

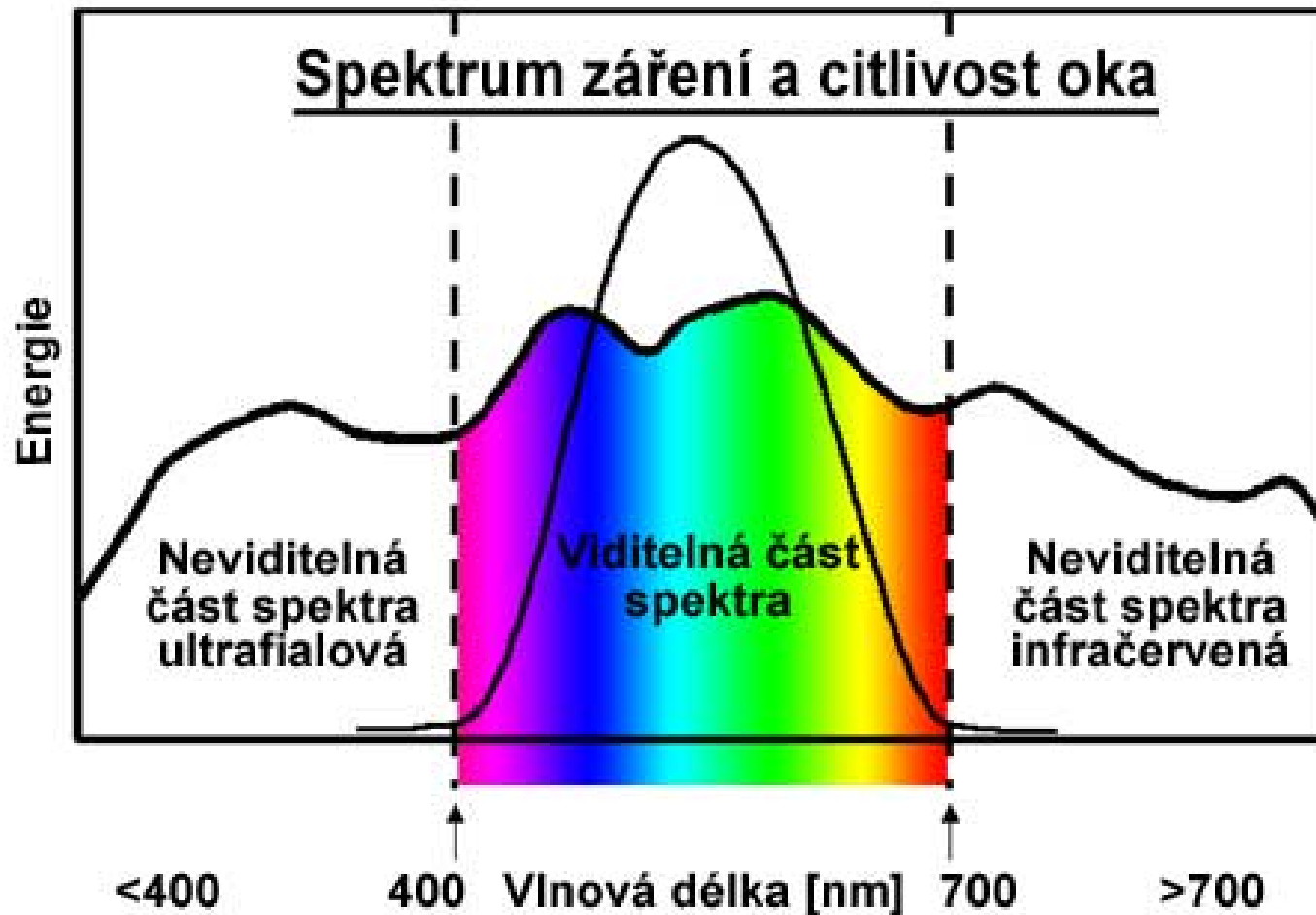
A composite image for the top half of the slide. The left side shows a stack of papers with a blue-to-purple gradient. The right side shows a clock face with a purple-to-pink gradient. A black-bordered box is overlaid on the center.

# Barvy

A composite image for the bottom half of the slide. The left side shows a stack of papers with a green-to-cyan gradient. The right side shows a clock face with a yellow-to-orange gradient. A black-bordered box is overlaid on the center.

Vítězslav Otruba

# Elektromagnetické záření



# Achromatické světlo

---

- **„Bílé světlo“** : signál složený ze záření všech vlnových délek viditelného spektra
- Difúzní odraz dopadajícího světla na povrchu těles:
  - odraz > 80 %** - bílé předměty
  - odraz < 3%** - černé předměty
- Kolik úrovní šedé barvy rozlišíme ?  
**Stačí 32-64**
- Lidský vizuální systém je schopen adaptace na různé úrovně intenzity. Dolní a horní mez vnímání intenzity se liší **násobkem  $10^{10}$**  ! Současně vnímáme několik desítek úrovní intenzity v určitém místě, při změně pohledu se podle úrovně intenzity na sledovaném povrchu vizuální systém přizpůsobí.

# Lambert-Beerův zákon

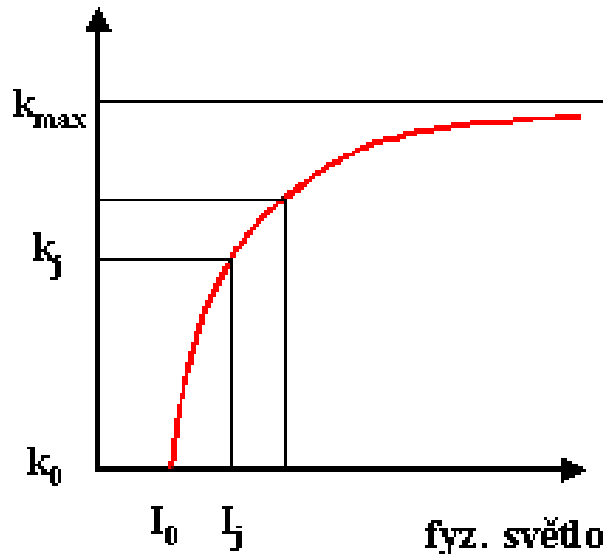
**Rovnoměrný přírůstek jasu fyzikálního světla vnímá člověk subjektivně jako logaritmický přírůstek intenzity vnímaného světla.**

$I_0$  - nejmenší vnímaná intenzita

$I_1 = r I_0$  ;  $I_2 = r I_1$

$I_k = r I_{k-1} = r^k I_0$

vjem a chrom. světla



$$r = \left( \frac{1}{I_0} \right)^{1/k_{max}}$$
$$I_j = I_0^{(k_{max} - j)/k_{max}} ; 0 \leq j \leq k_{max}$$

linearizace: „Gamma korekce“  
(televize, monitory, software ...)

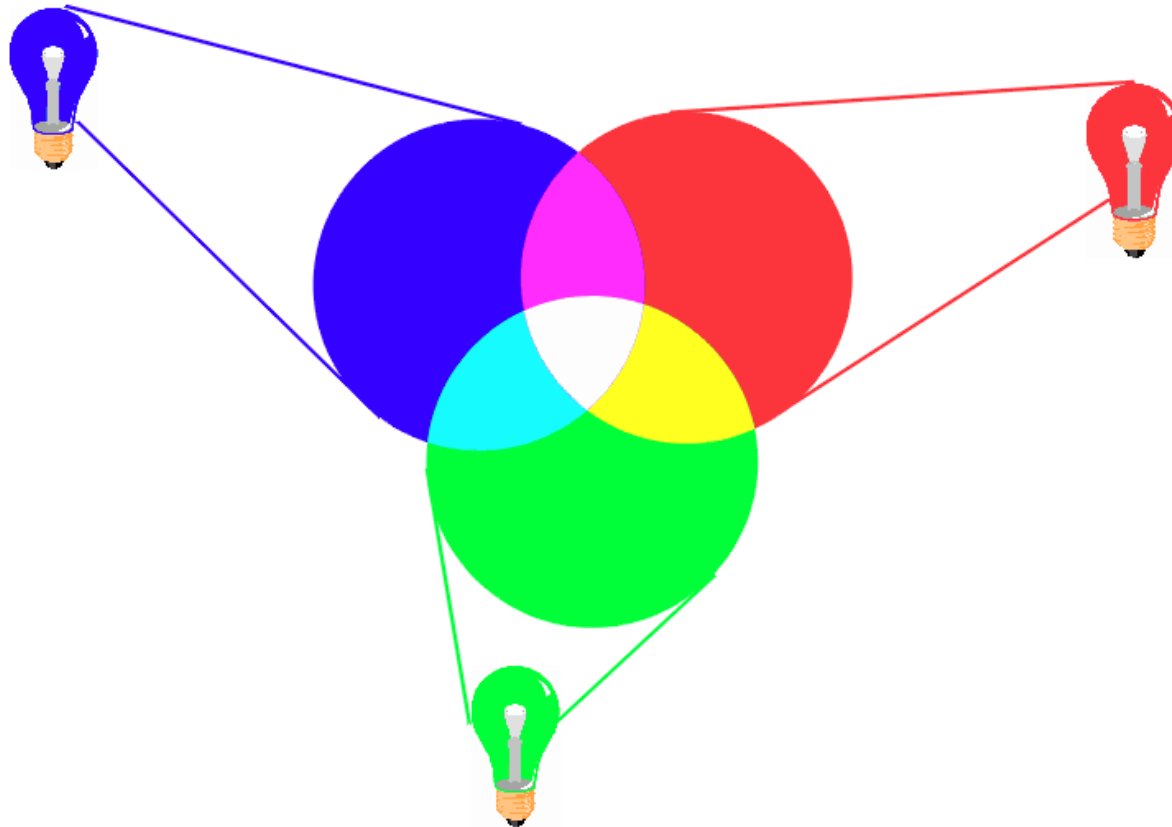
# Barevný vjem

---

- Grassmanovy zákony (1854) - lidské oko vnímá:
  - **dominantní vlnovou délku** (odstín, "hue")
  - **čistotu barvy** (sytost, "saturation")
  - **intenzitu** (jas, "brightness")
- barvy lze aditivně skládat ( $A=B, C=D \rightarrow A+C=B+D$ )

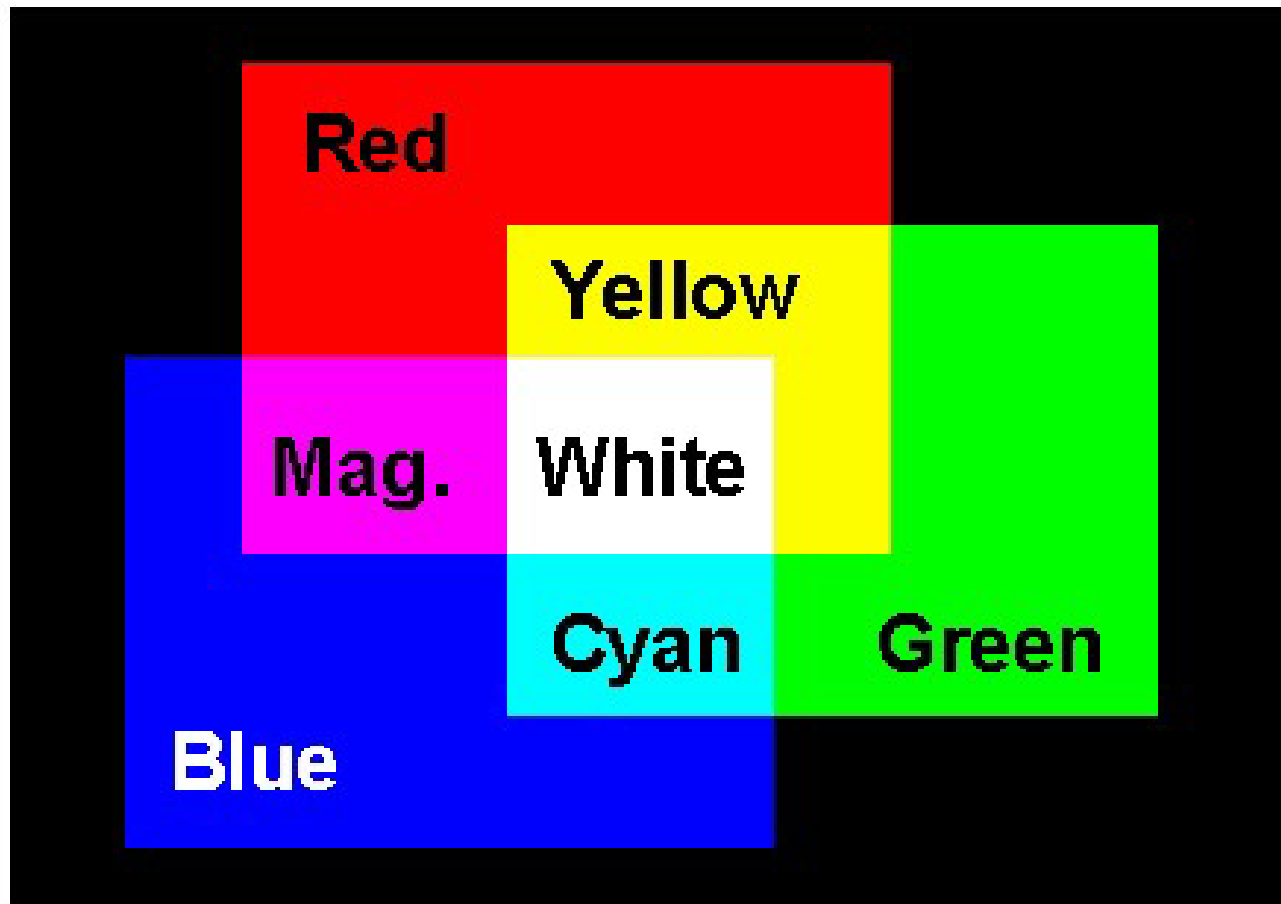
# Skládání světél

---



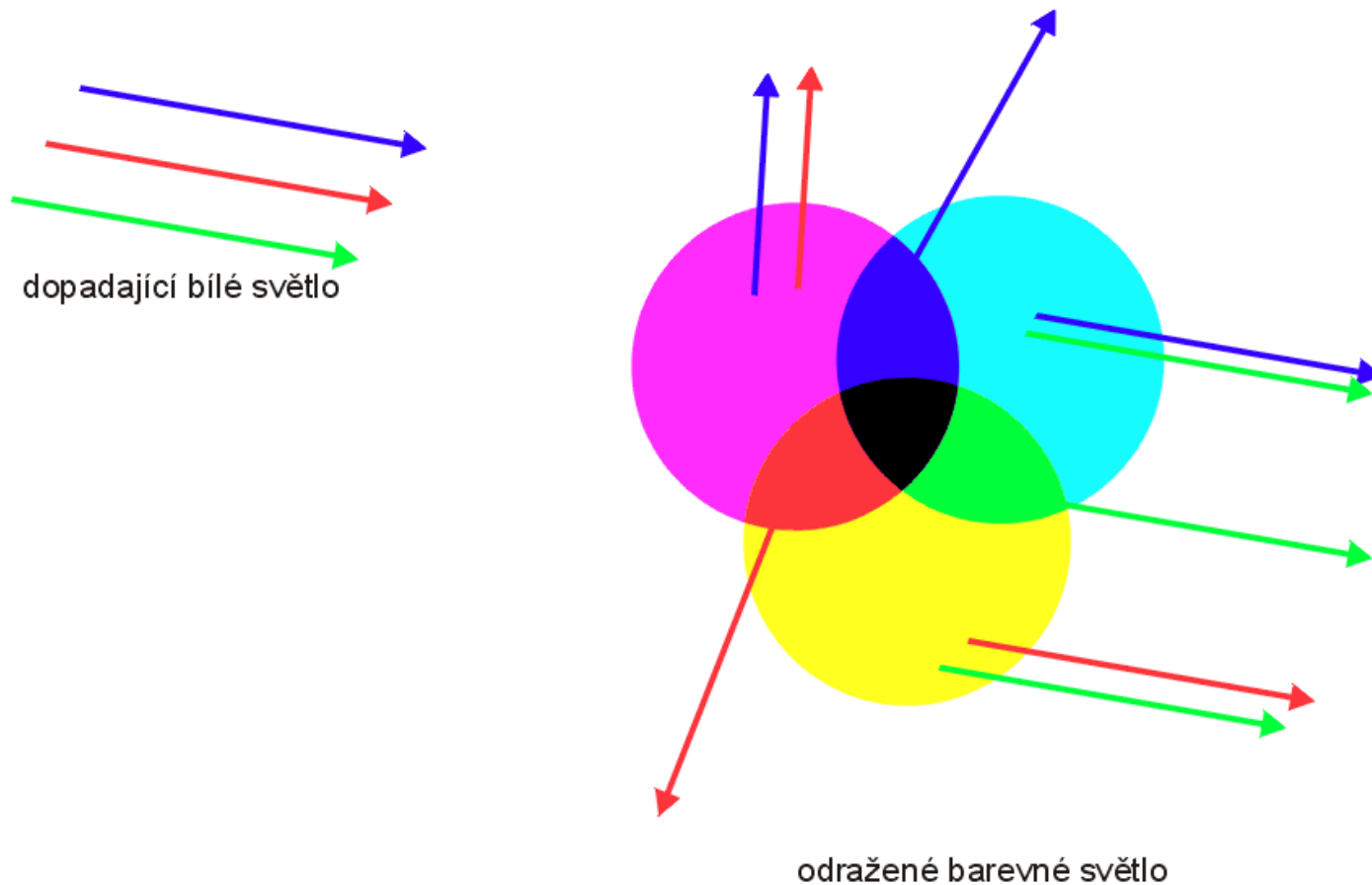
# Aditivní skládání barev (RGB)

---



# Skládání barviv

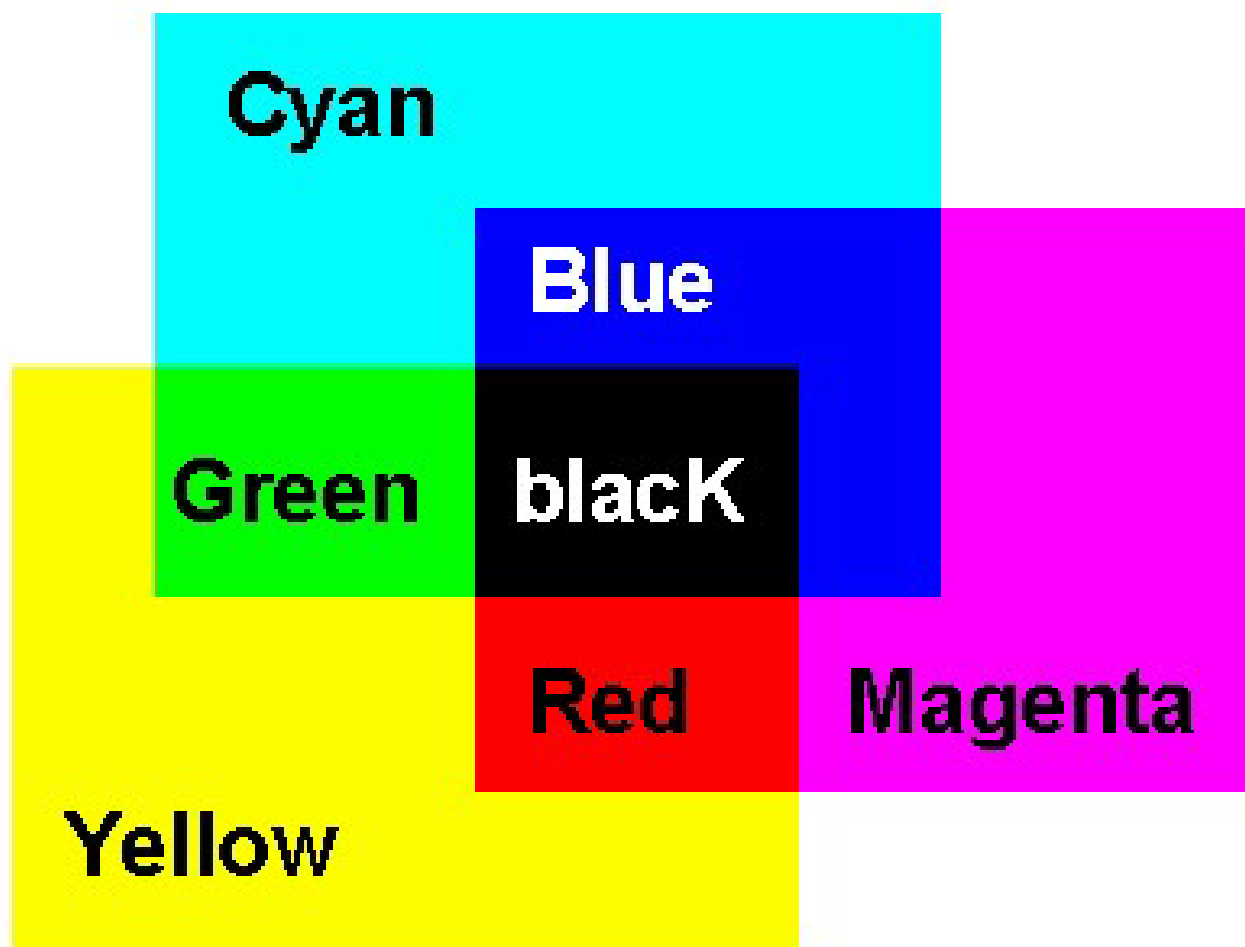
---



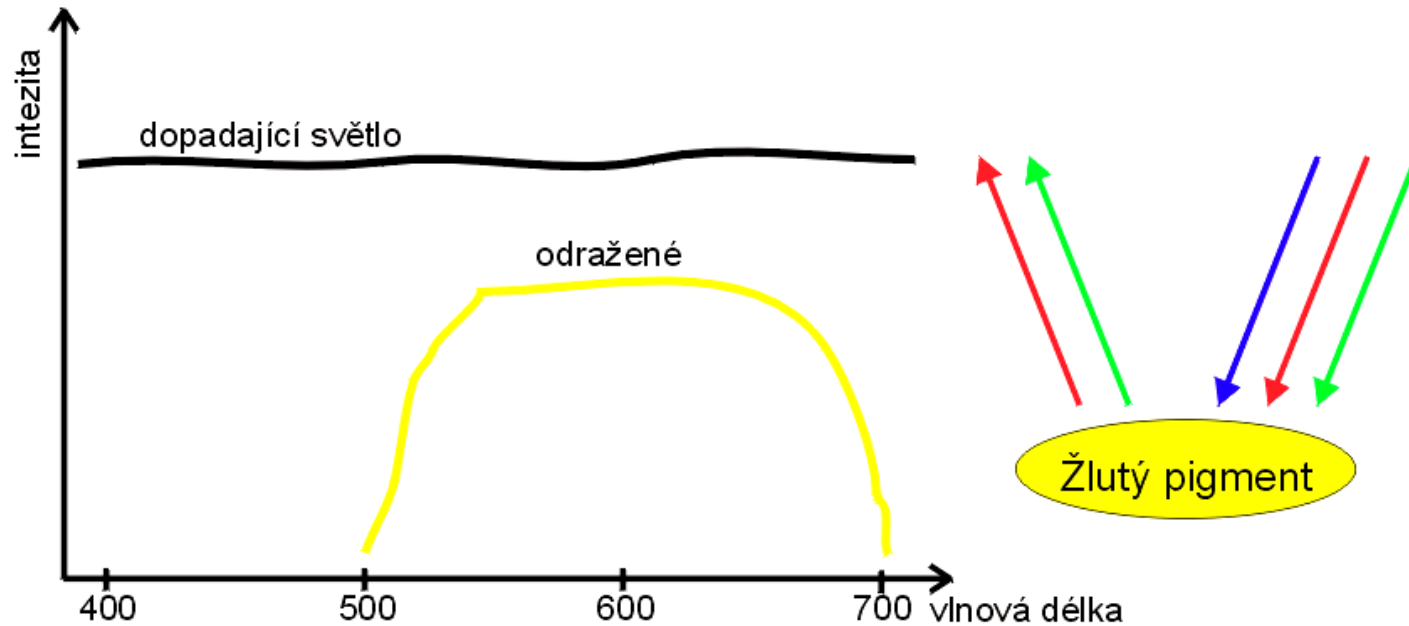


# Subtraktivní skládání barev (CMY)

---

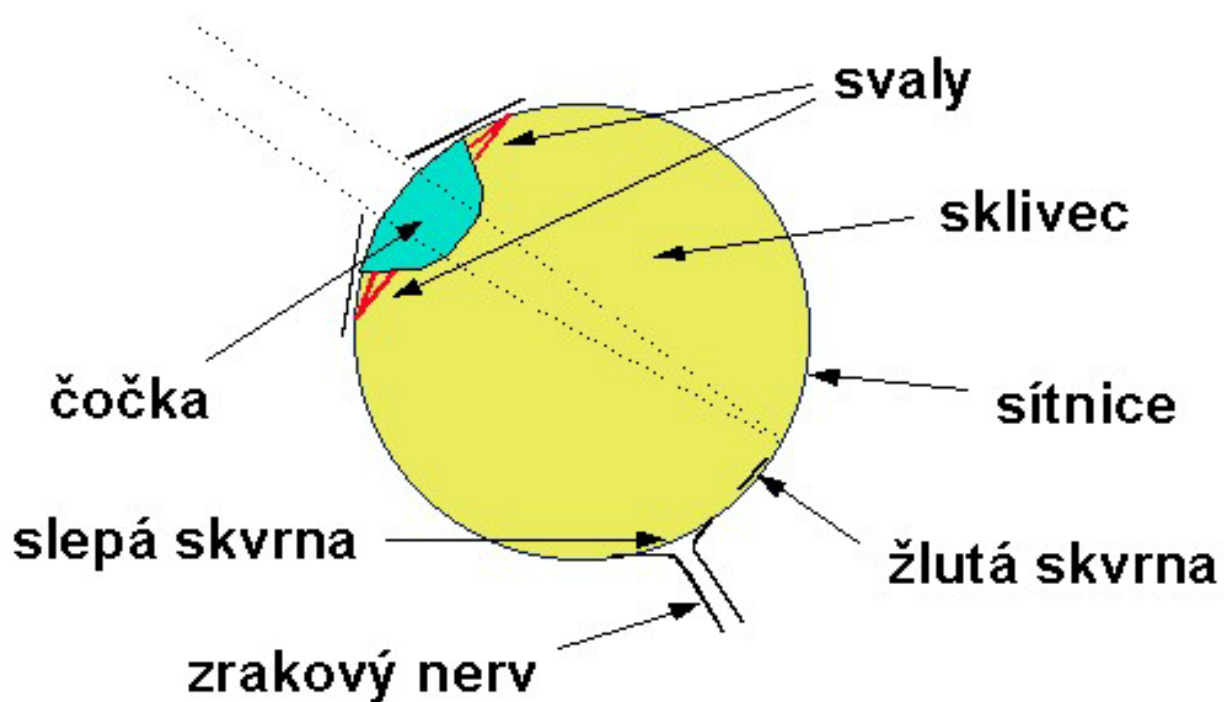


# Žlutý barevný pigment

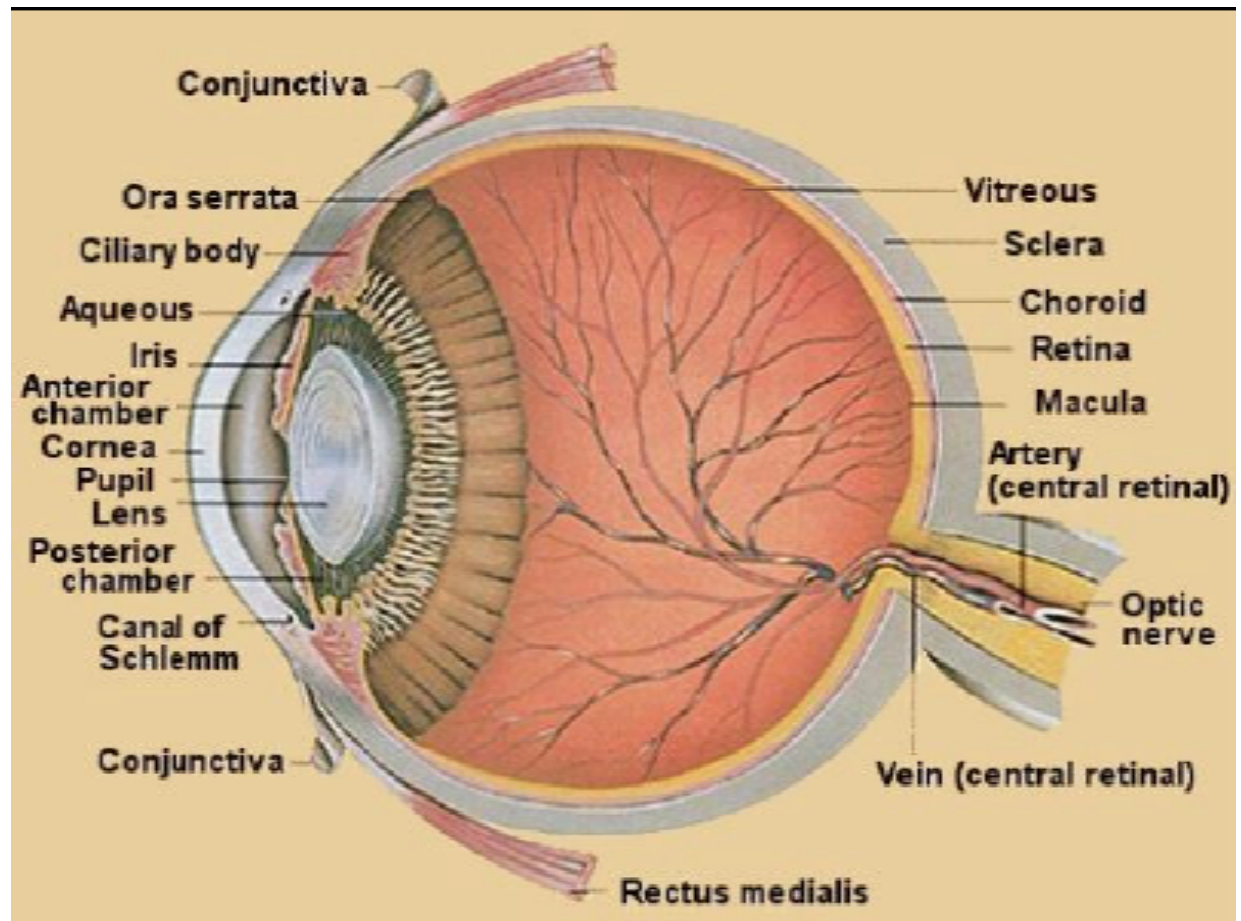


# Lidské oko

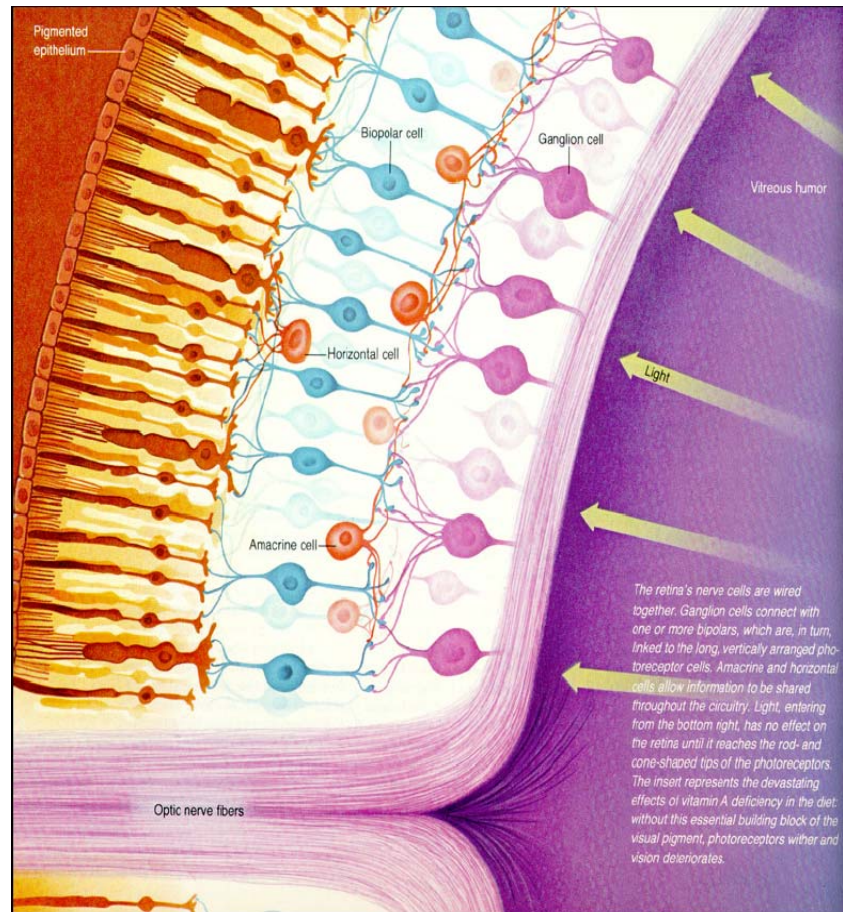
---



# Lidské oko

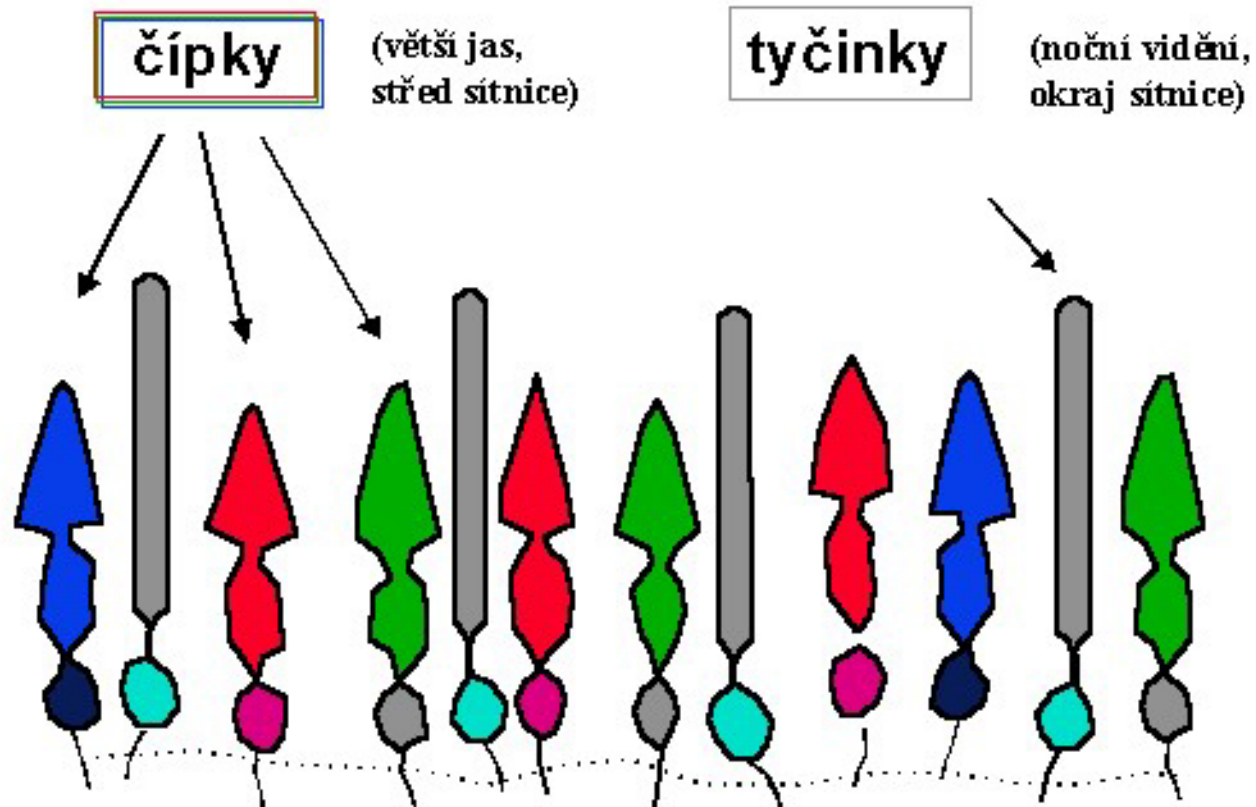


# Sítnice



# Sítnice lidského oka

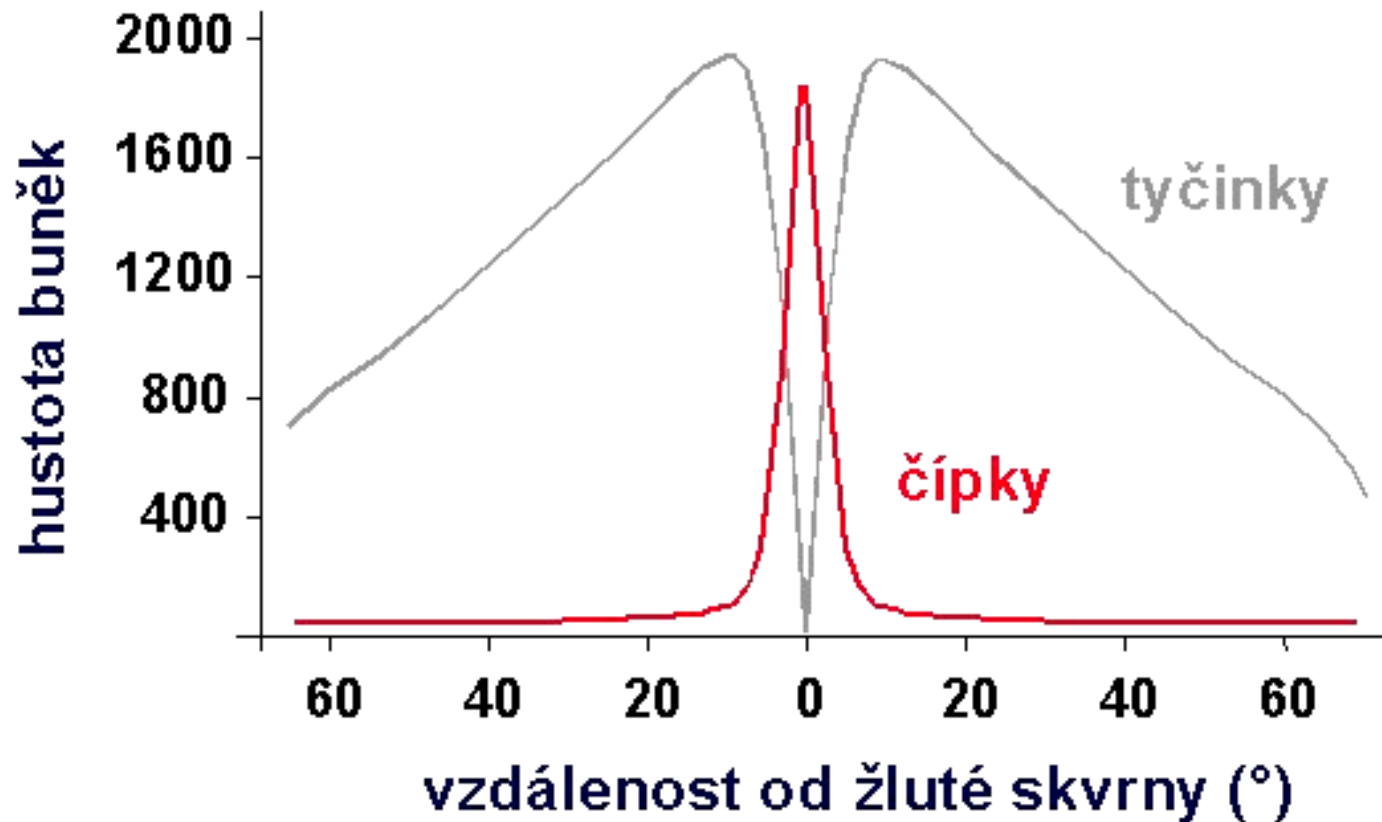
---



Sítnice obsahuje asi 7 milionů čípků a 120 milionů tyčinek

# Rozložení fotoreceptorů

---



# Vlastnosti zraku

---

- různá citlivost na **červenou** (0.3), **zelenou** (0.6) a **modrou** (0.1) barvu – navíc střed žluté skvrny téměř neobsahuje “modré” čípky
- zaostřuje se **podle jasové složky** ( $Y = R+G$ ) – nelze dobře zaostřit na rozdíly v modré složce
- **integrační schopnost** sítnice – vnímáme samostatné tečky a zároveň jejich hustotu



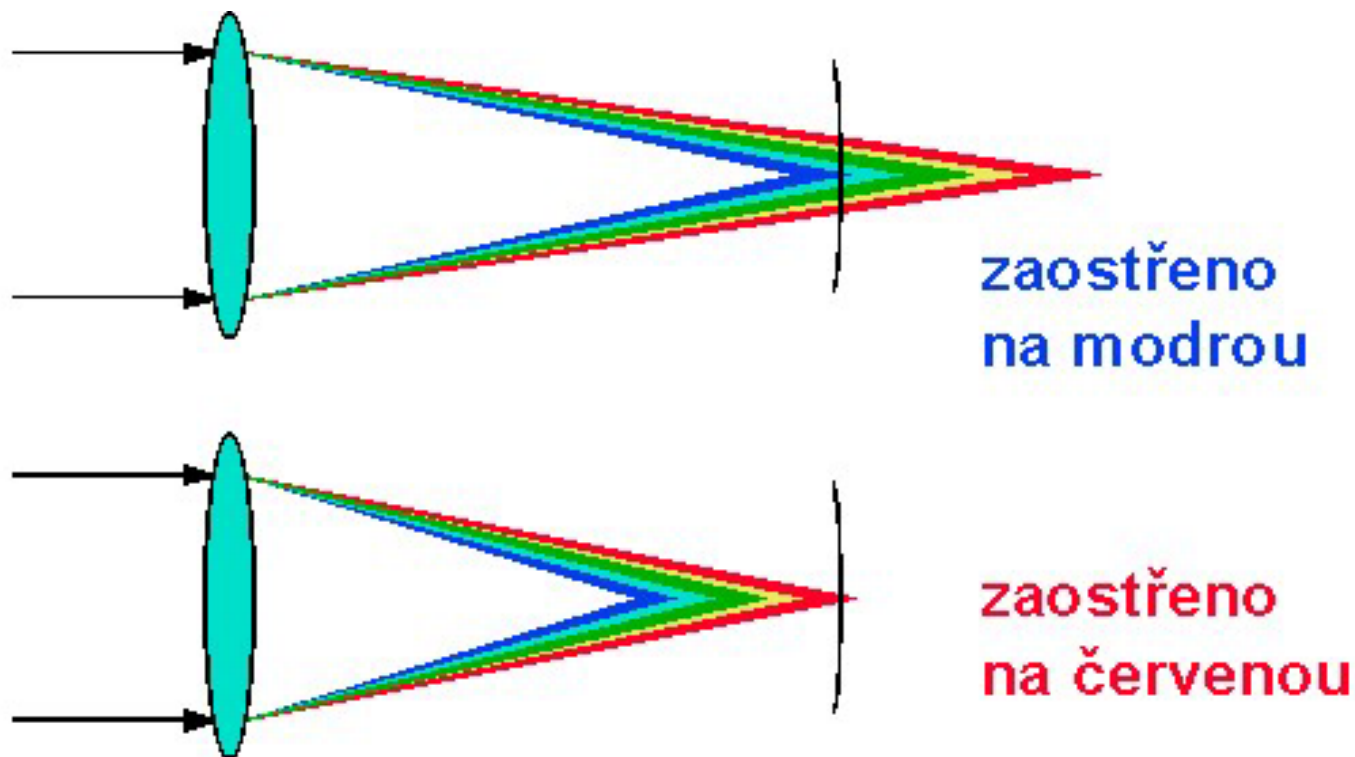
# Vlastnosti systému vidění

---

- **větší rozlišovací schopnost** ve svislém a vodorovném směru – v šikmých směrech asi o 30% menší
- **přeostrůvání** na barvy vzdálené ve spektru
- **setrvačnost** (“afterimage”) – laterální inhibice nervových buněk
- **očekávání** (“expectation”) – psychofyzilogická vlastnost

# Barevná aberace oka

---



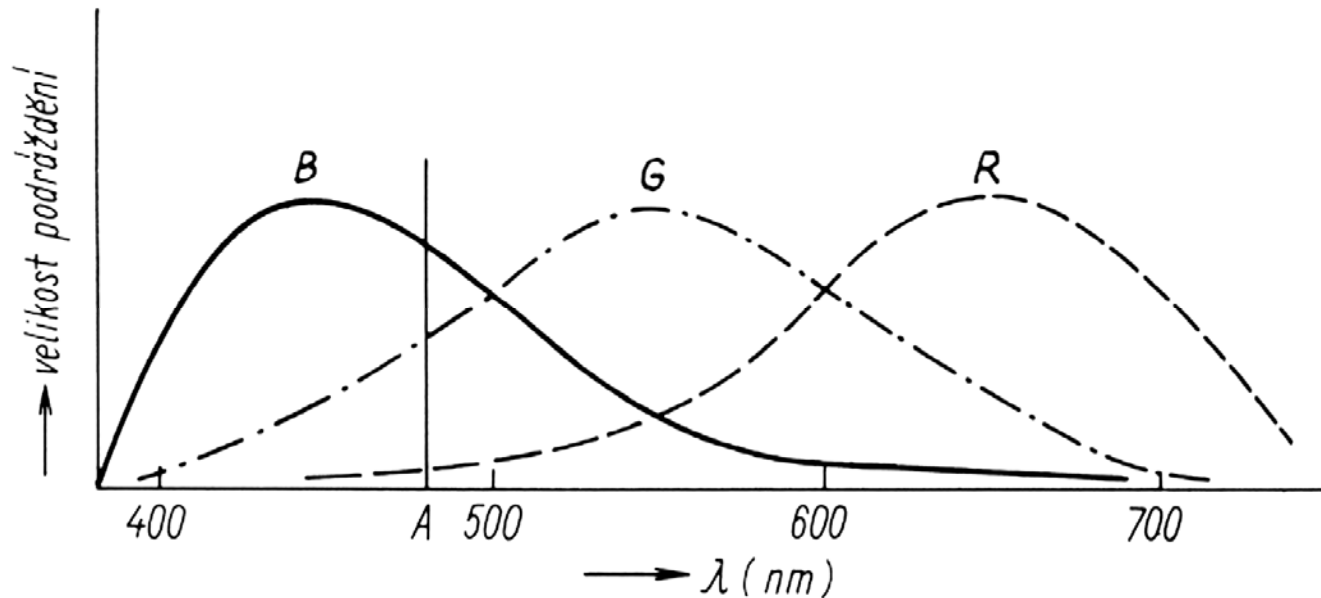
**Lidské oko se chová jako normální čočka, tj. nemá barevnou korekci.**

# Doporučení

---

- ➔ **používat barvy strážlivě**
  - maximálně 4-6 různých barev, odstínů může být víc
- ➔ **nekreslit malé objekty a tenké čáry modře**
  - málo “modrého” pigmentu ve středu žluté skvrny
- ➔ **na pozadí nepoužívat červenou a zelenou**
  - modrá i žlutá vyhovují
- ➔ **nekreslit vedle sebe syté barvy vzdálené ve spektru**
- ➔ **používat barvy logicky a konzistentně**

# Vnímání barev



Citlivost předpokládaných tří druhů čípků – na vlnovou délku A reaguje každý detektor jinou velikostí podráždění – barevný vjem může být charakterizován mimo vlnové délky záření i relativní velikostí podráždění receptorů. Obojí způsob je podle potřeby používán.

# Monochromatické světlo

---

- Čípky dovedou rozlišit pásma o šířce cca 2 nm, cca 150 barevných tónů (monochromatických světel) – **barevných tónů sytých**
- Směs všech monochromatických světel je světlo **bílé**

# Barevný tón, sytost

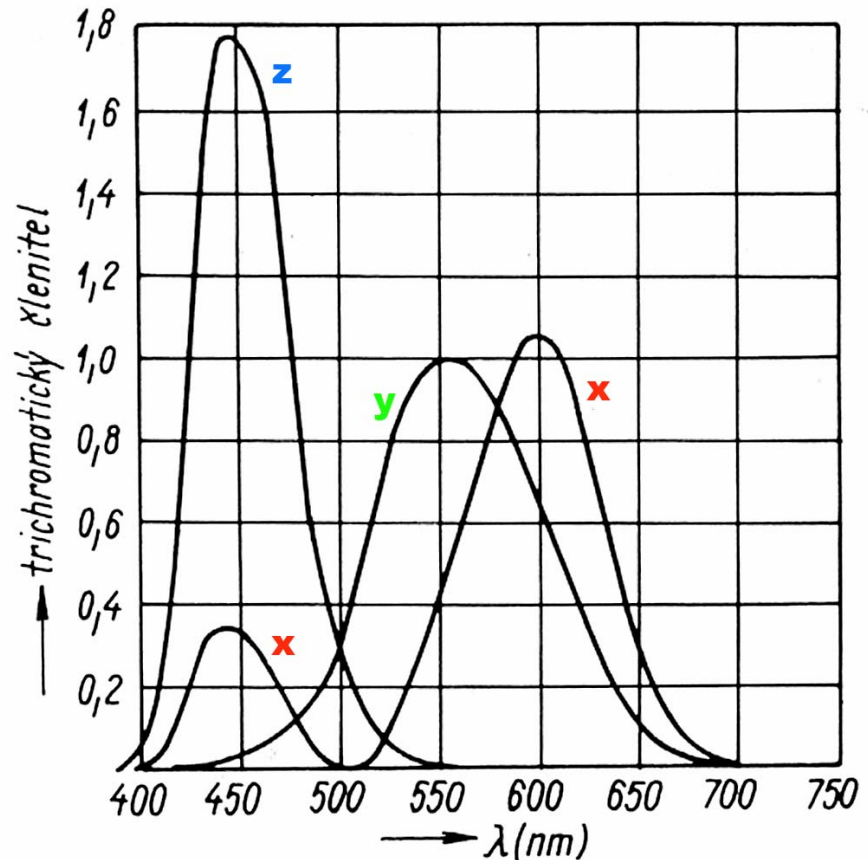
---

- Dvě nebo více monochromatických světel tvoří **směs**, jejíž **barevný tón** je shodný s tónem určitého monochromatického světla, ale **sytost** směsi je vždy menší.
- Směs několika monochromatických světel je **světlo složené**. Světlo složené a světlo monochromatické, která se jeví ve stejném barevném tónu, se označují jako světla **podmíněně podobná (metamerní)**.

# Diagram chromatičnosti CIE

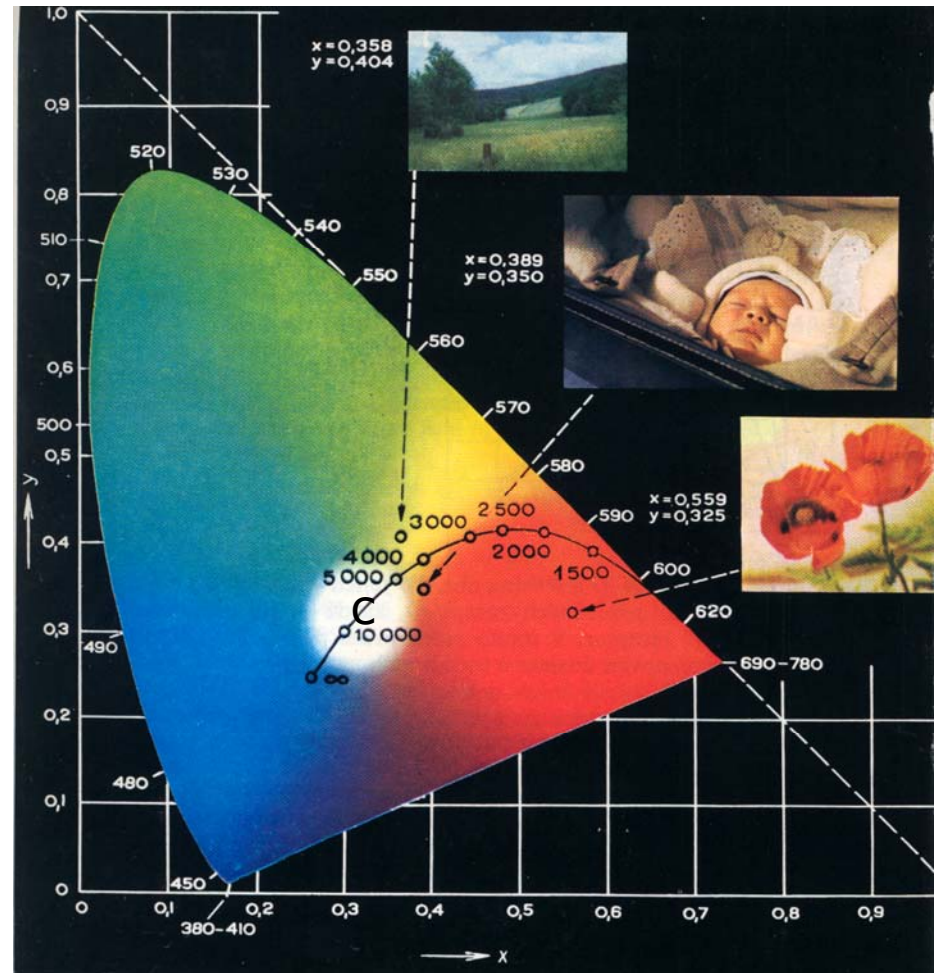
Každý barevný vjem může být způsoben podrážděním každého receptoru zvlášť, použije-li se přiměřená množství světel R,G,B potřebných k jeho vyvolání. Potřebná množství zvoleného červeného, zeleného a modrého světla se určují podle grafu trichromatických činitelů  $x$ ,  $y$ ,  $z$  pro které platí  $x+y+z = 1$ . Pro charakterizování barevného tónu tedy stačí dvě hodnoty,

$$z = 1 - (x+y)$$



# Diagram chromatičnosti CIE

Obvod podkovy vyznačuje polohu monochromatických (**sytých**) světél, souřadnice  $x=y=0,33$  určují polohu bílého světla (C), tedy barev **nepestrých** (bílá, šedá černá). Křivka uvnitř plochy je tzv. čára **teplotních zářičů**. Konce podkovy spojuje přímka, vyznačující polohu směsí fialového a červeného světla (purpurové barvy nespektrální). Celkem na podkově je rozlišeno 150, na přímce 30, celkem 180 tónů **barev pestrých**.





# Vlastnosti CIE diagramu

---

- všechny viditelné barvy jsou uvnitř podkovy
- intenzita (světlost) barev je ignorována, dvě barvy se shodným tónem a sytostí se promítají do stejného bodu diagramu
- spektrální (monochromatické) barvy leží na křivkovém okraji podkovy
- úsečka mezi modrou a červenou barvou je „purpurová čára“
- bod C je „bílý bod“
- protože  $xy$ -rovina je projekcí lineárního prostoru (barevného prostoru), lze také skládat barvy lineárně na CIE-diagramu
- *komplementární barvy* jsou barvy, jejichž kombinací složíme bílou
- dominantní vlnovou délku barvy nalezneme na polopřímce spojující bílou a testovanou barvu. Je to průsečík s křivkovým okrajem podkovy
- některé barvy nemají dominantní vlnovou délku, ale jejich komplementy ano.

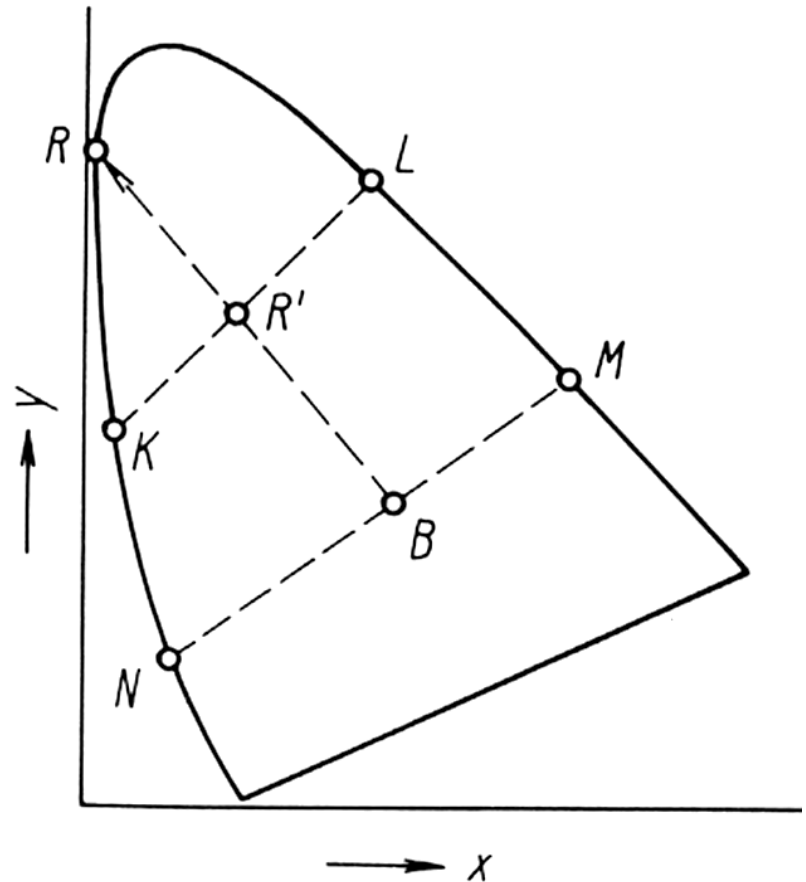
# Vlastnosti CIE diagramu

---

- protože  $xy$ -rovina je projekcí lineárního prostoru (barevného prostoru), lze také skládat barvy lineárně na CIE-diagramu
- *komplementární barvy* jsou barvy, jejichž kombinací složíme bílou
- dominantní vlnovou délku barvy nalezneme na polopřímce spojující bílou a testovanou barvu. Je to průsečík s křivkovým okrajem podkovy
- některé barvy nemají dominantní vlnovou délku, ale jejich komplementy ano.

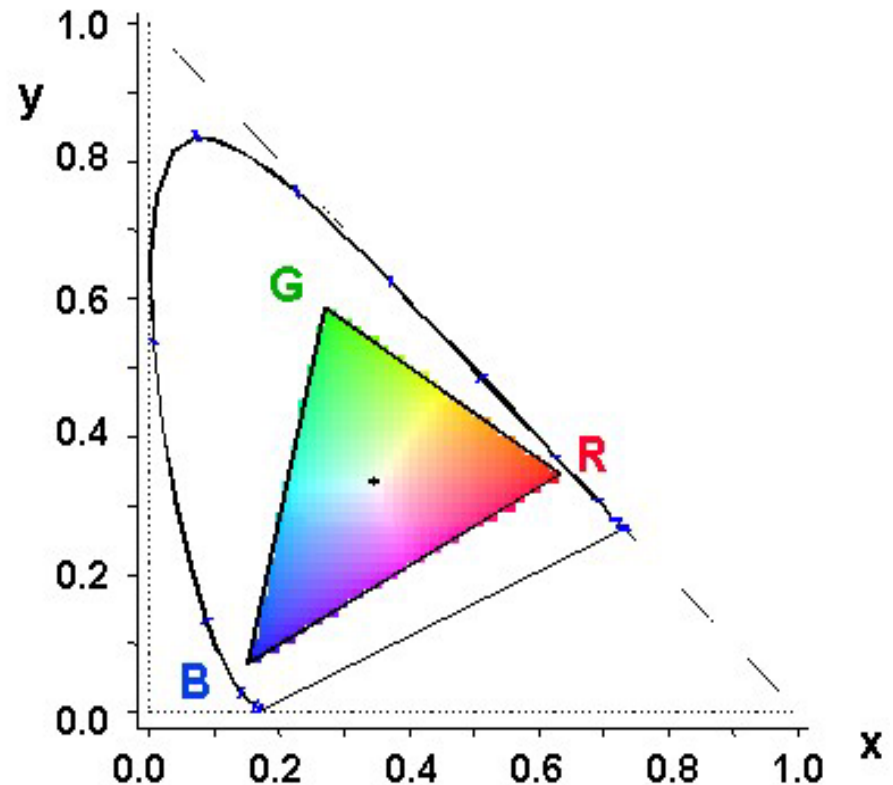
# Vlastnosti CIE diagramu

- Směs světel K a L leží na spojnici KL. **Barevný tón** odpovídající směsi např. v  $R'$  odpovídá průsečíku spojnice  $R'$  a B s podkovou. Směs dvou spektrálních světel je vždy **méně sytá** než základní složky.
- Barvy dávající smísením bílou (M, N) jsou **doplňkové**.



# Barevná primitiva RGB (monitor)

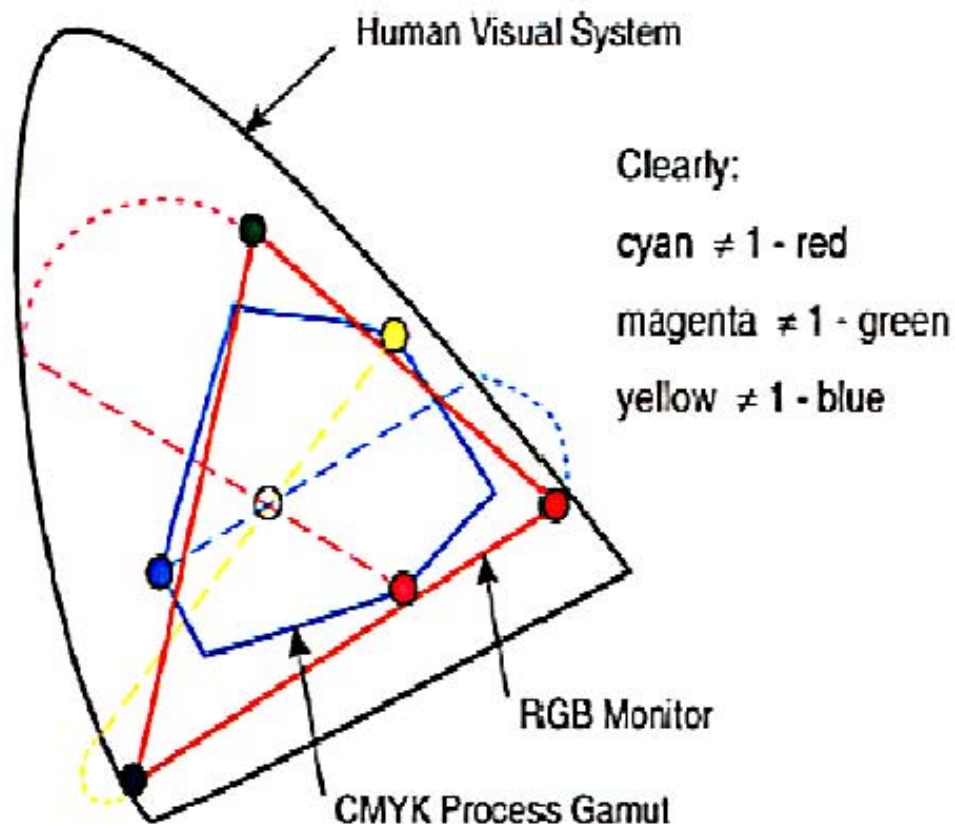
- odpovídají poloze tří typů barevných luminoforů:  
R = [0.635, 0.340], G = [0.305, 0.595], B = [0.155, 0.070]  
bílá W(D6500) = [0.313, 0.329]
- izoenergetická bílá W má souřadnice [1/3, 1/3],
- bílá R podle televizní NTSC normy [0.31, 0.316]



Gamut monitoru

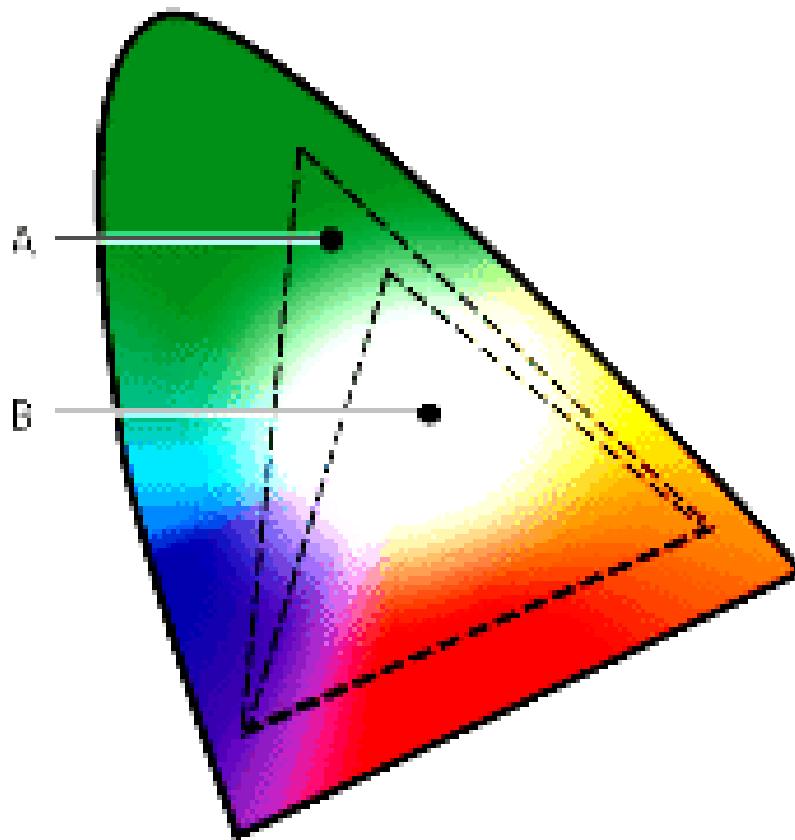
# Gamut RGB monitoru a tisku CMYK

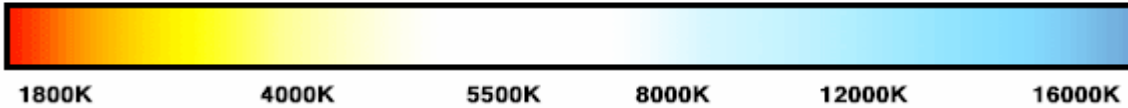
---



# Prostory Adobe RGB (A) a s-RGB (B)

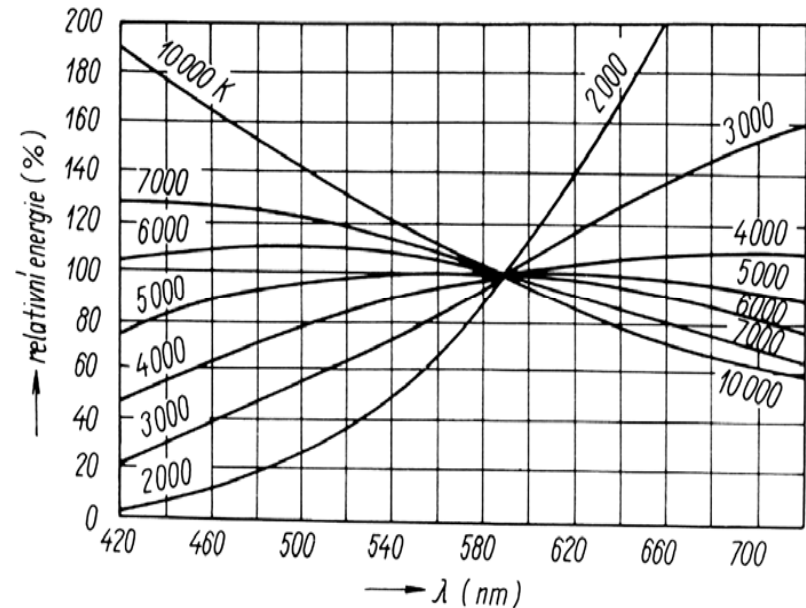
---





# Teplota chromatičnosti

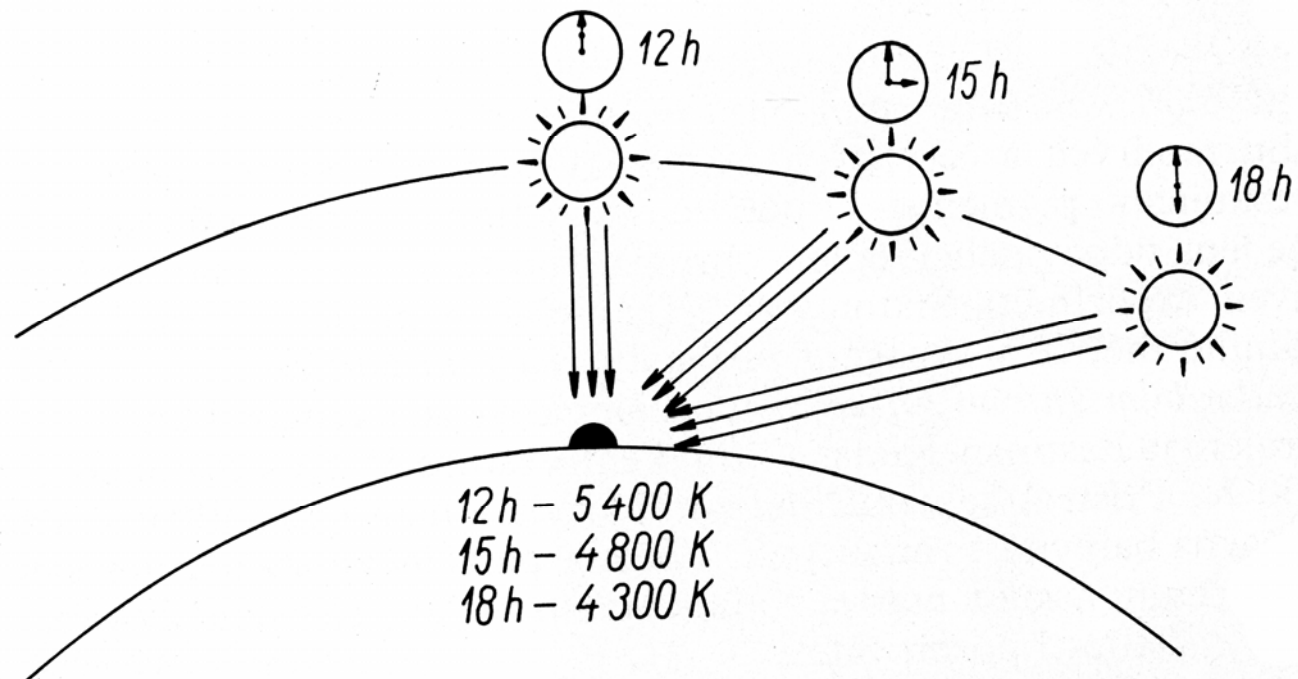
- Barevná teplota charakterizuje spektrum bílého světla. Světlo určité barevné teploty má barvu tepelného záření vydávané černým tělesem, zahřátým na tuto teplotu.
- Člověk své vnímání barev přizpůsobuje světlu – bílý papír vnímá jako bílý, i když je vlivem osvětlení zabarvený. Fotoaparáty a kamery se naproti tomu musí na barevnou teplotu nastavovat
- Filmový materiál je naproti tomu většinou kalibrován na denní světlo, a barevné tónování se upravuje buď speciálními filtry



Rozložení energie ve spektru absolutně černého tělesa

# Teplota chromatičnosti

- Vliv různé polohy slunce během dne na teplotu chromatičnosti





# Konverzní filtry

---

- „Bílé světlo“ může mít tedy různý odstín. Barevné materiály jsou vyváženy buď pro „denní“ světlo (cca 5500 K) nebo „umělé“ (cca 3200 K, označení T – tungstram).
- Pro korekce teploty chromatičnosti se používají konverzní filtry načervenalé (snižují teplotu chromatičnosti) nebo namodralé (zvyšují teplotu chromatičnosti).
- Pro měření teploty chromatičnosti se vyrábějí tzv. colortestery které měří poměr intenzit modré a červené složky světla, příp. třípásmové, měřící poměry R:G:B.

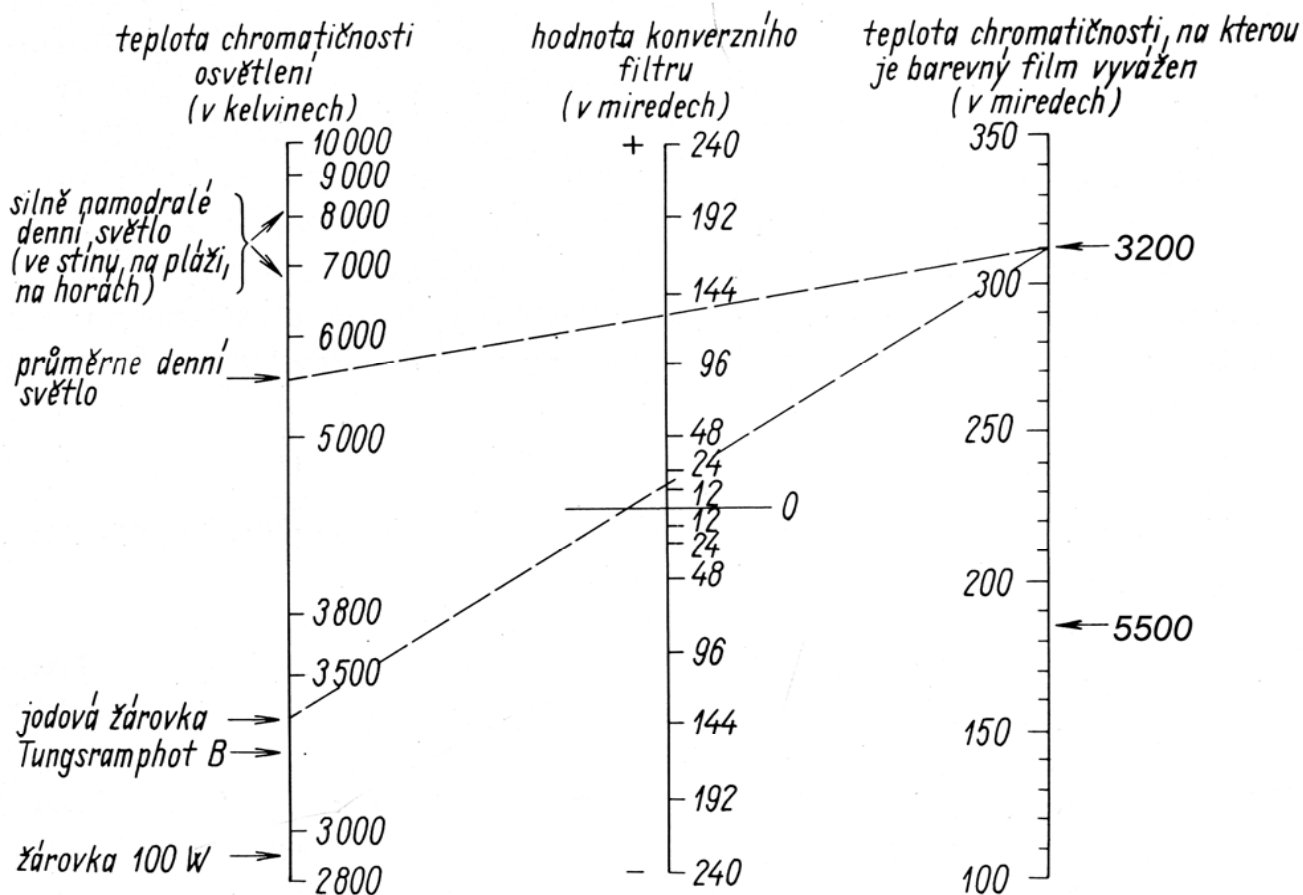
# Hodnoty mired

---

- Konverzní filtry jsou vyráběny v sadách a jejich převodní hodnoty se udávají v **mired** (*micro reciprocal degree*):  
$$a = 10^6 / T$$

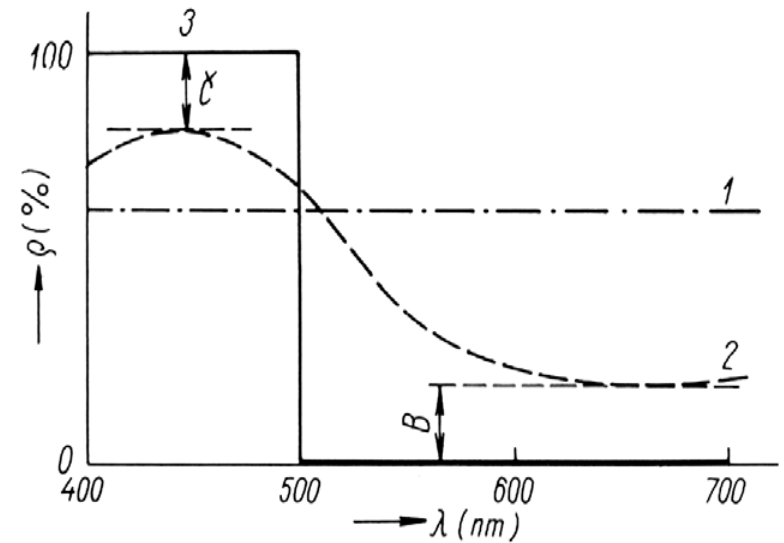
v podstatě reciproké teploty chromatičnosti.
- Výhodou je, že stejné diference v miredech odpovídají stejným diferencím v barvě vnímané lidským okem. Prakticky se používá jednotka 10x větší **dekamired**. V dekamiredech jsou nastavovány i barevné korekce u digitálních přístrojů (obvykle vyšší kategorie)

# Příklad nomogramu pro konverzní filtry



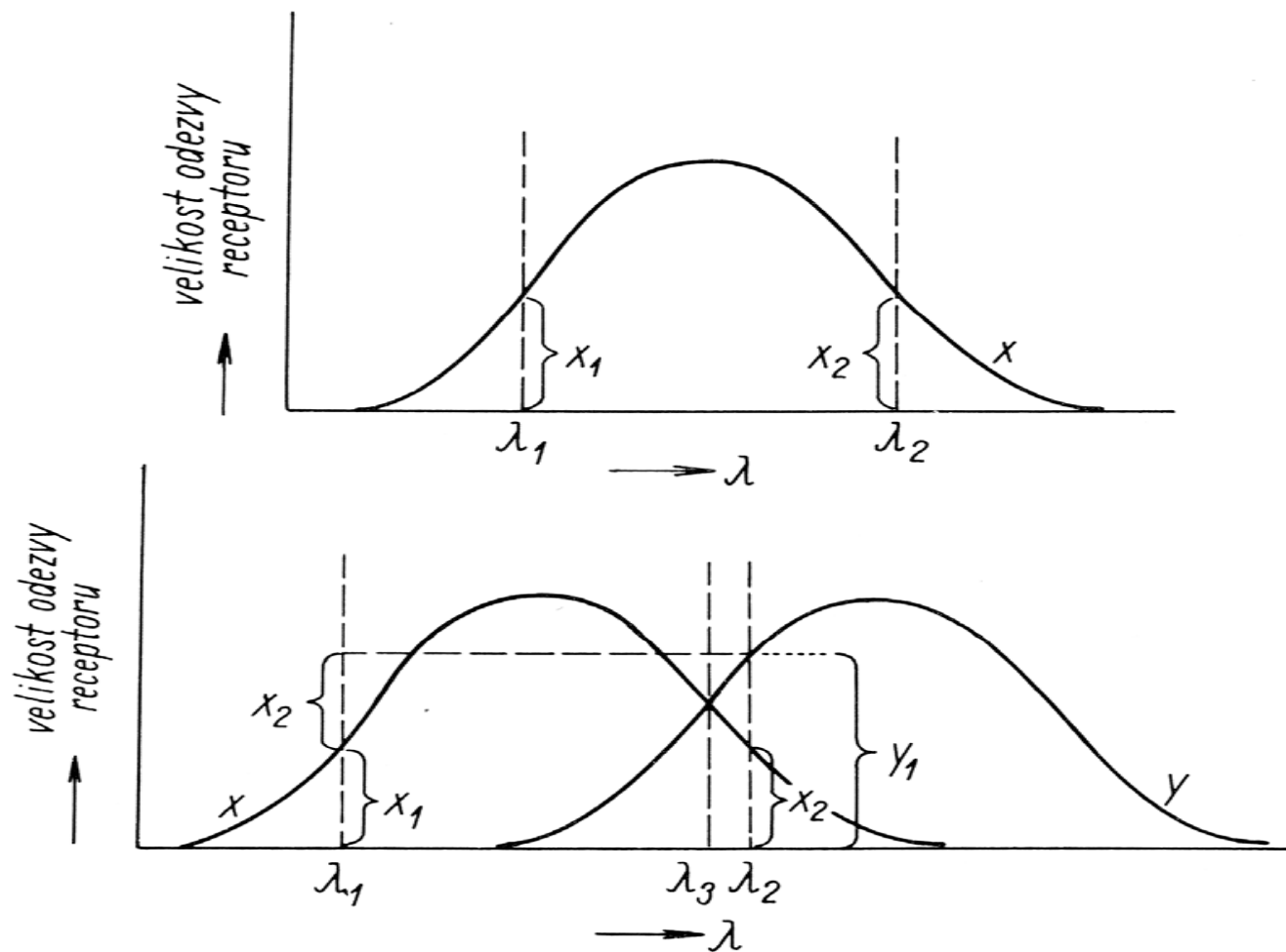
# Barvy předmětů

- Ideální šedá plocha (1)
- Ideální modrá plocha (3)
- Skutečná modrá plocha (2) vykazuje ve srovnání s ideální příměs černé (Č) a bílé (B) barvy



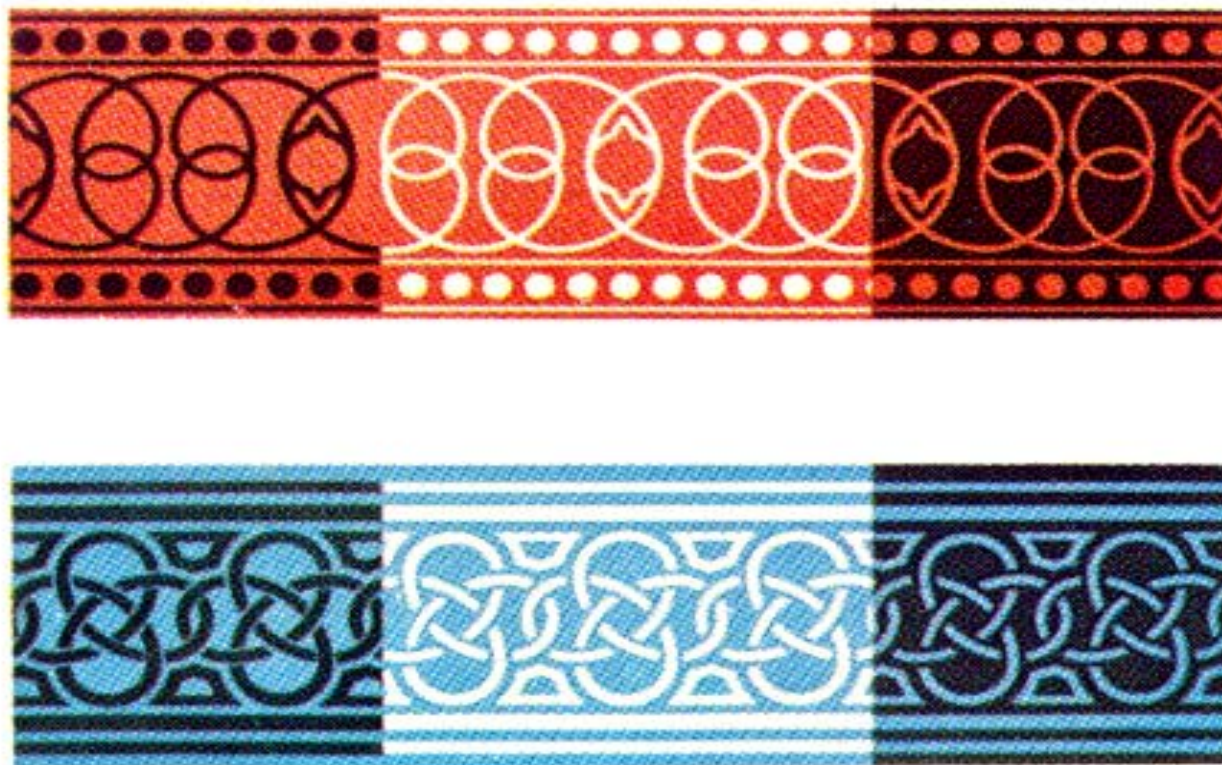
Spektrální reflektance ideálních a skutečných povrchových barev

# Sčítání podnětů



# Soudobý kontrast

---

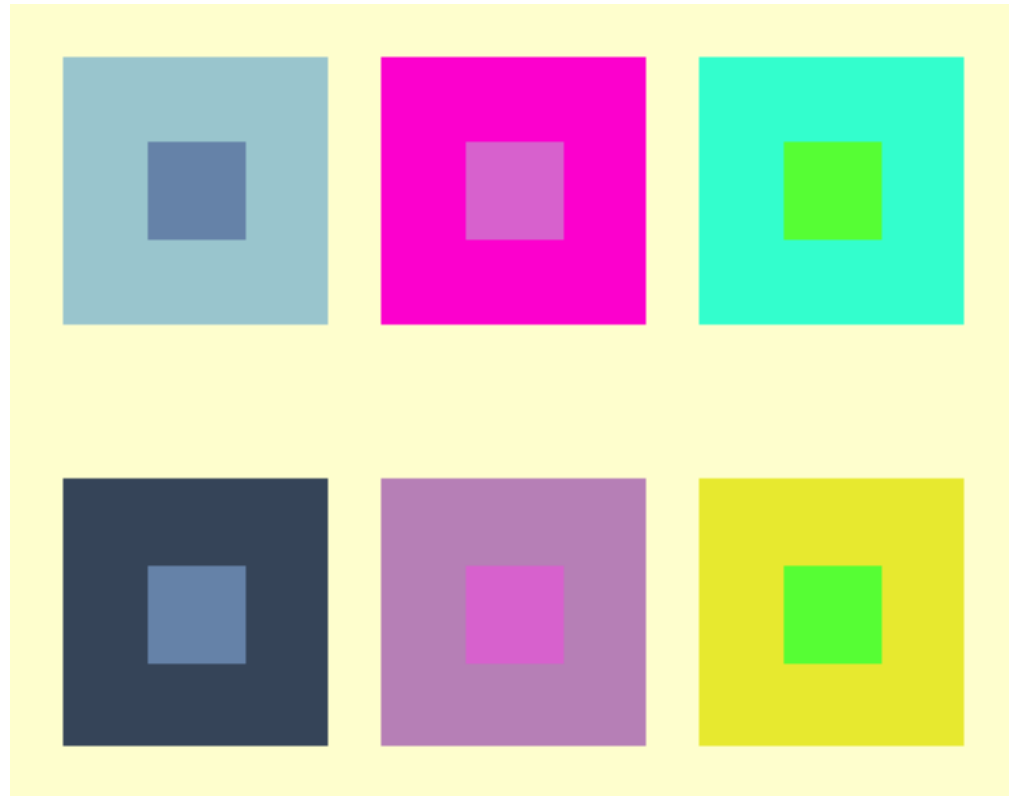


Vliv sousedství černé a bílé na zdánlivou světlost a sytost barvy (podle Evanse)

# Simultánní kontrast

---

- Velké čtverce v dvojici nad sebou se navzájem barevně liší jasem (vlevo), saturací (uprostřed) a barevným tónem (vpravo). Dvojice malých čtverců v jejich středu má vždy přesně tutéž barvu, nicméně kontrast s velkým čtvercem způsobuje, že vypadají, jako by jejich jas (vlevo), saturace (uprostřed) nebo barevný tón (vpravo) byly různé.



# Machovy pruhy

---

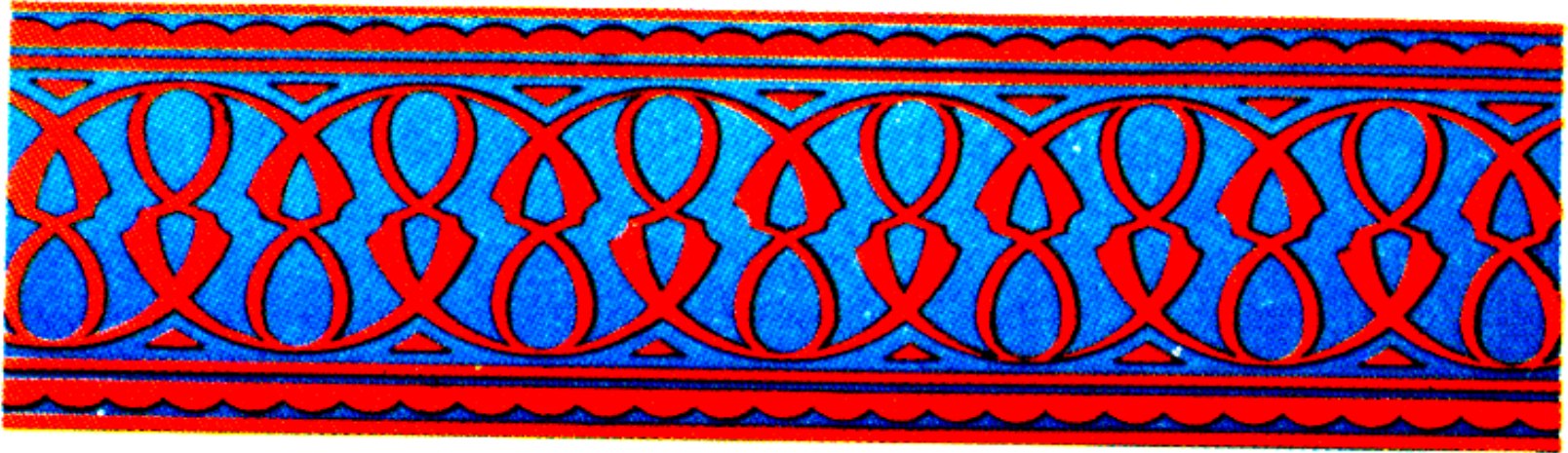


- Kontrast podél náhlých přechodů (hran) se oku jeví větší, než ve skutečnosti je. Díky tomuto efektu vypadá levá strana každého pruhu světlejší než pravá, ačkoli celý pruh je ve skutečnosti stejně tmavý.



# „Přecházení zraku“

---

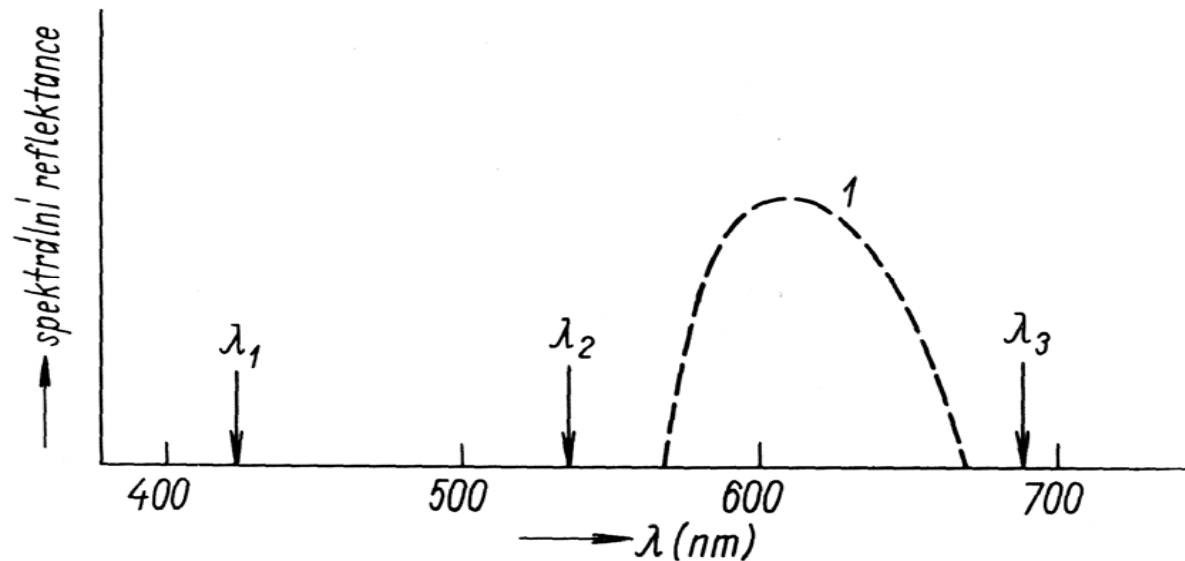


Rozhraní červené a modré barvy se jeví jako neklidné (podle Evanse). Je to způsobeno přestřováním oční čočky podle ohniska příslušné barvy – barevná vada oční čočky

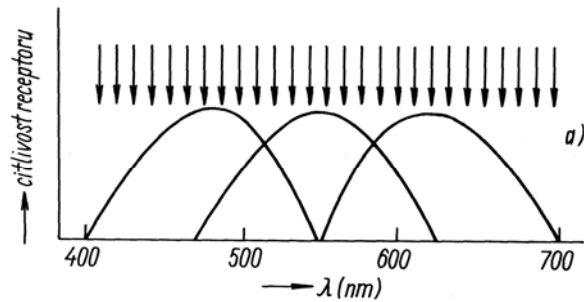
# Vliv spektrálního složení světla

---

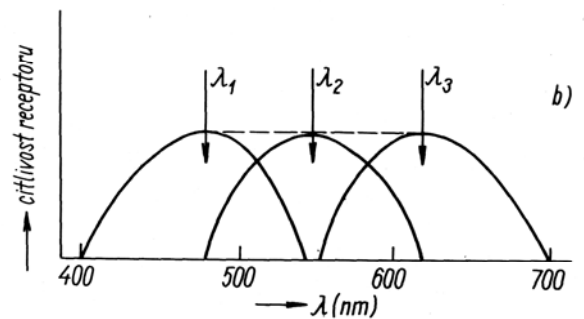
- Křivka spektrální reflektance plochy, která se jeví ve světle složeném z vlnových délek  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  jako černá



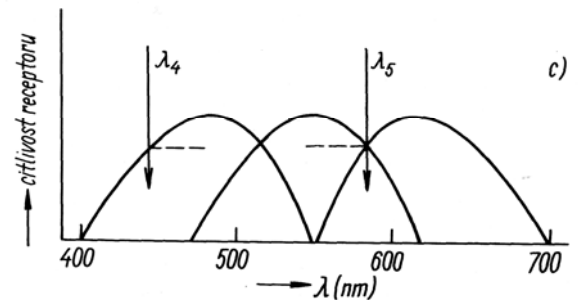
# Vjem bílého světla



a) světlo zahrnuje všechny vlnové délky



b) světlo zahrnuje jen tři vlnové délky  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$



c) světlo zahrnuje jen dvě vlnové délky  $\lambda_4, \lambda_5$ .

□ Ve všech třech případech se světlo jeví oku jako bílé!

# Vliv složení světla na podání barev

- Na horním snímku je scéna osvětlena světlem se spojitým spektrem (žárovka)
- Na dolním snímku je scéna osvětlena směsí monochromatického červeného a modrozeleného světla, které se jeví oku jako bílé



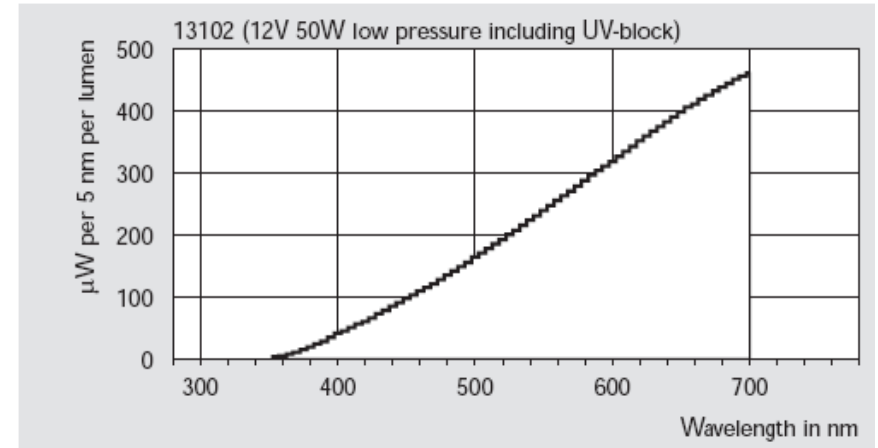
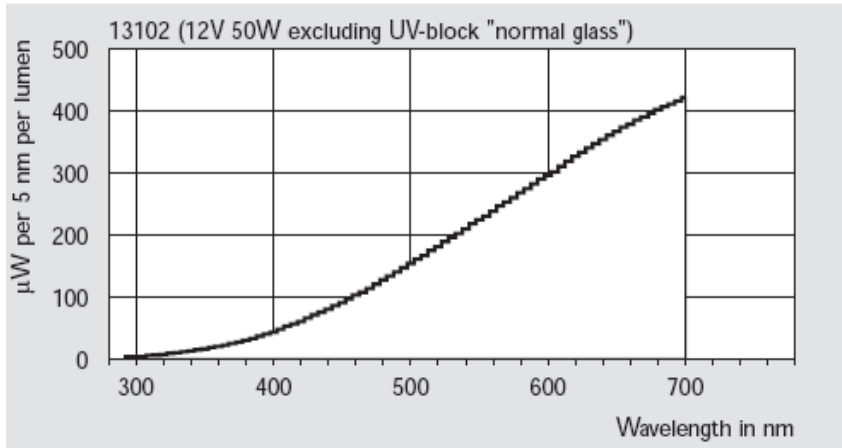
# Světelné zdroje

---

- **Přirozené zdroje světla** mají spojité spektrum, základem je sluneční světlo v našich zeměpisných šířkách o teplotě chromatičnosti 5500K, (nad atmosférou Země 6565K). Slouží jako srovnávací standard bílého světla. Ve stínu dosahuje při modré obloze až 12000K (ve stínu při sytě modré obloze na horách), při zatažené obloze 6000-8000K.
- **Umělé světelné zdroje** mají často velmi složitý průběh spektra a je možné posuzovat pouze přibližně odpovídající teplotu chromatičnosti. Proto jsou zavedeny pojmy Colour Rendering (Ra) – podání barev ve srovnání se standardním osvětlením a
- **CRI - Colour Rendering Index (činitel věrnosti barvy,** rozsah 0-100) je mezinárodní systém pro popis fyziologického vjemu barvy při osvětlení příslušným světelným zdrojem ve srovnání se slunečním světlem (CRI = 100). Obecněji se používá srovnání i pro zdroje jiné teploty chromatičnosti ve srovnání s příslušným zářením černého tělesa (žárovky CRI = 100)

# Žárovky (CRI = 100)

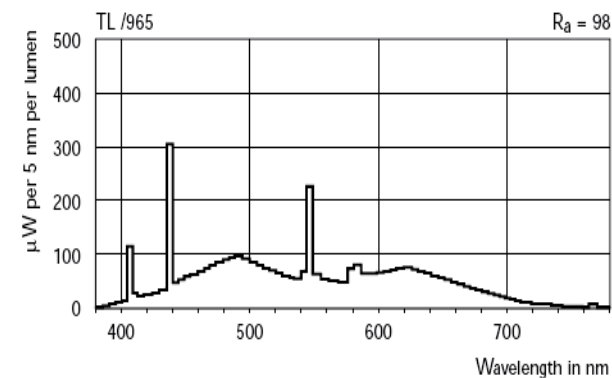
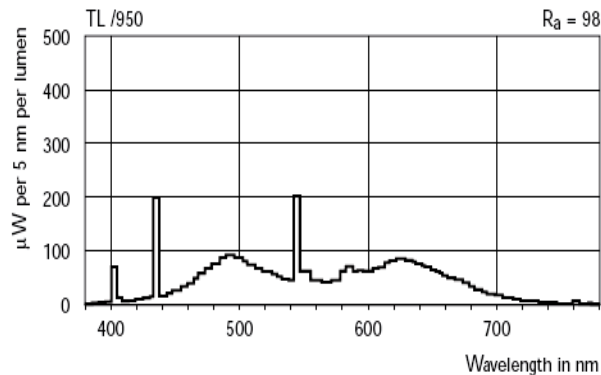
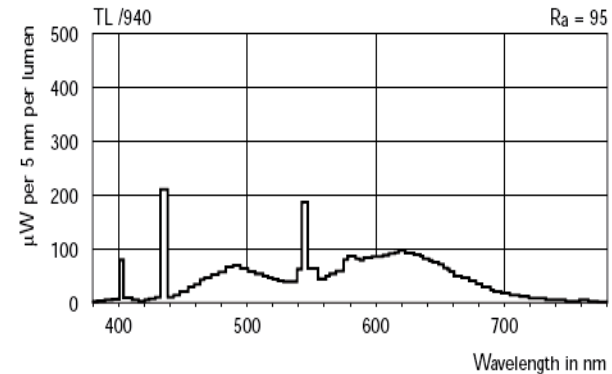
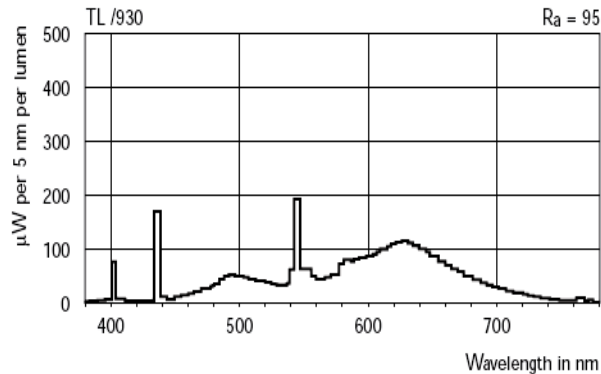
---



Nízkonapěťové halogenové žárovky Philips CAPSULEline Pro  
CRI = 100

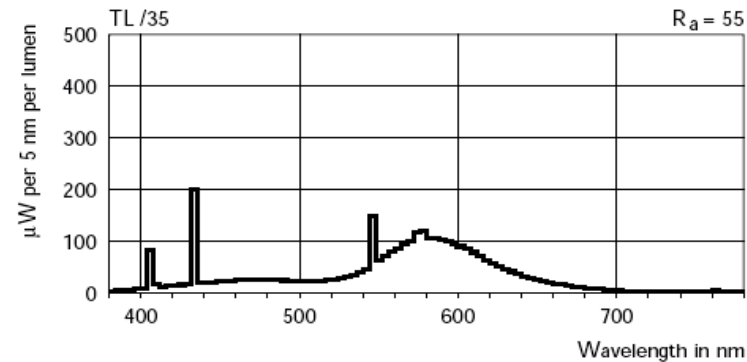
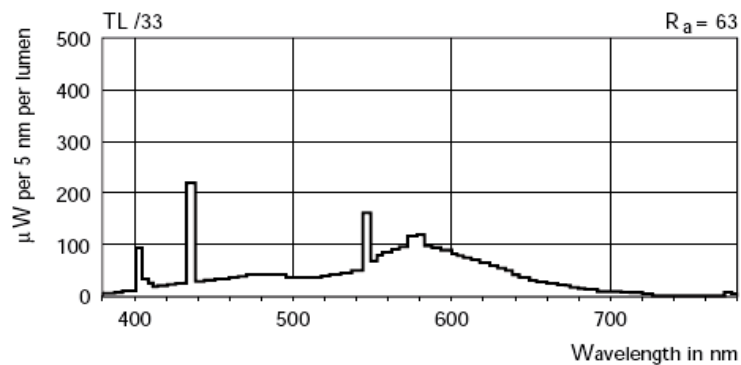
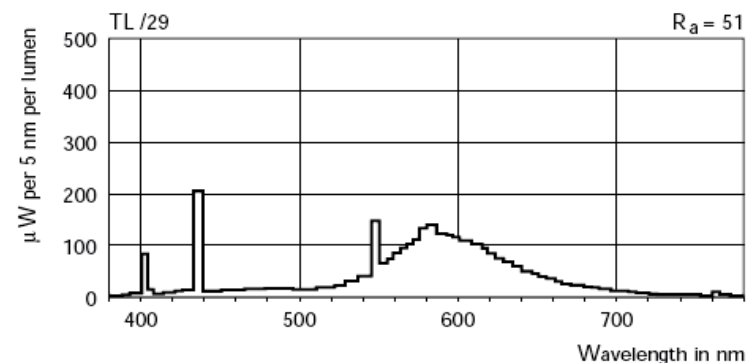
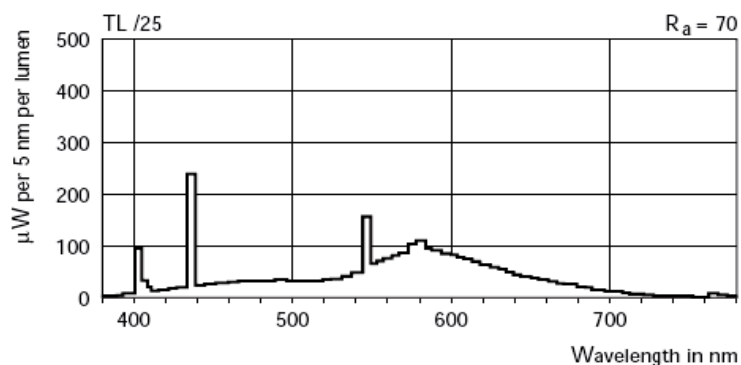
Barevné korekce na teplotu chromatičnosti 5500 K barevné folie  
(např. IFF Florencie, Kodak Rochester)

# Zářivky s vysokým CRI (>90)



Zářivková trubice Philips TL-D 90 de Luxe  
 $T_{chr} = 3000K, 4000K, 5000K, 6500K$

# Zářivky standardní (CRI 50-75)

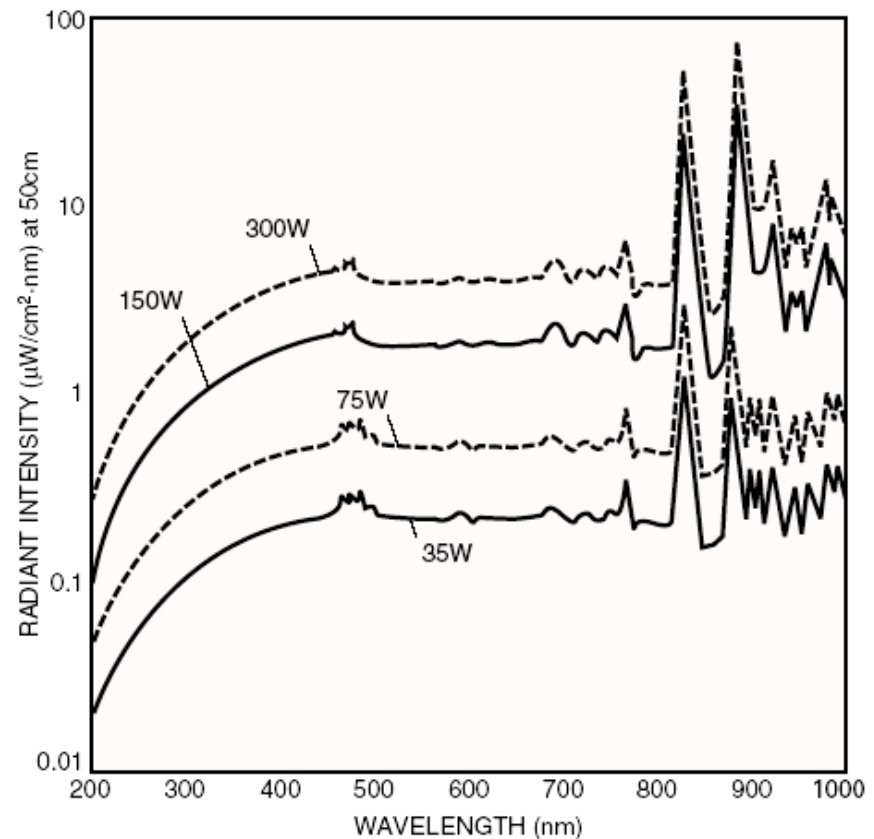


Trubice Philips TL-D Standard colours  
CRI 50 – 70



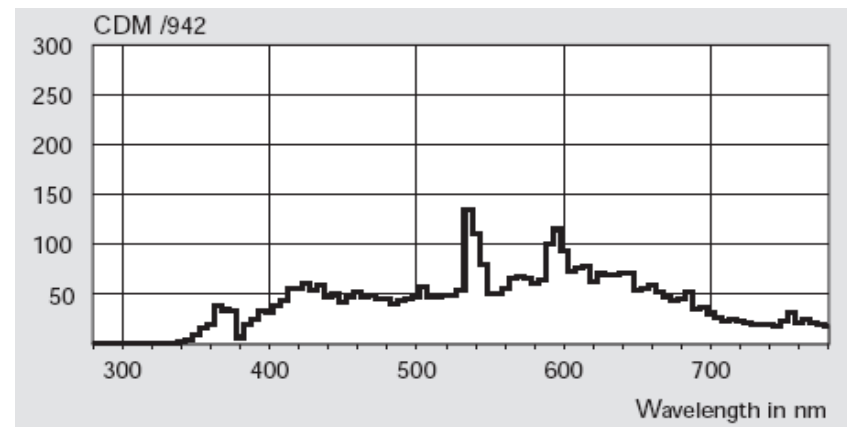
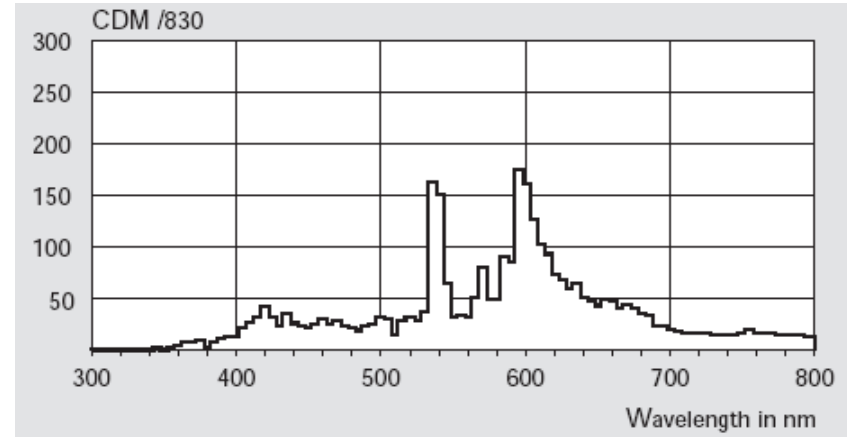
# Xenonové výbojky

- Pulzní bleskové výbojky fotografické mají teplotu chromatičnosti 5500K (korigované žlutým filtrem,  $D \approx 0,1$ ) nebo 6000K bez korekce na čáry Xe v modré oblasti spektra. CRI = 95-100.
- Kontinuální xenonové výbojky (výkony do 20kW) pro projekci filmů a přisvětlení scény při denním světle. CRI = 90-98,  $T_{chr} \approx 5800K$



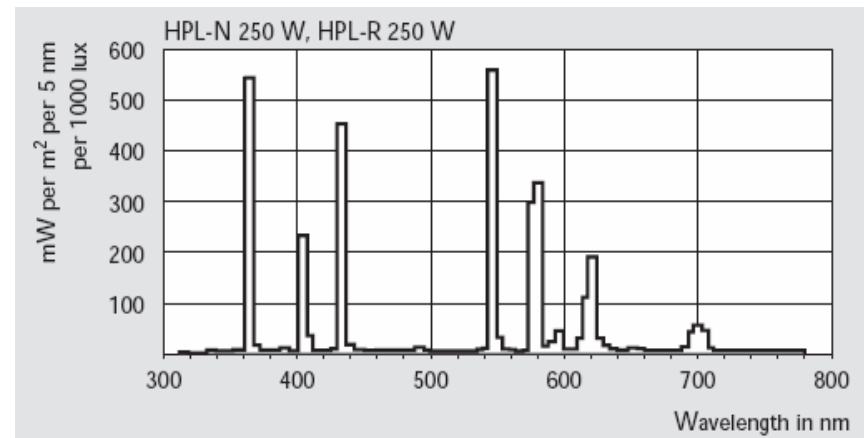
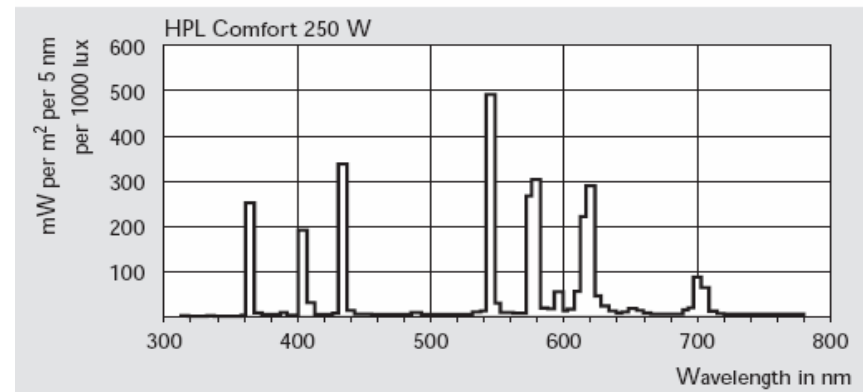
# Vysokotlaké výbojky metalhalidové

- Výbojky s náplní směsí rtuti, halogenidů kovů (převážně vzácných zemin) a argonu, příp. xenonu, hořák je z korundu.
- Příklad výbojky Philips MASTER Colour CDM-T s teplotou chromatičnosti 3000 K (CRI až 85) a 4200 K (CRI až 96)
- Výkonové (až 5000W) mají CRI 55 – 85.



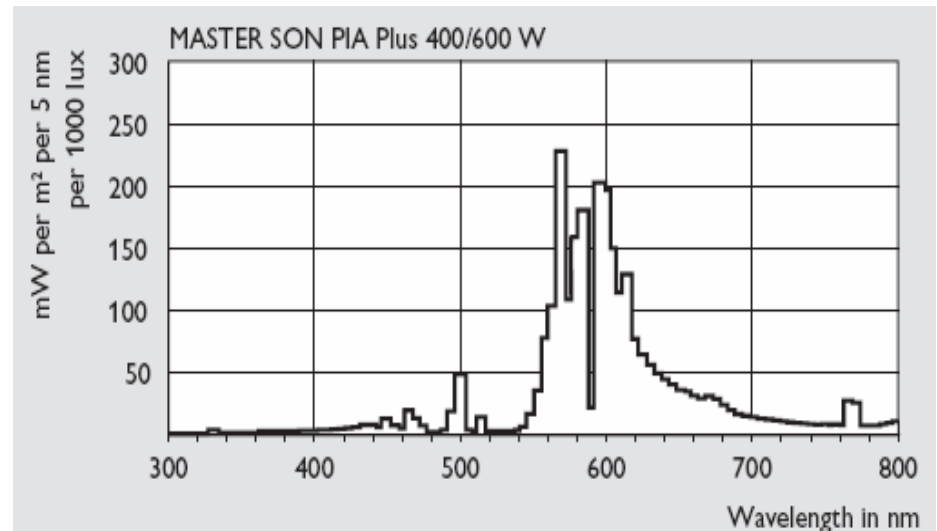
# Vysokotlaké rtuťové výbojky

- Klasické výbojky s křemenným hořákem, produkující čárové spektrum. Zlepšení barevného podání se dosahuje pokrytím vnitřního povrchu ochranné baňky luminoforem. CRI se pohybuje podle typu v rozsahu 30-60.



# Vysokotlaké sodíkové výbojky

- Díky maximu záření v okolí maxima citlivosti lidského oka dosahují nejlepší světelné účinnosti ze všech zdrojů (typ. 150 lm/W). Korelující teplota chromatičnosti je kolem 2000 K. Světlo má ale charakter téměř monochromatického záření. CRI se pohybuje mezi 20–30.



# LED (Light emitting diode ) zdroje

- ❑ Moderní polovodičové zdroje světla. Mají již vysokou účinnost, dlouhou životnost a jsou otřesuvzdorné – důležité pro mobilní zařízení.
- ❑ Spektrální vlastnosti jsou dány složením polovodiče (GaAs, InP, GaAlP, GaN, SiC,...
- ❑ „Bílé“ LED kombinují diodu emitující v modré oblasti spektra s luminoforem příp. s diodou emitující v dlouhovlnné oblasti.

