



Radiometrie, fotometrie a kolorimetrie

Karel Fliegel
(fliegek@fel.cvut.cz)



□ Radiometrie a fotometrie

- ❖ Radiometrické a fotometrické veličiny
- ❖ Poměrná spektrální světelná účinnost
- ❖ Lambertův zákon kosinového zářiče

□ Kolorimetrie

- ❖ Aditivní a subtraktivní míšení barev
- ❖ Experiment vyvážení barev (subjektivní kolorimetr)
- ❖ Spektrální trojbarvé členitele CMF
- ❖ Trichromatické složky a souřadnice
- ❖ Diagram chromatičnosti (MKO) CIE xy 1931
- ❖ Prostory stejných barevných rozdílů CIE Luv a Lab 1964
- ❖ Korelovaná teplota chromatičnosti CCT
- ❖ Index podání barev CRI

- **Kvantitativní popis optického záření**
 - ❖ Určování jeho **mohutnosti – energetické charakteristiky**
 - ❖ **Radiometrie a fotometrie** se zabývají určováním ...
 - ❖ ... **energetických a výkonových vlastností optického záření**
- **Radiometrie ...**
 - ❖ **Zabývá se optickým zářením jako formou energie**
 - ❖ Používá **objektivní energetické a výkonové veličiny**
- **Fotometrie ...**
 - ❖ **Omezuje se pouze na záření vyvolávající zrakový vjem**
 - Spektrální obor viditelného záření ($\sim 360 - 830$ nm)
 - Vztahuje se ke spektrální citlivosti lidského oka
 - ❖ Ke každé radiometrické veličině se **vztahuje fotometrická**

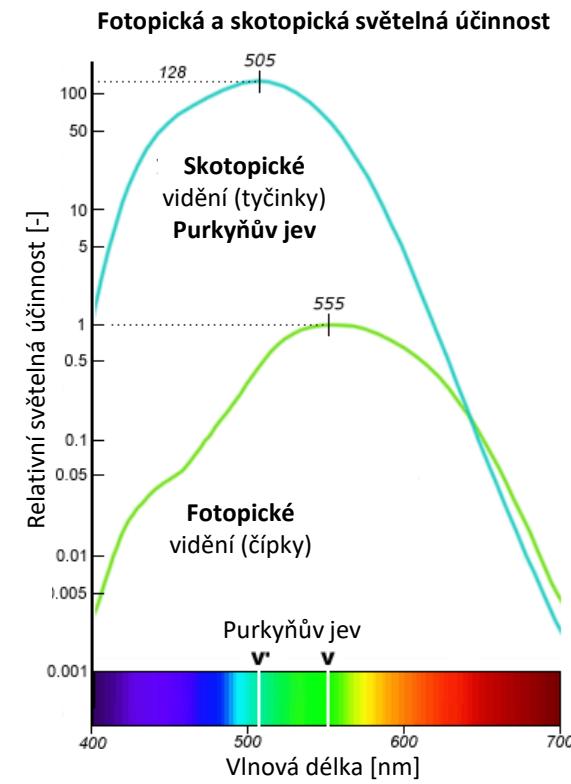
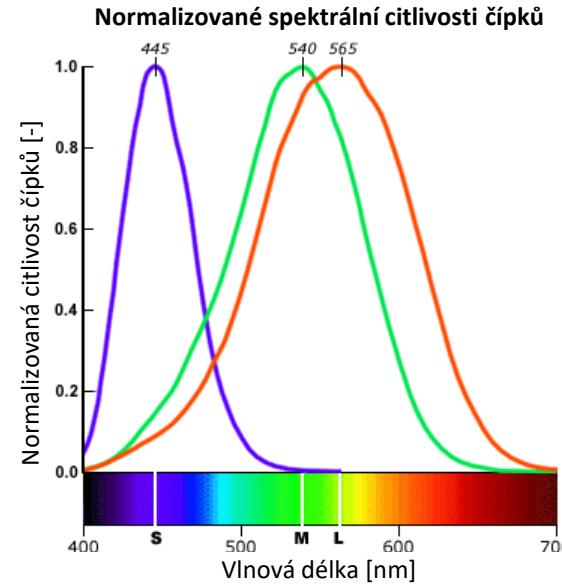
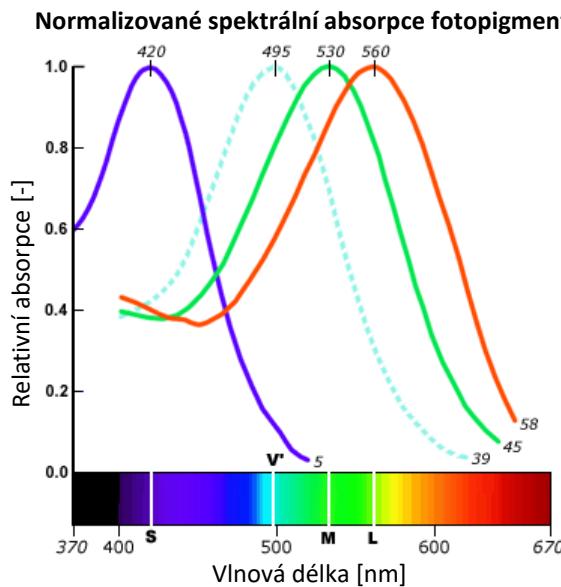
Radiometrické a fotometrické veličiny

Radiometrické veličiny		Fotometrické veličiny	
Název	Jednotka	Název	Jednotka
zářivý tok Φ_e	W (watt)	světelný tok Φ_v	lm (lumen)
zářivost I_e	$W \cdot sr^{-1}$	svítivost I_v	cd (candela) [lm · sr $^{-1}$]
zář, plošná zářivost L_e	$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	jas L_v	cd · m $^{-2}$ [lm · m $^{-2} \cdot sr^{-1}$]
intenzita vyzařování M_e	$W \cdot m^{-2}$	(intenzita) světlení M_v	lm · m $^{-2}$
intenzita ozáření E_e	$W \cdot m^{-2}$	(intenzita) osvětlení E_v	lx (lux) [lm · m $^{-2}$]
expozice (dávka ozáření) H_e	$W \cdot s \cdot m^{-2}$	expozice (osvit) H_v	lx · s

□ Spektrální citlivost receptorů a fotometrie

❖ Spektrální oblasti (vrchol absorpce, citlivost) pro tyčinky/čípky

- V' – skotopická (tyčinky) – (~495 nm, 505 nm)
- L – fotopická (čípky L) – (~560 nm, 565 nm)
- M – fotopická (čípky M) – (~530 nm, 540 nm)
- S – fotopická (čípky S) – (~420 nm, 445 nm)



□ Radiometrické a fotometrické veličiny

❖ Vztah mezi fotometrickou a radiometrickou veličinou

- Obor **vlnových délek záření budící zrakový vjem** ($\sim 360 - 830$ nm)
- **Oko není pro celý obor stejně citlivé**
 - Nejméně citlivé na **okrajích oboru** (nezanedbatelná odezva $\sim 380 - 780$ nm)
 - Nejvíce citlivé uprostřed pro **žlutozelené světlo** $\lambda_{\max} = 555$ nm

❖ Poměrná spektrální světelná účinnost $V_\lambda = V(\lambda) [-]$

- **Citlivost oka na světlo vlnové délky λ ve srovnání s $\lambda_{\max} = 555$ nm**

$$V_\lambda = V(\lambda) = \frac{\Phi_{e\lambda}(\lambda_{\max})}{\Phi_{e\lambda}(\lambda)} \leq 1$$

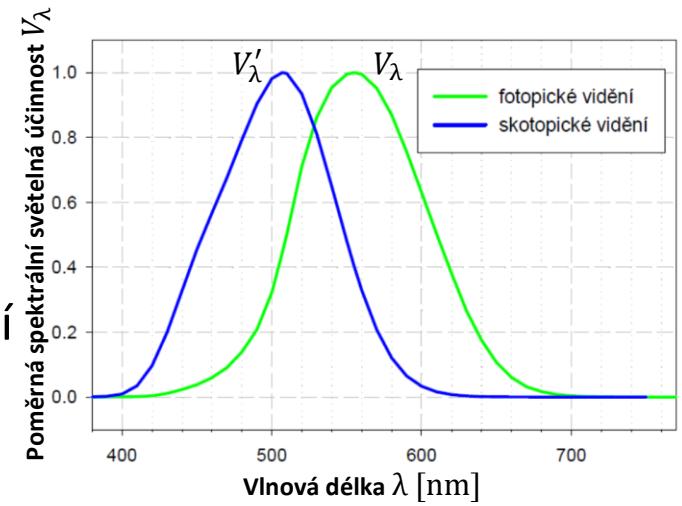
– $\Phi_{e\lambda}(\lambda)$ – spektrální hustota zářivého toku

❖ Světelná účinnost záření K

- **Světelný tok Φ_v , charakterizuje zhodnocení zářivého toku Φ_e normálním okem**

$$\Phi_v = K\Phi_e \quad [\text{lm}, \text{lm}/\text{W}, \text{W}]$$

– Uvažuje **rozdílnou citlivost na různé barvy**



□ Radiometrické a fotometrické veličiny

- ❖ Vztah mezi fotometrickou a radiometrickou veličinou
- ❖ Spektrální světelná účinnost $K(\lambda)$

- Poměr spektrální hustoty světelného toku $\Phi_{v\lambda}(\lambda)$ a spektrální hustoty zářivého toku $\Phi_{e\lambda}(\lambda)$

$$K(\lambda) = \frac{\Phi_{v\lambda}(\lambda)}{\Phi_{e\lambda}(\lambda)} \text{ [lm/W]}$$

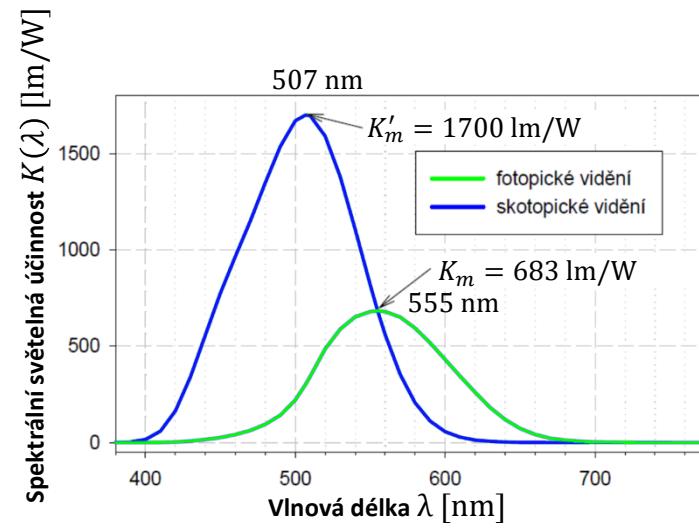
– $\Phi_{v\lambda}(\lambda)$ – spektrální hustota světelného toku a tok $\Phi_v = \int_0^{\infty} \Phi_{v\lambda}(\lambda) d\lambda$

- Největší spektrální účinnost pro záření s vlnovou délkou $\lambda = 555 \text{ nm}$

$$K_m = 683 \text{ lm/W}$$

- Vztah mezi spektrální světelnou účinností $K(\lambda) [\text{lm/W}]$ a poměrnou spektrální světelnou účinností $V_\lambda = V(\lambda)$

$$K(\lambda) = \frac{\Phi_{v\lambda}(\lambda)}{\Phi_{e\lambda}(\lambda)} = \frac{\Phi_{v\lambda}(\lambda)}{\Phi_{e\lambda}(\lambda_{\max})} V(\lambda) = K_m V(\lambda)$$



□ Radiometrické a fotometrické veličiny

- ❖ Vztah mezi fotometrickou a radiometrickou veličinou
- ❖ Výpočet světelného toku Φ_v [lm] ze zářivého Φ_e [W]
 - Vztah spektrální hustoty světelného $\Phi_{v\lambda}(\lambda)$ a zářivého toku $\Phi_{e\lambda}(\lambda)$
$$\Phi_{v\lambda}(\lambda) = K(\lambda)\Phi_{e\lambda}(\lambda) = K_m V(\lambda) \Phi_{e\lambda}(\lambda)$$
 - Vztah světelného toku Φ_v a spektrální hustoty zářivého toku $\Phi_{e\lambda}(\lambda)$

$$\Phi_v = K_m \int_0^{\infty} V(\lambda) \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda$$

– $V(\lambda)$ – poměrná spektrální světelná účinnost V_λ

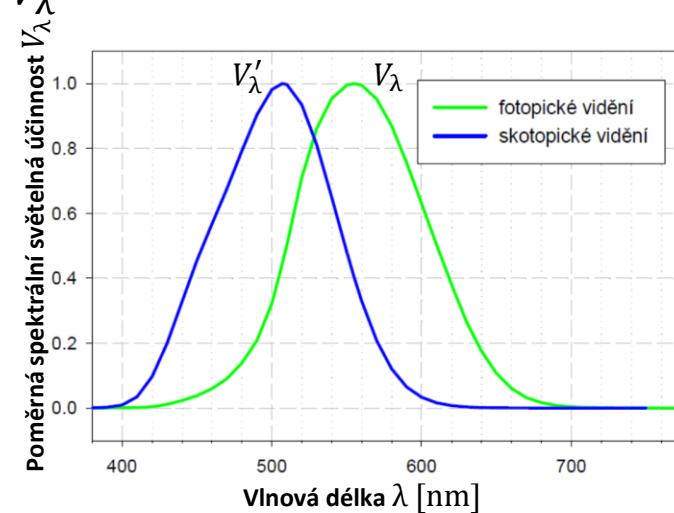
– $K_m = 683 \text{ lm/W}$ – největší spektrální účinnost pro $\lambda = 555 \text{ nm}$

- Pro skotopické vidění (soumrak, tyčinky)

$$\Phi_v = K'_m \int_0^{\infty} V'(\lambda) \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda$$

– $V'(\lambda)$ – skotopická V'_λ ($L_v < 10^{-3} \text{ cd m}^{-2}$)

– $K'_m = 1700 \text{ lm/W}$ – pro skotopické vidění a vlnovou délku $\lambda = 507 \text{ nm}$



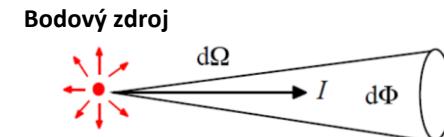
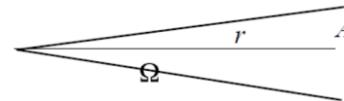
□ Zářivost a svítivost

- ❖ **Zářivost** I_e [$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$] a **svítivost** I_v [$\text{cd}, \text{lm} \cdot \text{sr}^{-1}$]

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

– $d\Omega$ – element prostorového úhlu

– Prostorový úhel $\Omega = \frac{A}{r^2}$ [sr]



□ Intenzita ozáření a osvětlení

- ❖ **Intenzita ozáření** E_e [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$] a **osvětlení** E_v [$\text{lx}, \text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$]

$$E = \frac{d\Phi}{dA}$$

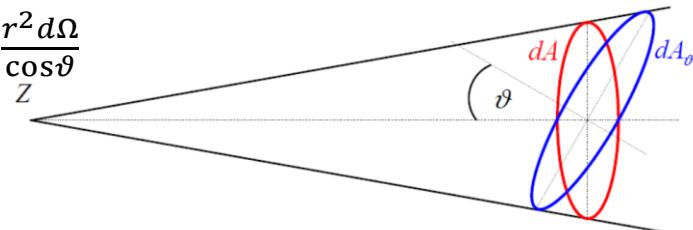
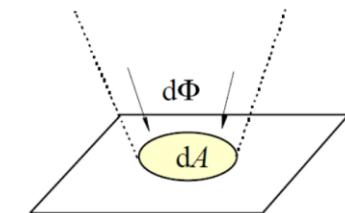
- **Osvětlení plošky pro bodový zdroj**

– Kolmá ploška $d\Omega = \frac{dA}{r^2}$

– Šikmý dopad pod úhlem ϑ platí $dA_\vartheta = \frac{dA}{\cos\vartheta} = \frac{r^2 d\Omega}{\cos\vartheta}$

$$E = \frac{d\Phi}{dA} = \frac{d\Phi}{d\Omega} \frac{\cos\vartheta}{r^2} = \frac{I}{r^2} \cos\vartheta$$

– Intenzita klesá se čtvercem vzdálenosti r^2



❑ Plošná zářivost (zář) a jas

- ❖ **Plošná zářivost L_e [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$] a jas L_v [$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$]** plošného zdroje

$$L = \frac{dI}{dS \cos\vartheta} = \frac{1}{\cos\vartheta} \frac{d^2\Phi}{dS d\Omega}$$

– Podíl svítivosti dI elementární plošky dS ve zvoleném směru ϑ a kolmého průmětu plošky v tomto směru

- ❖ **Lambertův zákon a kosinové zářiče**

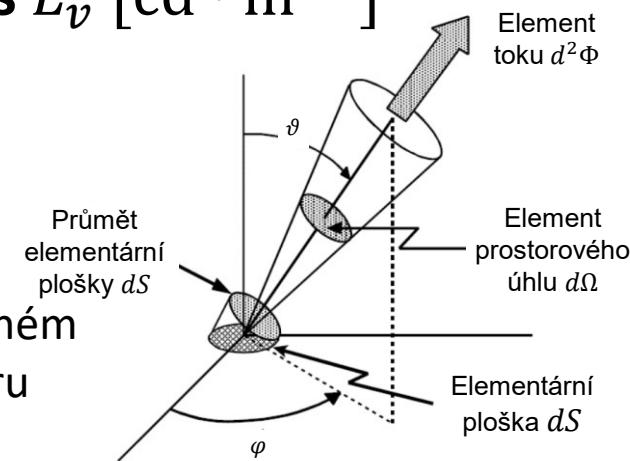
- **Svítivost klesá s kosinem odklonu od kolmice**

$$\Delta I_\vartheta = \Delta I_n \cos\vartheta$$

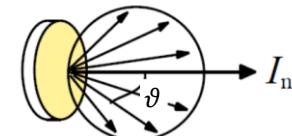
- **Jas L_v kosinového zářiče**

$$L_\vartheta = \frac{\Delta I_\vartheta}{\Delta S_\vartheta} = \frac{\Delta I_n \cos\vartheta}{\Delta S \cos\vartheta} = L_n$$

– **Jas L_ϑ nezávisí na sklonu ϑ její normály od směru pozorování plošky**



$$\Delta I_\vartheta = \Delta I_n \cos\vartheta$$

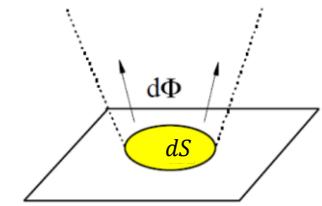


□ Intenzita vyzařování a světlení

❖ Intenzita vyzařování M_e [$\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$] a světlení M_v [$\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$]

$$M = \frac{d\Phi}{dS}$$

- Podíl elementu světelného toku $d\Phi$, který elementární ploška dS vysílá do celého poloprostoru



- Vztah mezi světlením M a jasem L pro kosinový zářič

- Elementární prostorový úhel $d\Omega$

$$d\Omega = \frac{dS}{r^2} = \frac{2\pi r \sin\vartheta r d\vartheta}{r^2} = 2\pi \sin\vartheta d\vartheta$$

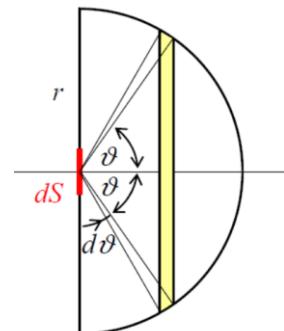
- Tok $d(\Delta\Phi)_\vartheta$ připadající z celkového toku $\Delta\Phi$ na prostorový úhel $d\Omega$

$$d(\Delta\Phi)_\vartheta = \Delta I_\vartheta d\Omega = L_\vartheta \Delta S \cos\vartheta d\Omega = 2\pi L_\vartheta \Delta S \sin\vartheta \cos\vartheta d\vartheta$$

$$\Delta\Phi = 2\pi L_n \Delta S \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin\vartheta \cos\vartheta d\vartheta = \pi L_n \Delta S = \pi \Delta I_n$$

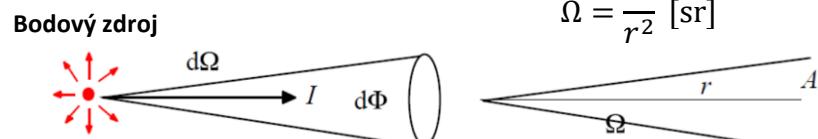
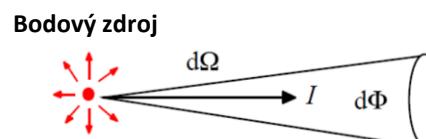
- Pro intenzitu světlení M a jas L platí

$$M = \frac{d\Phi}{dS} = \pi \frac{\Delta I_n}{\Delta S} = \pi L_n$$



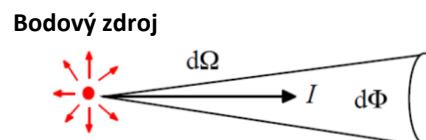
□ Radiometrické a fotometrické veličiny

Radiometrické veličiny		Fotometrické veličiny	
Název	Jednotka	Název	Jednotka
zářivý tok Φ_e	W (watt)	světelný tok Φ_v	lm (lumen)
Výkon přenášený optickým zářením <ul style="list-style-type: none"> Určen energií dQ_e procházející sledovaným místem (plochou) za čas dt $\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$ 		Schopnost zářivého toku vyvolat vjem <ul style="list-style-type: none"> Světelný tok vysílaný z přibližně bodového zdroje do prostorového úhlu Ω je určen integrálem svítivosti I v oboru tohoto úhlu Je součinem střední svítivosti \bar{I} a velikosti úhlu Ω $\Phi = \int_0^\Omega I d\Omega = \bar{I} \Omega$ 	

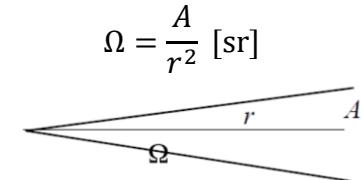


□ Radiometrické a fotometrické veličiny

Radiometrické veličiny		Fotometrické veličiny	
Název	Jednotka	Název	Jednotka
zářivost I_e	$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$	svítivost I_v	cd (candela) [lm · sr $^{-1}$]
<p>Schopnost přibližně bodového zdroje vyzařovat v daném směru</p> <ul style="list-style-type: none"> Podíl elementárního zářivého toku $d\Phi_e$ a elementárního prostorového úhlu $d\Omega$ v němž je tento tok vyzařován $I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$ 		<p>Schopnost přibližně bodového zdroje vyvolat v daném směru zrakový vjem</p> <ul style="list-style-type: none"> Podíl elementárního světelného toku $d\Phi_v$ a elementárního prostorového úhlu $d\Omega$ v němž je tento tok vyzařován $I = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}$ Základní fotometrická veličina 	



Bodový zdroj



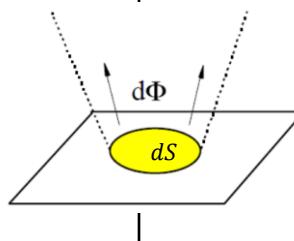
□ Radiometrické a fotometrické veličiny

Radiometrické veličiny		Fotometrické veličiny	
Název	Jednotka	Název	Jednotka
zář, plošná zářivost L_e	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$	jas L_ν	$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ [$\text{lm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$]
<ul style="list-style-type: none"> Je určena podílem zářivosti dI_e elementární plošky o obsahu dS zdroje ve zvoleném směru ϑ a kolmého průmětu plošky v tomto směru $L_e = \frac{dI_e}{dS \cos\vartheta} = \frac{1}{\cos\vartheta} \frac{d^2\Phi_e}{dS d\Omega}$ 		<ul style="list-style-type: none"> Je určen podílem svítivosti dI_ν elementární plošky o obsahu dS zdroje ve zvoleném směru ϑ a kolmého průmětu plošky v tomto směru $L_\nu = \frac{dI_\nu}{dS \cos\vartheta} = \frac{1}{\cos\vartheta} \frac{d^2\Phi}{dS d\Omega}$ 	

The diagram illustrates the geometry of radiometry and photometry. It shows a point source at the origin of a coordinate system defined by angles φ (azimuth) and ϑ (elevation). A small element of surface area dS is shown at an angle φ from the horizontal axis. A vertical cylinder of height dS represents the element of solid angle $d\Omega$. An arrow labeled "Element toku $d^2\Phi$ " points along the vertical axis. The diagram also shows the projection of the surface element dS onto the horizontal plane.

□ Radiometrické a fotometrické veličiny

Radiometrické veličiny		Fotometrické veličiny	
Název	Jednotka	Název	Jednotka
intenzita vyzařování M_e	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	(intenzita) světlení M_v	$\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$
<ul style="list-style-type: none"> Je určena podílem zářivého toku $d\Phi_e$ vysílaného danou ploškou zdroje do poloprostoru a obsahu dS této plošky $M_e = \frac{d\Phi_e}{dS}$ 		<ul style="list-style-type: none"> Je určeno podílem světelného toku $d\Phi_v$ vysílaného danou ploškou zdroje do poloprostoru a obsahu dS této plošky $M_v = \frac{d\Phi_v}{dS}$ 	



□ Radiometrické a fotometrické veličiny

Radiometrické veličiny		Fotometrické veličiny	
Název	Jednotka	Název	Jednotka
intenzita ozáření E_e	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	(intenzita) osvětlení E_v	lx (lux) $[\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}]$
<ul style="list-style-type: none"> Je určena podílem zářivého toku $d\Phi_e$ a obsahu dA plošky, na kterou tento tok dopadá $E_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$ $E_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \frac{\cos\vartheta}{r^2} = \frac{I_e}{r^2} \cos\vartheta$ 		<ul style="list-style-type: none"> Je určeno podílem světelného toku $d\Phi_v$ a obsahu dA plošky, na kterou tento tok dopadá $E_v = \frac{d\Phi_v}{dA}$ $E_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} \frac{\cos\vartheta}{r^2} = \frac{I_v}{r^2} \cos\vartheta$ 	

□ Radiometrické a fotometrické veličiny

Radiometrické veličiny		Fotometrické veličiny	
Název	Jednotka	Název	Jednotka
expozice (dávka ozáření) H_e	$\text{W} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$	expozice (osvit) H_ν	$\text{lx} \cdot \text{s}$
<ul style="list-style-type: none">Plošná hustota zářivé energie, která dopadla na danou plochu v časovém intervalu od $t_0 = 0$ do tSoučin střední intenzity ozáření \bar{E}_e a doby t, po kterou ozáření působí$H_e = \bar{E}_e t$		<ul style="list-style-type: none">Plošná hustota světelného množství, které dopadlo na danou plochu v časovém intervalu od $t_0 = 0$ do tSoučin středního osvětlení \bar{E}_ν a doby t, po kterou osvětlení působí$H = \bar{E}_\nu t$	

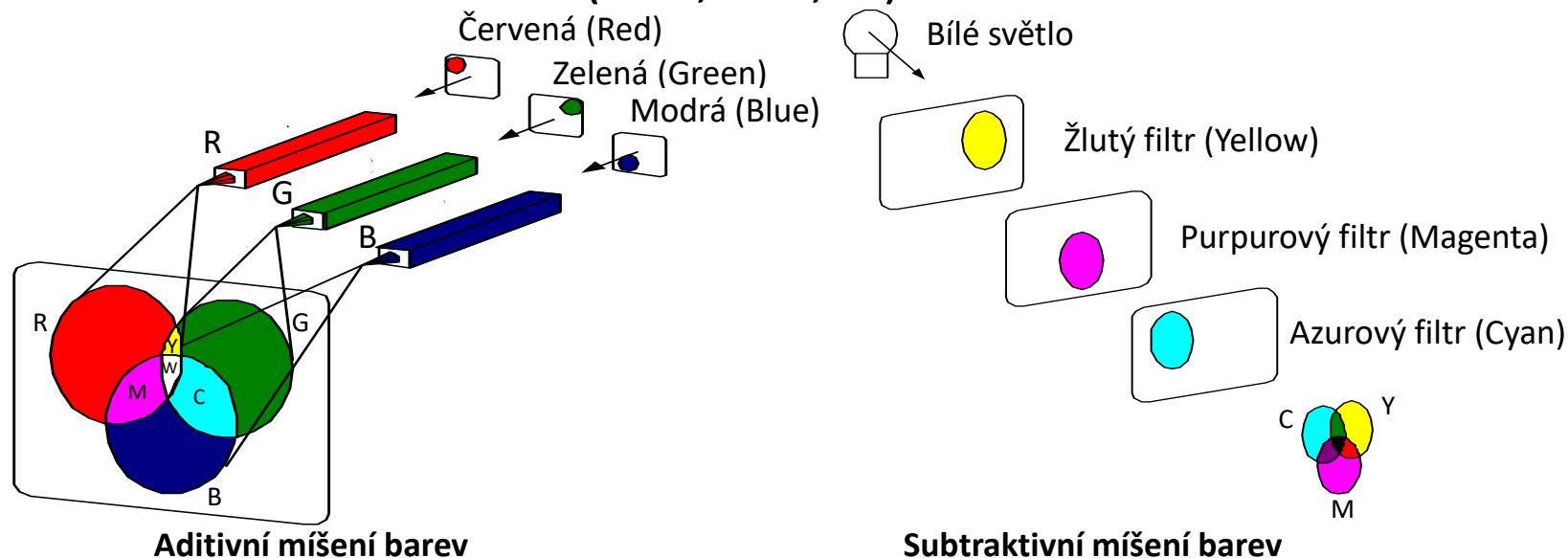
□ Kolorimetrie ...

❖ Obor zabývající se měřením a popisem barev

- Vjem barvy je psychovizuální jev ...
- ... ale barvy lze měřit a kvantifikovat

□ Mechanismus vzniku barev – míšení barev

- ❖ Aditivní – sčítací (elektronické zobrazovače, displeje, ...)
- ❖ Subtraktivní – odečítací (film, tisk, ...)



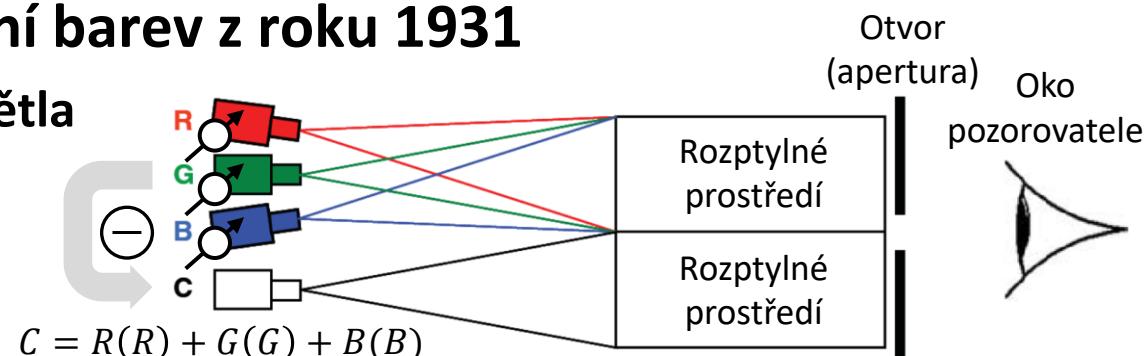
- Experiment vyvážení barev (subjektivní kolorimetr)
 - ❖ Vyvážení (color matching) porovnáním dvou projekcí
 - ❖ Pozorovatel nastavuje intenzitu projekce pro vyvážení barvy
- Princip trichromatického vyvážení barev

- ❖ Aditivní míšení tří světel - Red, Green a Blue
 - Množství světel (R), (G) a (B) lze řídit a uživatelsky nastavit
 - Světlo C s neznámou/měřenou barvou (Color) pro vyvážení
 - Difuzní prostředí pro dosažená rovnoměrného pole pro pozorovatele
- ❖ Experiment vyvážení barev z roku 1931

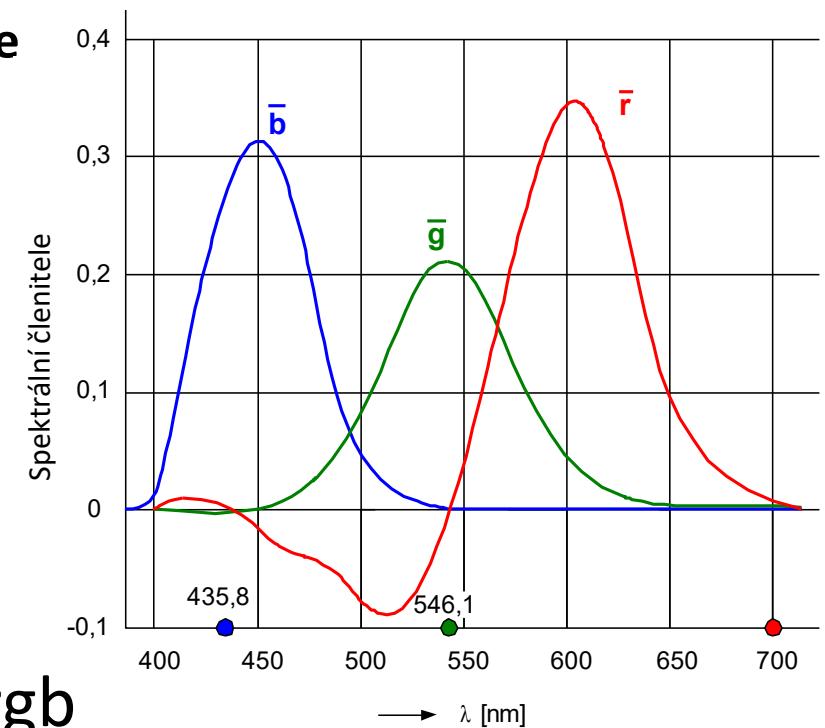
- Monochromatická světla

- Red 700 nm
- Green 546.1 nm
- Blue 435.8 nm

- Pro některá C je nutno (R), (G) a (B) přesunout k C (negativní odezva)

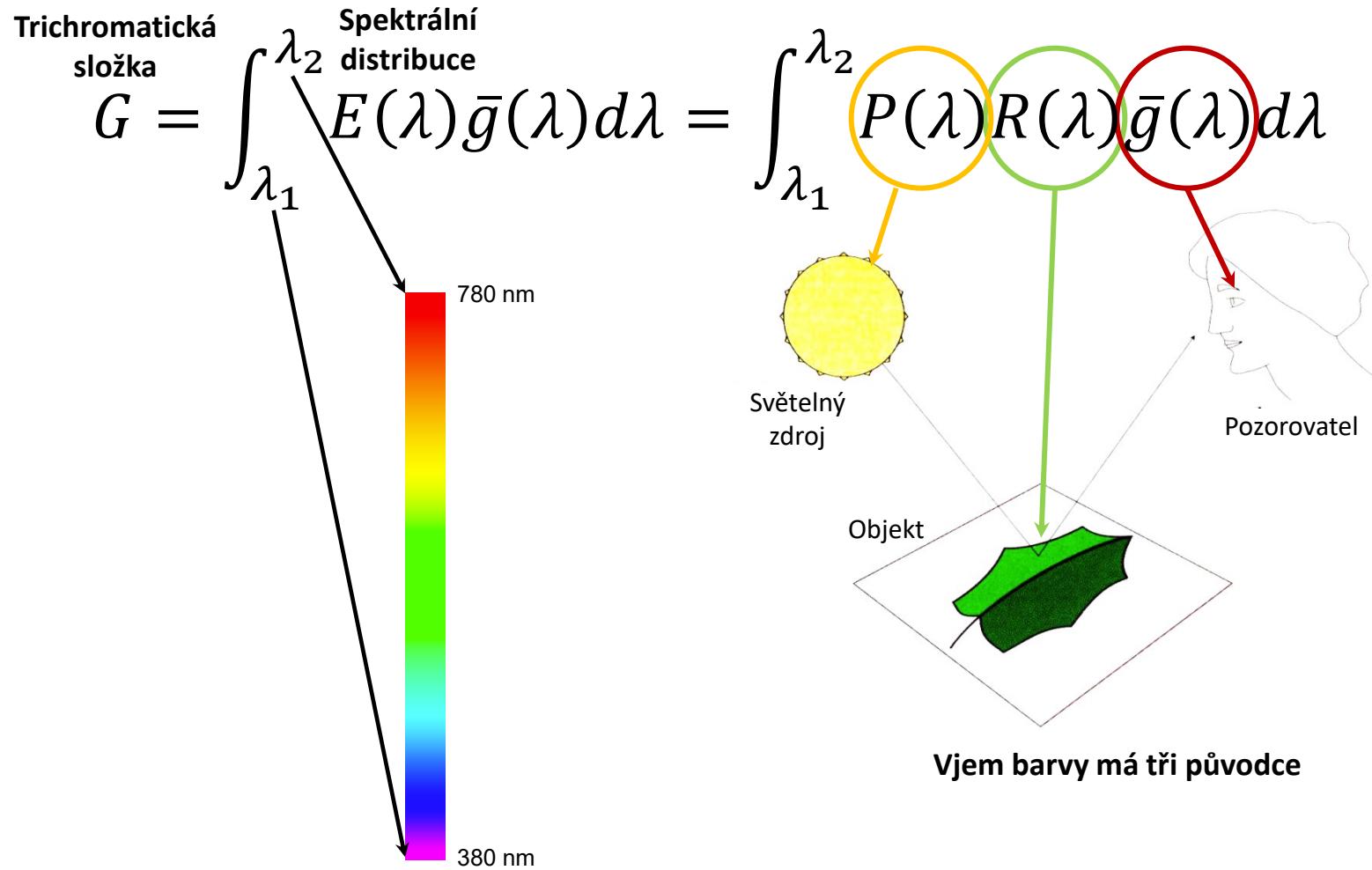


- Trichromatický systém CIE RGB (1931)
 - ❖ CIE (International Commission on Illumination)
 - Trichromatické členitele (CMF)
 - Číselný popis odezvy pozorovatele
(color matching functions)
 - $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$
 - Trichromatické složky RGB
- $R = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda$
 $G = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda$
 $B = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda$



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

□ Od spektra ke kolorimetrickému popisu světla



□ Trichromatický systém CIE RGB a CIE XYZ

❖ Konstrukce CIE XYZ diagramu

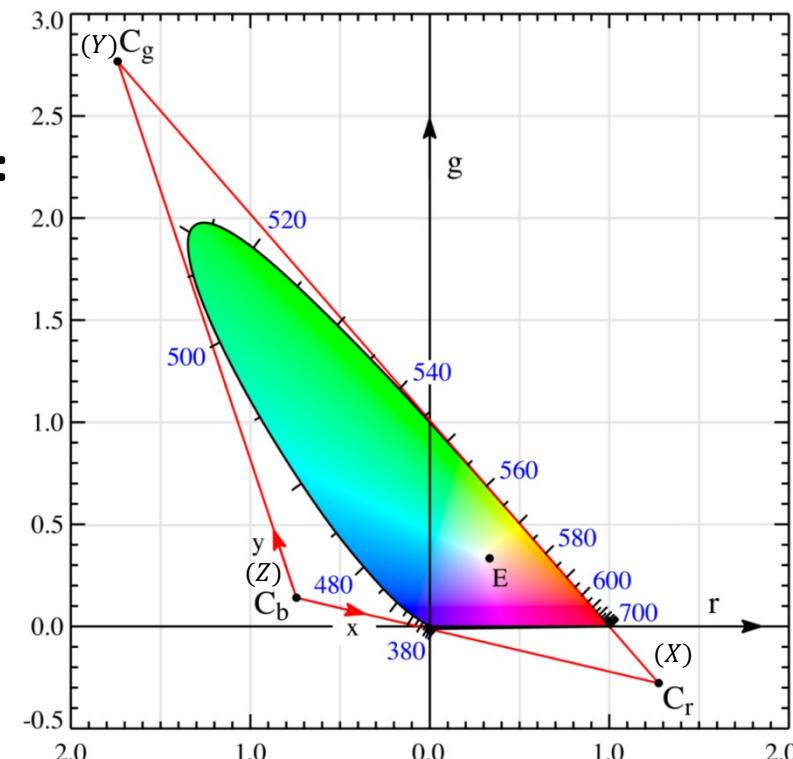
- CIE modifikovala CIE RGB
- Na základě dvou hlavních požadavků:
 - (1) kladné hodnoty členitelů CMF
 - (2) jedna CMF jako fotopická poměrná spektrální světelná účinnost V_λ

❖ Reálná (CIE RGB) a nereálná/neskutečná (CIE XYZ) základní světla

❖ Výsledná transformace pro CMF

- Přepočet CIE RGB $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$ na CIE XYZ $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.49 & 0.31 & 0.20 \\ 0.17697 & 0.81240 & 0.01063 \\ 0.00 & 0.01 & 0.99 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$



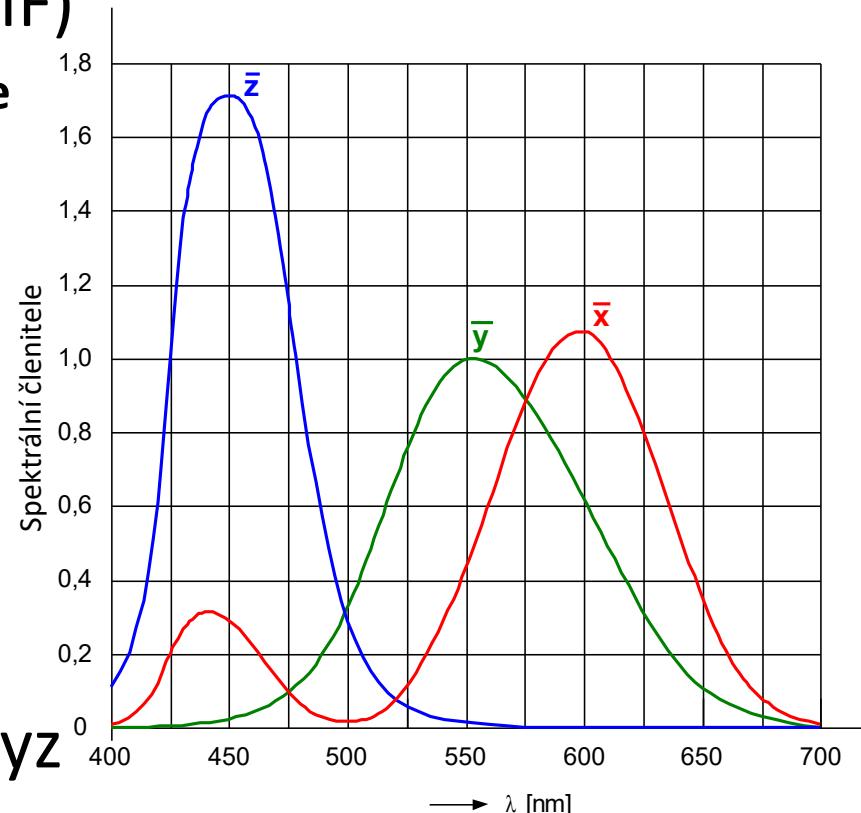
- Trichromatický systém CIE XYZ (1931)
 - ❖ Nereálná základní světla X, Y a Z - CIE XYZ
- Trichromatické členitele (CMF)
 - Číselný popis odezvy pozorovatele
(color matching functions)
 - $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$
- Trichromatické složky XYZ

$$X = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$
- Trichromatické souřadnice xyz

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, y = \frac{Y}{X+Y+Z}, z = \frac{Z}{X+Y+Z}, x + y + z = 1$$



□ Trichromatický systém CIE XYZ (1931)

❖ Nereálná základní světla X, Y a Z - CIE XYZ

❖ Výpočet trichromatických složek

- V reálných podmírkách – spektrální distribuce **barevného stimulu** $E(\lambda)$ dána **součinem** ...
 - Spektrální výkonové distribuce (SPD) $P(\lambda)$ zdroje
 - Spektrální odrazivosti předmětu $R(\lambda)$
 - Průběhy členitelů CMF standardního pozorovatele
- ... a **integrací** přes **viditelné vlnové délky**

❖ Trichromatické složky XYZ

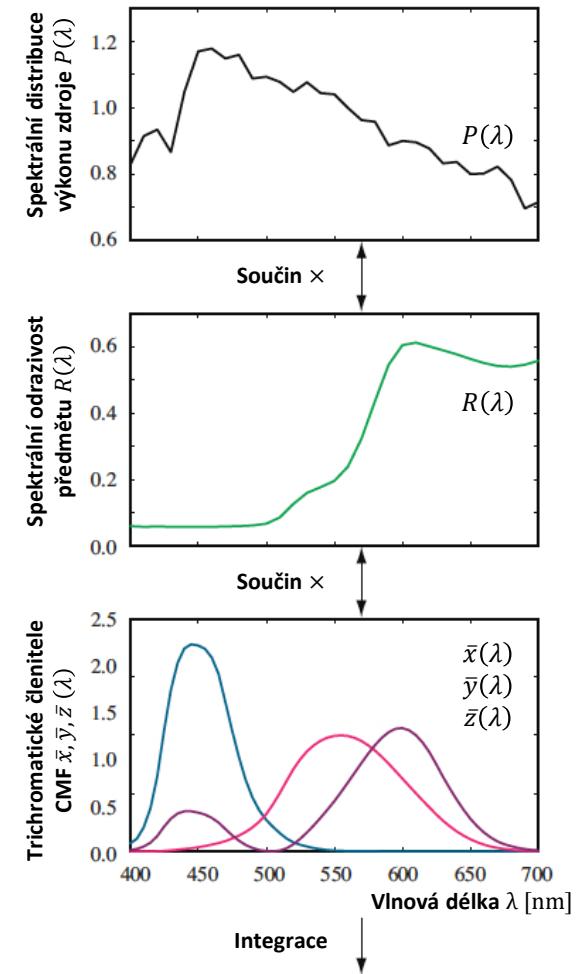
$$X = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda) R(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda) R(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda) R(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

- Trichromatické **souřadnice xyz**

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, y = \frac{Y}{X+Y+Z}, z = \frac{Z}{X+Y+Z}, x + y + z = 1$$



☐ Tabelované průběhy kolorimetrických funkcí

❖ Color & Vision Research Laboratory (CVRL)

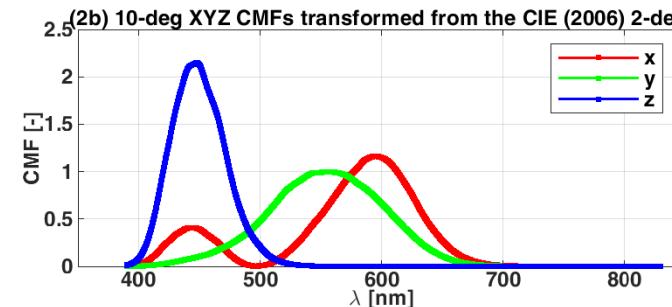
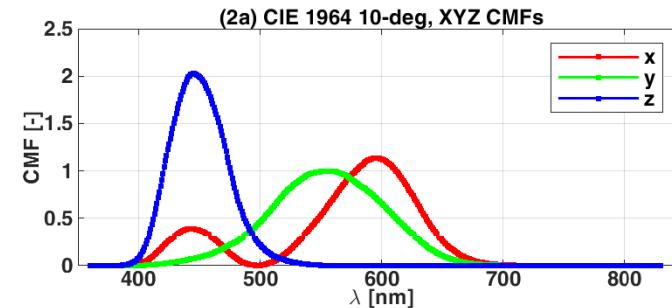
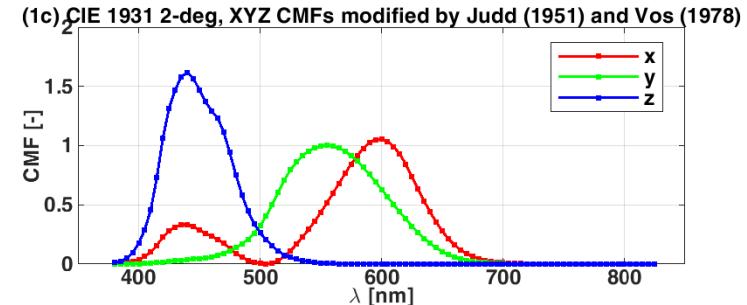
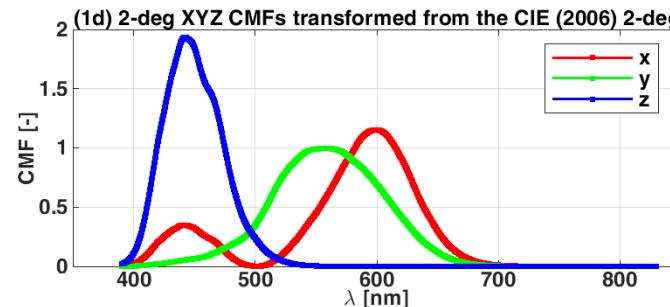
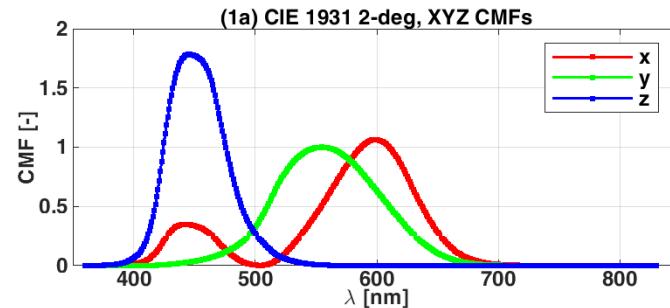
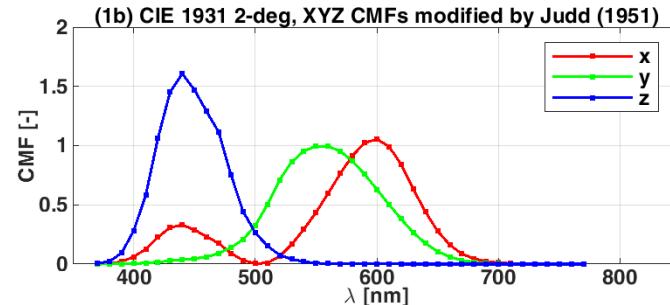
<http://www.cvrl.org/>

- Přesnější výsledky pozdějších experimentů (1931, 1964, ...)

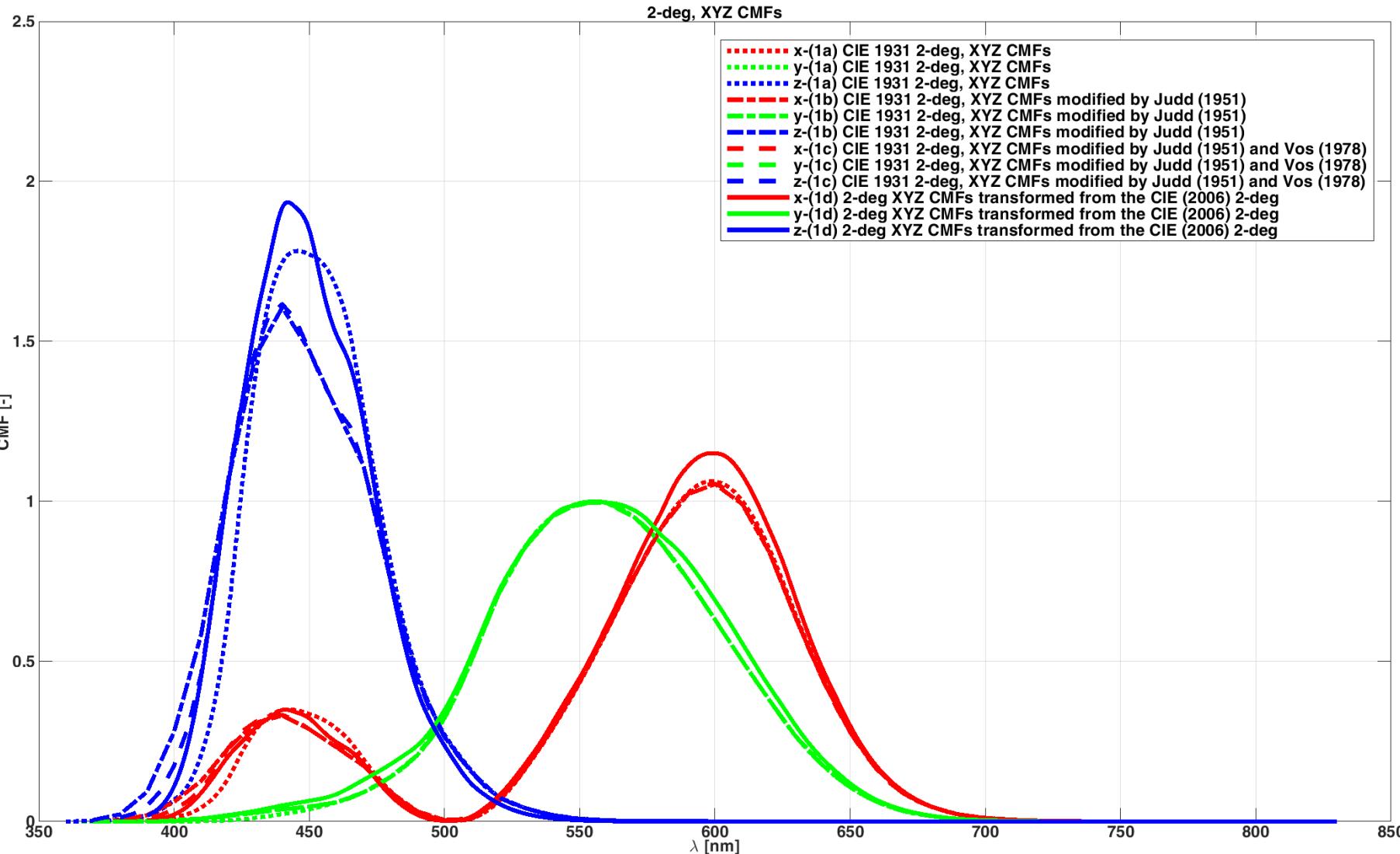
❖ Porovnání členitelů CMF pro různé pozorovací úhly

- (1) Pozorovatel 2° (pozorovací úhel 2°)
 - (1a) CIE 1931 2-deg, XYZ CMFs (standardizace CIE 1931)
 - (1b) CIE 1931 2-deg, XYZ CMFs modifikace Judd (1951)
 - (1c) CIE 1931 2-deg, XYZ CMFs modifikace Judd (1951) a Vos (1978)
 - (1d) 2-deg XYZ CMFs transformace z CIE (2006) 2-deg LMS spektrálních citlivostí čípků
- (2) Pozorovatel 10° (pozorovací úhel 10°)
 - (2a) CIE 1964 10-deg, XYZ CMFs (standardizace CIE 1964)
 - (2b) 10-deg XYZ CMFs transformace z CIE (2006) 2-deg LMS spektrálních citlivostí čípků

❖ Porovnání členitelů CMF pro různé pozorovací úhly



❖ Pozorovatel 2° - spektrální členitele CMF



□ Trichromatický systém CIE XYZ (1931)

❖ Barva nemá vztah k Y (jas) trichromatické složky

- Projekce složek XYZ na XY osy
- Tento prostor obsahuje pouze informaci o barvě

❖ Diagram chromatičnosti

- Chromatické souřadnice
 - Trichromatické souřadnice bez informace o jasu

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, y = \frac{Y}{X+Y+Z}, z = \frac{Z}{X+Y+Z}, x + y + z = 1$$

❖ Možnost plného popisu barevného světla

- Poskytnutí Y a 2 zbývajících souřadnic xy

$$Yxy \rightarrow z = 1 - x - y$$

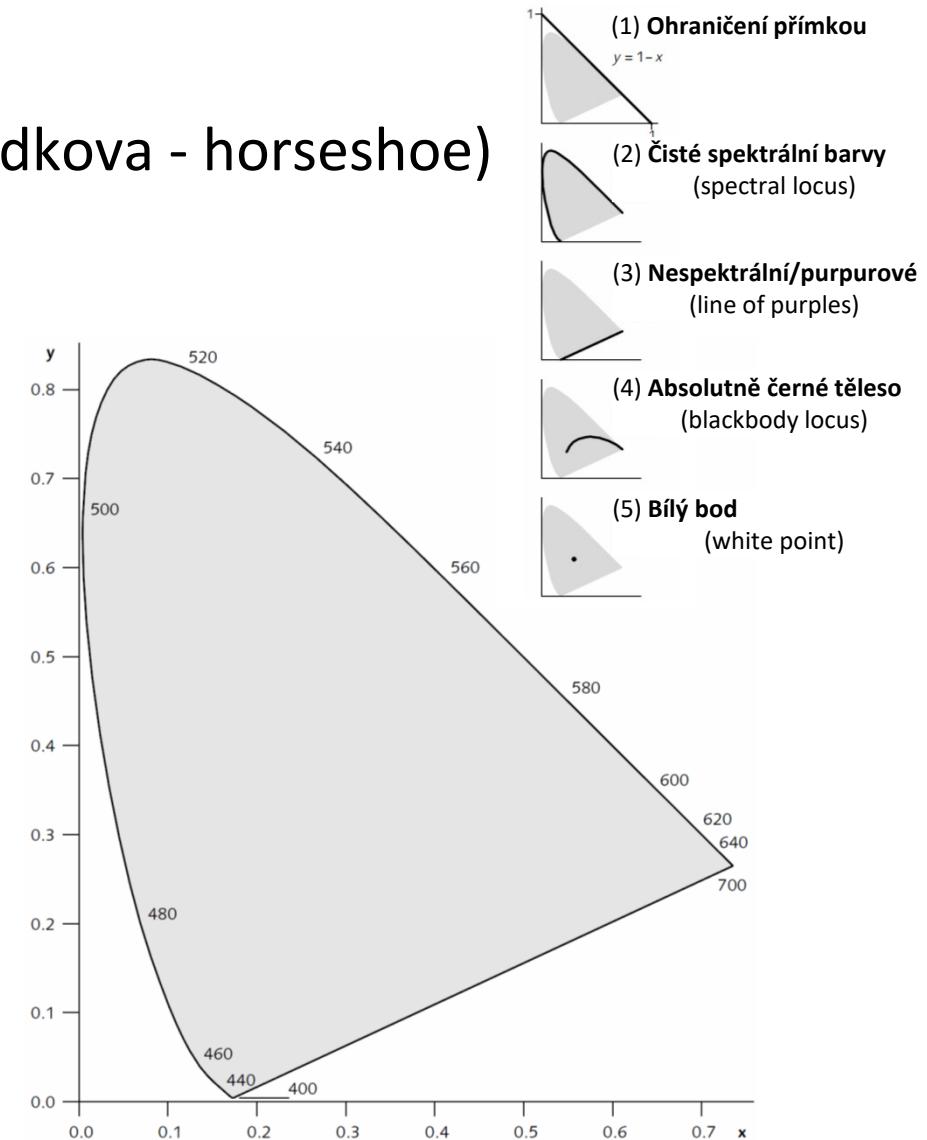
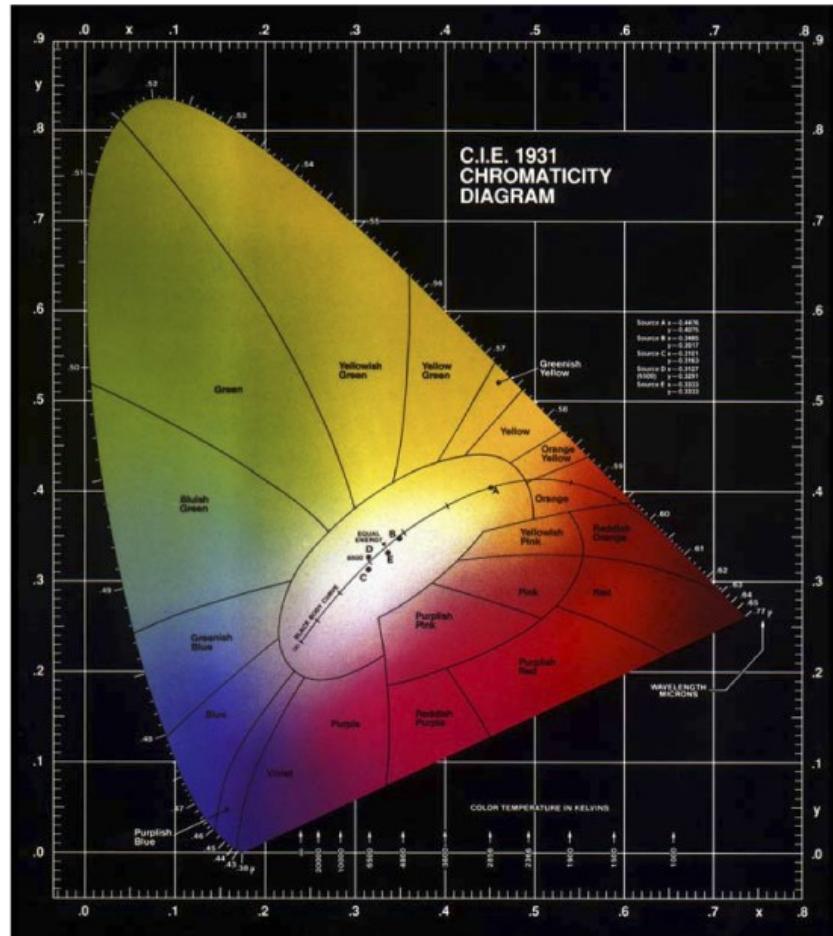
$$X = \frac{x}{y}Y, Z = \frac{z}{y}Y$$

❖ Vykreslení barev do xy prostoru

- Výsledkem je CIE xy diagram chromatičnosti

□ Diagram CIE xy (1931)

❖ Diagram chromatičnosti (podkova - horseshoe)



□ Diagram CIE xy (1931)

❖ Diagram chromatičnosti (podkova - horseshoe)

❖ Nespektrální purpurové barvy

- Nepopisují spektrální barvy
- Lineární kombinace dvou stimulů na krátké a dlouhé vlnové délce

❖ Barvy

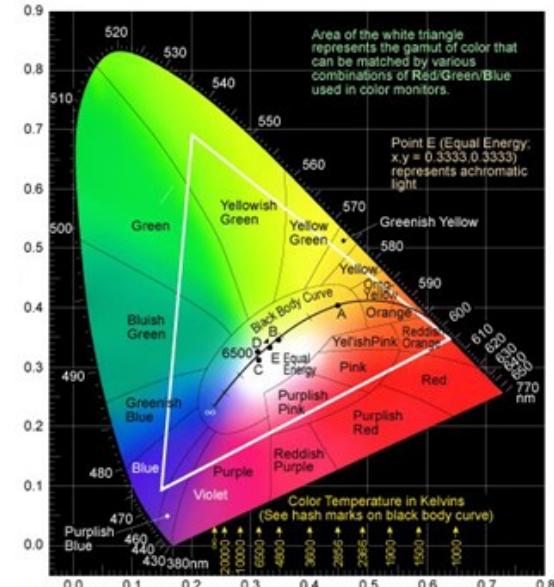
- Reprezentovány body uvnitř (nebo na obvodu) CIE xy diagramu/podkovy

❖ Míšení 2 barev

- Pohyb po interpolační přímce mezi barvami

❖ Míšení 3 barev

- Interpolace uvnitř trojúhelníku
- Rozsah reprodukovatelných barev (gamut)



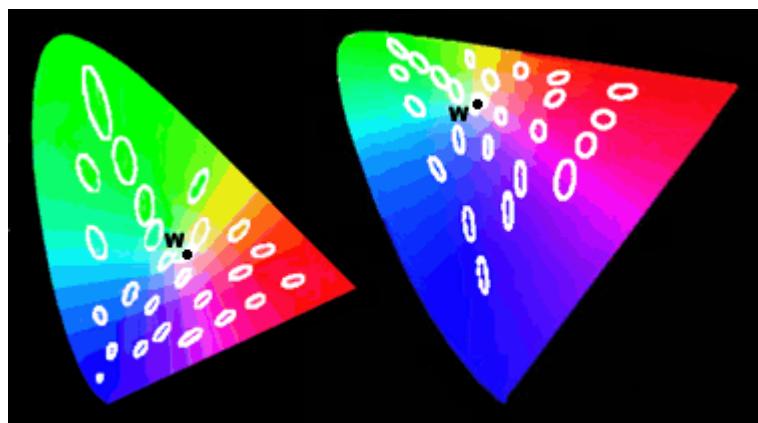
❑ Rozlišení barevných rozdílů (MacAdam) – CIE XYZ (1931)

❖ JND – Just Noticeable Difference

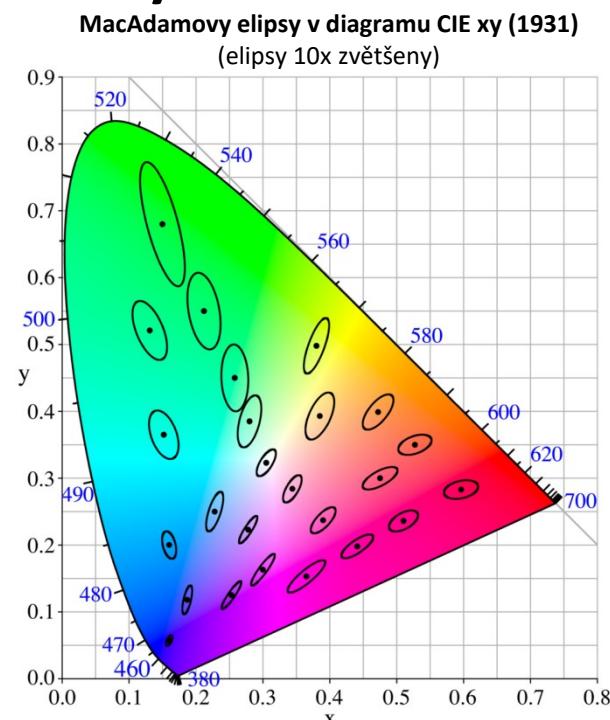
- MacAdam studoval vnímání barevných rozdílů (MacAdamovy elipsy)
- CIE XYZ (1931) výrazně neuniformní popis vnímaných barevných rozdílů

❖ Požadavek uniformní reprezentace barevných rozdílů

- Návrh vhodného uniformního barevného prostoru UCS (uniform color space)
- Elipsy přechází téměř v kružnice



MacAdamovy elipsy v diagramu CIE xy (1931) a CIE uv (1976)
(elipsy 10x zvětšeny)



https://en.wikipedia.org/wiki/MacAdam_ellipse
<https://www.handprint.com/HP/WCL/color2.html>

□ Diagram stejných barevných rozdílů CIE Luv (1976)

❖ Vyrovnává barevné rozdíly vzhledem ke vnímání barev

- Vztah XYZ a L*u*v*
- Nelineární transformace

$$L^* = \begin{cases} \left(\frac{29}{3}\right)^3 \left(\frac{Y}{Y_n}\right) & \frac{Y}{Y_n} \leq \left(\frac{6}{29}\right)^3 \\ 116\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3} - 16 & \frac{Y}{Y_n} > \left(\frac{6}{29}\right)^3 \end{cases}$$

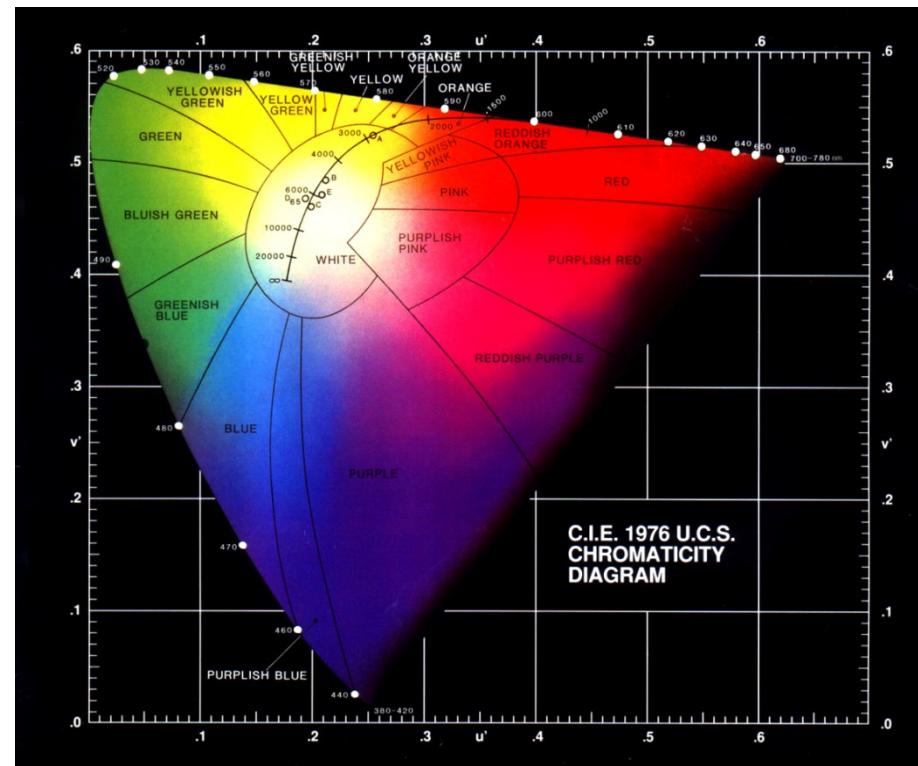
$$u^* = 13L^* (u' - u'_n)$$

$$v^* = 13L^* (v' - v'_n)$$

$$u' = \frac{4x}{-2x+12y+3} = \frac{4X}{X+15Y+3Z}$$

$$v' = \frac{9y}{-2x+12y+3} = \frac{9Y}{X+15Y+3Z}$$

- Index n – souřadnice bílého bodu
- CIE doporučuje pro barevné zářící povrchy (světelné zdroje)



□ Barevný prostor CIE Lab (1976)

❖ Využití oponentních barevných složek

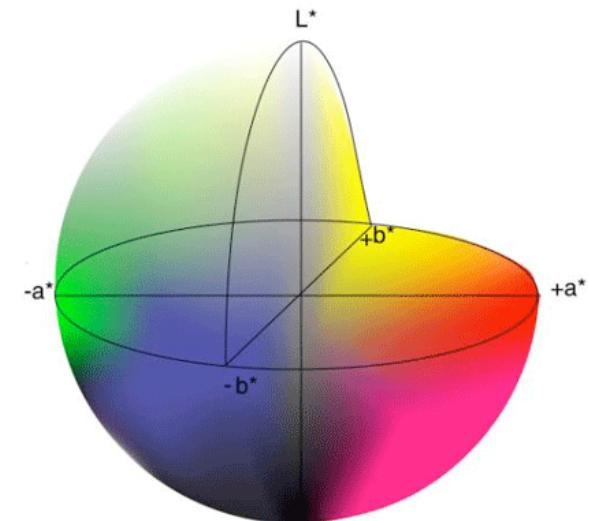
- L – lightness – světlost (L = 0 - černá, L = 100 - bílá)
- a, b – barevné složky – zeleno-červená, modro-žlutá (a = 0, b = 0 – šedá)
- Nelineární komprese CIE XYZ – perceptuálně (vjemově) uniformní

$$L^* = 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16$$

$$a^* = 500 \left\{ f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right\}$$

$$b^* = 200 \left\{ f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right\}$$

$$f\left(\frac{X}{X_n}\right) = \begin{cases} \frac{841}{108} \left(\frac{X}{X_n}\right) + \frac{16}{116} & \frac{X}{X_n} \leq \left(\frac{24}{116}\right)^3 \\ \left(\frac{X}{X_n}\right)^{1/3} & \frac{X}{X_n} > \left(\frac{24}{116}\right)^3 \end{cases}$$



- Index n – souřadnice bílého bodu
- CIE doporučuje pro barevné odrazné povrchy – nahrazuje CIE Luv

❑ Měření barevných rozdílů

- ❖ Perceptuální relevance pro uniformní prostory UCS

❑ Barevný prostor Lab

- ❖ Vzdálenost dvou barev v prostoru Lab

- Index T (trial) – měření, S (standard) – reference

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

$$\Delta L^* = L_T^* - L_S^*$$

$$\Delta a^* = a_T^* - a_S^*$$

$$\Delta b^* = b_T^* - b_S^*$$

- Obvyklý limit pro nerozlišitelný vjem barvy $\Delta E_{ab}^* < 1$

❑ Perceptuálně uniformní vzdálenost CIEDE2000

- ❖ Nejrozšířenější současná metrika

- Doporučení používat pro malé rozdíly
- Pro $\Delta E_{ab}^* > 5$ doporučeno používat vzdálenost v Lab

□ Perceptuálně uniformní vzdálenost CIEDE2000

$$\Delta E_{00} = \left[\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H} \right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C} \right) \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

- S_L, S_C, S_H a R_T - **váhovací funkce** závislé na světlosti, odstínu a sytosti
- R_T - **korekce** rozdílu odstínu a sytosti v **modré oblasti prostoru CIELAB**
- Další **korekční faktory** k_L, k_C a k_H

❖ Metrika určena k **porovnání barev větších ploch**

- Problematické použití v **případě složitých vzorů**
- Nejčastější **aplikace prostorovým průměrováním**

ΔE_{min}	ΔE_{max}	Vnímaný rozdíl
0,0	0,5	Hardly
0,5	1,5	Slight
1,5	3,0	Noticeable
3,0	6,0	Appreciable
6,0	12,0	Much
12,0	24,0	Very much
24,0	∞	Strongly

❑ Barevná testovací tabulka

❖ ColorChecker color rendition chart (Macbeth/x-rite)

- Představena roku **1976** (používána ~50 let)
- **24 políček** pro **přirozené barvy** předmětů, ...
 - Lidská pokožka, listová zeleň, květiny, ...

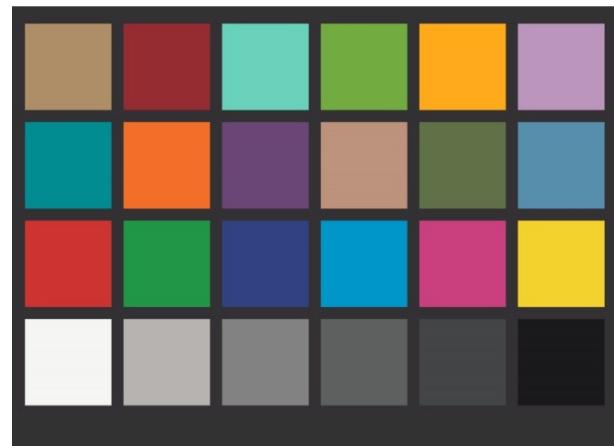
❖ Kolorimetrická data (x-rite vs. BST4D)

No.	Number	sRGB			CIE L*a*b*		
		R	G	B	L*	a*	b*
1.	dark skin	115	82	68	37.986	13.555	14.059
2.	light skin	194	150	130	65.711	18.13	17.81
3.	blue sky	98	122	157	49.927	-4.88	-21.925
4.	foliage	87	108	67	43.139	-13.095	21.905
5.	blue flower	133	128	177	55.112	8.844	25.399
6.	bluish green	103	189	170	70.719	-33.397	-0.199
7.	orange	214	126	44	62.661	36.067	57.096
8.	purplish blue	80	91	166	40.02	10.41	-45.964
9.	moderate red	193	90	99	51.124	48.239	16.248
10.	purple	94	60	108	30.325	22.976	-21.587
11.	yellow green	157	188	64	72.532	-23.709	57.255
12.	orange yellow	224	163	46	71.941	19.363	67.857
13.	blue	56	61	150	28.778	14.179	-50.297
14.	green	70	148	73	55.261	-38.342	31.37
15.	red	175	54	60	42.101	53.378	28.19
16.	yellow	231	199	31	81.733	4.039	79.819
17.	magenta	187	86	149	51.935	49.986	-14.574
18.	cyan	8	133	161	51.038	-28.631	-28.638
19.	white (.05*)	243	243	242	96.539	-0.425	1.186
20.	neutral 8 (.23*)	200	200	200	81.257	-0.638	-0.335
21.	neutral 6.5 (.44*)	160	160	160	66.766	-0.734	-0.504
22.	neutral 5 (.70*)	122	122	121	50.867	-0.153	-0.27
23.	neutral 3.5 (.105*)	85	85	85	35.656	-0.421	-1.231
24.	black (1.50*)	52	52	52	20.461	-0.079	-0.973

x-rite ColorChecker

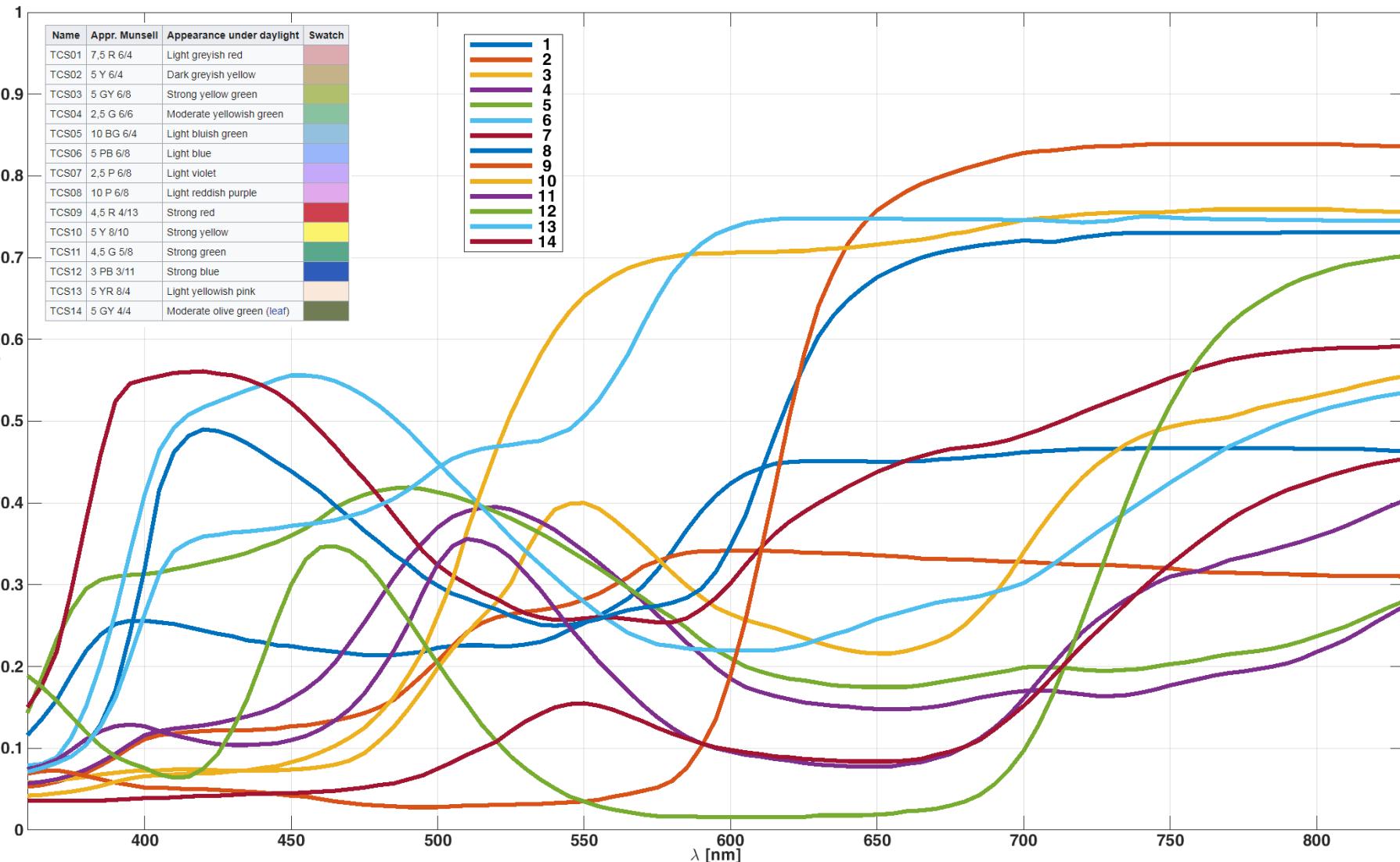
Position	Color	CIE L*a*b* (D50)		
		L*	a*	b*
A 1	Light Brown	62.52	9.22	25.34
A 2	Ruby	37.93	42.00	20.54
A 3	Mint Green	77.55	-36.29	-0.44
A 4	Lemon Green	64.98	-34.43	45.21
A 5	Warm Yellow	78.94	24.61	74.21
A 6	Lila	68.48	20.17	-15.35
B 1	Turquoise Blue	58.75	-47.34	-12.87
B 2	Orange	63.86	47.94	59.32
B 3	Purple	36.39	23.29	-20.50
B 4	Light Skin	73.98	16.61	18.24
B 5	Foliage	50.44	-12.27	15.34
B 6	Sky	56.02	-11.69	-24.66
C 1	Red	50.19	62.65	41.78
C 2	Green	52.31	-50.95	24.04
C 3	Blue	34.02	-0.59	-37.74
C 4	Cyan	57.08	-24.10	-40.15
C 5	Magenta	52.98	59.79	2.87
C 6	Yellow	92.00	-3.96	81.12
D 1	White	95.96	-0.03	-0.40
D 2	Grey 1	74.89	-0.03	-0.32
D 3	Grey 2	55.58	0.58	0.42
D 4	Grey 3	41.84	0.23	0.22
D 5	Grey 4	29.91	-0.59	-0.43
D 6	Black	6.60	0.54	-1.85

Daneš-Picta BST4D



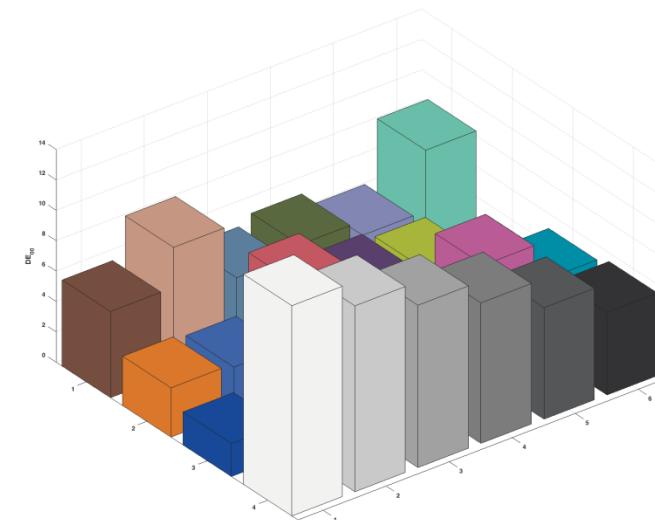
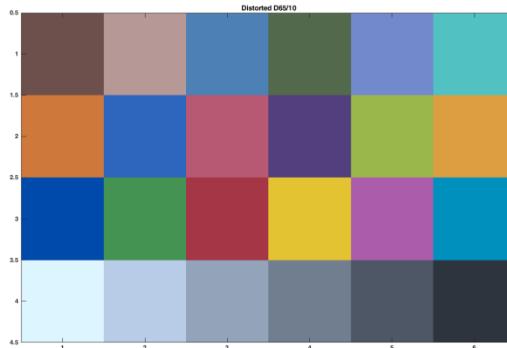
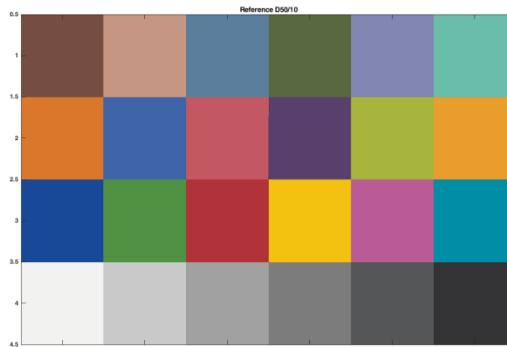
McCamy, C. S., Marcus, H., Davidson, J., G., A Color-Rendition Chart, Journal of Applied Photographic Engineering 2(3), 1976.
<https://en.wikipedia.org/wiki/ColorChecker>, <https://www.xrite.com/categories/calibration-profiling/colorchecker-classic>, <https://www.danes-picta.com/>

❖ Spektrální odrazivosti typických barevných vzorků



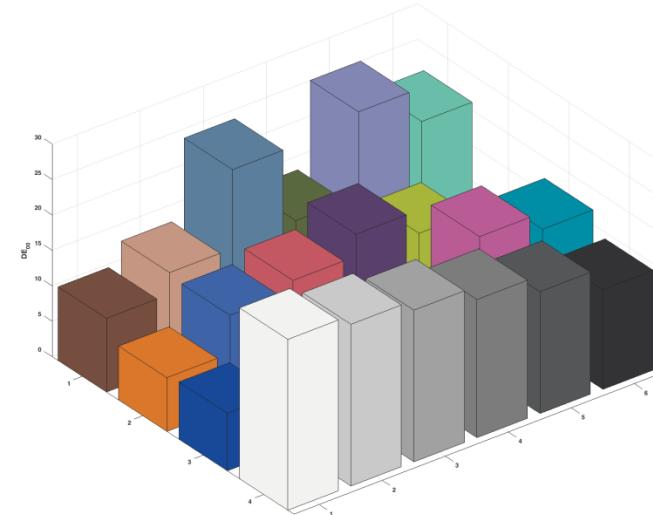
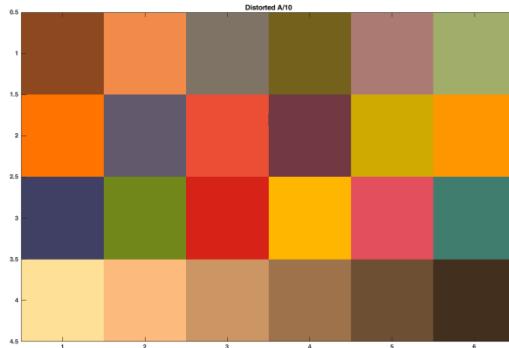
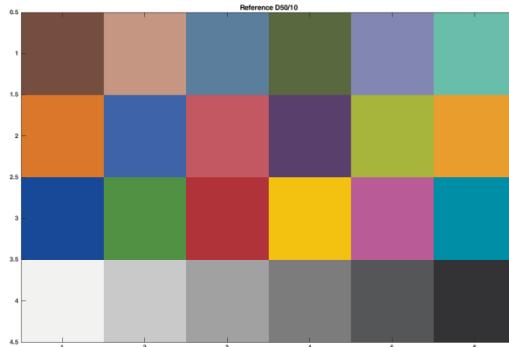
❖ Náhled na testovací obrazec a vypočtenou CIEDE2000

- Zobrazení při referenčním (D50) a denním světle (D65) $\overline{\Delta E_{00}} = 6.2$

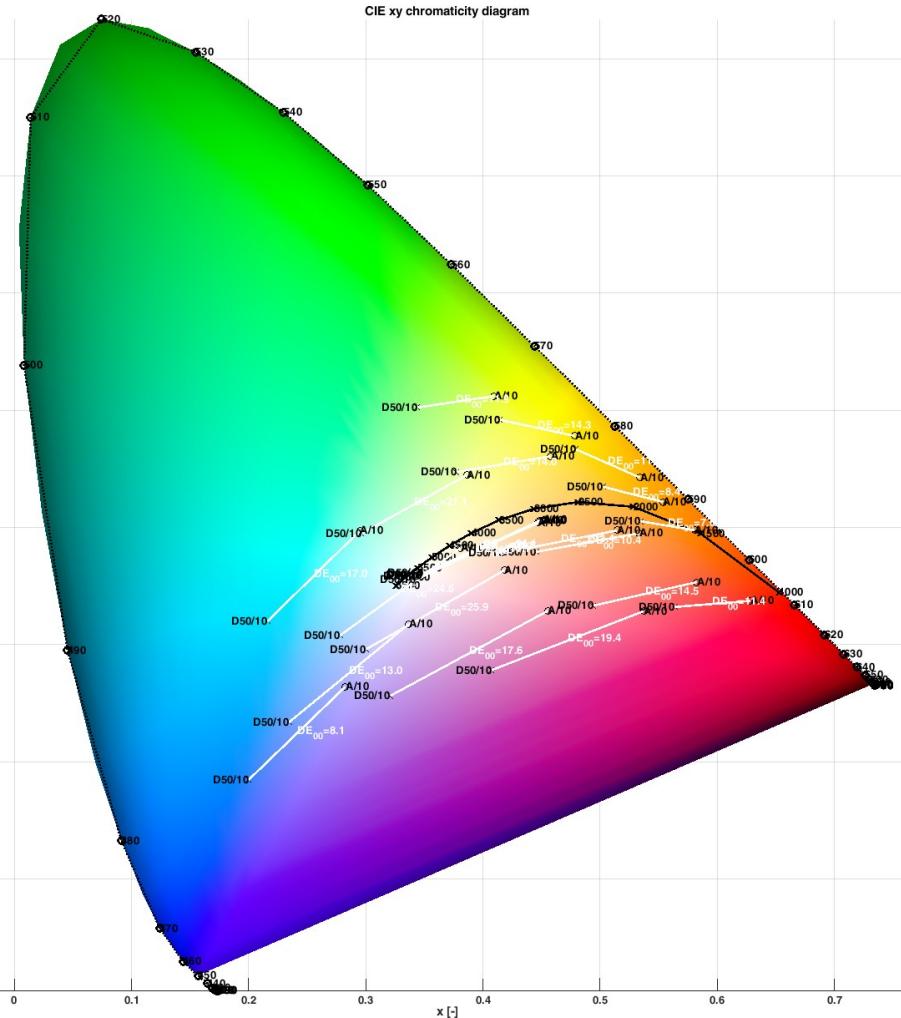
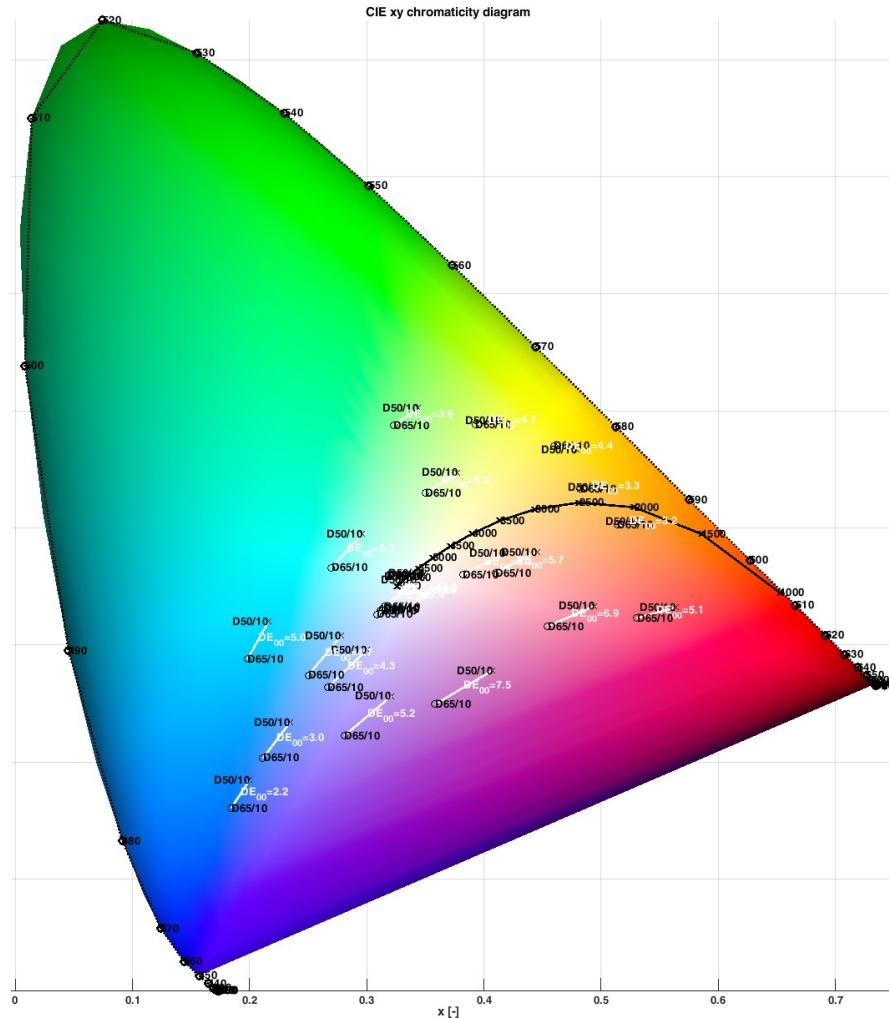


❖ Náhled na testovací obrazec a vypočtenou CIEDE2000

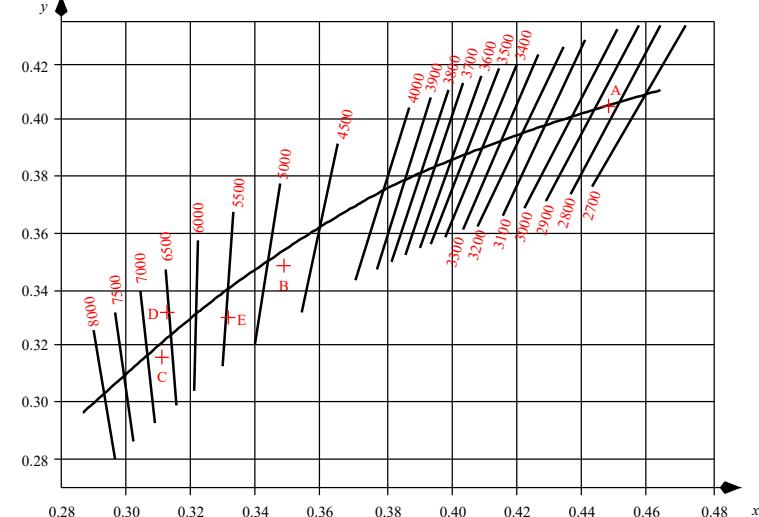
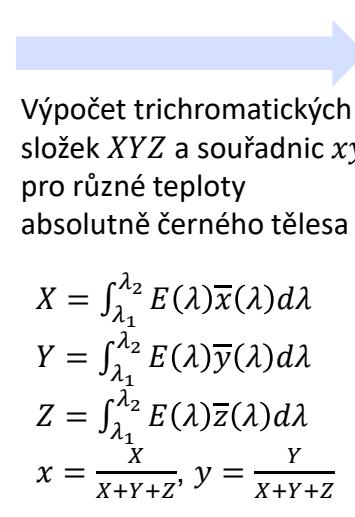
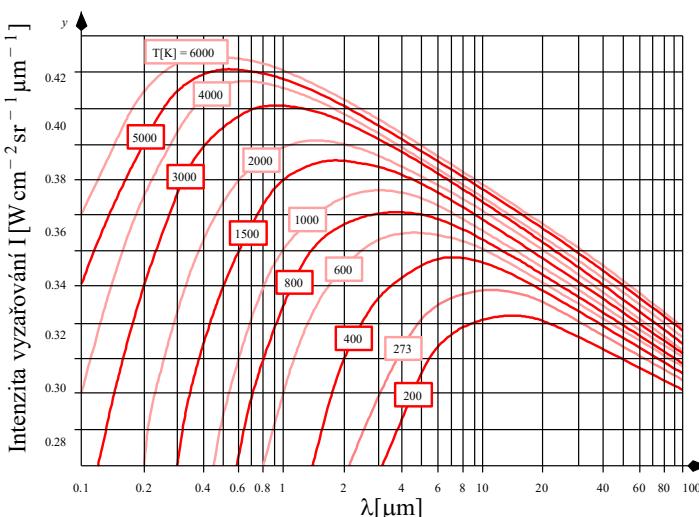
- Zobrazení při referenčním (D50) a žárovkovém světle (A) $\overline{\Delta E_{00}} = 16$



- ❖ Náhled na testovací obrazec a vypočtenou CIEDE2000
 - Zobrazení CIE xy pro denní (D65) a žárovkové světlo (A)



- Teplota chromatičnosti světelných zdrojů
 - ❖ Spektrální charakteristiky záření absolutně černého tělesa
 - Diagram CIE xy a stanovení CCT (Correlated Color Temperature)
 - Určení korelované teploty chromatičnosti (CCT) pro světelný zdroj
 - Nejbližší bod (barva) na křivce absolutně černého tělesa v CIE uv



- Existují různé approximace
 - Pro rozsah **2000** až **12500 K** se používá tzv. **McCamy approximace**

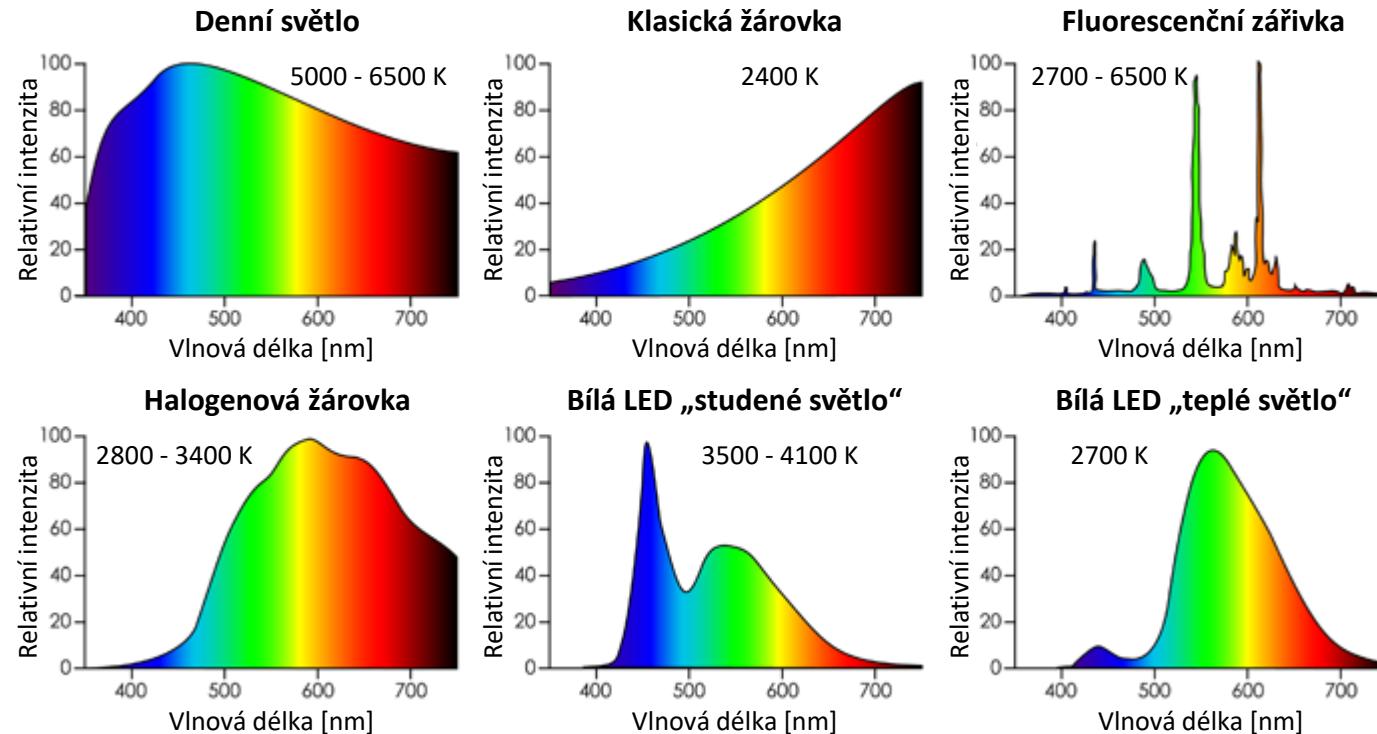
$$CCT_{est.} = 449 n^3 + 3525 n^2 + 6823,3 n + 5520,33$$

$$n = \frac{x - 0,3320}{y - 0,1858}$$

□ Spektra vyzařování různých světelných zdrojů

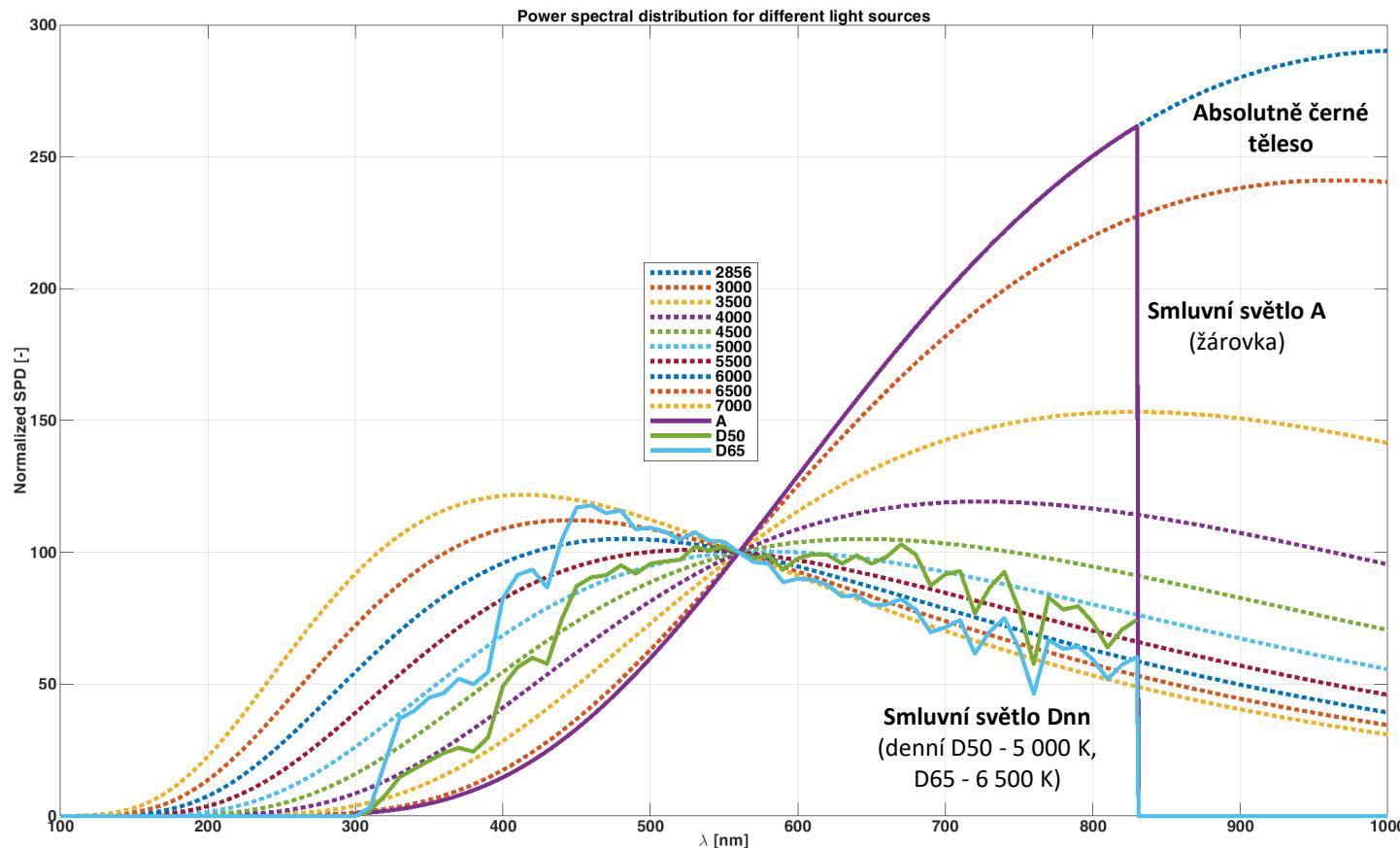
❖ Různý charakter spektra „bílého světla“

- Znázornění spekter světelných zdrojů a **teplota chromatičnosti CCT**
- Další charakteristika **index podání barev CRI** (Color Rendering Index)



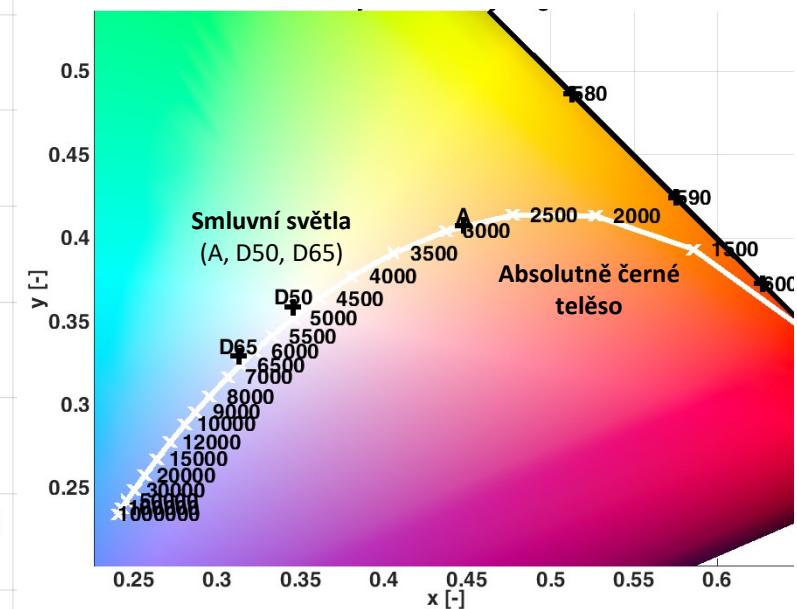
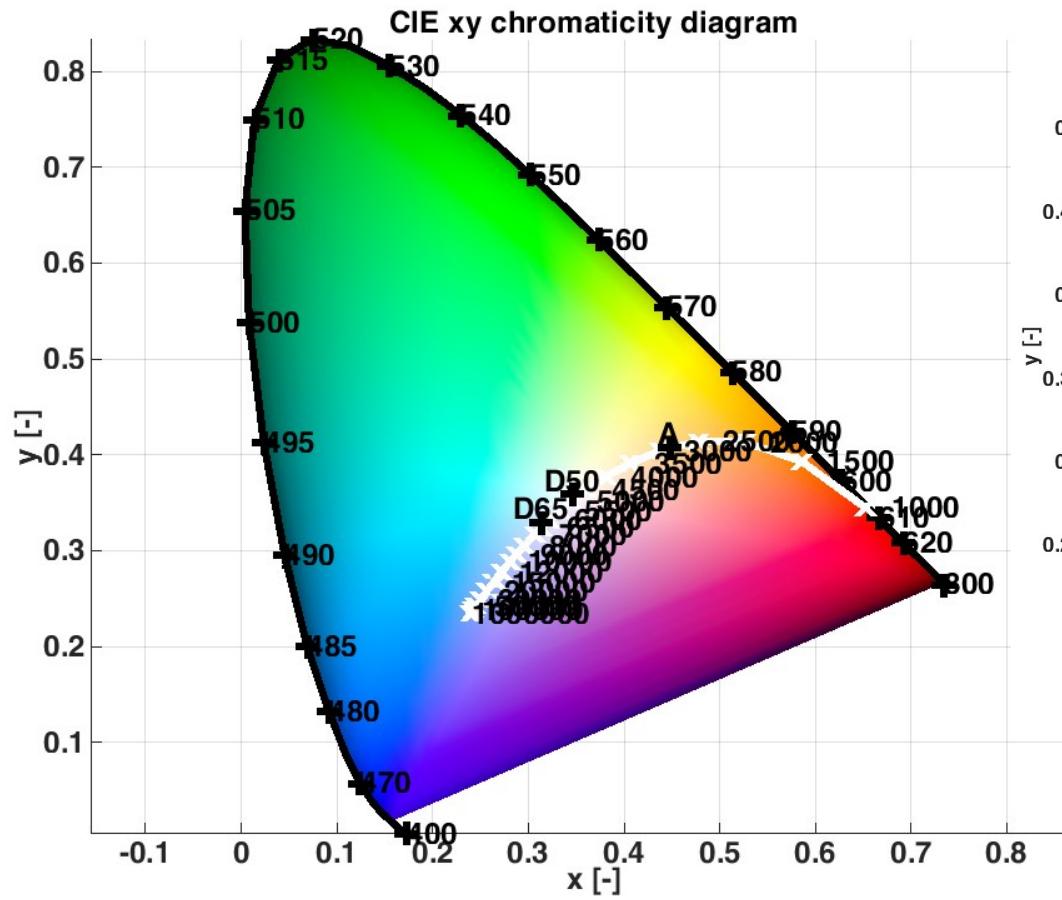
❖ Spektrální distribuce výkonu SPD (spectral power distribution)

- Pro **vlnové délky** včetně blízkého **UV** a **IR** (100 – 1000 nm)
- **Smluvní světla A** (žárovka), **D50**, **D65** (denní) a **absolutně černé těleso** pro **teploty** (CCT(A), 3 000 – 7 000 K) – průběhy **normalizovány**



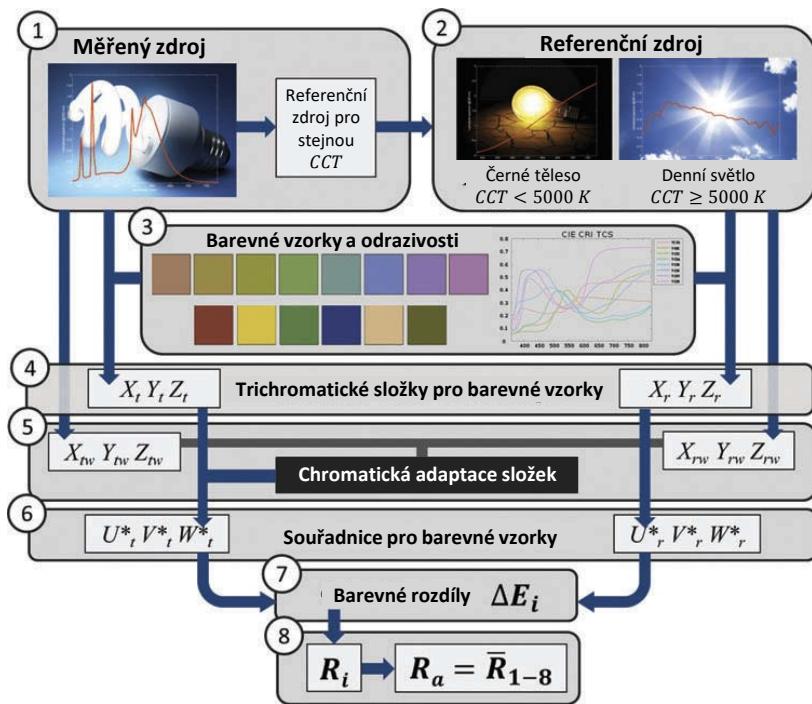
❖ Diagram CIE xy (horseshoe/podkova)

- Včetně souřadnic spektrálních barev (380 – 780 nm), vyzařování absolutně černého tělesa (1 000 – 1 000 000 K) a světel A, D50 a D65



- Index podání barev CRI (Color Rendering Index)
 - ❖ Hodnotí **věrnost barevného vjemu pro světelný zdroj**
 - ❖ Postup **definován CIE** (několik verzí 1965, 1974, 1995)
 - (1) Korelovaná teplota chromatičnosti (CCT) určena pro **měřený zdroj**
– Nejbližší místo na křivce absolutně černého tělesa v (u, v) CIE 1960 UCS
 - (2) Určení spektrální distribuce výkonu (SPD) reference pro CCT
 - (a) Černé těleso ($CCT < 5000 K$)
 - (b) Denní světlo Dnn ($CCT \geq 5000 K$)
 - Chromatická vzdálenost (DC) mezi testem a referencí méně než $5.4 \cdot 10^{-3}$

$$DC = \Delta_{uv} = \sqrt{(u_r - u_t)^2 + (v_r - v_t)^2}$$
 - (3) Barevné vzorky s definovanou spektrální odrazivostí ($i = 1, 2, \dots, 14$)
 - Vzorky ($i = 1, 2, \dots, 8$) použity pro CRI
 - Simulace nasvícení pomocí obou zdrojů



CIE, Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources, 1995.

Houser, K., Mossman, M., Smet, K., Whitehead, L. Tutorial: Color Rendering and Its Applications in Lighting, The Journal of the Illuminating Engineering Society, 2016.

□ Index podání barev CRI (Color Rendering Index)

- (4) Výpočet XYZ složek podle CIE 1931 2° pozorovatel
 - Provedeno pro test i referenční zdroj a všechny barevné vzorky
- (5) Chromatická adaptace (von Kries) pro všechny vzorky

$$u_{c,i} = \frac{10.872 + 0.404 \left(\frac{c_r}{c_t} \right) c_{t,i} - 4 \left(\frac{d_r}{d_t} \right) d_{t,i}}{16.518 + 1.481 \left(\frac{c_r}{c_t} \right) c_{t,i} - \left(\frac{d_r}{d_t} \right) d_{t,i}}$$

$$v_{c,i} = \frac{5.520}{16.518 + 1.481 \left(\frac{c_r}{c_t} \right) c_{t,i} - \left(\frac{d_r}{d_t} \right) d_{t,i}}$$

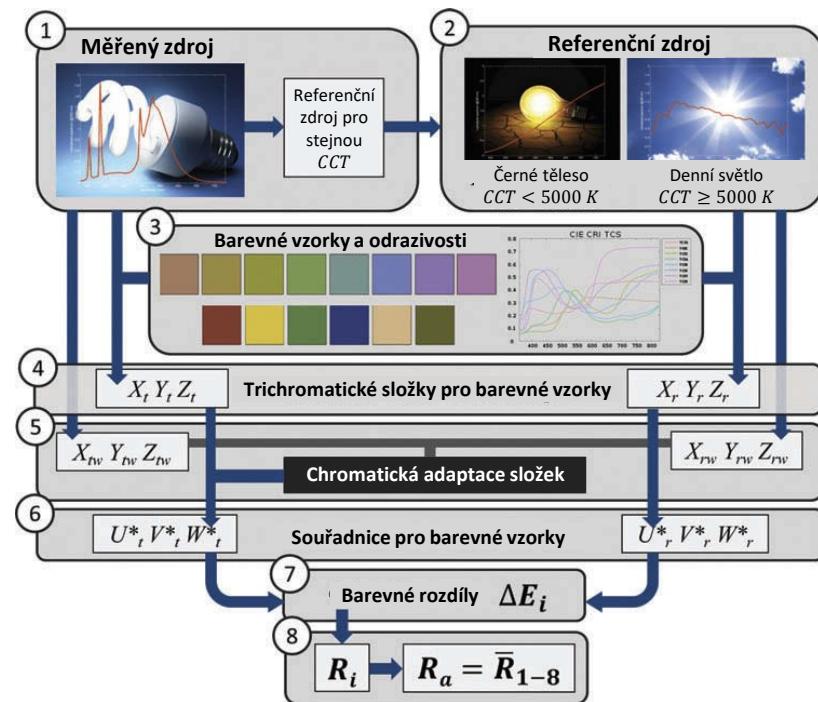
$$c = \frac{4.0 - u - 10.0v}{v}, \quad d = \frac{1.708v - 1.481u - 0.404v}{v}$$

- (6) Výpočet U*V*W* souřadnic v UCS prostoru CIE 1964

$$U^* = 13W^*(u - u_0),$$

$$V^* = 13W^*(v - v_0)$$

$$W^* = 25Y^{\frac{1}{3}} - 17$$



CIE, Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources, 1995.

Houser, K., Mossman, M., Smet, K., Whitehead, L. Tutorial: Color Rendering and Its Applications in Lighting, The Journal of the Illuminating Engineering Society, 2016.

□ Index podání barev CRI (Color Rendering Index)

- (6) Výpočet $U^*V^*W^*$ souřadnic v UCS prostoru CIE 1964

$$U^* = 13W^*(u - u_0), V^* = 13W^*(v - v_0), W^* = 25Y^{\frac{1}{3}} - 17$$

– Kde (u, v) jsou CIE 1960 UCS souřadnice a (u_0, v_0) referenční světlo

$$u = \frac{4X}{X+15Y+3Z}, v = \frac{6Y}{X+15Y+3Z}$$

- (7) Výpočet Euklidovské vzdálenosti

ΔE_i pro vzorky v $U^*V^*W^*$

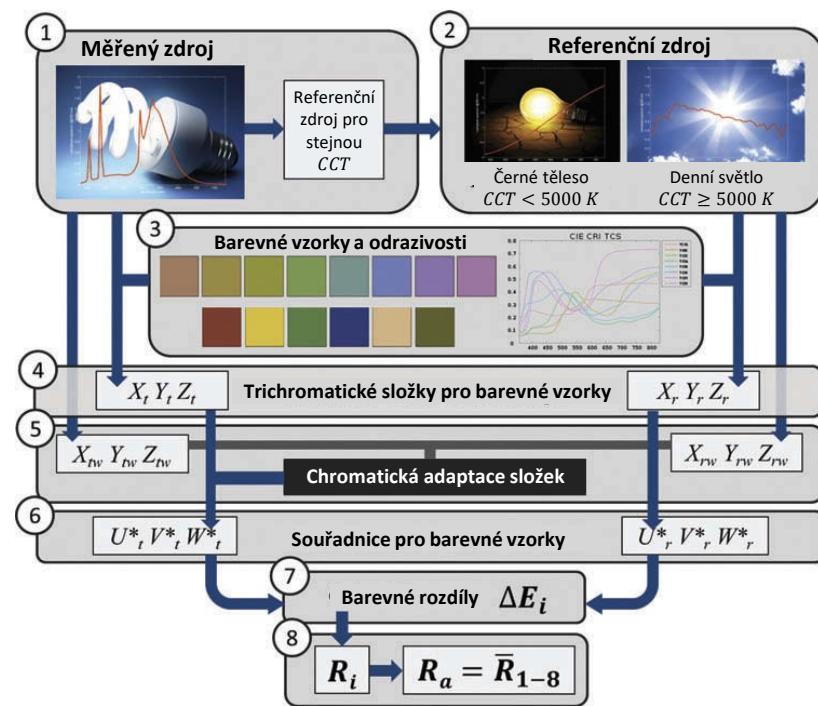
- (8) Výpočet dílčích CRI R_i pro všechny barevné vzorky

$$R_i = 100 - 4.6 \Delta E_i$$

- (9) Výpočet celkového/průměrného (average) CRI R_a

$$R_a = \overline{R_{1-8}}$$

❖ CRI bližší 100 znamená lepší podání barev pro daný zdroj



CIE, Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources, 1995.

Houser, K., Mossman, M., Smet, K., Whitehead, L. Tutorial: Color Rendering and Its Applications in Lighting, The Journal of the Illuminating Engineering Society, 2016.

□ Ukázka analýzy spektra reálných světel

❖ Spektra zdrojů změřena pomocí vláknového spektrometru

- Měřené **světelné zdroje**
 - (a) Pilotní světlo (halogen 3 200 K)
s regulací výkonu (10 stupňů)
 - (b) Fluorescenční trubice (5 000 K)
 - (c) LED svítidla (5 400 K/3 200K)
 - (d) LCD počítačový monitor



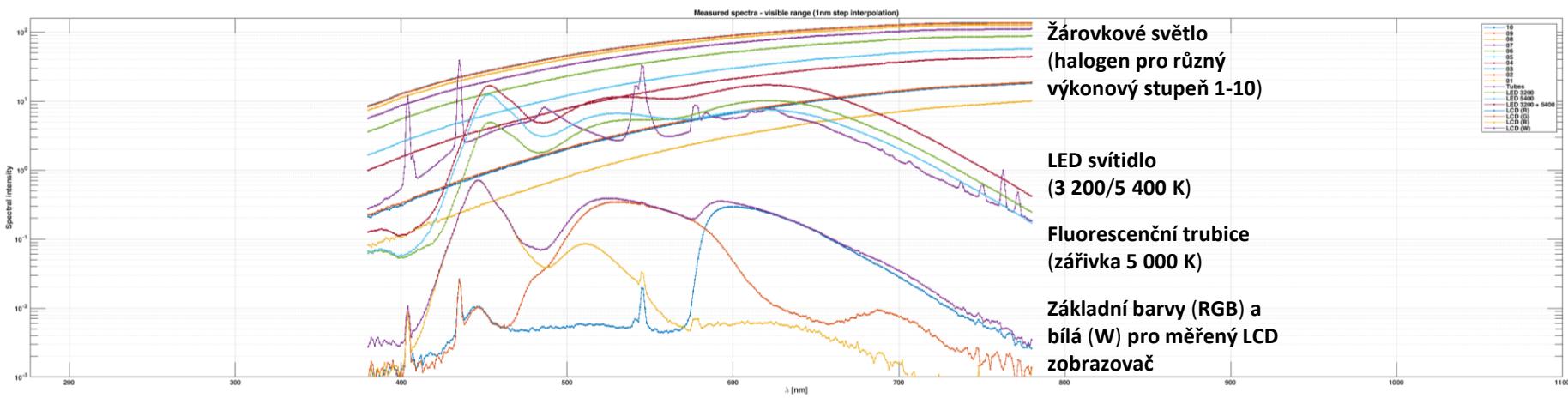
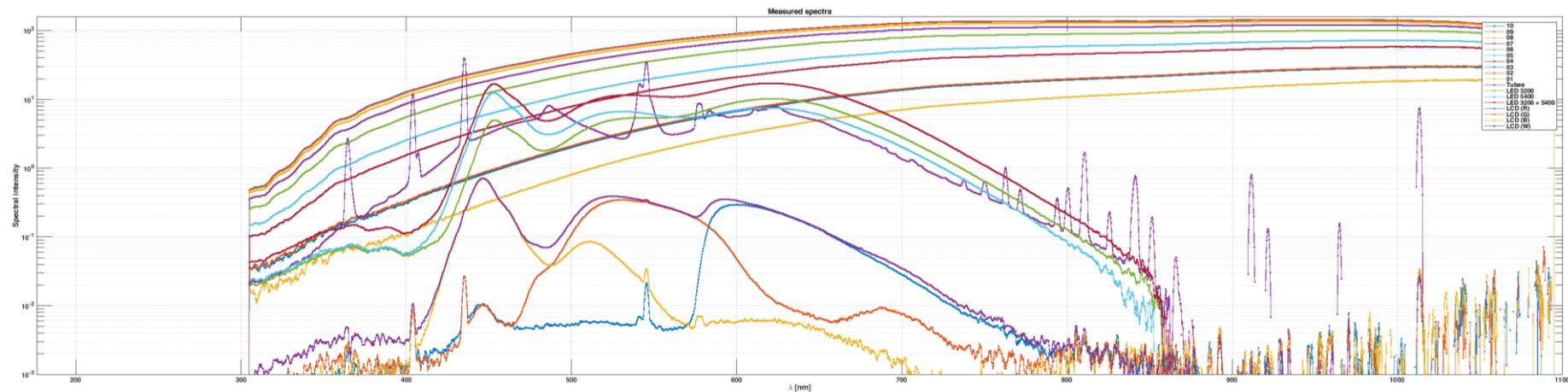
- **Avantes AvaSpec – 3648**
 - Spektrometr s optickým vláknem
 - Vlákno s kosinovým korektorem
 - Připojen k PC přes USB
 - Export spekter do XLSX



<https://www.foemei.com/>
<https://www.avantes.com/products/spectrometers>

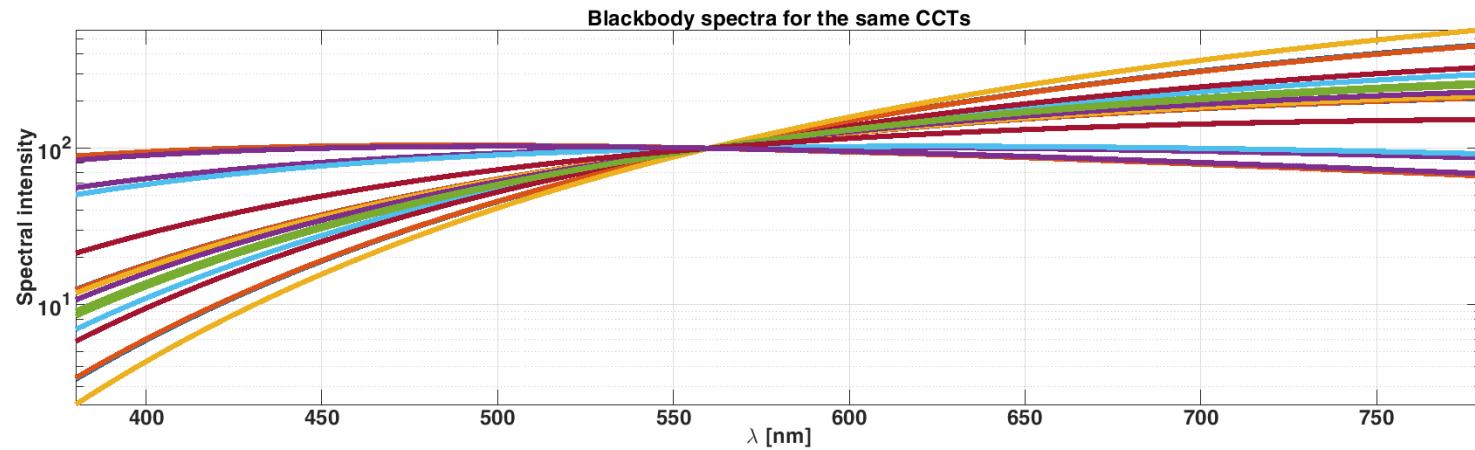
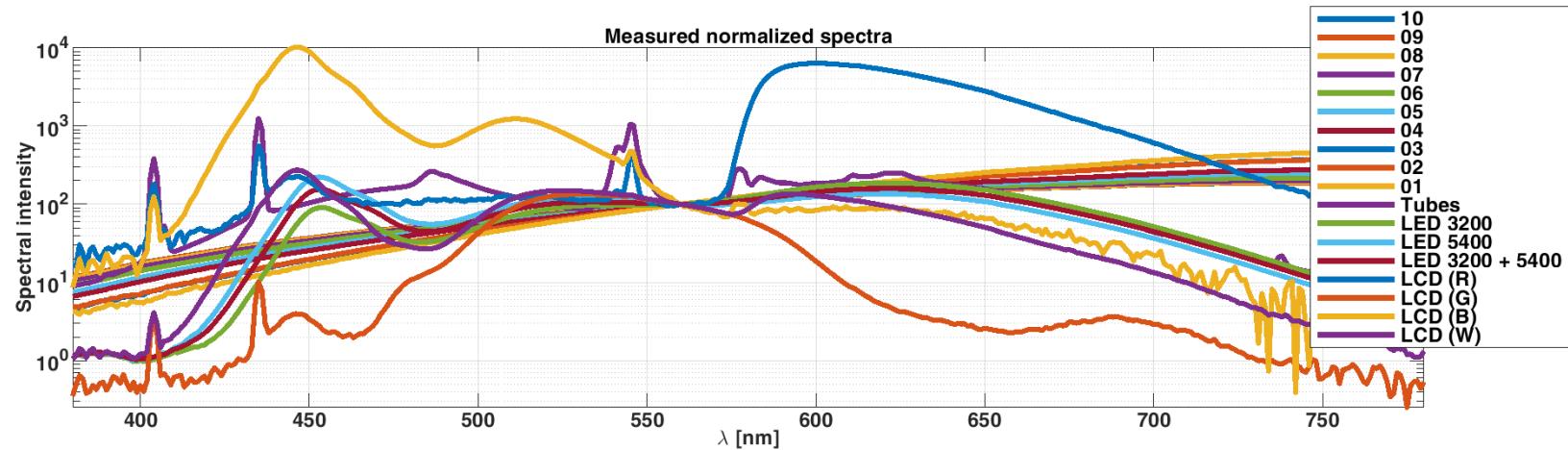
Kolorimetrie

- Změřená a interpolovaná spektra (380 – 780 nm s krokem 1 nm)



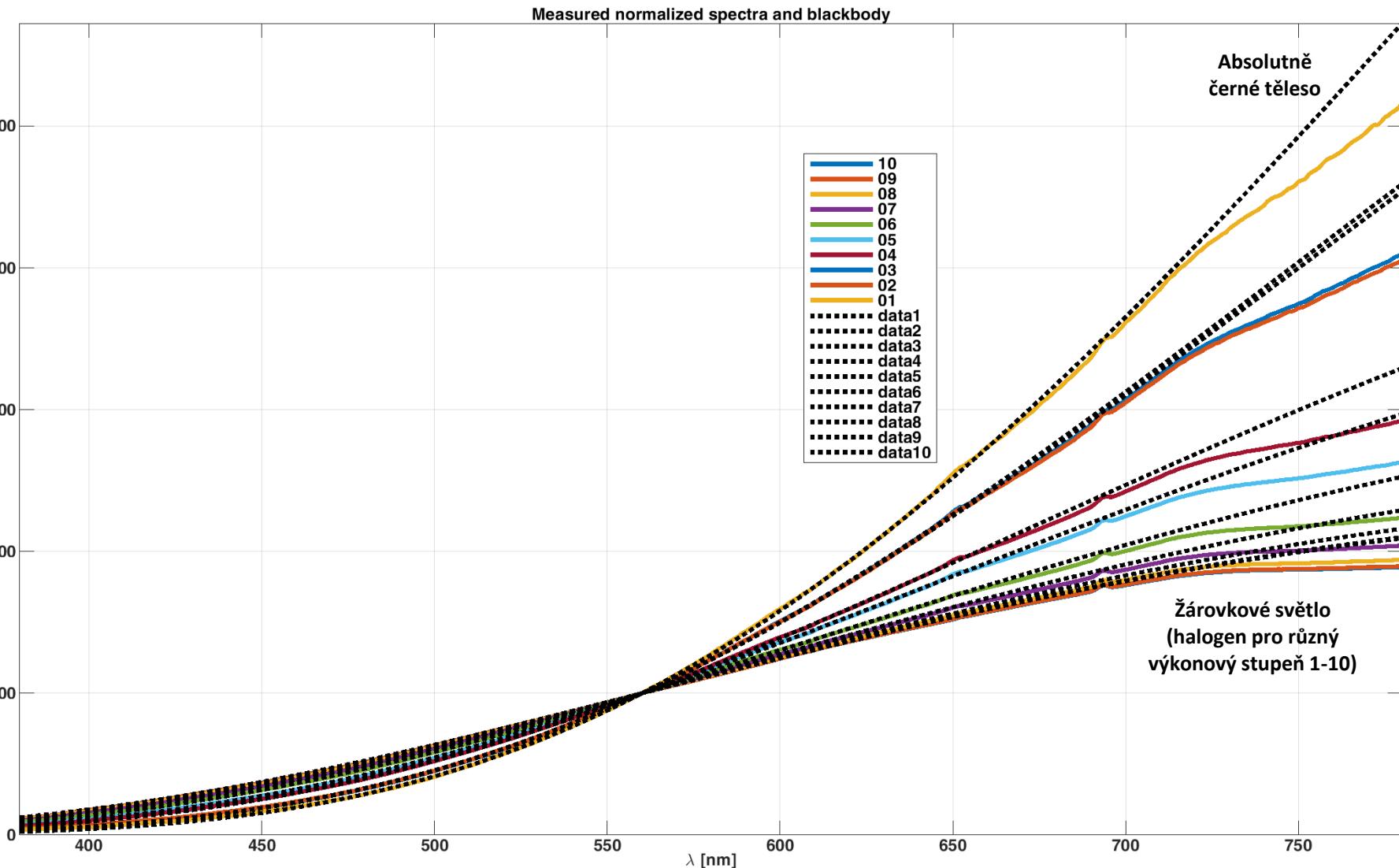
Kolorimetrie

- Normalizovaná spektra pro měřená světla a černé těleso



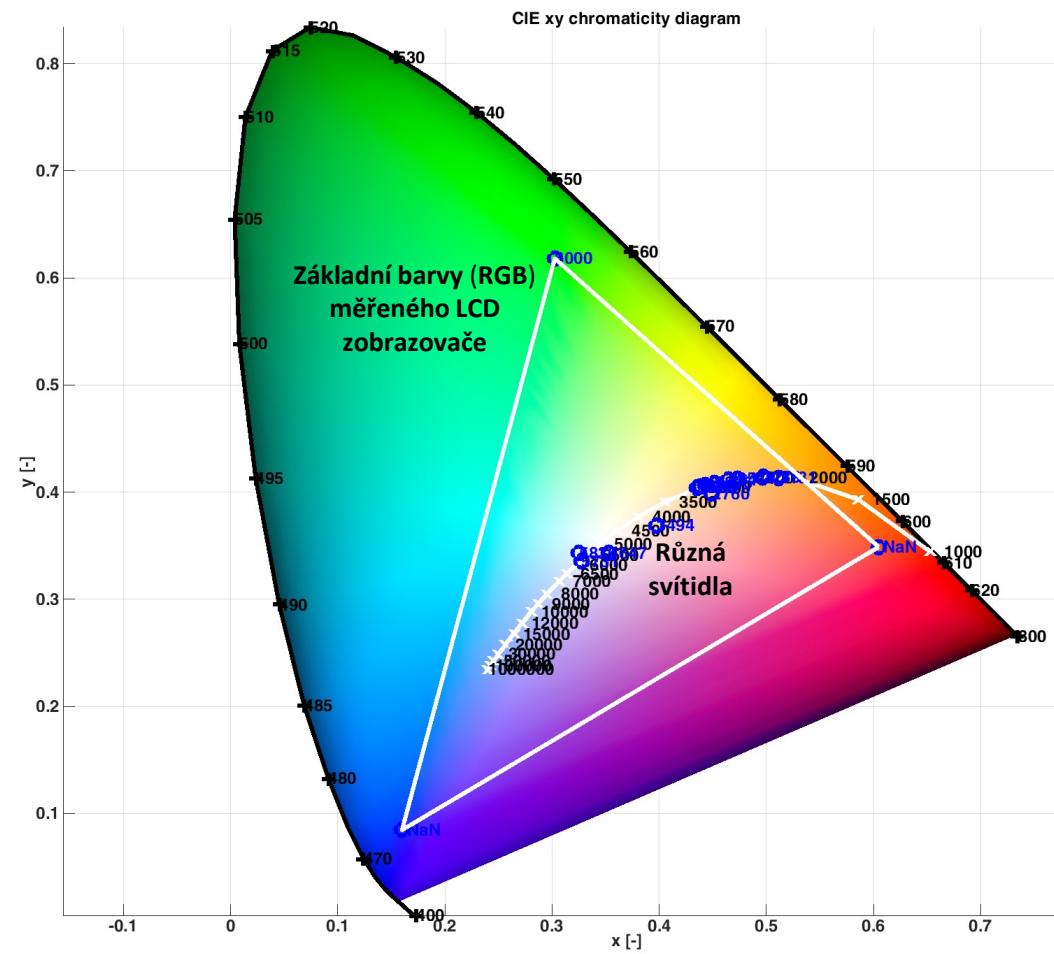
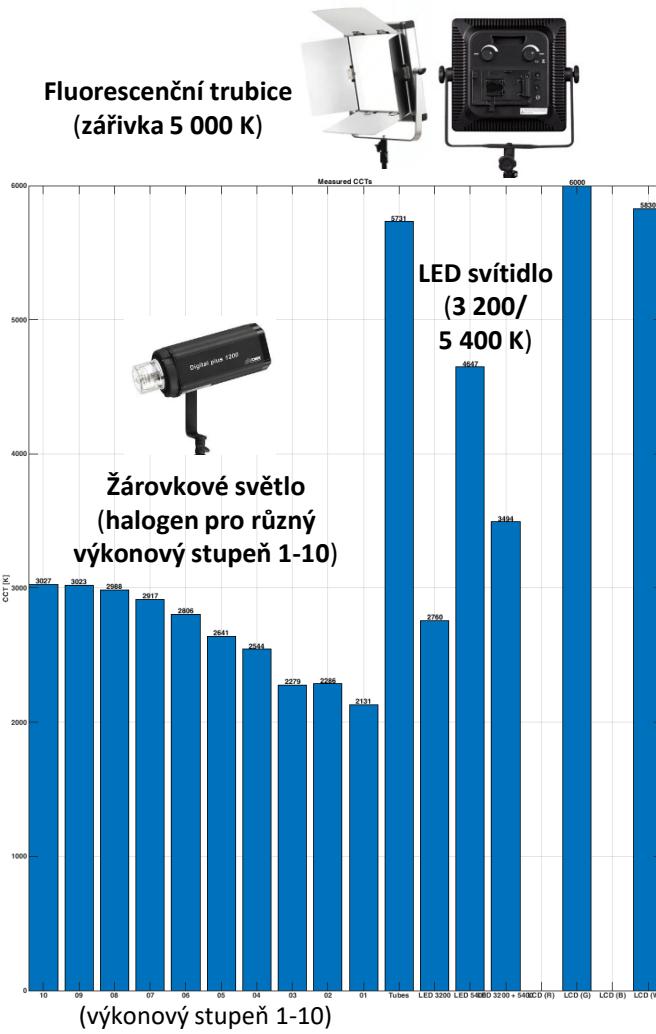
Kolorimetrie

- Normalizovaná spektra pro halogenovou lampu a černé těleso



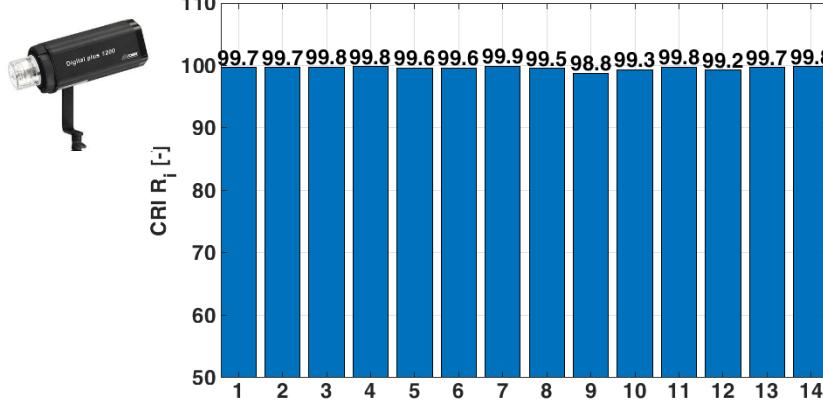
Kolorimetrie

- Určené souřadnice CIE xy a teplota chromatičnosti (CCT)

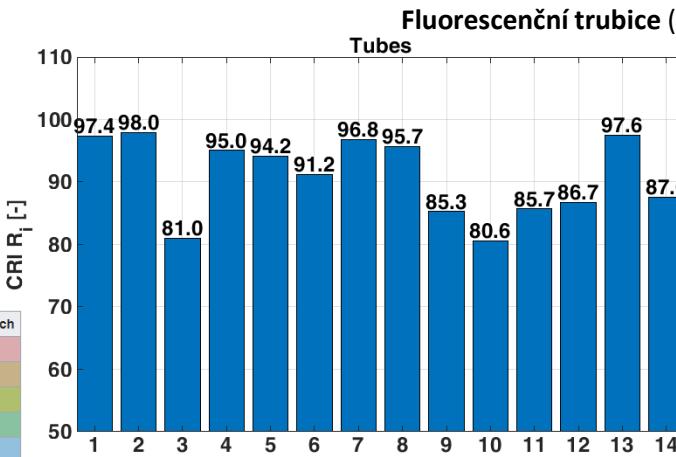


❖ Vypočtené dílčí CRI R_i pro vybrané světelné zdroje

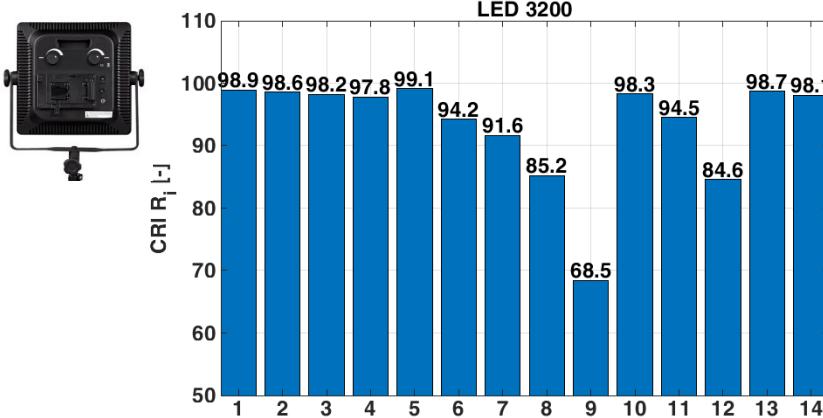
Žárovkové světlo (halogen 3 200 K)



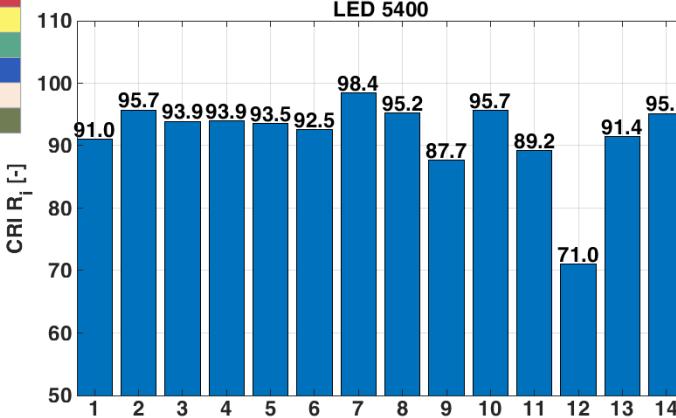
Fluorescenční trubice (zářivka 5 000 K)



LED svítidlo (3 200 K)

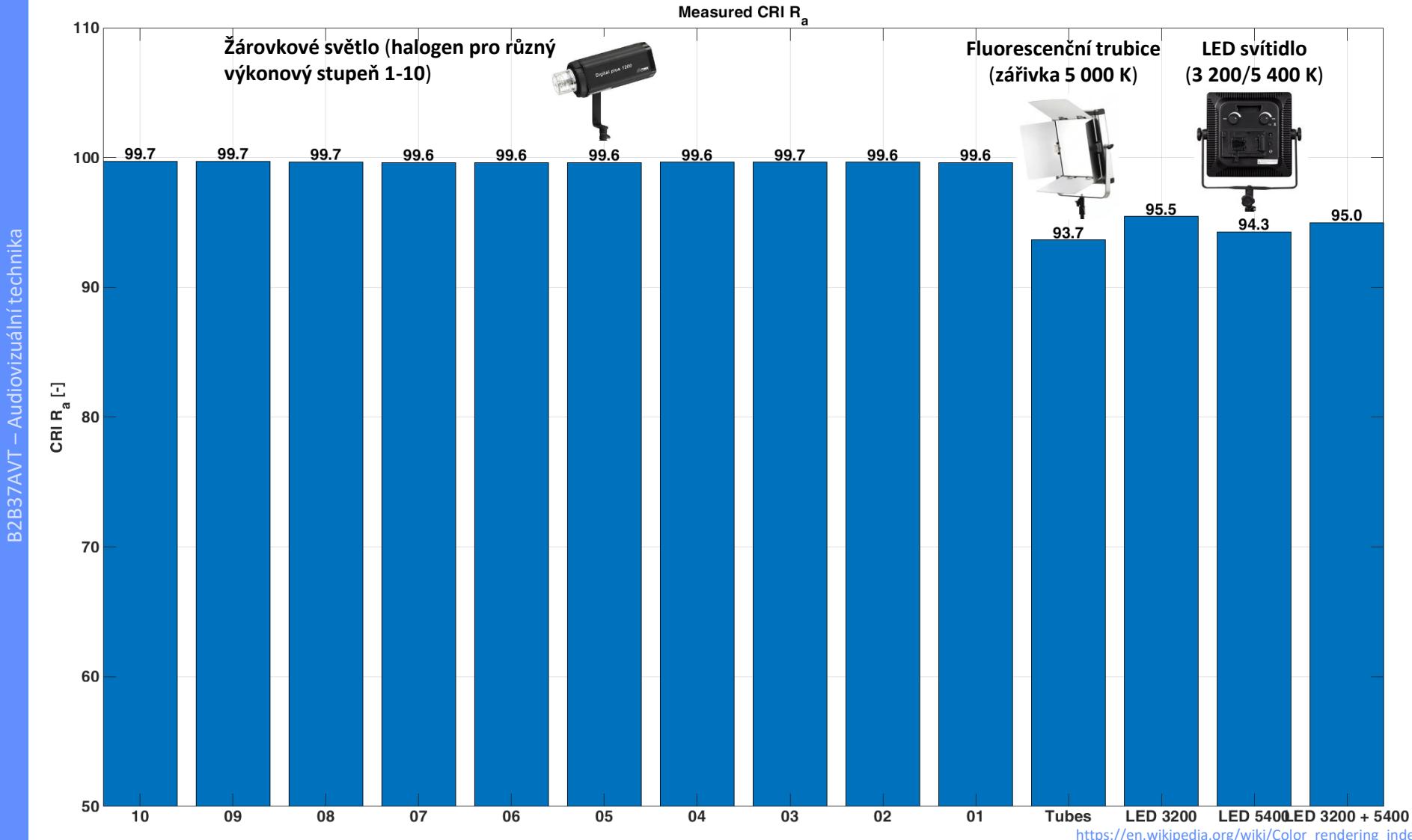


LED svítidlo (5 400 K)



Kolorimetrie

❖ Celkové CRI $R_a = \overline{R_{1-8}}$ pro vybrané světelné zdroje



Použitá a doporučená literatura

- McCluney, W. R. **Introduction to Radiometry and Photometry**, Artech House, 2014.
- Rogalski, A., Bielecki, Z. **Radiometry and Photometry**, Routledge, 2022.
- Ohno, Z. **Handbook of Optics**, Volume III Visual Optics and Vision, Photometry and Radiometry, OSA, 1999.
- Hunt, R. W. G., Pointer, M. R. **Measuring Colour**, Wiley, 2011.
- Shevell, S. K. **The Science of Color**, Elsevier, OSA, 2003.
- Poynton, C. **Digital Video and HDTV Algorithms and Interfaces**, Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2003.
- Wagberg, J. **Optprop - a color properties toolbox**, MATLAB, 2007.
<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/13788-optprop-a-color-properties-toolbox>
- Stockman, A. **Colour & Vision Research Laboratory (CVRL)**, database, 2020.
<http://www.cvrl.org/>



Audiovizuální technika

Děkuji za pozornost!

