

BARVA, BAREVNÉ OBRAZY A SPRÁVA BAREV

Václav Hlaváč

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická, katedra kybernetiky
Centrum strojového vnímání

<http://cmp.felk.cvut.cz/~hlavac>, hlavac@fel.cvut.cz

Poděkování: K. Ikeuchi, T. Darrell, T. Muenzer, L. Cerman za inspiraci a některé obrázky.

Osnova přednášky:

- ◆ Barva, souhra tří jevů.
- ◆ Barva, fyzikální podstata.
- ◆ Barva, subjektivní vjem.
- ◆ Barevný trojúhelník.
- ◆ Barevné prostory.
- ◆ Správa barev.

Správa barev, neformálně

- ◆ Správa barev dovolí zajistit, aby sobě odpovídající barvy vypadaly velmi podobně na různých zobrazovacích a tiskových zařízeních.
 - ◆ Správa barev se opírá o způsob, jakým člověk vnímá barvy.
 - ◆ Vnímání barev člověkem je potřebné kvantifikovat a modelovat.
-
- ◆ Nejdříve si vysvětlíme: (a) co je barva, (b) jak ji člověk vnímá a (c) jak se barva kvantifikuje.
 - ◆ Potom budeme moci vysvětlit, jak zajistit věrný přenos barvy mezi zařízeními.

Barva a její využití

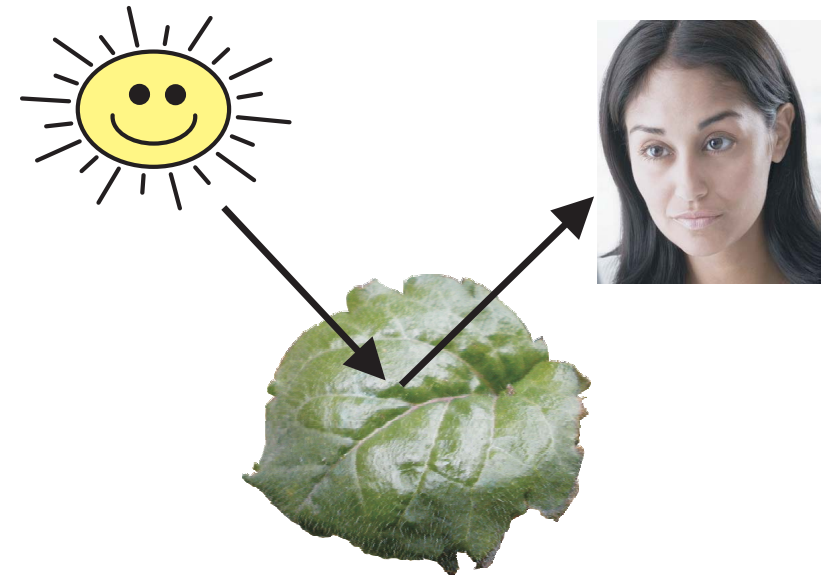
Barva se studuje v několika disciplínách:

- ◆ Fyzika.
- ◆ Lidské vidění. Fyziologie.
- ◆ Psychofyzika, vnímání.
- ◆ Malba, fotografie, film, počítačová grafika.

Barva

Barva popisuje jev vznikající souhrou tří jevů:

- ◆ Barva souvisí s vlastnostmi pozorovaného objektu.
- ◆ Barva souvisí s vlastnostmi světla (osvětlení scény).
- ◆ Barva souvisí s mechanismy vnímání člověkem.



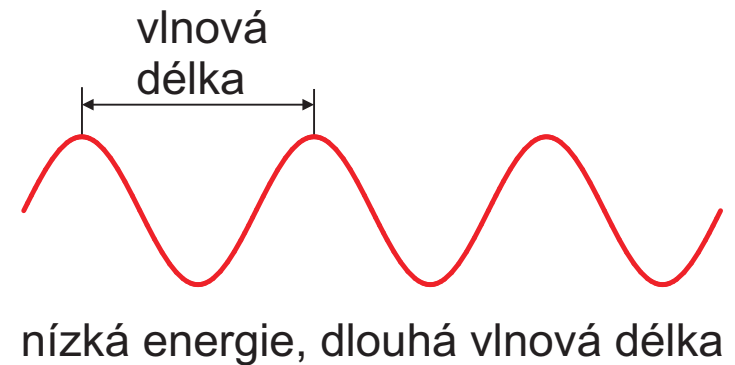
Barva charakterizuje vjem pozorovatele na základě (viditelného) záření původně přicházejícího ze světelného zdroje (směs záření o různých vlnových délkách) a změněného díky vlastnostem pozorovaných objektů.

Subjektivní vnímání barvy

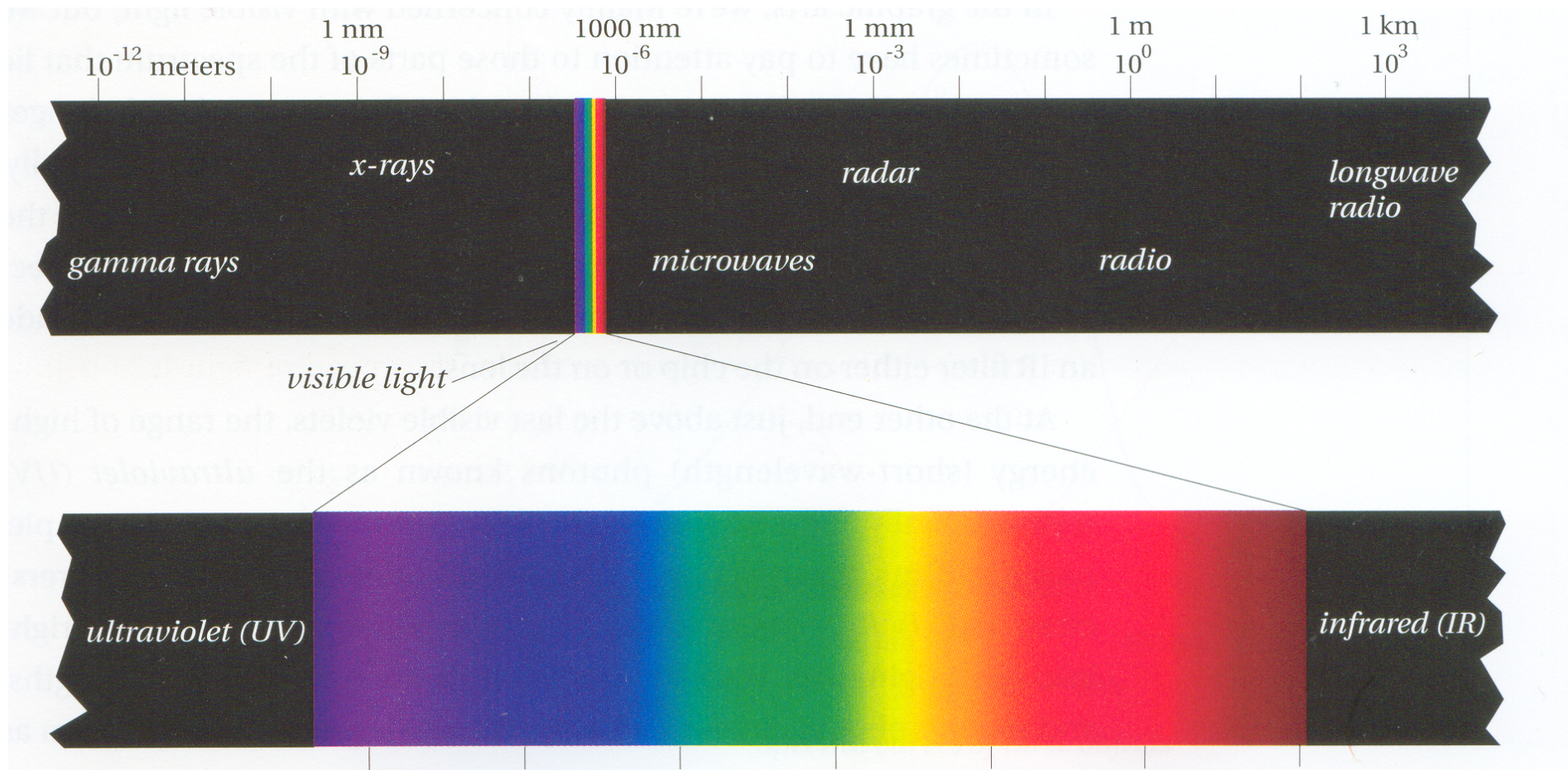
- ◆ Vnímání barvy člověkem přidává subjektivní vrstvu nad objektivní fyzikální pozorování, tj. **intenzitu** a **spektrum** elektromagnetického záření.
- ◆ Barva tedy představuje **psychofyzikální jev**.
- ◆ Sama o sobě barva neexistuje, jde o lidský vjem.

Fotony a vlny

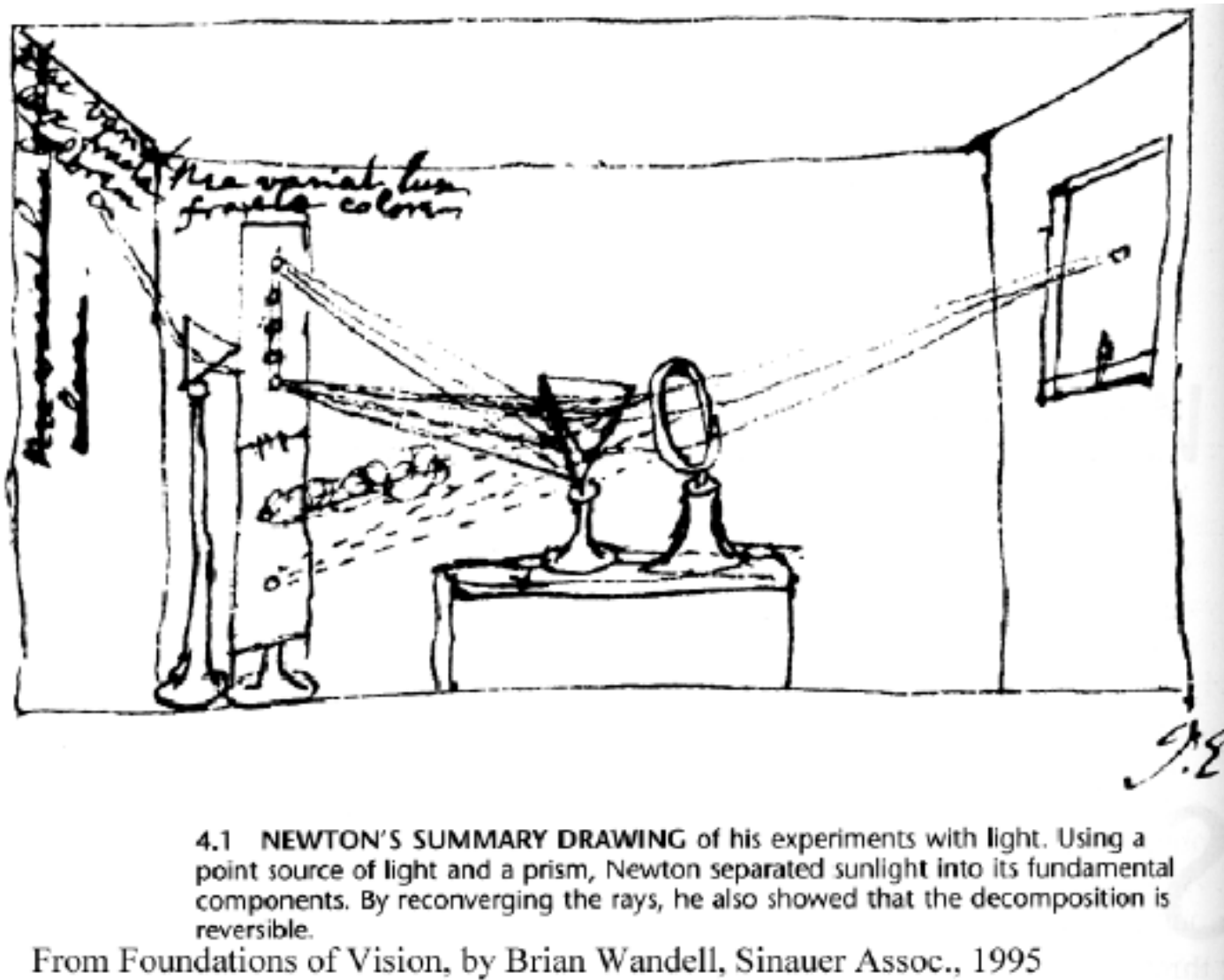
- ◆ Světlo se v některých experimentech chová jako částice (Isaac Newton) a někdy jako vlna (Christian Huygens).
- ◆ Rozpor završila až kvantová mechanika (Max Planck, Albert Einstein) zavedením pojmu foton.
- ◆ Foton si lze představit jako pulsující kvantum energie šířící se prostorem (rychlostí světla ve vakuu).
- ◆ Každý foton nese určitou energii, která určuje, jak rychle foton pulsuje, což odpovídá vlnové délce fotonu.



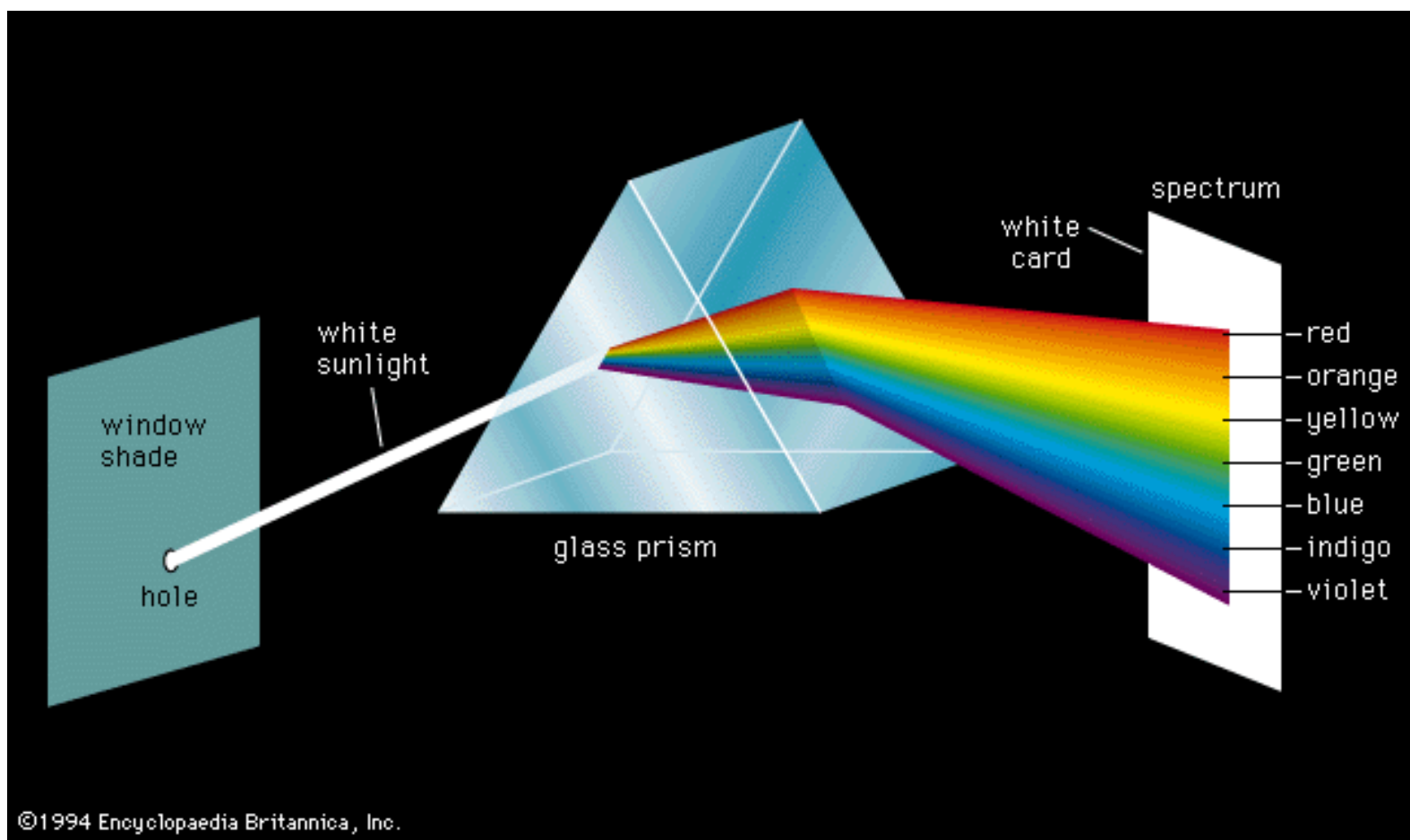
Spektrum záření



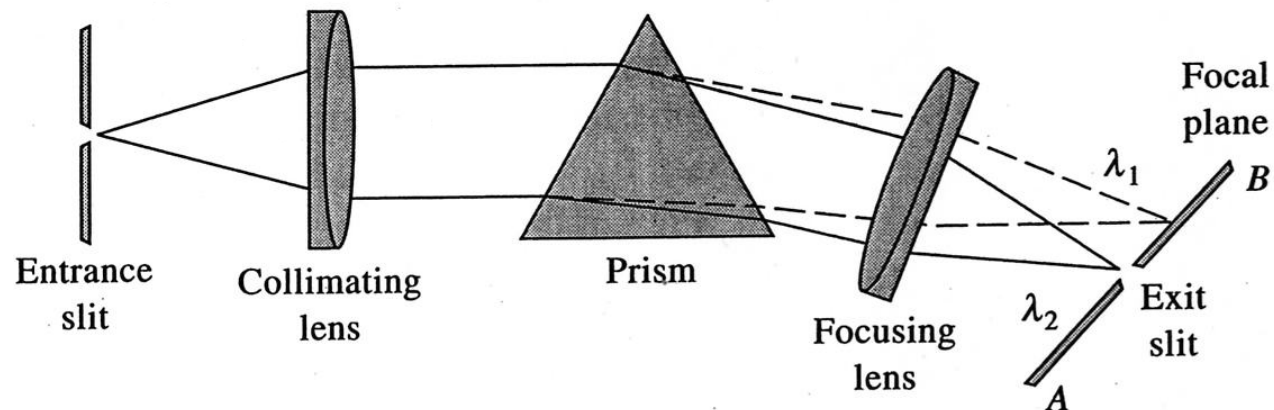
Ze zápisníku Issaca Newtona



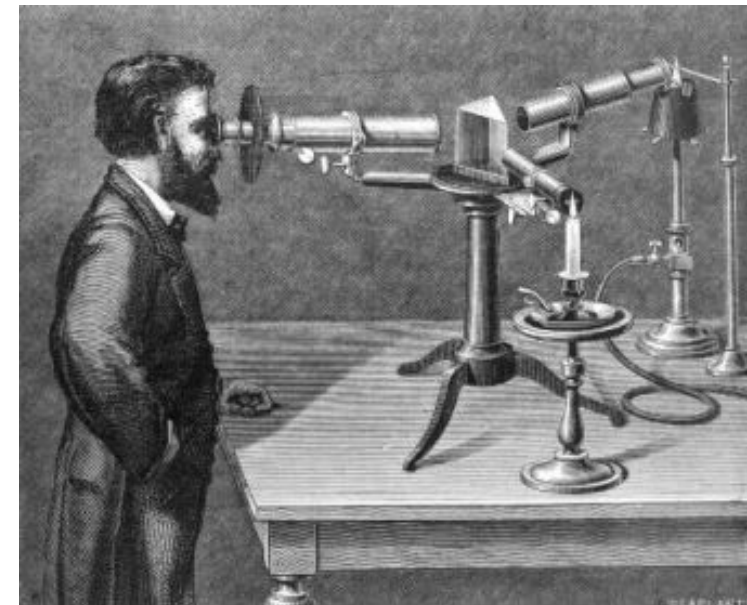
Barevné spektrum



Měření barevného spektra

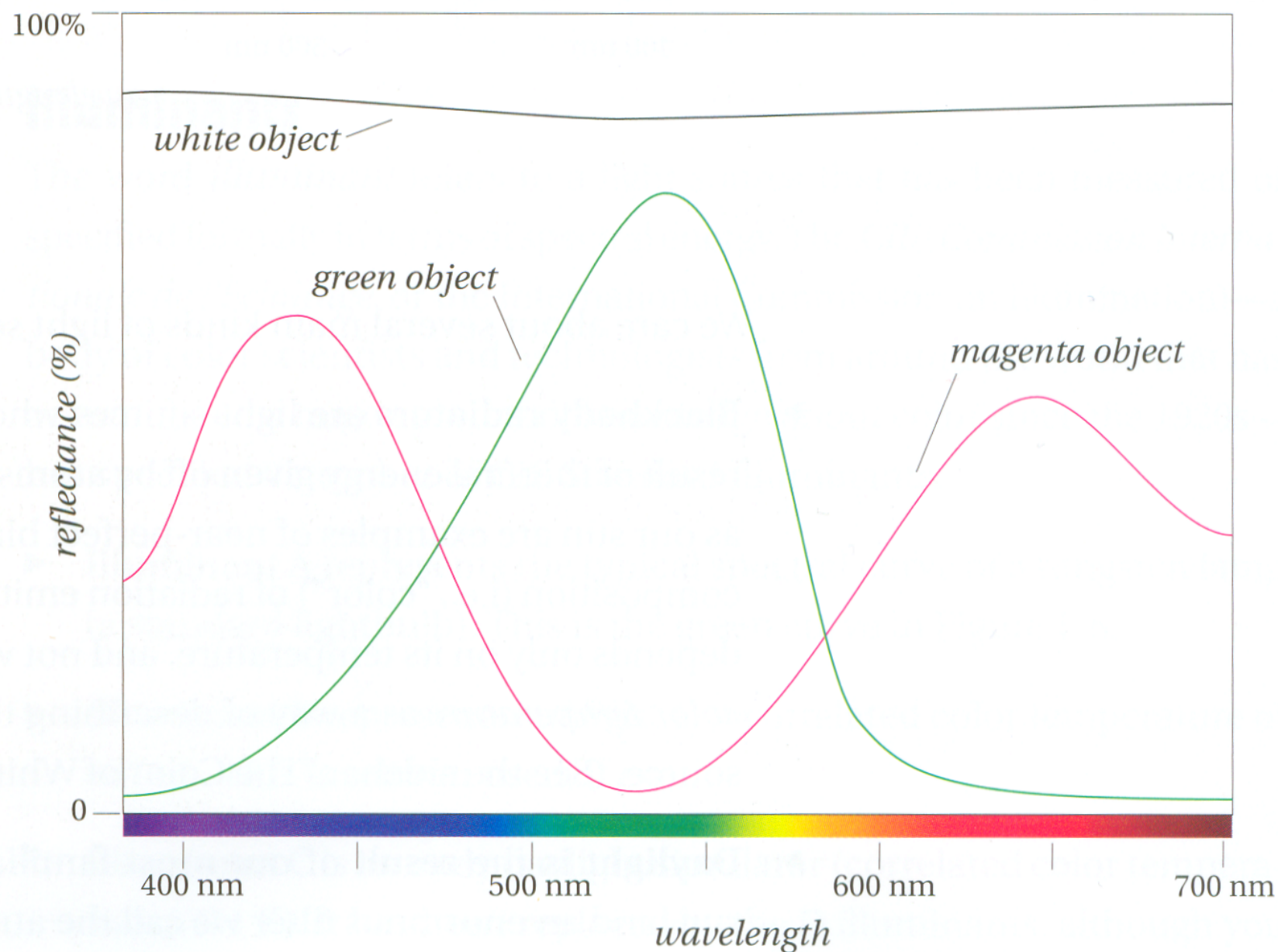


Princip Bunsenova monochromátoru

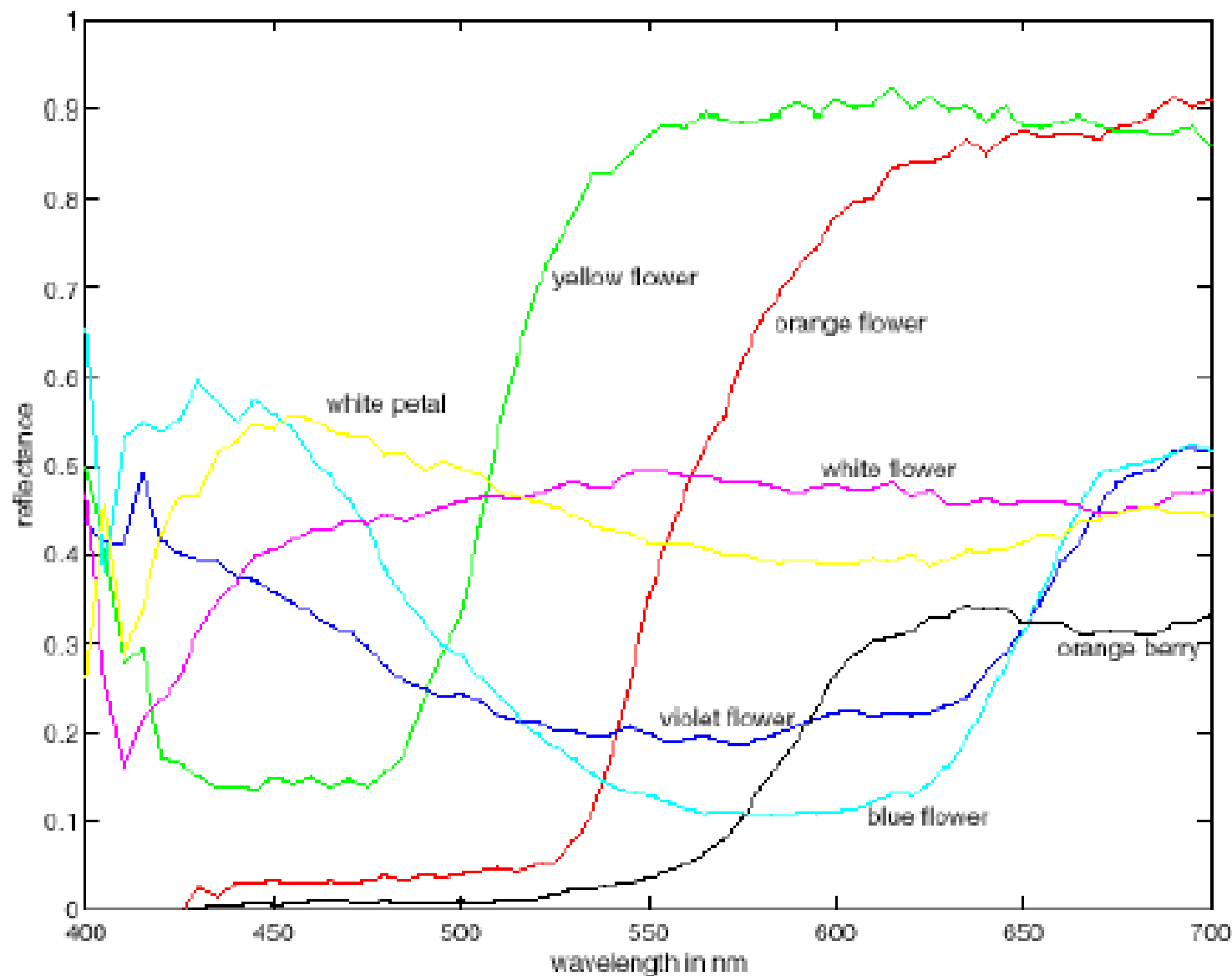


Bunsenův-Kirchhoffův
spektrometr (1859)

Spektrální křivky tří různých objektů



Příklad: spektrální odrazivost květin



Spectral albedoes for several different leaves, with color names attached. Notice that different colours typically have different spectral albedo, but that different spectral albedoes may result in the same perceived color (compare the two whites). Spectral albedoes are typically quite smooth functions. Measurements by E.Koivisto.

Barva z fyzikálního hlediska

- ◆ Světlo = elektromagnetické záření.
- ◆ Obrazové snímače nemají přímý přístup k vlnové délce λ .
Výjimka: monochromátor nebo spektrometr.
- ◆ Odezva senzoru v rozsahu vlnových délek $[\lambda_1, \lambda_2]$

$$s = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} s(\lambda) r(\lambda) d\lambda, \quad \text{kde}$$

$r(\lambda)$ je spektrální citlivost senzoru,

$s(\lambda)$ je spektrum světla.

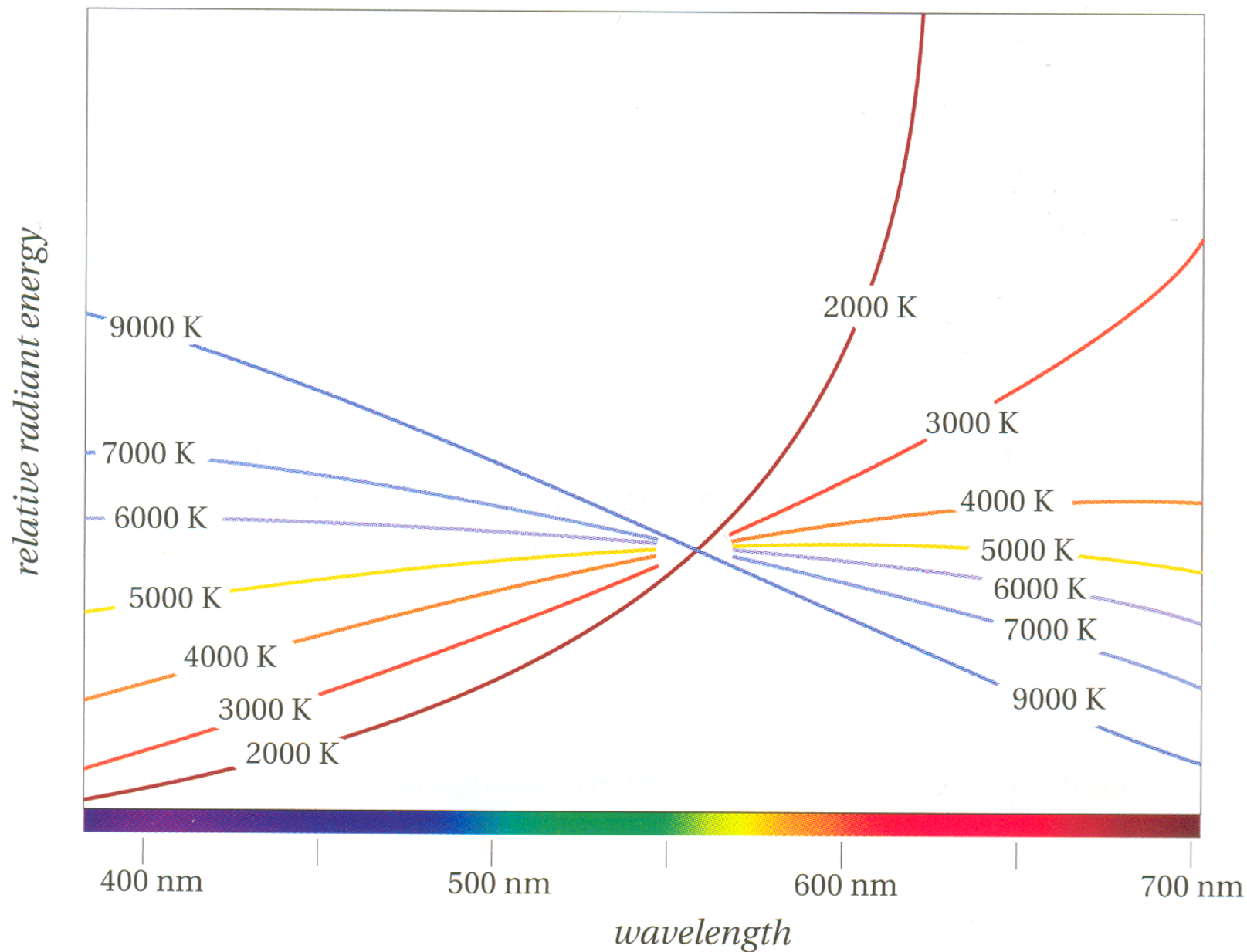
Vliv osvětlení



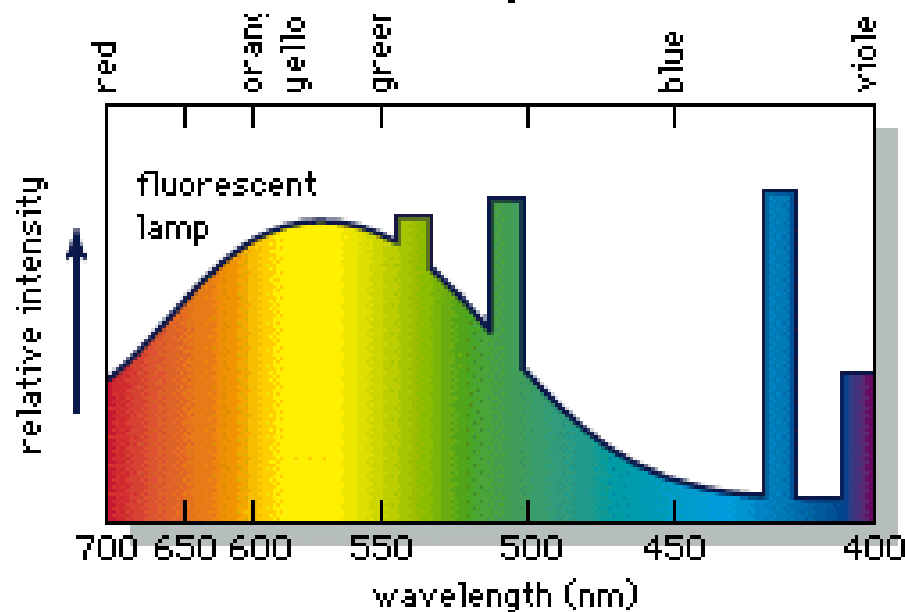
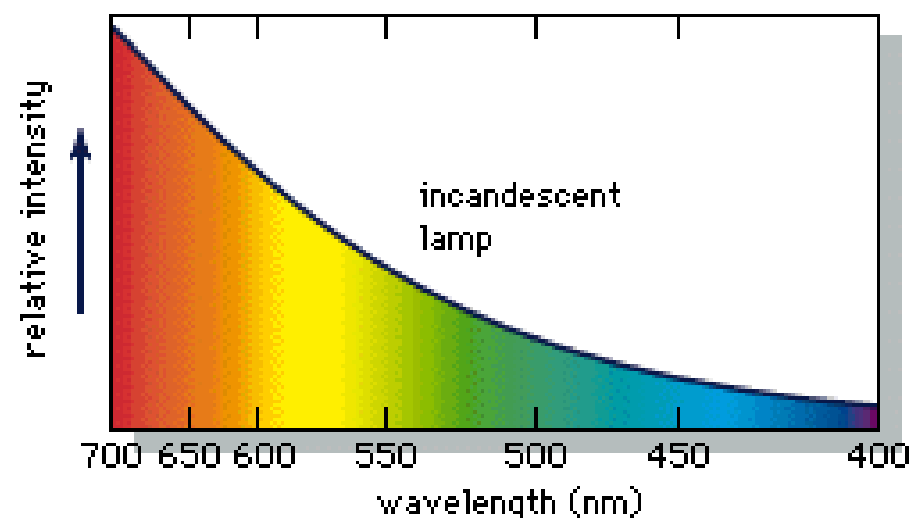
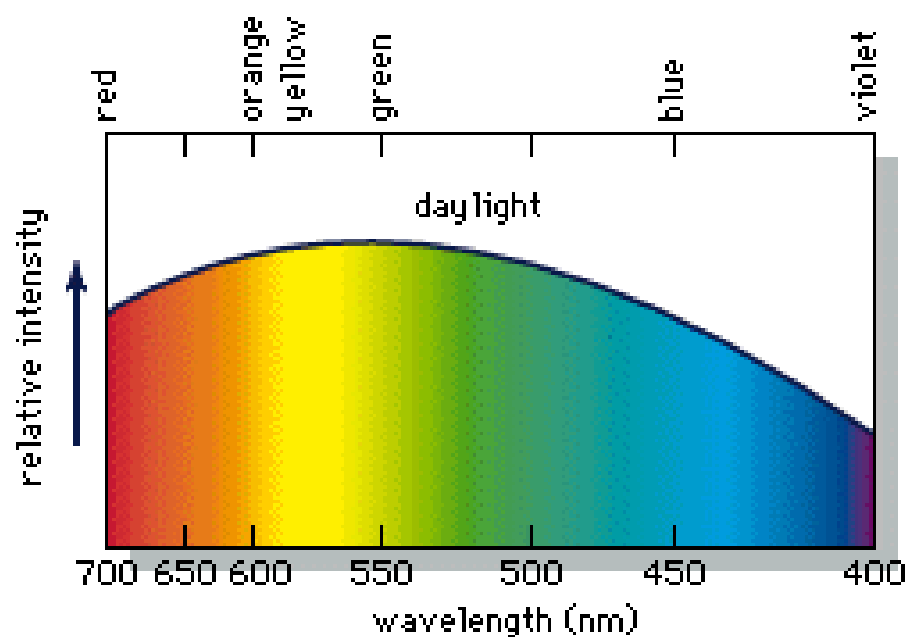
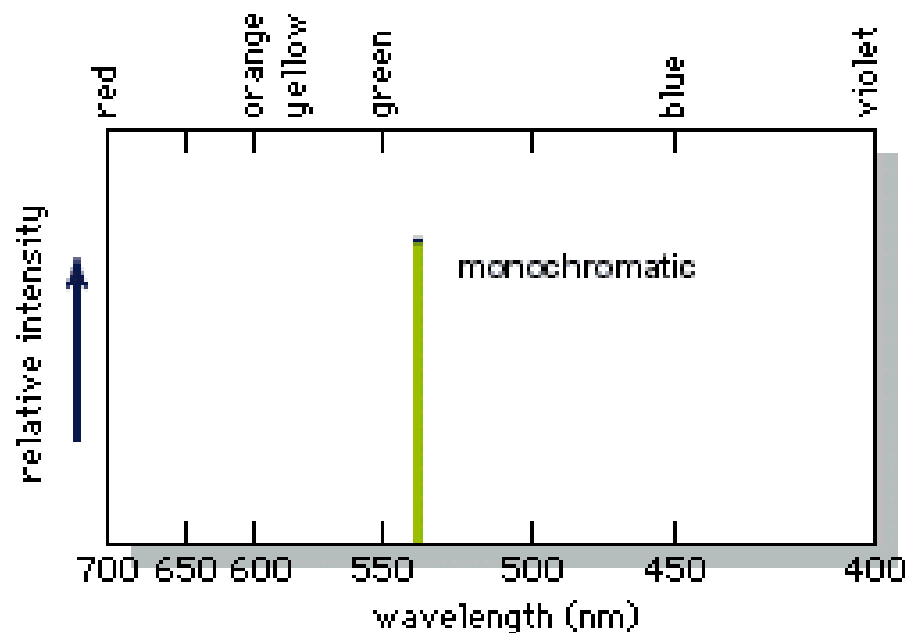
Zdroje světla, fyzikálně

- ◆ **Ideální zářič, černé těleso** – světlo je vyzařováno na základě tepelné energie atomů. Přibližně: žárovka s horkým vláknem, hvězdy, např. Slunce.
Spektrum světla závisí pouze na teplotě $\Rightarrow$ pojem: barevná teplota.
- ◆ **Denní světlo** – záření Slunce (černé těleso) silně filtrované zemskou atmosférou. Pro toto osvětlení se vyvinulo lidské vidění, a proto je důležité pro fotografování.
- ◆ **Elektrická výbojka** (spec. případ zářivka) – plyn (např. rtuť, xenon) excitovaný elektrickým nábojem vysílá světelnou energii. Ve spektru jsou výrazné špičky.
- ◆ **Počítačové monitory** - vakuové, LCD.

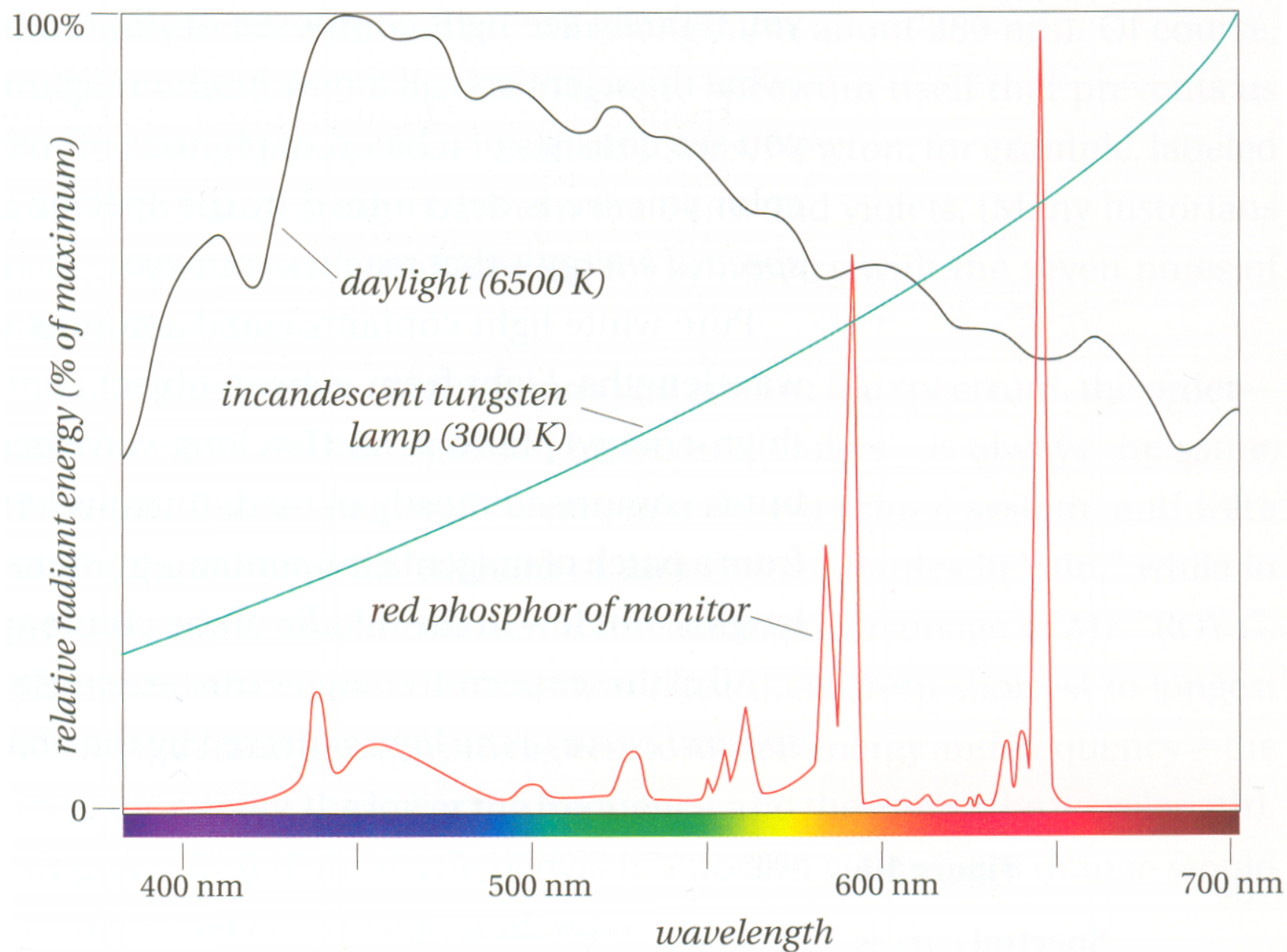
Spektra podle teploty



Spektrum zdrojů světla, kvalitativně



Změřená spektra zdrojů světla

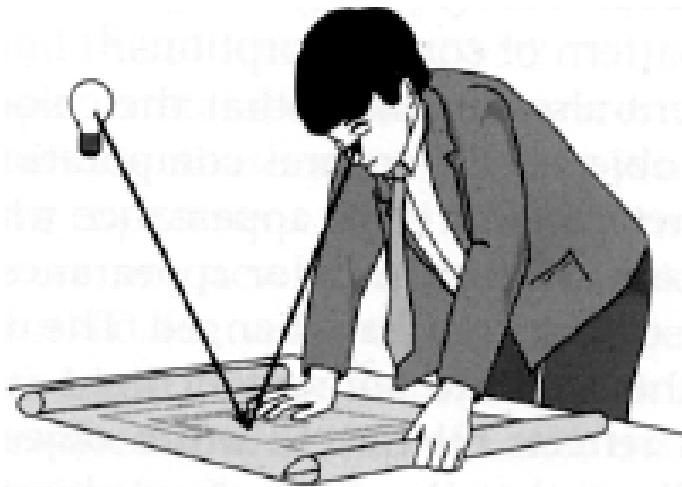


Normalizované osvětlovače podle CIE

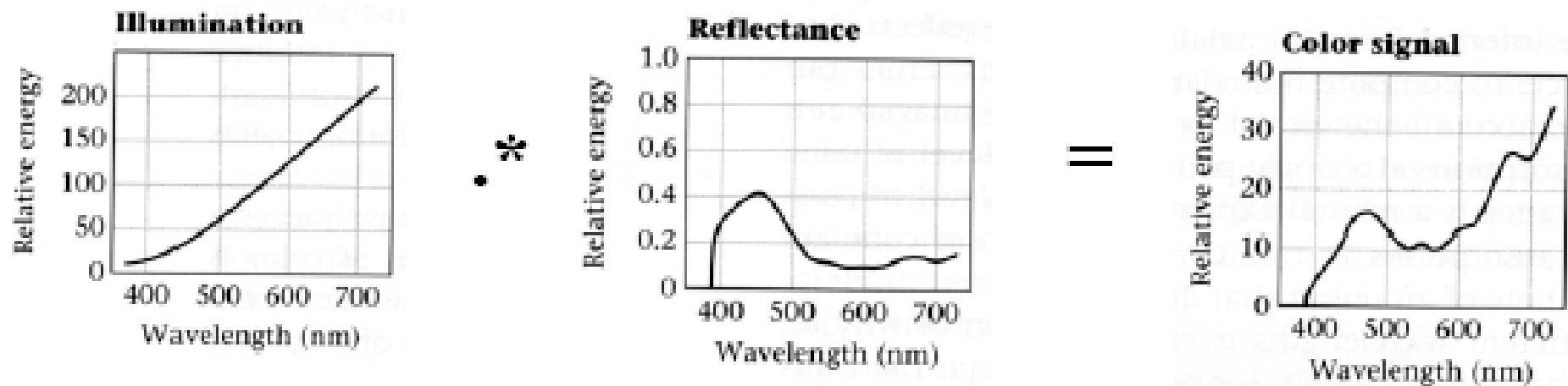
CIE = Commission Internationale de l'Eclairage.

- ◆ **Osvětlovač A** – typické spektrum obyčejné žárovky s wolframovým vláknem (zelená křivka na předchozí průsvitce).
- ◆ Osvětlovač B – sluneční světlo při teplotě 4874 K. Používá se zřídka.
- ◆ Osvětlovač C – starší model denního světla pro teplotu 6874 K. Nyní převážně nahrazen osvětlovačem D.
- ◆ **Osvětlovač D** – řada osvětlovačů modelující různá denní světla. Nejčastější D50 (pro teplotu 5000 K) a D65 (pro teplotu 6504 K). Příklady viz příští průsvitka.
- ◆ Osvětlovač E – “celková energie”, má teoretický význam při výpočtech.
- ◆ **Osvětlovač F** – modeluje osvětlovače s fluorescencí. Nejčastěji jsou používané F2, F3, ..., F12.

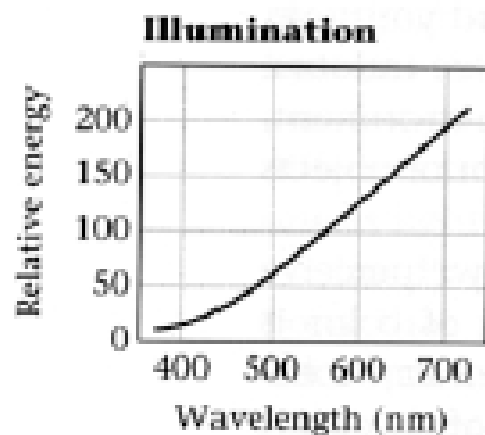
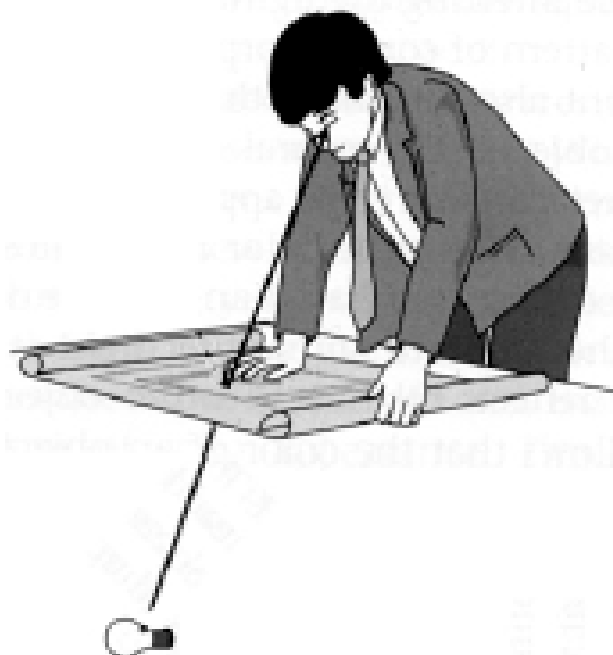
Součinitel odrazivost



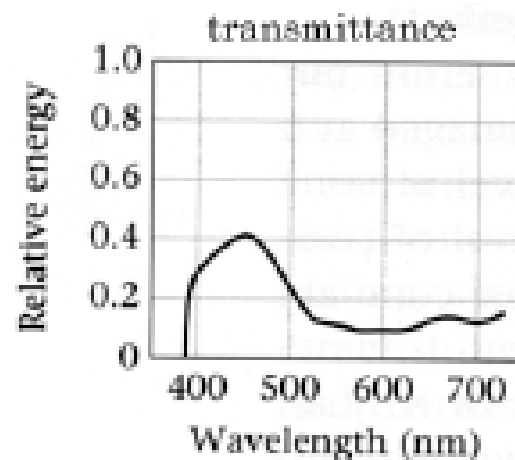
Often are more interested in relative spectral composition than in overall intensity, so the spectral BRDF computation simplifies a wavelength-by-wavelength multiplication of relative energies.



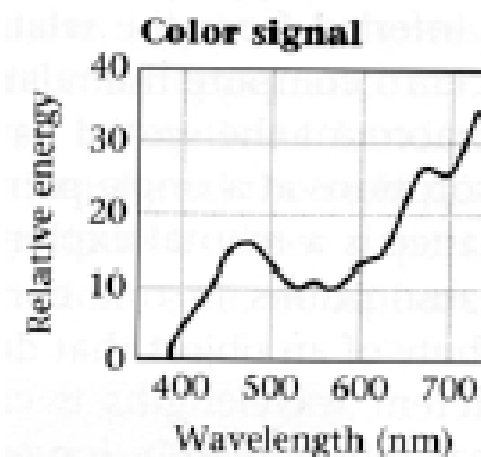
Součinitel propustnosti



• *



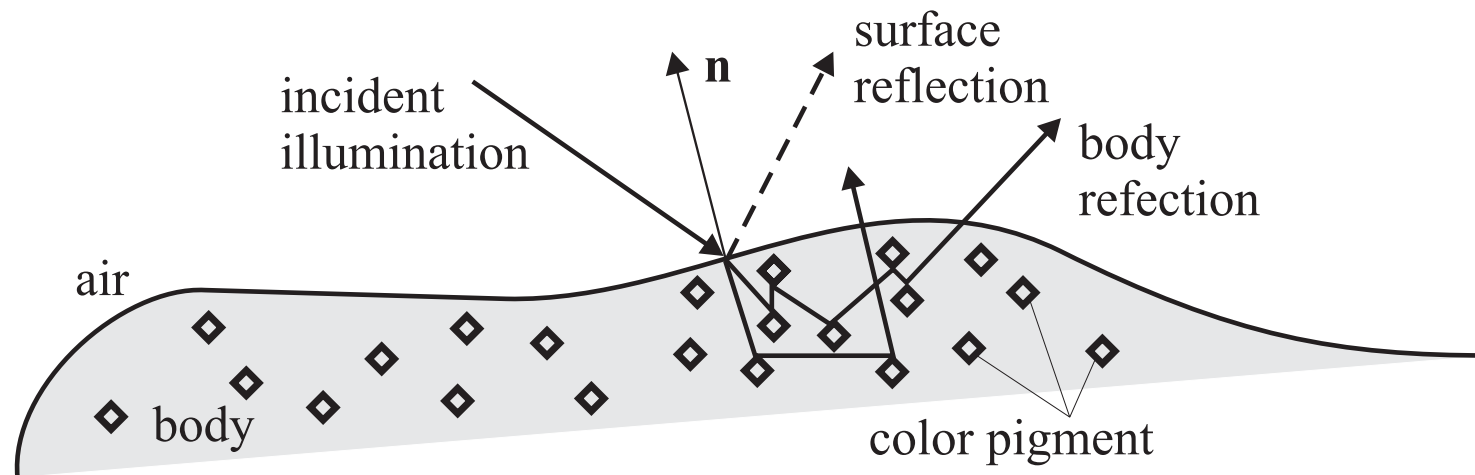
=



Proč vidíme objekty barevně?

- ◆ **Odras z povrchu** se chová jako zrcadlo. Model se hodí pro kovy. Téměř nemá vliv na spektrum. “Kovy nemají barvu.”
- ◆ **Odrazy uvnitř objektu** převládají v dielektrických, především u plastů a barev (ve smyslu – k natírání). Matematický model – difúze.

Viděná barva je způsobena vlastnostmi pigmentů (částic), které pohltní některé vlnové délky ze spektra přicházejícího světla.

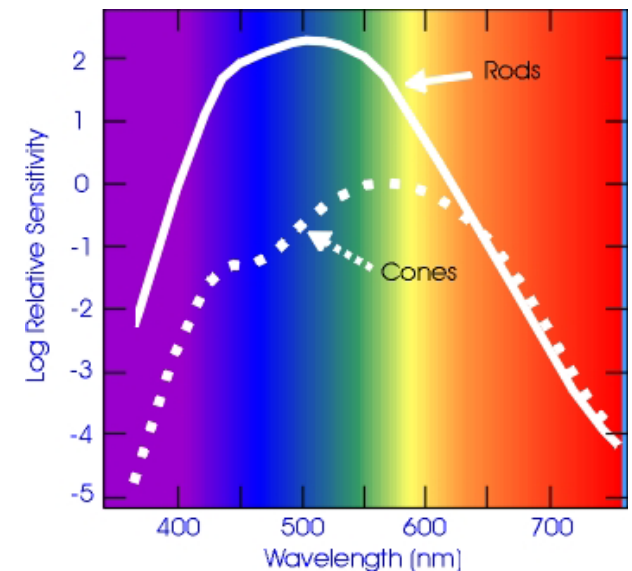
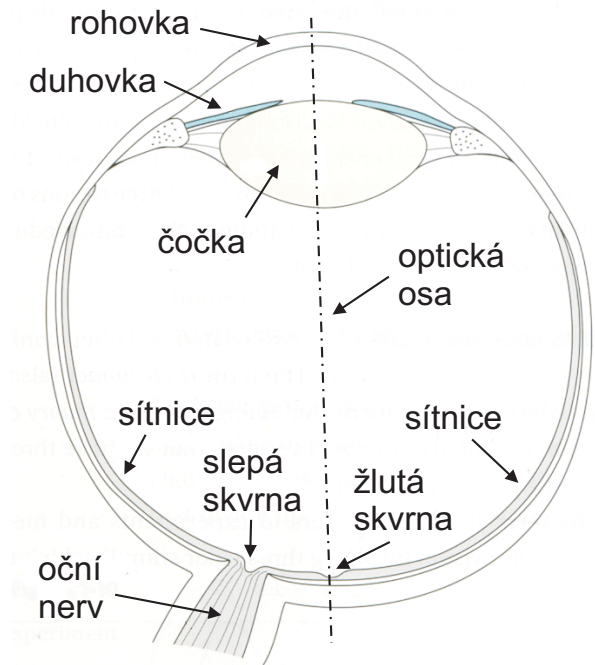


Fluorescence

- ◆ Fluorescence popisuje jev, kdy některé atomy přijmou foton s určitou energií ($\approx$ vlnové délce) a vyzáří fotony s nižší energií (větší vlnovou délkou).
- ◆ Fluorescence se také používá schválně pro zjasňování. Část blízkého ultrafialového záření se přemění na viditelné záření, obvykle fialové či modré.
- ◆ Toto je princip zjasňovačů v pracích práscích, zubních pastách a také tiskových papírech, inkoustech, voscích, tonerech tiskáren.
- ◆ Problém s barevnou věrností výtisků na papírech se zjasnovačem..

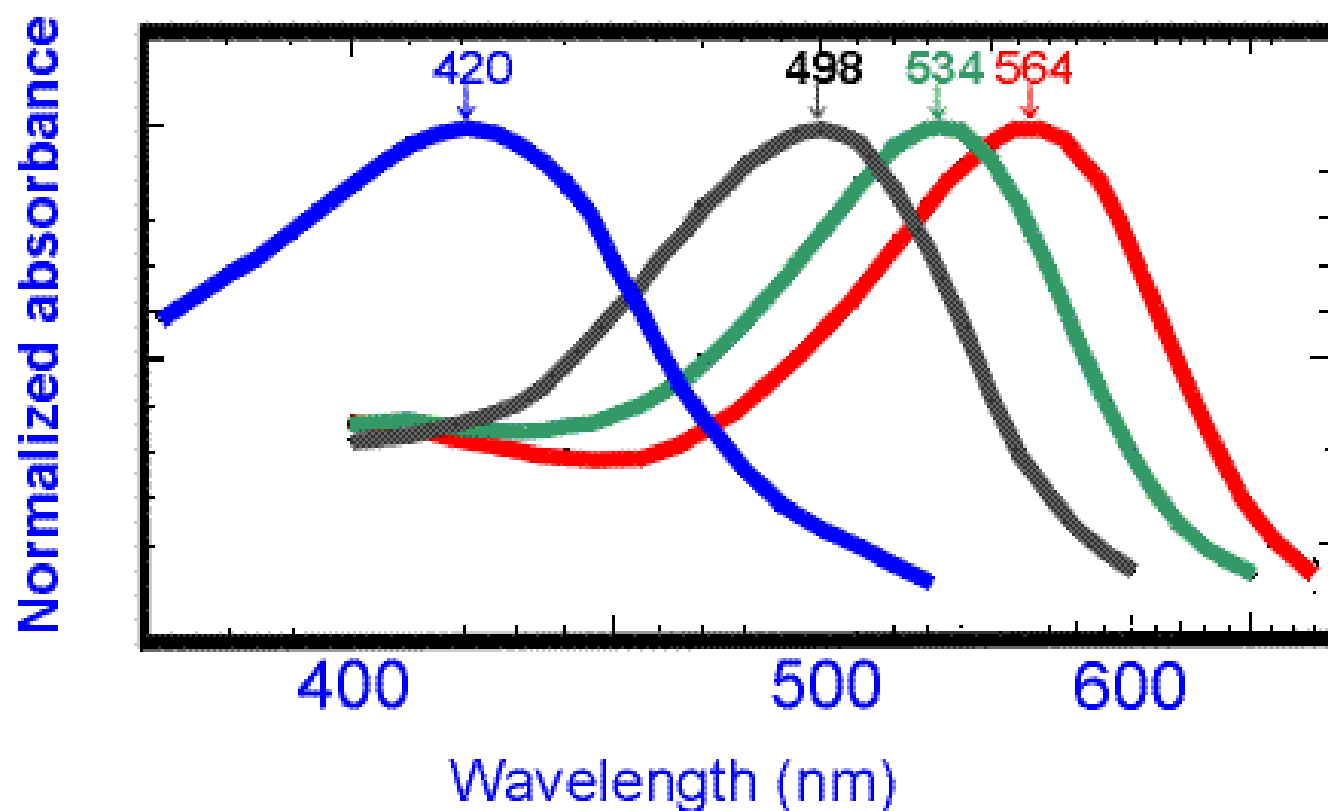
Spektrum vidění člověkem

- ◆ Sítňice obsahuje 4 typy receptorů.
- ◆ R, G, B čípky, pro **barevné vidění**.
- ◆ Tyčinky, pro **monochromatické vidění** s vyšší citlivostí.
- ◆ Logaritmická citlivost na intenzitu. Proč?
- ◆ Objevil Hermann von Helmholtz, kniha 1867, modeluje situaci na sítnici.
- ◆ Existuje alternativní teorie, 3 dvojice protikladných barev (červená-zelená, žlutá-modrá, bílá-černá), Ewald Hering, 1872. Potvrzeno $\approx$ 1970 Edwin Land, teorie Retinex jako model zpracování barvy v mozku.



Trichromatické vidění u lidí

Oko “měří v daném pixelu” vlnové délky na kombinaci odezvy R, G, B čípků.

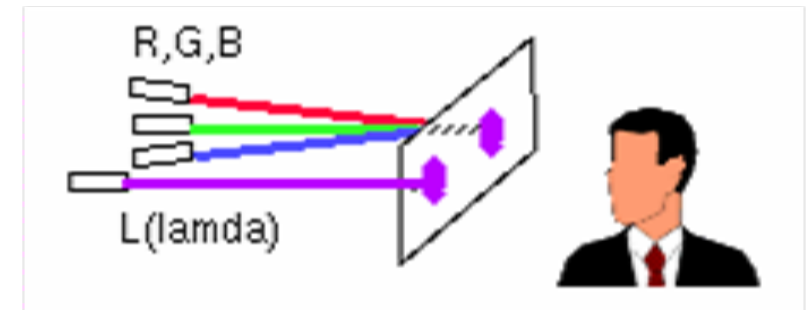


After Bowmaker & Dartnall, 1980

- ◆ Metamerismus je obecně definován jako dva různé jevy, které jsou vnímány stejně.
- ◆ Smícháním červené a zelené vznikne žlutá (metamerismus). Žlutou lze také získat pomocí spektrální barvy, což je záření jediné vlnové délky mezi zelenou a červenou.
- ◆ Lidské vnímání barev je tedy “klamáno”, že směs červené a zelené je totéž jako fyzikálně vytvořená žlutá.
- ◆ Tato vlastnost vývoje druhů je ale geniální, protože dovoluje jednoduchým mechanismem tří receptorů vidět velké množství nespektrálních barev.

Jak definovat barevný prostor?

- ◆ Tři typy čípků na sítnici vybízejí definovat barvu jako veličinu ve trojrozměrném (3D) vektorovém prostoru.
- ◆ Jak takový barevný prostor definovat?

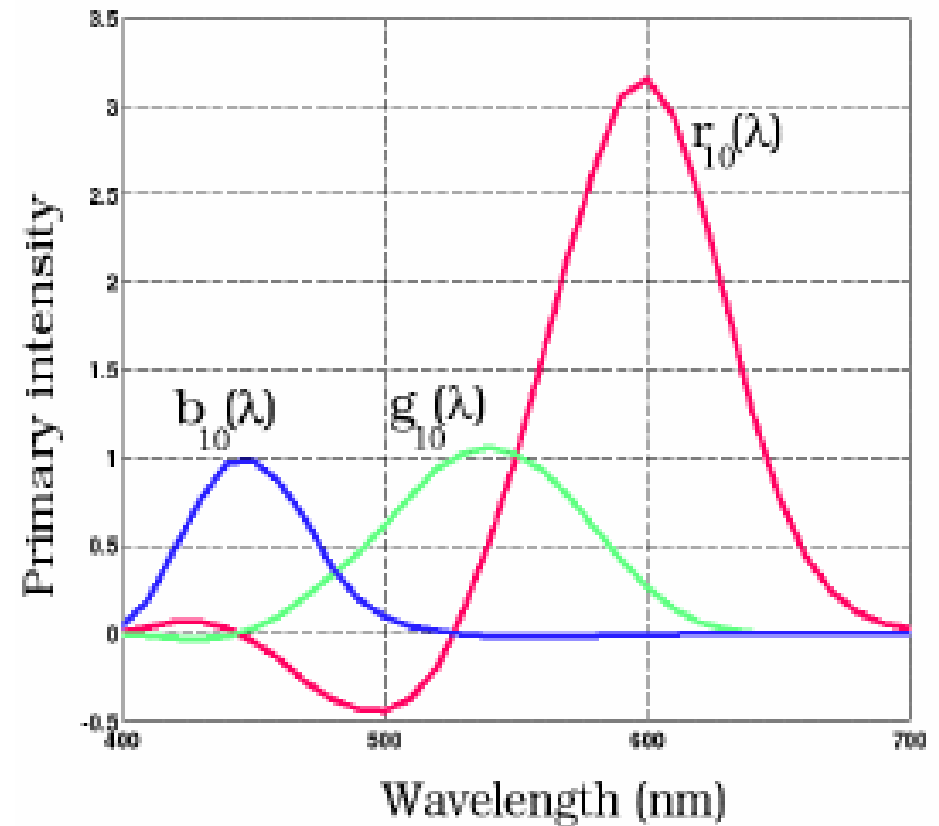


Myšlenka experimentálního postupu:

- ◆ Posvítit světlem jedné vlnové délky λ na promítací plátno.
- ◆ Člověk nastavuje tři “potenciometry” ovlivňující intenzitu tří základních světél (tzv. funkce vyvažující barvy) $R=645,2 \text{ nm}$; $G=525,3 \text{ nm}$; $B=444,4 \text{ nm}$, až se mu podaří dosáhnout stejného vjemu.
- ◆ Víme již, že je to možné právě díky barevnému metamerismu.

Funkce vyvažující RGB barvy

- ♦ Vytvořeny a normalizovány CIE.
Základní barvy $X=700,0$ nm;
 $Y=546,1$ nm; $Z=435,8$ nm, otvor pro pozorovatele odpovídající úhlu 2° .
- ♦ Záporný lalok v červené! To znamená, že je potřebné zvýšit intenzitu referenční spektrální barvy vůči třem složkovým barvám, aby se dosáhlo stejného vjemu.
- ♦ Ze základních RGB barev nelze generovat barvy všech vlnových délek spektra přirozeného bílého světla.
- ♦ Řešení: převést barvy do nového umělého souřadného systému, v němž je úkol reprezentace barev jednodušší.

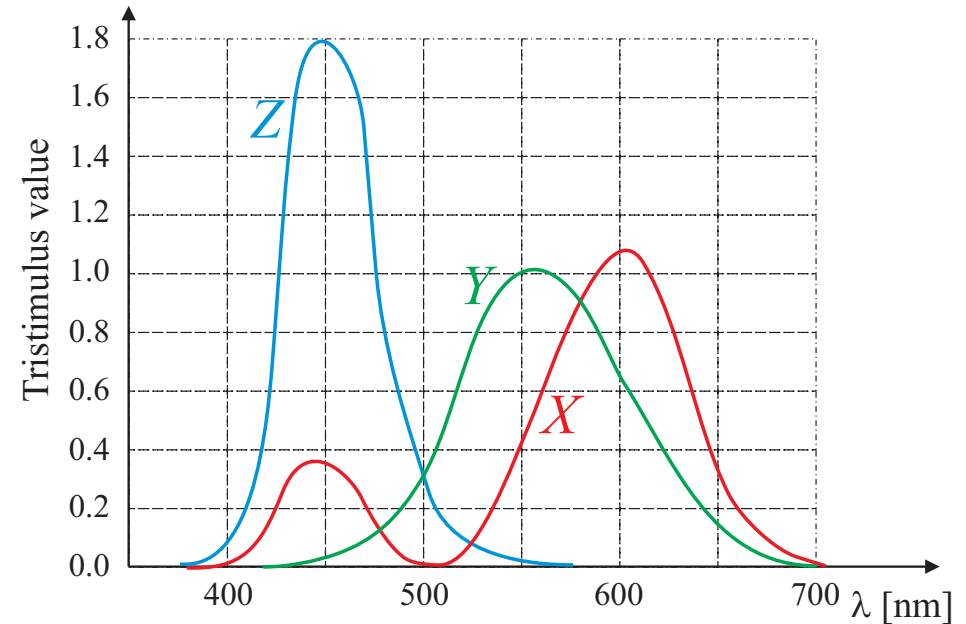


Průběh funkcí vyvažující RGB barvy.

XYZ tristimulus

CIE vytvořila barevný model jako matematickou abstrakci.

- ◆ Mají-li dva různé podněty stejný XYZ tristimulus, vnímá je člověk jako stejnou barvu.
- ◆ Absolutní standard, protože je vztažen k vnímání standardního pozorovatele.



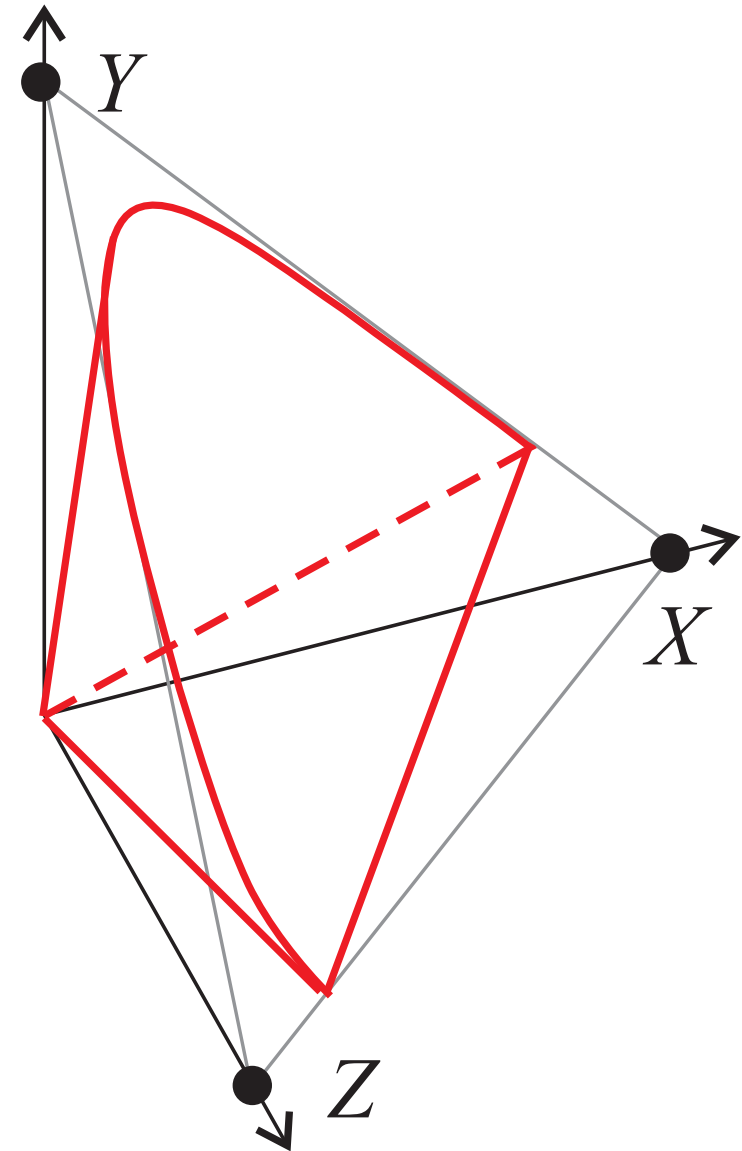
$$X = \int_{380}^{780} k f(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

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

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

Barevný rozsah vnímaných barev

- ◆ Barevný rozsah (angl. gamut) všech člověkem vnímatelných barev je 3D podprostorem všech možných barev v X, Y, Z souřadnicích.
- ◆ Barva = $c_X X + c_Y Y + c_Z Z$, kde $0 \leq c_X, c_Y, c_Z \leq 1$ jsou váhy v této konvexní kombinaci.
- ◆ Barevný rozsah se obvykle promítá do dvojrozměrné roviny, a to po normalizaci $X' + Y' + Z' = 1$.



Barevný rozsah ve 2D

barevný trojúhelník CIE

Souřadnice x , y .

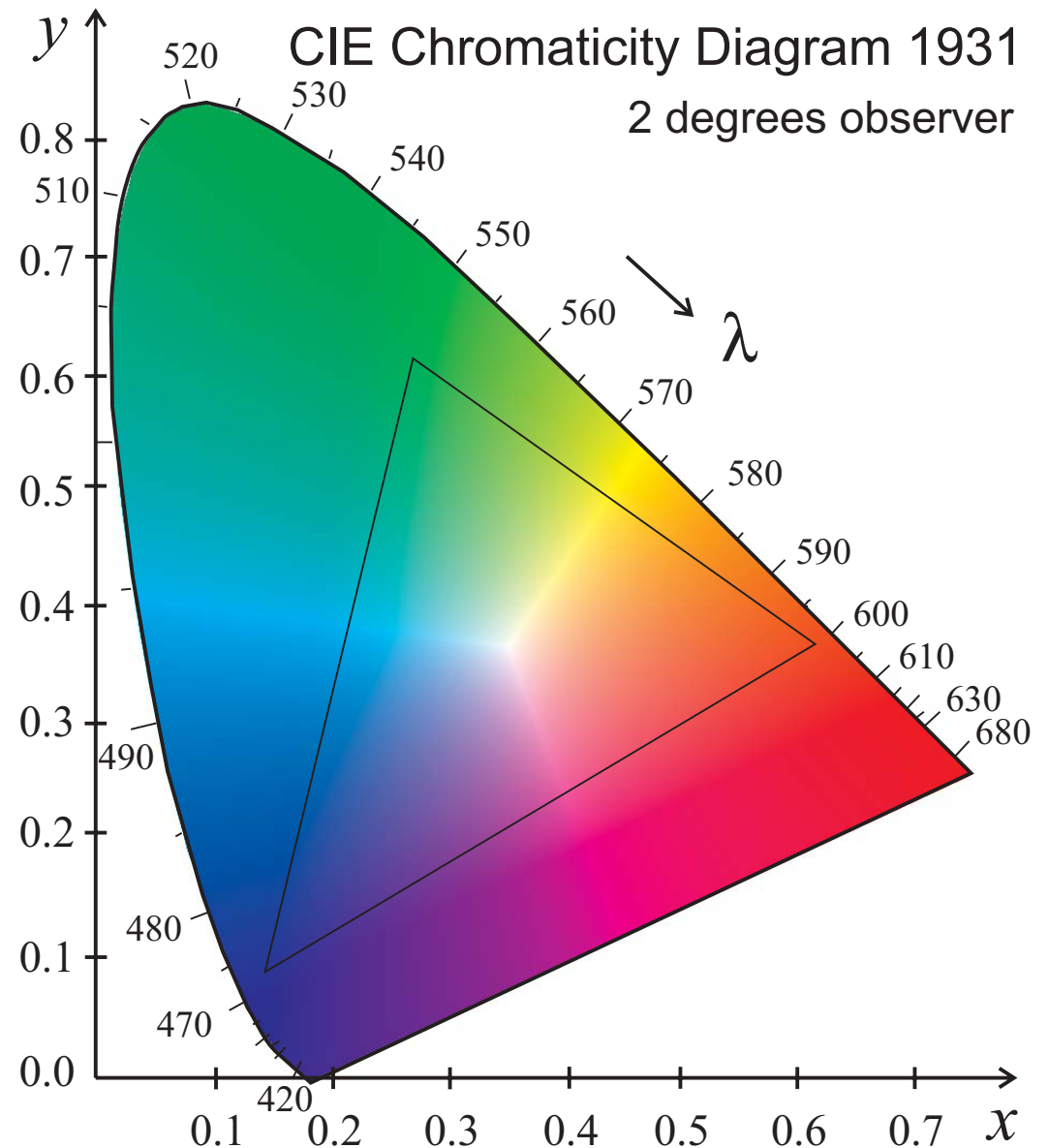
$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

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

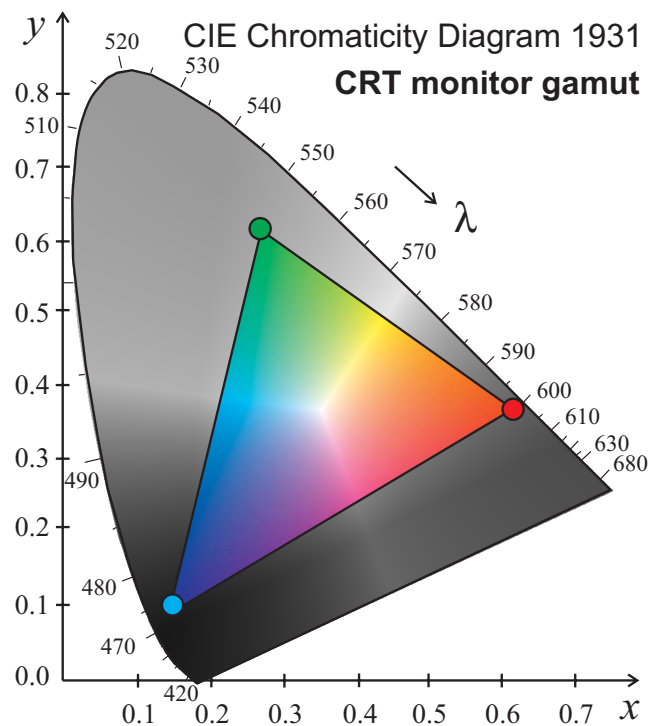
$$z = 1 - x - y$$

Všechny viditelné spektrální barvy jsou na okraji “podkovy”, též nepřesně barevného trojúhelníku.

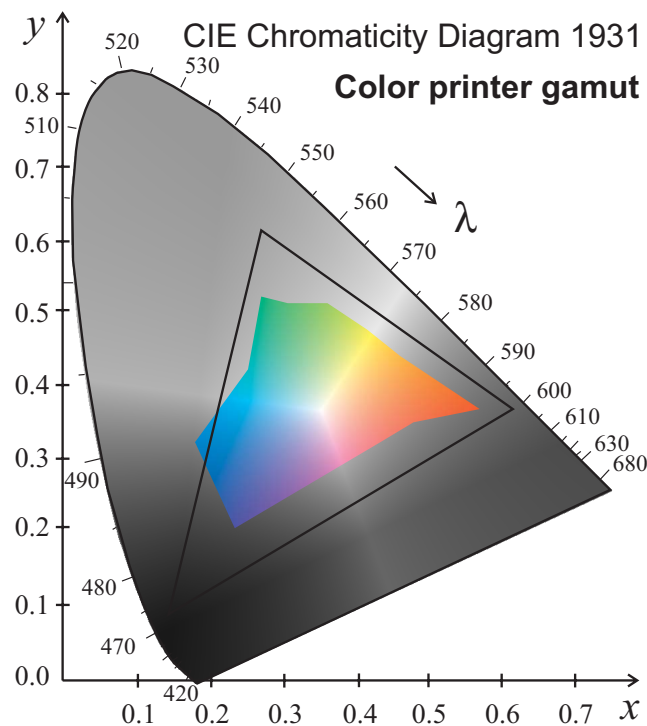
Všechny viditelné barvy, které lze namíchat, leží uvnitř “podkovy”.



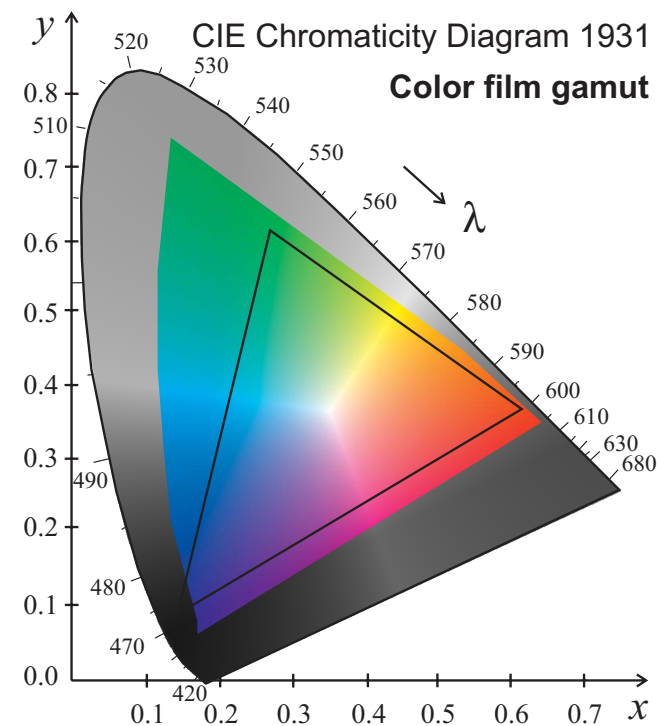
Barevný rozsah různých zařízení



vakuový monitor



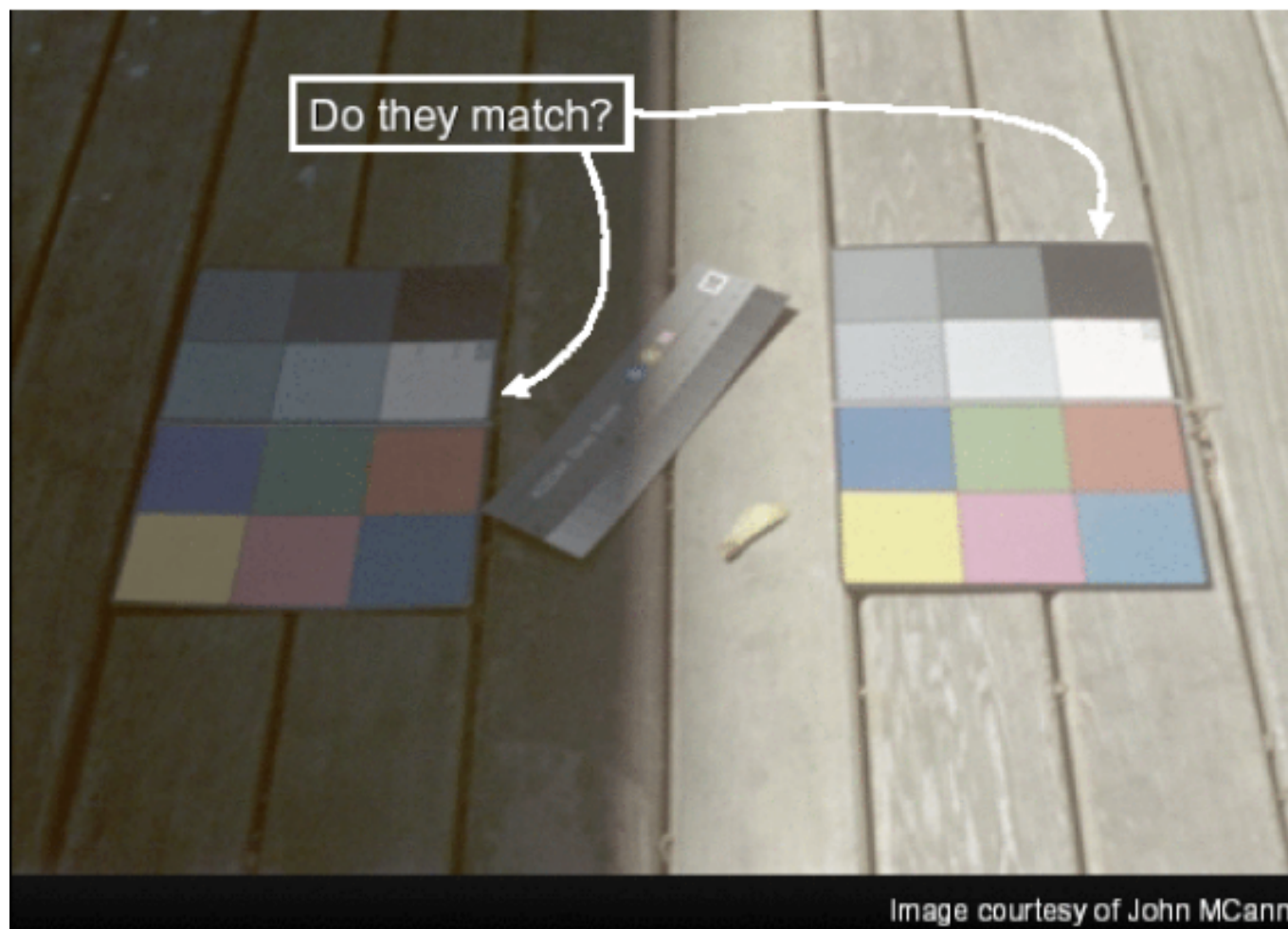
tiskárna



film

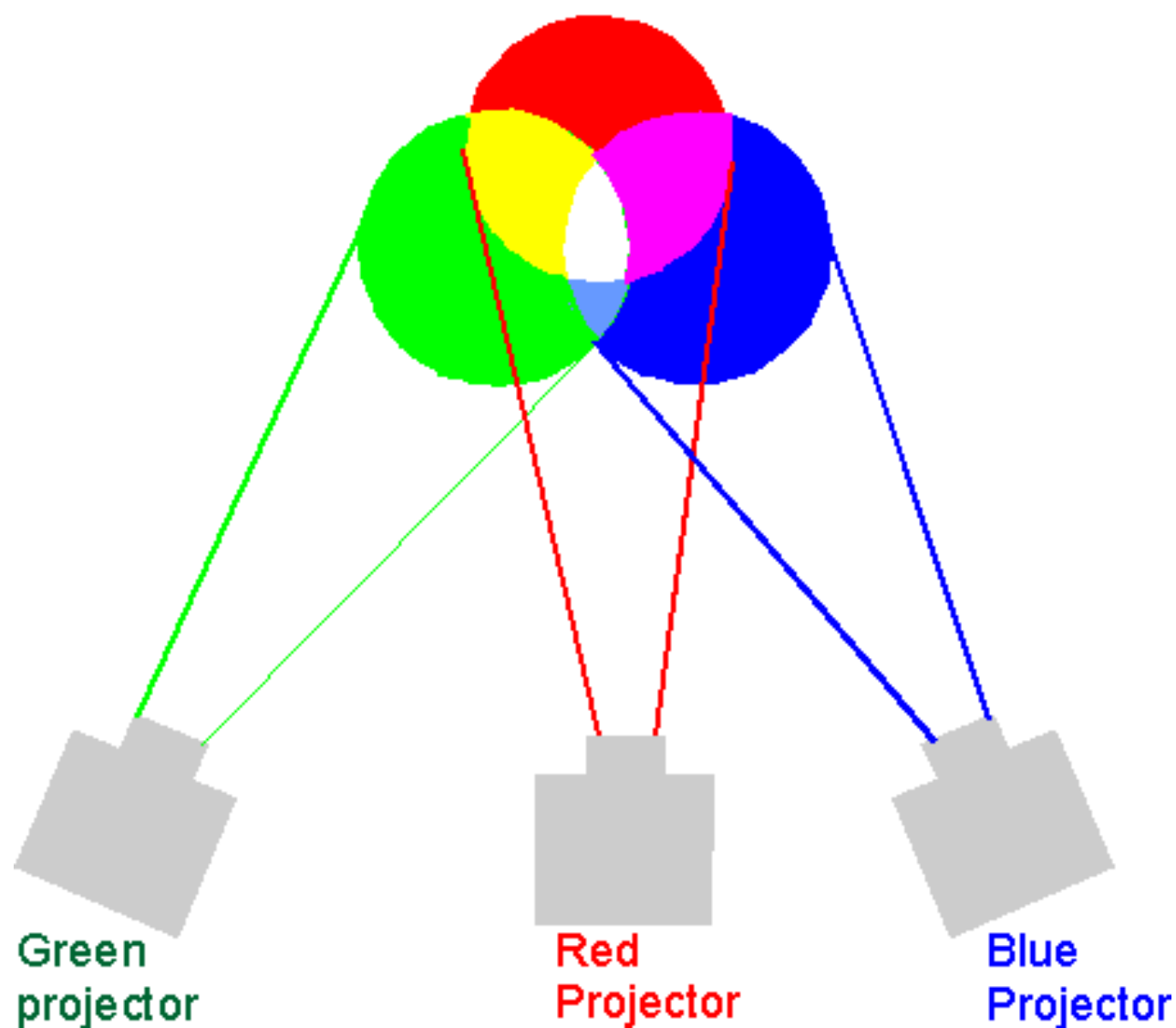
Konstantnost barev, motivace

Konstantnost barev vyjadřuje schopnost člověka potlačit vliv různého osvětlení při vnímání barev objektů.

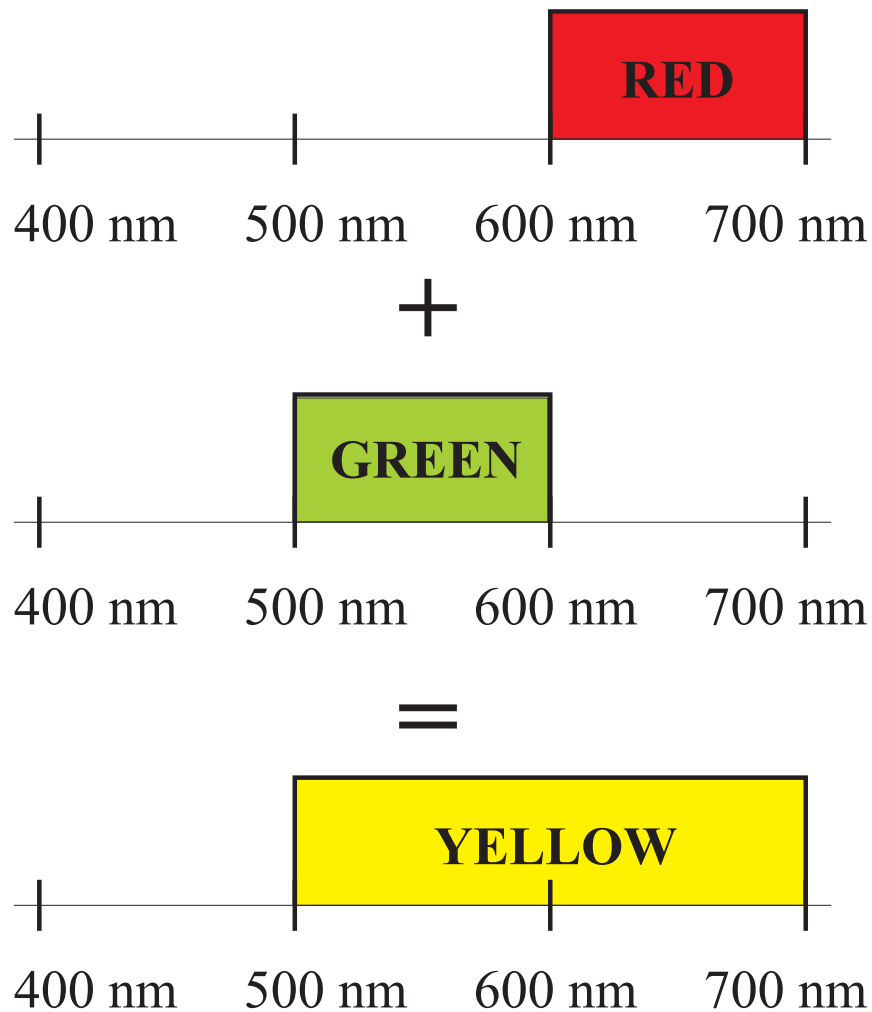


Kolorimetrie × vnímání barvy.

Míchání barev

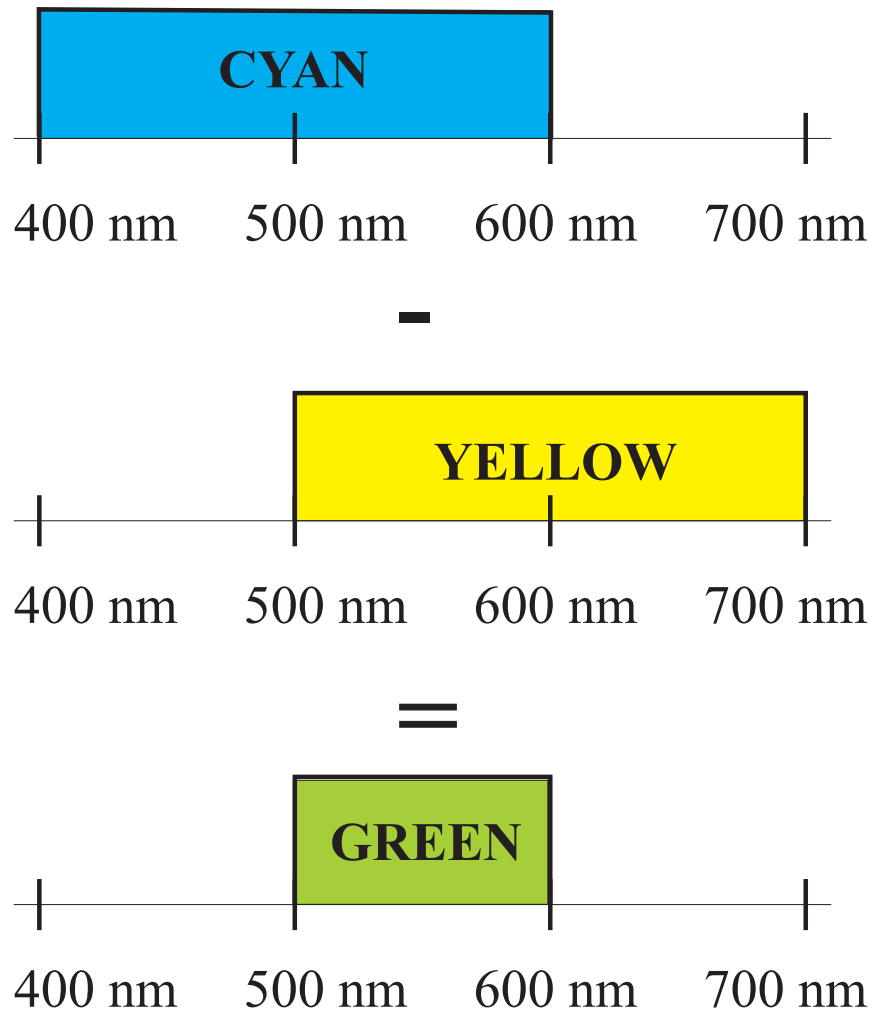


Aditivní míchání barev



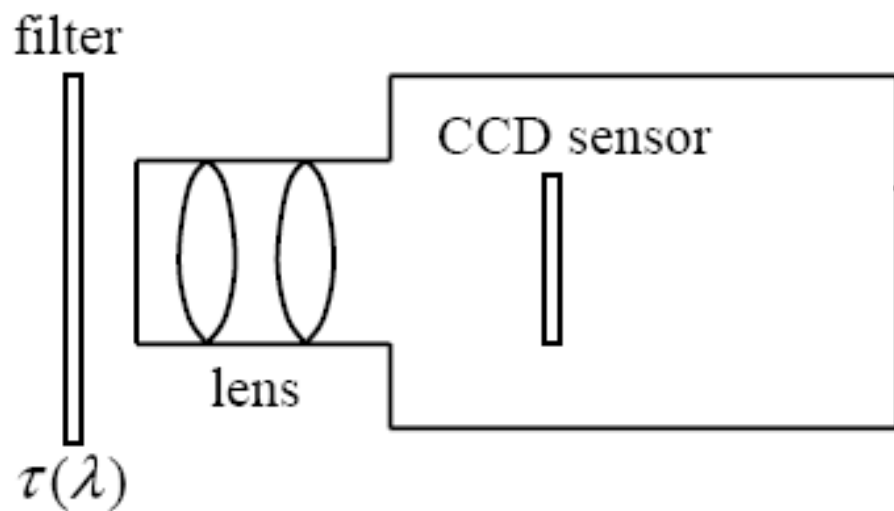
- ♦ Prázdné spektrum + červená + zelená = žlutá.
- ♦ Model aditivního míchání barev platí pro luminofovy vakuových obrazovek, vícenásobnou projekci na plátno a čípky na lidské sítnici.

Subtraktivní míchání barev

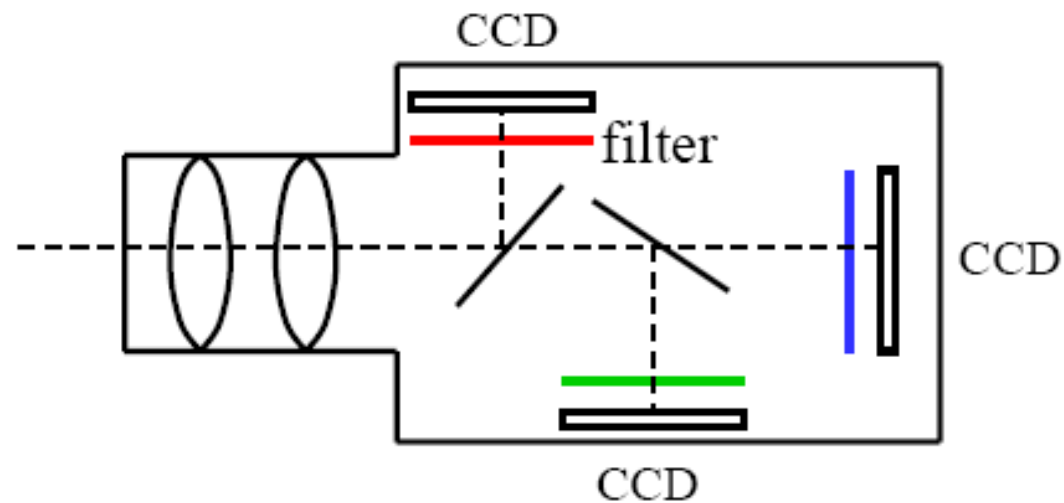


- ◆ Uplatňuje se, když se barvy míchají tak, že např. od plného spektra bílé se postupně odečítají díky filtraci (vlastně jde o násobení) jednotlivé části spektra
- ◆ V příkladu: plné spektrum bílé - modrozelená (též tyrkysová, angl. cyan) - žlutá = zelená.
- ◆ Model subtraktivního míchání barev platí pro většinu fotografických filmů, nátěry (barvy), barevné pastelky, tisk a kaskádně řazené optické filtry.

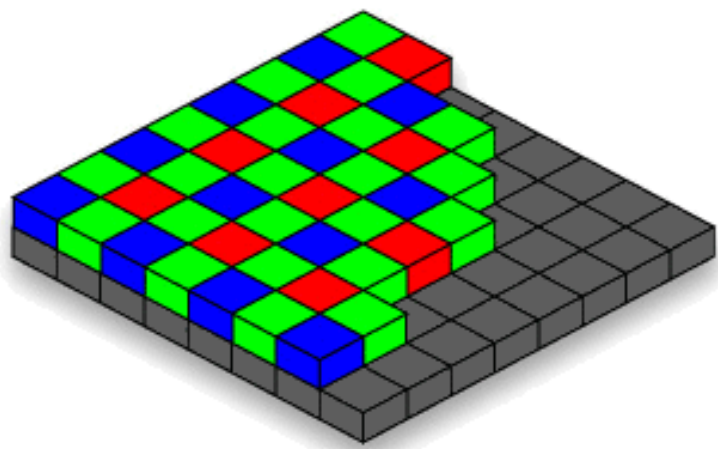
Barevné kamery



1-čipová kamera + barevné filtry



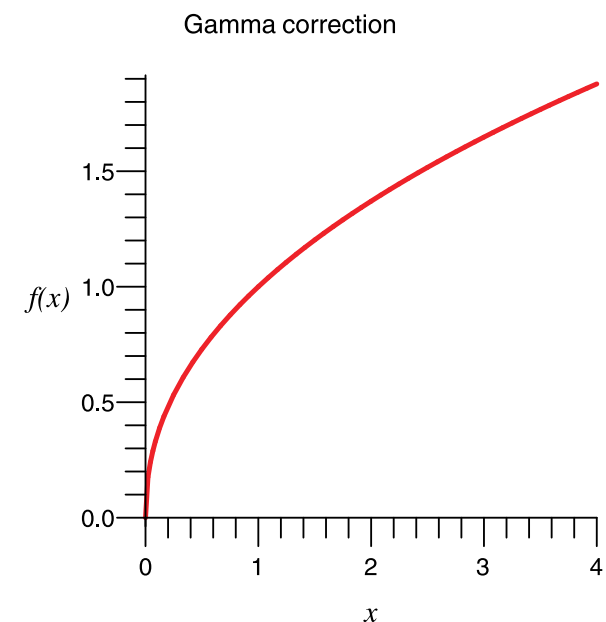
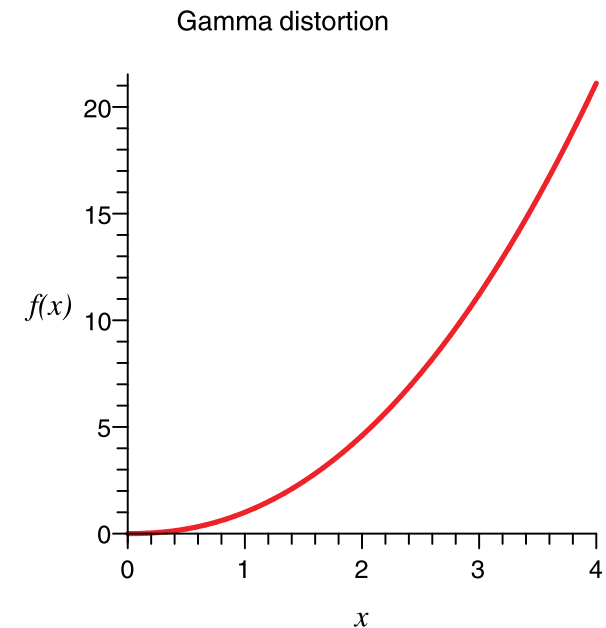
3-čipová camera



Bayerův vzor uspořádání filtrů

Nelinearita v jas, γ -korekce

- ◆ Kamery obsahují modul realizující nelineární transformaci jasu, γ -korekci.
- ◆ Ve vakuových obrazovkách televizí závisí jas na mřížkovém napětí U exponenciálně, tj. $\text{jas} = U^\gamma$, kde obvyklé $\gamma = 2, 2$.
- ◆ Aby se zachovala lineární přenosová funkce v celém řetězci, musí se tento efekt v kamerách kompenzovat inverzní funkcí. Při vstupním ozáření E a výstupním napětí kamery U to odpovídá $U = E^{(1/\gamma)}$, obvykle $U = E^{0,45}$.
- ◆ I když u LCD monitorů jas závisí na vstupním napětí lineárně, používá se γ -korekce nadále kvůli zpětné kompatibilitě.

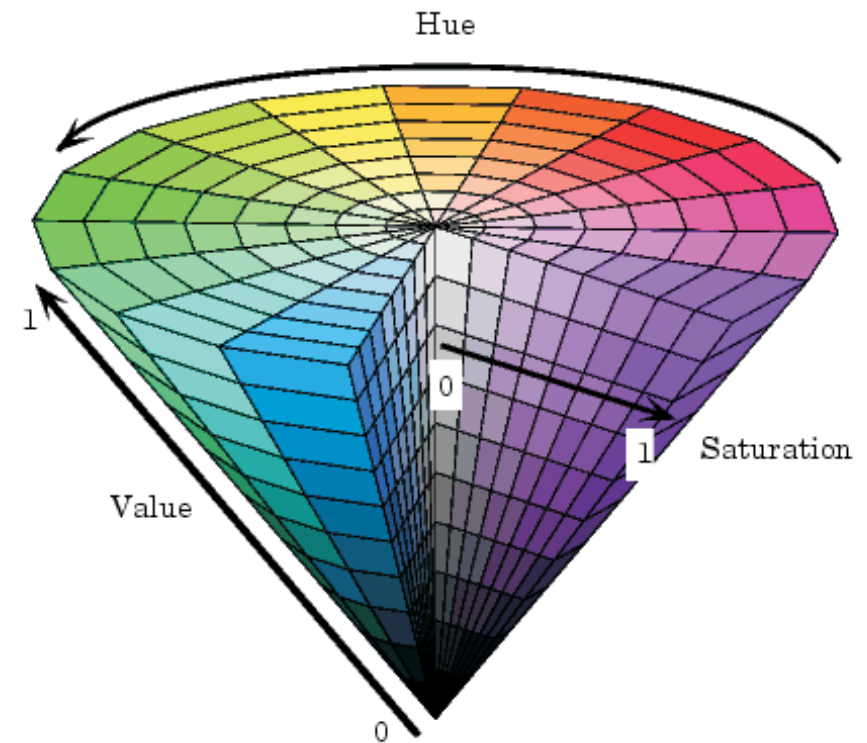


Ilustrace: Barevné složky

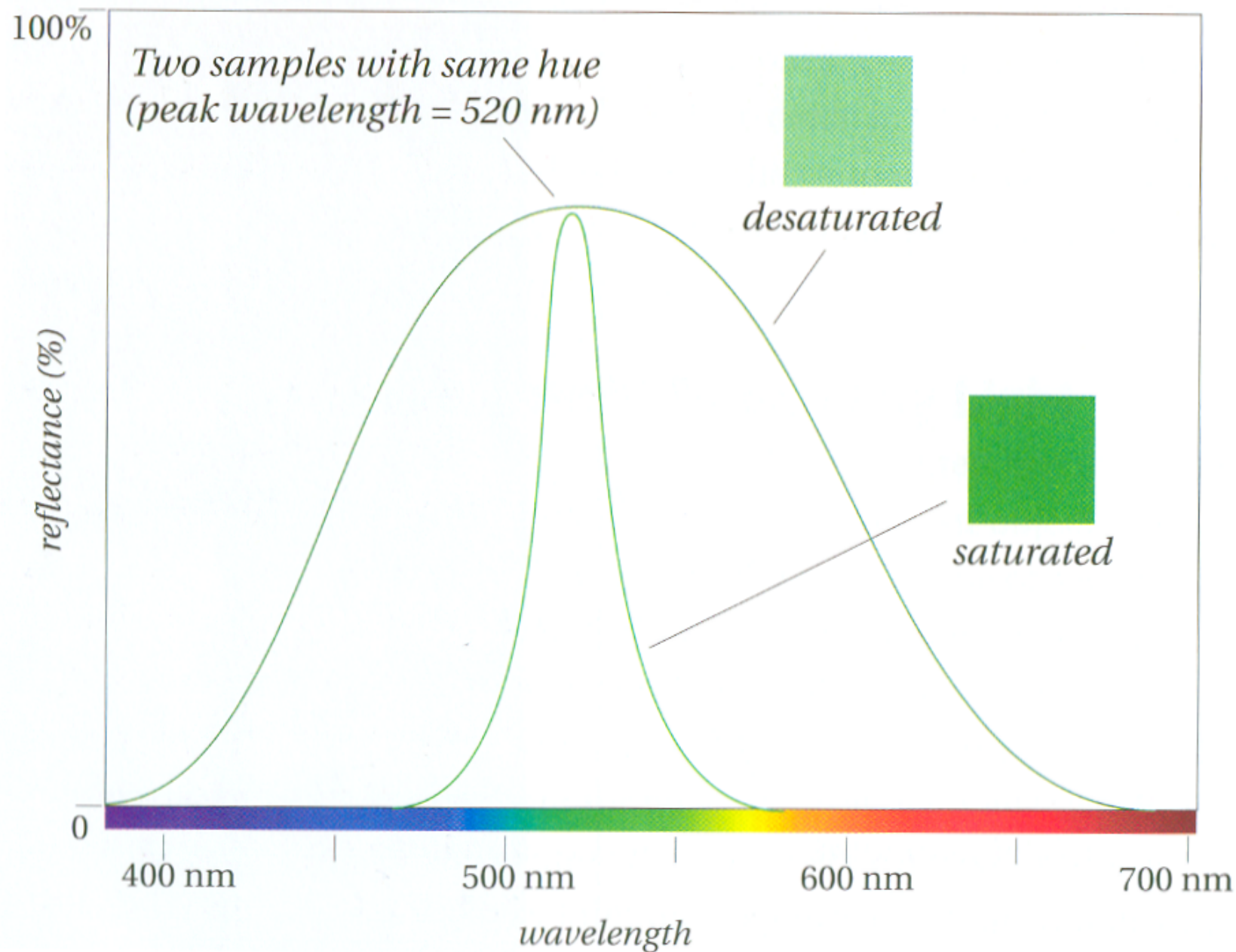
HSV – odstín, sytost, (jas)

Motivace: Míchání barev na malířově paletě.

- ◆ **Odstín barvy** (angl. hue) odpovídá dominantní vlnové délce, projekci barvy na okraje barevného trojúhelníka, kde jsou spektrální barvy.
- ◆ Jména barev vlastně odpovídají odstínům. Liší se ovšem v různých kulturách.
- ◆ **Sytost barvy** (angl. saturation) popisuje, jak je barva vzdálena od neutrální šedé. Popisuje také, jak je dominantní vlnová délka (odstín) znečištěna jinými vlnovými délkami.



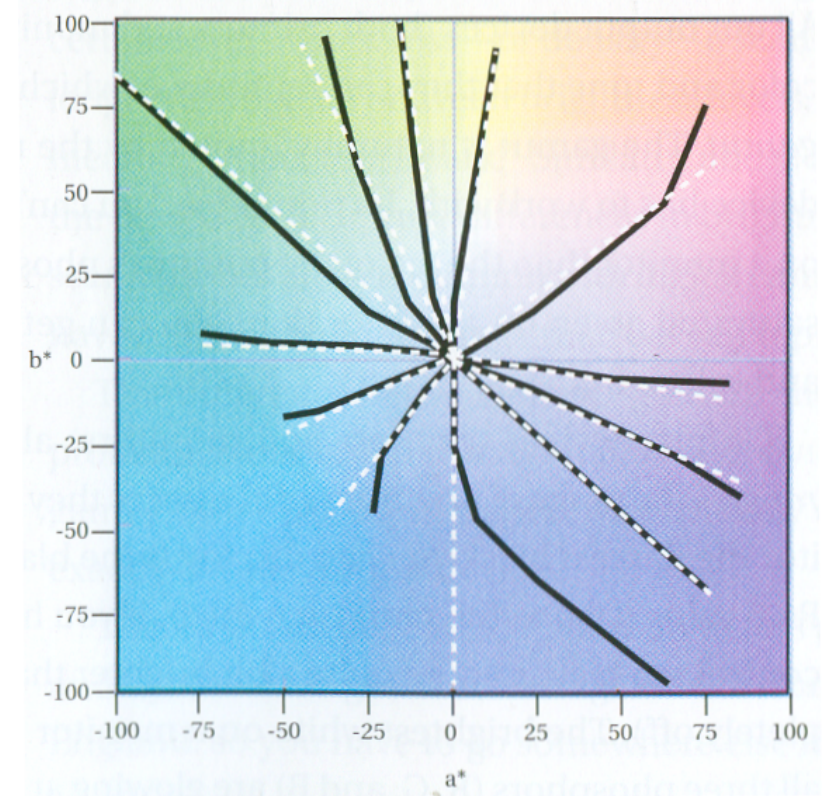
Sytost barvy v barevném spektru



Barevný prostor CIE LAB

Nejpoužívanější absolutní barevný prostor při správě barev. Vznikl nelineární transformací CIE XYZ prostoru.

- ◆ Napodobuje způsob, jak člověk posuzuje barvu, aby byl vjem barvy rovnoměrný.
- ◆ Základní barvy jsou L^* (světlo, angl. light), a^* popisuje dvojici červená-zelená, b^* popisuje dvojici modrá-žlutá). Viz Heringovy protichůdné barvy.
- ◆ Změna základní barvy o určitý přírůstek by měla způsobit podobnou změnu vizuálního vjemu. Nedokonalosti, viz obr. vpravo.
- ◆ Používá se jako základní prostor pro převod barevných prostorů zařízení, což je podstatou správy barev.



- ◆ Odstín je zobrazen jako polární úhel.
- ◆ Sytost je zobrazena jako vzdálenost od středu (neutrální šedé).
- ◆ Bílé čárkované čáry by měly odpovídat konstantnímu odstínu, ale vnímané odstíny jsou nepřesné (plné černé čáry).

Základní parametry zobrazovacích a vstupních zařízení

Pro správu barev je potřebné znát (změřit) základní parametry monitorů, fotoaparátů, skenerů, tiskáren, ...

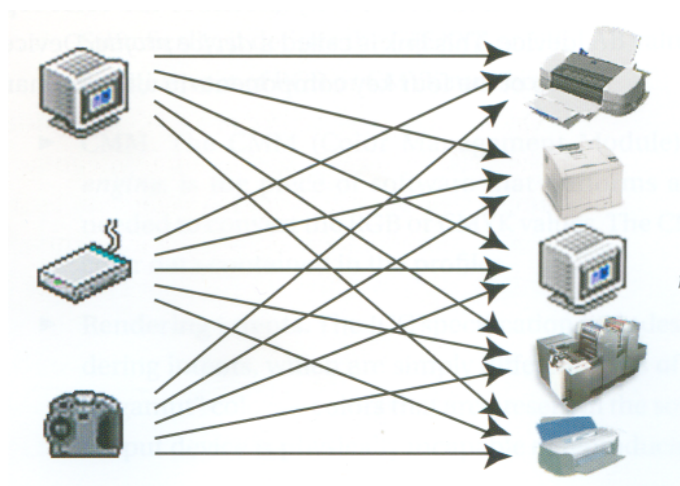
- ◆ **Tři základní barvy** (angl. colorants), jejich barvu a jas základních barev.
- ◆ **Bílý bod**, jeho barvu a jas. K bílé barvě se v lidském vnímání nevědomě vztahují ostatní barvy. Proto je při kalibraci zařízení u bílého bodu důležitější barva než jas.
- ◆ **Černý bod**, jeho barvu a jas. Černota (hustota) černé udává mez dynamického rozsahu, které je zařízení schopné zobrazit nebo sejmout. Dynamický rozsah je důležitý pro vnímání detailů v jas. Proto se pro tisk přidává zvlášť černá složka, viz CMYK. Černý bod nejde nastavovat na LCD monitorech.
- ◆ **Převodní charakteristiky základních barev** (angl. tone reproduction curve) udávají, jak se mezi barevnými prostory dvou zařízení převádějí intenzity v jednotlivých barevných složkách. Charakteristiky jsou obvykle nelineární a implementují se přes vyhledávací tabulky (angl. LUT, look-up tables).

Přenos barev mezi zařízeními, omezení

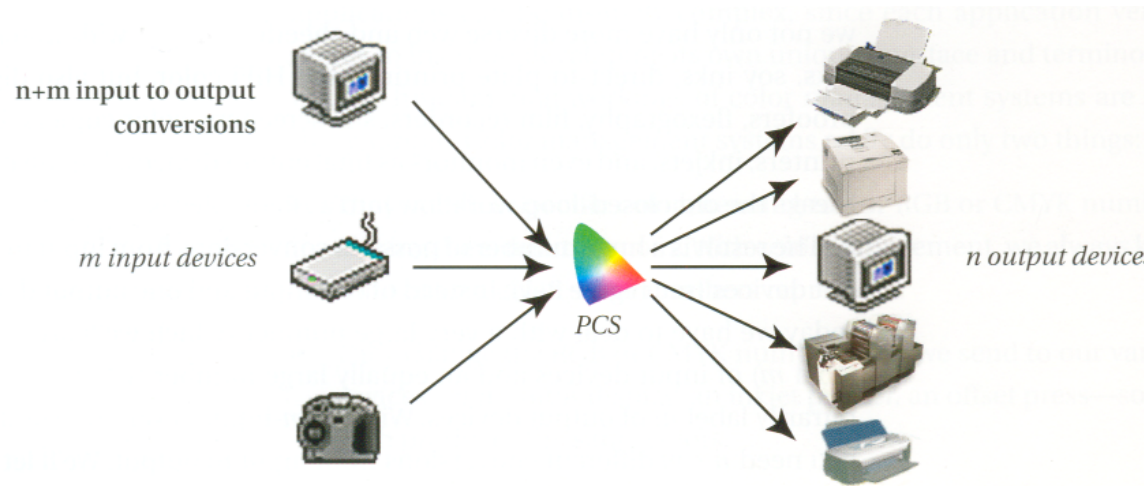
- ◆ Správa barev slouží k věrnému přenosu barev ze zdroje, přes náš obrazový soubor do cílového zobrazovacího nebo tiskového zařízení.
- ◆ Fyzikální zákony brání, aby byly zobrazeny všechny barvy, ve všech odstínech, sytostech a intenzitách. Obdobně je tomu s dynamickým rozsahem
- ◆ Potřeba transformovat výchozí rozsah barev na cílový rozsah barev. Jejich průnik je často jen částí původních rozsahů barev.
- ◆ Nelineární transformace v barevných složkách dané převodními tabulkami základních barev také nebývají přímo kompatibilní.

Správa barev

zjednodušení díky mezilehlé reprezentaci



$m \times n$ možností

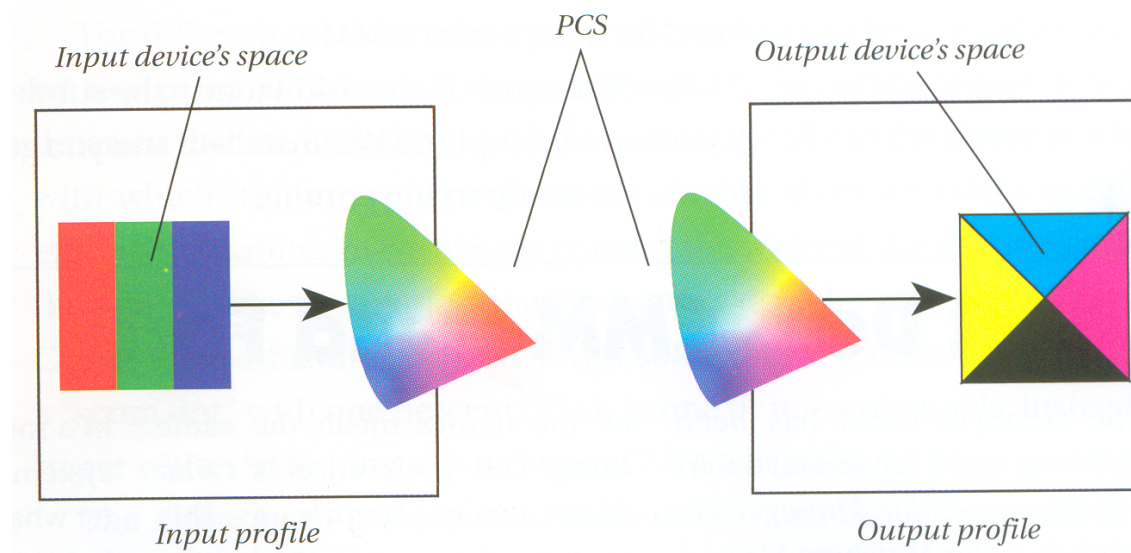


$m + n$ možností

Spojovníkem mezi zařízeními je **prostor profilů barev**, angl. PCS, Profile Connection Space, tj. reprezentace barvy nezávislá na konkrétním zařízení, obvykle CIE LAB nebo CIE XYZ.

ICC, International Color Consortium

- ◆ Kolem roku 1980 mnoho firem, zejména Adobe, Agfa, HP, Kodak, Tektronix, Kodak vyřešili správu barev přes profily mezi dvojicí zařízení.
- ◆ Apple Computer zavedl v roce 1993 ColorSync pro operační systém Mackintosh a sdružil konsorcium firem.
- ◆ Později známé jako ICC, International Color Consortium.
- ◆ Hlavním dokumentem ICC je otevřený “Profile Format Specification”.



- ◆ **Prostor profilů barev PCS.** Byl již vysvětlen.
- ◆ **Profily.** Profil popisuje zobrazení mezi řídicími signály (např. RGB nebo CMYK) a skutečnými barvami, které signály vytvářejí. Jednotlivým vstupním RGB nebo CMYK barvám definuje odpovídající CIE LAB nebo CIE XYZ hodnoty.
- ◆ **Modul správy barev CMM** (angl. Color Management Module) je program, který přepočítává RGB nebo CMYK hodnoty na požadované CIE LAB nebo CIE XYZ hodnoty. CMM pracuje s barevnými daty uloženými v profilech.
- ◆ **Požadavky na zobrazování** (angl. rendering intents) V ICC specifikaci jsou uloženy čtyři, které řeší problém, když barva je mimo barevný rozsah.

Záměry reprodukce (Rendering intents)

- ◆ Součástí Profile Format Specification konsorcia firem ICC (International Color Consortium).
- ◆ Popisuje, jak vyřešit problém, když požadovaná barva leží mimo rozsah barev, tj. jak ji nahradit jinou dostupnou barvou na výstupním zařízení.
- ◆ Norma obsahuje 4 metody a ty jsou implementovány v editorech obrazů, např. ve PhotoShopu:
 1. **Perceptuální** – pokouší se zachovat celkový barevný vjem. Vhodné pro obrazy, kde mnoho barev leží mimo barevný rozsah.
 2. **Sytost** (saturation) – upřednostňuje živé barvy, aniž hledí na přesnost. Hodí se pro umělé obrázky, obchodní grafiku, digitální modely terénu, atd.
 3. **Relativní kolorimetrický** – využívá skutečnosti, že lidské vidění se vždy adaptuje na bílou. Záměr převede zdrojovou bílou na cílovou bílou (např. nažloutlou papíru), barvy uvnitř barevného rozsahu zobrazí přesně a barvy vně zobrazí jako nejbližší odstín. Pro fotografie je lepší než “perceptuální”.
 4. **Absolutní kolorimetrický** – liší se od předchozího tím, se ve výstupním barevném prostoru snaží simulovat bílou vstupního prostoru. Hodí se pro ověřování budoucího tisku na jiném zařízení, např. monitoru.

- ◆ Nyní jsme se naučili potřebnému, abychom mohli správu barev realizovat prakticky, např. proto, že budete chtít vytisknout malý fotografický projekt v minilabu ve Výpočetním a informačním centru ČVUT, k němuž budete znát barevný profil.
- ◆ K tomu potřebujeme s pomocí speciální sondy nakalibrovat používaný monitor a potom ve vybraném fotoeditoru (např. PhotoShopu) úpravy realizovat. Obojímu se naučíme ve cvičeních.
- ◆ Jeden z cvičících Ing. Lukáš Cerman k tomu napsal pro cvičení stručné a výstižné vysvětlení, viz [cm-v2.pdf](#) (860 kB)