

Kolorymetria

Wykład opracowany m.in. dzięki materiałom dra W.A. Woźniaka,
za jego zgodą.

Widmo światła białego

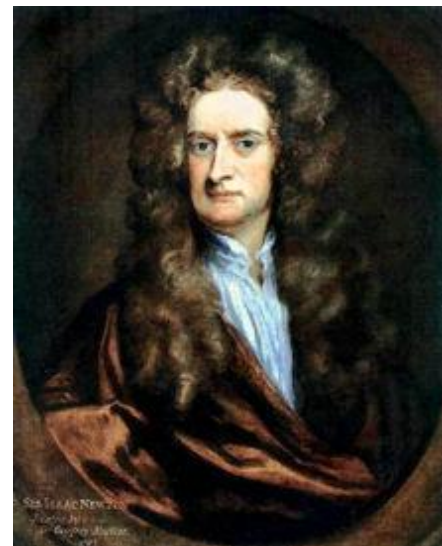
- 400 - 450 nm - fiolet
- 450 - 500 nm - niebieski
- 500 - 560 nm - zielony
- 560 - 590 nm - żółty
- 590 - 630 nm - pomarańczowy
- 630 - 780 nm - czerwony



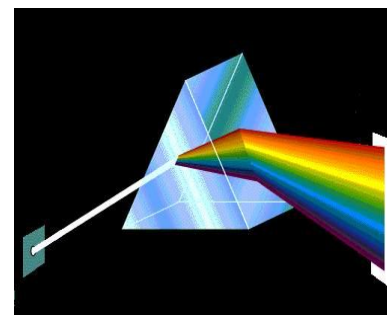
Izaak Newton

ur-1642 Woolsthorpe (Anglia)

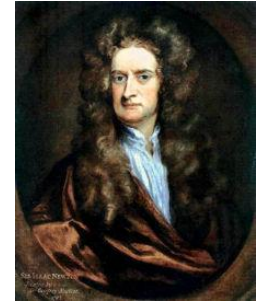
zm-1727 Londyn (Anglia)



Newton badał właściwości barw i ich związek ze światłem. Ówczśnie twierdzono, że barwy powstają na skutek modyfikacji światła, które stanowi barwę białą w czystej postaci. Twierdzenie to stało się powodem przeprowadzenia przez Newtona serii doświadczeń, w których wąską wiązkę światła, przepuścił przez pryzmat.



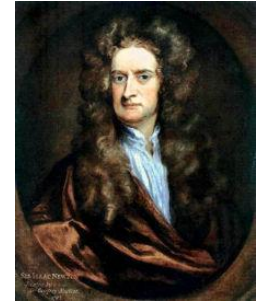
Izaak Newton



Newton obserwując efekty tego doświadczenia na zaciemnionej ścianie pokoju zauważył, że promień światła przechodzący przez pryzmat ulega załamaniu a poszczególne barwy załamywały się w różnym stopniu.

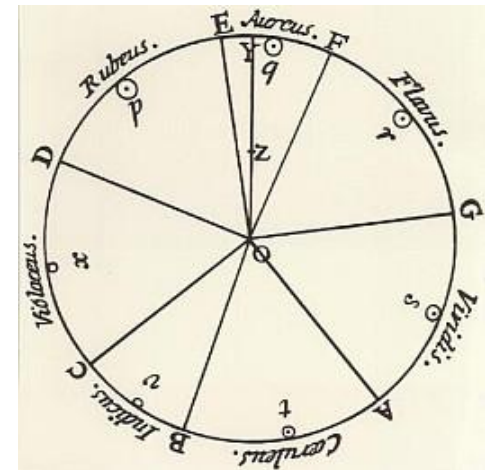
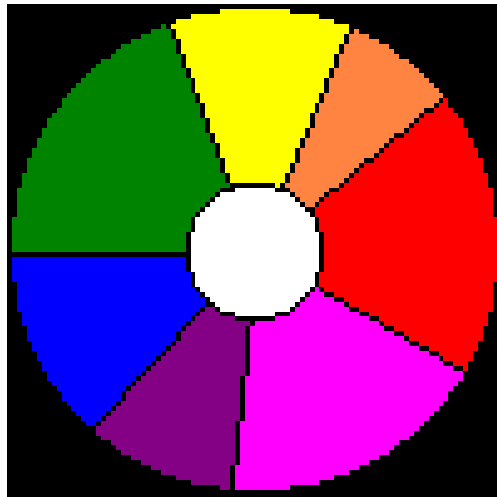


Izaak Newton



Wynikiem tego doświadczenia było wyróżnienie pasma sąsiadujących barw: czerwonej, pomarańczowej, żółtej, zielonej, niebieskiej, indygo i fioletowej, które Newton przedstawił w postaci koła barw.

Światło jest niejednorodną mieszaniną, w skład, której wchodzi podstawowe barwy składowe. Jest to założenie stanowiące podstawy teorii o **addytywnym** mieszaniu barw.



Thomas Young

ur-1773 Milverton
zm-1829 Londyn

Angielski fizyk i lekarz.



Jako pierwszy w 1801 roku ogłosił hipotezę o istnieniu trzech typów receptorów w oku (czerwonych, zielonych i niebieskich) odpowiedzialnych za widzenie barwne. Young rozumował, że sprowadzenie nieskończonej ilości prostych drgań świetlnych do małej ilości barw wynika z fizjologicznego mechanizmu siatkówki, a nie jak przypuszczano przed nim, z właściwości samego światła.

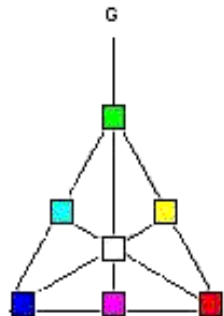


James Clerk Maxwell

ur-1831
zm-1879

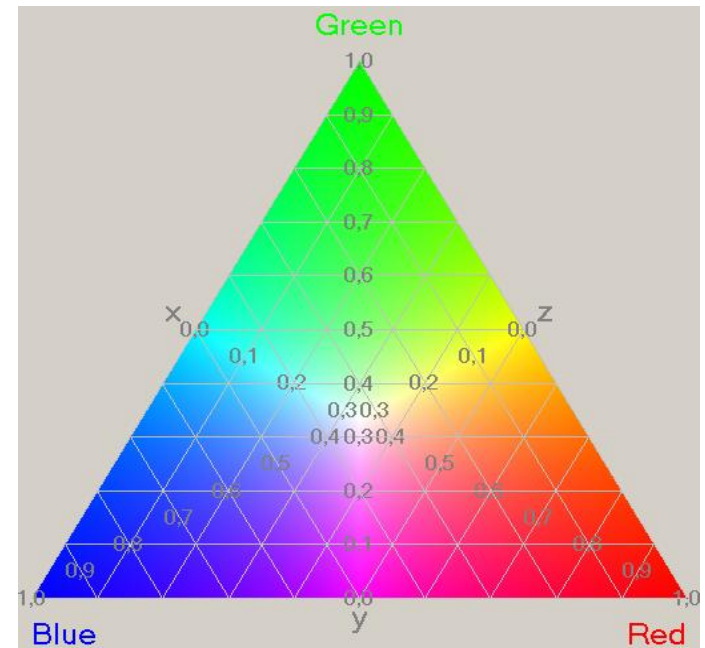
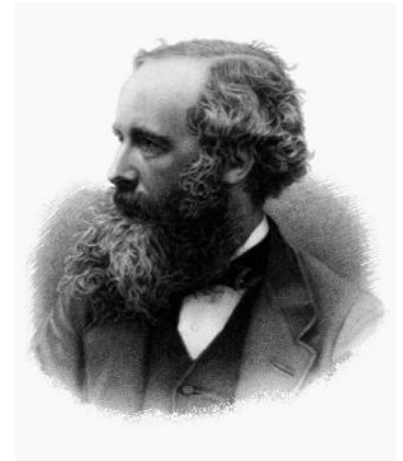
Angielski fizyk.

Trójkąt Maxwella to nadal opis jakościowy, a nie kolorymetria. Jest to tylko opis zasady mieszania barw, który można wyjaśnić w sposób wektorowy.



B

R

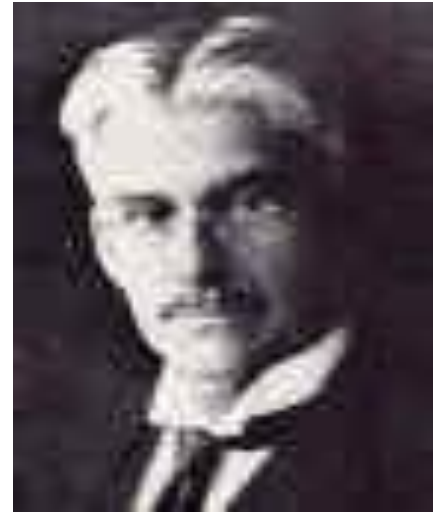


Albert H. Munsell

ur-1858 Boston

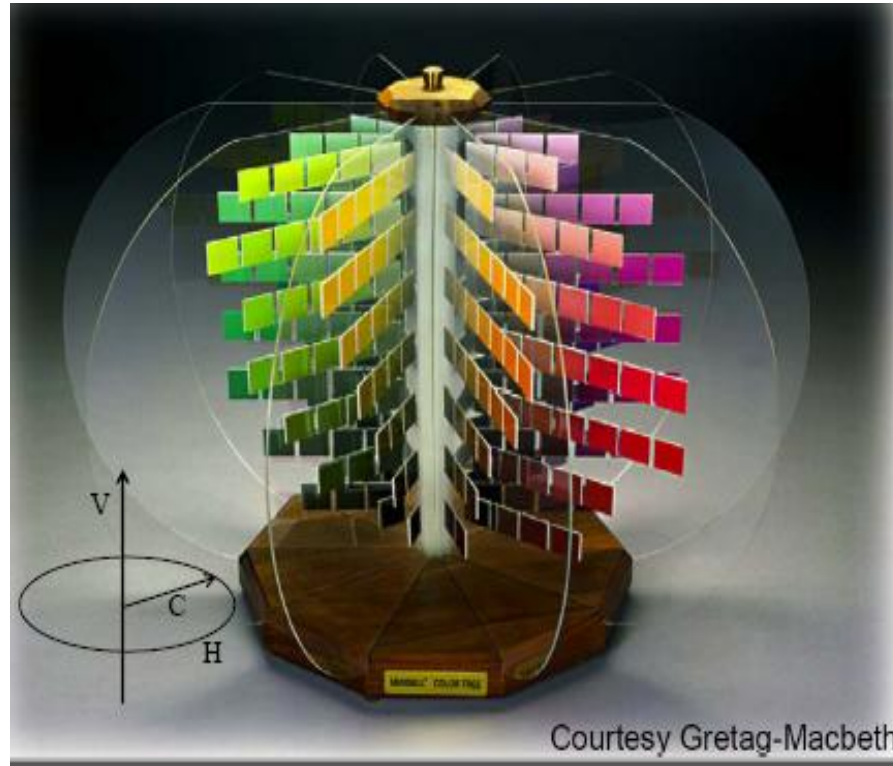
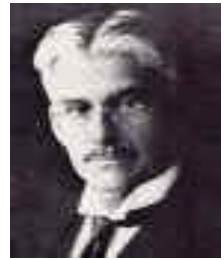
zm-1918 Brookline

Amerykański malarz i profesor sztuki.



Pierwsza wersja atlasu ukazała się w roku 1905, kolejna jej modyfikacja 10 lat później pod nazwą używaną do dziś jako „**The Munsell Book of Colour**”. Jego twórca sklasyfikował wszystkie barwy, jakie można uzyskać przez mieszanie pigmentów, według trzech cech: odcienia, nasycenia i jasności. Atlas ten jednak nie obejmuje wszystkich barw dostrzeganych przez człowieka.

Albert H. Munsell



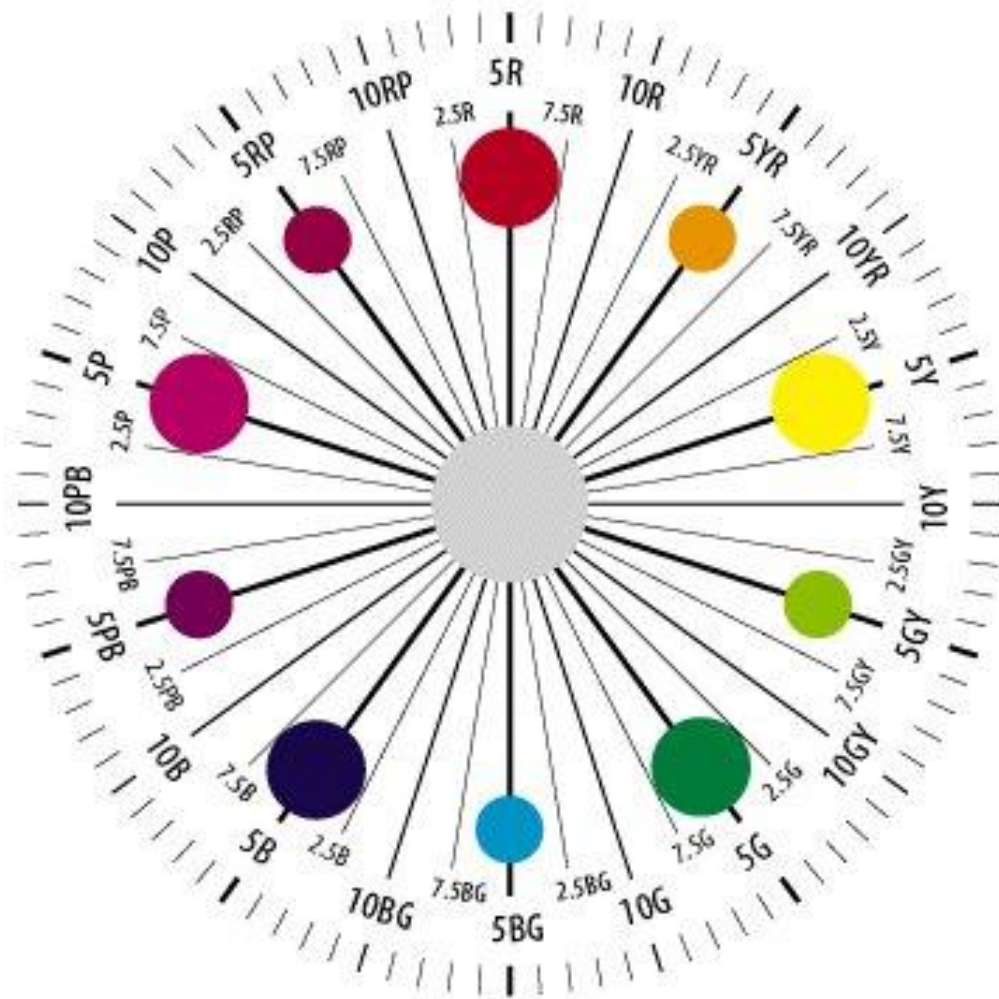
Albert Munsell zauważył, że wszystkie sąsiadujące ze sobą pola w całej przestrzeni barw cechuje ta sama różnica barw ΔE .

Albert H. Munsell

Trzy cechy barw Munsella:

- **odcień (kolor) H (Hue)** – znajduje się na kole barw, podzielonym na 10 głównych segmentów wyznaczonych przez barwy **Red**, **Yellow**, **Green**, **Blue**, **Purple** oraz ich barwy pośrednie **YR** (pomarańczowy), **GY** (jasnozielony), **BG** (cyjan), **PB** (fiolet), **RP** (róż), te z kolei podzielone są na 10 mniejszych. W ten sposób koło obejmuje 100 odcieni.
- **nasycenie C (Chroma)** – określające czystość barwy. Barwy najbardziej nasycone znajdują się na zewnątrz bryły, a najmniej nasycone w środku.
- **walor V (Value) (jasność)** – mówiąca o zmianie jasności barwy, przyjmuje wartości z przedziału [0, 10], znajduje się na pionowej osi układu.

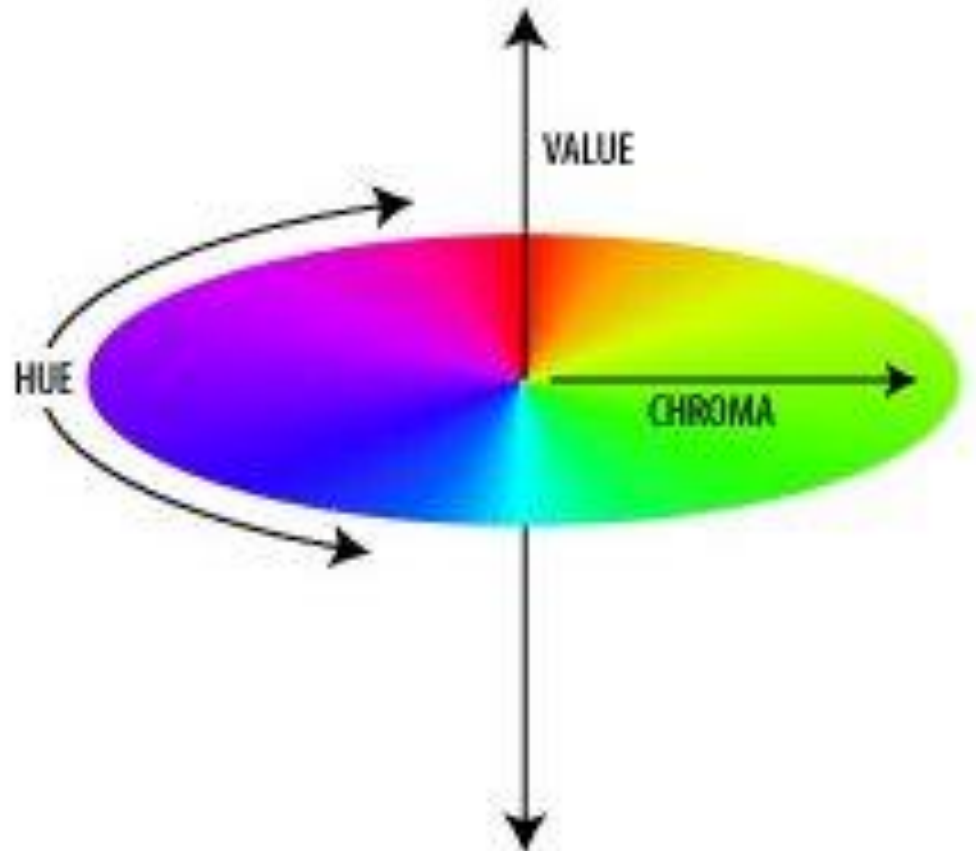
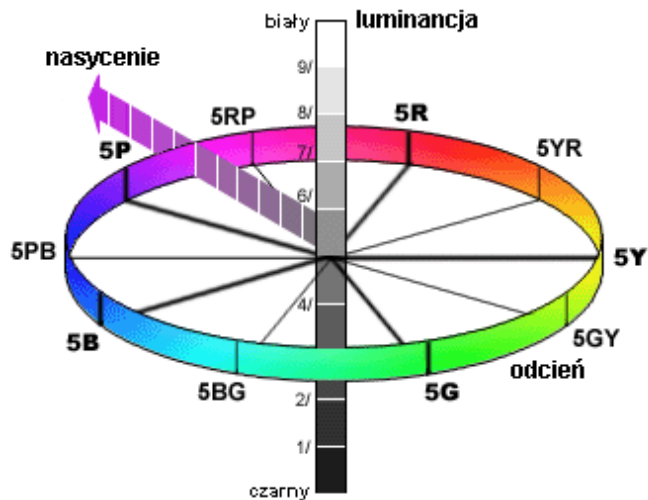
Albert H. Munsell



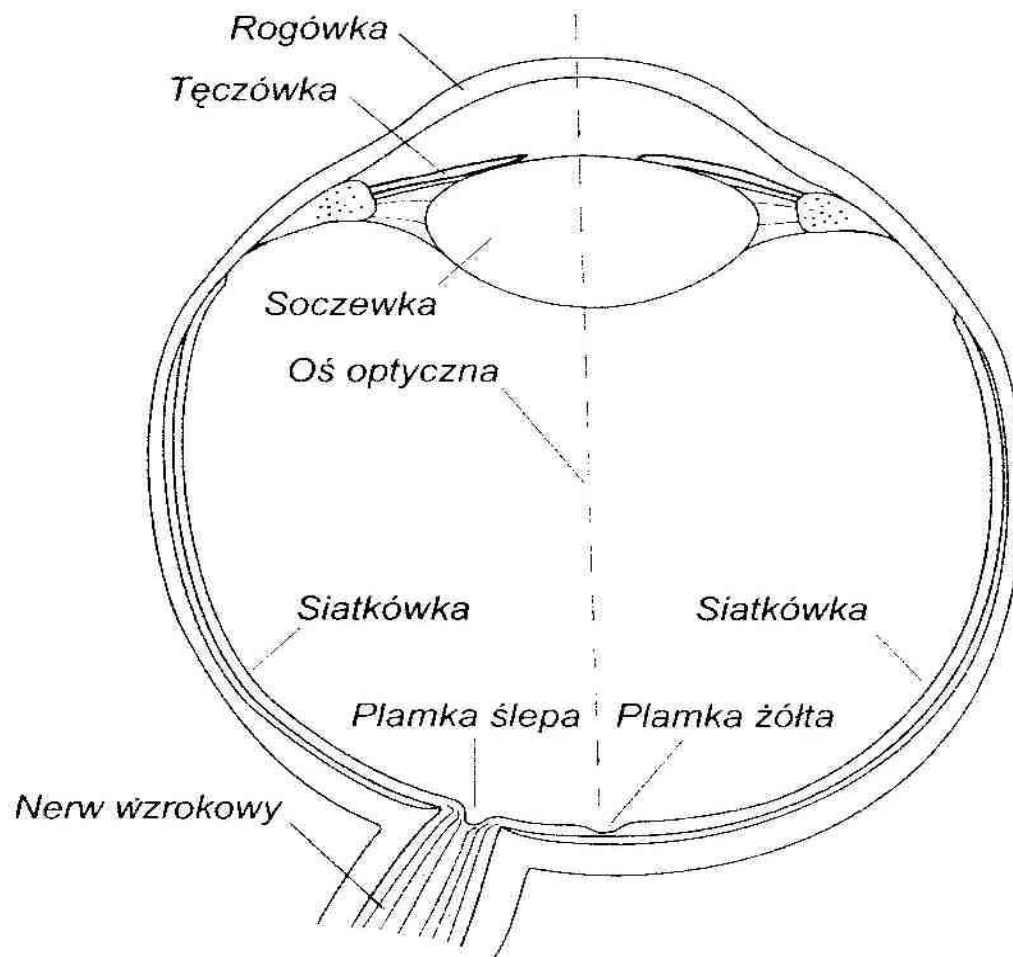
Albert H. Munsell

Trzy cechy barw Munsella:

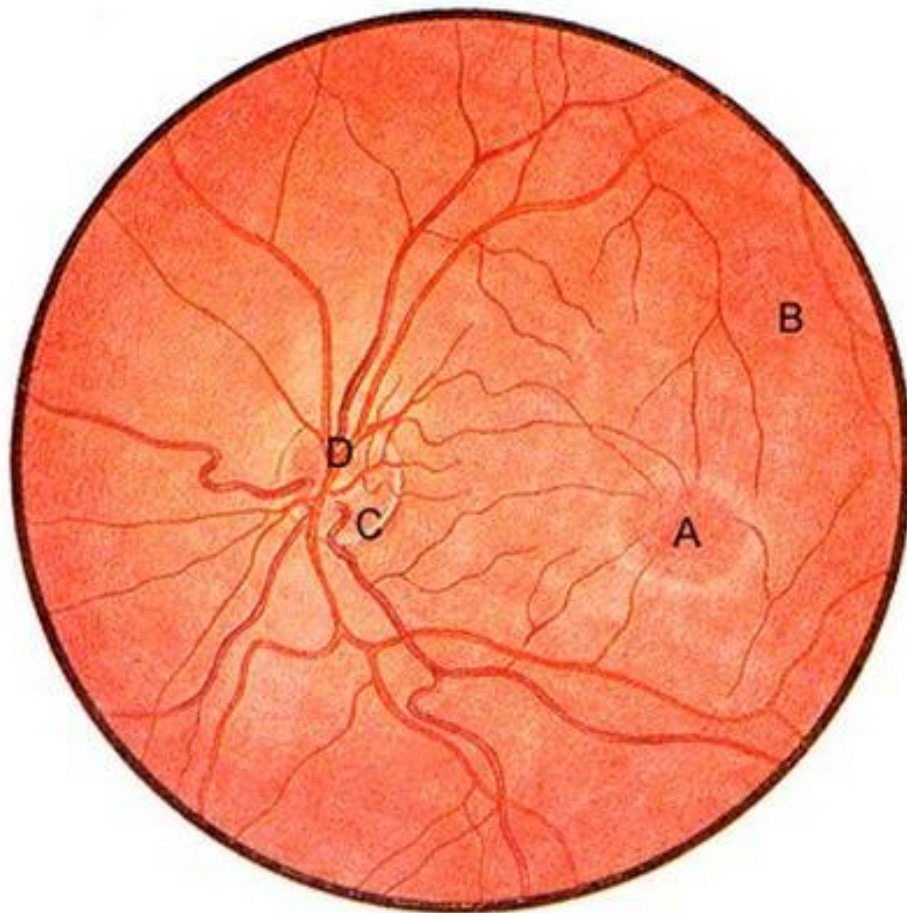
- odcień (kolor) H (z ang. Hue)
- nasycenie C (z ang. Chroma)
- walor V (z ang. Value)



Budowa oka



Siatkówka



A-plamka żółta

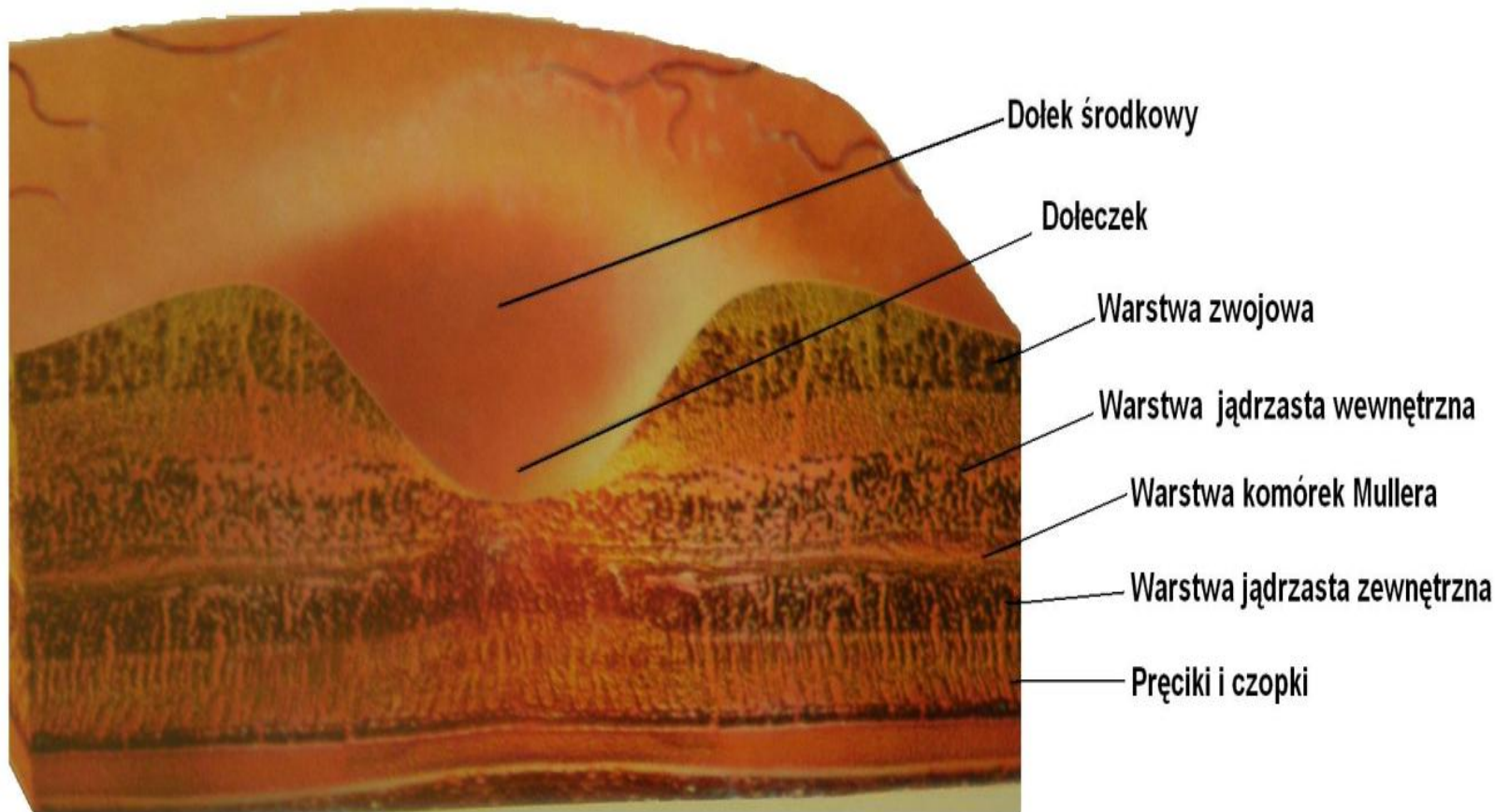
B- siatkówka

C- plamka ślepa)

D- naczynia siatkówki

Siatkówka

Plamka żółta



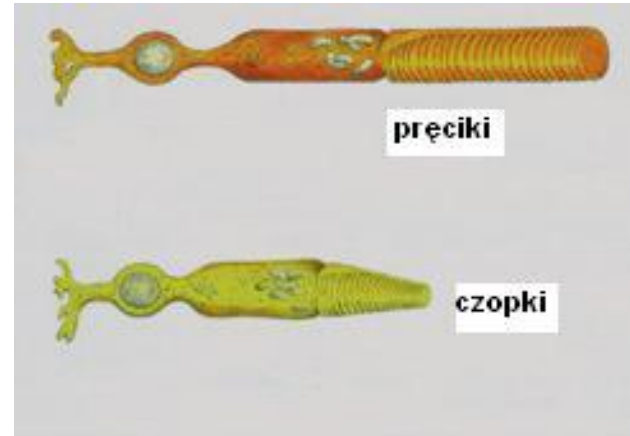
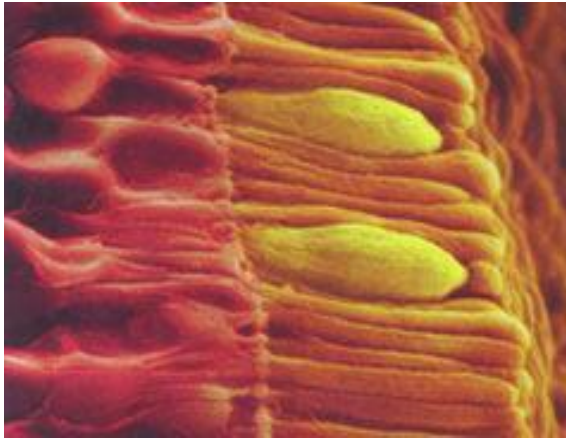
Pręciki

- odpowiedzialne za **widzenie nocne (skotopowe;** przy poziomie oświetlenia poniżej 0,01 lx);
- jest ich około 120 mln na siatkówce oka, mają długość około 60 μm i szerokość 2 μm .
- znajdują się na obrzeżach siatkówki (**widzenie peryferyjne**);
- **nie rozróżniają barw;**

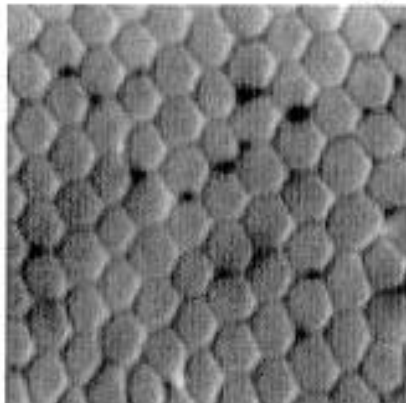
Czopki

- odpowiedzialne za widzenie dzienne (**fotopowe**; przy poziomie oświetlenia powyżej 30lx);
- liczba czopków na siatkówce jednego oka to około 6 mln. ich szerokość wynosi 4 μm , a długość 40 μm .
- znajdują się głównie wewnątrz dołka środkowego (plamki żółtej), gdzie ich zagęszczenie wynosi około 200 000/mm², poza dołkiem jest ich mniej;

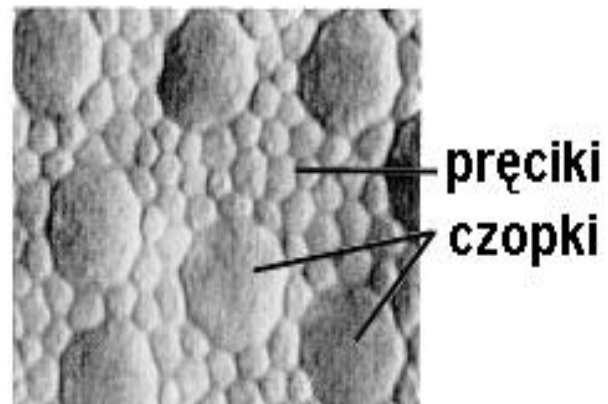
Pręciki i czopki



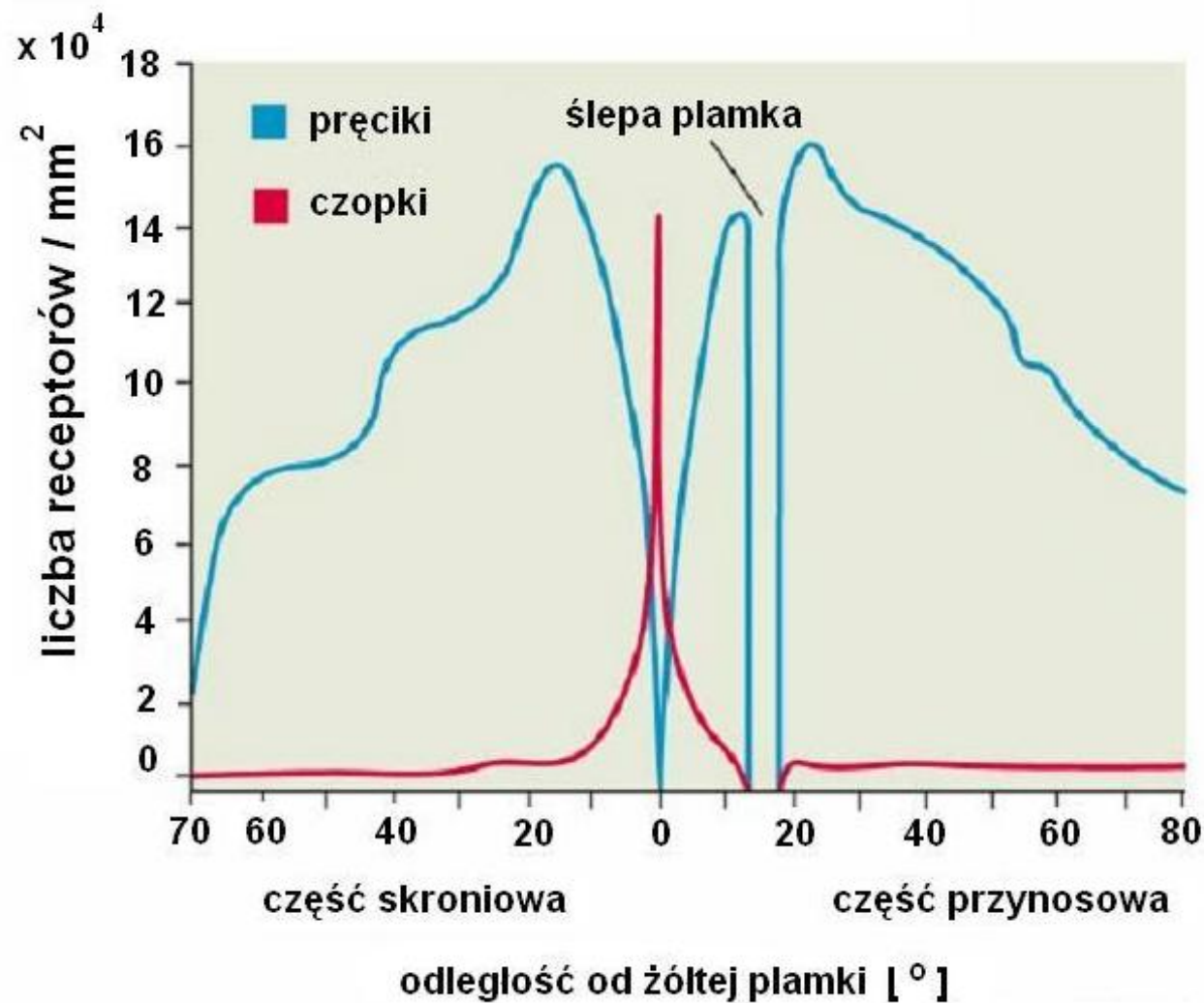
dolek środkowy



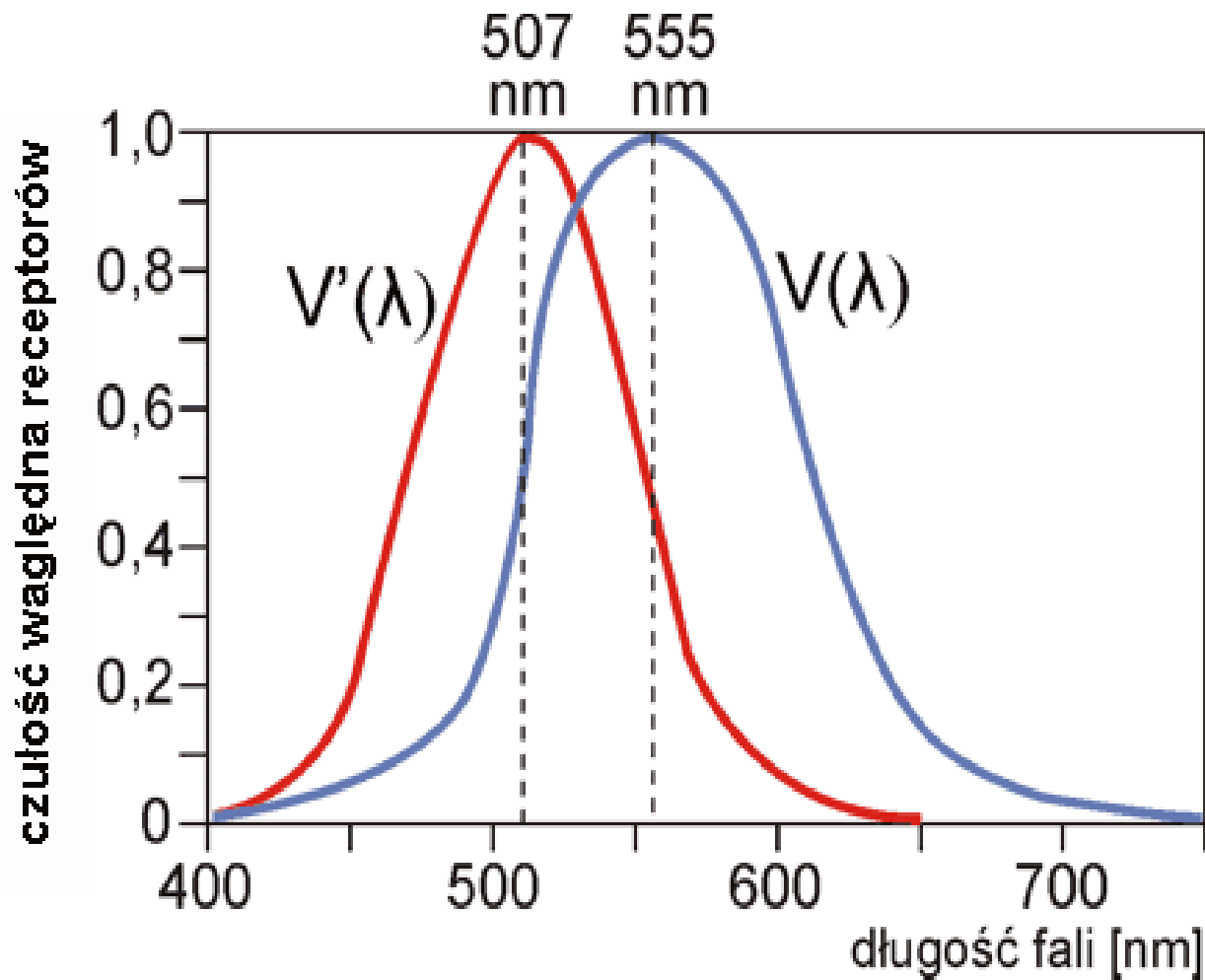
poza dolkiem



Pręciki i czopki



Efekt Purkyniego

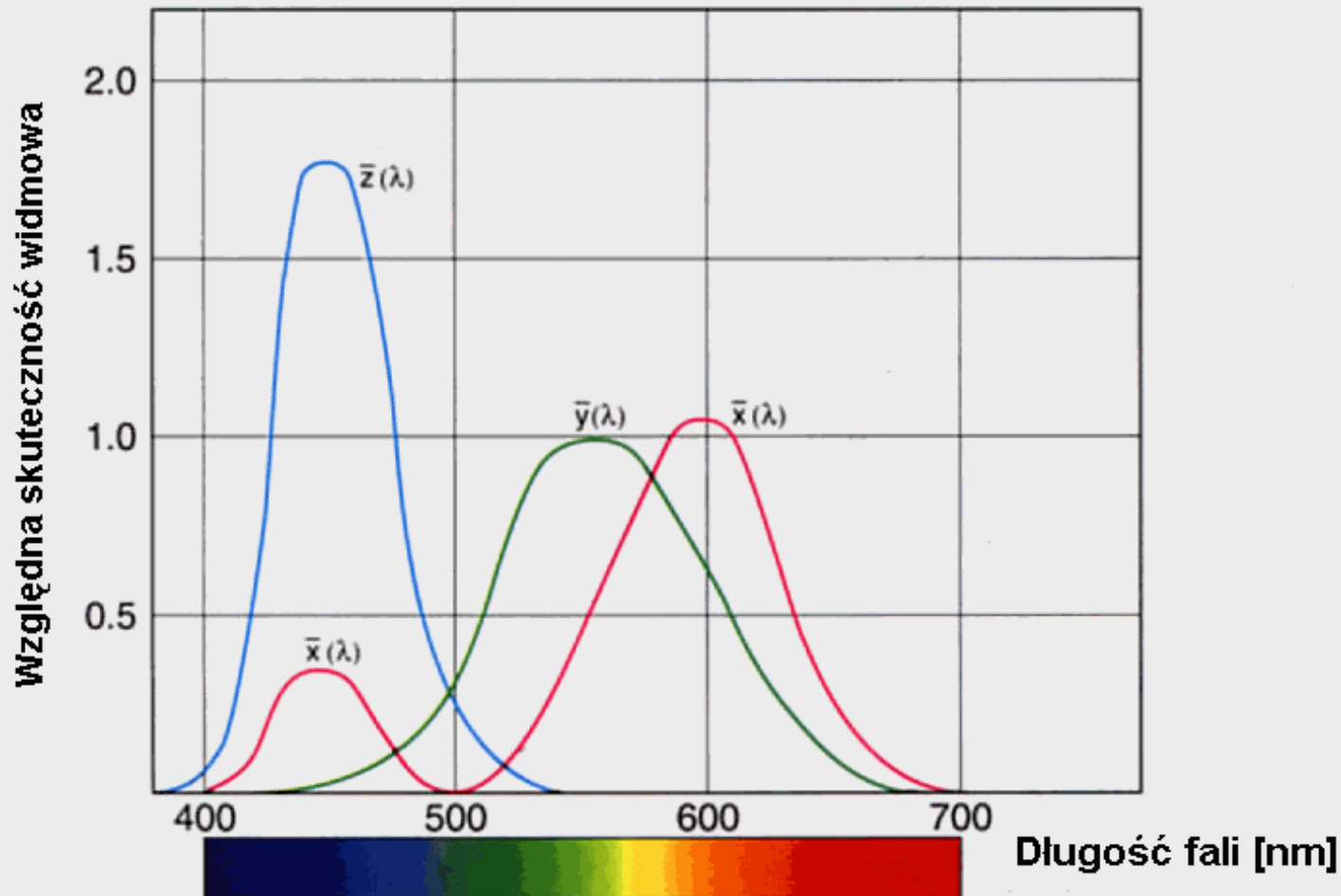


Czopki – widzenie barwne

Rozróżnia się **trzy rodzaje czopków** reagujące na różne długości promieniowania widzialnego:

- typu X – 64 % czopków; (Red, Long, Protos)
- typu Y- 32 % czopków; (Green, Medium, Deutos)
- typu Z- 4% czopków; (Blue, Short, Tritos).

Czopki – widzenie barwne



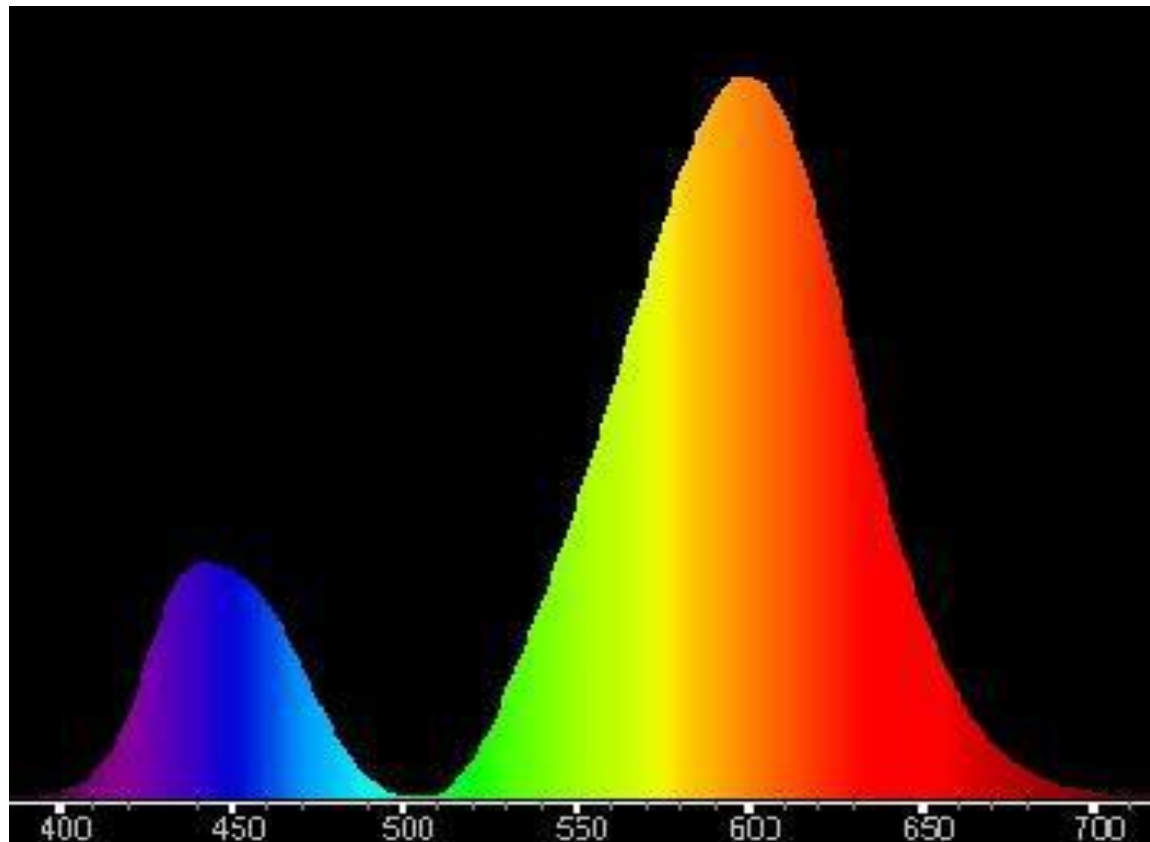
Czopki – widzenie barwne

Czułość czopka X (Red, Long, Protos)

Zakres: 410 to 690 nanometrów

Szczyt 580 nm

Zakres „szczytu”: 558 do 580 nm



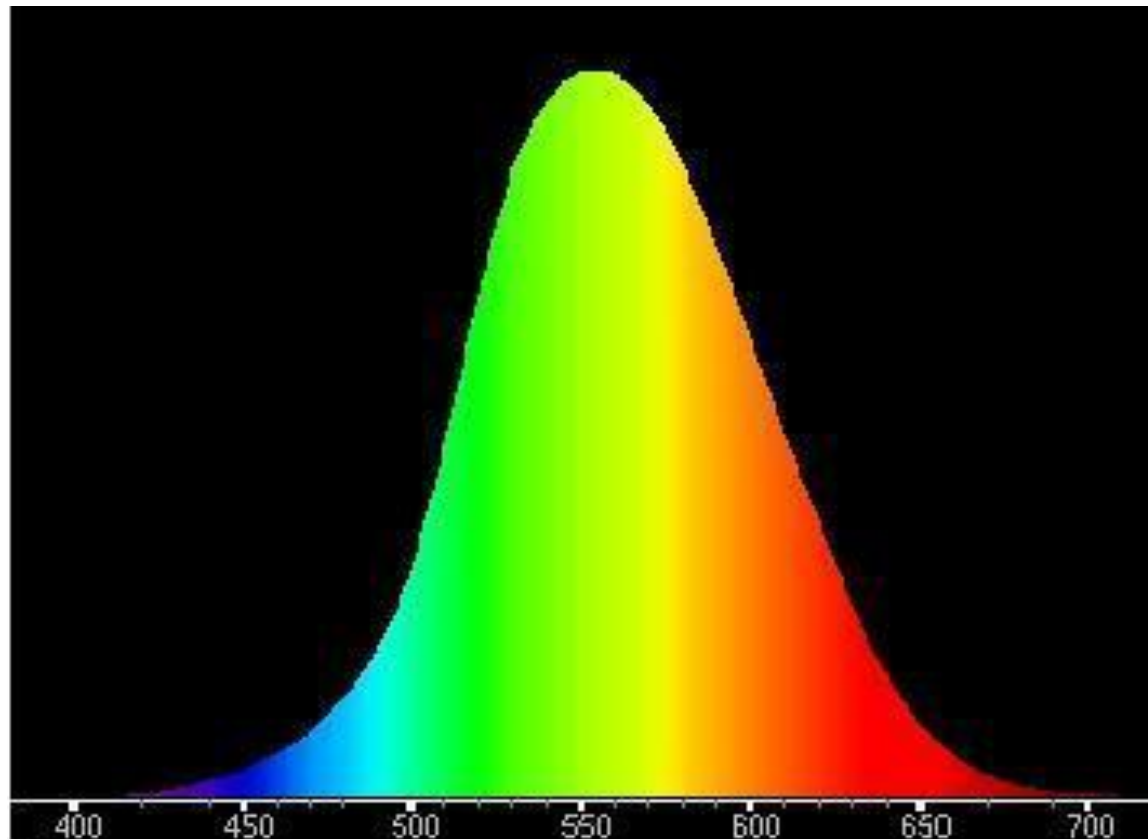
Czopki – widzenie barwne

Czułość czopka Y (Green, Medium, Deutos)

Zakres: 440 to 670 nanometrów

Szczyt 540 nm

Zakres „szczytu”: 534 do 540 nm



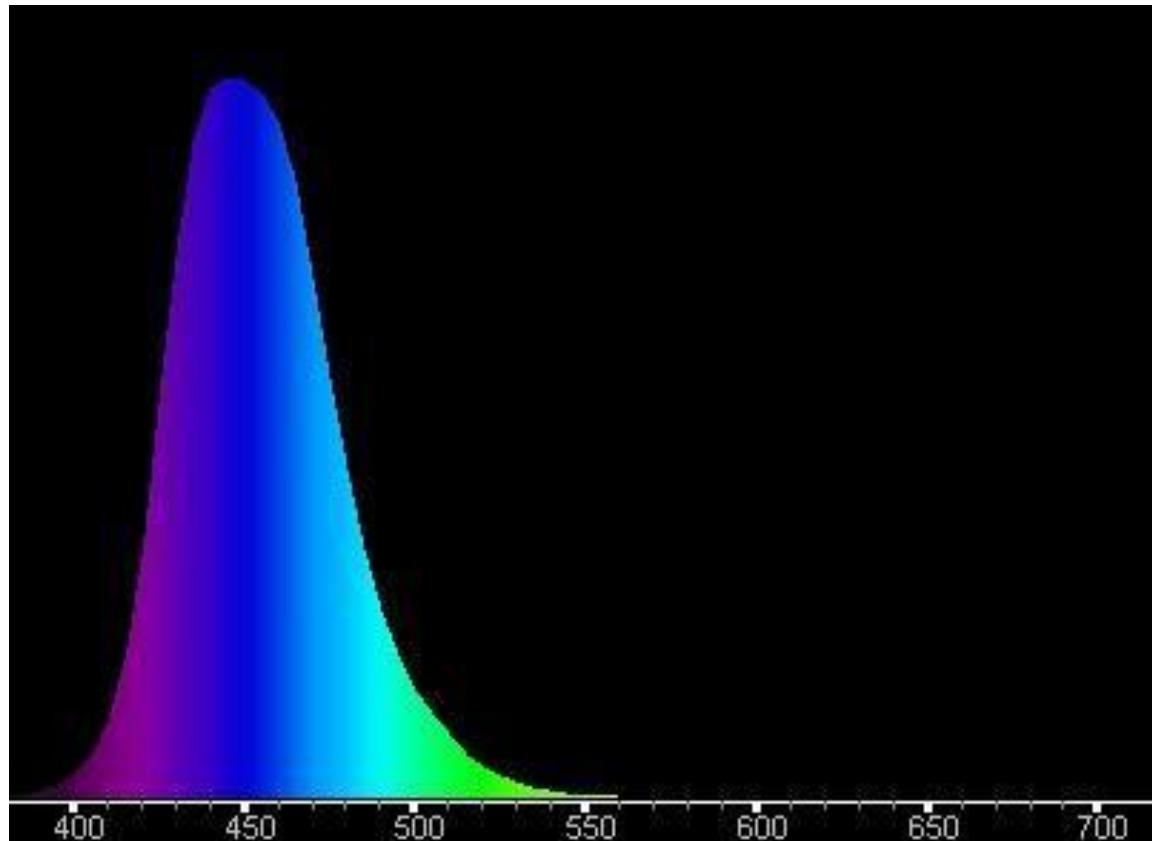
Czopki – widzenie barwne

Czułość czopka Z (Blue, Short, Tritos)

Zakres: 400 to 540 nanometrów

Szczyt 440 nm

Zakres „szczytu”: 420 do 440 nm



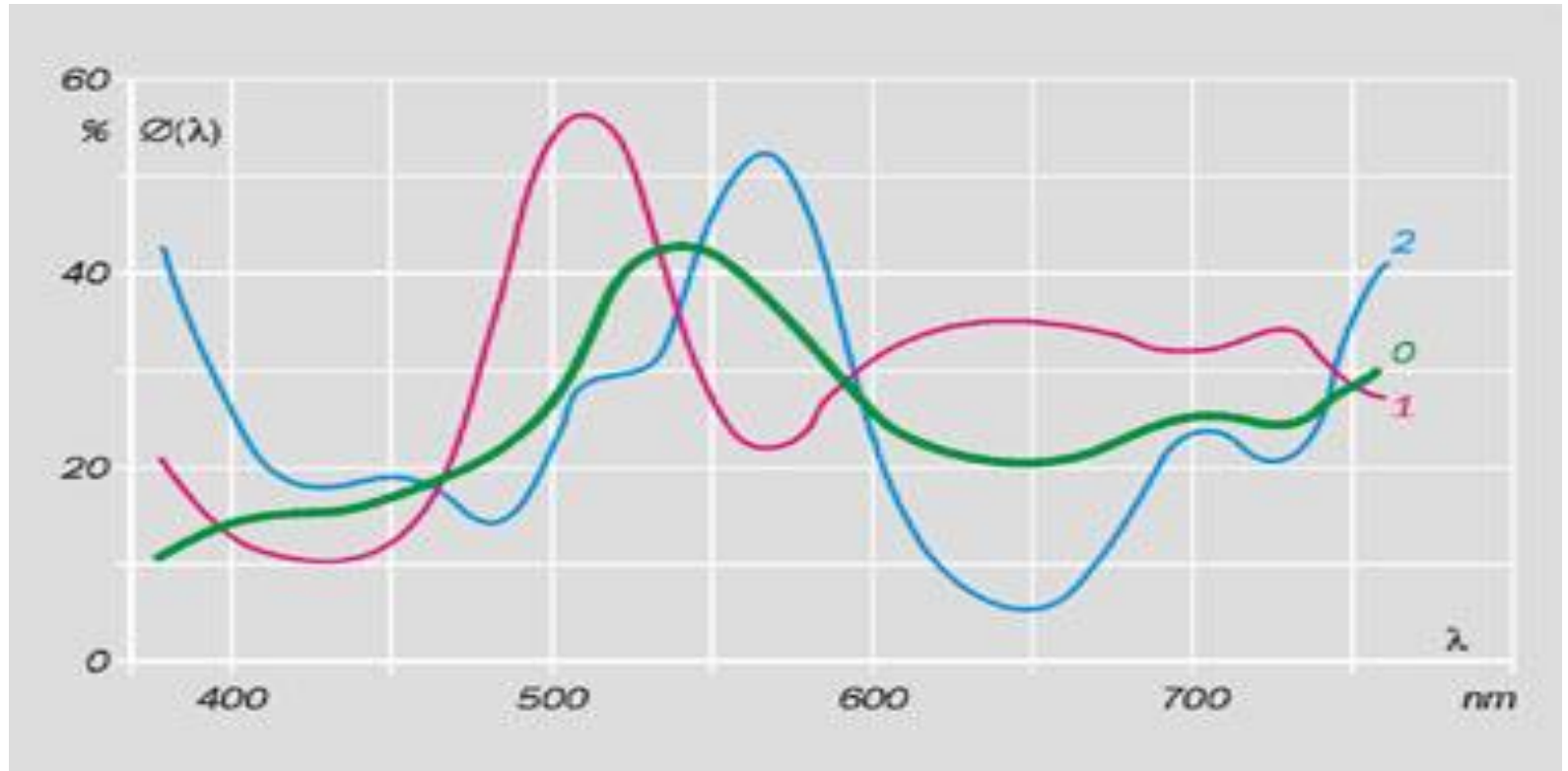
Teoria Younga-Helmholtza

- Substancje światłoczułe absorbują światło docierające do siatkówki oka, przechodząc zmiany o charakterze fotochemicznym, prowadzące to pojawienia się potencjału elektrochemicznego w czopkach.
- Potencjał ten w postaci impulsów elektrycznych przesyłany jest systemem nerwowym do mózgu.
- Mózg rozróżnia sygnały pochodzące od każdej z substancji, a ich wzajemny stosunek $r : g : b$ uświadamia wrażenie barwy.
- Odczucie jasności (luminancji) bodźca świetlnego zależy od sumy tych sygnałów ($r + g + b$). Im większa suma tym wrażenie bodźca jest większe. Jednakowe pobudzenie receptorów $r : g : b = 1:1:1$ odpowiada wrażeniu bieli, przy dużej sumie sygnałów lub szarości, przy małej sumie.

Teoria Heringa

- W oku istnieją komórki wrażliwe na promieniowanie trzech par przeciwstawnych barw: czerwonej-zielonej, żółtej-niebieskiej i białej-czarnej.
- W każdej z nich zachodzi mieszanie impulsów powodujących powstawanie barw, na które są wrażliwe.
- Założenie o czterech podstawowych barwach: czerwonej, żółtej, zielonej i niebieskiej odpowiada intuicyjnemu odróżnianiu tych barw w widmie jako barw samodzielnych, niestanowiących wrażenia mieszaniny jak np. fioletowa czy pomarańczowa.

Metameryzm



Oko ludzkie w przeciwieństwie do ucha, nie odróżnia widma drgań. Oznacza to, że wrażenia widzenia barwnego mogą być takie same przy różnych składnikach spektralnych promieniowania, które je wywołuje.

Wady postrzegania barw

Daltonizm – niedobór lub brak jednego lub więcej rodzajów czopków (8% mężczyzn i 0,3% kobiet)

Deuteranomalia – niedobór czopków zielonych (D, G, M, Y) - 5% mężczyzn i 0,2% kobiet

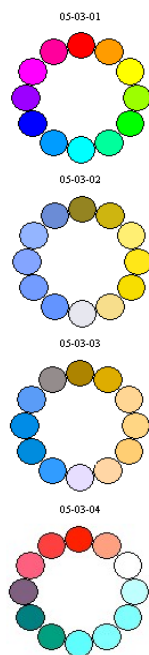
Deuteranopia - brak czopków zielonych (1% mężczyzn i 0,02% kobiet)

Protanomalia, protanopia - niedobór (brak) czopków czerwonych (P, R, L, X) (1% mężczyzn i 0,02% kobiet)

Tritanopia – brak czopków niebieskich (T, B, S, Z) (0,001% mężczyzn i 0,001% kobiet)

Monochromaci – brak czopków albo czopki tylko jednego rodzaju.

Daltonizm



NORMAL



PROTAN



DEUTERAN



TRITAN



Widzenie barwne

$$X = \int_{380}^{780} \bar{x}(\lambda) I(\lambda) d\lambda$$

$$Y = \int_{380}^{780} \bar{y}(\lambda) I(\lambda) d\lambda$$

$$Z = \int_{380}^{780} \bar{z}(\lambda) I(\lambda) d\lambda$$

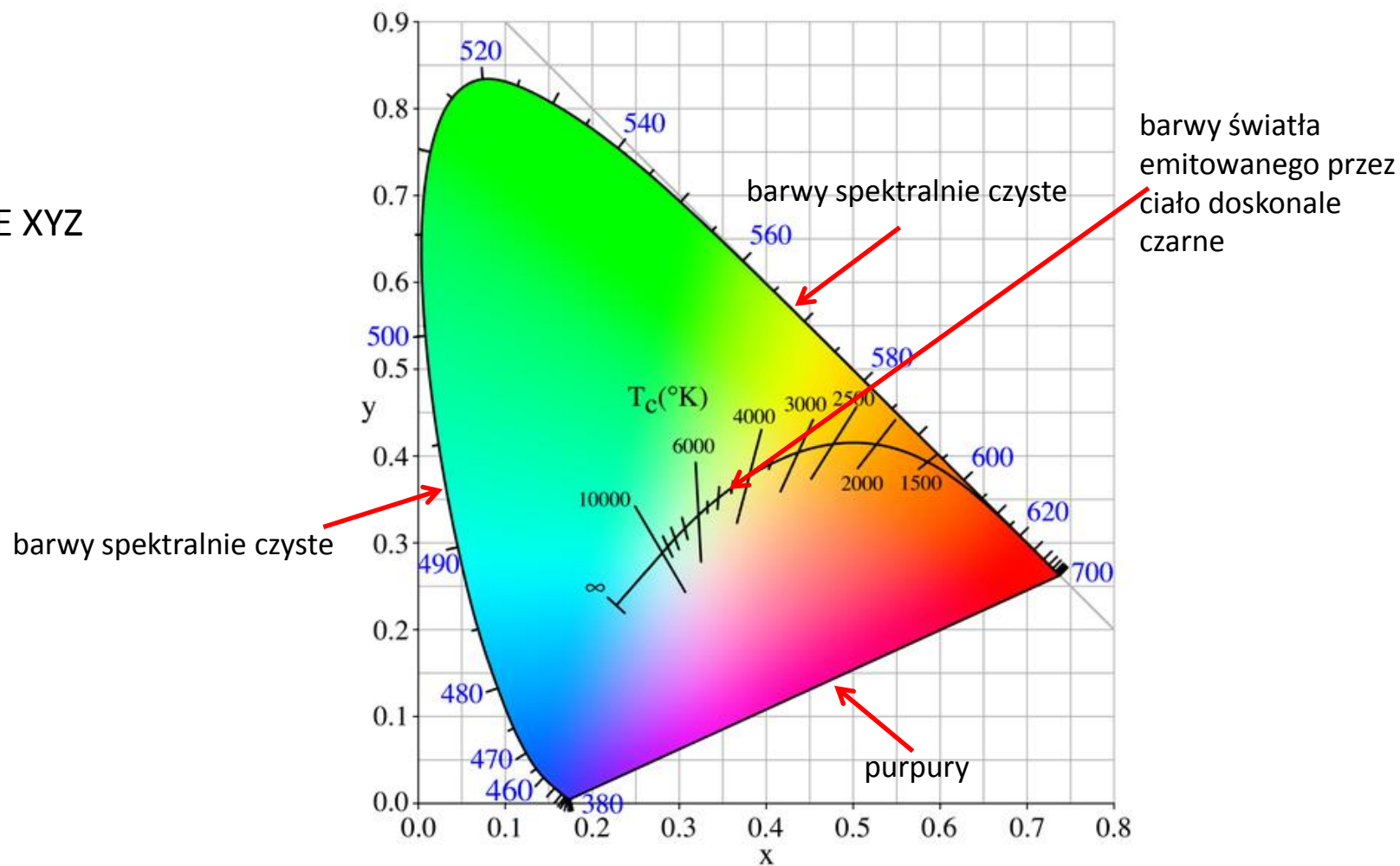
$$x = \frac{X}{X + Y + Z},$$

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

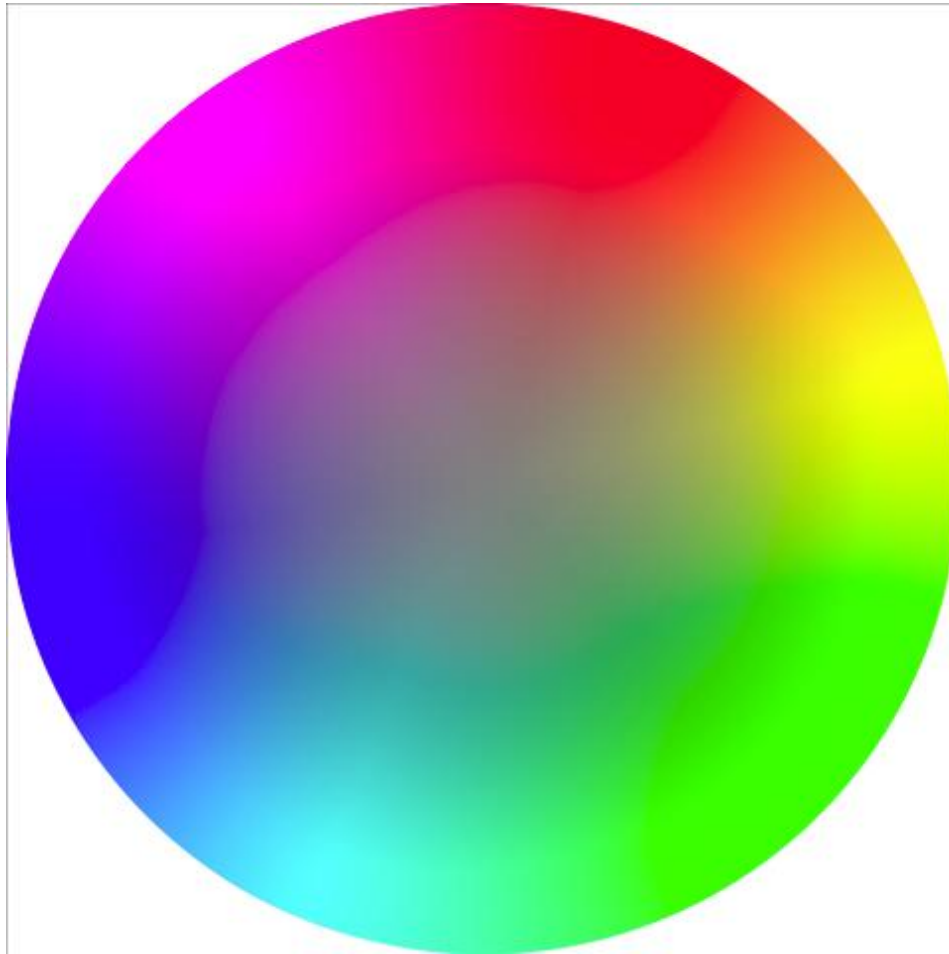
$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}.$$

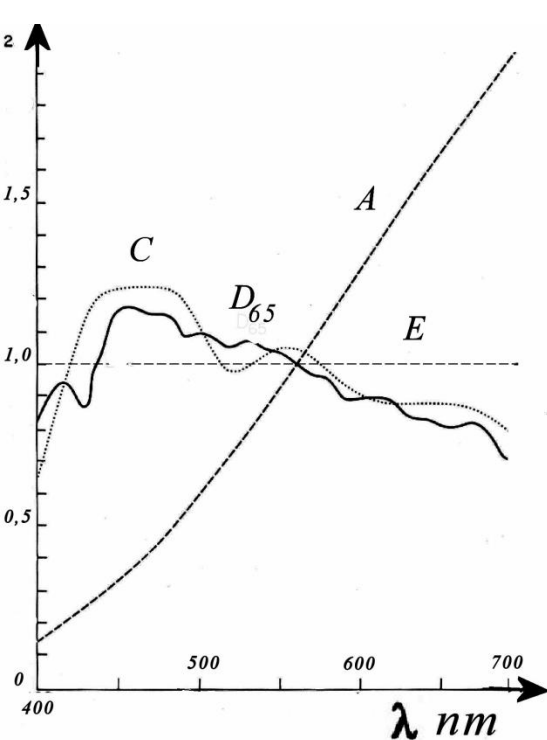
Trójkąt barw CIE XYZ

CIE XYZ



Koło barw





Illuminanty

- wzorce światła, o określonej charakterystyce widmowej

Illuminant A o współrzędnych trójkromatycznych $x=0,44758$, $y=0,40744$ ma barwę włókna wolframowej żarówki gazowanej w temperaturze barwowej 2854 K. Rozkład spektralny strumienia energii promieniowania A pokazano na rys.

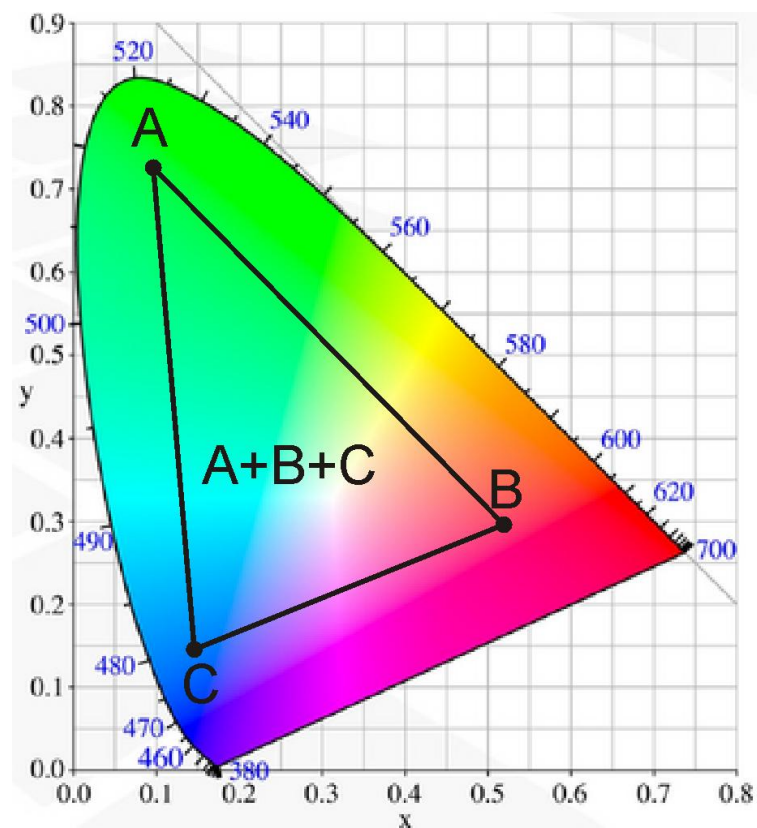
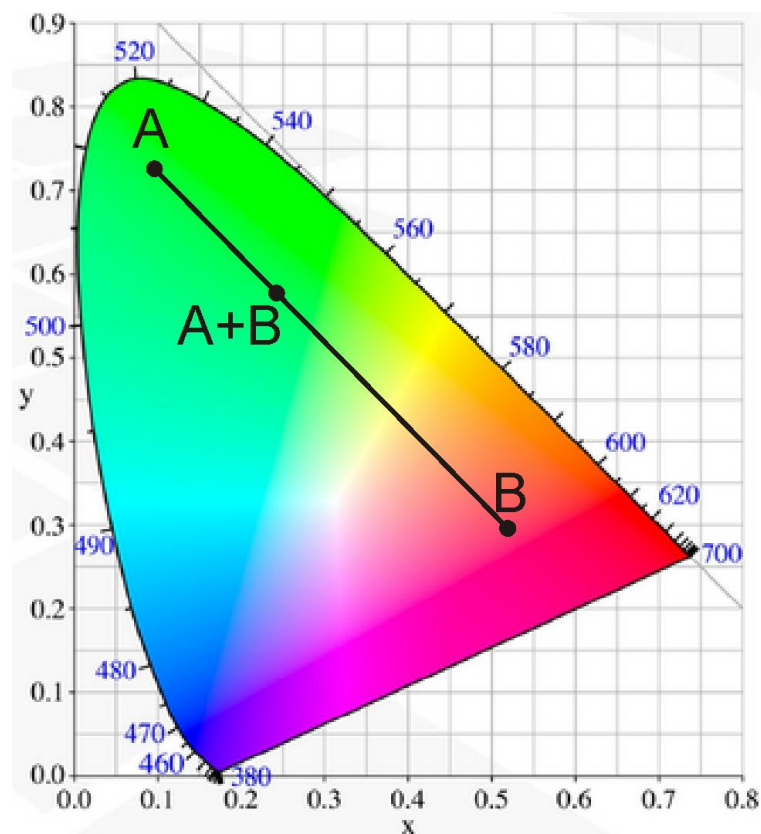
Illuminant B o współrzędnych trójkromatycznych $x=0,34842$, $y=0,35161$ odpowiada uśrednionej barwie bezpośredniego promieniowania słonecznego w południe (temperatura barwowa 4874 K.

Illuminant C o współrzędnych trójkromatycznych $x=0,31006$, $y=0,31616$ odpowiada w przybliżeniu barwie rozproszonego światła dziennego północnej strony nieba (temperatura barwowa 6774.

Illuminant D_{65} o współrzędnych trójkromatycznych $x=0,31271$, $y=0,329016$ odpowiada w przybliżeniu barwie uśrednionego strumienia energii światła dziennego o różnych porach dnia, przy różnym zachmurzeniu i różnej szerokości geograficznej krajów europejskich (temperatura barwowa 6500 K (rys.). Istnieje jeszcze kilka iluminantów (np. D_{55} , D_{75} odpowiadających światłu rozproszonemu w innych warunkach geograficznych.

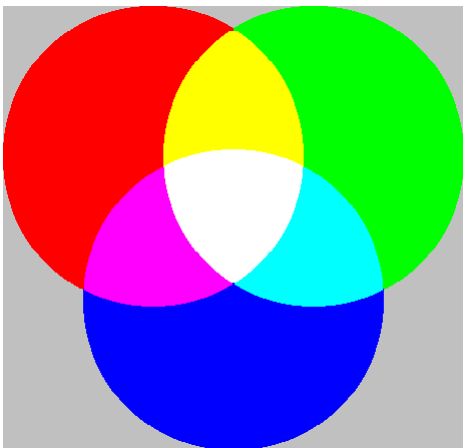
Illuminant E o współrzędnych trójkromatycznych $x=0,33333$, $y=0,33333$ jest wytworem czysto teoretycznym i odpowiada promieniowaniu równoenergetycznemu.

Zasady dodawania barw

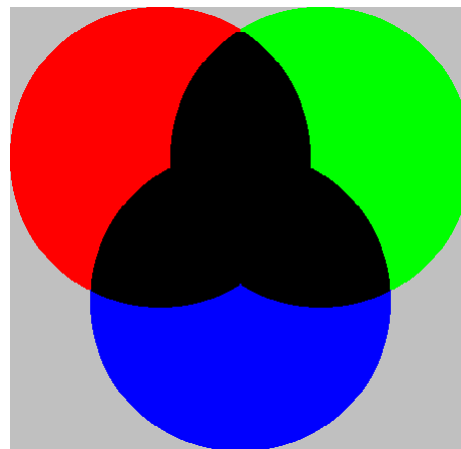


Mieszanie barw

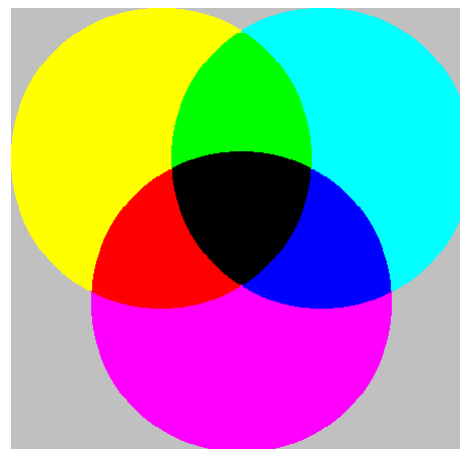
Addytywne



Subtraktywne



Subtraktywne barw dopełniających



Układ x, y, Y

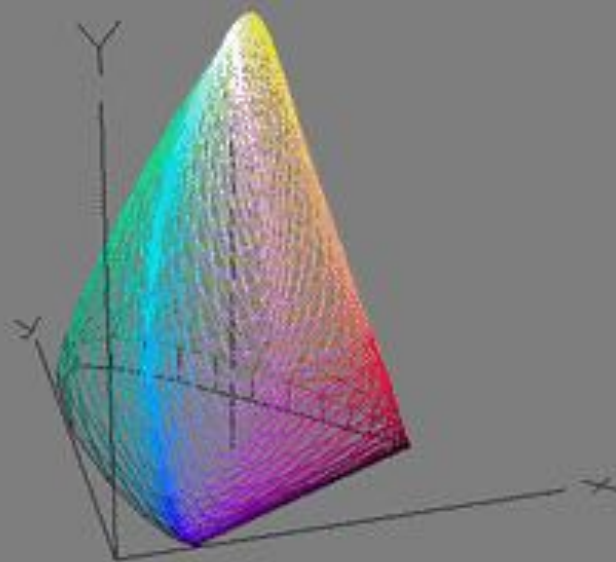
Współrzędne tróchromatyczne x, y określają **chromatyczność** barwy, składowa Y wyznacza od razu **jasność** barwy.

Barwa achromatyczna (biała) ma w tej skali jasność $Y=100$, gdy zakres promieniowania obejmuje całe promieniowanie widmowe. Barwa ta ma czystość pobudzenia (niżej) zerową, jest więc całkowicie nienasycona. Barwa monochromatyczna, widmowa, jest w pełni nasycona, ale formalnie ma jasność $Y=0$!

Układ x, y, Y

Copyright © 2007 Bruce Justin Lindbloom

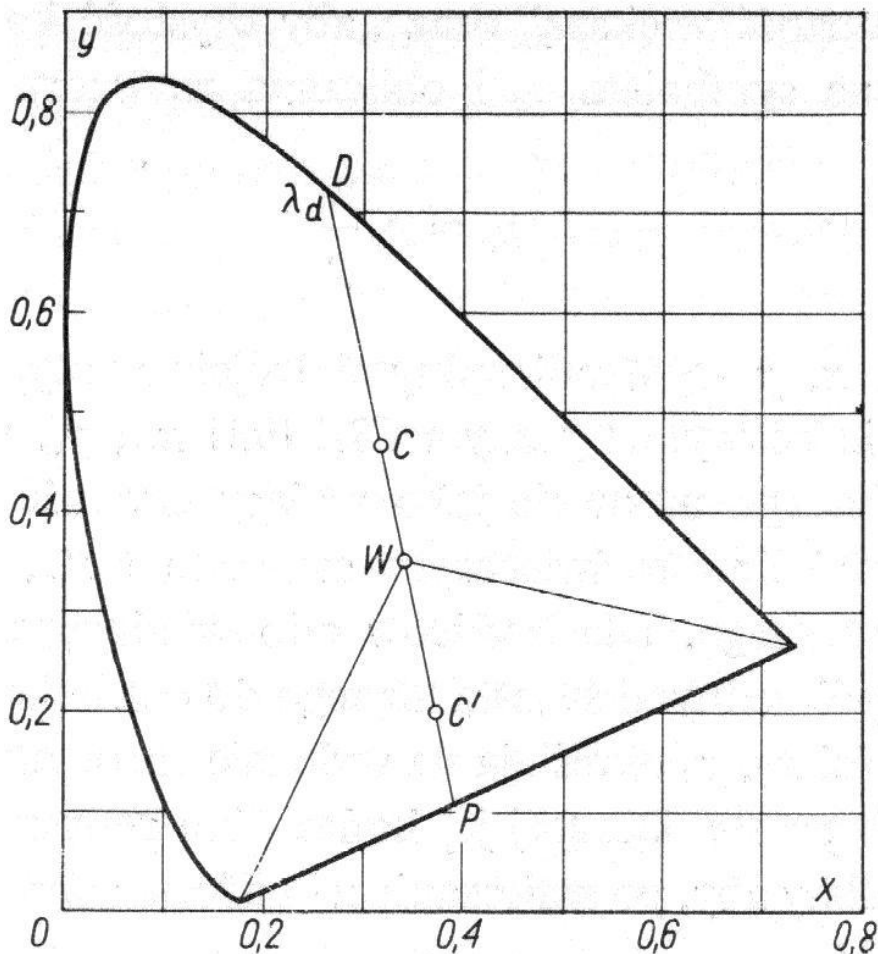
www.brucelindbloom.com



Jednowymiarowe skale barw

- ❑ Określenie barwności (chromatyczności) wymaga **dwóch parametrów** – dwóch współrzędnych chromatyczności lub odpowiedników odcienia i nasycenia. Jeżeli jednak zmienia się tylko odcień, to do określenia barwności wystarczy **jeden parametr**.
- ❑ Istnieje wiele takich skal barwy. Nie są one uniwersalne, ale upraszczają czynności klasyfikacyjne związane z wieloma zagadnieniami praktycznymi w produkcji i handlu.

Długość fali dominującej (dopełniającej) i czystość bodźca

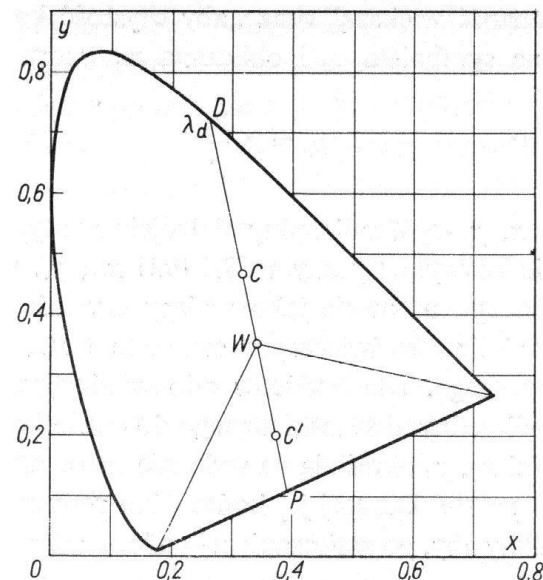


Długość fali dominującej (dopełniającej) i czystość bodźca

Pierwszy parametr:

Długość fali **dominującej** λ_d – gdy punkt barwy „czystej” leży na krzywej barw widmowych lub powyżej trójkąta purpur;

Długość fali **dopełniającej** – gdy punkt ten leży na podstawie lub wewnątrz trójkąta purpur.



Długość fali dominującej (dopełniającej) i czystość bodźca

Drugi parametr:

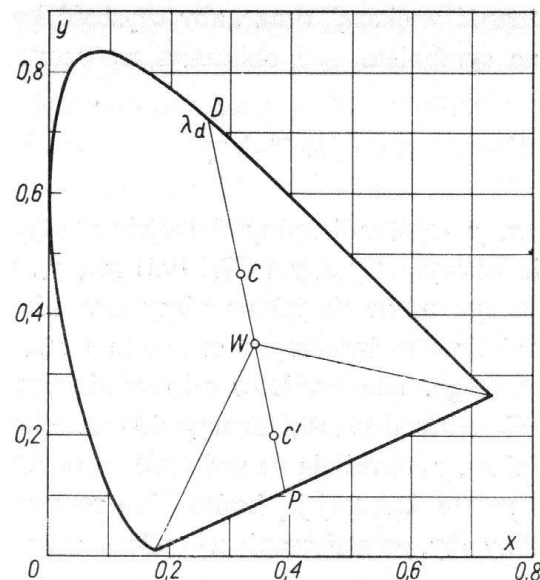
**Czystość pobudzenia (czystość
kolorymetryczna):**

Czystość pobudzenia ma być liczona z tego z
dwóch wzorów:

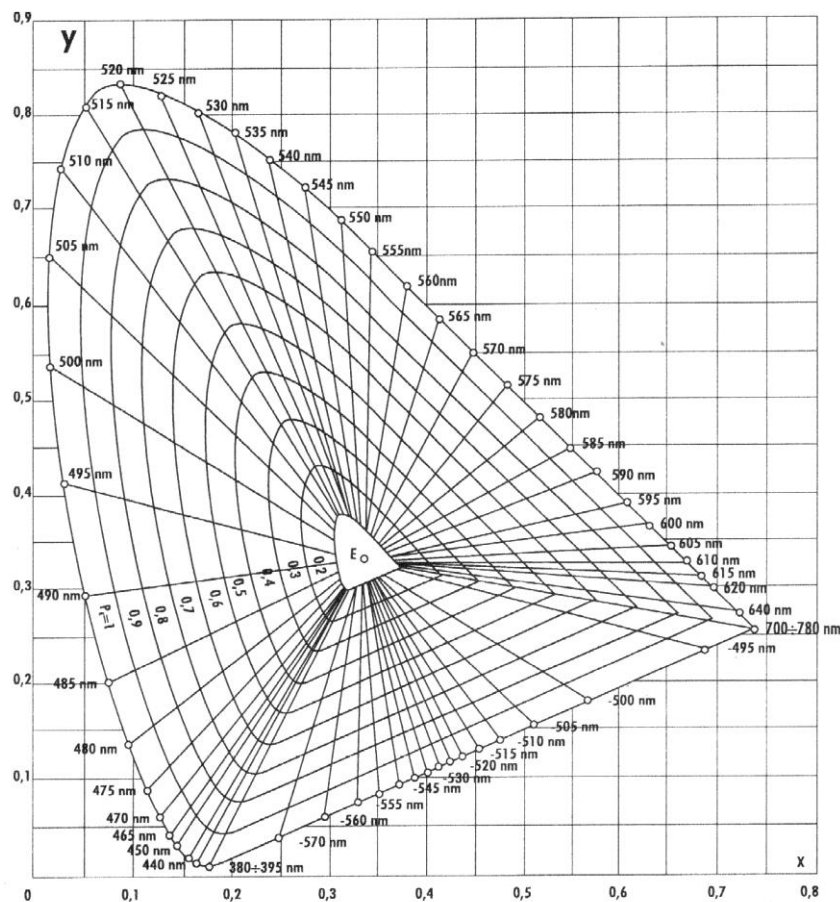
$$p_e = \frac{y - y_w}{y_d - y_w} \quad \text{lub:} \quad p_e = \frac{x - x_w}{x_d - x_w}$$

którego licznik ma większą wartość;
czystość kolorymetryczna zaś:

$$p_c = p_e \frac{y_d}{y}$$



Długość fali dominującej (dopełniającej) i czystość bodźca



Układ RGB CIE 1931

W tym układzie za bodźce główne przyjęto dla R promieniowanie o długości fali $\lambda \geq 700$ nm, oraz dwie linie spektralne rtęci: 546,1 nm dla G oraz 435,8 nm dla B .

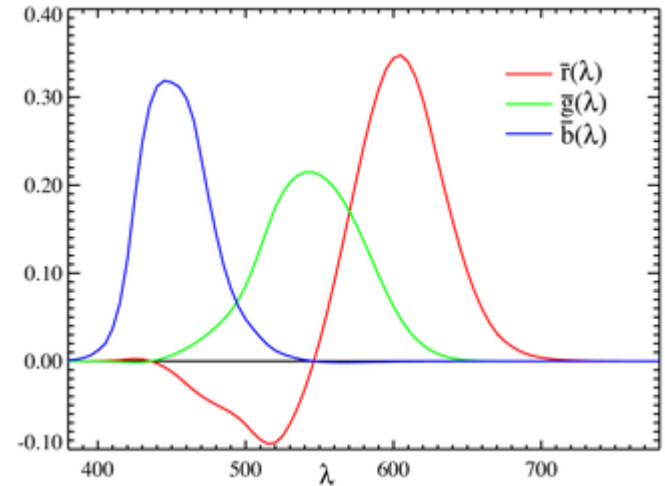
Macierz barw podstawowych układu RGB (iluminant D65):

$$\begin{bmatrix} x_R & x_G & x_B \\ y_R & y_G & y_B \\ z_R & z_G & z_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,7347 & 0,2738 & 0,1666 \\ 0,2653 & 0,7174 & 0,0089 \\ 0,0000 & 0,0088 & 0,8246 \end{bmatrix}$$

$$r = \frac{R}{R+G+B}, \quad g = \frac{G}{R+G+B}, \quad b = 1 - r - g.$$

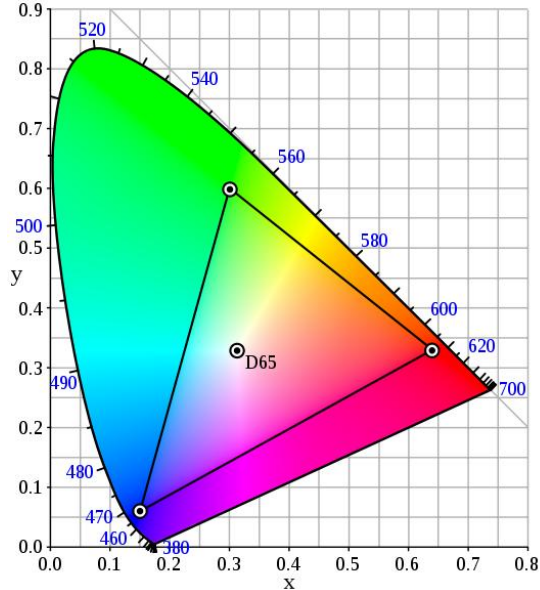
$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 41,213 & 32,041 & 21,7628 \\ 14,882 & 83,954 & 1,1626 \\ 0,0000 & 1,0298 & 107,717 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,028 & -0,011 & -0,5565 \cdot 10^{-2} \\ -14,882 & 83,954 & 0,0858 \cdot 10^{-2} \\ 0,0000 & -1,0298 & 0,9275 \cdot 10^{-2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$



sRGB

sRGB (standard RGB)
(1996 Hewlett-Packard, Microsoft)



Zakres kolorów przestrzeni sRGB

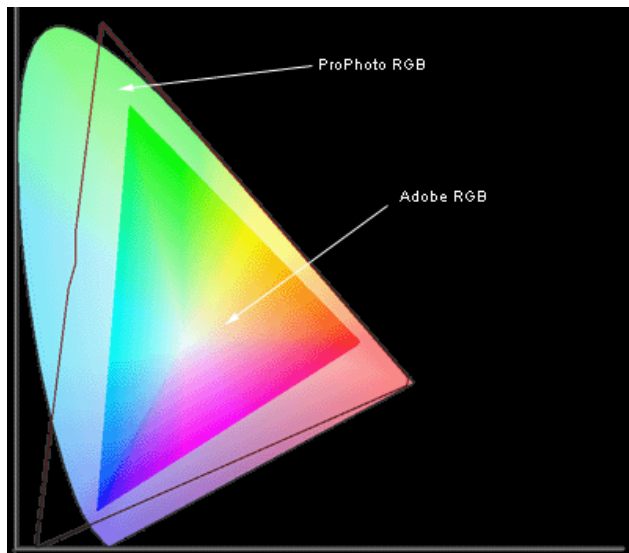
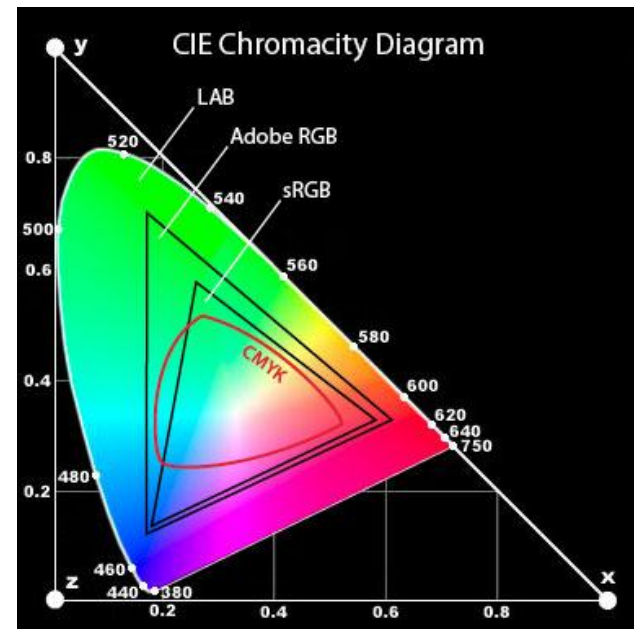


Figure 1: A 2-D plot of Adobe RGB (the solid triangle) compared to ProPhoto RGB (the red triangle). ProPhoto RGB contains many more of the colors we can see (represented by the curved triangle) than Adobe RGB.



RGB a luminofory

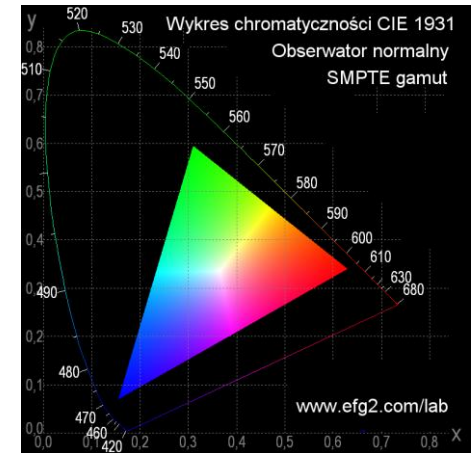
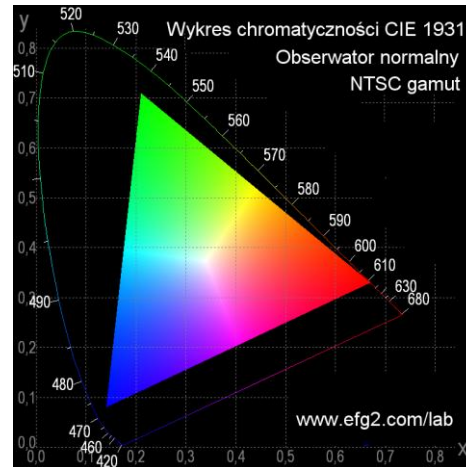
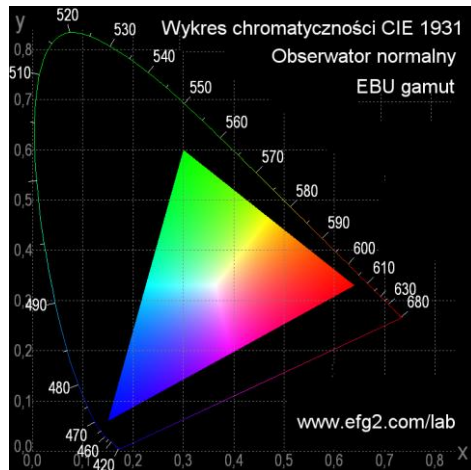
Luminofor EBU

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,2418 & -1,5378 & -0,4987 \\ -0,9690 & 1,8755 & 0,0415 \\ 0,0557 & -0,2043 & 1,0586 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

Luminofor SMPTE

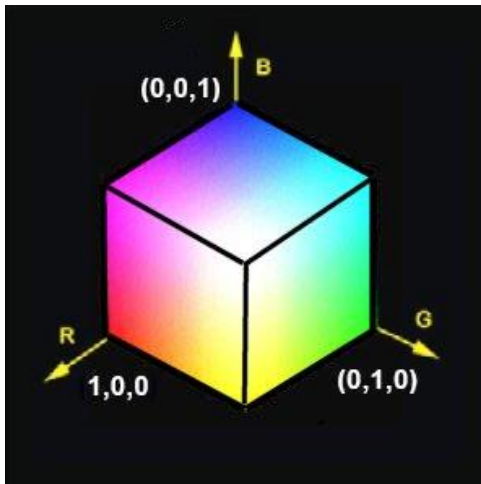
$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,5069 & -1,7402 & -0,5442 \\ -1,0688 & 1,9772 & 0,0352 \\ 0,0564 & -0,1973 & 1,0515 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

Luminofor NTSC

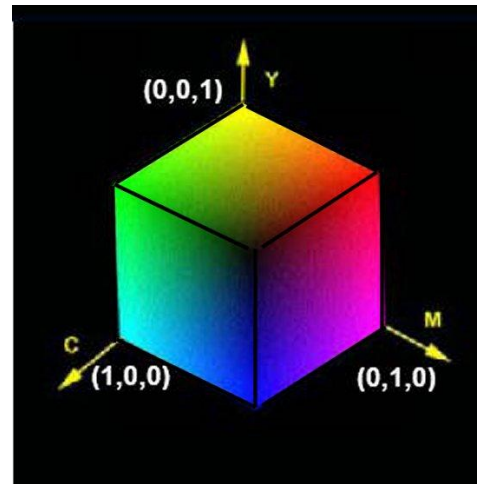


CMYK

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

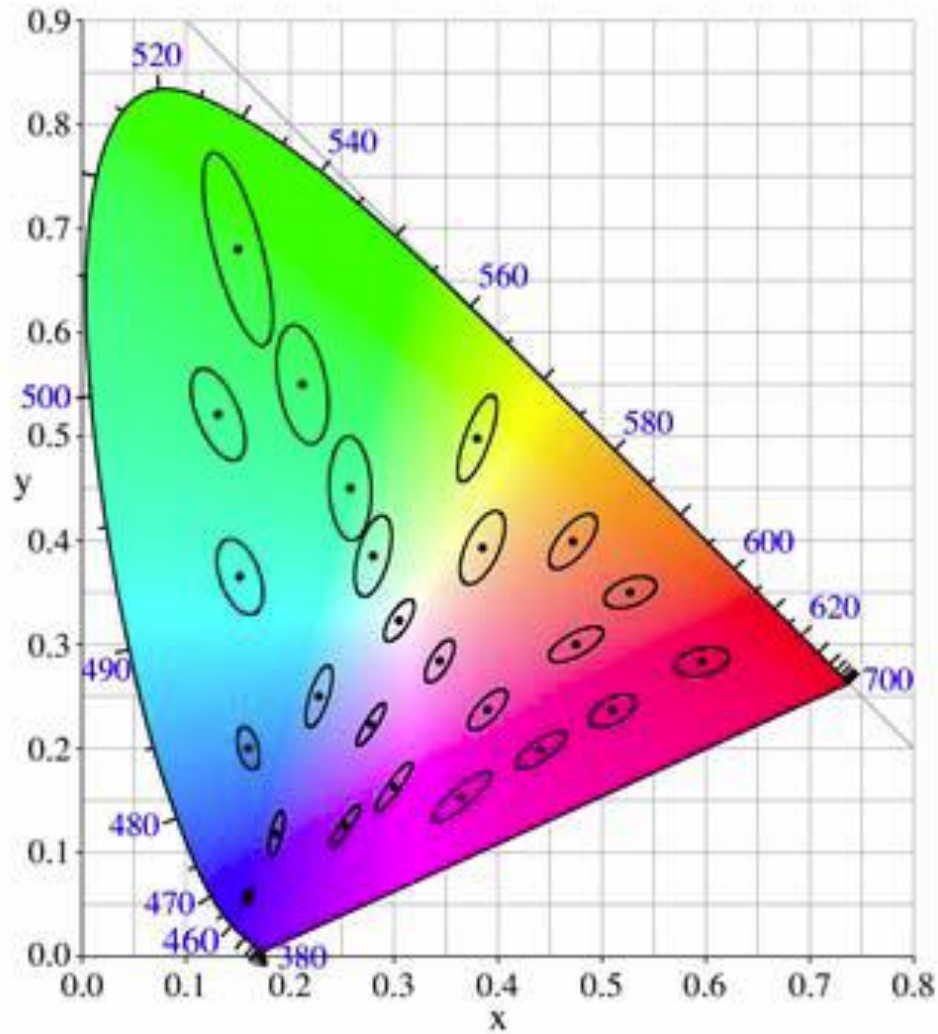


Sześcian RGB



Sześcian CMYK

Elipsy Stilesa



Wady modelu CIE XYZ

- ❑ Wykres jest płaski i nie można na nim odróżnić barw różniących się luminancją. Nie odróżnia się np. niebieskiego od granatowego, zielonego od oliwkowego, różowego od brązowego. Co prawda wielkość Y opisująca te różnice istnieje, ale jest ukryta, nie ma jej na wykresie.
- ❑ Obszary barw, których oko nie rozróżnia, leżą wewnątrz tzw. elips Stilesa. Elipsy barw mieszczących się poniżej zdolności rozdzielczej barwowej oka mają bardzo różne wielkości: najmniejsze leżą w okolicy barw fioletowych, wielokrotnie większe są natomiast w obszarze zieleni. Utrudnia to bardzo tolerowanie barw produktów przemysłowych.

Inne układy barw

- CIE XYZ (1931)
- CIE uv (1960)
- CIE $L^*u^*v^*$ (1976)
- CIE $L^*a^*b^*$ (1976)
- mutacje

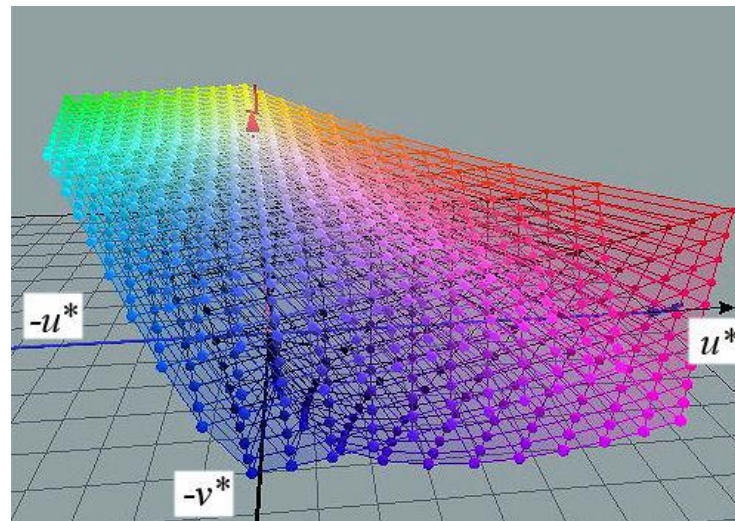
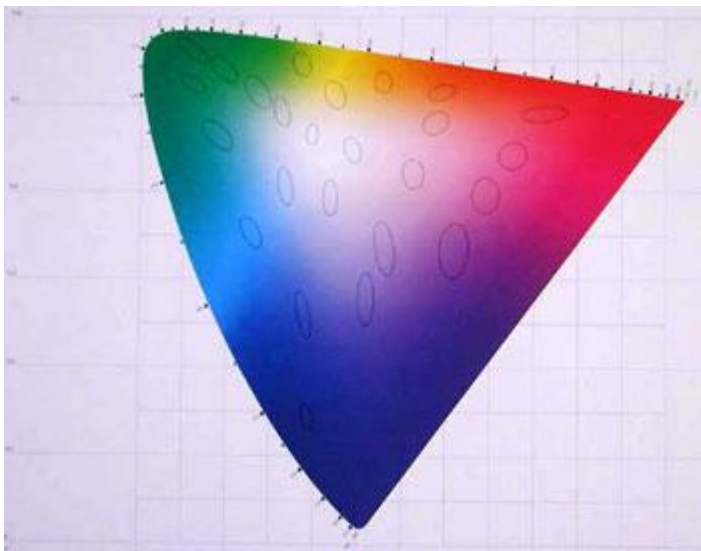
CIE $L^*u^*v^*$

L – luminancja (zależy od długości fali)

u^*, v^* – współrzędne barwy zależne od x, y, z z układu CIE XYZ

N – nasycenie (związek z czystością pobudzenia, „ilość barwy w barwie”)

C – chromatyczność, $C = L \cdot N$

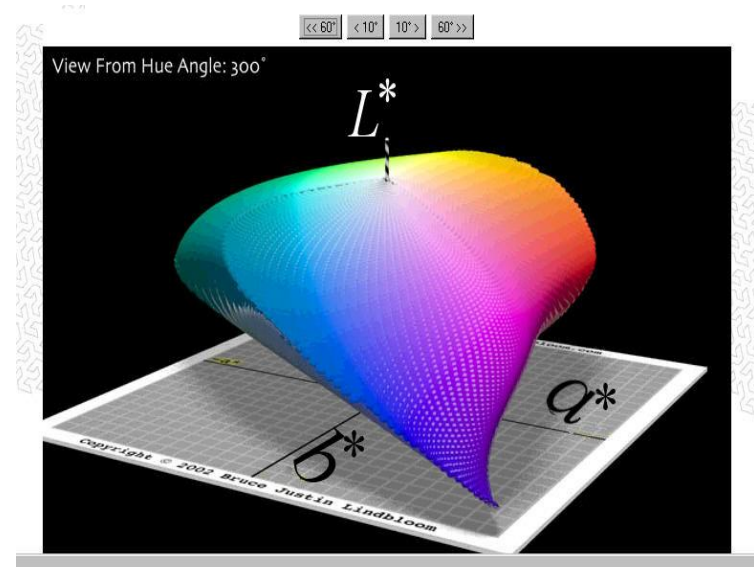


Przestrzeń barw w układzie CIE $L^*u^*v^*$

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

L – luminancja (zależy od długości fali)

a^*, b^* – współrzędne barwy zależne od x, y, z z układu CIE XYZ



Przestrzeń barw w układzie CIE Lab

Jednorodna przestrzeń kolorów, w której odległość między punktami jest proporcjonalna do wizualnej różnicy barw.

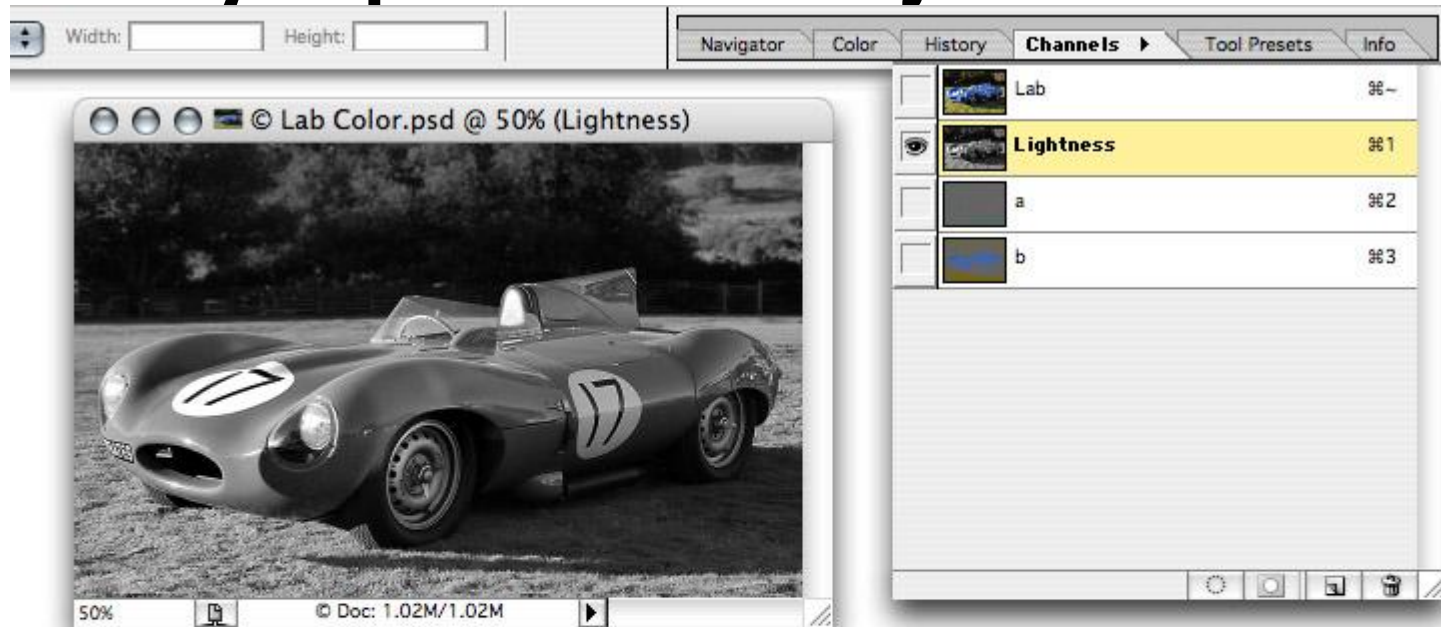
Sposoby zapisu informacji o barwie - RGB



Sposoby zapisu informacji o barwie - CMYK



Sposoby zapisu informacji o barwie - Lab



Kanały:

L – jasność

a – mieszanina barw czerwień-zielń

B – mieszanina barw żółta-niebieska

Pomiary barw

- Metody porównawcze
- Metody spektralne
- Metody 3 barw
- Kalkulatory barw

Zastosowanie pomiarów barw

- Technologie video (monitory, wyświetlacze, aparaty fotograficzne, drukarki)
- Przemysł włókienniczy
- Przemysł farbiarski
- Systemy sygnalizacji i ostrzegania
- Optometria