

# SVĚTLO, BARVA, KOLORIMETRIE



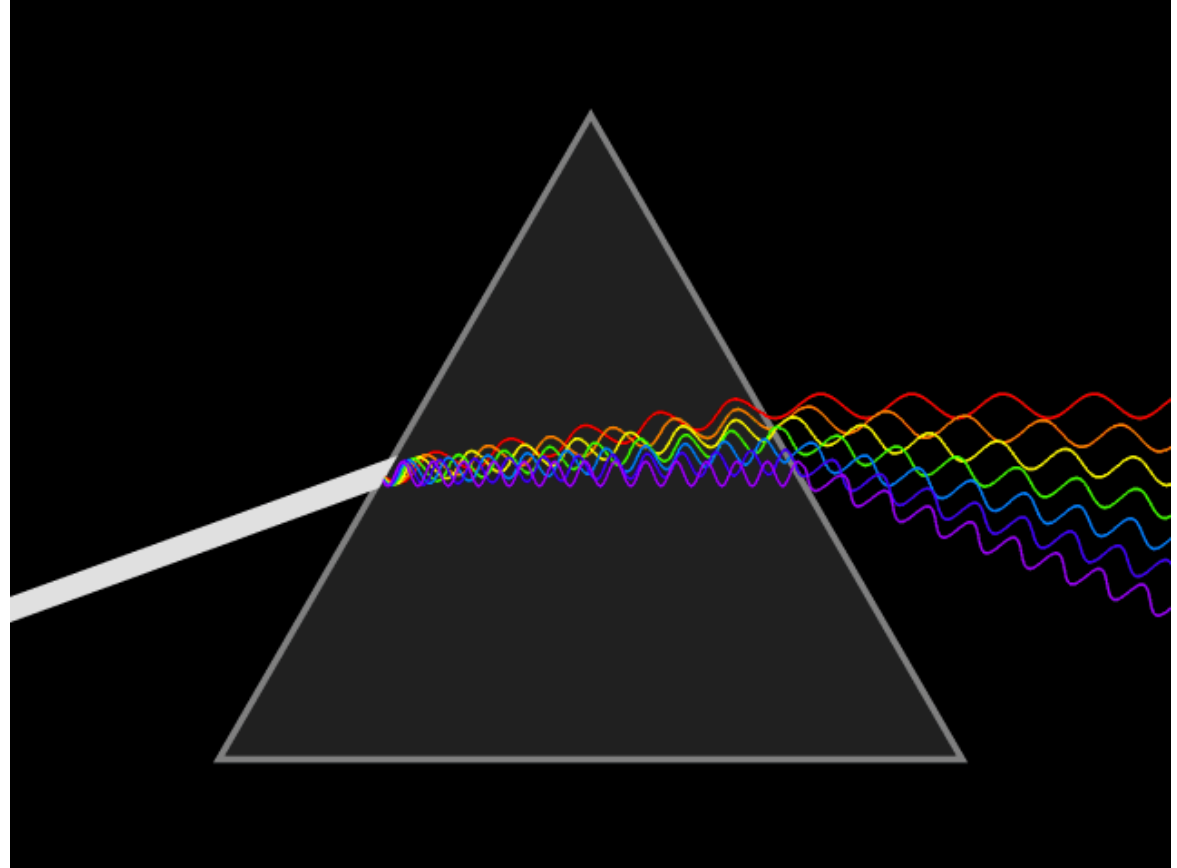
**Kurz:**       **VIDEOTECHNIKA A MULTIMÉDIA**

---

**Lektor:**     Kamil Říha

# Podstata světla

- (bílé) světlo je směs elektromagnetických vln
- přechod bílého světla vzduch/sklo zpomalí rychlost šíření, což ohýbá parsek
- různé vlnové délky různé rychlosti různé ohyby
- Isaac Newton kolem roku 1670 objevil, že bílé světlo je složené z mnoha barev



By Kalki [Public domain] via Wikimedia Commons from Wikimedia Commons

# Světlo jako elektromagnetické vlnění

energie 1 fotonu ( $\times 1,24$ ) [eV] :

$10^6$   $10^5$   $10^4$   $10^3$   $10^2$   $10^1$   $10^0$   $10^{-1}$   $10^{-2}$   $10^{-3}$   $10^{-4}$   $10^{-5}$   $10^{-6}$   $10^{-7}$   $10^{-8}$   $10^{-9}$

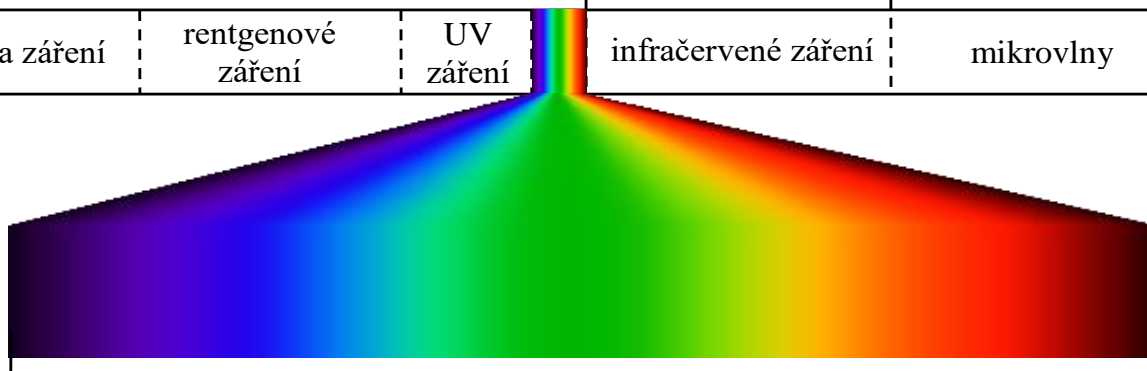
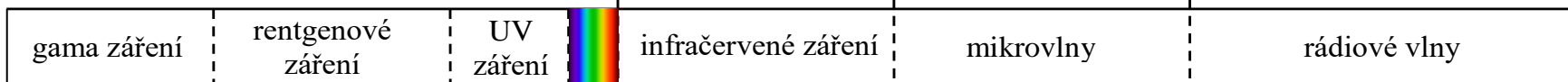
frekvence [Hz] :

$3 \cdot 10^{20}$   $3 \cdot 10^{19}$   $3 \cdot 10^{18}$   $3 \cdot 10^{17}$   $3 \cdot 10^{16}$   $3 \cdot 10^{15}$   $3 \cdot 10^{14}$   $3 \cdot 10^{13}$   $3 \cdot 10^{12}$   $3 \cdot 10^{11}$   $3 \cdot 10^{10}$   $3 \cdot 10^9$   $3 \cdot 10^8$   $3 \cdot 10^7$   $3 \cdot 10^6$   $3 \cdot 10^5$

vlnová délka:

1 10 100 1 10 100 1 10 100 1 10 100 1 10 100 1

[pm] [nm] [ $\mu\text{m}$ ] [mm] [m] [km]



380 nm

viditelné světlo

780 nm

# Barva

- psychofyzikální jev
- definuje ji vjem lidského zrakového orgánu
- fyzikálně je barva odvozena od vlnové délky daného světla, resp. směsi vlnových délek, protože monochromatické světlo prakticky neexistuje
- vlnová délka: vzdálenost, jakou urazí vlna v daném prostředí za jednu periodu

$$\lambda = vT = \frac{v}{f},$$

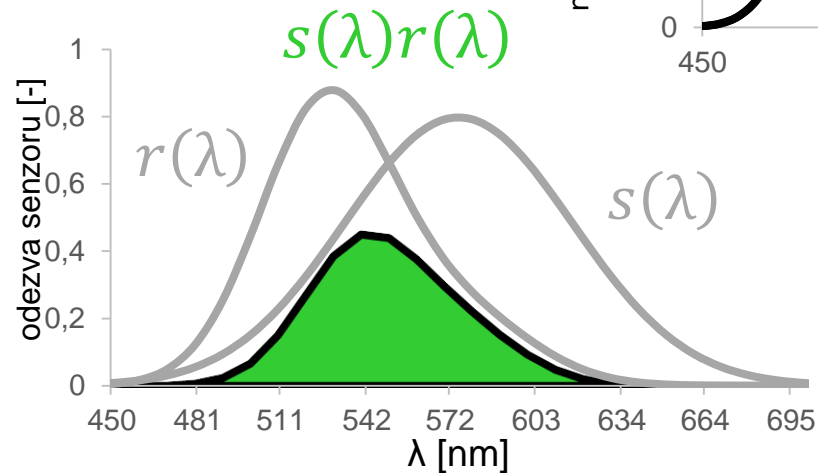
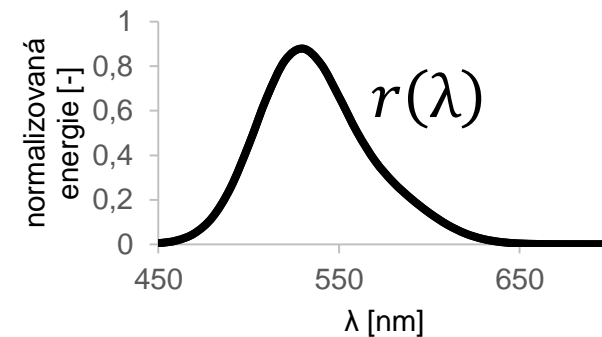
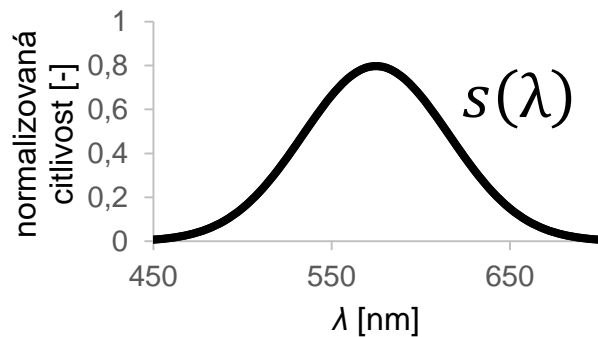
- kde  $T = \frac{1}{f}$  je perioda vlnění a  $v$  je rychlost šíření v daném prostředí
- barevný senzor: charakterizován spektrální citlivostí  $s(\lambda)$
- barevné světlo: charakterizovatelné pomocí spektrální funkce  $r(\lambda)$
- odezva senzoru:

$$o = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} s(\lambda)r(\lambda)d\lambda$$

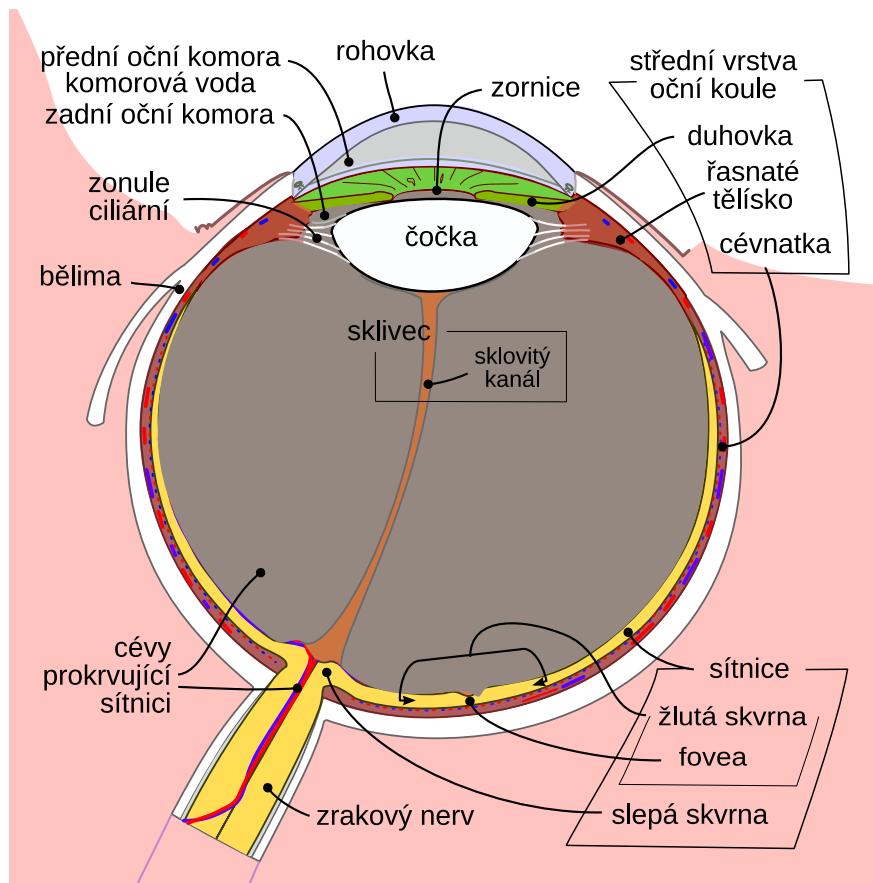
# Odezva senzoru na světelné spektrum

1. spektrální citlivost barevného senzoru  $s(\lambda)$
2. spektrální funkce barevného světla  $r(\lambda)$
3. odezva senzoru:

$$o = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} s(\lambda)r(\lambda)d\lambda$$



# Anatomie oka



By Rhcastilhos [Public domain], Medical gallery of Mikael Häggström via Wikimedia Commons from Wikimedia Commons

# Anatomie oka

## hlavní funkce oka (oční bulvy):

- akomodace (zaostření) – řasnaté tělísko (ciliární sval) deformuje čočku
- změna velikosti vstupní pupily (clony) pomocí duhovky
- adaptace – změna citlivosti oka na světlo (přizpůsobení se světelným podmínkám)
- konvergence – sbíhavost očních os

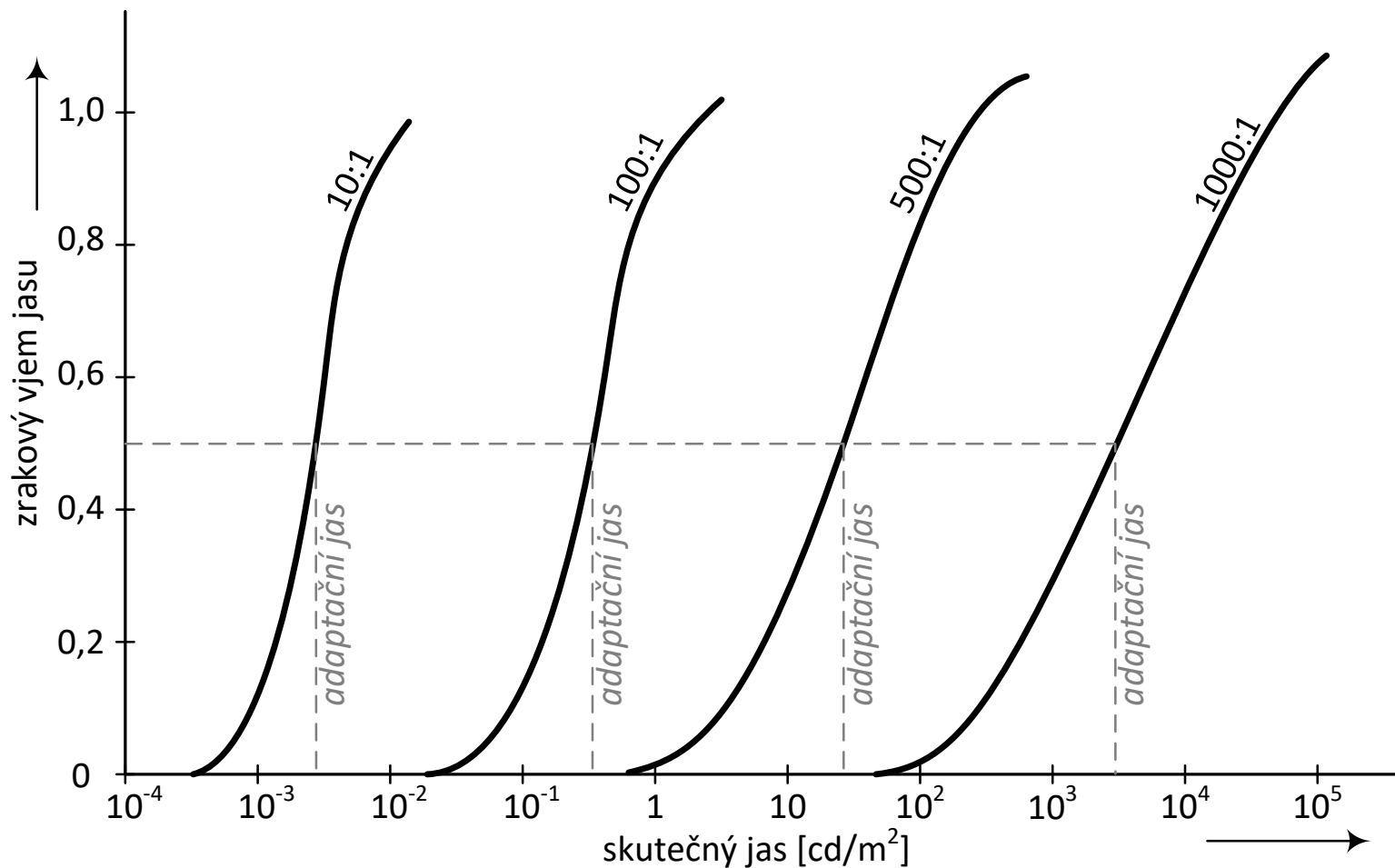
## princip „snímání“ optického vjemu na sítnici:

světločivné buňky převádí energii dopadajícího světla na vzruchy přenášené do mozku pomocí nervových vláken

- tyčinky (asi 120 milionů): 200 000 x citlivější na světlo než čípky, jsou však citlivé pouze na jas
- čípky (asi 6 milionů): méně jsou jich 3 typy rozlišující tři základní barvy

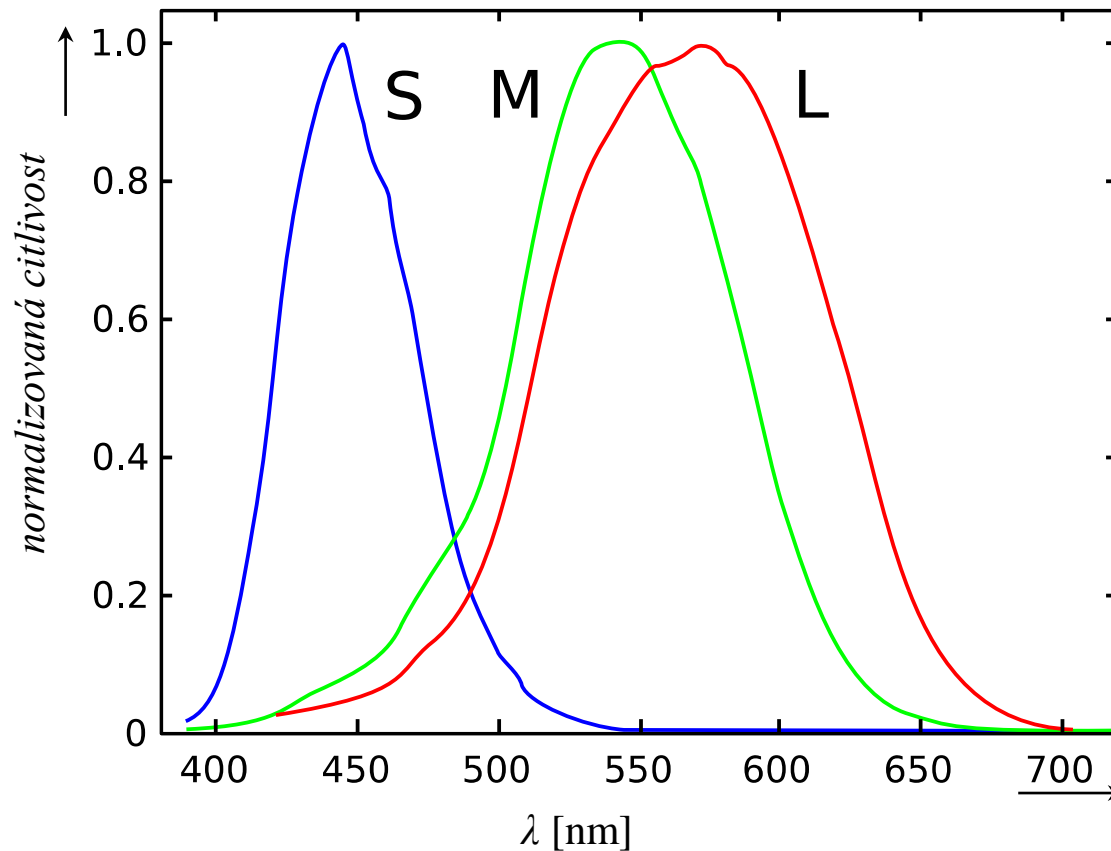
**žlutá skvrna** (makula) místo na sítnici s největší hustotou čípků. Toto místo snímá obraz při přímém pohledu a umožňuje nejostřejší vidění. V jejím středu nejsou dokonce žádné tyčinky.

# Adaptace zraku na střední jas





# Typy čípků



**S** – short – krátké

**M** – medium – střední

**L** – long – dlouhé

odtud

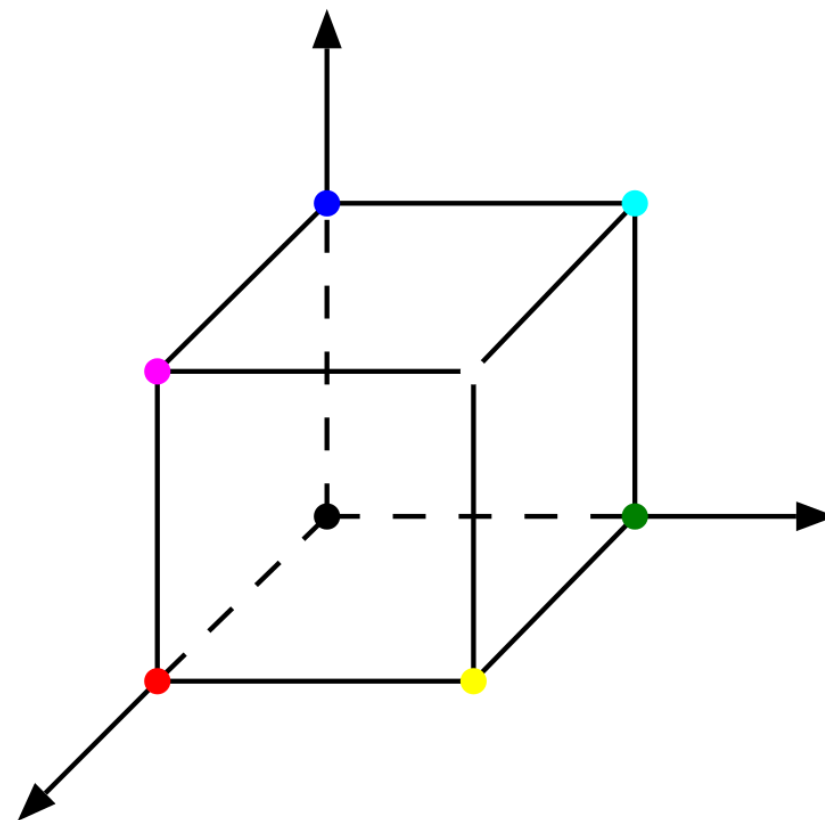
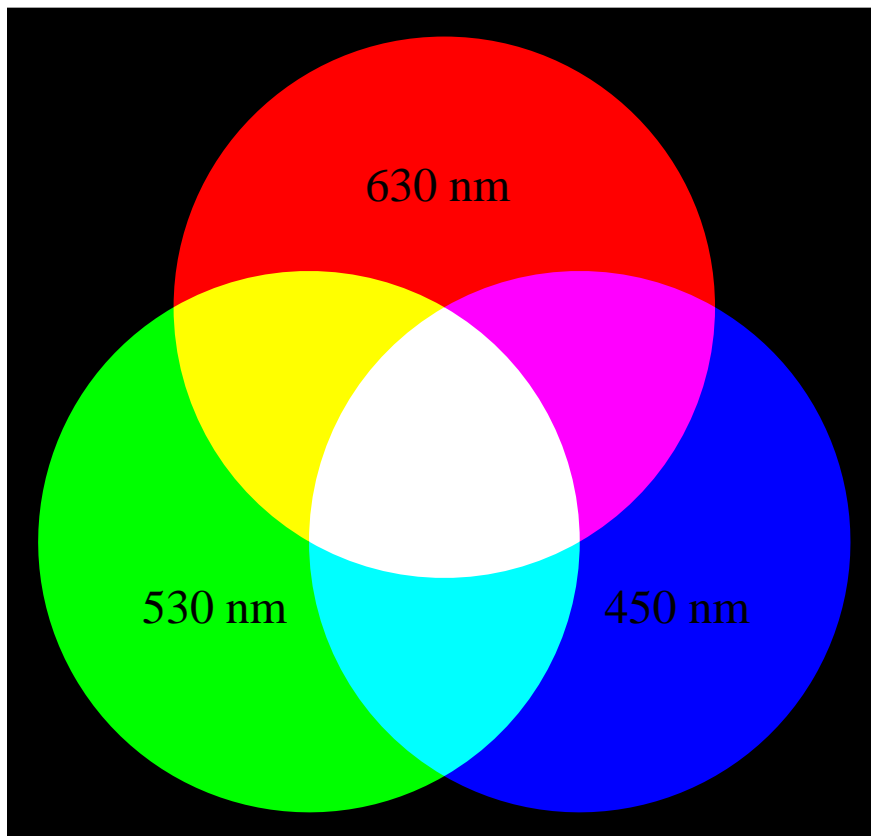
**RGB** základní

barevný prostor

metamerismus:

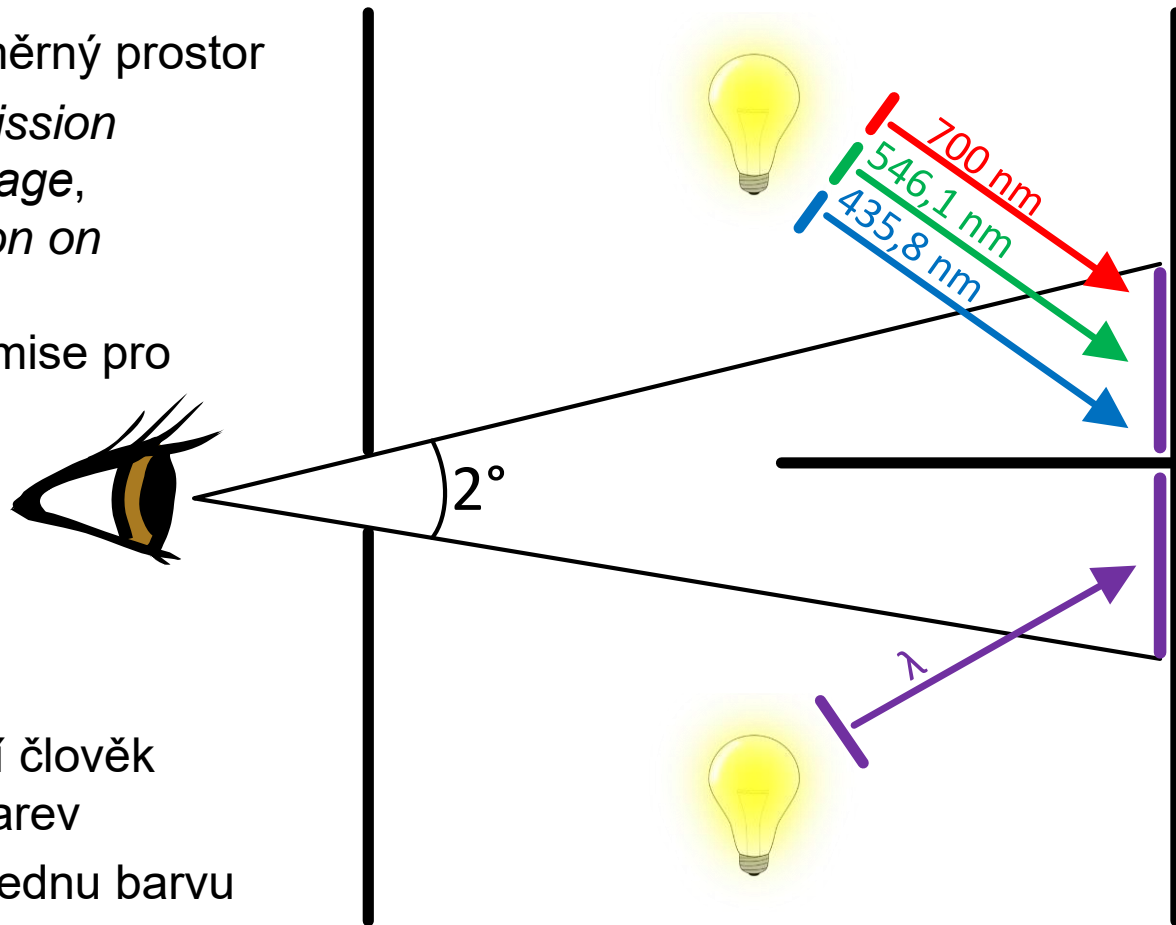
jev, kdy se dvě barvy lidskému zraku jeví jako stejné, přestože z hlediska spektrální charakteristiky stejné nejsou.

# Barevný model *RGB*

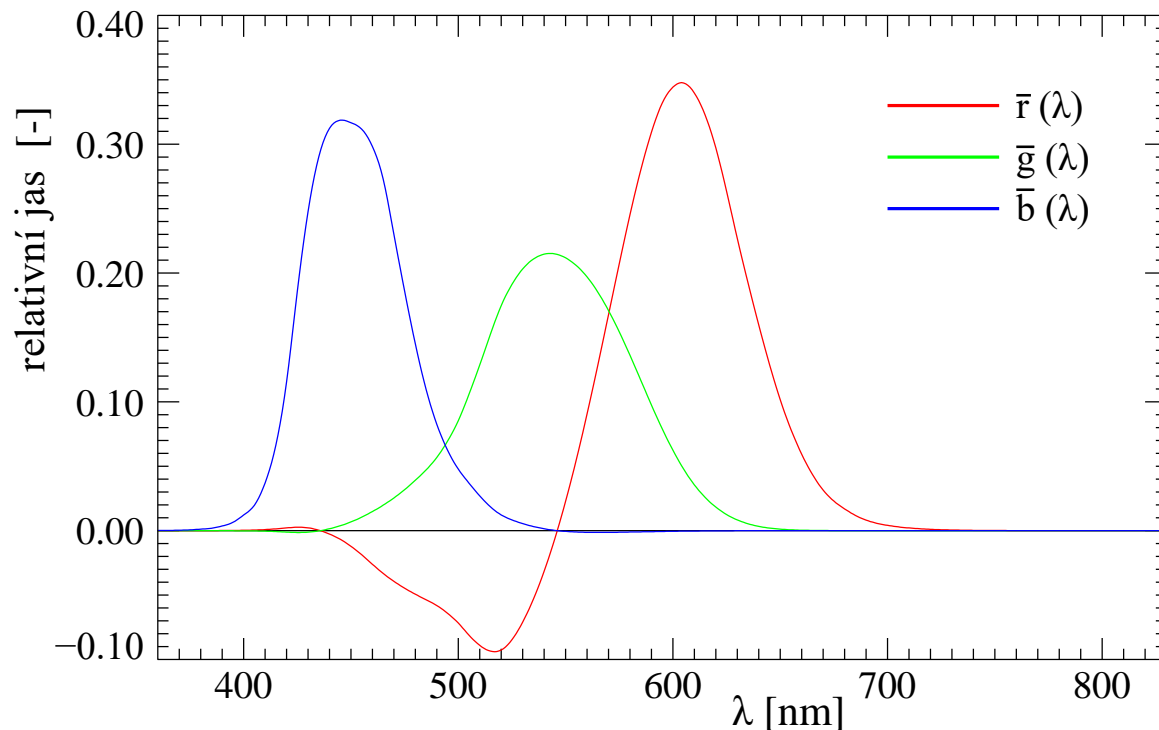


# Experiment CIE

- tři typy čípků → trojrozměrný prostor
- CIE experiment (*Commission internationale de l'éclairage, International Commission on Illumination* 1931)  
(MKO - mezinárodní komise pro osvětlování)
- světlo o známé  $\lambda$  vytváří člověk pomocí tří základních barev
- díky metamerismu vidí jednu barvu



# Nastavení základních barev CIE - výsledek experimentu



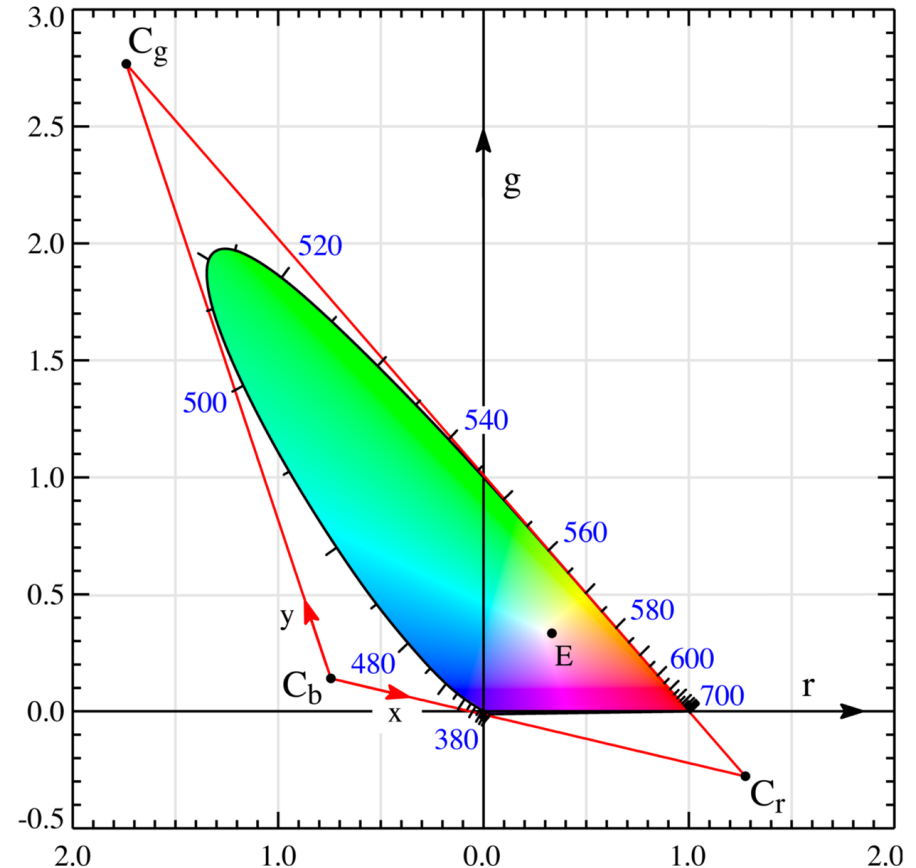
- křivky, které v podstatě popisují spektrální citlivosti jednotlivých čípků u průměrného pozorovatele
- záporná hodnota jasu červeného kanálu
- některé barvy dosaženy přidáváním červené k referenční barvě
- základní barvy nestačí na generování celého spektra

By Marco Polo at English Wikipedia [Public domain], via Wikimedia Commons from Wikimedia Commons

# Spektrální barvy v rovině $rg$ - výsledek experimentu

- výsledky je možné vynést jako určitou 3D oblast do prostoru  $rgb$
- pro jednotkový jas není třeba prostor, postačí rovina
- jedna barva je pak redundantní:  

$$b = 1 - r - g$$
- díky záporným hodnotám  $r$  je některé barvy nesnadné určit
- řešení: volba neskutečných barev  $x, y$  jako vrcholů trojúhelníka vymežujícího oblast barev skutečných



CIE 1931 chromaticity diagram showing the boundaries of the [00], [01], [10] triangle in xy space. Data from Wyszecki, Günter and Stiles, Walter Stanley (2000) Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae (2nd ed.), Wiley-Interscience

## Barevný prostor $XYZ$ , rovina $xy$ - výsledek experimentu

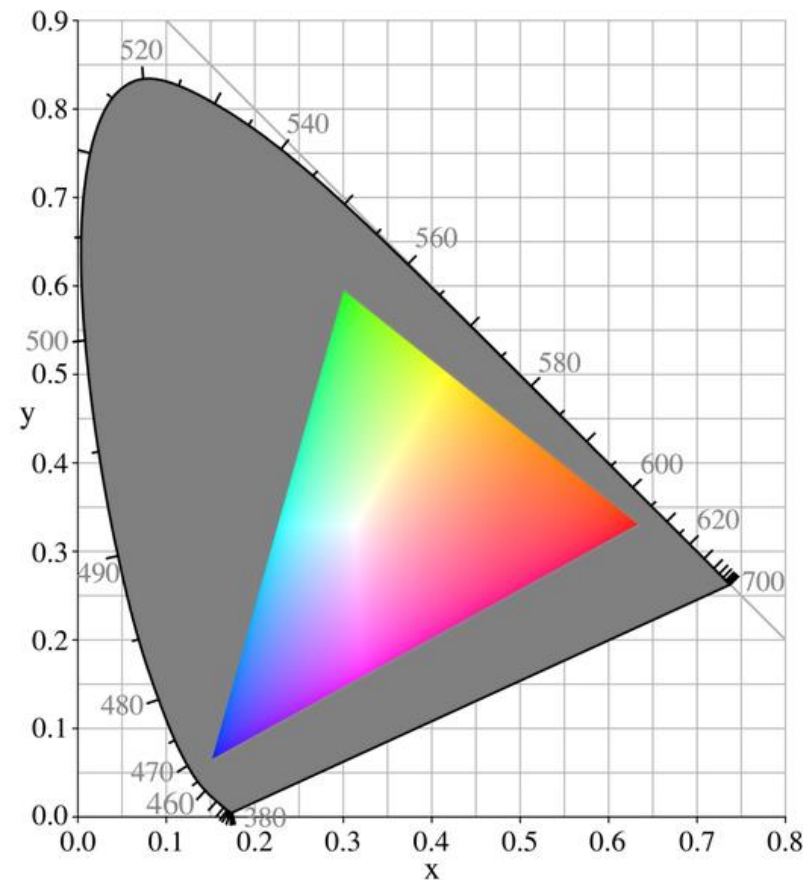
- prostor  $RGB$  (pro konstantní jas rovina  $rg$ ) obsahuje u některých barev záporné hodnoty
- CIE navrhla transformaci do prostoru  $XYZ$  (pro konstantní jas rovina  $xy$ )
 
$$X = 2,7690R + 1,7518G + 1,1300B$$

$$Y = 1,0000R + 4,5907G + 0,0601B$$

$$Z = 0,0000R + 0,0565G + 5,5943B$$
- pro jednotkový jas stačí souřadnice  $x, y$  které jsou po normalizaci:

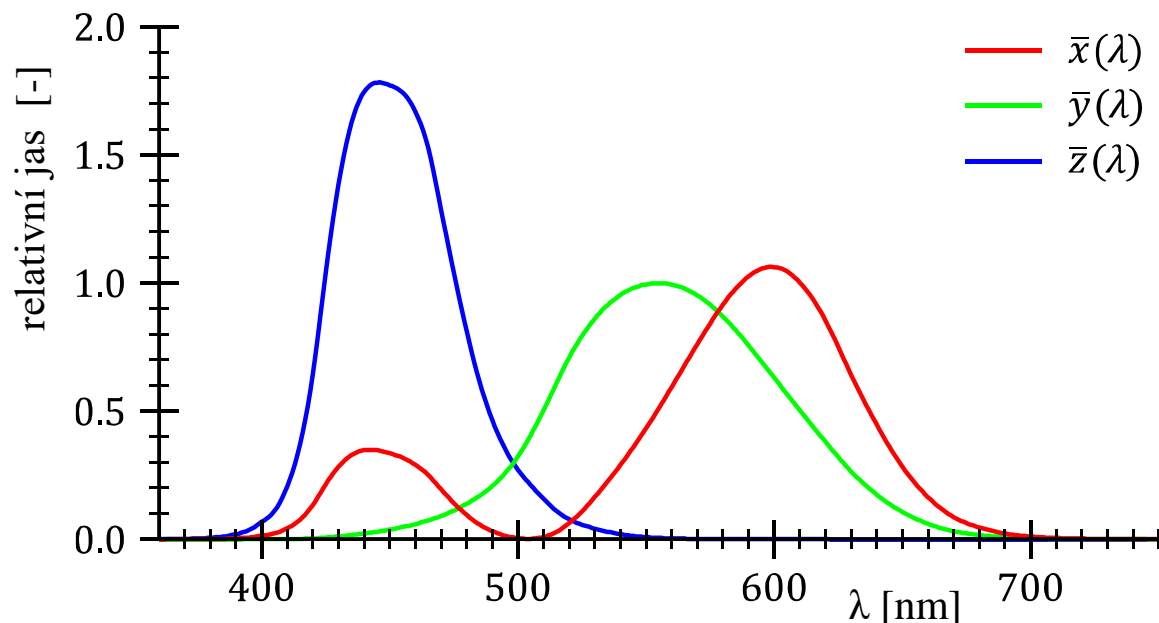
$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

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



By Hankwang at English Wikipedia [Public domain], via Wikimedia Commons from Wikimedia Commons

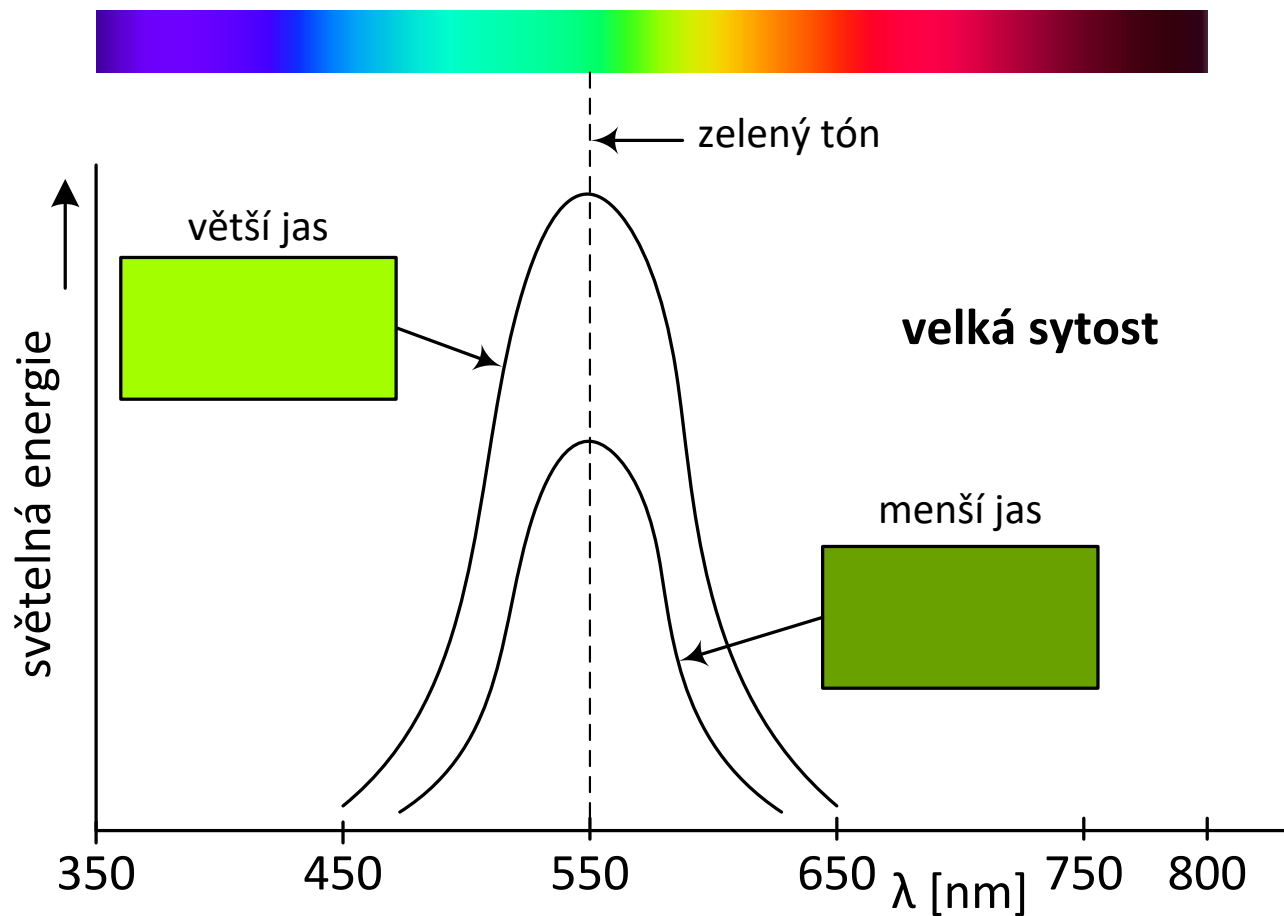
# Nastavení základních barev CIE - výsledek experimentu



- opět v podstatě křivky spektrální citlivosti jednotlivých čípků, tentokrát ale bez potřeby záporné červené
- po přepočtu jsou k dispozici neskutečné základní barvy  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$ , které definují kompletní gamut (viditelný rozsah barev) normálního pozorovatele

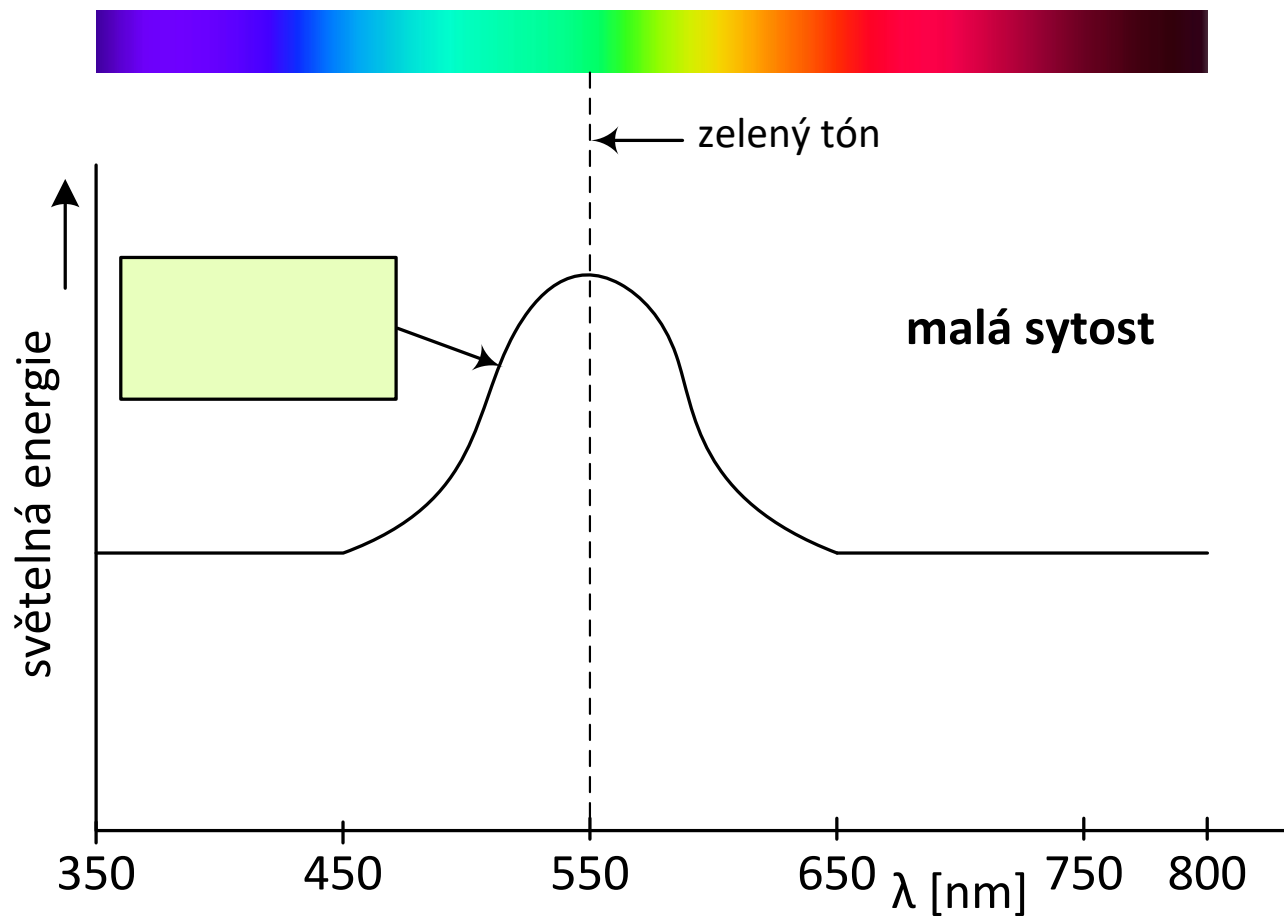
By Marco Polo at English Wikipedia [Public domain], via Wikimedia Commons from Wikimedia Commons

# Jas, tón, sytost

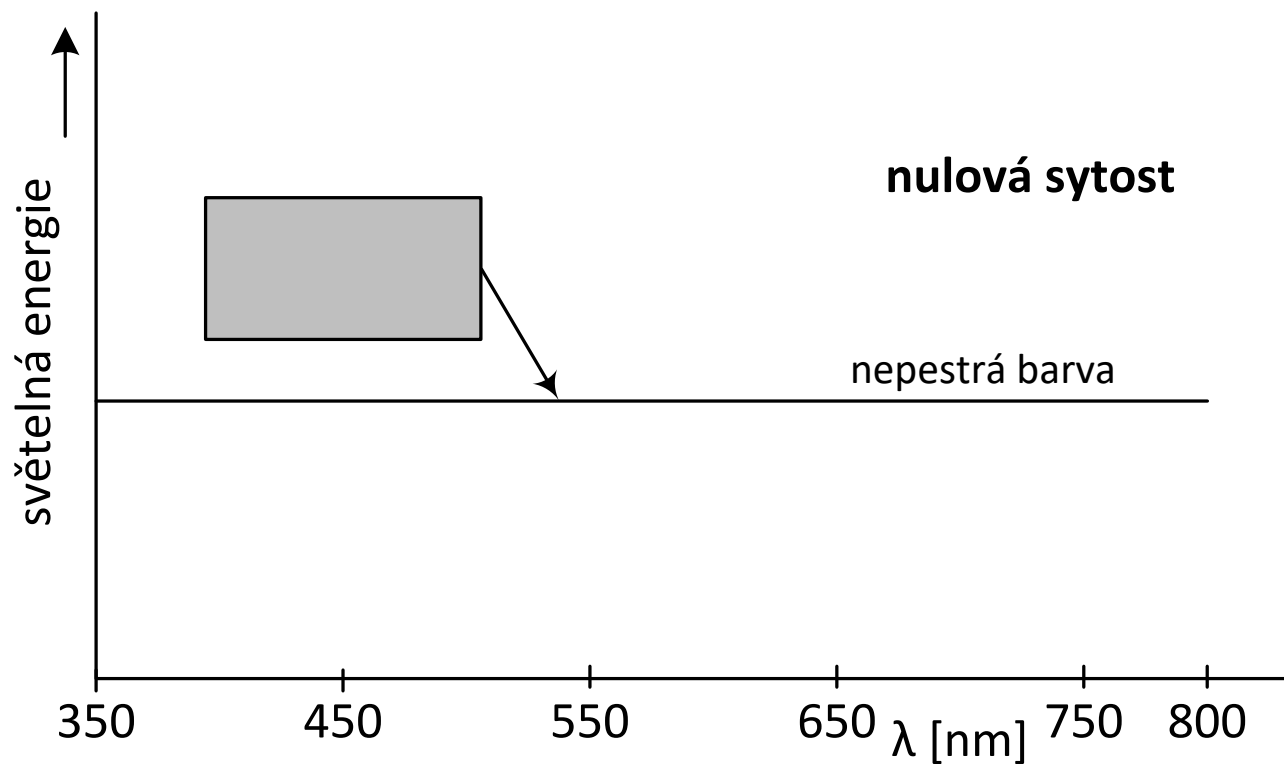




# Jas, tón, sytost

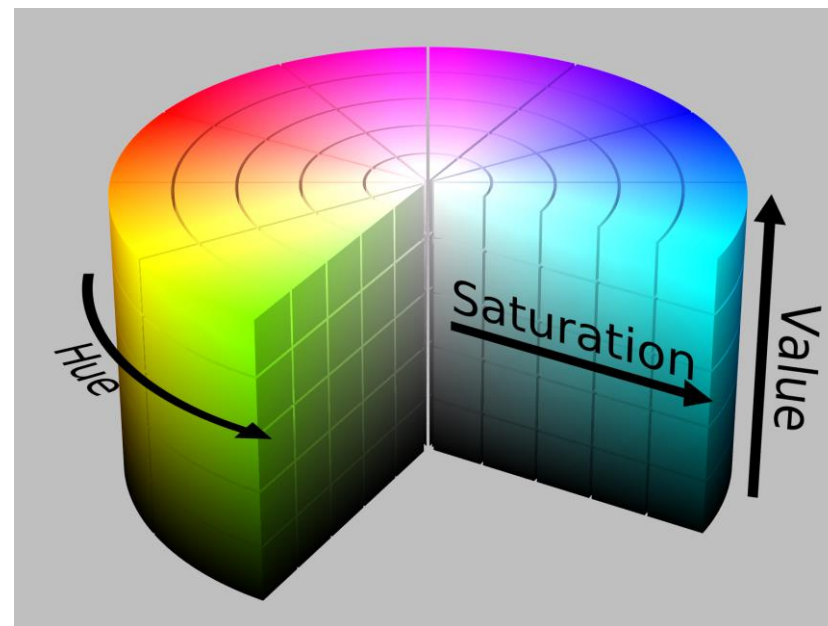
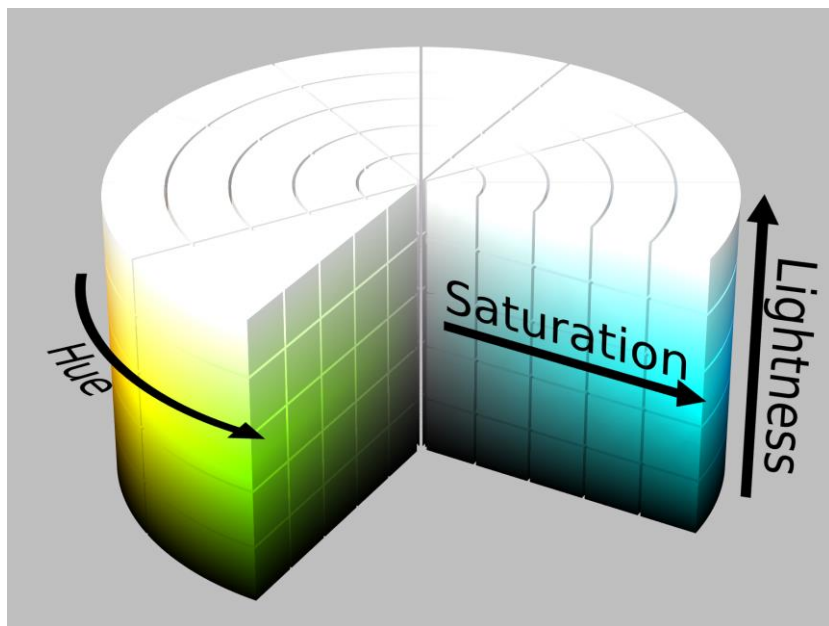


# Jas, tón, sytost



# Další barevné modely

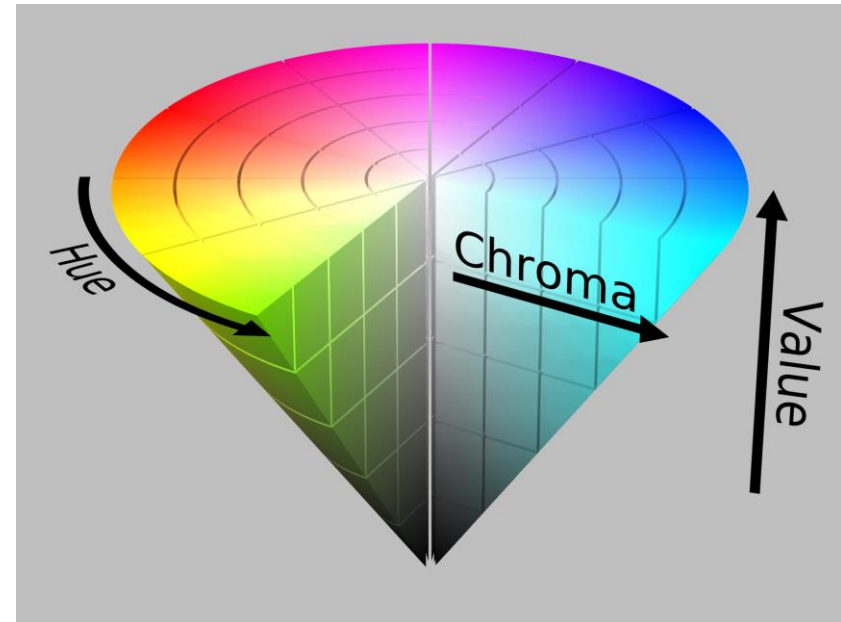
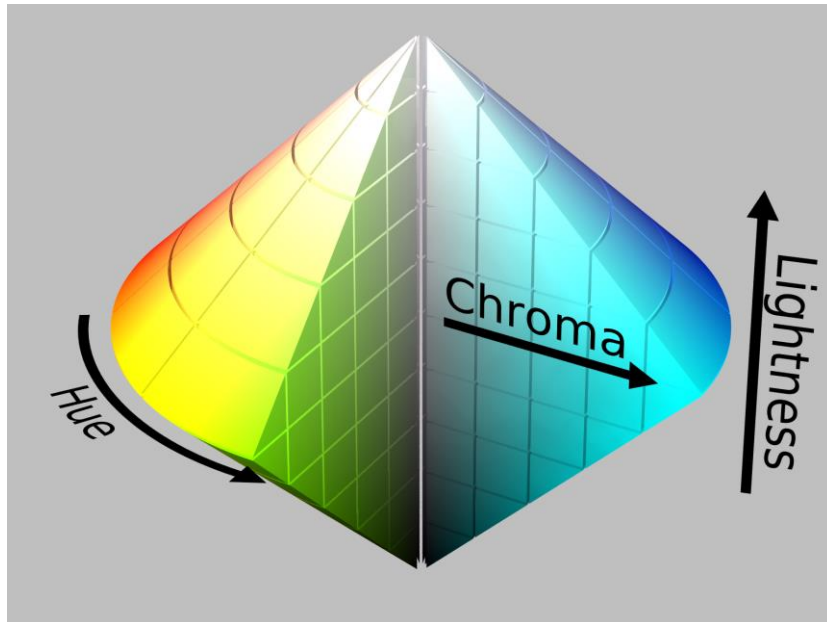
1. Model RGB je v některých aplikacích často nevýhodný
2. Potřeba oddělení manipulace s jasnem, odstínem a saturací:  
HSV (hue, saturation, value), HSL (hue, saturation, *lightness*)



By SharkD derivative work: via Wikimedia Commons from Wikimedia Commons

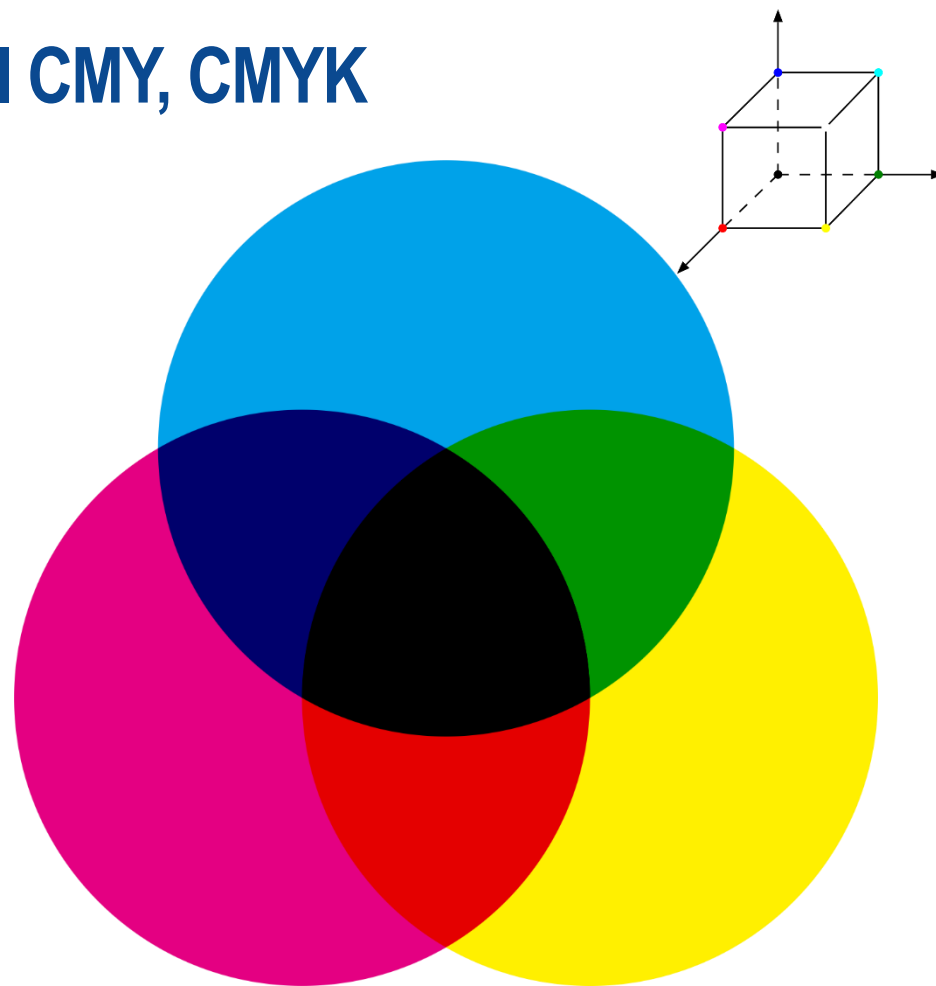
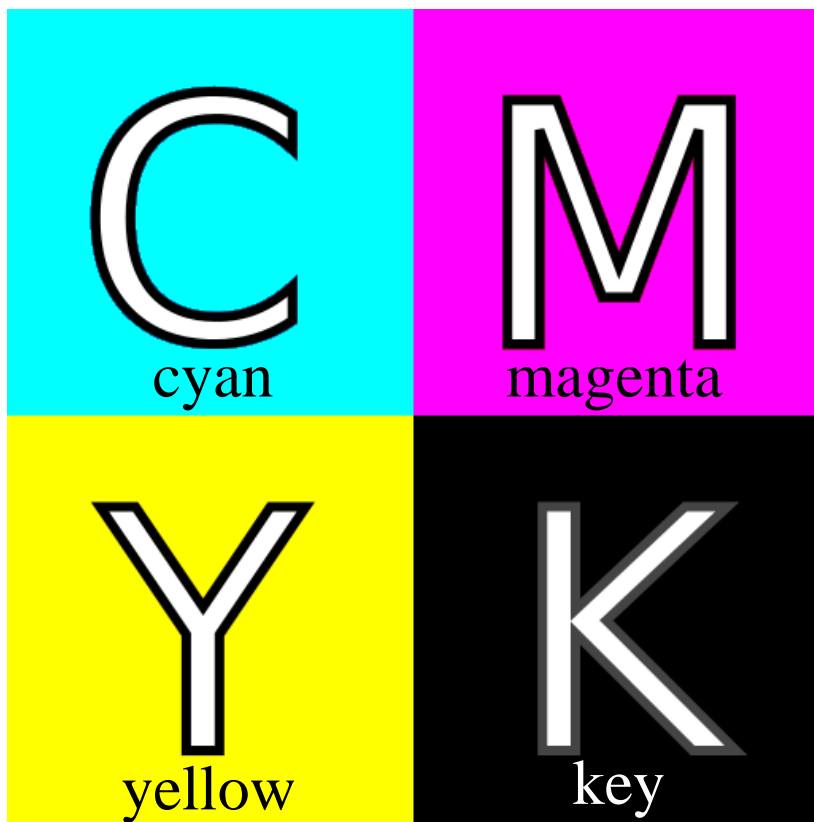
# Další barevné modely

1. Model RGB je v některých aplikacích často nevýhodný
2. Potřeba oddělení manipulace s jasem, odstínem a saturací:  
HSV (hue, saturation, value), HSL (hue, saturation, *lightness*)



By SharkD derivative work: via Wikimedia Commons from Wikimedia Commons

# Barevný (subtraktivní) model CMY, CMYK



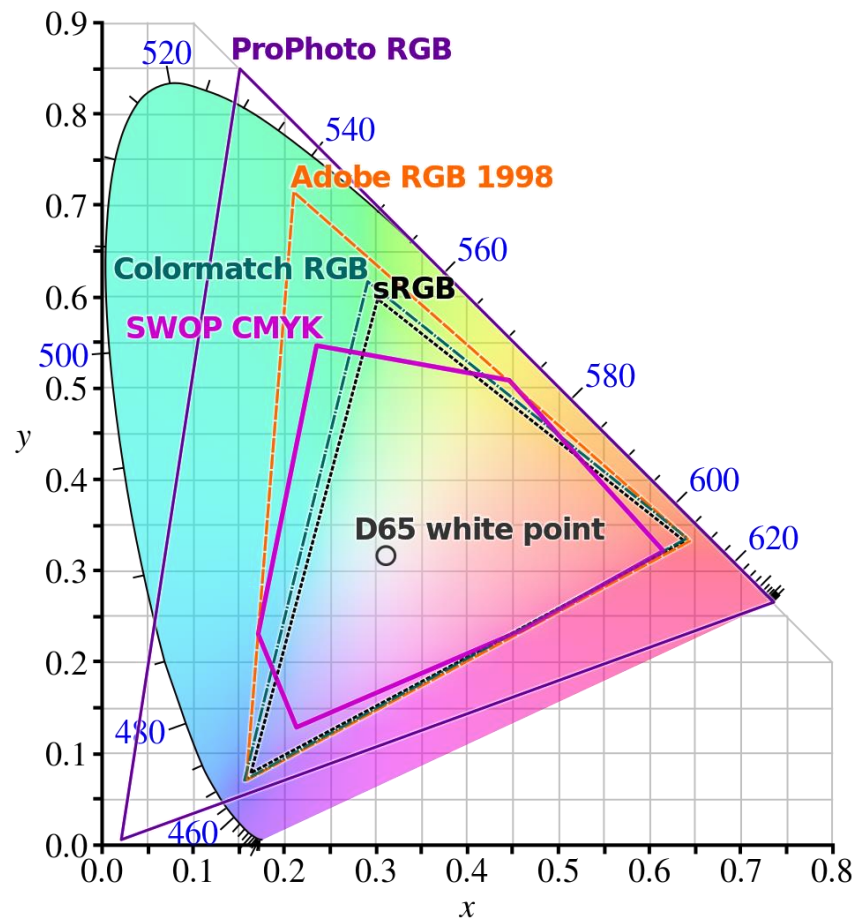
By Viliam Furík and Baraaszter via Wikimedia Commons from Wikimedia Commons

# Barevné prostory

Barevný prostor je definovaná množina barev, umožňující reprodukci barev pomocí daného zařízení

1. sRGB (1995): 36%
2. Adobe RGB (1998): 52%
3. Wide Gamut RGB: 78%
4. ProPhoto RGB (Kodak 1980): 90%

při větším gamutu (daná kompletní množina barev) je doporučeno používat vyšší (16) bitové rozlišení jako předcházení posterizaci (zviditelnění barevných přechodů)



By BenRG and cmglee via Wikimedia Commons from Wikimedia Commons

# Barevné prostory

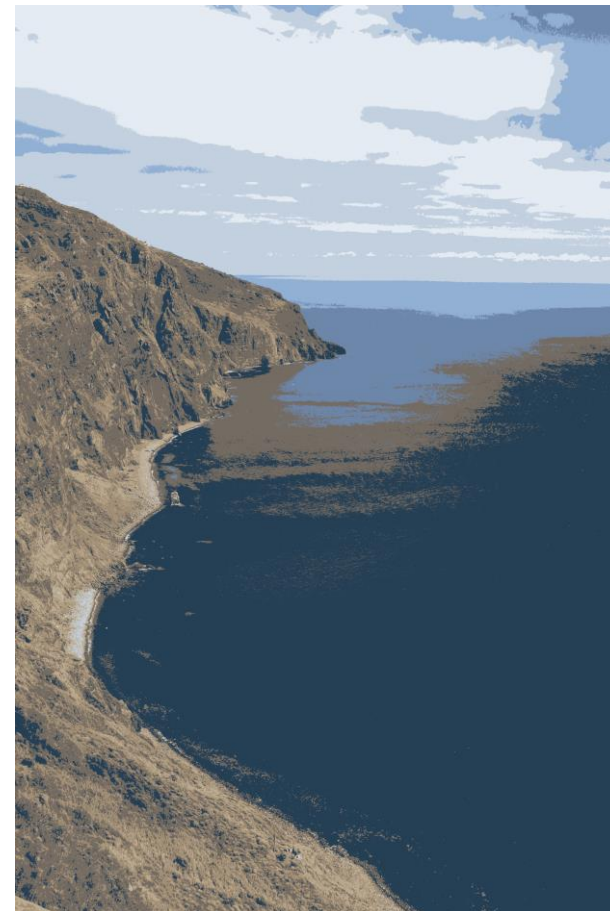
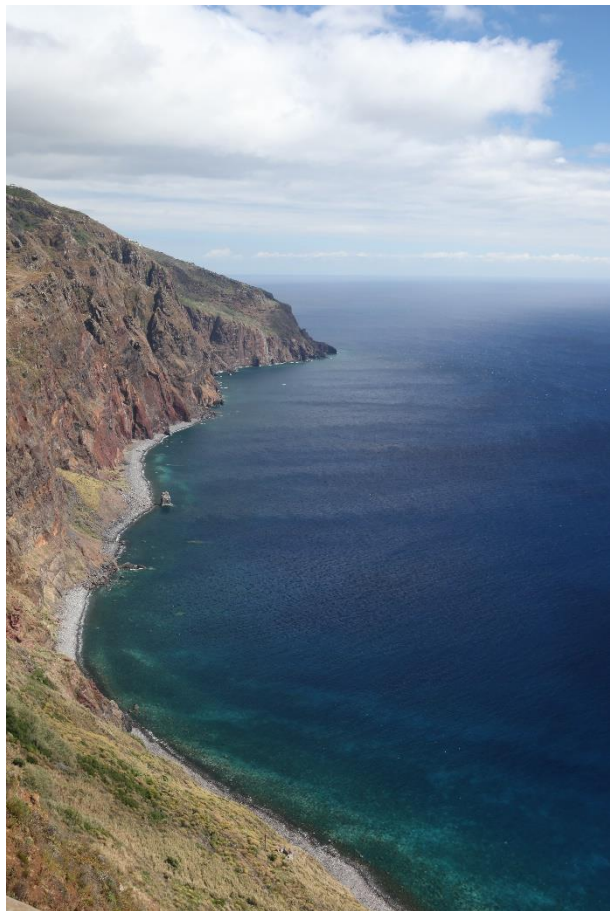
Barevný prostor je definovaná množina barev, umožňující reprodukci barev pomocí daného zařízení

1. sRGB (1995): 36%
2. Adobe RGB (1998): 52%
3. Wide Gamut RGB: 78%
4. ProPhoto RGB (Kodak 1980): 90%

při větším gamutu (daná kompletní množina barev) je doporučeno používat vyšší (16) bitové rozlišení jako předcházení **posterizaci** (zviditelnění barevných přechodů)



# Posterizace - příklad



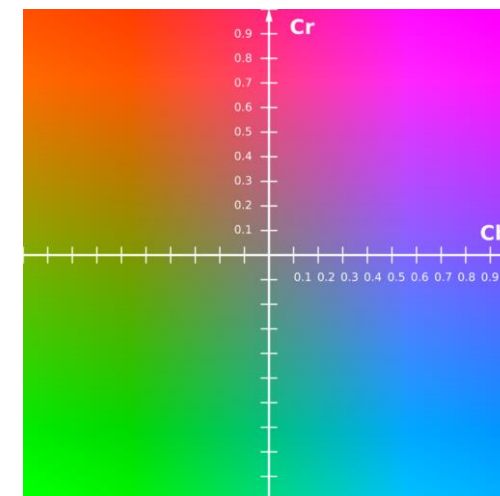
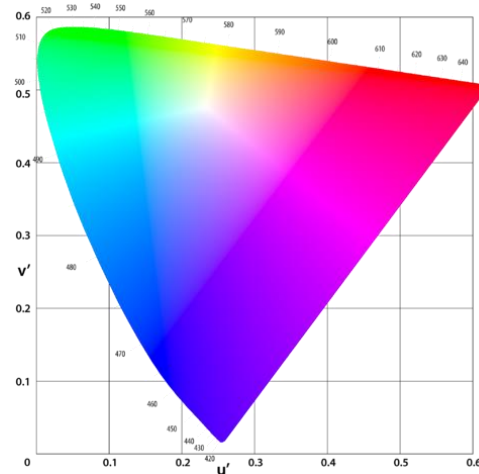


# Absolutní barevné prostory

**Absolutní barevný prostor:** prostor s jednoznačně definovanými barvami

**Relativní barevný prostor:** definuje pouze vztahy mezi nejednoznačně definovanými komponentami (barevný model)

1. LAB (1948): L – lightness (jas), a, b – komplementární barevné souřadnice, nelineární transformace CIE XYZ
2. podobný CIE LUV (1976)
3. v digitální televizi: Yuv, YCbCr, ...



By Simon A. Eugster and Adoniscik, via Wikimedia Commons from Wikimedia Commons

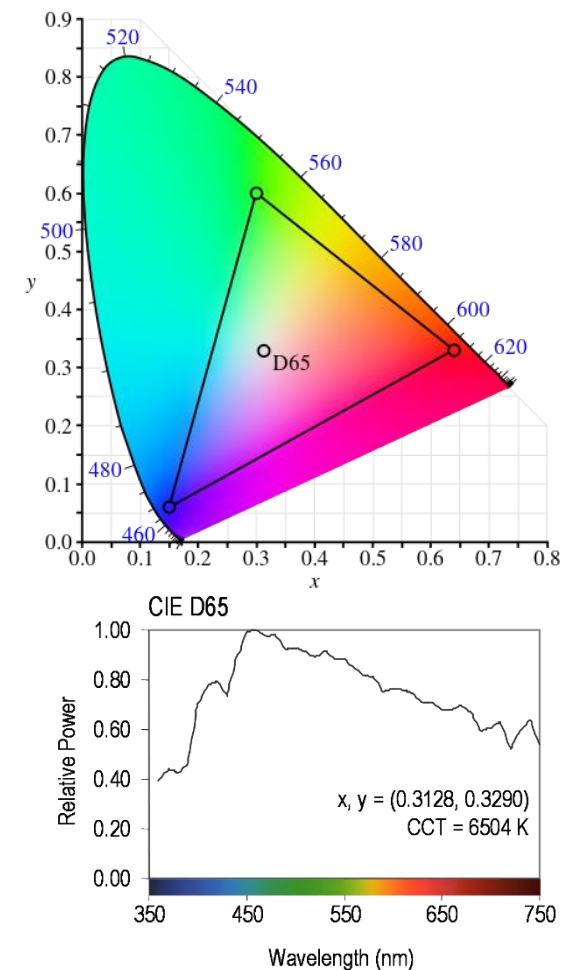
# ICC profil

- Každé zařízení, které snímá nebo produkuje obraz může přiřazovat skutečným barvám jiné číselné souřadnice v daném barevném modelu
- ICC - *International Color Consortium* definuje barevné profily daných zařízení
- ICC profil: definuje přiřazení (pomocí přepočtu nebo tabulky) souřadnic použitého barevného modelu (RGB, CMYK) ke skutečným barvám definovaným v referenčním (absolutním) barevném prostoru (CIE XYZ, CIE LAB)
- ICC profil může být získán od výrobce daného zařízení, nebo kalibrací pomocí kalibrační sondy či spektrofotometru



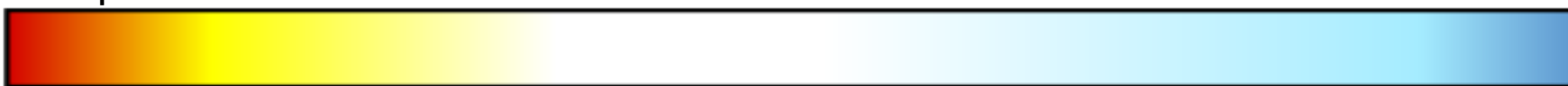
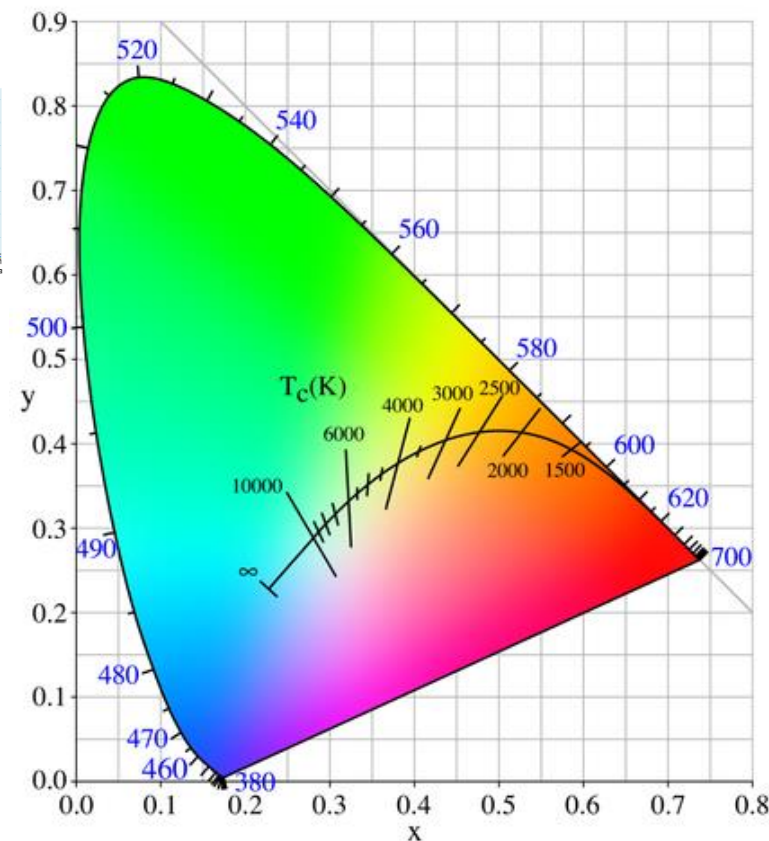
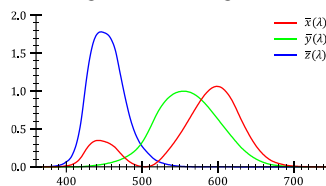
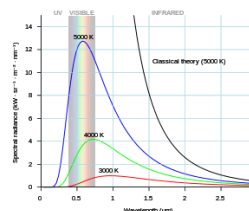
# Základní parametry snímacích a zobrazovacích zařízení

- primární barvy vymezující trojúhelník v referenční paletě (jejich barvu a jas)
- převodní nelineární tabulka barev (ICC profil)
- bílý bod: zejména jeho barva, např. D65 je standardizovaný bod v rovině  $xy$   
CCT: *correlated color temperature* – viz dále
- černý bod: barva a jas, hustota černé udává dolní hranici dynamického rozsahu daného zařízení
- dynamický rozsah: poměr mezi největším (bílá) a nejmenším (černá) jasnem



# Teplota chromatičnosti

- odvozeno od tepelných zářičů
- Planckův vyzařovací zákon
- jsou hledány barvy, které se nejvíce podobají spektrální křivce záření absolutně černého tělesa na dané teplotě
- je počítána korelace Planckovy křivky s křivkami citlivosti oka
- isothermické přímky: barvy nejbližší spektrální křivce



1800K

4000K

5500K

8000K

12000K

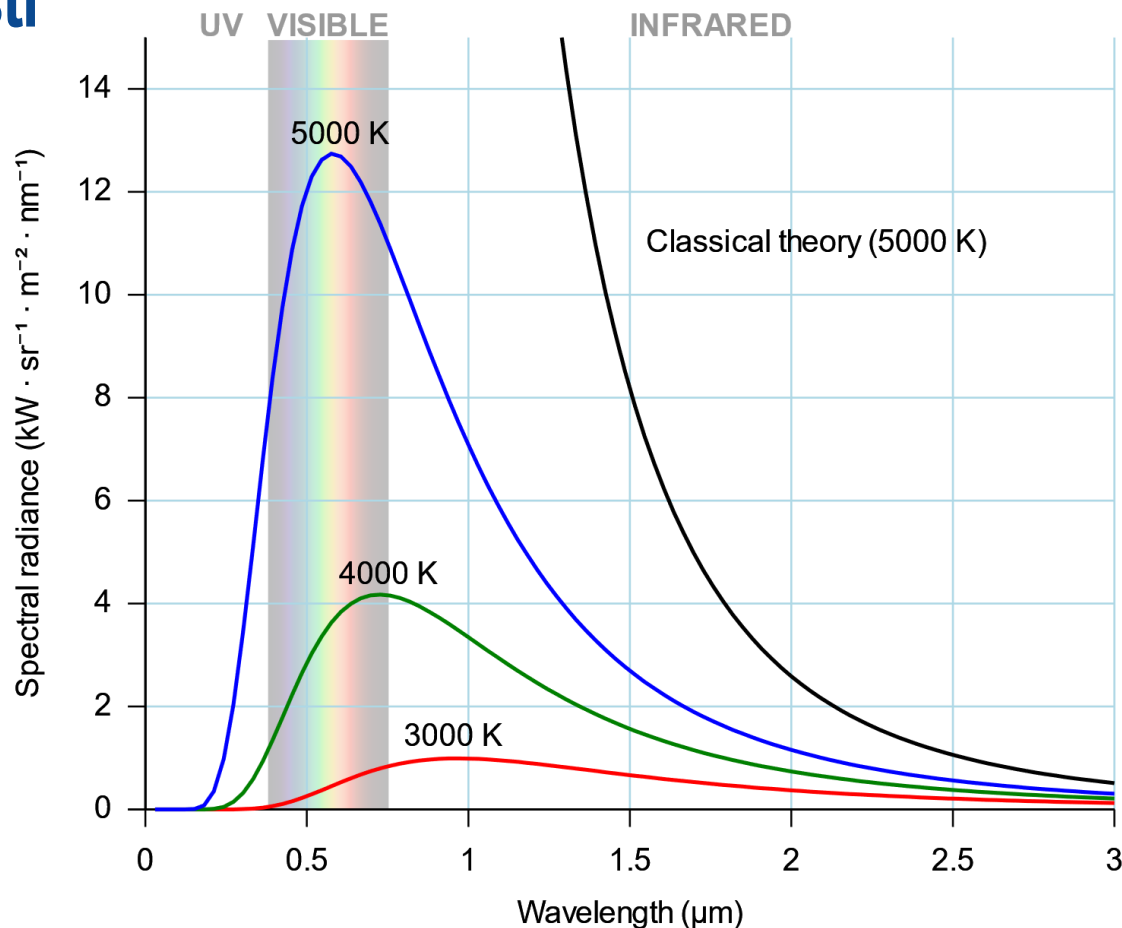
16000K

By en:User:PAR, Hošek, and Darth Kule via Wikimedia Commons from Wikimedia Commons

# Teplota chromatičnosti

$M(\lambda, T)$  spektrální hustota zářivého toku absolutně černého tělesa

spektrální křivky světla pro různé teploty absolutně černého tělesa



By Darth Kule, Public domain, via Wikimedia Commons

# Teplota chromatičnosti

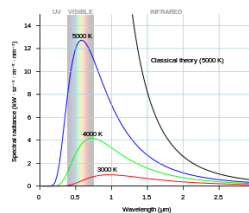
souřadnice barev tepelných zářičů  
v prostoru XYZ:

$$X_T = \int_0^{\infty} \bar{x}(\lambda) M(\lambda, T) d\lambda$$

$$Y_T = \int_0^{\infty} \bar{y}(\lambda) M(\lambda, T) d\lambda$$

$$Z_T = \int_0^{\infty} \bar{z}(\lambda) M(\lambda, T) d\lambda$$

kde  $M(\lambda, T)$  spektrální hustota zářivého  
toku absolutně černého tělesa



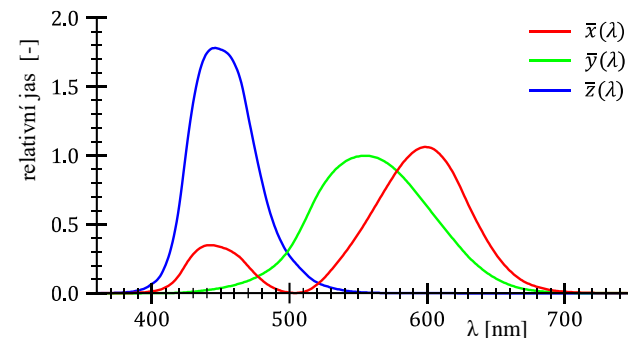
souřadnice barev tepelných zářičů  
v prostoru XYZ:

$$X_T = \int_0^{\infty} \bar{x}(\lambda) M(\lambda, T) d\lambda$$

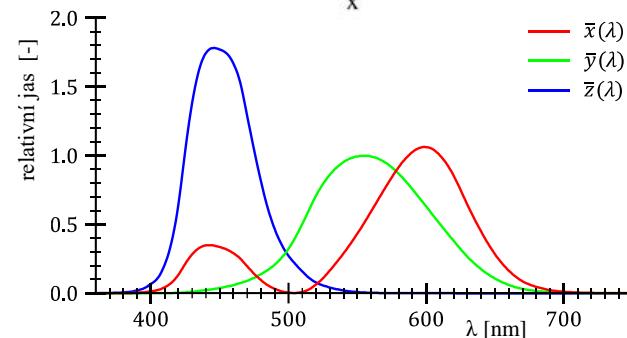
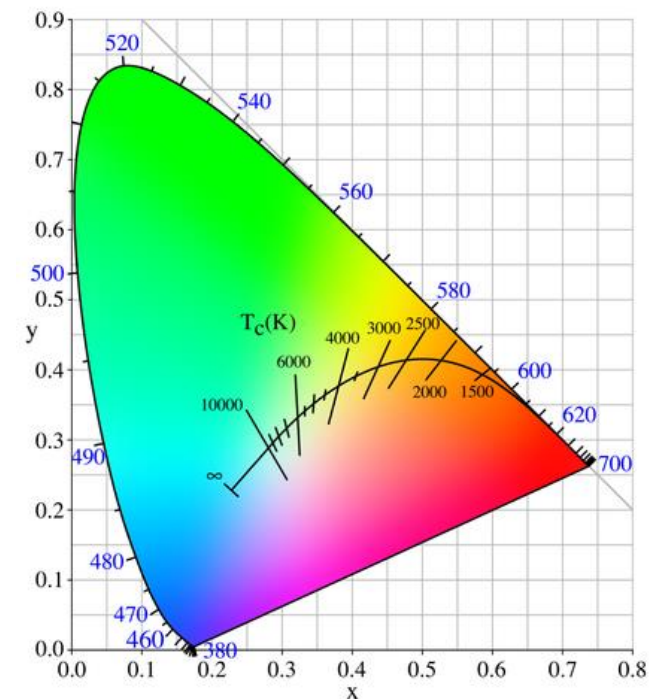
$$Y_T = \int_0^{\infty} \bar{y}(\lambda) M(\lambda, T) d\lambda$$

$$Z_T = \int_0^{\infty} \bar{z}(\lambda) M(\lambda, T) d\lambda$$

kde  $M(\lambda, T)$  spektrální hustota zářivého  
toku absolutně černého tělesa



# Teplota chromatičnosti

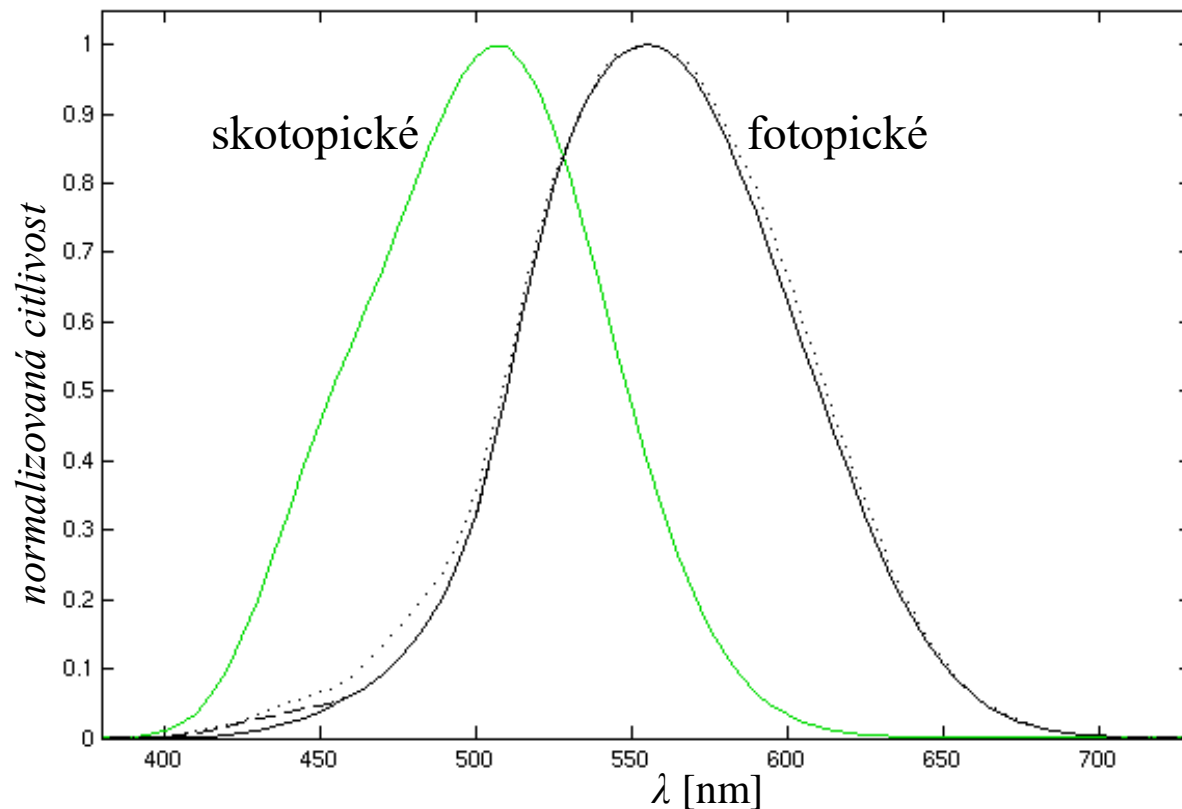


By Yerocus, en>User:PAR, and Marco Polo via Wikimedia Commons from Wikimedia Commons

# Celková spektrální citlivost

- skotopické vidění:  
tyčinkové vidění  
adaptované na nízkou  
úroveň osvětlení
- fotopické vidění:  
barevné vidění za  
dobrých světelných  
podmínek
- další křivky mezi  
těmito extrémy
- výpočet jasové složky:

$$Y = 0,30R + 0,59G + 0,11B$$



By Dicklyon at English Wikipedia [Public domain], via Wikimedia Commons from Wikimedia Commons



**Děkuji za pozornost**