

Ladění barevné harmonie Vesmíru

Prezentace v lidských barvách

Filip Hroch

*„Svět v temných, ale skutečných barvách má větší cenu,
než svět v barvách růžových, ale falešných.“*

Jean Dutourd (1920 – 1980)

Barva

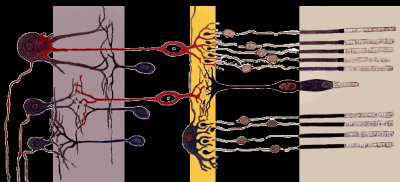
Barvy:

- modifikace spektra oproti bílému světlu
- charakteristika samotného zdroje
- pigmenty u odražejících předmětů

Pro astronomii:

- přesně definovaná spektrální intenzita nebo tok
- neomezeno jen na optický obor
- použití falešných i skutečných barev

Lidské vnímání barev



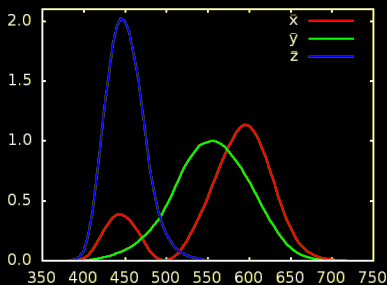
struktura sítnice

- barevné vidění čípkami
- černobílé tyčinkami

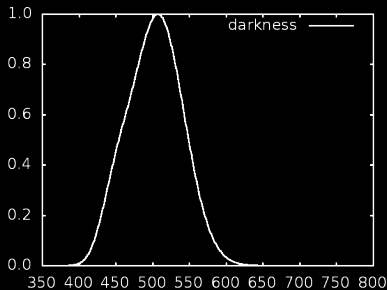
Z pohledu člověka:

- vizuální vjem (pocit) vzhledu okolního světa
- snadné odlišení a orientace předmětů (potrava, nebezpečí)
- hojně využívaný v umění, módě, politice

Spektrální citlivost lidského oka



při dobrém světle



za tmy

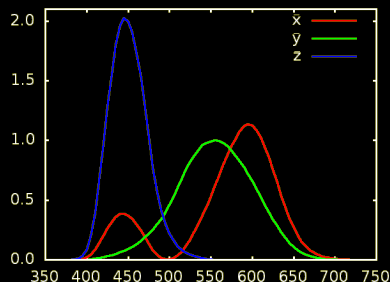
- interpretace citlivostí: vnímání různými receptory
- zdroj světla je planckovský pro asi 6500K.
- plochy pod křivkami jsou zhruba stejné
- v modré je oko výrazně citlivější

Oko – CIE 1931 XYZ

$$X = \int_0^{\infty} I(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

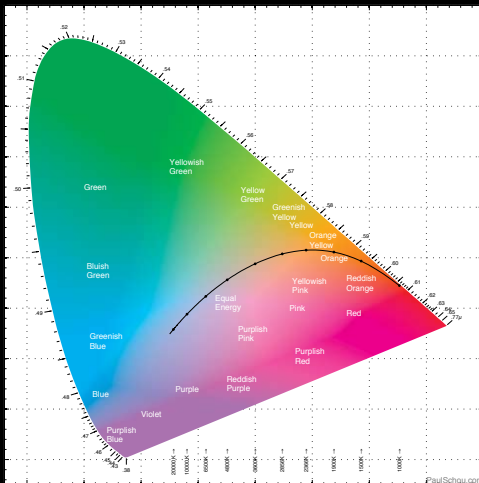
$$Y = \int_0^{\infty} I(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = \int_0^{\infty} I(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$



- XYZ vyjadřuje podmět pro receptory
- Y složka je úměrná svítivosti (odrazivosti)
- barva je daná X a Z
- CIE (Commission internationale de l'éclairage), založena 1913
- citlivosti pro CIE standardního pozorovatele

Barevný diagram pro CIE 1931 XYZ

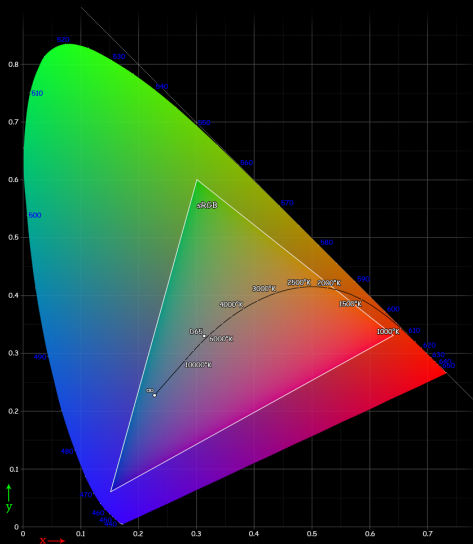


$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

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

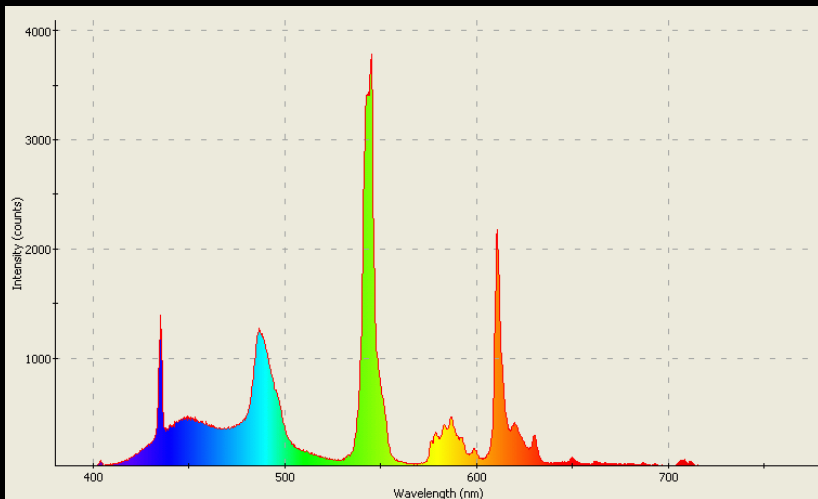
- nadplocha v prostoru, $Y = \text{const.}$
- úplný barevný rozsah oka
- obvykle degradováno displejem

Zobrazovací zařízení – sRGB



- odvozeno z vlastností zobrazovacích zařízení
- základní barvy RGB s nelineárním škálováním
- nepsaný standard pro nové monitory, LCD a projekory
- „předpotopní technika“

Barevný prostor RGB



Asus 24'' VW246 monitor (displaying white)

<http://ledmuseum.candlepower.us/led1/specx333.htm>

Transformace XYZ do sRGB

$$\begin{pmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.2410 & -1.5374 & -0.4986 \\ -0.9692 & 1.8760 & 0.0416 \\ 0.0556 & -0.2040 & 1.0570 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

$$g(x) = \begin{cases} 12.92x, & x \leq 0.0031308, \\ 1.055x^{1/2.4} - 0.055, & x > 0.0031308 \end{cases}$$

pro $R = g(R')$, $G = g(G')$, $B = g(B')$.

Barevný prostor CIELUV

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

$$u^* = 13L^*(u' - 0.2009),$$

$$v^* = 13L^*(v' - 0.4610),$$

kde

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

$$v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z}.$$

- odpovídá citlivosti oka na barvy a intenzity
- vzdálenost je eukleidovská
- L^* umožňuje škálovat citlivost detektoru
- u^*, v^* škálují barvy

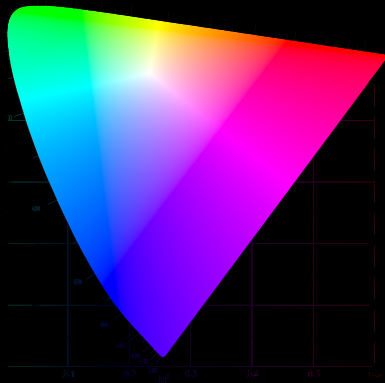
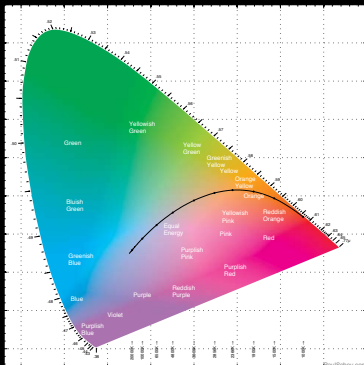
Barevný prostor CIELUV

Saturace (chroma)

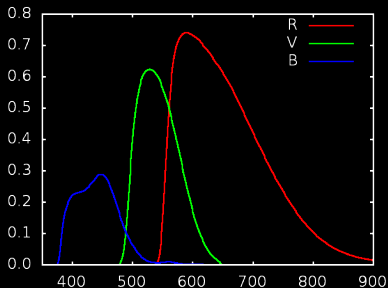
$$C = \sqrt{(u^*)^2 + (v^*)^2}.$$

Hue

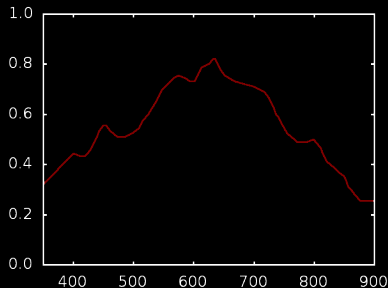
$$h = \arctan \frac{v^*}{u^*}.$$



Dalekohled s CCD a astronomickými filtry



propustnost BVR



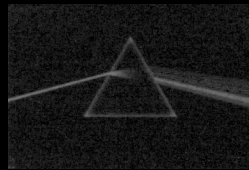
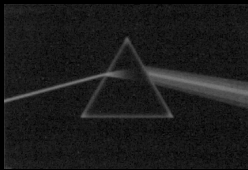
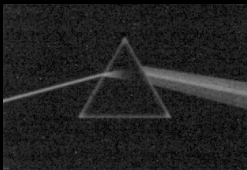
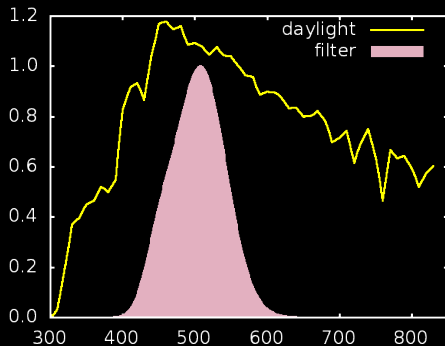
citlivost CCD

Landoltův (U)BVR(IJ...) systém ([2]):

- vychází z Johnsonova systému
- volba citlivostí odráží různé astrofyzikální důvody
- zdroj světla je planckovský pro 10 tisíc K
- plochy pod křivkami jsou zhruba stejné, modrá je nevýrazná

Abstraktní popis filtrů

$$\phi = \int_0^{\infty} I(\lambda) f(\lambda) d\lambda$$



Skalární vektorový součin

Obyčejný vektor se složkami (x, y) v rovině a s bázovými vektory \mathbf{i}, \mathbf{j} můžeme zapsat jako

$$\mathbf{r} = x \mathbf{i} + y \mathbf{j}.$$

Elegantní způsob vyloupení jedné složky zapíšeme

$$x = \mathbf{r} \cdot \mathbf{i} = x \mathbf{i} \cdot \mathbf{i} + y \mathbf{j} \cdot \mathbf{i} = x \mathbf{i} \cdot \mathbf{i},$$

přičemž

$$\mathbf{i} \cdot \mathbf{i} = 1, \quad \mathbf{i} \cdot \mathbf{j} = 0.$$

Skalární součin počítáme podle předpisu

$$\mathbf{i} \cdot \mathbf{j} = i_1 \cdot j_1 + i_2 \cdot j_2 = \sum_k i_k \cdot j_k.$$

Skalární součin funkcí

Zajímavé je, že to podobně funguje i s funkcemi

$$I(\lambda) = x \varphi(\lambda) + y \psi(\lambda).$$

Elegantní vyjmutí provedeme obdobně

$$x = I \cdot \varphi = x \varphi \cdot \varphi + y \psi \cdot \varphi = x \varphi \cdot \varphi,$$

ale pouze pokud počítáme skalární součin podle předpisu

$$\varphi \cdot \psi = \int_0^{\infty} \varphi(\lambda) \psi(\lambda) d\lambda$$

a neponecháme náhodě výběr báзовých funkcí

$$\varphi \cdot \varphi = 1, \quad \varphi \cdot \psi = 0.$$

Barevný vjem

V oku máme jako bázové funkce $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ a spektrum aproximujeme neboli „vnímáme barvu“

$$I(\lambda) = X \bar{x}(\lambda) + Y \bar{y}(\lambda) + Z \bar{z}(\lambda)$$

$$X = \int_0^{\infty} I(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda, \quad Y = \dots, \quad Z = \dots$$

- Nedokonalá aproximace – „špatně vybrané bázové funkce“
- Analogicky platí i pro ostatní barevné prostory

Aproximace profilu filtru

„Vzdálenost“ mezi filtry můžeme měřit po vzoru Eukleida

$$d(\mathbf{r}, \mathbf{r}) = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}.$$

Zapsáno s pomocí skalárního součinu

$$d[f(\lambda), \varphi(\lambda)] = \|f - \varphi\| = \sqrt{(f - \varphi) \cdot (f - \varphi)}$$

neboli (Pro identické filtry platí podmínka $d = 0$.)

$$d[f(\lambda), \varphi(\lambda)] = \int_0^{\infty} [f(\lambda) - \varphi(\lambda)]^2 d\lambda.$$

Pro filtry jsou předem pevně dány aproximující funkce

$$\varphi(\lambda) \approx \sum_i a_i \varphi_i(\lambda)$$

Aproximace profilu jednoho filtru – I.

$$\int_0^{\infty} [f(\lambda) - a\varphi(\lambda)]^2 d\lambda.$$

Předpokládejme $a' = a + \alpha$ a hledejme minimum

$$\int_0^{\infty} [f(\lambda) - a'\varphi(\lambda)]^2 d\lambda = \int_0^{\infty} [f^2 - 2fa'\varphi + a'^2\varphi^2] d\lambda =$$

$$\int_0^{\infty} [f^2 - 2f(a + \alpha)\varphi + (a^2 + 2a\alpha + \alpha^2)\varphi^2] d\lambda.$$

zanedbáním členů s α^2 a vyššími a přeskupením dostaneme

$$\int_0^{\infty} [f^2 - 2fa\varphi + a^2\varphi^2 - 2f\alpha\varphi + 2a\alpha\varphi^2] d\lambda.$$

Aproximace profilu jednoho filtru – II.

Sdružením členů nakonec dostaneme

$$\int_0^{\infty} \{ [f(\lambda) - a\varphi(\lambda)]^2 - 2\alpha\varphi(f - a\varphi) \} d\lambda$$

a podmínka pro minimum integrálu je

$$2\alpha \int_0^{\infty} (f - a\varphi) \varphi d\lambda = 0.$$

Nejlepší aproximaci pak dostaneme výpočtem

$$a = \frac{\int_0^{\infty} f(\lambda)\varphi(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \varphi^2(\lambda) d\lambda}.$$

Instrumentální MonteBoo bvr na Landoltův BVR

Aplikace předchozích vztahů pro aproximaci R filtru

$$a_1 r \cdot r + a_2 v \cdot r + a_3 b \cdot r = R \cdot r,$$

$$a_1 r \cdot v + a_2 v \cdot v + a_3 b \cdot v = R \cdot v,$$

$$a_1 r \cdot b + a_2 v \cdot b + a_3 b \cdot b = R \cdot b,$$

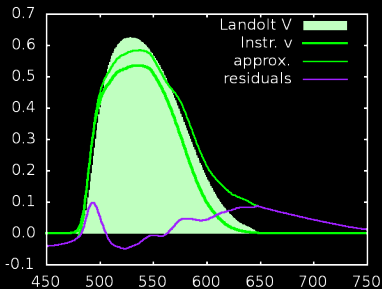
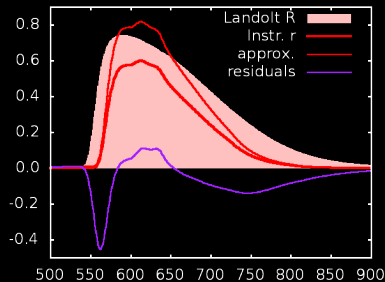
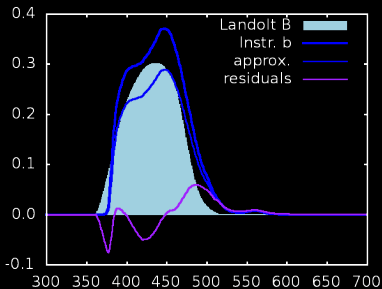
kde například

$$r \cdot v = \int_0^{\infty} r(\lambda)v(\lambda) d\lambda.$$

Výsledek:

$$\begin{pmatrix} R \\ V \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.7798218 & 0.0078136 & 0.0012729 \\ -0.1084479 & 1.0939958 & 0.1843696 \\ -0.0048955 & 0.0178585 & 1.3653429 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r \\ v \\ b \end{pmatrix}.$$

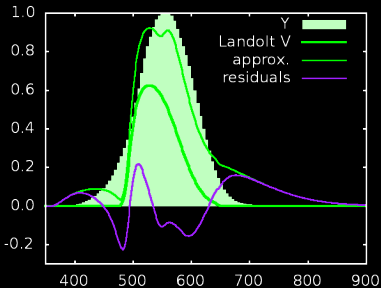
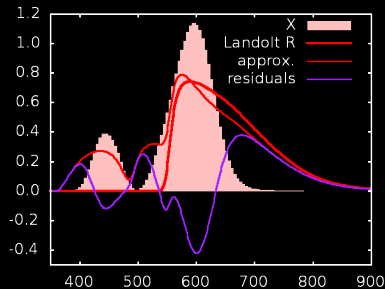
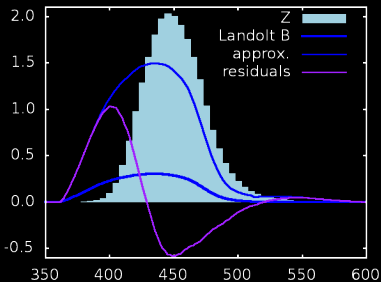
Instrumentální MonteBoo bvr na Landoltův BVR



$$(b, v, r) \rightarrow (B, V, R)$$

$$\begin{pmatrix} 0.7800 & 0.0078 & 0.0013 \\ -0.1084 & 1.0940 & 0.1847 \\ -0.0049 & 0.0179 & 1.3653 \end{pmatrix}$$

Landoltův BVR na CIE 1931 XYZ



$$(B, V, R) \rightarrow (Z, Y, X)$$

$$\begin{pmatrix} 4.9614, 0.0966, -0.0220 \\ 0.2931, 1.4793, 0.3486 \\ 0.9029, 0.5135, 0.8373 \end{pmatrix}$$

Barevné snímky

„zobrazení vesmírných objektů co nejdělněji, tak jak by je vidělo lidské oko“

Postup zpracování

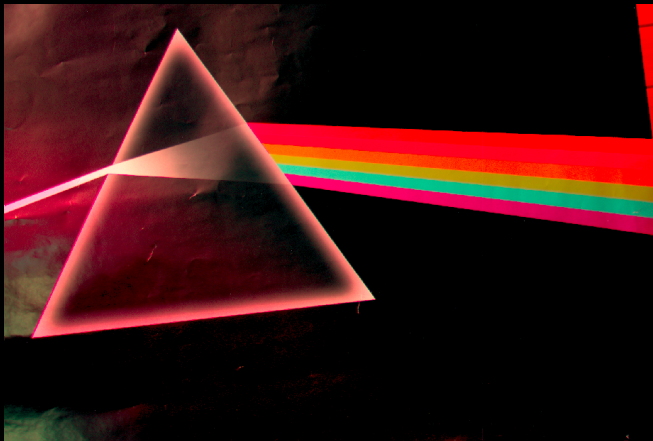
- standardní preprocessing (dark, flat)
- pouze barevná transformace
- žádné další vylepšování
- skládané snímky

Barevné transformace

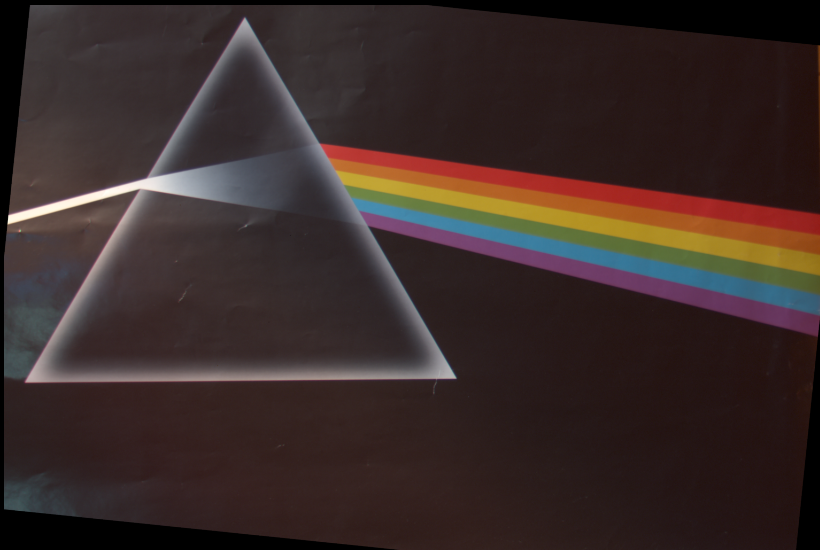
- pořízení snímků v instrumentálním systému b,v,r
- přepočet do BVR (standardní toky v astronomii)
- přepočet z BVR do XYZ (standardní v technice)
- přepočet do sRGB (pro zobrazení)

Klíčový experiment

„exponujeme-li s CCD a BVR filtry pozemskou scénu, můžeme zkontrolovat barevné poddaní“



CCD na MonteBoo ve dne



Krabí mlhovina



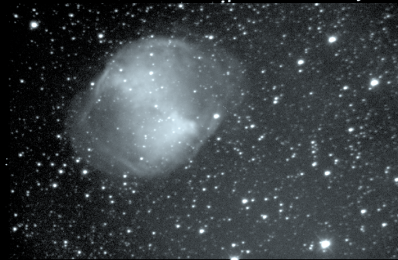
Činka



Činka černobíle



barevně



saturace na nule

Činka v noci¹



barevně



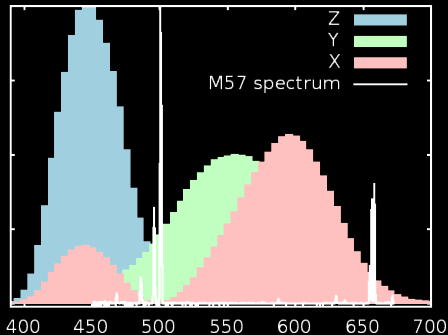
noční vidění

¹Suggested by Jesus II.

Prstencová mlhovina

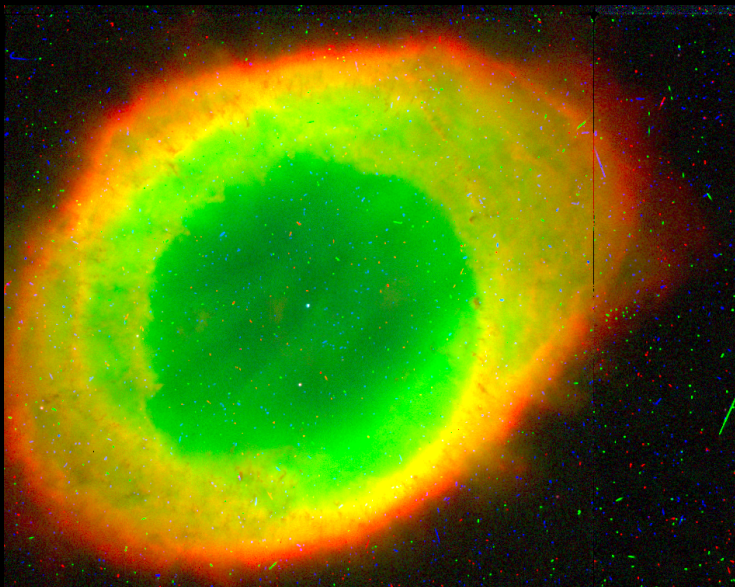


Barva Prstencové mlhoviny ze spektra

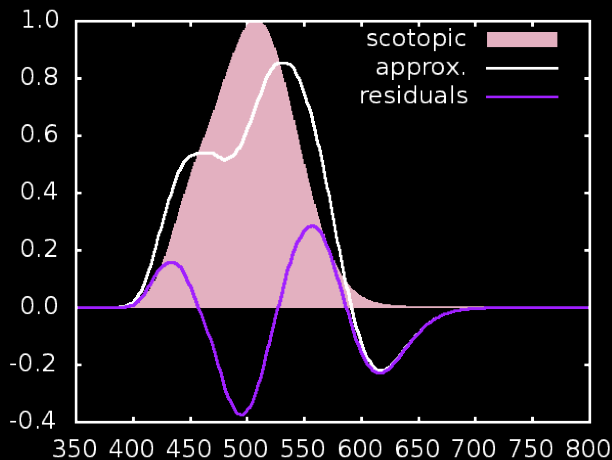


$$X = \int_0^{\infty} I_{M57}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda, \quad Y = \dots, \quad Z = \dots$$

Prstencová mlhovina z vesmírného dalekohledu



Noční vidění



Zodiak — denní vidění



Zodiak — noční vidění



Purkyňův efekt



Botanická zahrada ve dne



Botanická zahrada v noci

Jak vidí botanickou zahradu ...

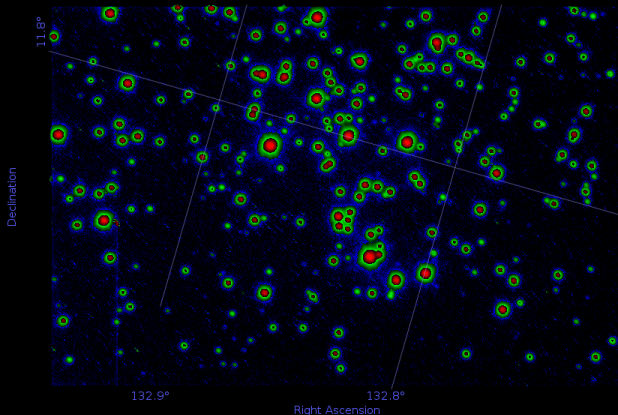


... člověk



... pes

Kalibrační pole — M 67



Barevná kalibrace: Určení vztahu mezi instrumentálními a standardními toky (magnitudami).

Fotometrické filtry

$$I_B = \int_0^{\infty} I(\lambda) B(\lambda) d\lambda, \quad I_b = \int_0^{\infty} I(\lambda) b(\lambda) d\lambda, \dots$$

$$I_b = e_{bB} I_B + e_{bV} I_V,$$

$$I_V = e_{vB} I_B + e_{vV} I_V$$

$$\frac{I_b}{I_B} = e_{bB} + e_{bV} \frac{I_V}{I_B}, \dots$$

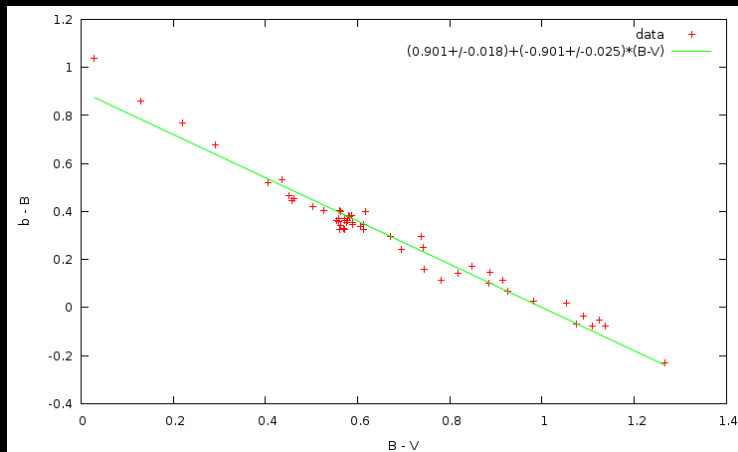
$$e_{bB} \approx 1, e_{bV} \ll 1$$

...

$$b - B = -2.5 \log_{10} \frac{I_b}{I_B}$$

$$b - B = p + q(B - V)$$

Kalibrační křivky



$$b - B = (0.901 \pm 0.018) + (-0.901 \pm 0.025)(B - V)$$

Shrnutí

Zpracování barev:

- každé detekční (oko, CCD+filtry, digi) nebo zobrazovací (sRGB) zařízení má specifický barevný prostor
- převody mezi filtry můžeme spočítat ze spektrálních průběhů

Uplatnění v astronomii:

- simulace nočního vidění
- astrofyzikální interpretace barvy
- fotometrická kalibrace

Credits – I.

M27 (slide 28)

- J.Poředníková, O. Urban, M. Kocka
- MonteBoo, 0.62 m, CCD (ST8XME) + Johnson BVRI

M1 (slide 27)

- F.Hroch
- Vyškov, 0.4 m, CCD (ST8XME) + Johnson BVRI

M57 (slide 31)

- T.Henych, T.Krejčová, B.Mikulecká a SD
- MonteBoo, 0.62 m, CCD (ST8XME) + Johnson BVRI

Credits – II.







Spektrum M57 ([4], slide 32)

- Ch. Buil
- 5-in refractor

HST data archive acknowledgment (slide 33)

- Based on observations made with the NASA/ESA Hubble Space Telescope, obtained from the data archive at the Space Telescope Science Institute. STScI is operated by the Association of Universities for Research in Astronomy, Inc. under NASA contract NAS 5-26555.

Reference – I.

-  <http://www.physics.muni.cz/~hroch/charmony.pdf>
-  http://is.muni.cz/th/106183/prif_b/jilkovabp.pdf
Jílková, L.: Bakalářská práce, Brno 2006
-  <http://adsabs.harvard.edu/abs/1992AJ...104..340L>
Landolt, A.: UBVRI photometric standard stars in the magnitude range 11.5-16.0 around the celestial equator
-  <http://cvr1.ioo.ucl.ac.uk/index.htm>
CIE XYZ, D65 a skotopické profily.
-  <http://astrosurf.com/buil/us/spe6/planet.htm>
Ch. Buil: Spektra planetárních mlhovin
-  <http://munipack.physics.muni.cz>
Developed for Munipack

Reference – II.



<http://seds.org/messier/m/m033.html>, [m001.html](http://seds.org/messier/m/m001.html),
[m027.html](http://seds.org/messier/m/m027.html), ...



http://en.wikipedia.org/wiki/Planetary_nebula



http://en.wikipedia.org/wiki/Hilbert_space



http://en.wikipedia.org/wiki/SRGB_color_space



http://en.wikipedia.org/wiki/CIELUV_color_space



http://en.wikipedia.org/wiki/CIE_1931_color_space