światła w materiale.

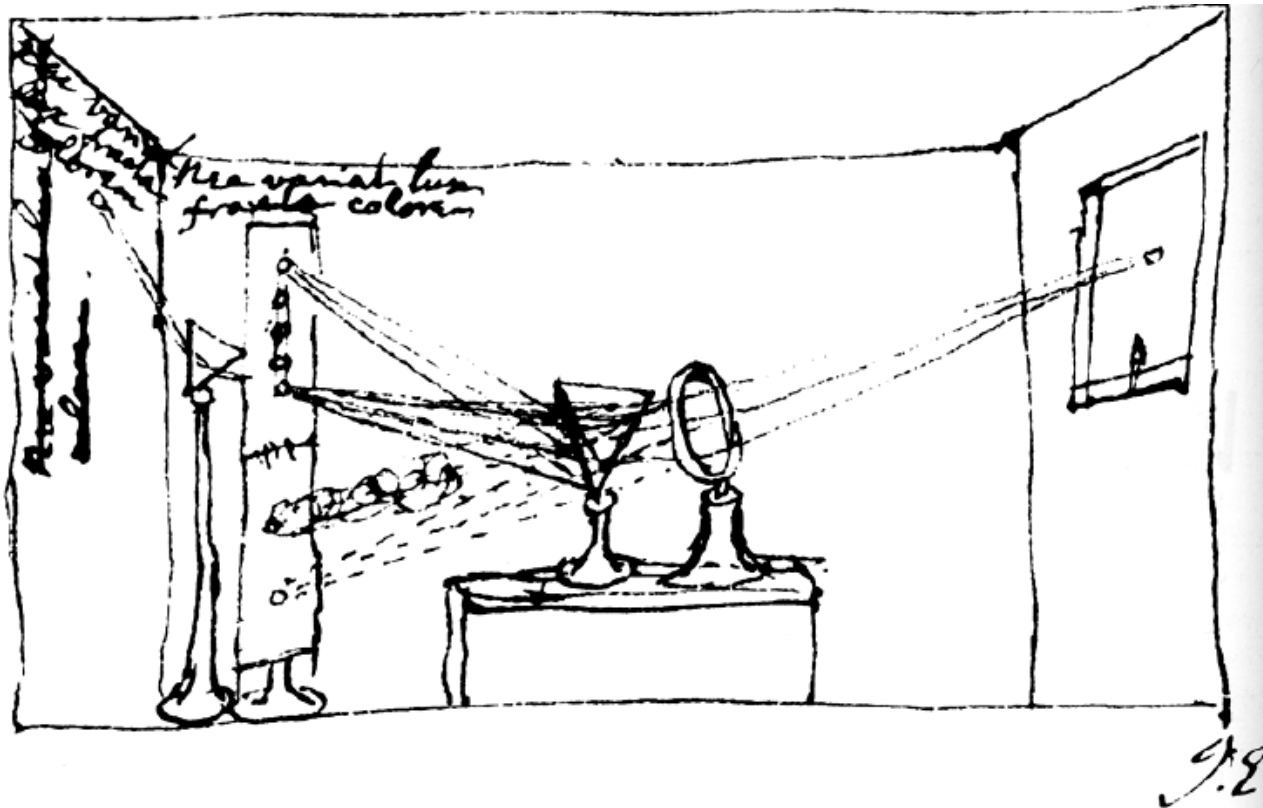
ŚWIATŁO BIAŁE

- Newton pokazał, że białe światło złożone jest z całego widma kolorów.



- Czyste, monochromatyczne światło oznacza światło, które składa się promieniowania elektromagnetycznego o jednej długości fali. Jest to rzadki przypadek (światło laserowe)

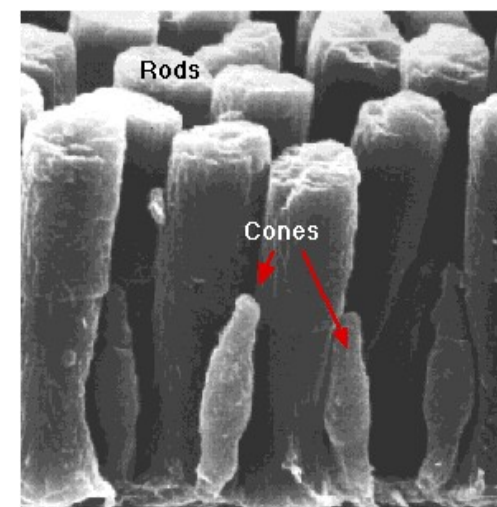
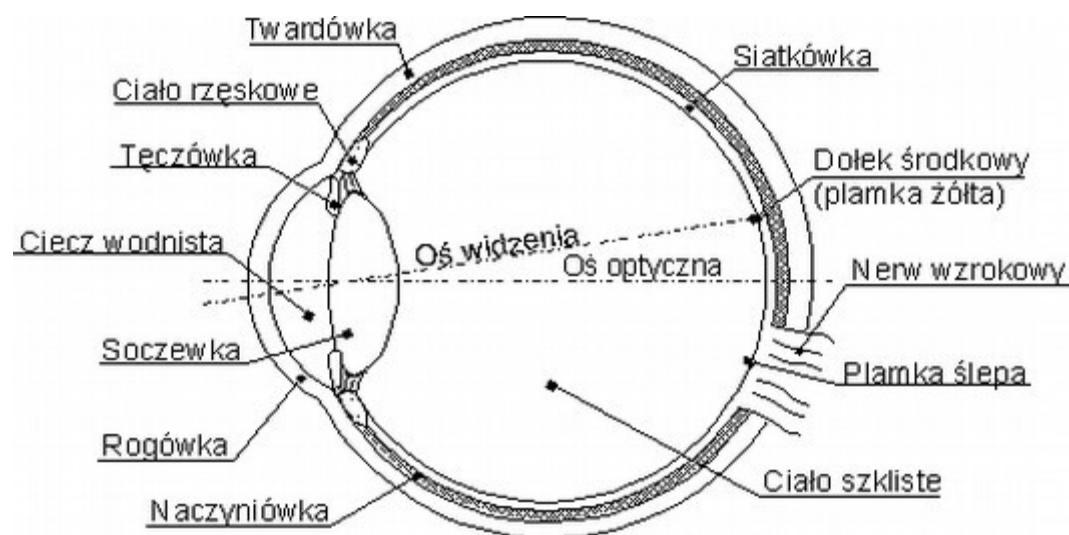
EKSPERYMENT NEWTONA



4.1 NEWTON'S SUMMARY DRAWING of his experiments with light. Using a point source of light and a prism, Newton separated sunlight into its fundamental components. By recombining the rays, he also showed that the decomposition is reversible.

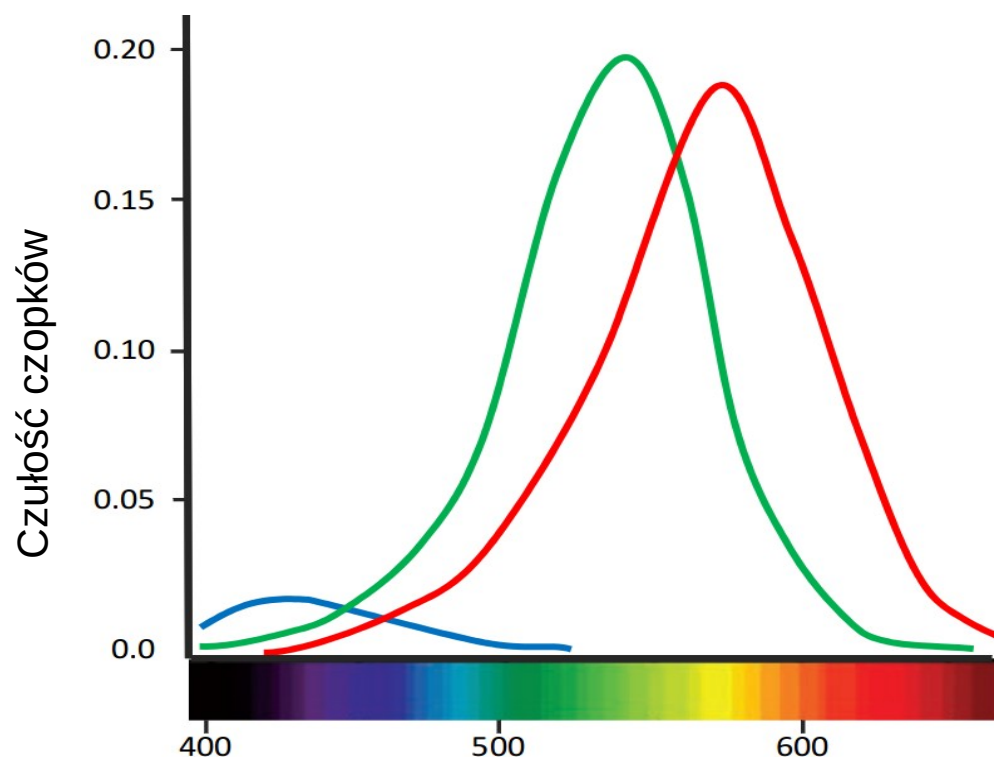
WIDZENIE

- Pojedyncza soczewka (11) daje obraz odwrócony
- Siatkówka (14) – fotoreceptory
 - Czopki** – ok. 4mln, 3 typy, niewielka czułość, wysoka ostrość, skupione w środku siatkówki
 - Pręciki** – ok. 90 mln, 1 typ, b. duża czułość, mała ostrość, rozproszone
- Widzenie fotopowe (dienne)
- Widzenie skotopowe (nocne)
- Widzenie mezopowe (przejściowe)



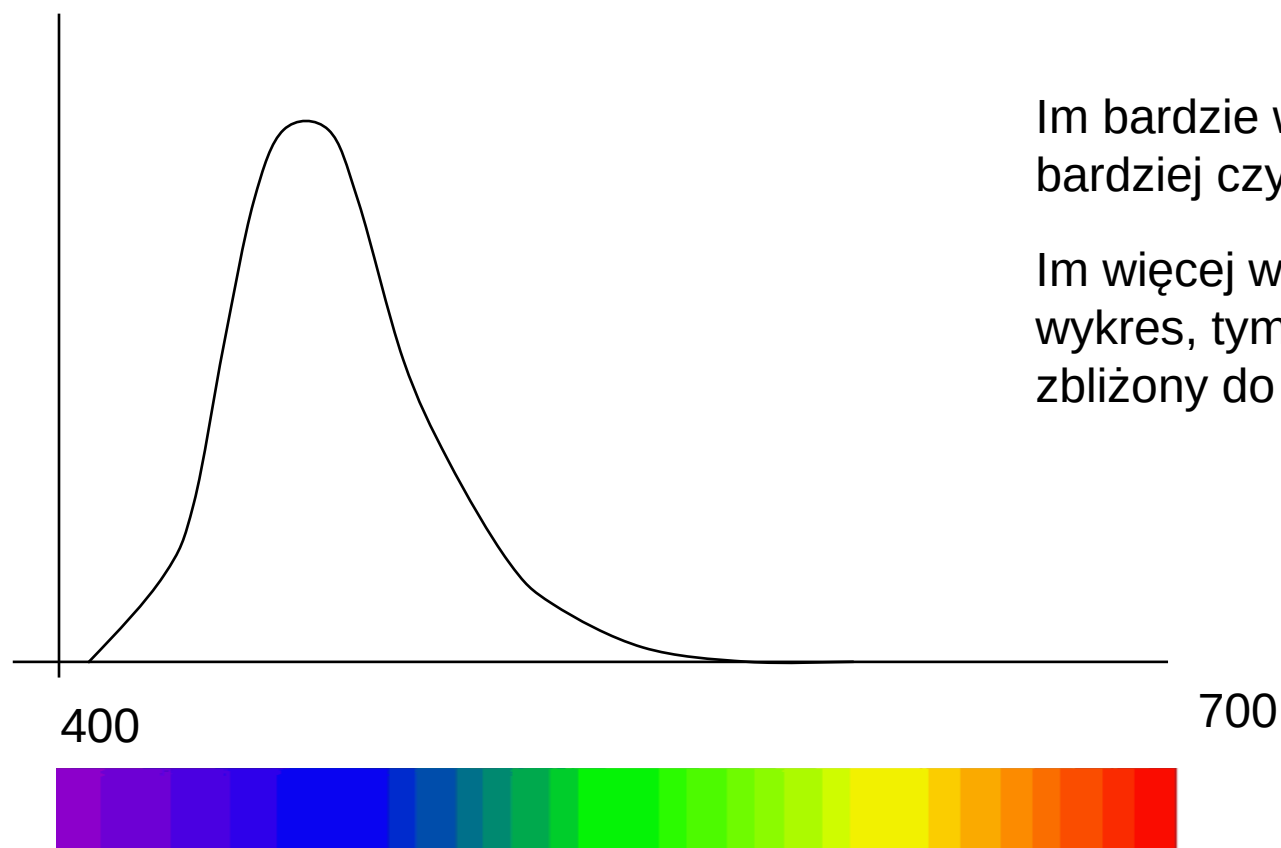
WIDZENIE FOTOPOWE

- Trzy rodzaje czopków
 - erythrolabe – $\lambda = 590$ nm, wywołujące wrażenie czerwieni
 - chlorolabe – $\lambda = 540$ nm, wrażenie zieleni
 - cyanolabe – $\lambda = 450$ nm, wrażenie barwy niebieskiej



ROZKŁAD MOCY WIDMOWEJ

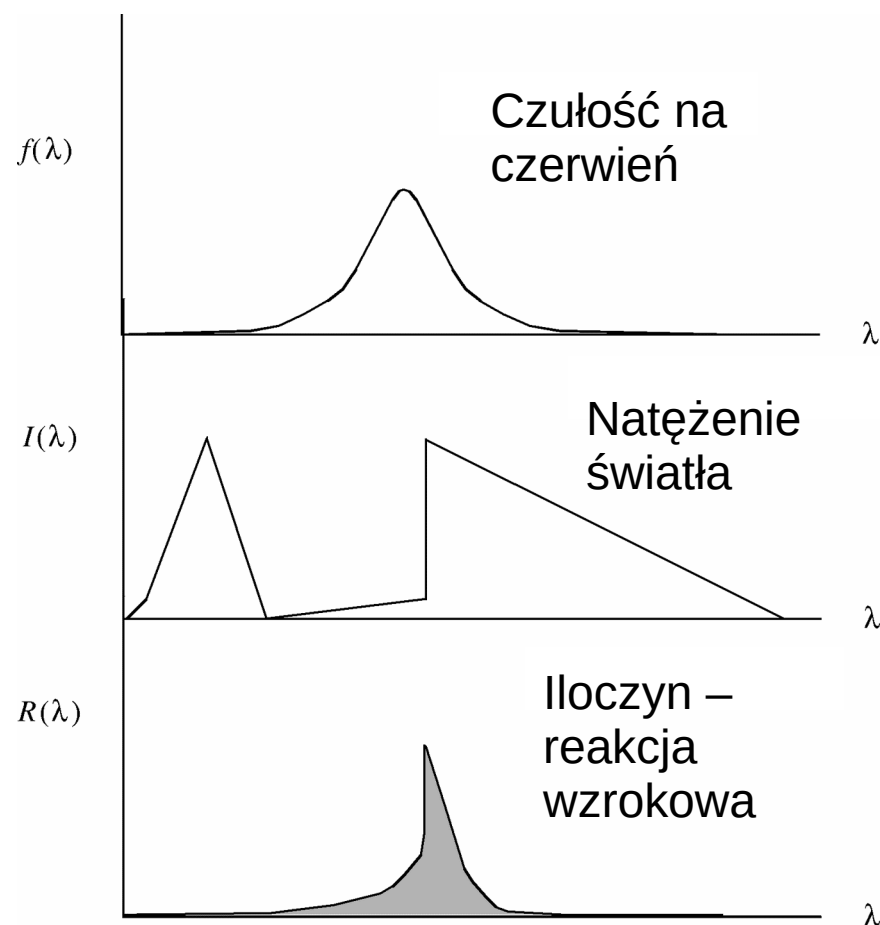
- Rozkład **mocy widmowej** (ang. *the spectral power distribution* - **spd**) konkretnego koloru przedstawia natężenie światła dla każdej długości fali pomiędzy 400nm i 700 nm, która ten kolor zawiera, np. poniższy wykres pokazuje kolor niebieski.



Im bardziej wąska krzywa, tym bardziej czysty jest kolor.

Im więcej widma obejmuje wykres, tym bardziej kolor jest zbliżony do białego.

REAKCJA WZROKOWA



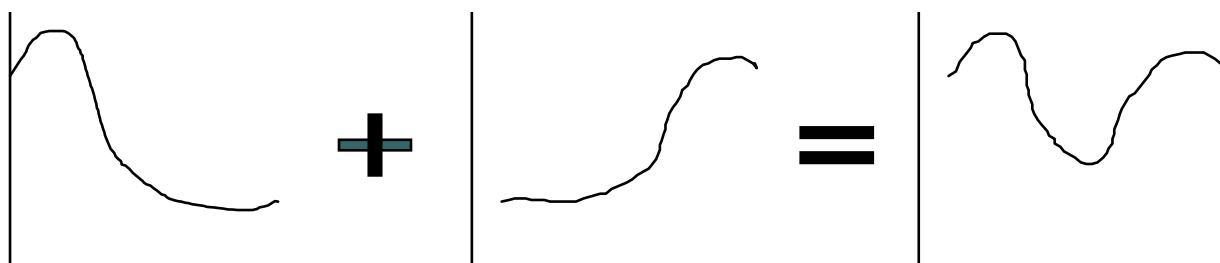
- Szare pole pod wykresem – to co rejestrują receptory (ang. *respons to stimuli*)

Reakcja na czerwień:

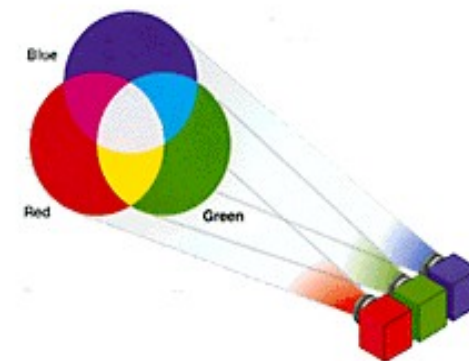
$$r(\lambda) = \int R(\lambda) d(\lambda) = \int I(\lambda) f(\lambda) d\lambda$$

SKŁADANIE BARW

- Newton pokazał, że mieszanie dwóch linii spektralnych (*spd*) jest równoważne zwykłemu dodawaniu.



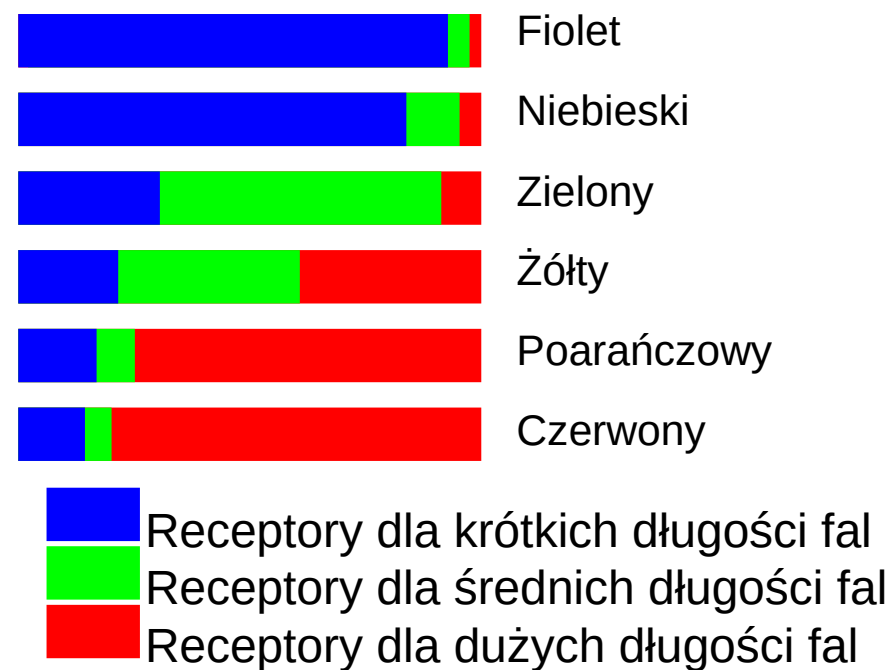
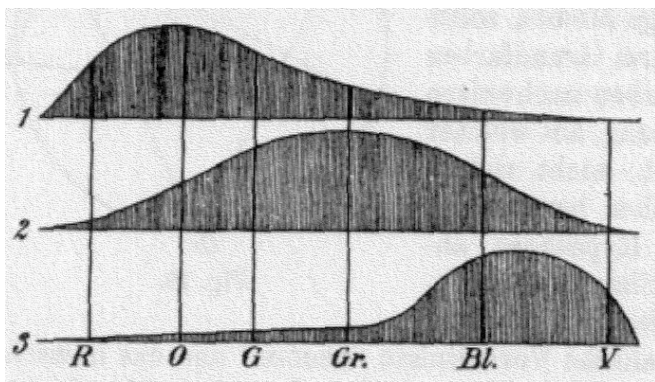
- W 1801 Young pokazał, że każdy kolor może być otrzymany przez mieszanie różnych ilości **trzech podstawowych kolorów** (*ang. primary colours*), np. **czerwonego**, **zielonego** i **niebieskiego**.



TEORIA YOUNGA-HELMHOLZA (1859)

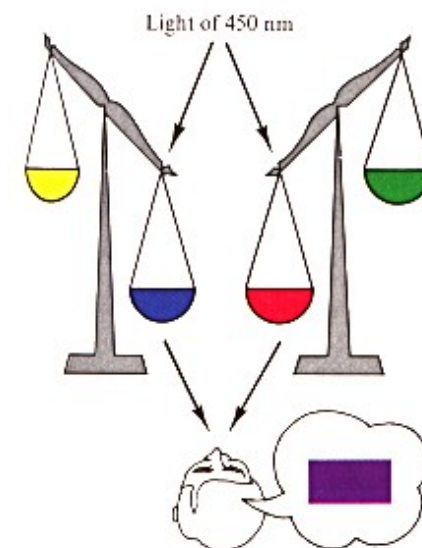
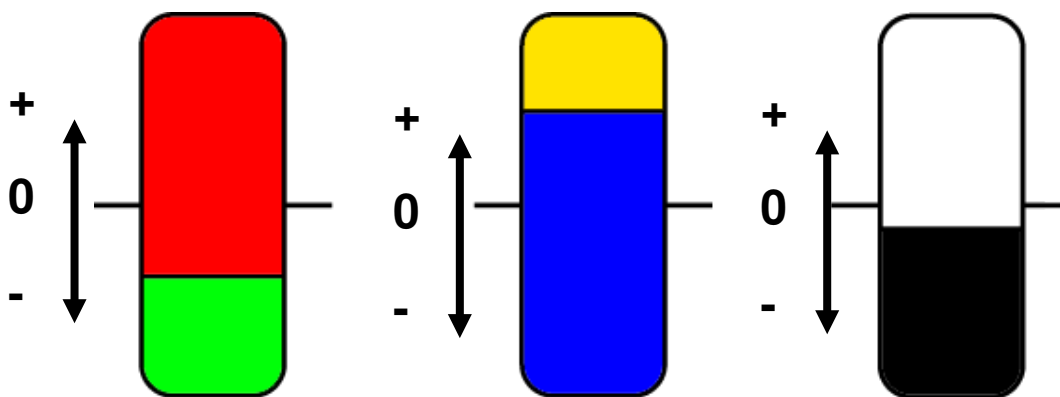
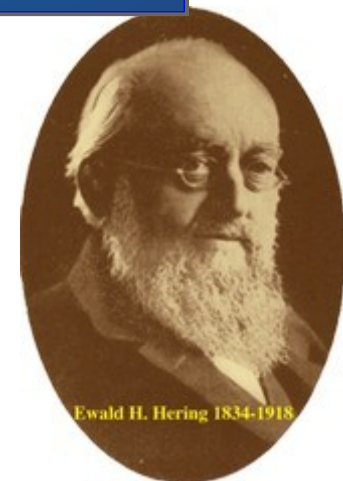
- Teoria tróchromatyczna
- Trójskładnikowa teoria widzenia barwnego
- Model z trzema ortogonalnymi kolorami bazowymi
- Liniowe składanie kolorów

$$C_1 + C_2 = (R_1 + R_2) + (G_1 + G_2) + (B_1 + B_2)$$



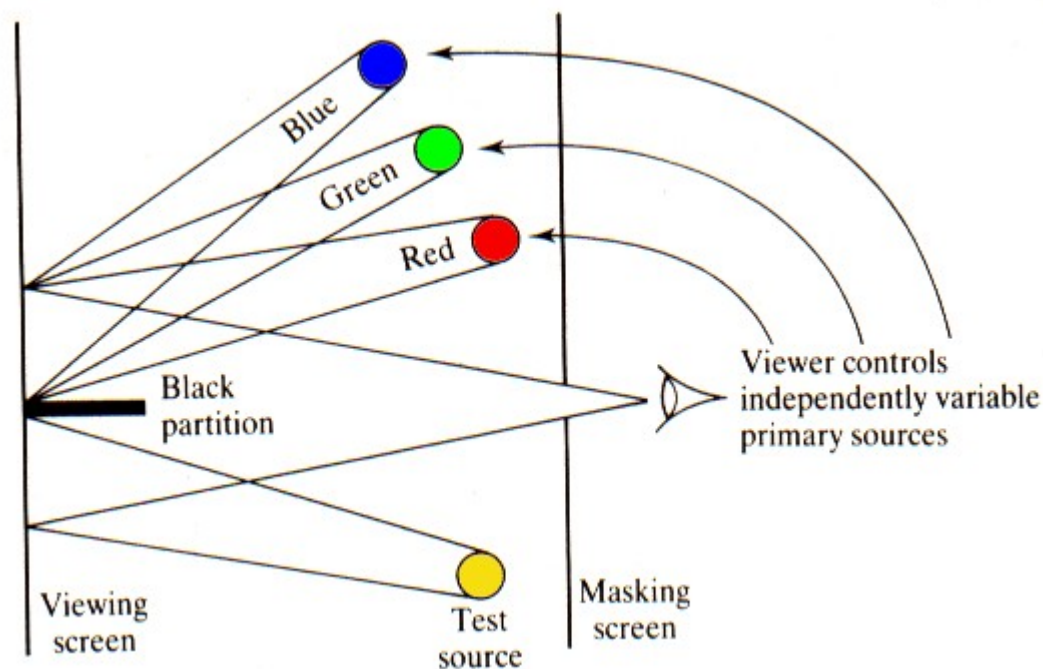
TEORIA KOLORÓW PRZECIWKSTAWNYCH

- E. Hering, 1874
- Hipoteza 3 typów przeciwnych receptorów:
czerwony–zielony niebieski–żółty czarny–biały
- Wprowadza cztery kolory bazowe R, G, B, Y



DOPASOWYWANIE KOLORÓW

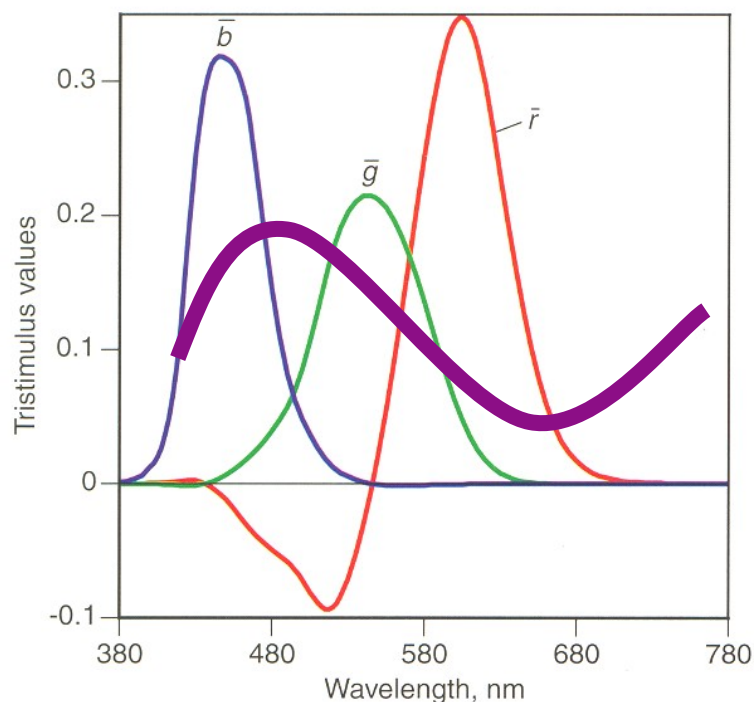
- Eksperyment dopasowania koloru za pomocą 3 podstawowych kolorów monochromatycznych



DOPASOWANIE KOLORÓW

- Teoria tróchromatyczna zakłada, że da się złożyć każdy kolor z trzech monospektralnych kolorów podstawowych...

... to prawie działa !



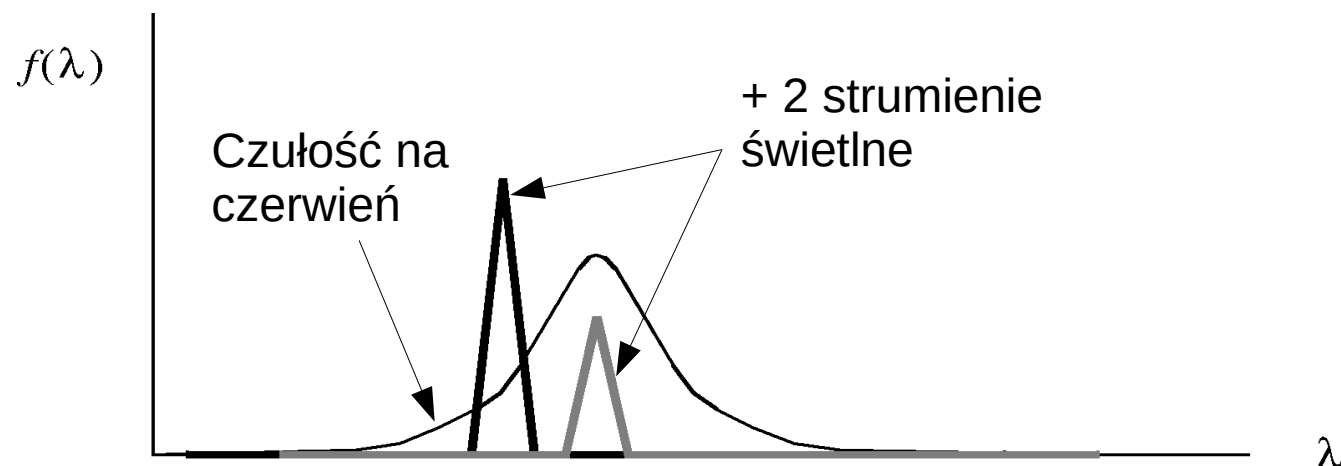
Pewne kolory nie mogą być
otrzymane przez zmieszanie RGB

Występują wartości ujemne!

These curves are the color-matching functions for the 1931 standard observer, The average results of 17 color-normal observers having matched each wavelength of the equal-energy spectrum with primaries of 435.8 nm, 546.1 nm, and 700 nm.

METAMERIA

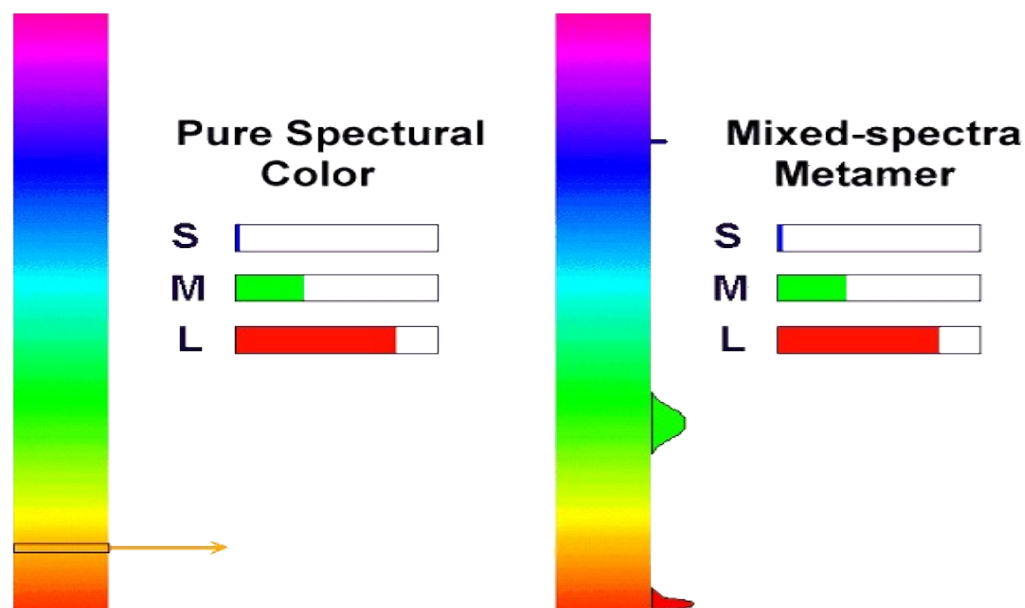
- Różny rozkład światła powoduje tą samą reakcję na bodziec



- Oba sygnały powodują tą samą reakcję na bodziec – będą widoczne jako ten sam kolor
- Dla trzech receptorów jest (teoretycznie) nieskończona liczba rozkładów kolorów (metamerów), które generują to samo wrażenie
- Odwrotnie – żadne dwa monochromatyczne strumienie nie wygenerują tego samego wrażenia wzrokowego

METAMERIA

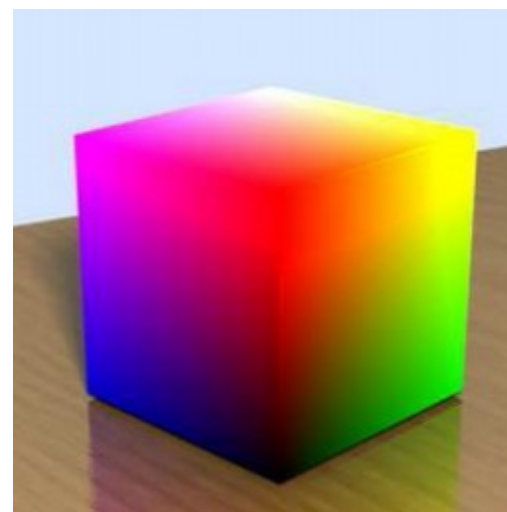
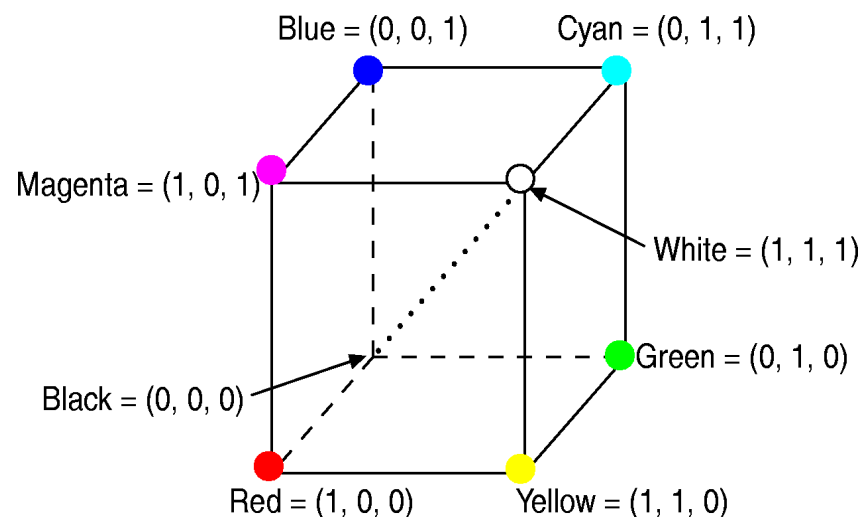
- Konkretne odczucie koloru pochodzi od pobudzenia 3 typów receptorów (czopków)



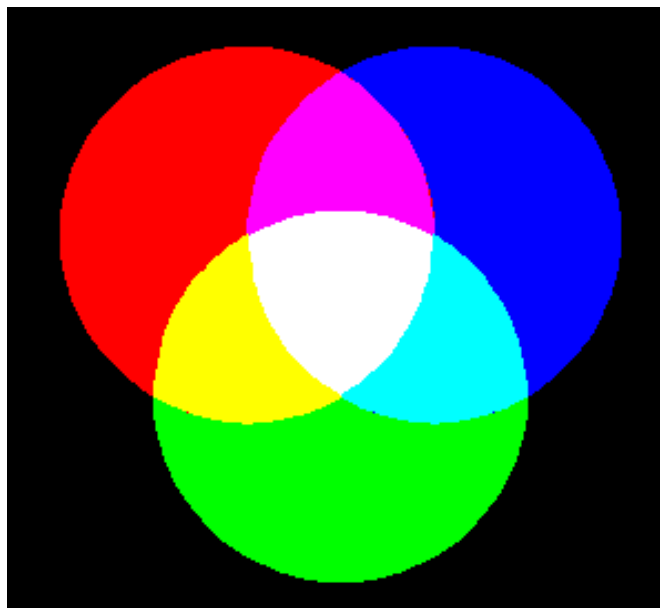
- Identyczne odczucie koloru może być wygenerowane przez różne długości fal

MODEL RGB

- Model oparty na bazowych kolorach podstawowych
 $R, G, B \in [0..1]$
- Na diagonalnej ma skalę szarości
- Jest modelem zależnym od urządzenia – uniemożliwia porównywanie kolorów
- Nie jest percepcyjnie równomierny



MODEL ADDYTYWNY VS SUBTRAKTYWNY



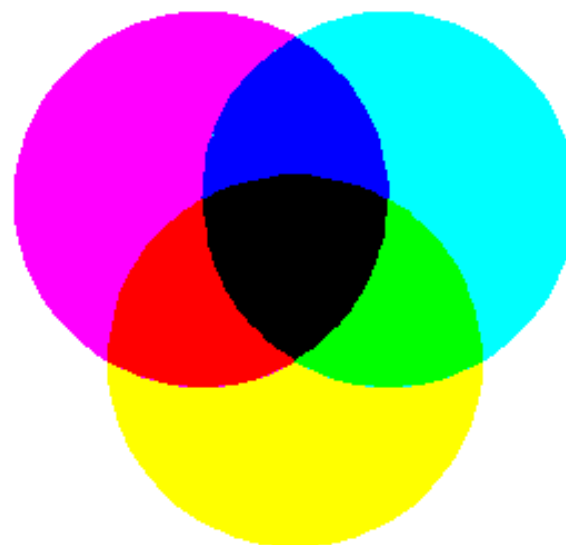
Barwa addytywna (Additive Colors)

Startuje z czarnego koloru.

Kolory podstawowe:: Red, Green, Blue.

Mieszanie wszystkich kolorów daje biały

Stosowany system w wyświetlaczach.



Barwy subtraktywne (Subtractive Colors)

Startuje z białego koloru.

Kolory podstawowe:: Cyan, Magenta, Yellow.

Mieszanie wszystkich kolorów daje czarny.

Stosowany w drukarstwie.

MODEL CMYK

- Model **CMY** jest subtraktywny do **RGB**

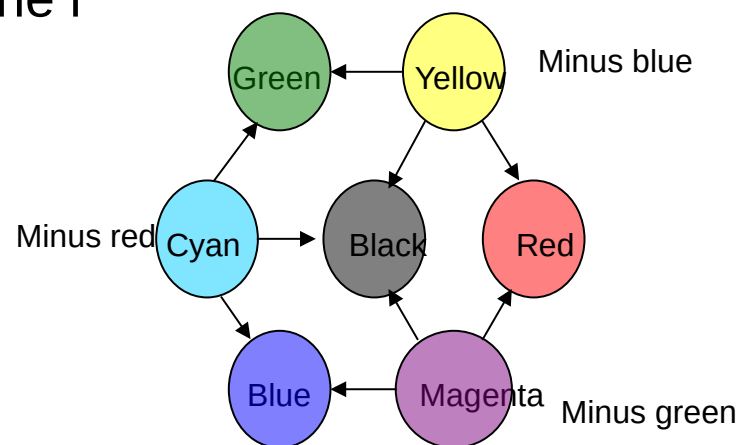
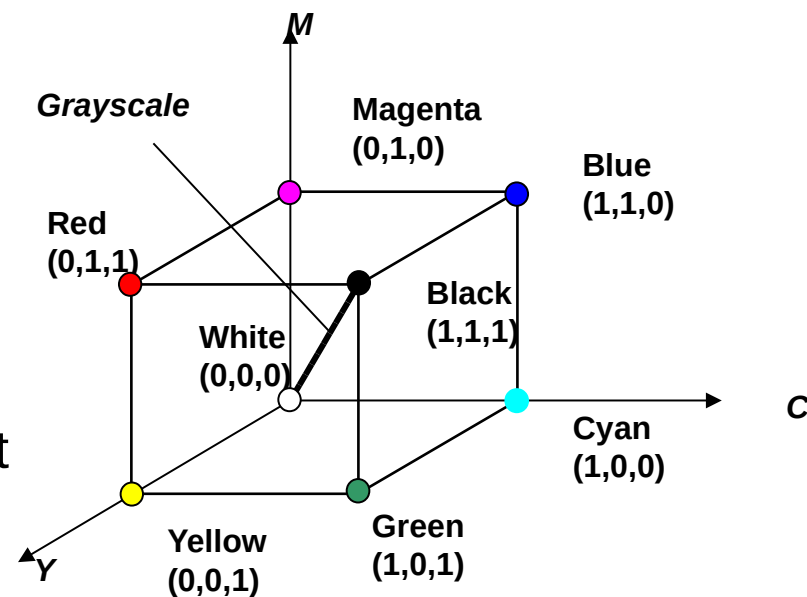
$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

- Początek układu = biały, gdyż żaden komponent padającego światła białego nie jest absorbowany.
- Punkt (1,1,1) = czarny, gdyż wszystkie składowe padającego światła są absorbowane i odjęte.

- CMYK** dodaje czwartą (zależną) barwę

$$K \text{ (black)} = \min(C, M, Y)$$

- Oszczędność tonera, jakość odwzorowania czerni
- Nietrywialna konwersja



CIE

- ***Commission Internationale de l'Éclairage (CIE)***
(ang. International Commission on Illumination)

- Model ***CIE XYZ*** (1931)

- trzy nowe, hipotetyczne składowe podstawowe ***X***, ***Y***, ***Z*** zastępują R, G, B

- definiuje 3 nowe funkcje dopasowania

$$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$$

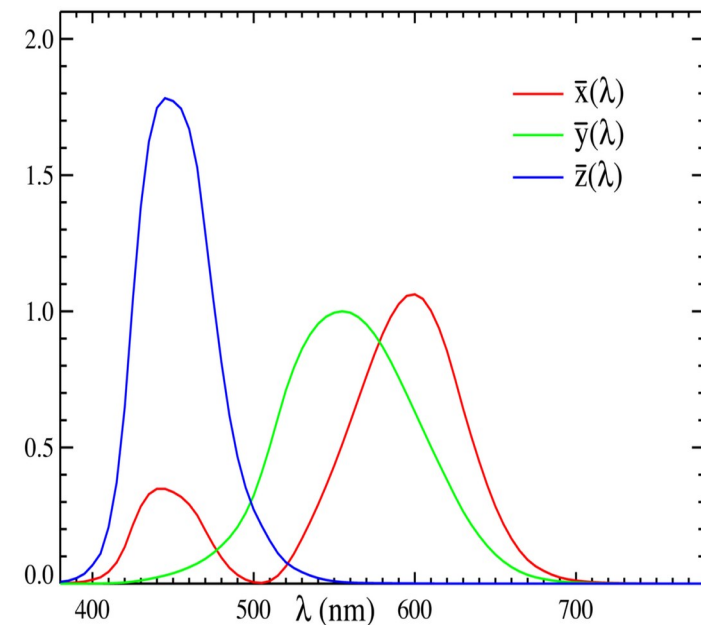
- są one liniową kombinacją

$$\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$$

- ***Y*** odzwierciedla funkcję luminancji

- ***Z*** jest bliski kolorowi niebieskiemu

- ***X*** jest dopełnieniem przestrzeni



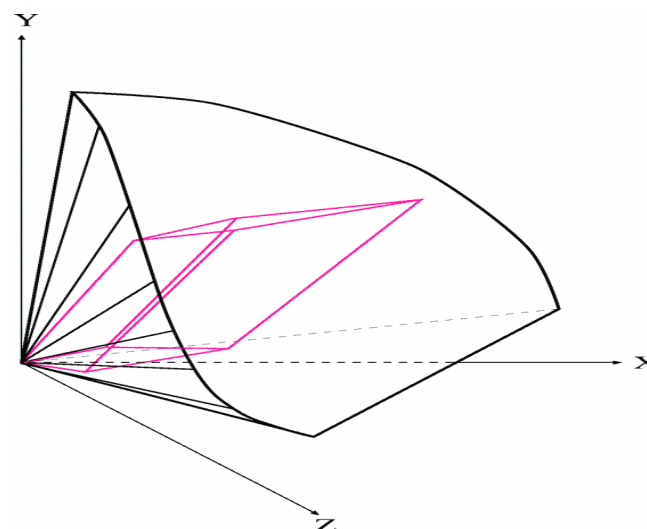
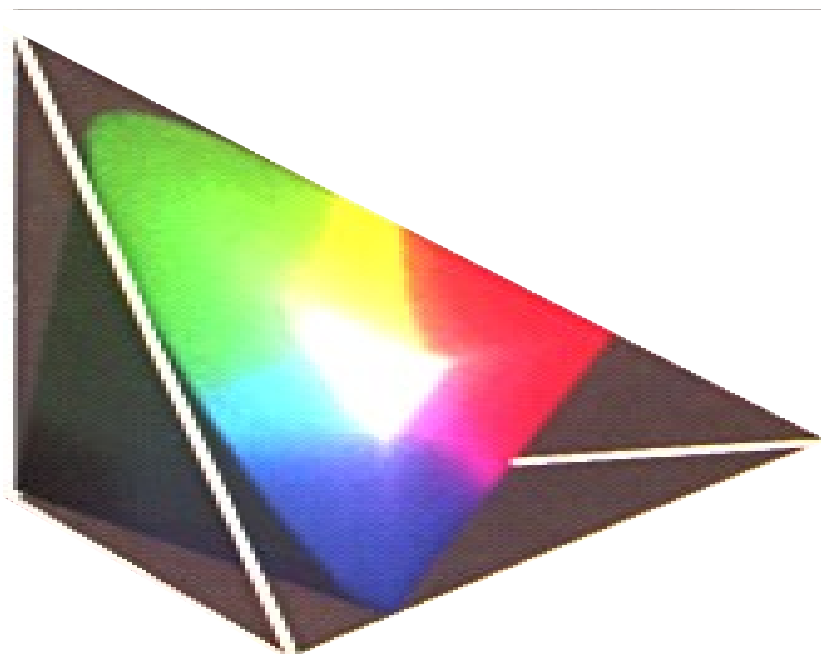
$$X = k \int P(\lambda) \bar{x}_\lambda d\lambda$$

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

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

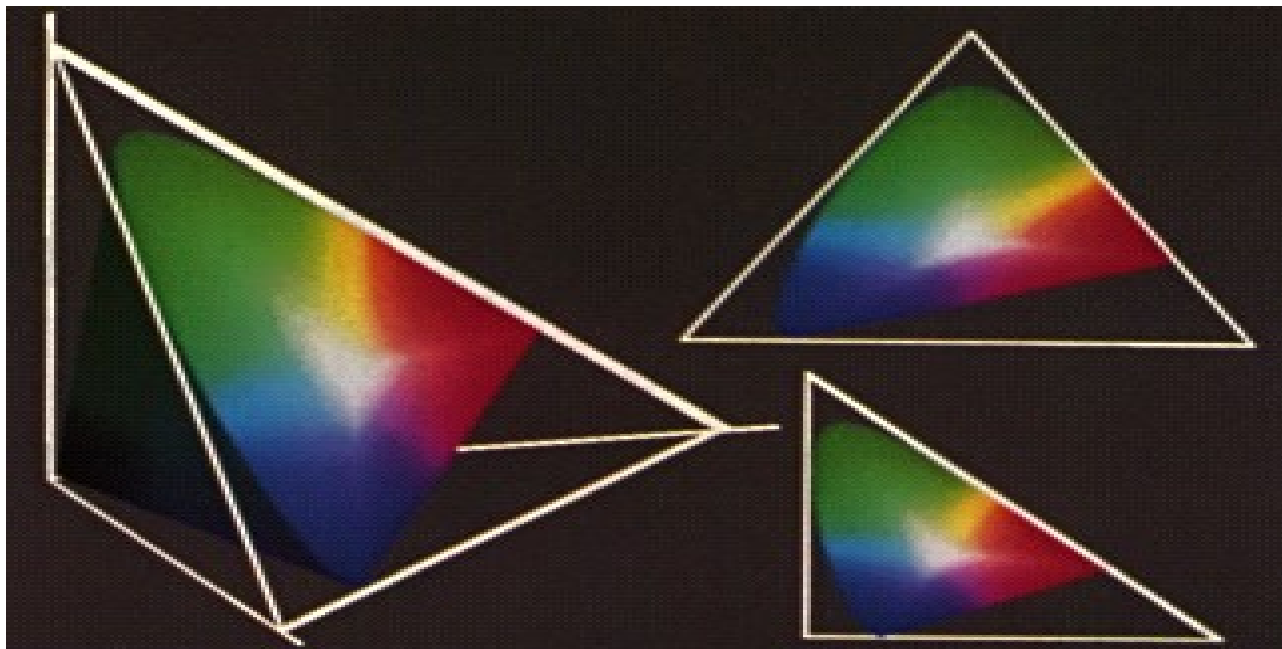
CIE XYZ GAMUT

- Gamut (gama) – wszystkie kolory jakie można odwzorować
- Gamut **XYZ** – nieregularna bryła zawarta w czworościanie
- Wiele współrzędnych **XYZ** nie reprezentuje rzeczywistych kolorów



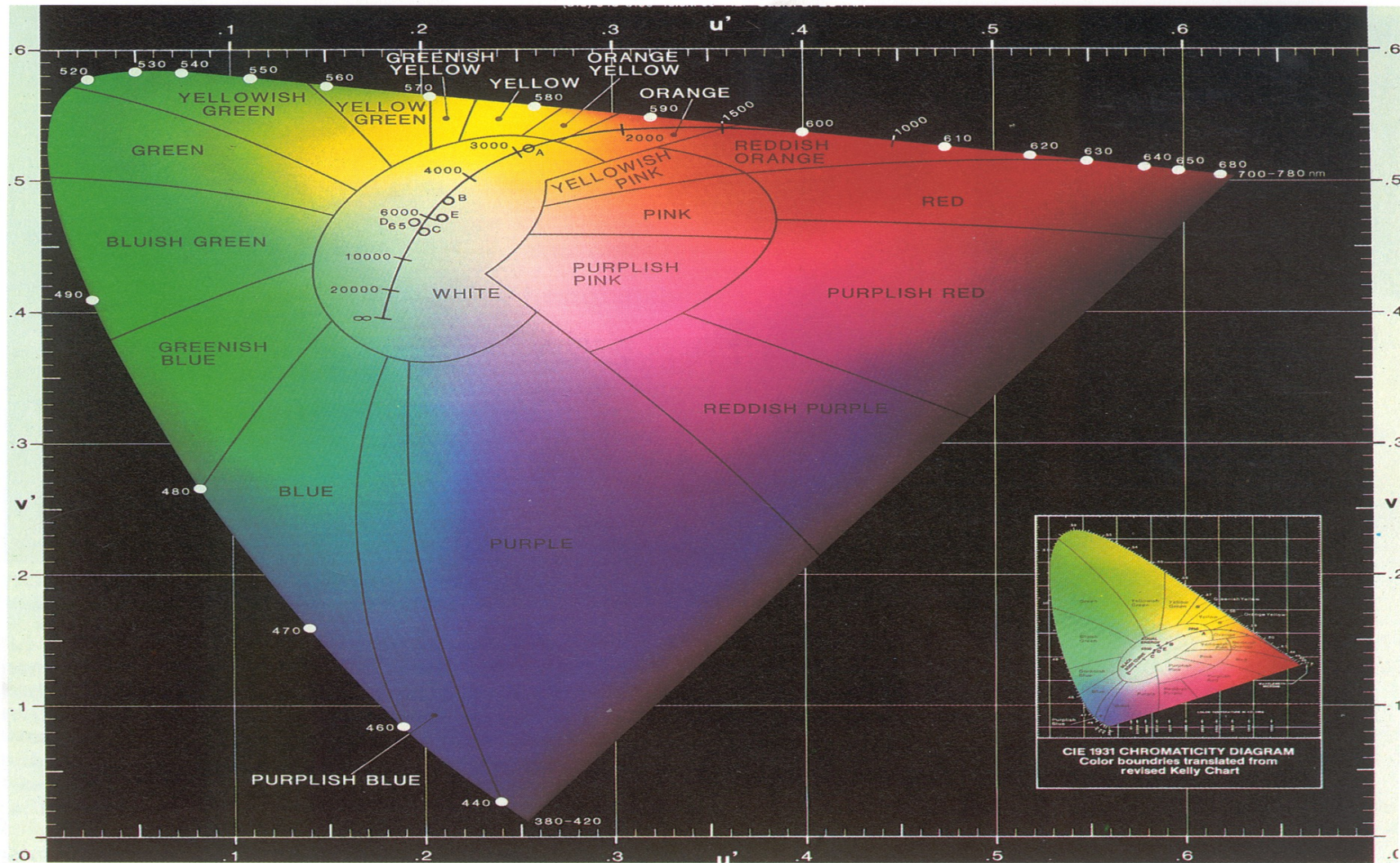
WYKRES CHROMATYCZNOŚCI

- Trzy rzuty $X + Y + Z = 1$ przestrzeni CIE XYZ



- Na dole po prawej: rzut na płaszczyznę (X,Y), tj. ($Z=0$) jest nazywany diagramem chromatyczności

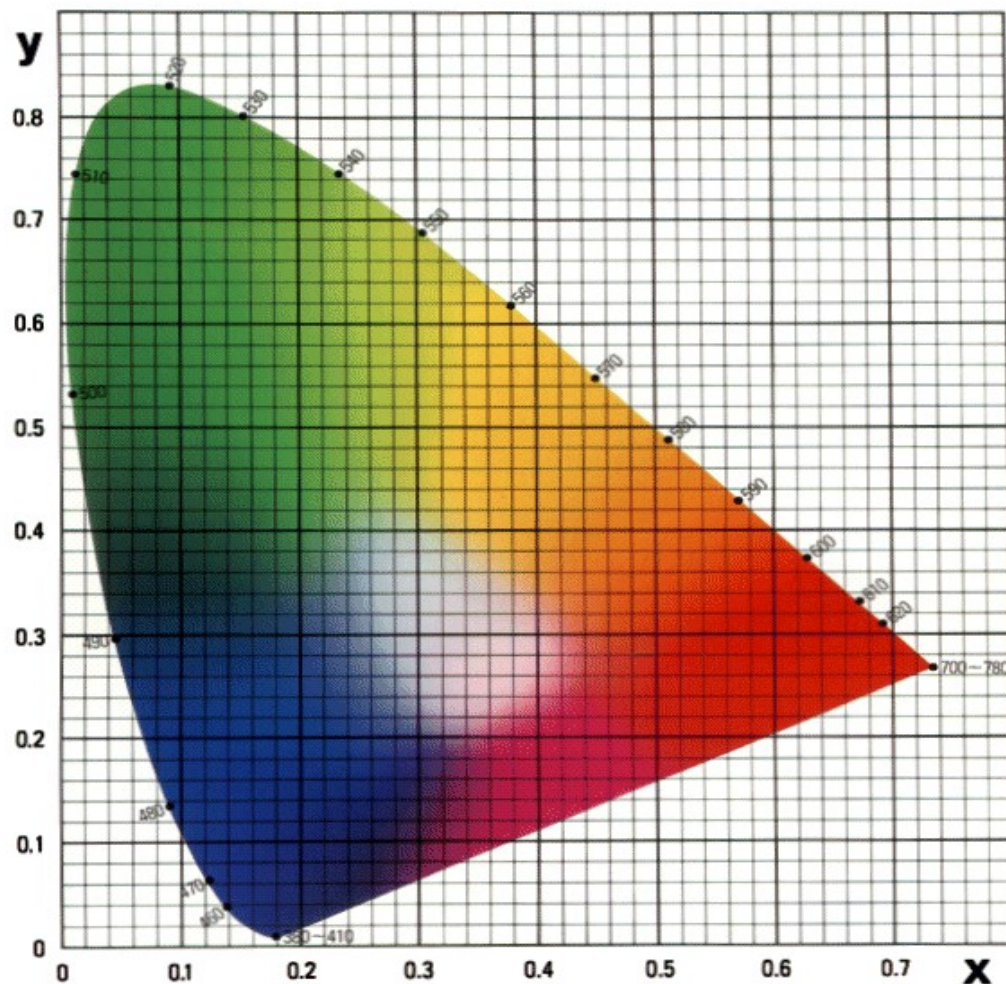
DIAGRAM CHROMATYCZNOŚCI



CIE 1976 UCS chromaticity diagram from Electronic Color: The Art of Color Applied to Graphic Computing,
Richard B. Norman, 1990

Inset: CIE 1931 chromaticity diagram

DIAGRAM CHROMATYCZNOŚCI



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

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

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

$$x + y + z = 1$$

$$x = x / (x + y + z)$$

$$y = y / (x + y + z)$$

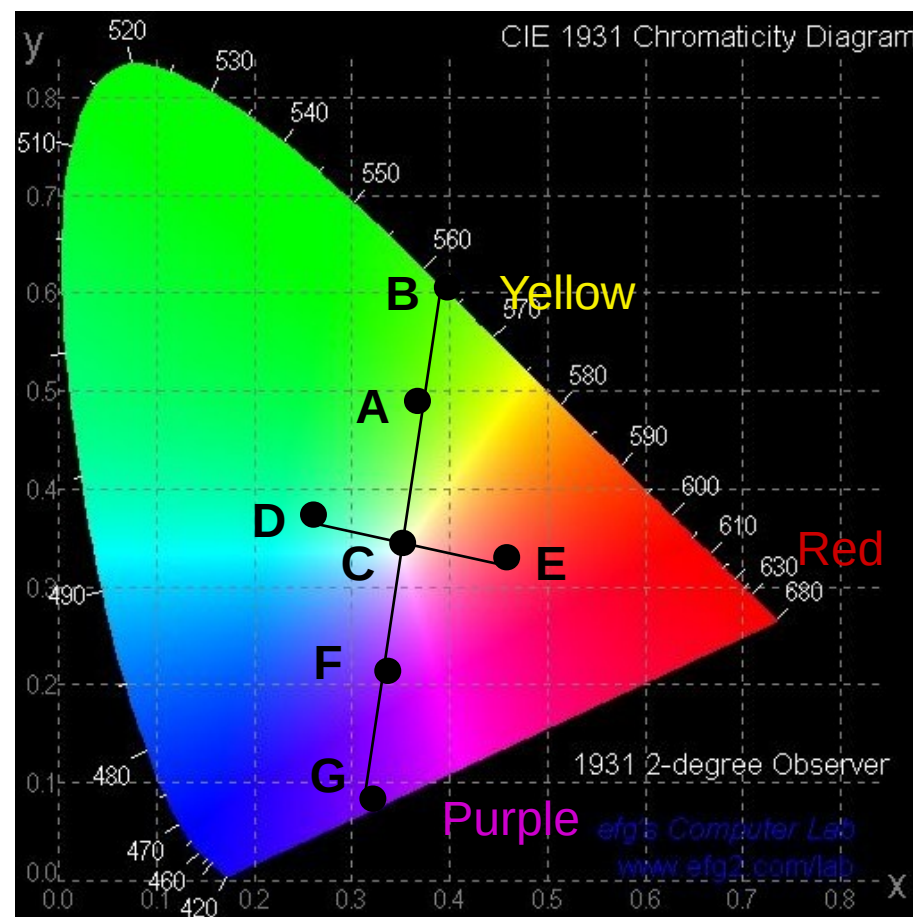
$$z = 1 - x - y$$

- „Czyste” kolory leżą wzdłuż granicy
- Definitywny związek z wielkościami fizycznymi
- Problem ze zdefiniowaniem bieli

DOPASOWANIE W XYZ

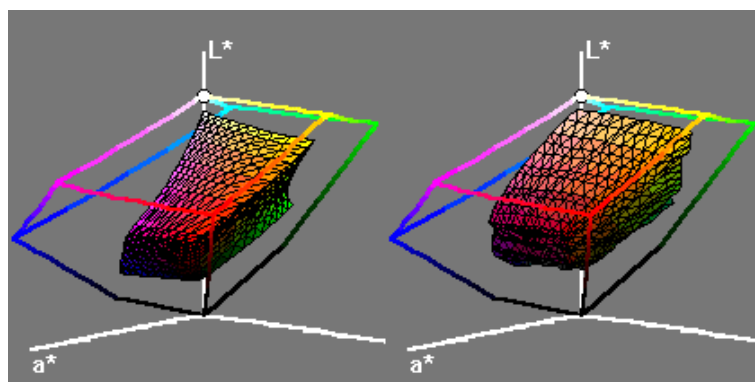
- Szukamy koloru **A**
- **A** jest mieszanką bieli **C** i koloru spektralnego **B**

$$A = tC + (1-t)B$$
- Stosunek **AC/BC** wyznacza czystość koloru **A**
- Kolory komplementarne do **A** leżą na odcinku **CG**
-



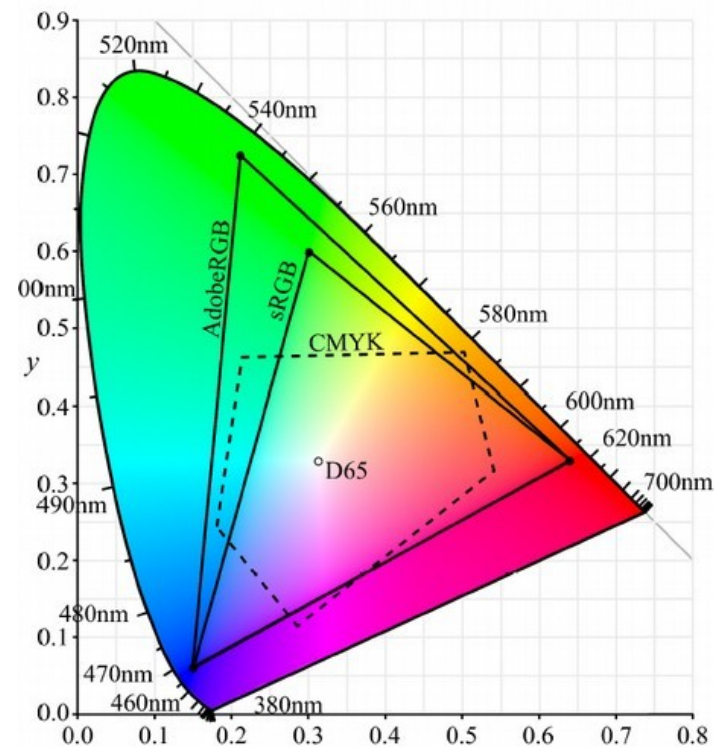
GAMUT W XYZ

- Żadne urządzenie nie jest w stanie odwzorować wszystkich barw XYZ
- Wyznacza się odpowiednie przestrzenie



gamut drukarki

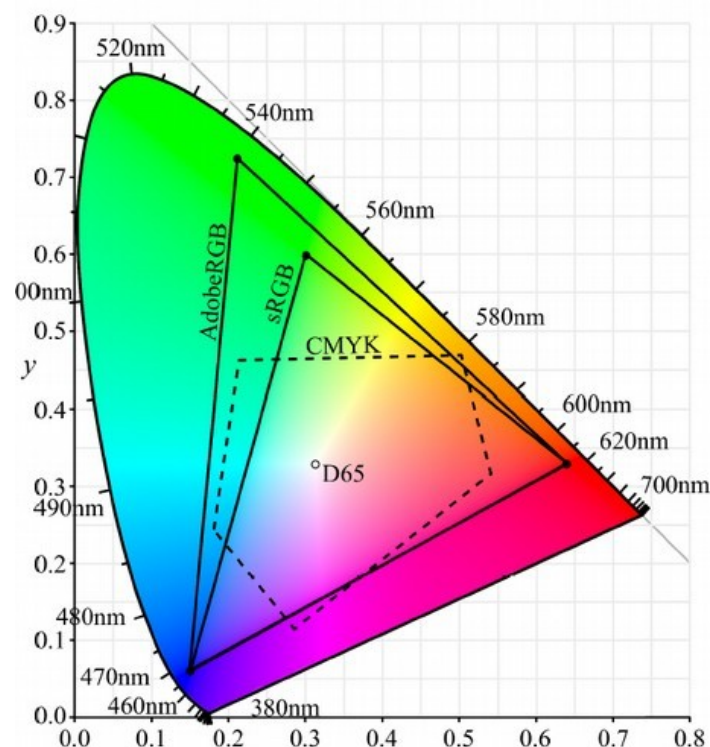
gamut monitora



XYZ GAMUT

- Trzy współrzędne wyznaczają trójkąt przestrzeni RGB i jej gamut
- Potrzeba zdefiniowania punktu bieli (D65, D55, etc.)
- Liniowa zależność między XYZ a RGB

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$



$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.24 & -1.54 & -0.50 \\ -0.97 & 1.88 & 0.04 \\ 0.06 & -0.20 & 1.06 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.41 & 0.36 & 0.18 \\ 0.21 & 0.72 & 0.07 \\ 0.02 & 0.12 & 0.95 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

KONWERSJA XYZ ↔ RGB

- Przejście XYZ – RGB jest kombinacją liniową ich współrzędnych
- Macierz współczynników definiuje Gamut danej przestrzeni RGB
- Współrzędne RGB są unormowane [0..1]

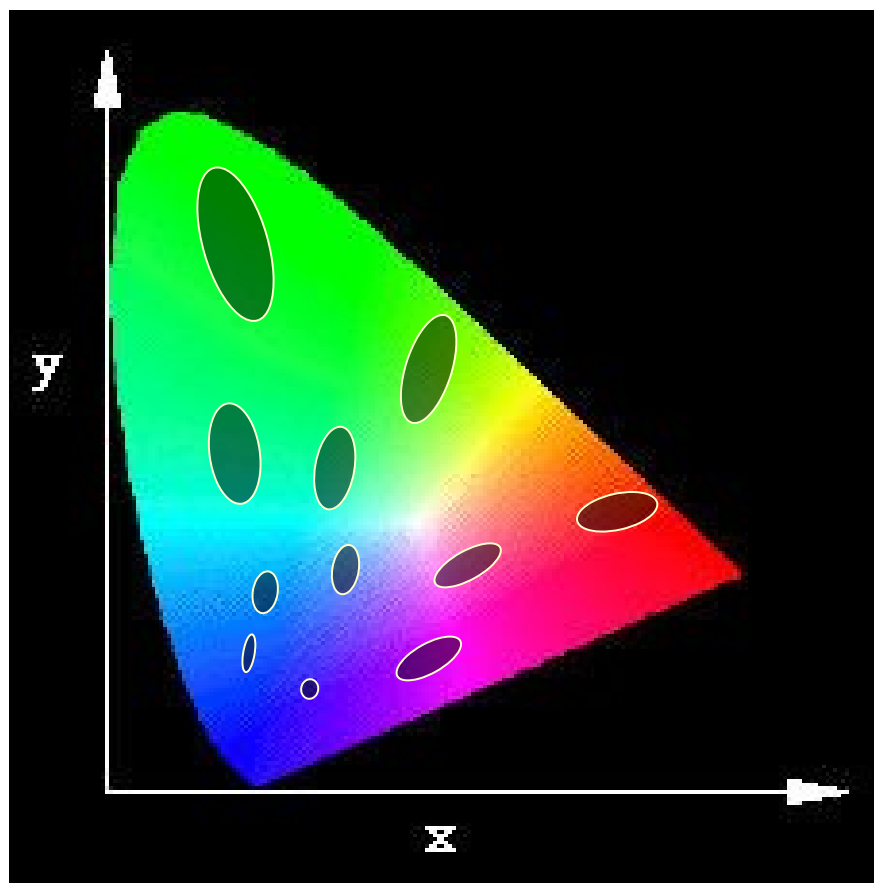
$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.24 & -1.54 & -0.50 \\ -0.97 & 1.88 & 0.04 \\ 0.06 & -0.20 & 1.06 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.41 & 0.36 & 0.18 \\ 0.21 & 0.72 & 0.07 \\ 0.02 & 0.12 & 0.95 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

KRYTYKA CIE XYZ

- Zawiera nierzeczywiste kolory
- Trudna interpretacja składowych
- Przestrzeń percepcyjnie nierównomierna
- Odległość między barwami nie jest wszędzie jednakowa
- Zdecydowana przewaga zieleni
- Utrudnia dodawanie i porównywanie kolorów



MODEL CIE L*a*b*

- Wprowadzony w 1976
- Trzy składowe

L^* – luminancja [0..100]

a^* – chrominancja czerwony/zielony [-128..127]

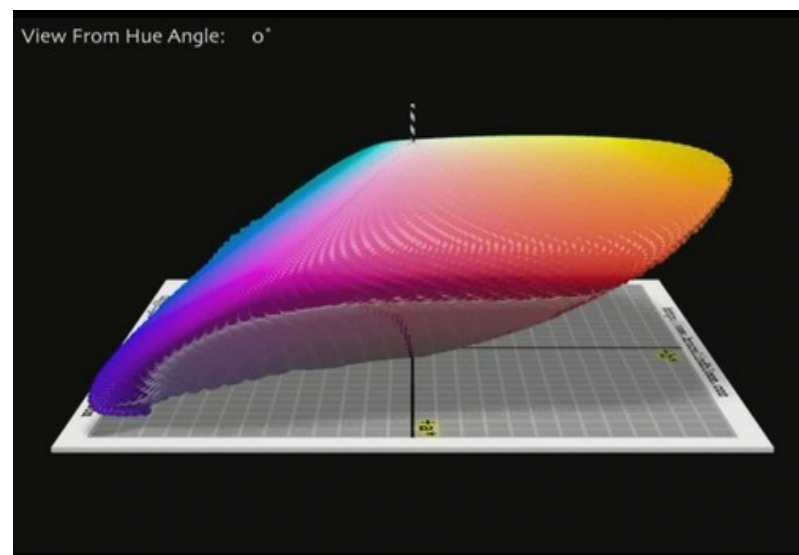
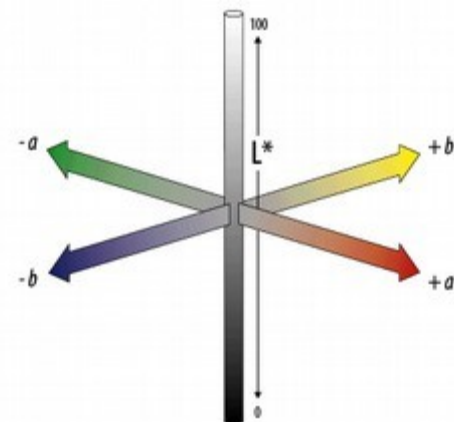
b^* – chrominancja niebieski/żółty [-128..127]

- Percepcyjnie jednolita przestrzeń
- Separuje luminancję od chrominancji
- Stosowana w zarządzaniu barwą (profile ICC)
- Jest matematyczną transformacją XYZ

$$L = 116 \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_0}} - 16$$

$$a = 500 \left(\sqrt[3]{\frac{X}{X_0}} - \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_0}} \right)$$

$$b = 200 \left(\sqrt[3]{\frac{Y}{Y_0}} - \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_0}} \right)$$



KONWERSJA CIE $L^*a^*b^*$

- Trzy składowe
 L^* – luminancja [0..100]
 a^* – chrominancja czerwony/zielony [-128..127]
 b^* – chrominancja niebieski/żółty [-128..127]
- Jest matematyczną transformacją XYZ

$$L = 116 \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_0}} - 16$$

$$a = 500 \left(\sqrt[3]{\frac{X}{X_0}} - \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_0}} \right)$$

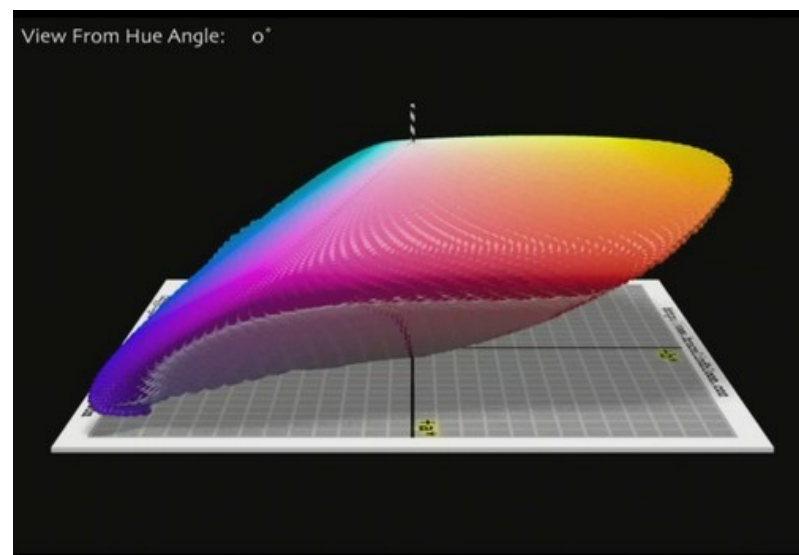
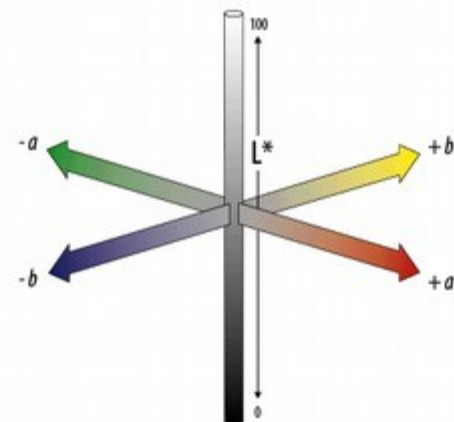
$$b = 200 \left(\sqrt[3]{\frac{Y}{Y_0}} - \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_0}} \right)$$

Gdzie Dla temperatura bieli D65 (6500K) :

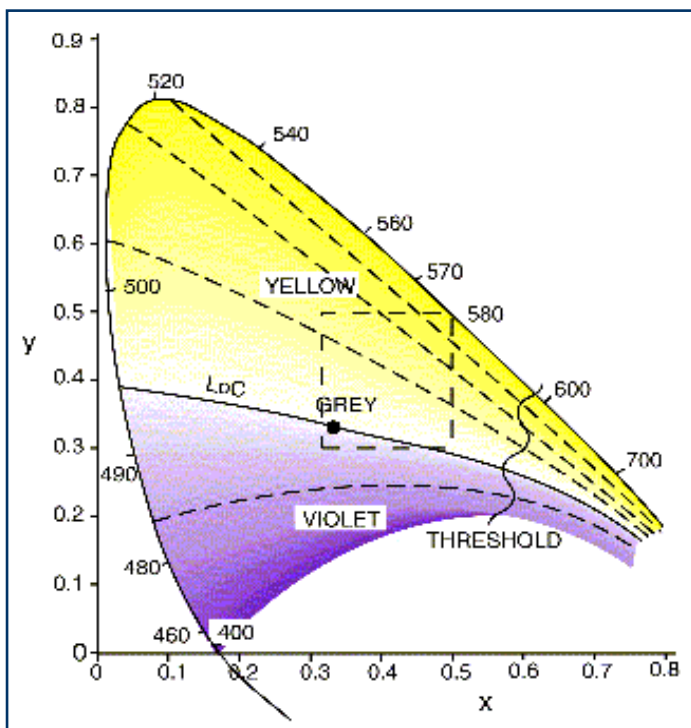
$$X_0 = 0.9505$$

$$Y_0 = 1.0000$$

$$Z_0 = 1.0891$$

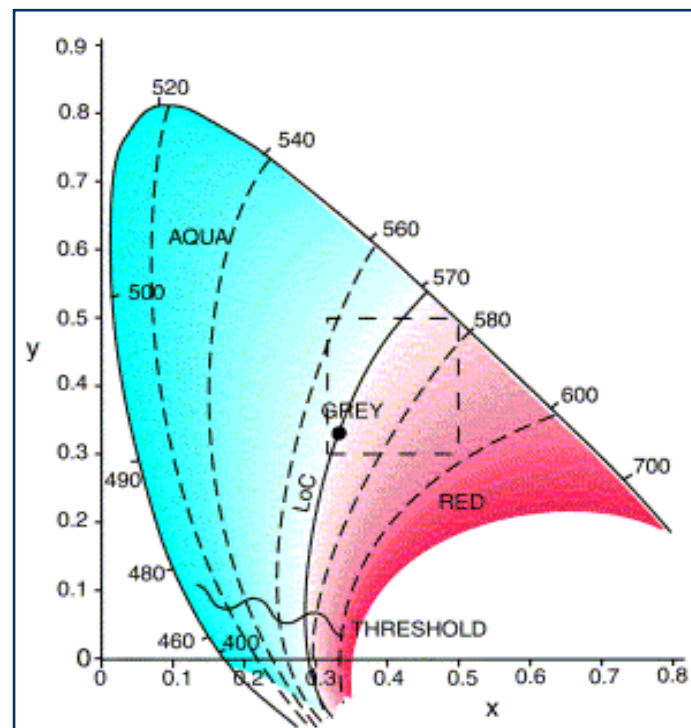


DALTONIZM



Duetranopes

Niebieski i magenta są odbierane jako fioletowe.
Zielony i pomarańczowy są odbierane jako żółty.
Cyan i czerwony są odbierane jako biały.

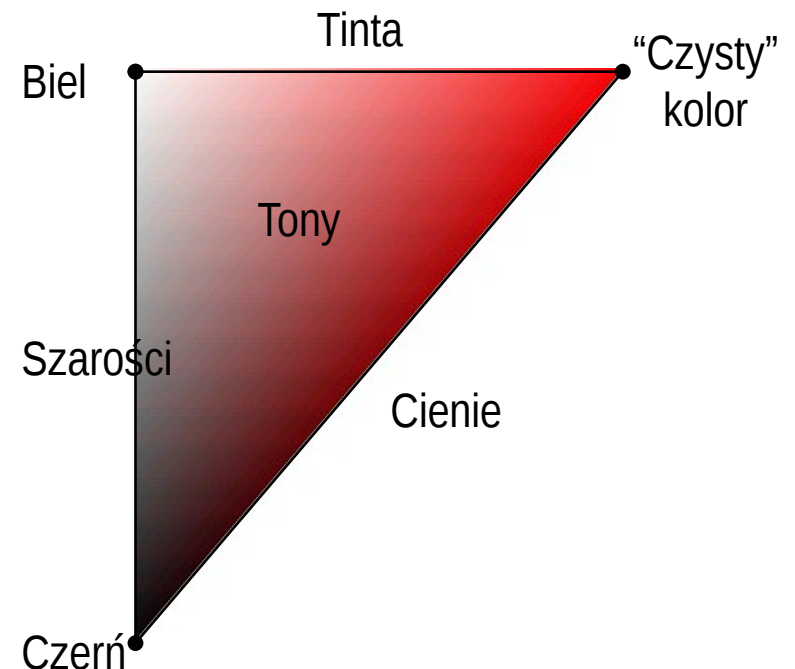


Tetartanopes

Pomarańczowy i magenta są odbierane jako czerwony.
Zielony i niebieski są odbierane jako cyan.
Żółty i fioletowy są odbierane jako biały.

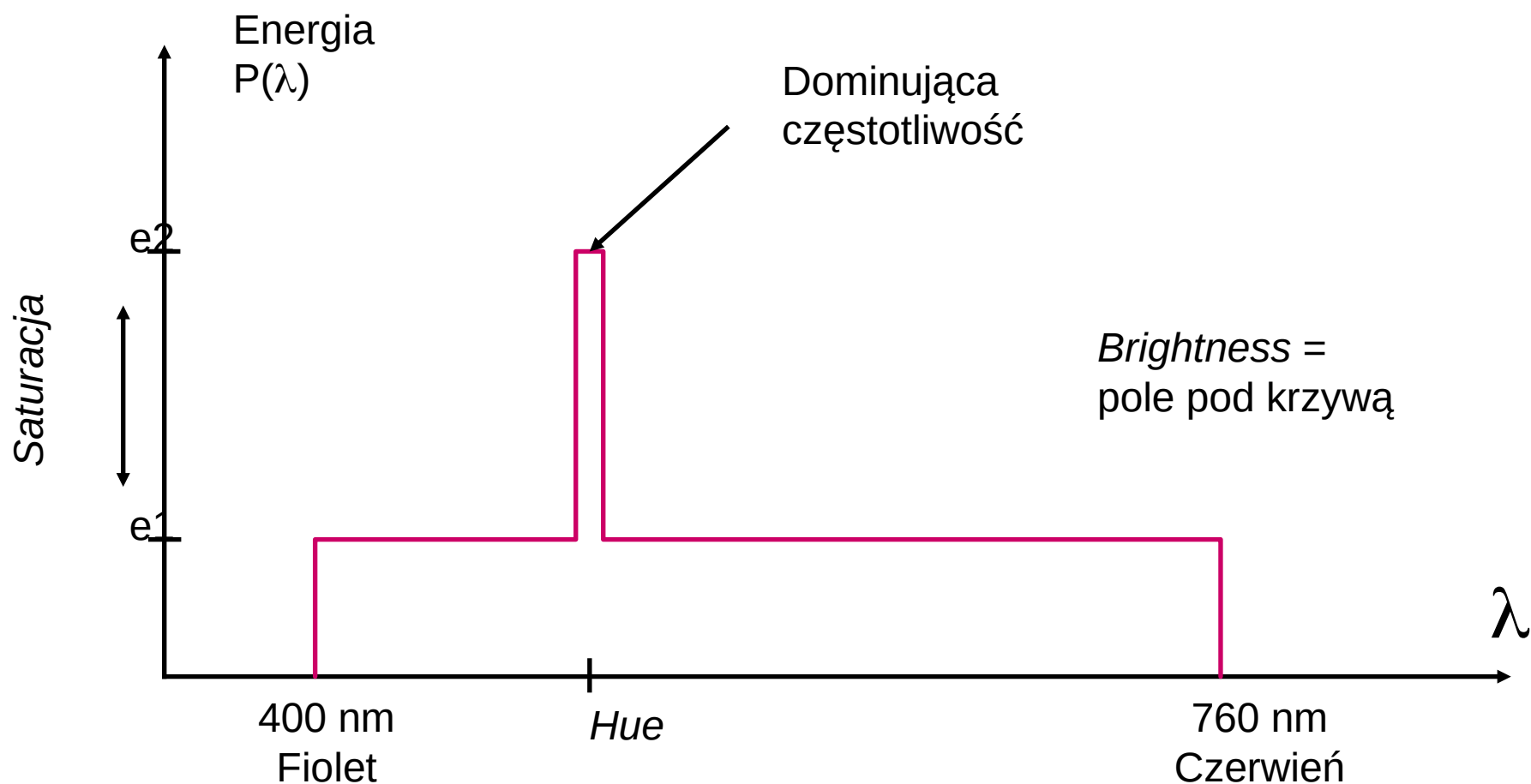
PODEJŚCIE ARTYSTYCZNE

- Artyści dysponują pigmentami, które mają maksymalne nasycenie
- Tinta powstaje w wyniku dodania białego barwnika do czystego barwnika, co zmniejsza nasycenie.
- Cień powstaje w wyniku dodania czarnego barwnika do czystego barwnika, co zmniejsza jasność.
- Ton powstaje w wyniku dodania zarówno czarnego, jak i białego barwnika do czystego pigmentu.



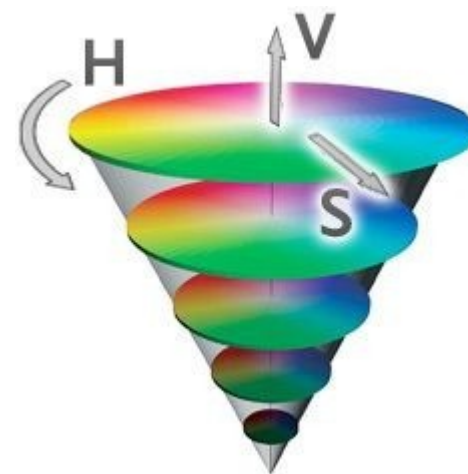
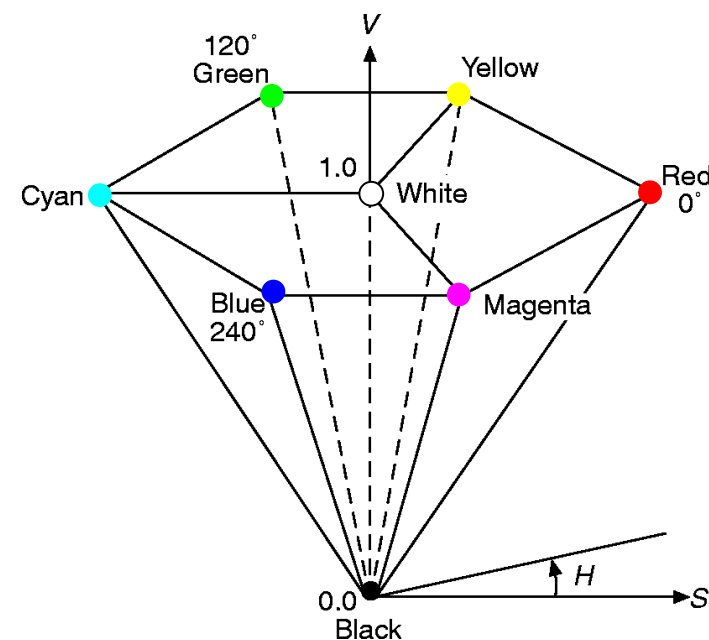
INNY SPOSÓB

- Interpretacja fizyczna



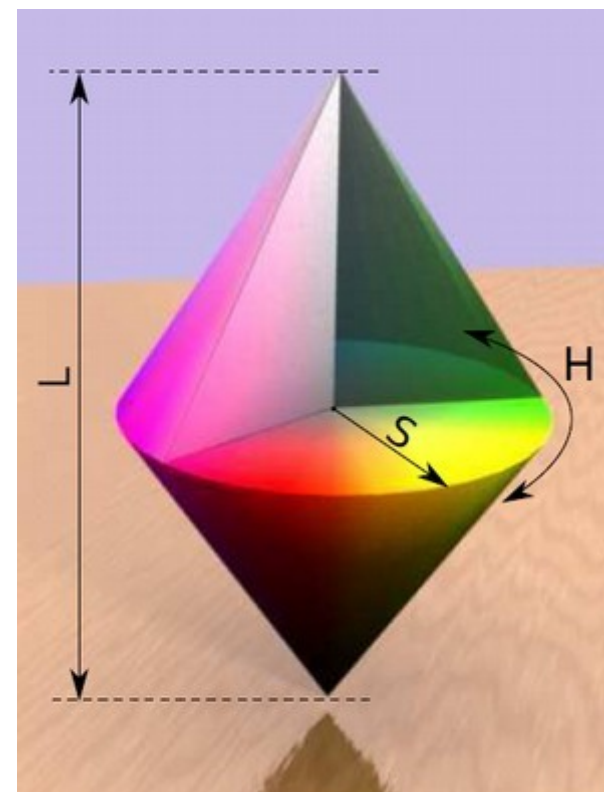
HSV

- 3 składowe
 - H** – hue (odcień) $[0^\circ..360^\circ]$
 - S** – saturation (nasycenie) $[0..1]$
 - V** – value (wartość) $[0..1]$
- Cylindryczny (biegunowy) układ współrzędnych
- Intuicyjne zastosowanie artystycznego pojęcia odcienia, tinty, cienia i tonu
 - czysta czerwień = **H** = 0, **S** = 1, **V** = 1;
 - Czyste pigmenty to (l, 1, 1)
 - tinta: dodawanie białego pigmentu \Leftrightarrow zmniejszanie **S** przy stałym **V**
 - cienie: dodawanie czarnego pigmentu \Leftrightarrow zmniejszanie **V** przy stałym **S**
 - tony: zmniejszanie **S** i **V**



HSL

- Cylindryczny model
- Podwójny stożek
 - H – hue
 - S – saturation
 - L – lightness
- Maksymalne nasycenie kolorów w $S=1$, $L=0.5$



INNE PRZESTRZENIE KOLORÓW

- YUV – model TV PAL
- YIQ – model TV NTSC
- ITU-R BT.709 – model TV HDTV
- YCbCr – model stosowany w JPEG
- NCS – Natural Color System

UWAGI

- Oko jest bardziej czułe na zmiany przestrzenne
- Małe detale powinny różnić się od tła nie barwą ale jasnością
- Niebieski i czarny, żółty i biały są szczególnie złymi kombinacjami
- Nie stosować niebieskiego dla tekstu
- Dla daltonistów nie stosować czerwonego i zielonego z małym nasyceniem i luminancją
- Kolory dla małych obiektów (a także dalekie) nie są rozróżnialne!

This is hard to read.

So is this.

And this, too! Yikes!

ZADANIA

- Zaimplementuj funkcjonalność modyfikacji poszczególnych kanałów w modelu:
 - RGB
 - HSL lub HSV
 - CIE Lab

*(Szczegóły konwersji między modelami w skrypcie na kampusie)