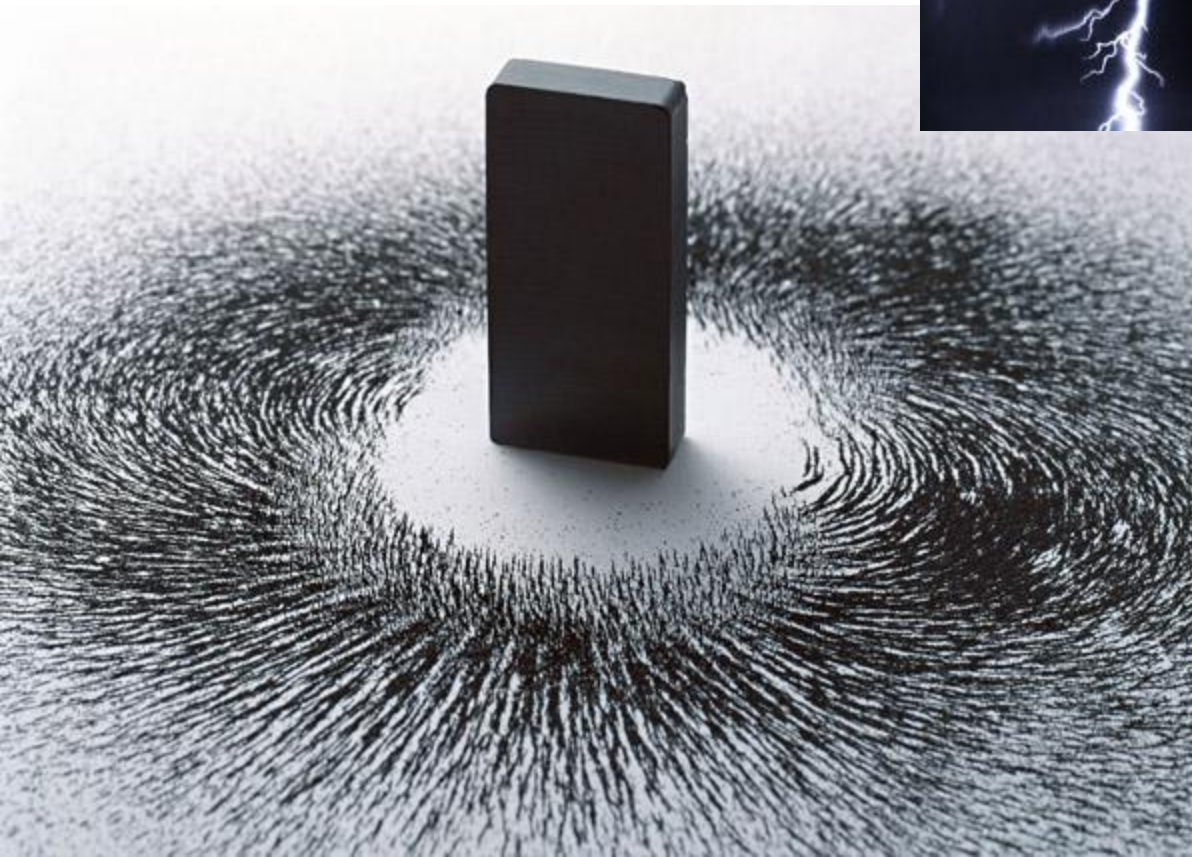


# Wykład 2

Fotometria i kolorymetria



Fala elektro-  
magnetyczna

# Fala elektromagnetyczna



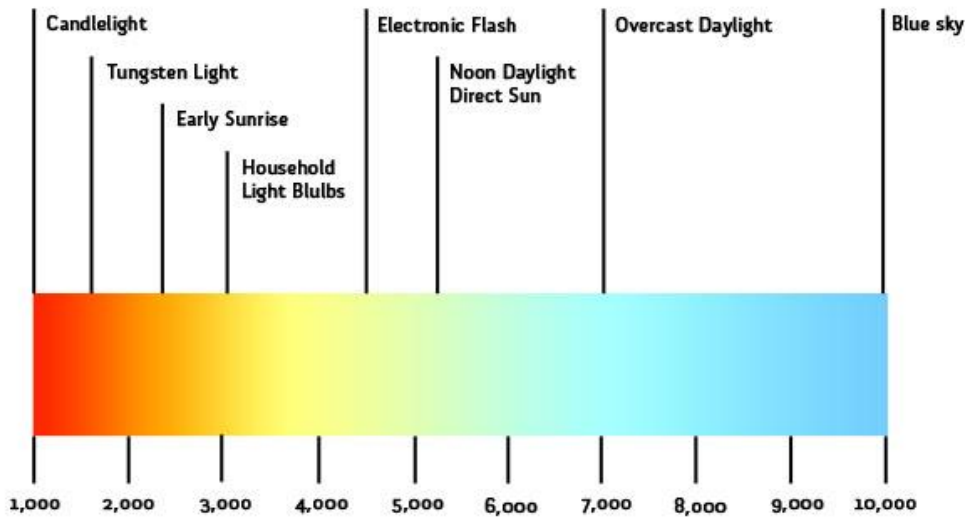


Światło widzialne



Gwiazdy

# Colour Temperatures in the Kelvin Scale



~2700 K

60 W Incandescent

3500 K

13 W Fluorescent



5500 K

13 W Fluorescent



Temperatura barwowa



Światło wiodzialne

# THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM

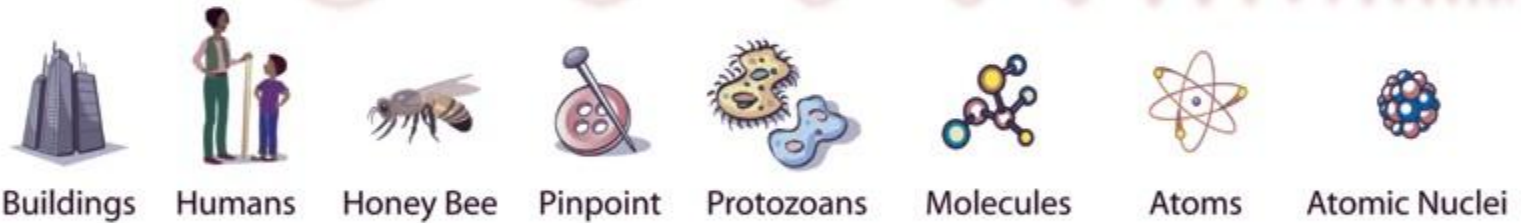
Penetrates Earth Atmosphere?



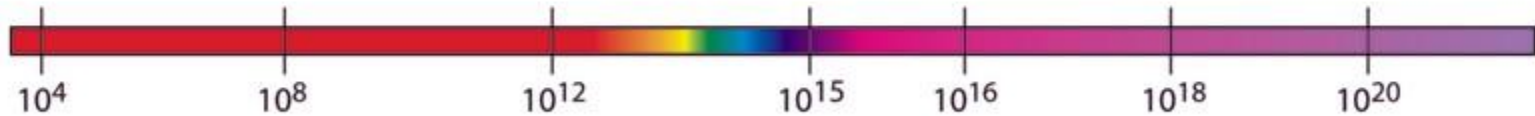
Wavelength (meters)



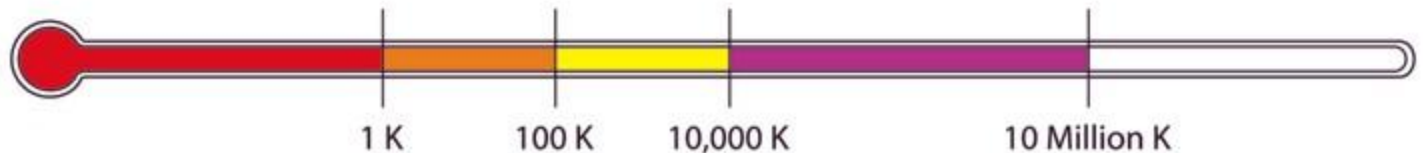
About the size of...



Frequency (Hz)



Temperature of bodies emitting the wavelength (K)





# Pomiar światła - fotometria

- 1729 Pierre Bouger

*Essai d'optique sur la gradation de la lumière*

światło słońca jest 300 razy intensywniejsze od światła księżyca

Prawo Bougera  $I(x) = I_0 e^{-ax}$

# Pomiary światła - fotometria

- 1760 Henrick Lambert
- 1814 Joseph Fraunhofer

Światło słońca i ognia posiada obszary spektralne o różnych jasnościach

Temperatura barwna

# Pomiar światła - fotometria

- Herman von Helmholtz (1911)

Porównywanie jasności linii widmowych nie niesie informacji o obiektywnych różnicach natężenia światła

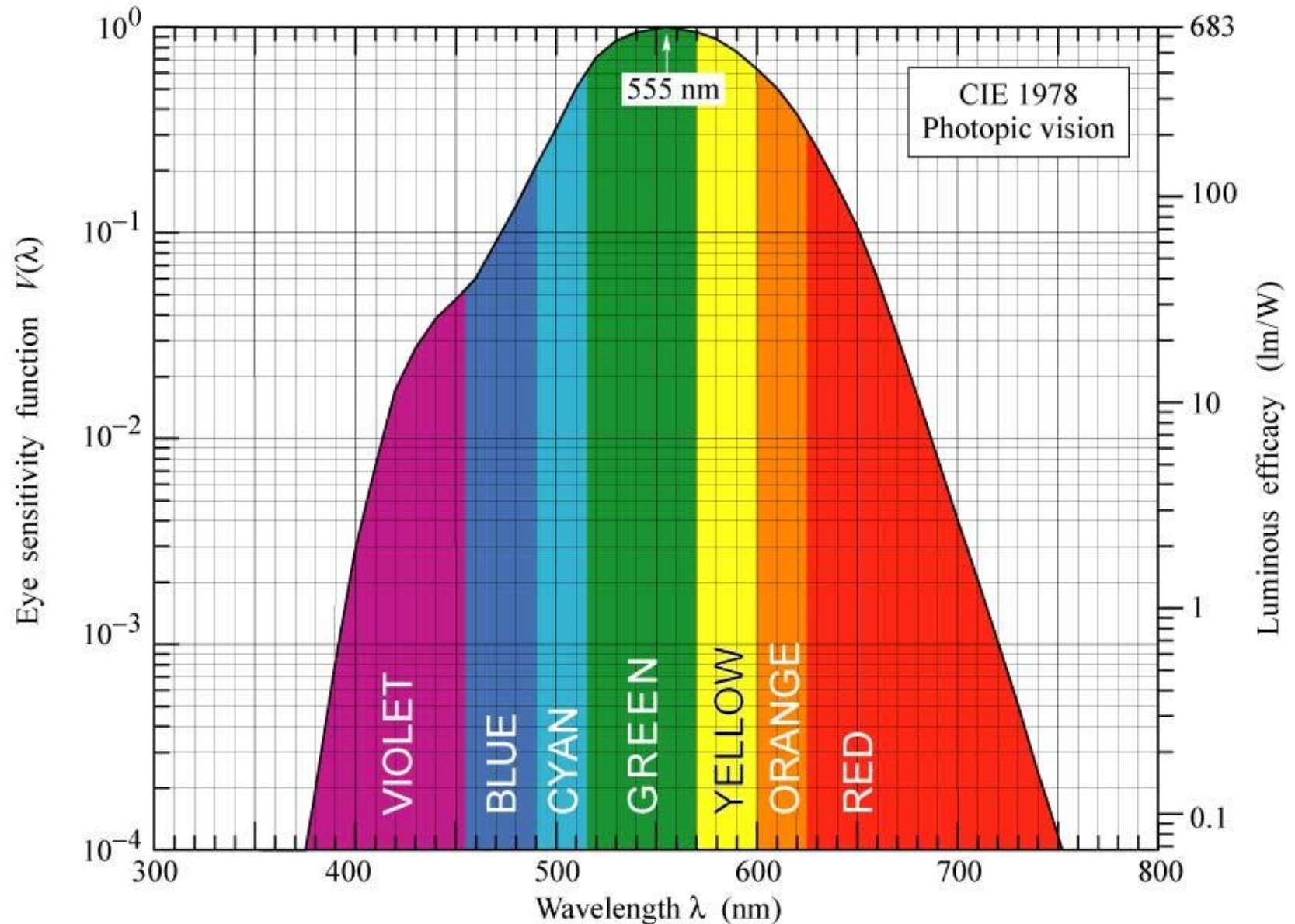
Jest to raczej optyka fizjologiczna niż fizyczna

# Pomiar światła - fotometria

- Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) (1924) (korekta 1931, 1978)

Funkcja znormalizowanej czułości spektralnej oka  $V(\lambda)$  – spektralna funkcja wagowa używana w urządzeniach do pomiaru natężenia światła

# Pomiar światła - fotometria



# Pomiar światła - fotometria

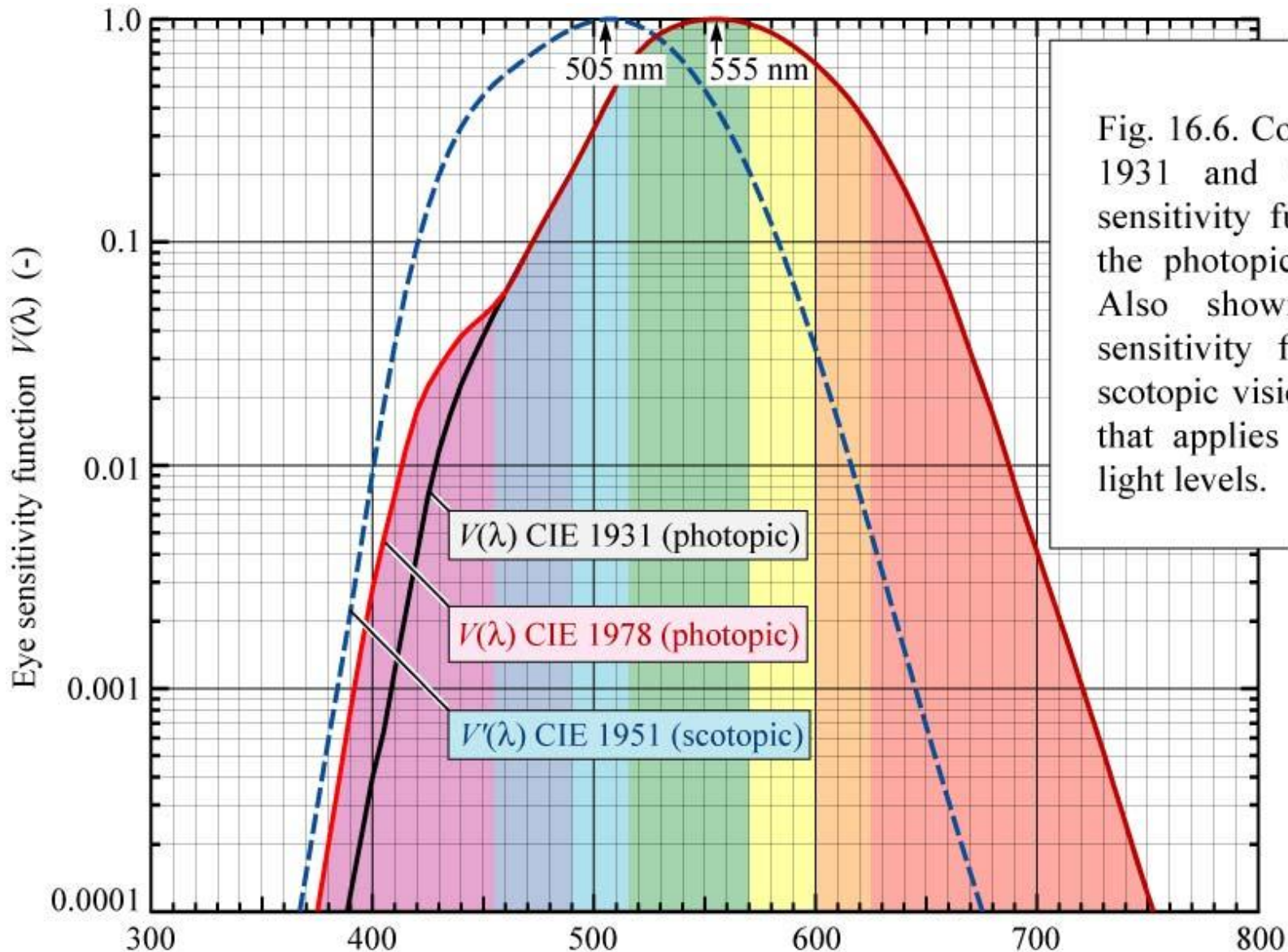
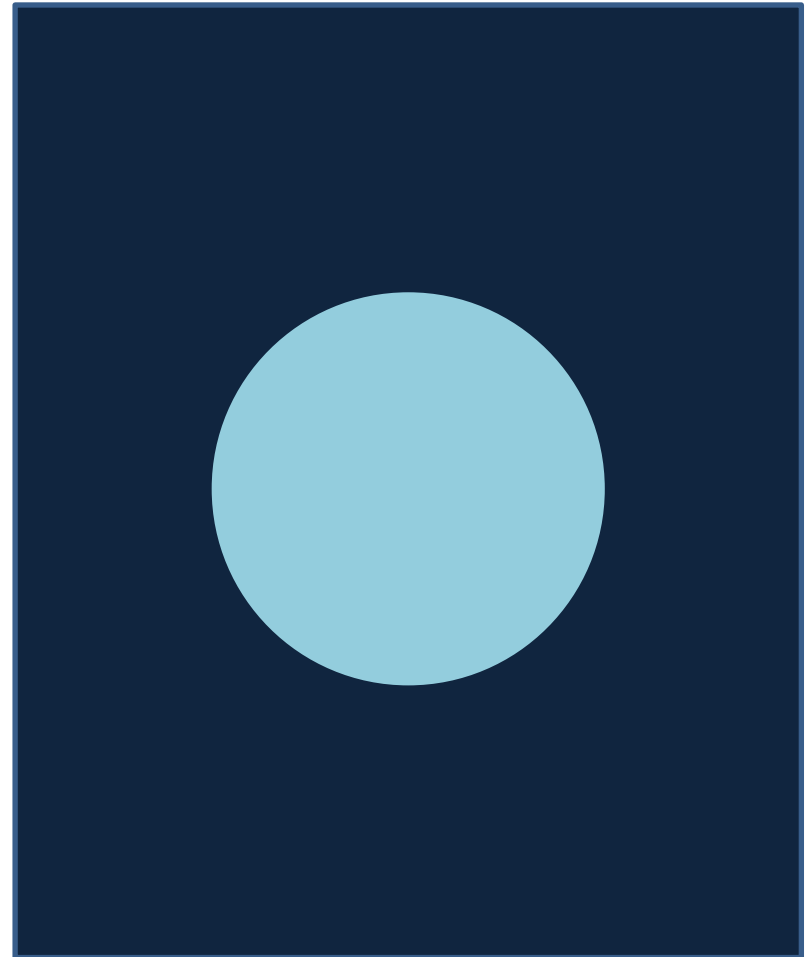
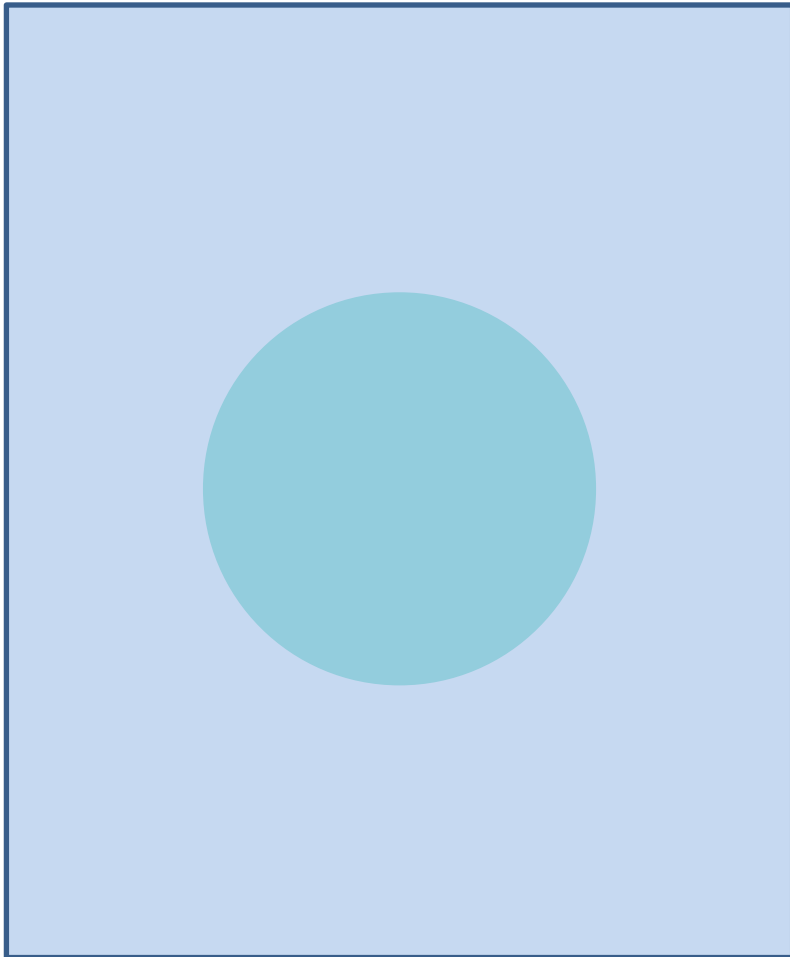


Fig. 16.6. Comparison of CIE 1931 and CIE 1978 eye sensitivity function  $V(\lambda)$  for the photopic vision regime. Also shown is the eye sensitivity function for the scotopic vision regime,  $V'(\lambda)$ , that applies to low ambient light levels.

# Jasność

- Jasność to cecha wrażenia wzrokowego w odniesieniu do której obszar zdaje się emitować więcej lub mniej światła (CIE 1987)
- Nie ma problemu w widzeniu nocnym, ale w widzeniu dziennym przy porównywaniu światła o różnych barwach jest problem (jasność heterochromiczna)
- W dodatku obszary otoczone ciemnym tłem odbierane są jako świecące własnym światłem i dają zupełnie inne wrażenie niż identyczne obszary, lecz otoczone jaśniejszym tłem, które odbierane są jako odbijające światło.

# Jasność









[visualparadox.com](http://visualparadox.com)

# Luminancja i reflektancja

- Przeważający pogląd w odniesieniu do którego „natężenie” odpowiedniego „wrażenia światła”, które nazywane jest jasnością lub białością porównywanych obszarów pola widzenia musi koniecznie rosnać wraz z rosącym natężeniem oświetlenia zewnętrznego obiektu i obrazu na siatkówce, należy do tych uprzedzeń, które są szczególnie utrudniają zrozumienie rzeczywistego widzenia
- ... kolor (najprościej) jako jakość nie ma wielkości ani natężenia i tylko różnica od innej barwy może być traktowana ilościowo

Ewald Hering

# Światło

- Światło – promieniowanie elektromagnetyczne, które powoduje wrażenia wzrokowe
- 380 nm – 780 nm
- Światło podczerwone (IR) i światło ultrafioletowe (UV) to jedynie nazwy, promieniowanie poniżej 380 nm i powyżej 780 nm jest niewidzialne

# Opis fizyczny

- Długość fali (nm)
- Natężenie promieniowania  $I_e$  (W/sr)
  - Radiant intensity
- Strumień promieniowania  $\Phi_e$  (W)
  - Radiant flux
- Irradiancja (Natężenie promieniowania)  $E_e$  (W/m<sup>2</sup>)
  - Irradiance
- Radiancja (luminancja energetyczna)  $L_e$  (W/sr·m<sup>2</sup>)
  - Radiance

# Opis fotometryczny

- Długość fali (nm)
- Światłość  $I_v$  (kandela, cd = lm/sr)
  - Luminous intensity
- Strumień świetlny  $\Phi_v$  (lumen, lm)
  - Luminous flux
- Natężenie oświetlenia  $E_v = \Phi_v/A$  (luks, lx = lm/m<sup>2</sup>)
  - Illuminance
- Luminancja  $L_v = I_v/A$  (cd/m<sup>2</sup>)
  - Luminance

# Natężenie oświetlenia siatkówki (retinal illuminance)

- $T = L_v \cdot A$  (troland, td)
  - $A$  – powierzchnia źrenicy
  - $L_v$  – natężenia oświetlenia wpadającego do oka
- dla 10 000 td średnica źrenicy wynosi 3 mm (optymalne warunki oświetlenia)
- dla 1 000 td źrenica wynosi 5 mm
- Minimalna wielkość źrenicy do 2,5 mm a maksymalna to nawet 6-7 mm

# Natężenie oświetlenia

- Słoneczny dzień 100 000 lx
- Miejsce pracy 500 lx
- Precyzyjne zadania manualne 2000 lx
- Pokój dzienny 50 lx
  - (czytanie wymaga więcej światła)
- Osoby starsze wymagają więcej światła z powodu zmian wiekowych w strukturach oka



# Spektralne funkcje wagowe

$$\Phi_v = 683 \int \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

- Równanie to jest używane we wszystkich miernikach światła
- Jest ono liniowe w przeciwieństwie do naszych statycznych wrażeń jasności czy koloru!
- Funkcja spektralna  $V(\lambda)$  została wyznaczana psychofizyczną metodą „heterochromatycznej fotometrii migotania” (*Heterochromatic flicker photometry*) – wrażenia liniowe!

przerwa

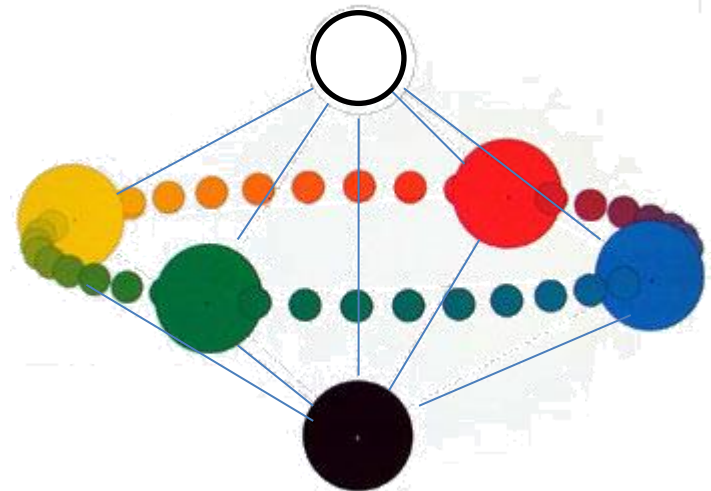
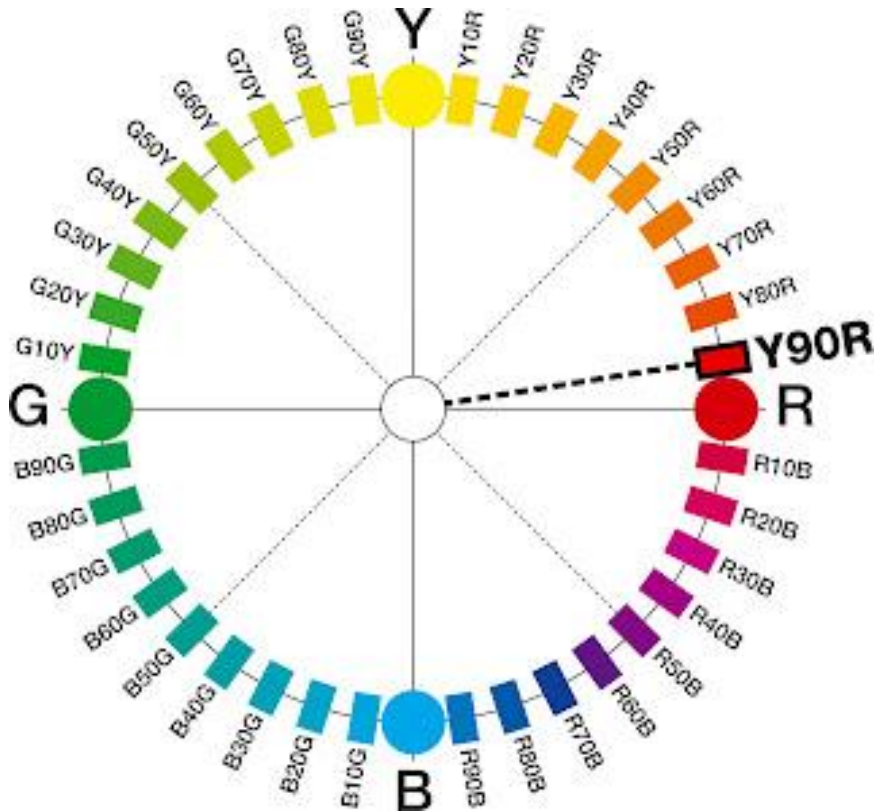


# Leonardo da Vinci

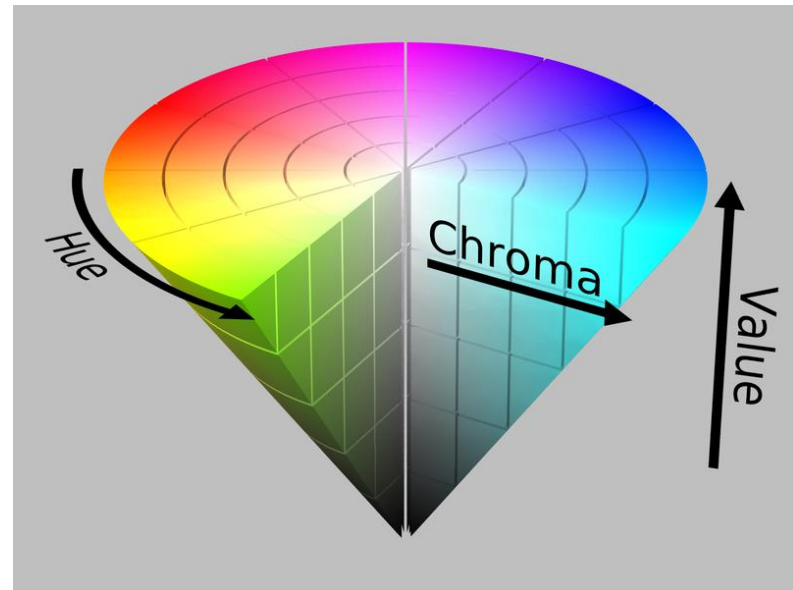
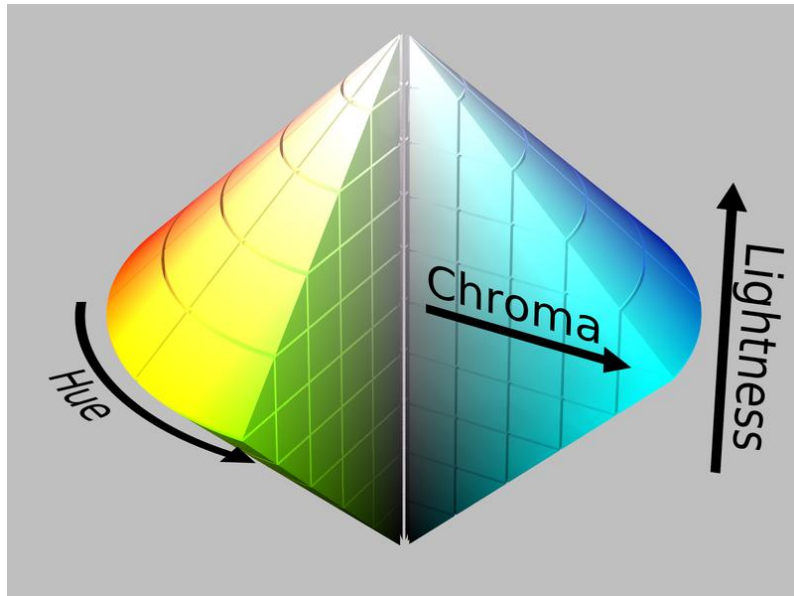
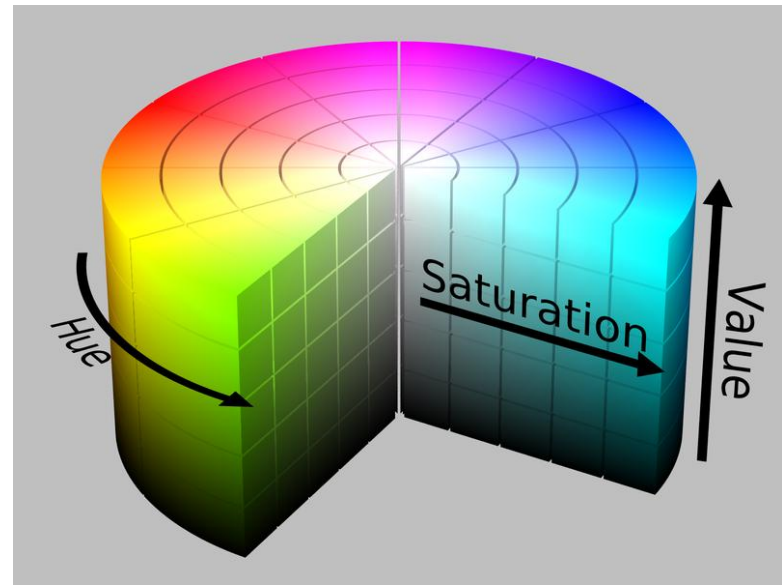
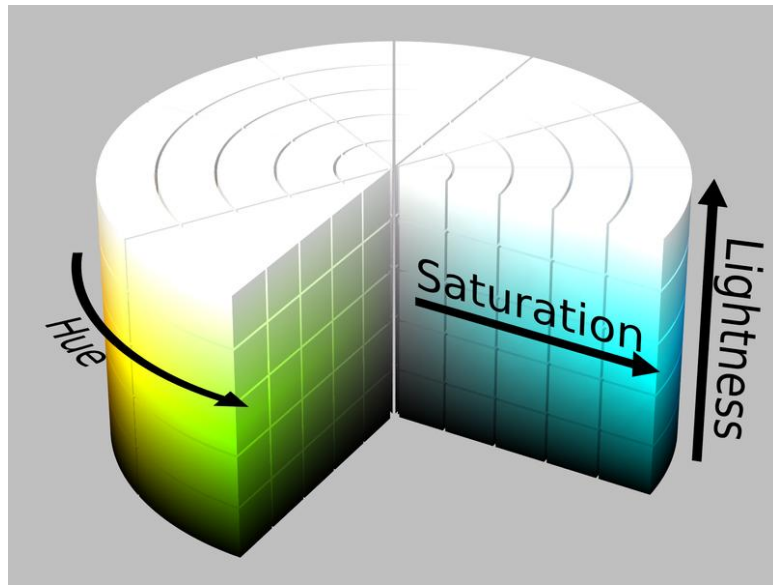
- *Podstawowych kolorów jest sześć. Pierwszym jest biały, nawet jeśli niektórzy filozofowie nie akceptują ani białego ani czarnego w zakresie barw, ponieważ pierwsze jest sumą wszystkich kolorów, zaś drugie brakiem jakiegokolwiek koloru. Ponieważ malarze nie mogą pracować bez nich ważnym jest ich zakwalifikowanie do kolorów podstawowych. A więc, biały jest pierwszym z kolorów podstawowych, żółty jest drugim, zielony jest trzecim, niebieski jest czwartym, czerwony jest piątym i czarny jest szóstym.*
- *Niebieski i zielony właściwie nie są kolorami podstawowymi. Niebieski, jak powietrze, jest złożony z jasności i ciemności. Zielony jest złożony z prostych i złożonych kolorów: żółtego i niebieskiego.*

# Kolor

- Nie jest możliwe opisanie wrażenia tych kolorów jako kombinację wrażenia innych z nich, ale wrażenie każdego innego koloru może zostać opisane jako kombinacja wrażenia tych sześciu np. NCS2060-R50B



# HSL/HSV (Odcień Nasycenie Jasność/Wartość)



# Fizyka koloru

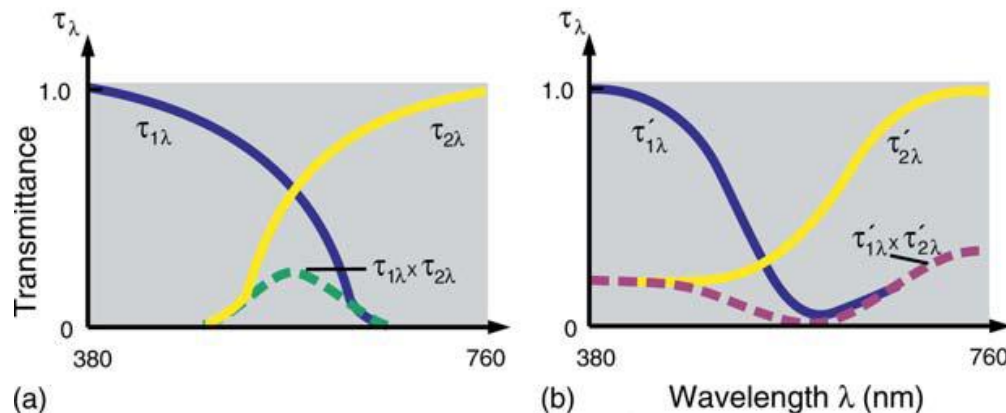
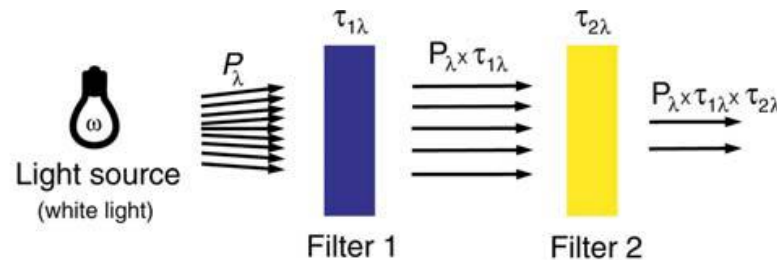
- Kolor powierzchni zależy od:
  - Struktury powierzchni (matowa, błyszcząca itp.)
  - Reflektancji spektralnej
  - Geometrii i rozkładu spektralnego oświetlenia
  - Fizjologicznej adaptacji oka do kontrastu i parametrów otoczenia (tła)
- Większość naturalnych barw można przedstawić jako sumę ważoną trzech podstawowych krzywych reflektancji spektralnej
- Oko nie jest analizatorem spektralnym!!!

# Kolory metametryczne

- Istnieje nieskończona ilość krzywych spektralnych, dających wrażenie tego samego koloru
- Bodźce, które sprawiają wrażenie identycznych barw pomimo różnic spektralnych nazywamy kolorami metametrycznymi.
- Metametryczne kolory powierzchni są zwykle równe jedynie przy jednym typie oświetlenia. Dlatego oglądając np. koszulę lub samochód w sztucznym świetle sklepu, domu lub garażu jawi nam się on w innych barwach niż w świetle dziennym.

# Kolory substraktywne

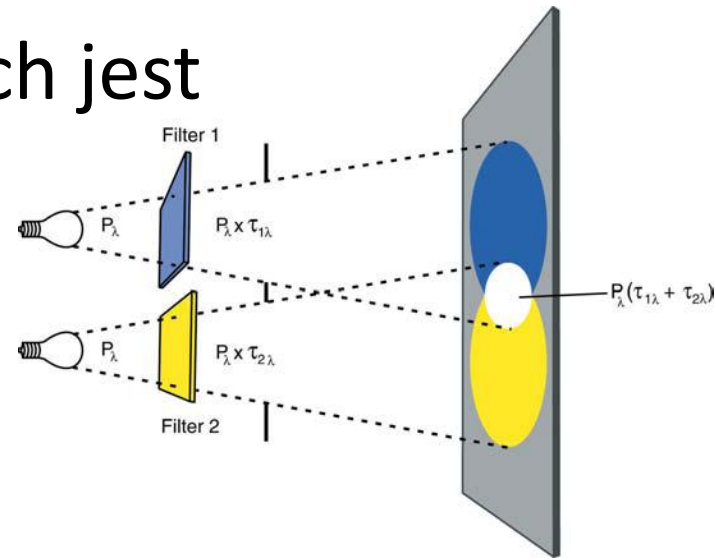
- Kolory substraktywne nie są mieszaninami kolorów źródłowych, a raczej wynikami iloczynu transmittancji spektralnej filtrów.





# Kolory addytywne

- Rezultat nie zależy od widma spektralnego światła a jedynie od barwy światła (wrażenia)
- Jedynie trzy kolory bazowe (podstawowe) wystarczą do stworzenia każdego odcienia barw
- Wybór kolorów podstawowych jest w zasadzie dowolny przy czym żaden nie może być sumą dwóch pozostałych



## Prawa kolorów addytywnych (H. Grassmann)

- Jeśli mamy kolor A i kolor B takie, że  $A=B$  oraz kolory C i D, takie, że  $C=D$  (w sensie metametrycznym) to  $A+C=B+D$ . Jest to prawo addytywności.
- Dodatkowo jeśli  $A=B$  to także zwiększenie natężenia obu bodźców  $\alpha$  razy nie zmieni tej relacji, tzn.  $\alpha A = \alpha B$ . Warunkiem zajścia prawa skalowania są warunki widzenia dziennego.
- Zachodzi także prawo liniowości, tj. jeśli  $A=B$  i  $B=C$  to  $A=C$ . To prawo także zachodzi jedynie przy widzeniu dziennym

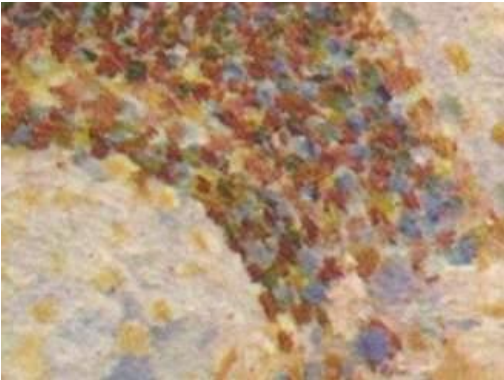
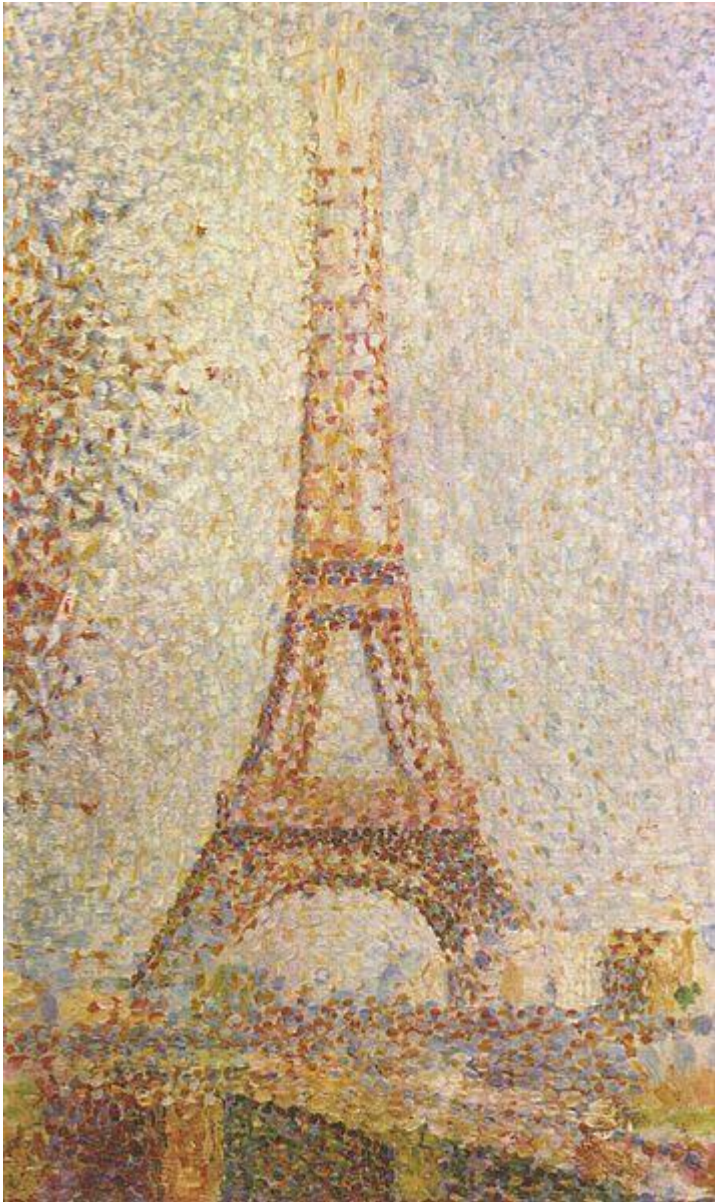
# System kolorów CIE 1931

- Prawa kolorów addytywnych pozwalają po wybraniu 3 kolorów bazowych na jednoznaczne zdefiniowanie barwy jako szeregu trzech współrzędnych odpowiadających natężeniu barw składowych (np. czerwonej (R), zielonej (G) i niebieskiej (B) albo Szarobłękitnej (C), Purpurowej (M) i Żółtej (Y))





Georges P. Seurat / Paul Signac



# Przestrzenie barw

- Jeśli dwie połówki pola testu mają ten sam kolor oznacza to, że światło z obu połówek prowadzi do takiego samego wzbudzenia fotoreceptorów w siatkówce.
- Stopień wzbudzenia trzech rodzajów czopków może definiować 3 wektory bazowe fizjologicznej przestrzeni barw.
- Jest to jedna z możliwości zdefiniowania takiej przestrzeni. Edwin Schrödinger udowodnił, że prawa kolorów addytywnych są takie same jak w dowolnej, liniowej przestrzeni wektorowej.

# Przestrzeń barw

- Zdefiniujemy kolor jako:

$$\mathbf{F} = R\mathbf{R} + G\mathbf{G} + B\mathbf{B}$$

- Długość takiego wektora wyniesie:

$$|\mathbf{F}| = [R^2 + G^2 + B^2]^{1/2}$$

- R, G i B nazywane są wartościami trójchromatycznymi (tristimulus values)
- Długość  $|\mathbf{F}|$  jest proporcjonalna do natężenia światła



# Przestrzeń barw

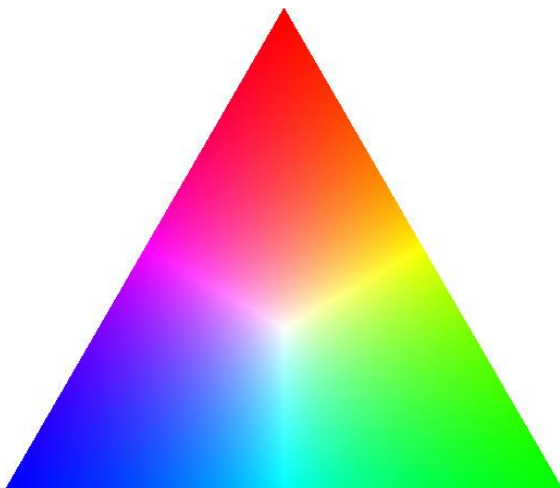
- Zdefiniujemy płaszczyznę:

$$R+G+B=\text{const.}$$

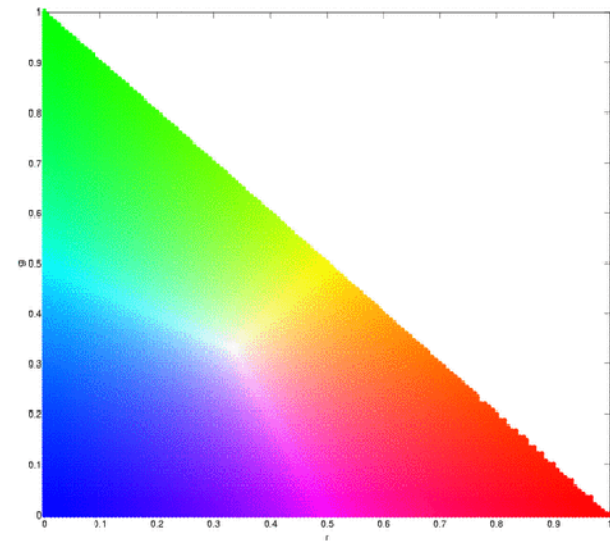
- oraz znormalizowane współczynniki:

$$r=R/(R+G+B); \quad g=G/(R+G+B); \quad b=B/(R+G+B)$$

$$r+g+b=1$$



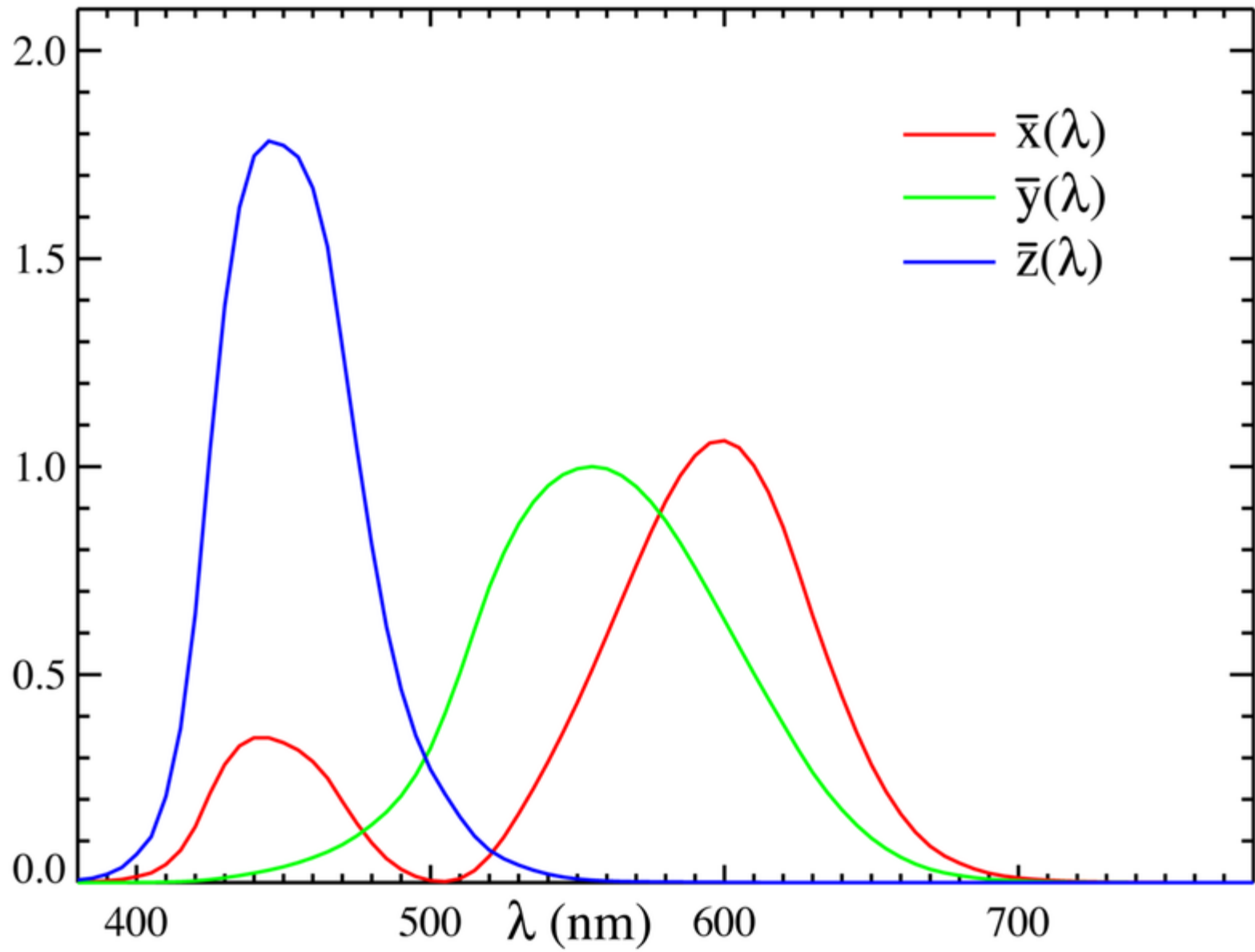
- skoro tak, to jedynie 2 z tych parametrów są niezależne!
- Biały ma współrzędne  $1/3; 1/3; 1/3$
- Można stworzyć tzw. trójkąt chromatyczności



# Przestrzenie barw

- Metoda mierzenia kolorów przez określenie ich wartości trójchromatycznych lub współrzędnych chromatyczności określa jedynie, jak bodźce świetlne będą się łączyć przy identycznych warunkach oświetlenia i niewiele mówi nam o wrażeniu barwy w normalnej sytuacji widzenia.

# Przestrzeń barw CIE XYZ (1931)



# Przestrzeń barw CIE XYZ (1931)

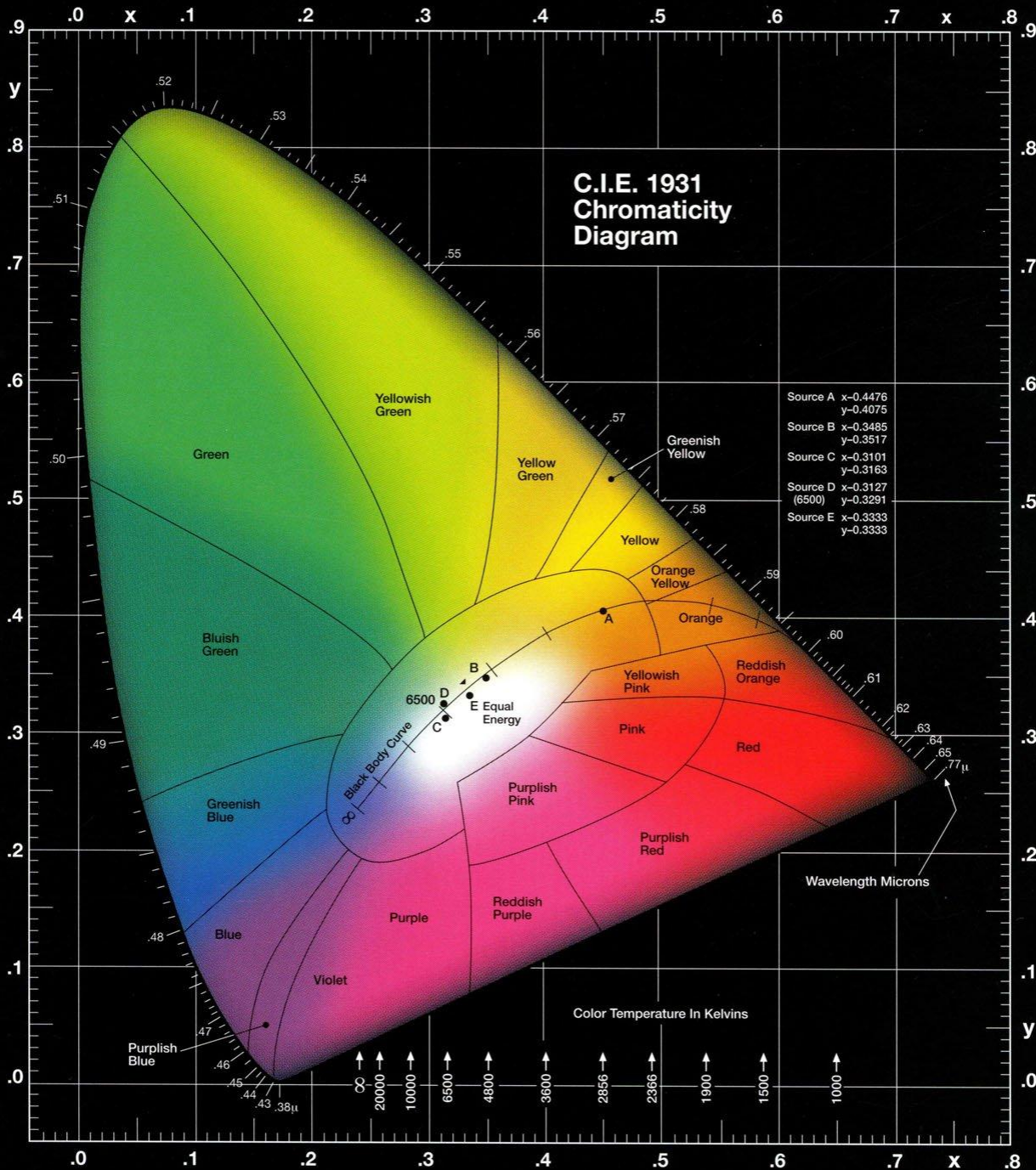
- 2 stopnie pola widzenia
  - w innej wersji 10 stopni
- 3 teoretyczne detektory o określonej charakterystyce spektralnej
- Detektor (współrzędna) Y odpowiada funkcji  $V(\lambda)$
- Czułości czopków są liniowymi funkcjami wartości trójchromatycznych X, Y i Z

# Przestrzeń barw CIE XYZ (1931)

- Zakładając  $X+Y+Z=\text{const}$  i normalizując współrzędne można zdefiniować płaszczyznę zwaną diagramem chromatyczności  $(x,y)$
- Monochromatyczne kolory tworzą krzywą ograniczającą przestrzeń barwną
- Punkty odpowiadające skrajnym długościom fali są połączone tzw. linią purpury. Kolory z tej nie mają odpowiedników w tzw. newtonowskiej przestrzeni barw (tj. tęczy), ale są mieszanką czerwieni i fioletu

# Przestrzeń barw CIE XYZ (1931)

- Czystość barwy zależy od odległości od punktu bieli  $E=(1/3, 1/3)$ , tj. biel ma  $p=0$ , a kolory monochromatyczne  $p=1$
- Przecięcie linii łączącej dany kolor z punktem bieli  $E$  wyznacza tzw. dominującą długość fali. Barwy z linii purpury nie mają dominującej długości fali, lecz mają komplementarną długość fali (na drugim przecięciu prostej)



Punkt A

Żarówka wolframowa

$x=0,4476$   $y=0,4075$

$T=2856$  K

Punkt B

Światło słoneczne w południe

$x=0,3485$   $y=0,3517$

$T=4874$  K

Punkt C

Uśrednione światło dzienne

$x=0,3101$   $y=0,3163$

$T=6774$  K

Punkt D

Światło dzienne

$y = 2.870x - 3.000x^2 - 0.275$

Dla D65

Światło dzienne w Europie

$x=0,3127$   $y=0,3291$

$T=6500$  K

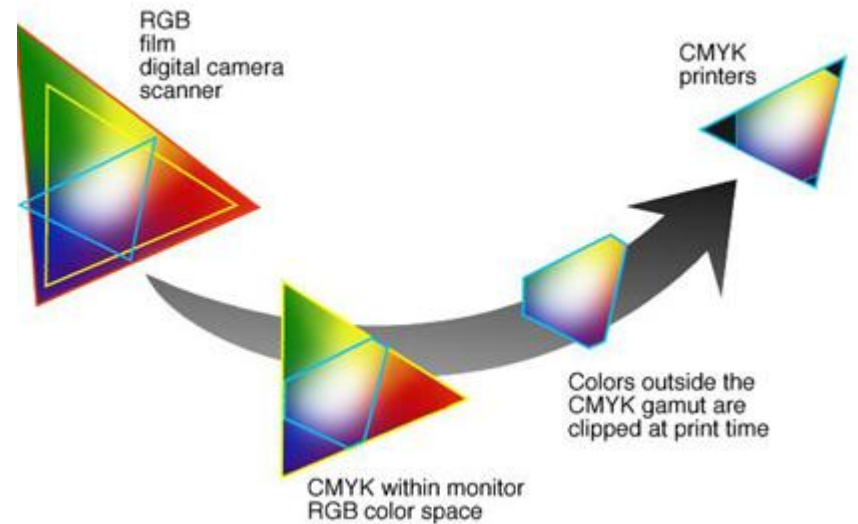
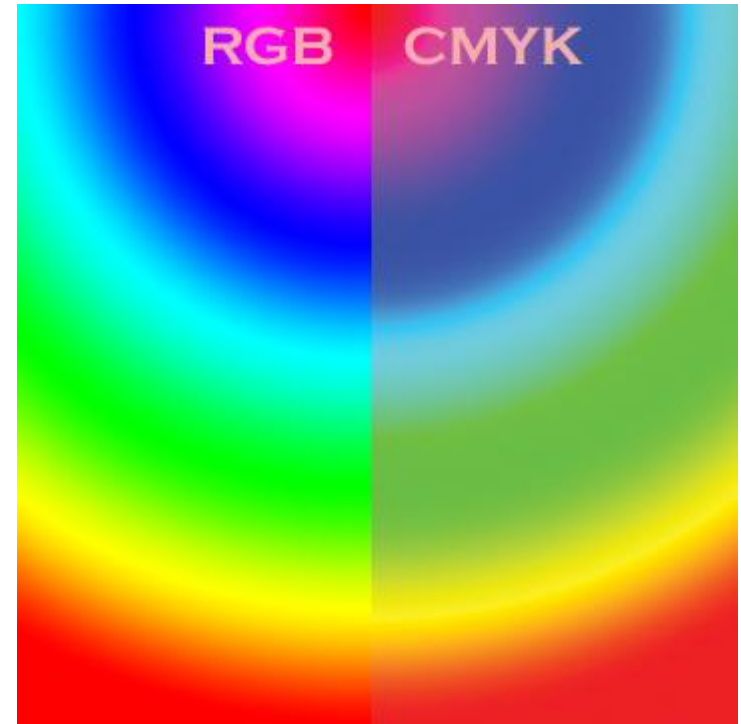
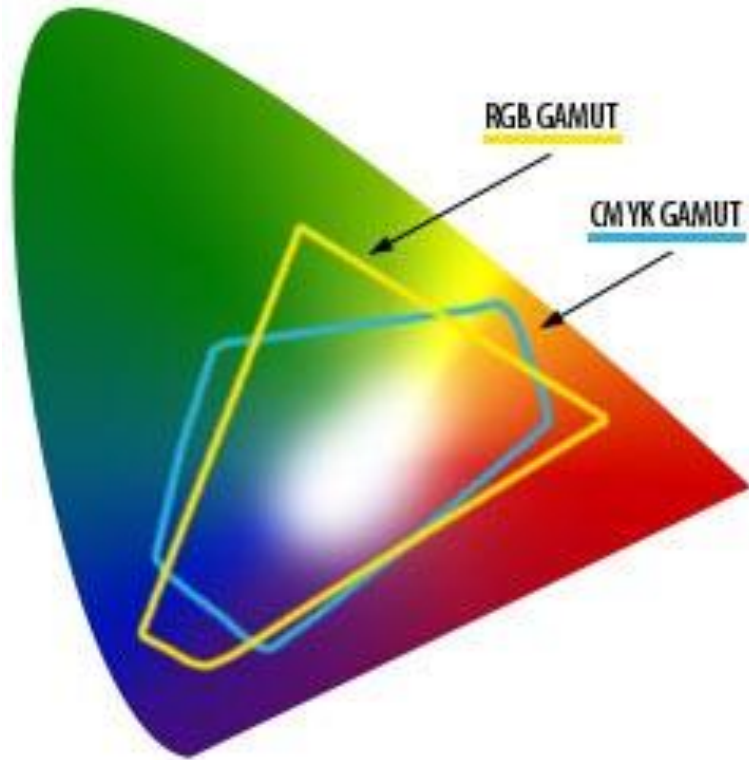
Punkt E

Punkt równej energii

$x=0,3333$   $y=0,3333$

$T \sim 5455$  K

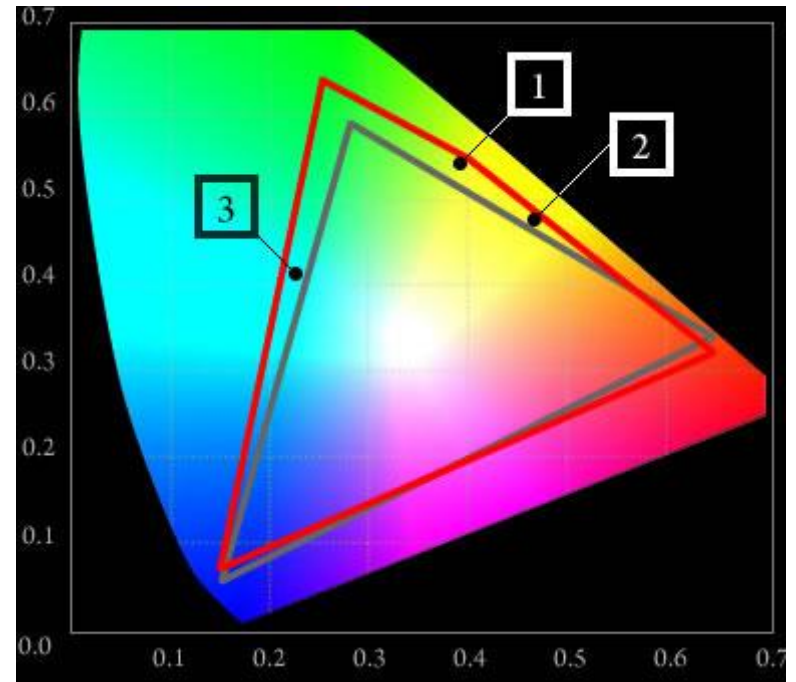
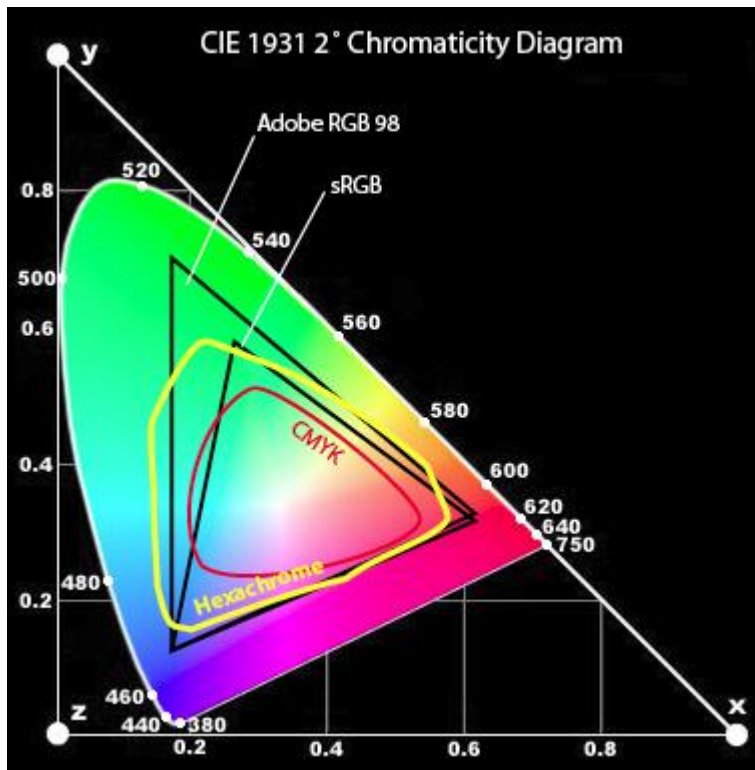
# Gamut





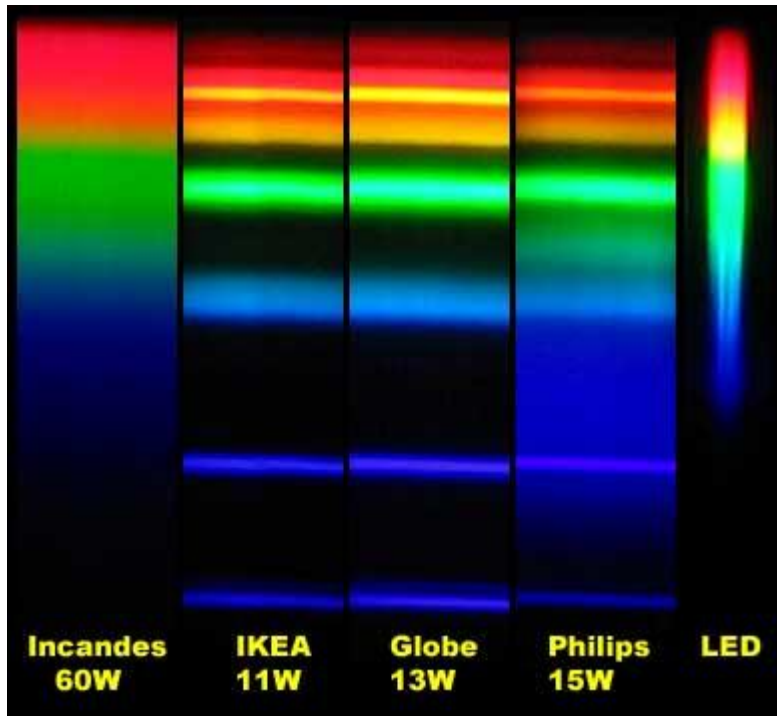
# Inne pojęcia stosowane w kolorymetrii

- Wzorce barw
  - RAL
  - Pantone

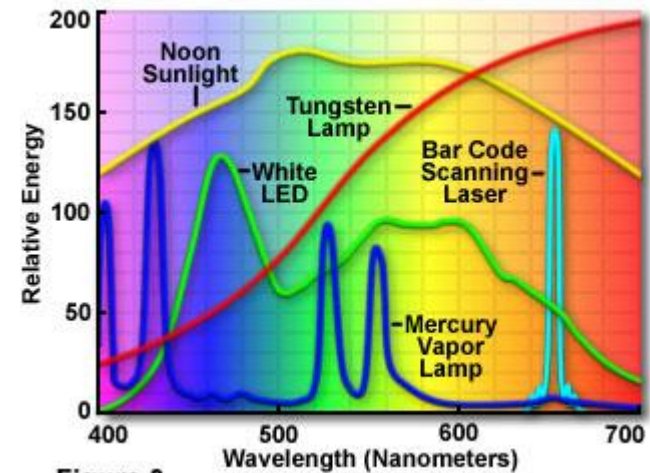


- Przestrzenie barw:
  - RGBY
  - CMYKOG

# Światło białe



Spectra From Common Sources of Visible Light



- Temperatura barwna
- Wierność odwzorowania kolorów
- Jasność (natężenie oświetlenia)
- Pobór mocy