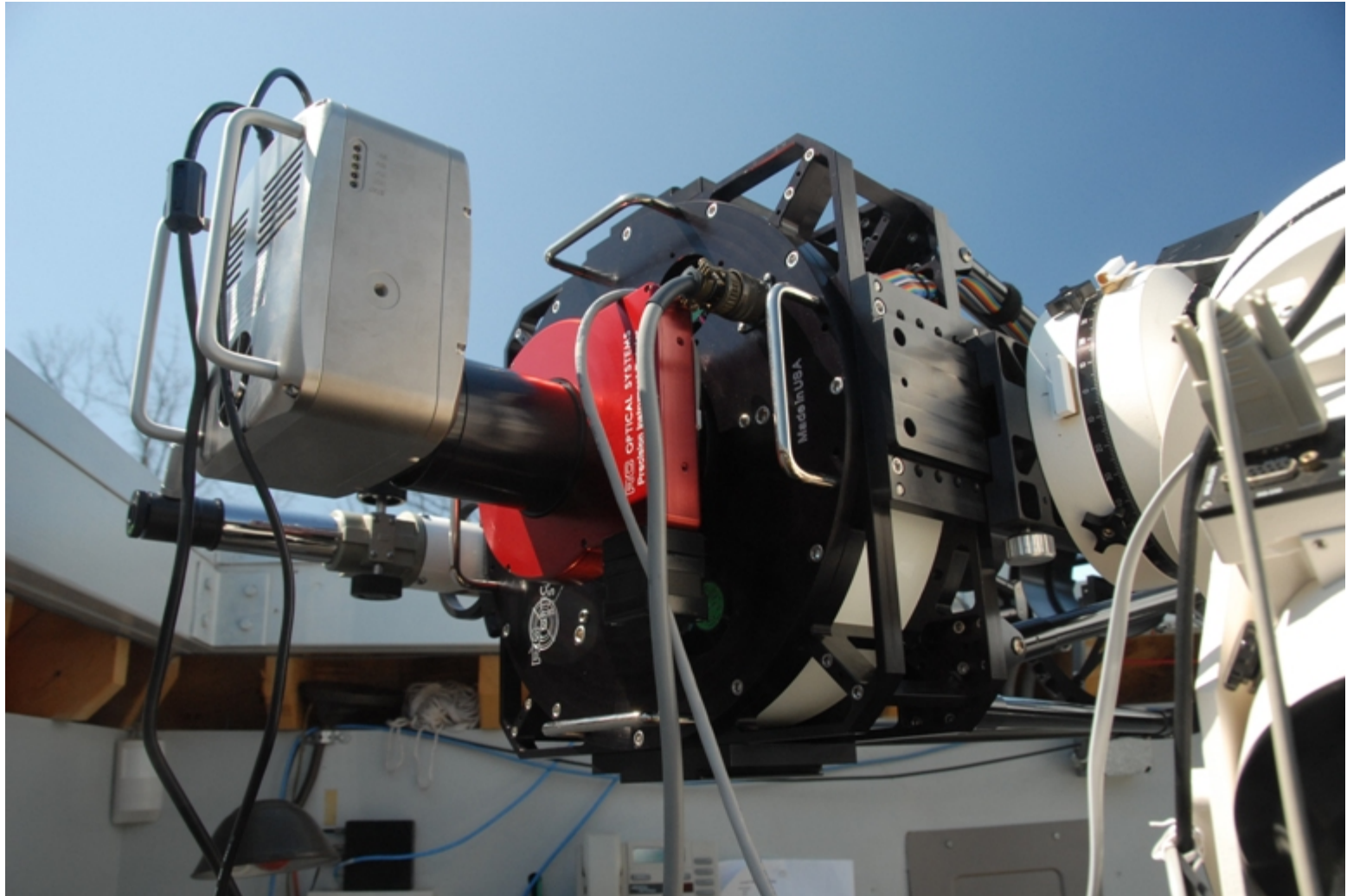


# Metody pozorování proměnných hvězd



# Astronomická fotometrie

**základní úkol - měření hustoty zářivého toku (jasnosti)  $F$**  astronomických objektů (v  $\text{W}/\text{m}^2$ ); v celém rozsahu spektra - bolometrická jasnost

náročné a nepraktické => praktické zjednodušení – měření v definovaných intervalech spektra, fotometrických oborech

*vizuální obor  $V$*  – odpovídá spektrální citlivosti lidského oka; maximum propustnosti filtru 554,4 nm, šířka filtru v polovině maximální propustnosti (FWHM z angl. full width at half maximum) 84,3 nm => hustota zářivého toku ve  $V$  = hustota světelného toku, jasnost  $j$

jednotka jasnosti – v principu  $\text{W}/\text{m}^2$ , lze vyjadřovat i v  $\text{lumen}/\text{m}^2$

1 lumen = světelný tok vyzařovaný do prostorového úhlu 1 steradiánu bodovým zdrojem, jehož svítivost je ve všech směrech 1 kandela.

Obdobně i nevizuální jasnosti  $j_s$  (hustoty zářivého toku po průchodu určitým definovaným filtrem)

z praktických důvodů - jasnost zdroje pomocí hvězdné velikosti (v magnitudách)  
 vztah hvězdné velikosti a jasnosti – Pogsonova rovnice

$$m - m_0 = -2.5 \log \left( \frac{j}{j_0} \right)$$

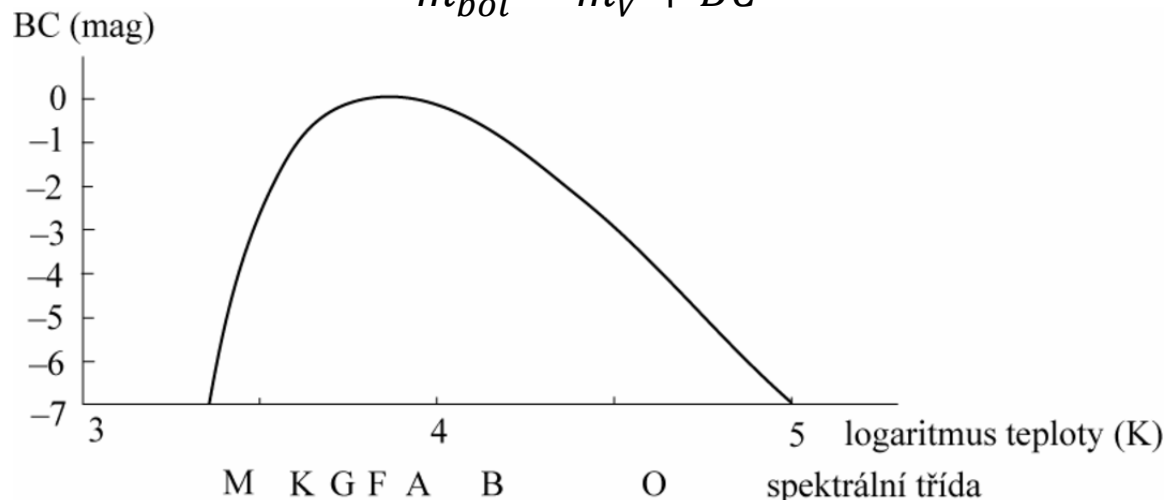
$$m = -2.5 \log \left( \frac{F}{F_0} \right)$$

$j_0$  referenční jasnost zdroje  $m_0 = 0$  mag; vizuální  $m_V j_0 = 2,54 \cdot 10^{-6} \text{ lm} \cdot \text{m}^{-2} = 2,54 \cdot 10^{-6} \text{ luxů}$ , (cca  $3,2 \cdot 10^{-9} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ).

hvězda s bolometrickou hvězdnou velikostí  $m_{bol} = 0$  mag působí mimo zemskou atmosféru hustotu zářivého toku  $F_0 = 2,553 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}$ .

vztah mezi vizuální a bolometrickou jasností

$$m_{bol} = m_V + BC$$



Pogsonova rovnice

$$m_2 - m_1 = -2.5 \log \frac{F_2}{F_1} = 5 \log \frac{r_2}{r_1}$$

modul vzdálenosti

$$(m - M) = 5 \log r - 5 = -5 \log \pi - 5$$

[ mag ]                  [ pc ]                  [ " ]

zářivý výkon, efektivní teplota

$$L = \sigma T_{\text{ef}}^4 4 \pi R^2,$$

za jakého předpokladu to platí?

AČT

# Rozložení energie ve spektru

**spektrální hustota zářivého toku**  $F_\nu$ , resp.  $F_\lambda$  [ $\text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$ , resp.  $\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$ ]

$$F = \int F_\nu d\nu = \int F_\lambda d\lambda, \quad d\nu = \frac{\partial \nu}{\partial \lambda} d\lambda = -\frac{c}{\lambda^2} d\lambda \quad \Rightarrow \quad F_\lambda = \frac{c}{\lambda^2} F_\nu.$$

**absolutní spektrofotometrie** – studium rozložení energie ve spektru

(SED – Spectral Energy Distribution)

průběh spektrální hustoty zářivé energie  $F_\lambda(\lambda)$  vzhledem k hustotě zářivé energie v referenční  $\lambda$  (často  $\lambda_r=500$  nm)

spektrofotometrická hvězdná velikost

$$\left( \frac{m(\lambda)}{1 \text{ mag}} \right) = -2,5 \log \left( \frac{F_\lambda(\lambda)}{F_\lambda(\lambda_r)} \right)$$

(pro  $\lambda = \lambda_r$   $m(\lambda) = 0$  mag)

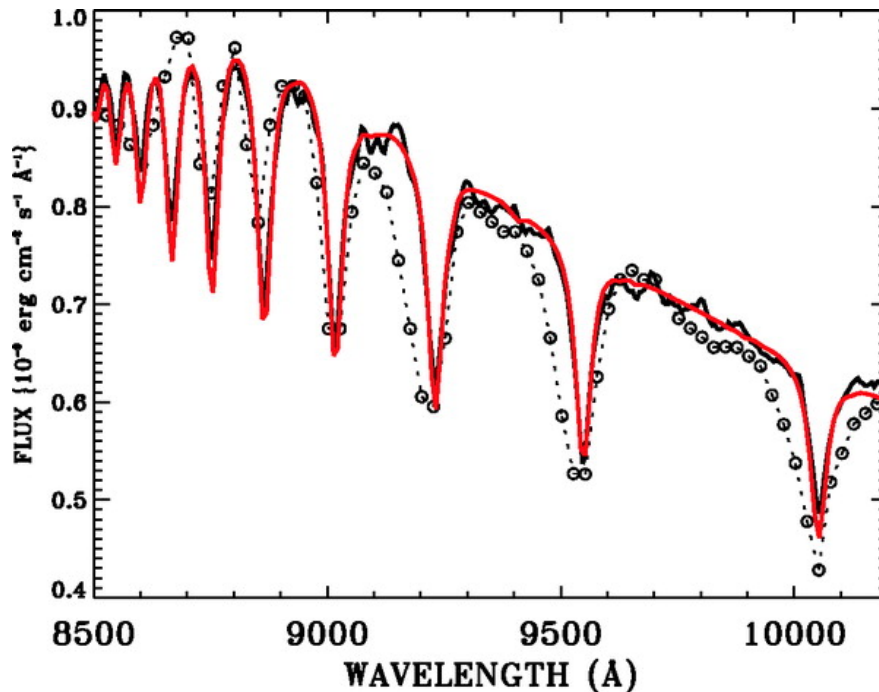
# Rozložení energie ve spektru

## praktická realizace:

úzkopásmovou fotometrií s filtry s šířkou spektrální propustnosti ( $<1$  nm) v desítkách vybraných vlnových délek

## výsledek měření:

křivka závislosti  $m(\lambda)$  na vlnové délce  $\lambda$  nebo vlnočtu  $1/\lambda$



Vega (HST) - Bohlin & Gilliland

# Barevné indexy

## monochromatická hvězdná velikost

$$m(\lambda) = -2,5 \log \left( \frac{F_\lambda(\lambda)}{F_{0\lambda}(\lambda)} \right) \text{ mag} = -2,5 \log F_\lambda(\lambda) + C(\lambda)$$

$C(\lambda)$  volí se pro spektrální typ A0 ( $T_{\text{eff}} = 9400 \text{ K}$ )  $m(\lambda)$  stejné

**barevný index** = rozdíl hvězdných velikostí v rozdílných vlnových délkách  $\lambda_{c1} < \lambda_{c2}$

$$CI = m(c_1) - m(c_2) = -2,5 \log \left( \frac{F_\lambda(c_1)}{F_\lambda(c_2)} \right) + [C(c_1) - C(c_2)]$$

pro (B-V) a AČT barevná teplota

$$T = \frac{7300 \text{ K}}{(B - V) + 0,52}$$

složitější barevné indexy, kombinace  
(např. v *uvby*)

$$CI_j = \sum_i a_{ij} m(c_i)$$

monochromatická hvězdná velikost, barevné indexy – ideální případ

skutečnost: měříme v intervalu vlnových délek => **heterochromatická hvězdná velikost** - ovlivněna použitým dalekohledem, detektorem ...=> závisí na relativní spektrální citlivost R

$$E = \int_0^{\infty} R(\lambda) F_{\lambda}(\lambda) d\lambda.$$

výkon zářivé energie zaznamenané detekčním zařízením

efektivní vlnová délka

$$\lambda_{ef} = \frac{\int_0^{\infty} \lambda R(\lambda) F_{\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} R(\lambda) F_{\lambda}(\lambda) d\lambda}$$

pro úzkopásmové filtry lze přepsat

$$\lambda_{ef} = \frac{\overline{F(\lambda_{ef})} \int \lambda R(\lambda) d\lambda}{\overline{F(\lambda_{ef})} \int R(\lambda) d\lambda} = \frac{\int \lambda R(\lambda) d\lambda}{\int R(\lambda) d\lambda}$$

ale pozor – záleží i na spektrálním typu pozorované hvězdy! (čím teplejší je hvězda tím kratší bude efektivní vlnová délka)



# Fotometrické systémy



## Historie

- vizuální pozorování
- fotografické hvězdné velikosti
- fotoelektrická měření s filtry (do 2. sv. války)
- 1. standard *UBV* (1953)

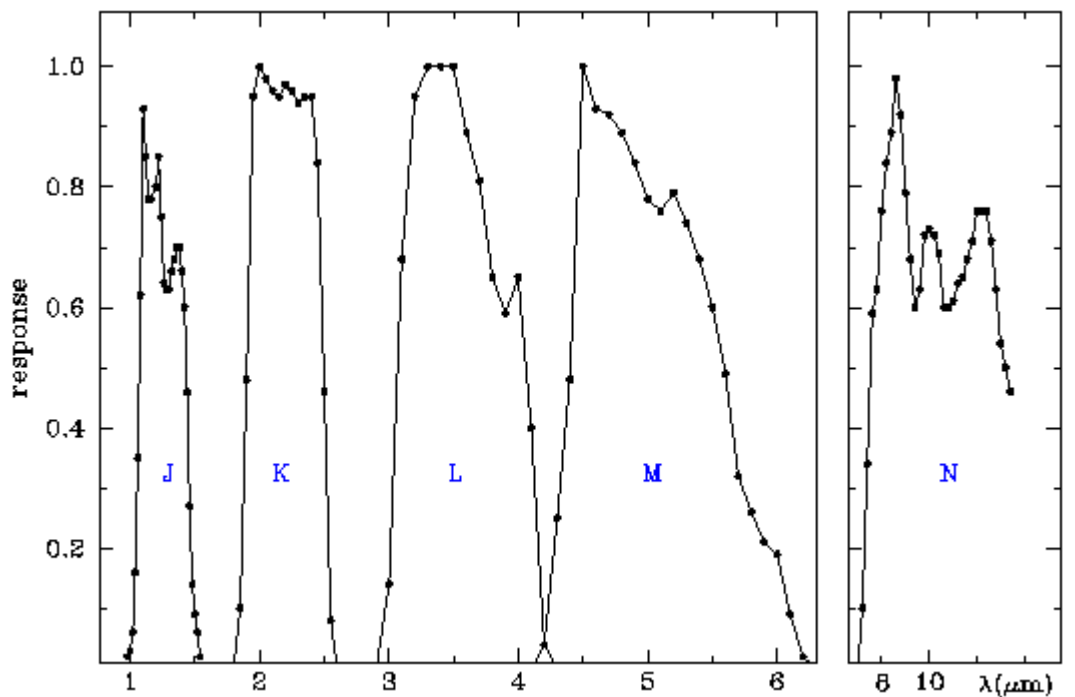
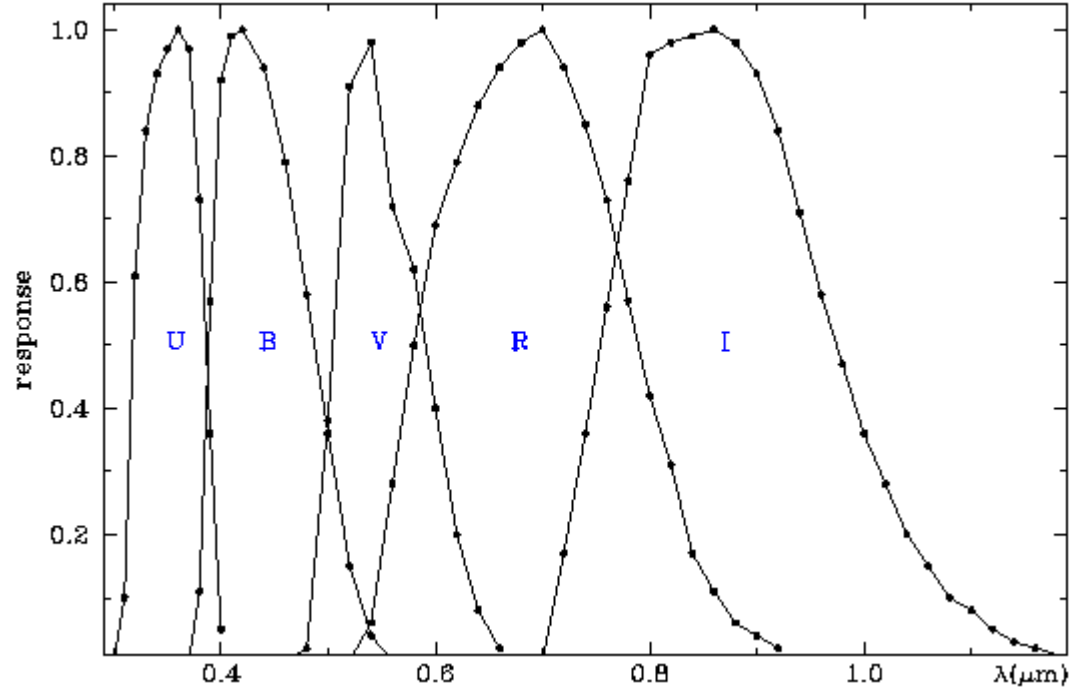
## Současnost

- přes 200 fotometrických systémů (Asiago Database on Photometric Systems)  
<http://ulisse.pd.astro.it/Astro/ADPS>
- vymezení
  - a) střední vlnová délka okna propustnosti
  - b) šířka propustnosti (filtru) jako FWHM
  - c) spektrální profil filtru
  - d) pokud profil filtru zahrnuje i křivku citlivosti detektoru, je třeba uvádět charakteristiku detektoru
  - e) teplota, k níž se vztahují výše uvedené specifikace
  - f) případně další specifikace a detaily (například strmost charakteristik, prosaky mimo pásmo propustnosti apod.)
- dělení
  - širokopásmové – šířka  $> 30$  nm, např. *UBV*
  - středněpásmové – šířka 10-30 nm, např. *uvby*
  - úzkopásmové – šířka  $< 10$  nm

**UBV** Johnson-Morgan (1953)  
**UBVRI(JHKLMN)** - Johnson (1965)

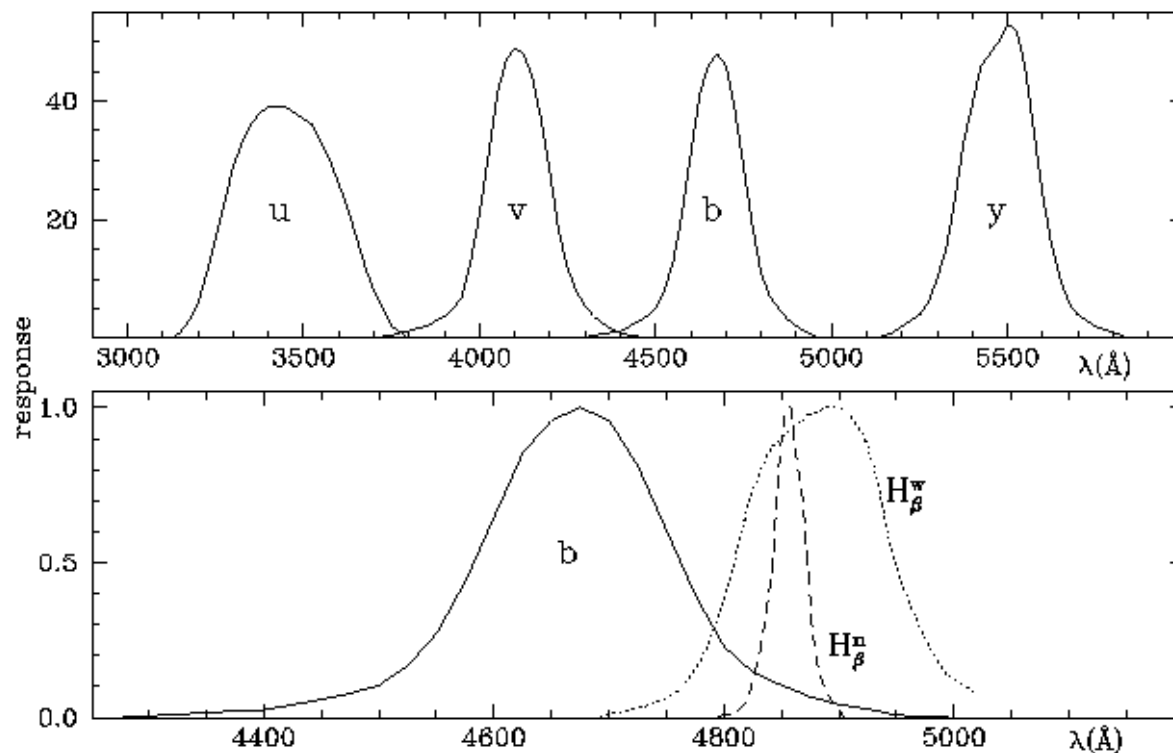
mnoho variací  
 – pro CCD – Bessell, Kron-Cousins

obor	$\lambda_0$ ( $\mu\text{m}$ )	po- šířka ( $\mu\text{m}$ )
<b>U</b>	0.36	0.04
<b>B</b>	0.44	0.10
<b>V</b>	0.55	0.08
<b>R</b>	0.70	0.21
<b>I</b>	0.90	0.22
<b>J</b>	1.25	0.3
<b>H</b>	1.62	0.2
<b>K</b>	2.2	0.6
<b>L</b>	3.4	0.9
<b>M</b>	5.0	1.1
<b>N</b>	10.2	6.0



## uvbyHbeta - Strömgen and Crawford - 1956

obor	$\lambda_{\text{peak}}$ (nm)	polo- šířka (nm)
<b>u</b>	350.0	30.0
<b>v</b>	411.0	19.0
<b>b</b>	467.0	18.0
<b>y</b>	547.0	23.0
<b>H<math>\beta</math><sub>úzký</sub></b>	485.9	3.0
<b>H<math>\beta</math><sub>široký</sub></b>	489.0	14.5



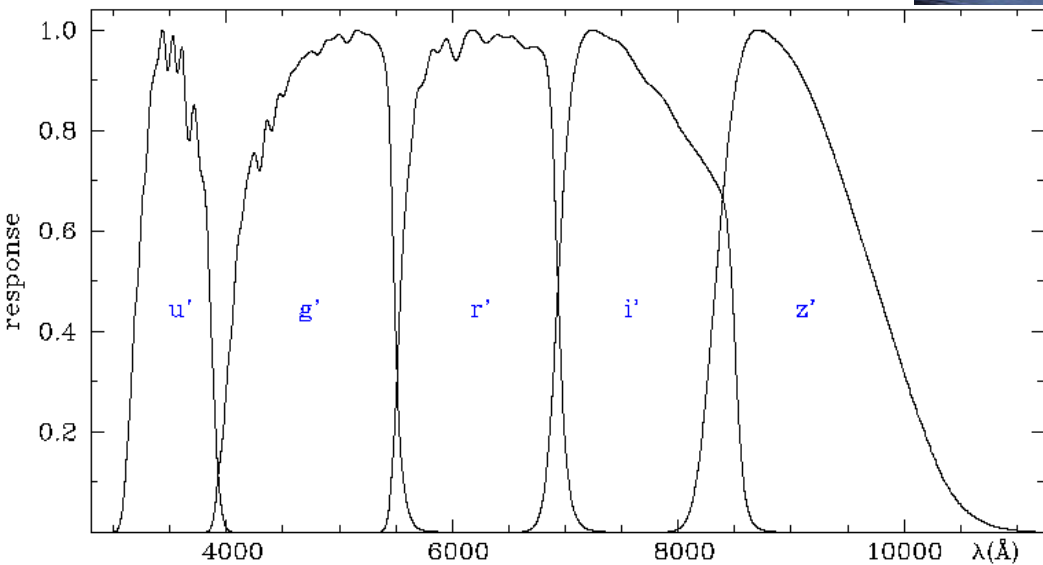
indexy  $c_1$  a  $m_1$  – málo závislé na mezihvězdné extinkci

$c_1 = (u-v) - (v-b)$  - souvisí s velikostí Balmerova skoku

$m_1 = (v-b) - (b-y)$  - metalický index (obsah kovových prvků v atmosféře zdroje)

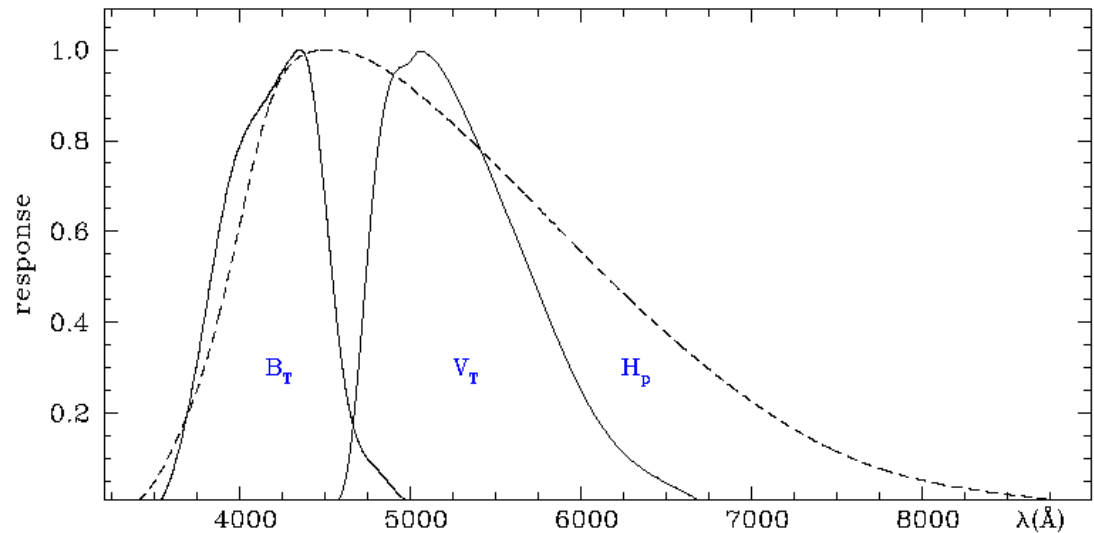
# Sloan DSS - Fukugita et al. (1996)

obor	$\lambda_{\text{eff}}$ (nm)	FWHM (nm)
<b>u'</b>	355.7	59.9
<b>g'</b>	482.5	137.9
<b>r'</b>	626.1	138.2
<b>i'</b>	767.2	153.5
<b>z'</b>	909.7	137.0



# HIPPARCOS, TYCHO

obor	$\lambda_{\text{peak}}$ (nm)	FWHM (nm)
$B_T$	435.0	72.5
$H_p$	452.5	220.0
$V_T$	510.0	95.0



## TELESCOPE

0.29cm (reflector)

## DETECTOR

Hipparcos: image dissector tube, (S-20 cathode)

Tycho: photomultiplier (Bi-alkali cathode)

## MAIN ARTICLE

Hipparcos and Tycho catalogues 1997, ESA pub SP-1200, Volume 1, pg. 39

nulový bod:  $H_p = B_T = V_T = 0.00$   
pro hvězdy s  $V_{\text{Johnson}} = 0$  a  $(B-V) = 0$



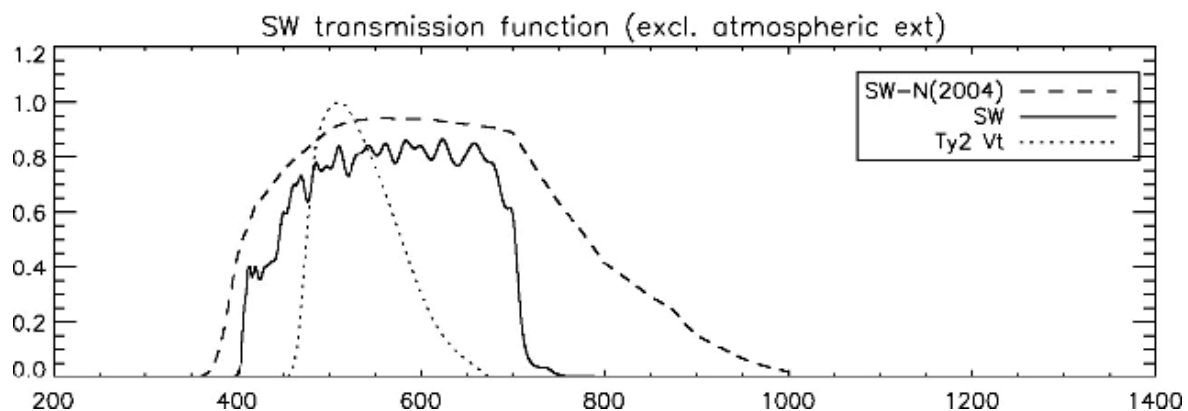
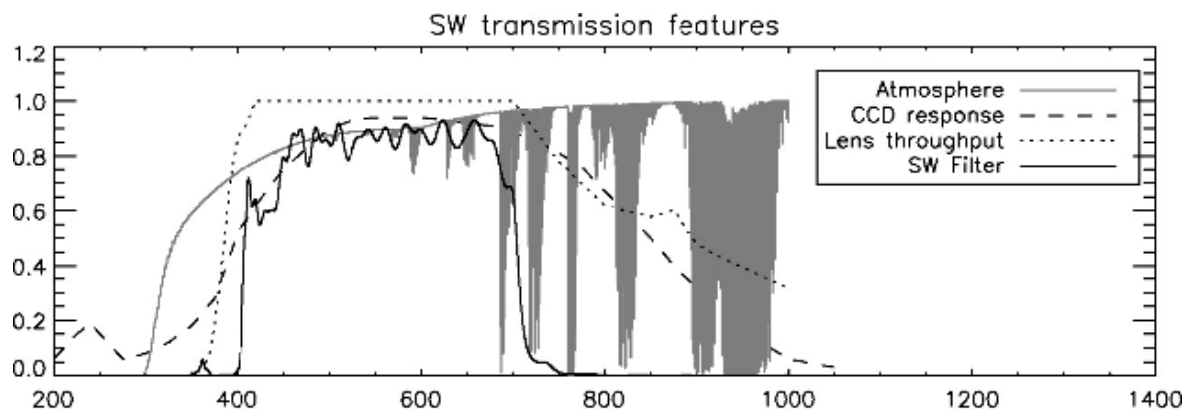
## Fotometrické systémy dalších přehlídkových projektů

ASAS – V, zčásti také I

OMC – V

Pi of the Sky – bez filtru => dle charakteristik kamer

SuperWASP  
– 2004 bez filtru,  
pak širokopásmový filtr



# Redukce a transformace

atmosférická extinkce - zeslabení světla zemskou atmosférou, závisí na vlnové délce záření a vlastnostech atmosféry

extinkční koeficient  $k$  - funkcí času a vlnové délky

$$m(c,z) = m_0(c) + k(c)X(z) \quad \text{Bouguerův zákon}$$

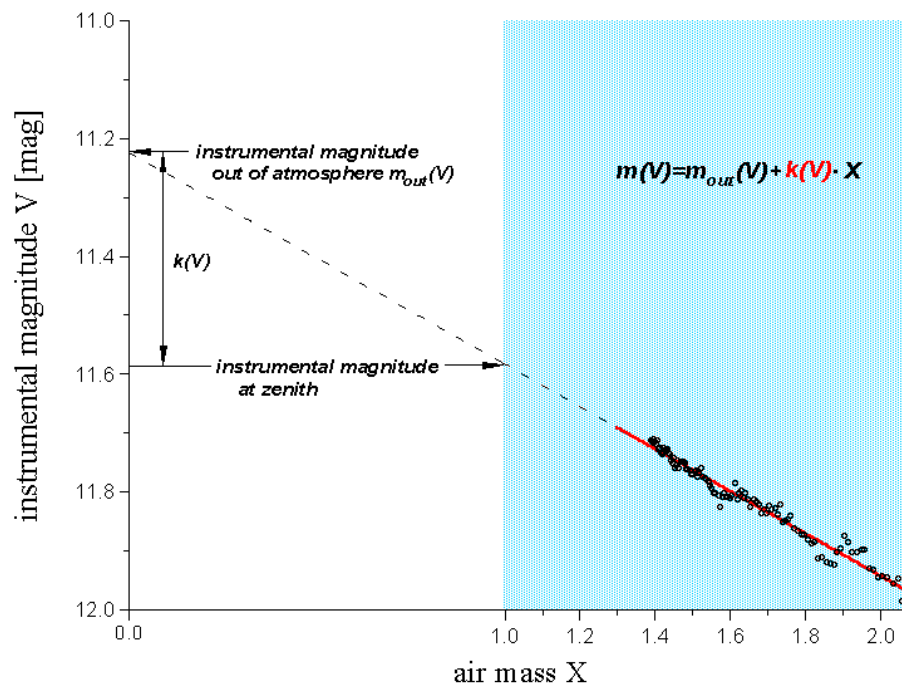
$m_0(c)$  – hv. velikost hvězdy vně zemské atmosféry v barvě  $c$

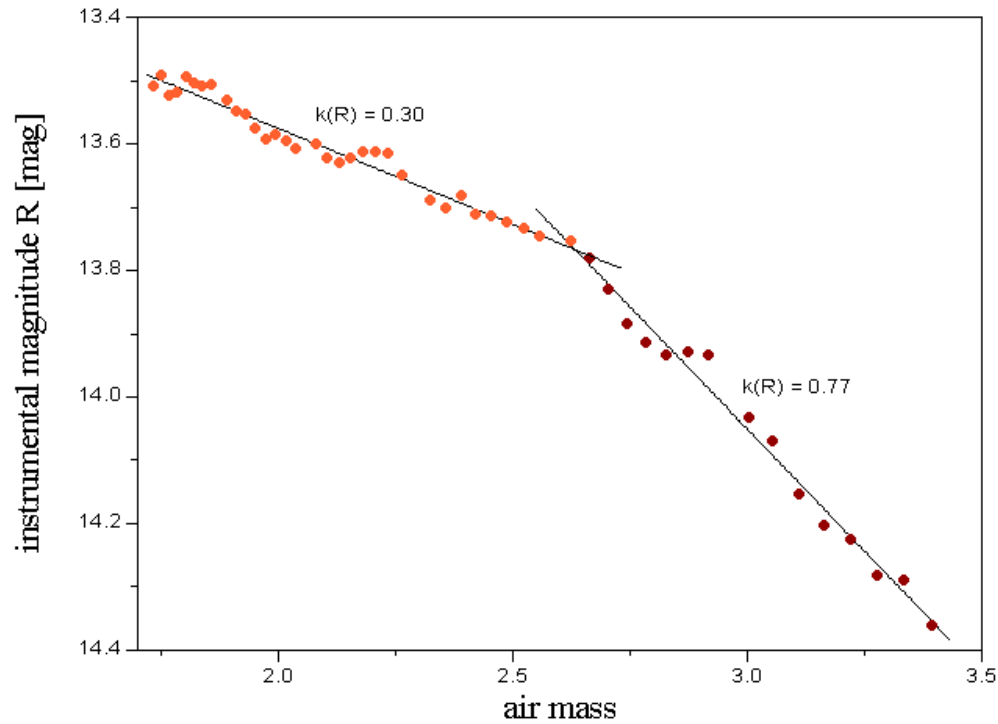
$m(c, z)$  – hv. velikost objektu v zenitové vzdálenosti  $z$

$k(c)$  - lineární extinkční koeficient v příslušné barvě v magnitudách,

$X$  - vzdušná hmota (v zenitu  $X(0) = 1$ )

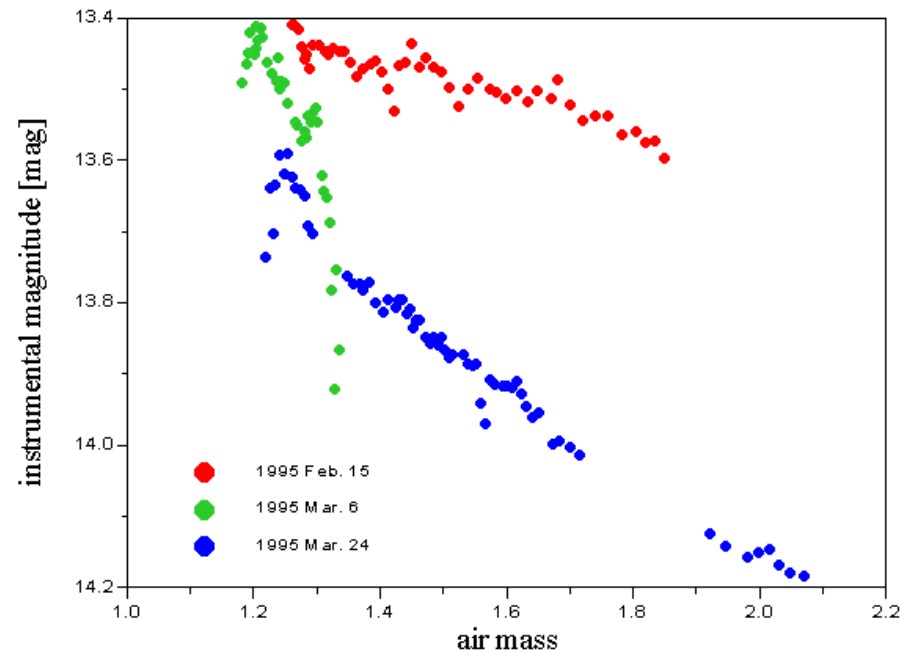
$$X = \sec z, \text{ lépe } X = (1 - 0,0012 \operatorname{tg}^2 z) \sec z$$





Při pozorování za ranní inverze hvězda zřejmě zapadala do přízemní aerosolové vrstvy a její instrumentální magnituda klesala rychleji než odpovídalo reálnému extinkčnímu koeficientu.

Závislost instrumentální magnitudy hvězdy GSC1326.1430 v B filtru na optické (vzdušné) hmotě. Nej kvalitnější byla první noc, během druhé noci se měnily podmínky, třetí noc byla zhoršená, ale poměrně konstantní extinkce. (Pozorováno v Ondřejově, 14.2.-24.3.1995)





## Transformace fotometrických barev

1. odečíst vliv atmosféry
2. převod na standardní fotometrický systém

pozorování ve fotometrických filtrech není zárukou toho, že máte data ve standardním mezinárodně srovnatelném fotometrickém systému!

(spektrální citlivost detektoru, dalekohledu, propustnosti filtrů apod. – mění se s časem)

**Normální transformace** – přechod od instrumentálních barev do standardního fotometrického systému; nutné pozorovat alespoň ve dvou barvách; nejjednodušší případ

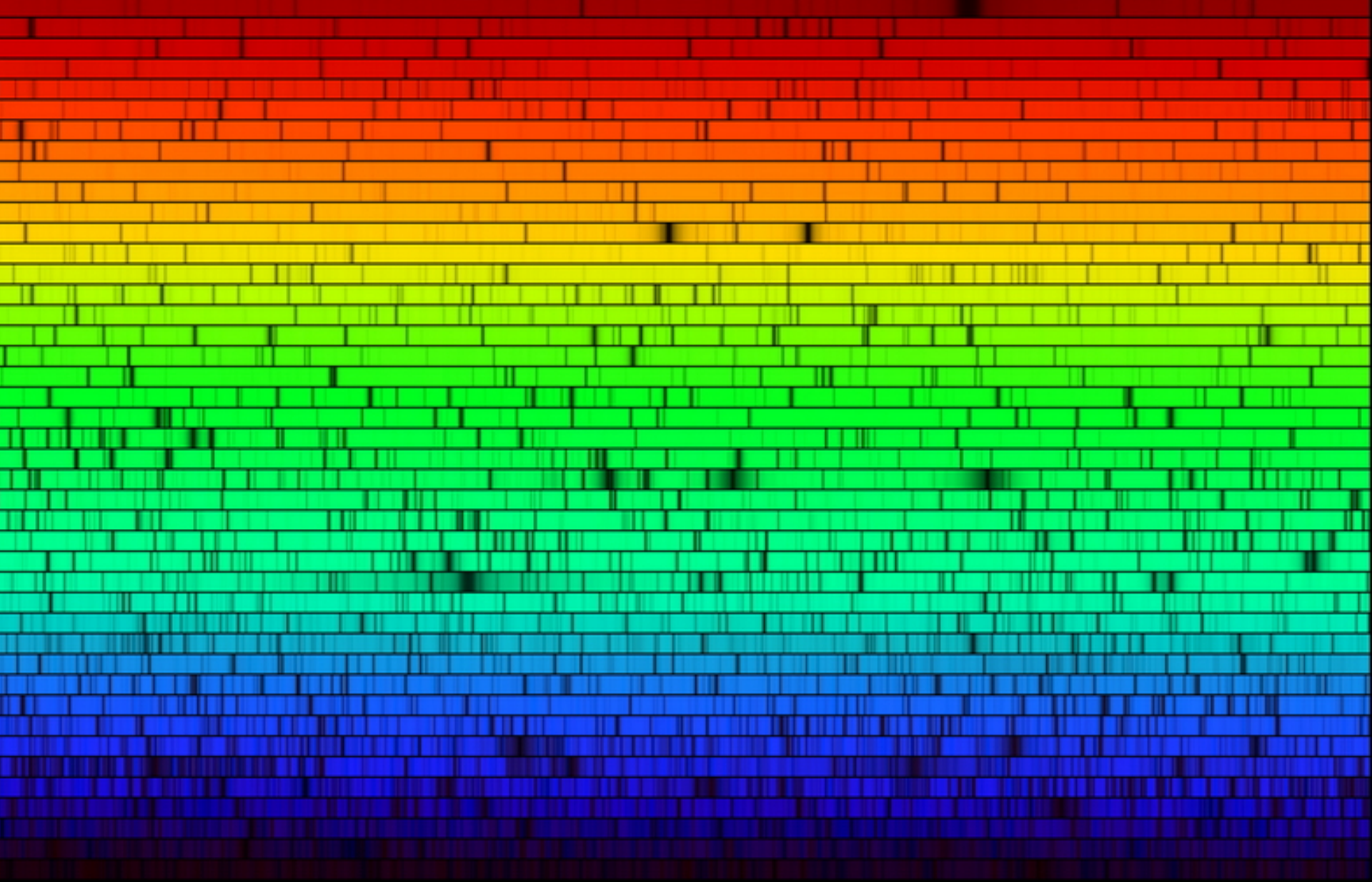
$$\begin{bmatrix} m(c_1) \\ m(c_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m(c'_1) \\ m(c'_2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

$$m(c_2) - m(c_1) = B_{21} [m(c'_2) - m(c'_1)] + A_{21}$$

(obecně viz např. Harmanec, HEC 22)

**Speciální transformace** – přechod z jednoho fotometrického systému na druhý

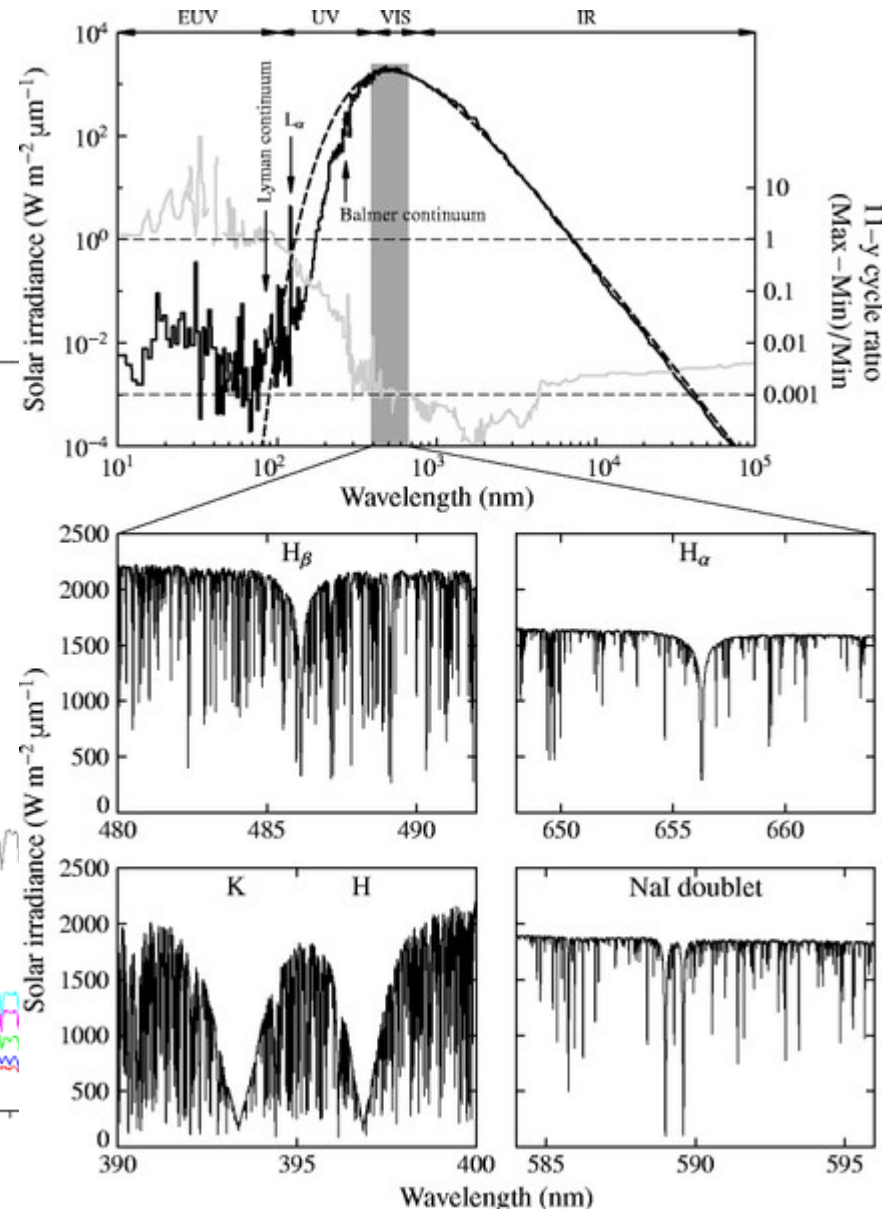
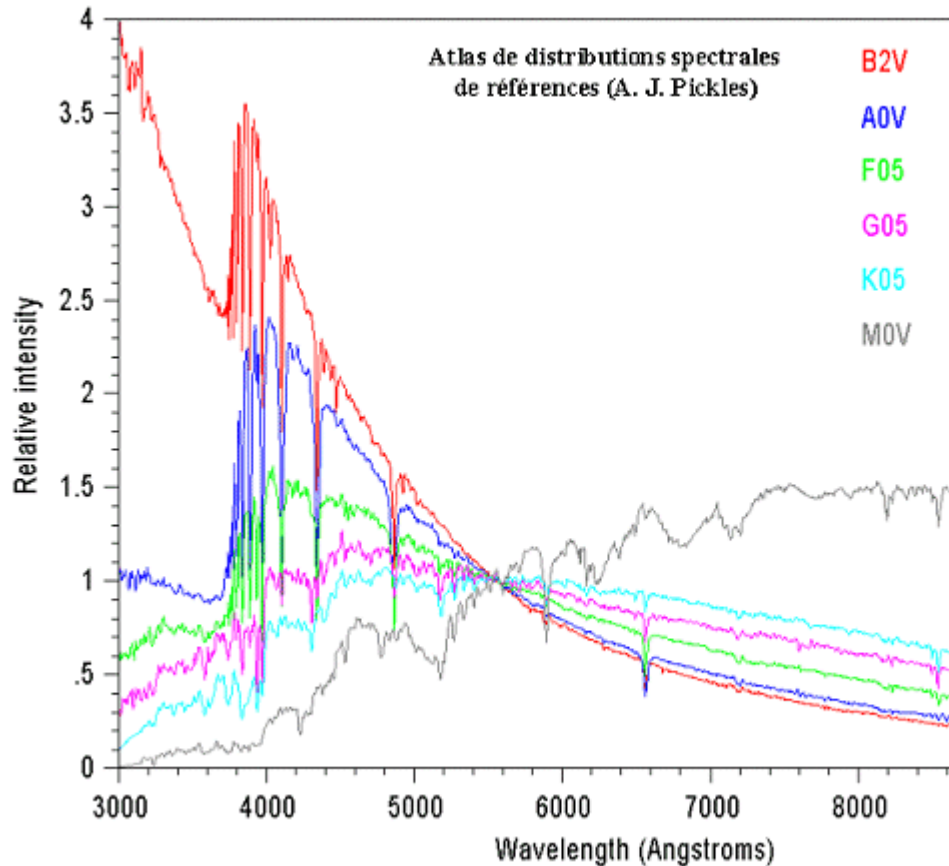
# Spektroskopie



# Spektrum – funkce intenzity v závislosti na vlnové délce/frekvenci

$$I(\lambda) = \frac{\partial I}{\partial \lambda}$$

Spektrum = vizitka vesmírných objektů



# Škála informací získávaných ze spekter

## A. hvězdy

1. Teplota a tlak (z intenzity a šířky spektrálních čar různých prvků).
2. Chemické složení (z šířky spektrálních čar s přihlédnutím k teplotě).
3. Zářivý výkon (z spektrálních čar obvykle vodíkových nebo ze srovnání intenzity některých spektrálních čar).
4. Rotace hvězdy a turbulentní pohyby plynů v horních vrstvách atmosféry (z Dopplerova jevu, tyto pohyby rozšiřují čáry a současně zplošťují jejich profil).
5. Radiální pohyb hvězd (z Dopplerova jevu).
6. Násobnost hvězdy (z periodického posunutí nebo rozštěpení čar).
7. Přítomnost případně polarita magnetického pole (vede k rozšíření čar, u silných polí k rozštěpení, ze Zeemanova jevu).

# Škála informací získávaných ze spekter

## B. Plynné mlhoviny

1. Teplota, hustota, chemické složení (z relativní intenzity čar různých prvků).
2. Koncentrace elektronů a hmotnost mlhoviny (z jasnosti mlhoviny ve spojitém spektru).
3. Pohyby mlhoviny jako celku, případně vnitřní pohyby (z Dopplerova jevu).

## C. Vnější galaxie

1. Hvězdné složení (z čar v absorpčním spektru a jejich intenzity).
2. Vzdálenost galaxie (z posuvu čar ve spektru a Hubbleova zákona).
3. Vnitřní pohyby v galaxiích (z radiálních rychlostí jednotlivých oddělených oblastí uvnitř galaxie určených z Dopplerova jevu).
4. Množství horkého plynu v galaxiích a zvláštnosti jeho rozdělení (z intenzity emisních čar ve spektru různých oblastí galaxie, zejména v aktivních jádrech galaxií).

## Spektra – rozdělení:

1. *spojitá* = kontinua
2. *čarová* - emisní
  - absorpční.

## Hvězdná spektra – vznik ve fotosférách

čarové spektrum - vázaně vázanými přechody elektronu mezi jednotlivými energiovými hladinami

spektrum vodíku - série spektrálních čar:

- Lymanova série v ultrafialové oblasti spektra,
- Balmerova série ve viditelné oblasti,
- Paschenova série,
- Brackettova série,
- Pfundova série v infračerveném oboru.

spojité záření kontinua – vznik přechody volně-volnými, vázaně-volnými, rekombinací

vodík - nejvýznamnější vázaně-volné přechody;

## Základní pojmy

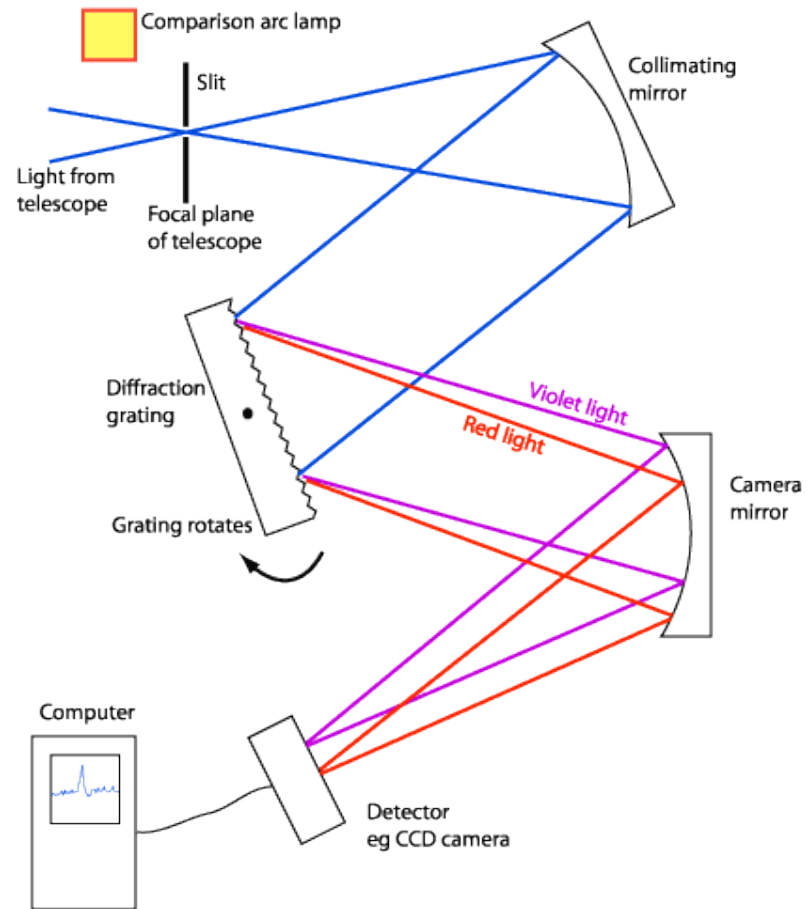
**Spektroskop** - pro pozorování a srovnávání spekter (Fraunhofer, 1817)

**Spektrograf** – záznam spektra – vzniká **spektrogram**

**Spektrografy** – dělení dle disperzního členu:

- *hranolový* - 1 až 3 hranoly - spektrální klasifikace
- *mřížkový* - difrakce na mřížce, vrypy na mřížce (hustota stř. 600 vrypů/mm); pozorování v různých řádech, nevýhoda - proužky spektra moc dlouhé
- *ešeletové* (z angl. echellette), Echelle - difrakční mřížka s malým počtem vrypů soustřeďujících záření do vysokých řádů spektra; velmi progresivní způsob informace, vysoké řády opticky naskládané nad sebou; vysoká disperze, užití CCD

# Základní pojmy

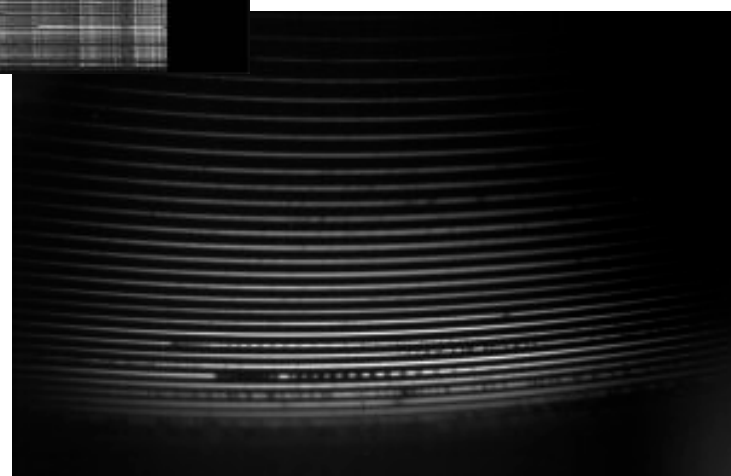
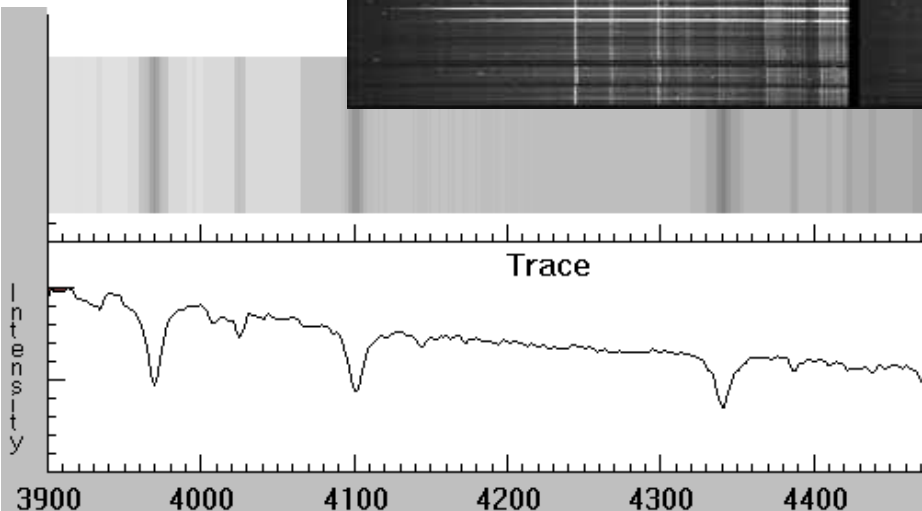
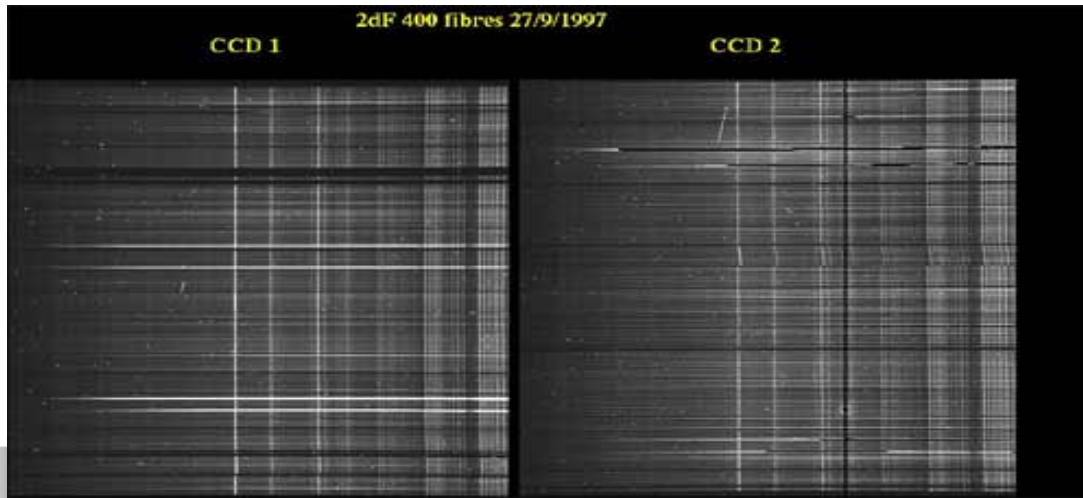
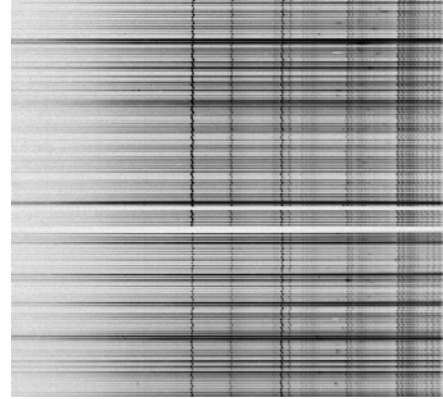


A Schematic Diagram of a Slit Spectrograph



# Detektory spektrografu

- oko - spektroskop
- fotografický - fotografická deska, fólie, papír - přehlídky;
- elektronický - CCD prvek - lineární, důležité, co nejobektivnější záznam
  - s užitím optických vláken - multifibre spectroscopy



# Charakteristiky spektrografu

**1. disperze**  $W$  - úsek spektra na 1 délkový element na detektoru spektrografu

$$W = \Delta\lambda/\Delta l \quad [\text{Å/mm, nm/mm; nm/pixel}]$$

*čím je disperze numericky menší, tím větší details v profilu čar můžeme pozorovat!*

Dělení spekter dle disperze:

- nízkodisperzní spektrum - 2 nm/mm a více
- vysokodisperzní spektrum - 2 nm/mm a méně

**2. světelnost** – s rostoucí disperzí klesá intenzita ve spektru

**3. rozlišovací schopnost**  $R = \lambda/\Delta\lambda$

$\Delta\lambda$  – vzdálenost ještě rozlišitelných čar u vlnové délky  $\lambda$

Př.  $R=50000$  pro okolí čáry 500 nm =>

=> lze rozlišit čáry vzdálené 0,01 nm

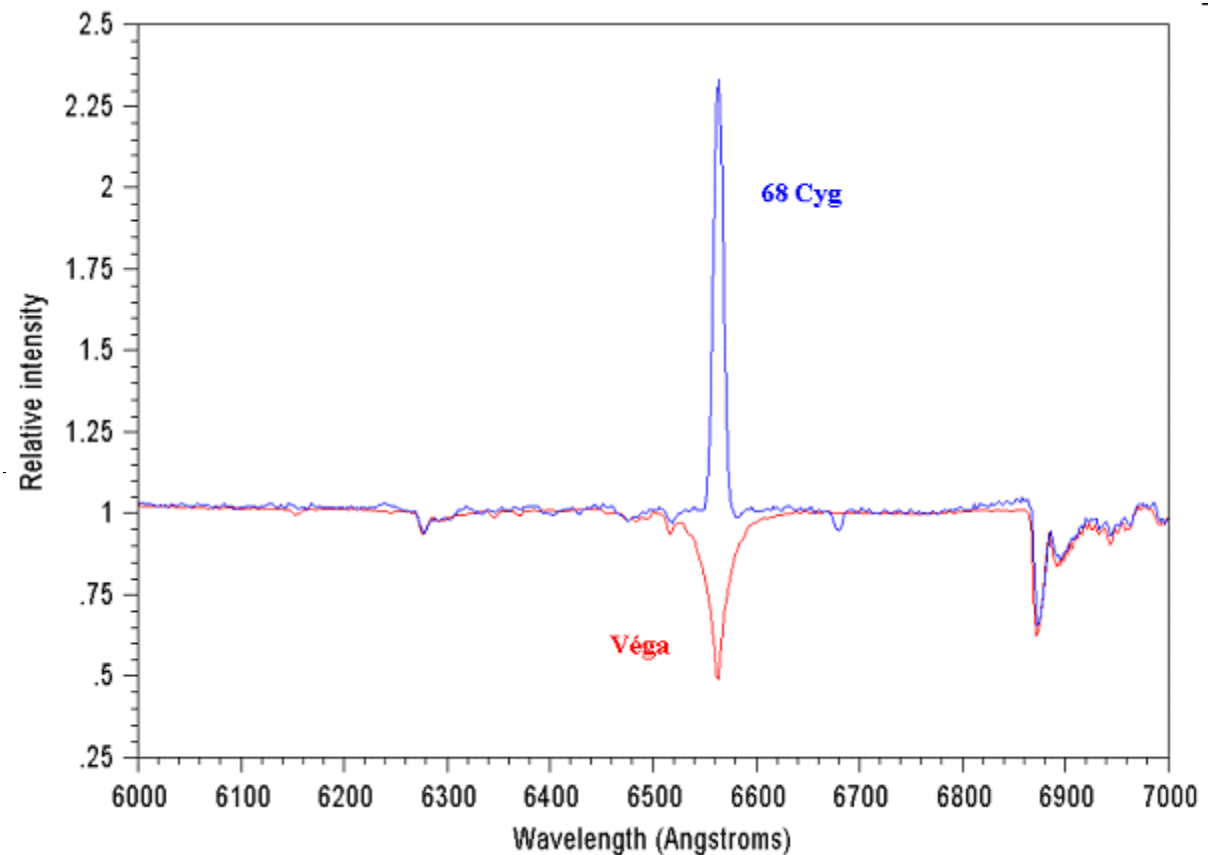
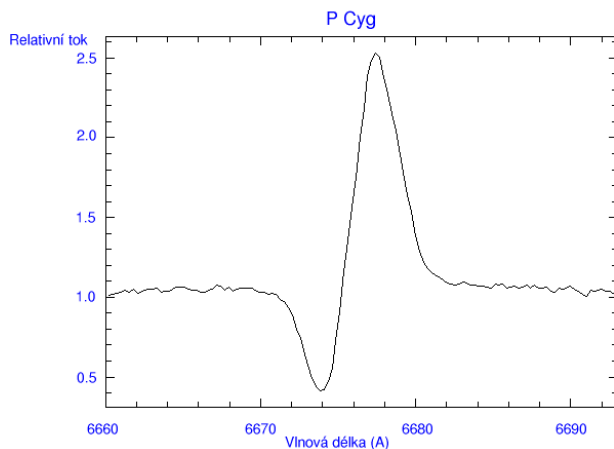
**4. kvalita spekter** – poměr signálu k šumu **S/N (SNR)** – lze odhadnout jako poměr průměrného signálu a jeho střední kvadratické chyby určené pro úsek spektra bez spektrálních čar.

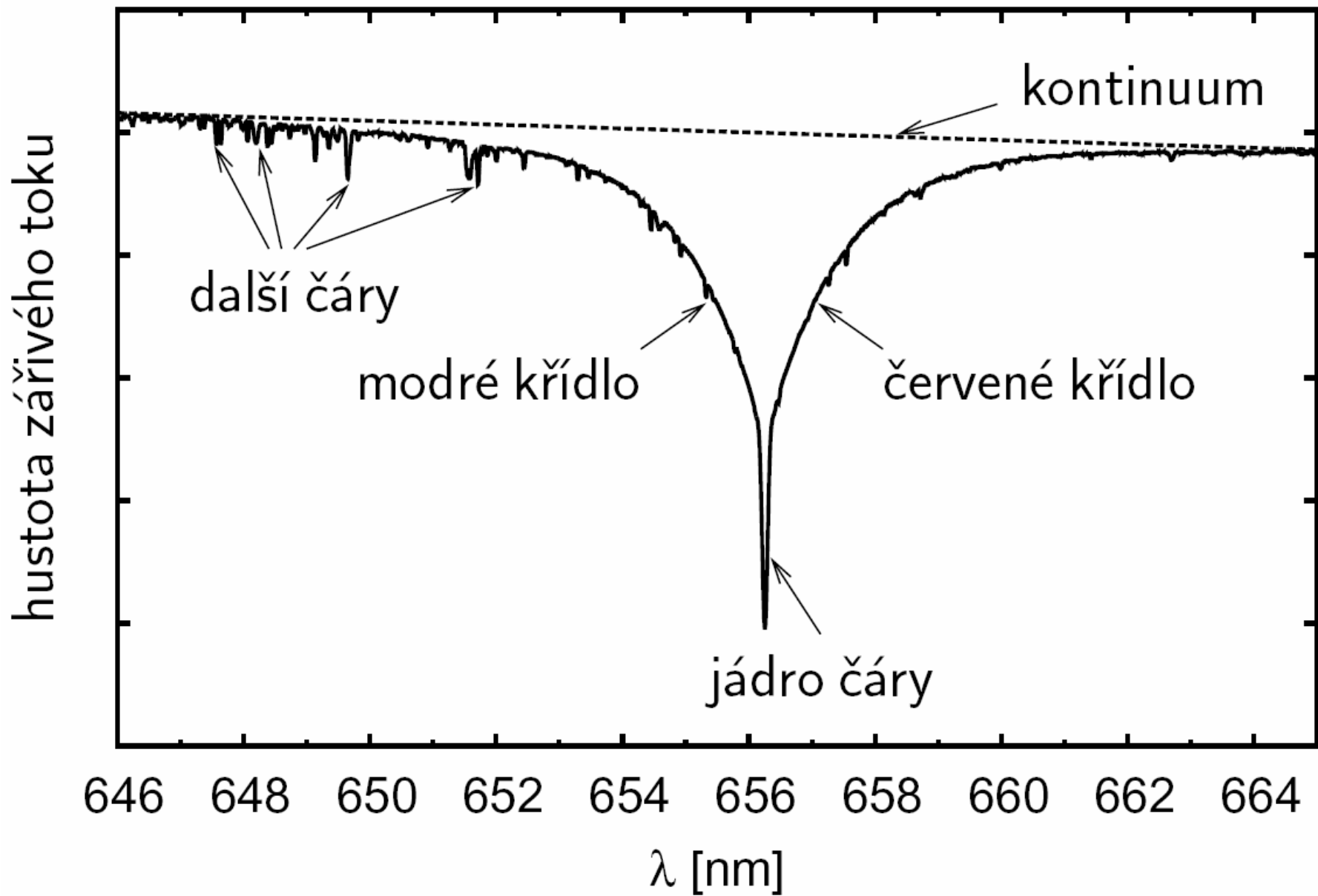
## Vzhled spektra závisí na:

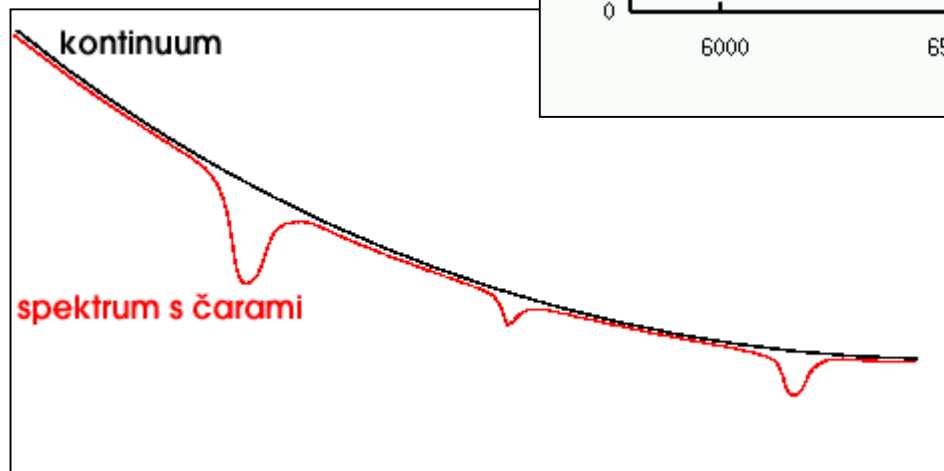
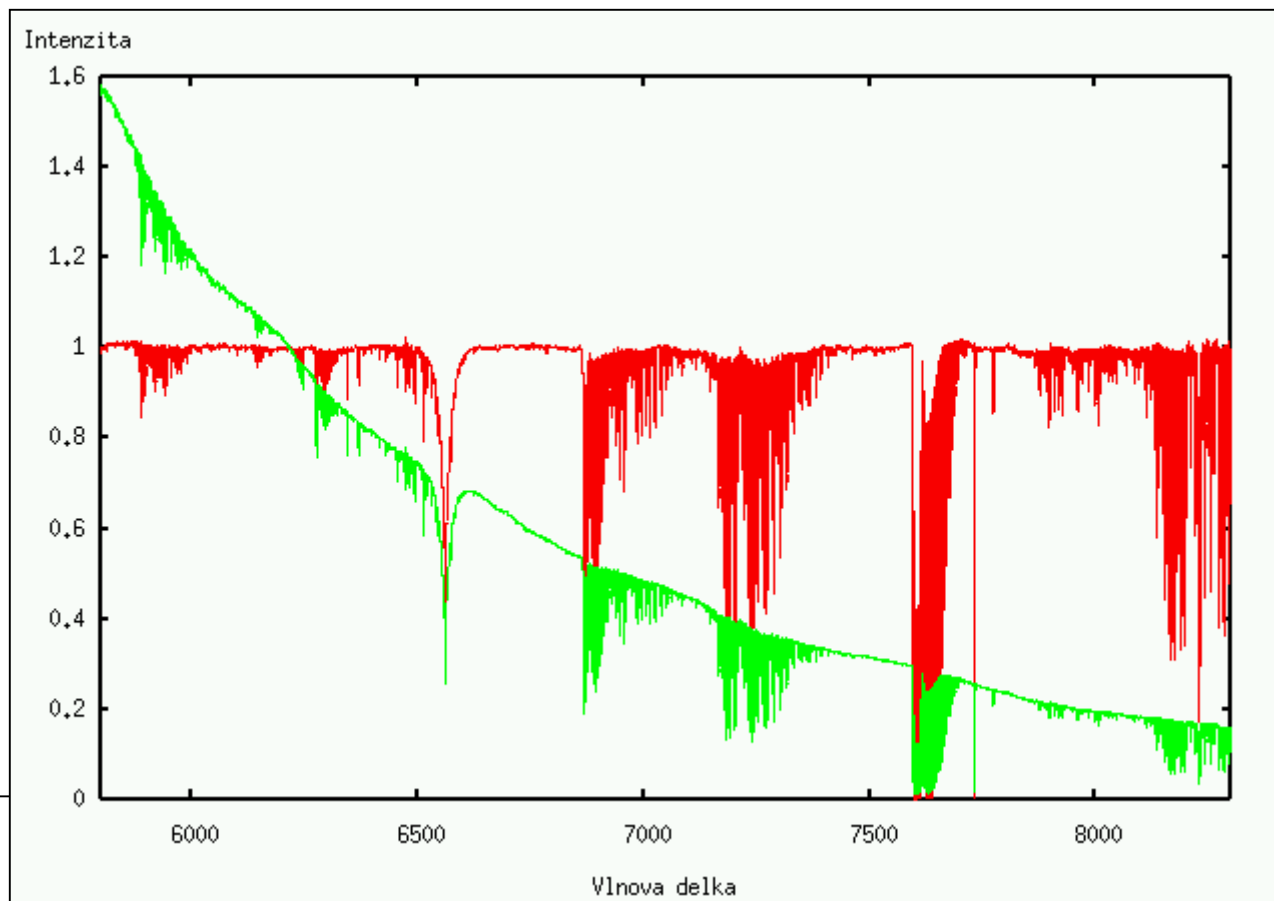
- pozorovaném objektu,
- atmosféře,
- vlastnostech dalekohledu, spektrografu, detektoru
- záznamovém médiu...

## Spektrální čáry

- absorpční
  - emisní
- (P Cyg profil)







## Charakteristiky spektrální čáry

1. vlnová délka a její posun oproti laboratoři
2. profil čáry, FWHM
3. ekvivalentní šířka
4. hloubka/intenzita čáry

ad 1. **radiální rychlost** – vzájemný pohyb pozorovatele a objektu

rozbor RV – dříve – dobře definované čáry – měření vln. délky středu čáry  
(SPEFO, VO-Splat)

- dnes – celé úseky spektra – CCF

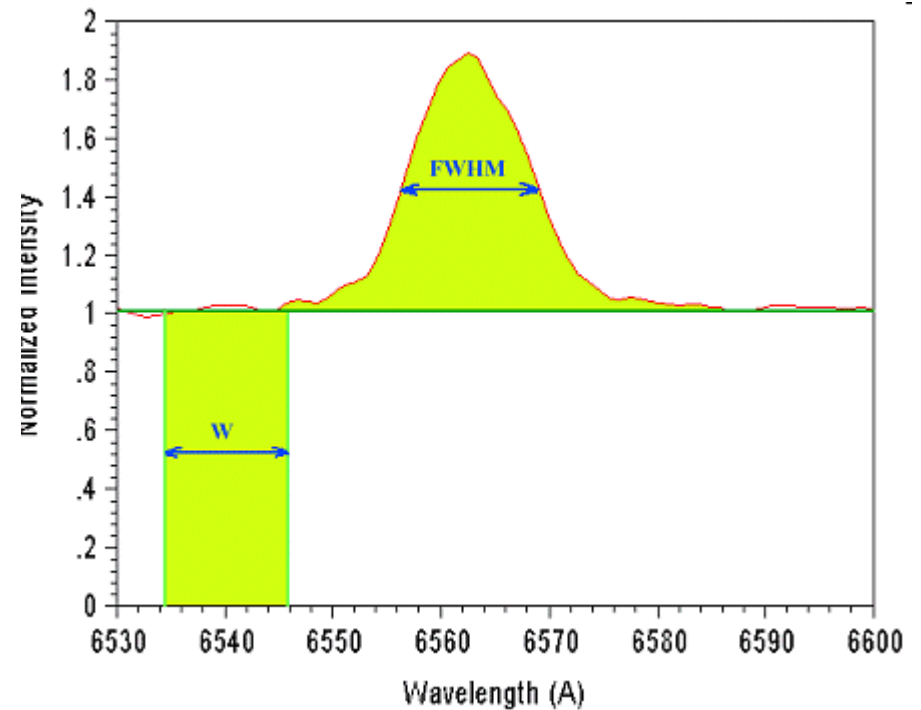
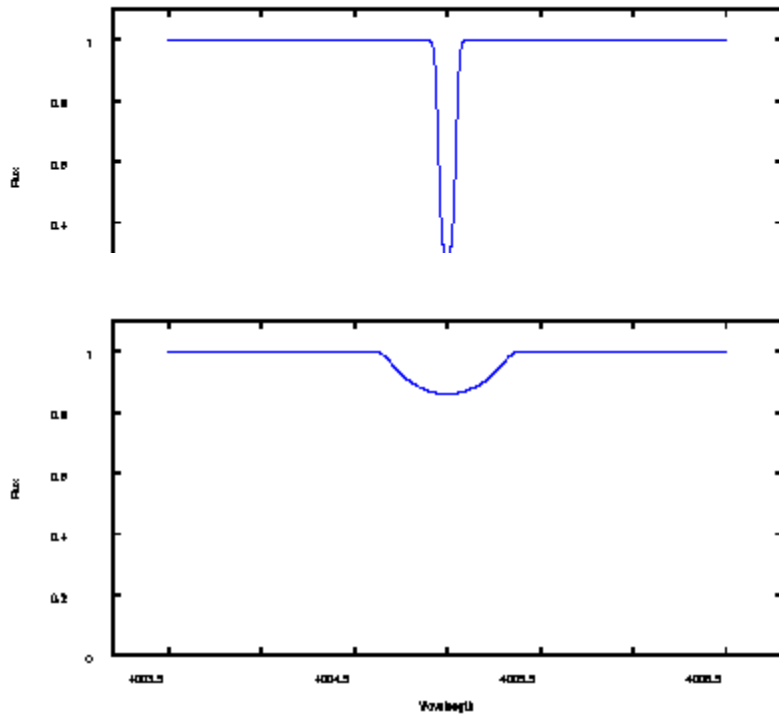
určité hodnotě  $RV/c$  odpovídá  $\Delta\lambda/\lambda_0$

- disentangling – KOREL, FDBINARY

příčiny změn RV – pulsace, ale hlavně dvojhvězdy SB1, SB2

ad 2. **profil čáry, FWHM** – full width at half maximum – slouží k určování charakteristik hvězd; ovlivněna množstvím efektů:

- rotace
- magnetické pole – Zeemanův jev
- elektrické pole – Starkův jev
- tlak
- teplota
- turbulence



ad 3. **ekvivalentní šířka** – množství záření, které ze spojitého spektra záření odstraní absorpční čára

graficky – pruh o stejné ploše jako čára – šířka pruhu = ekvivalentní šířka [nm, Å]

užití – pro určení chemického složení fotosfér

problém – málokdy čistý profil

ad 4. **hloubka/intenzita čáry** - intenzita ve středu čáry = centrální intenzita  $I_c$

pro emisní čáry:

intenzita čáry = skutečná intenzita záření v čáře

pro absorpční čáry:

intenzita čáry = rozdíl intenzit v proloženém kontinuu a v čáře;

skutečná intenzita záření v čáře = tzv. zbytková (reziduální) intenzita

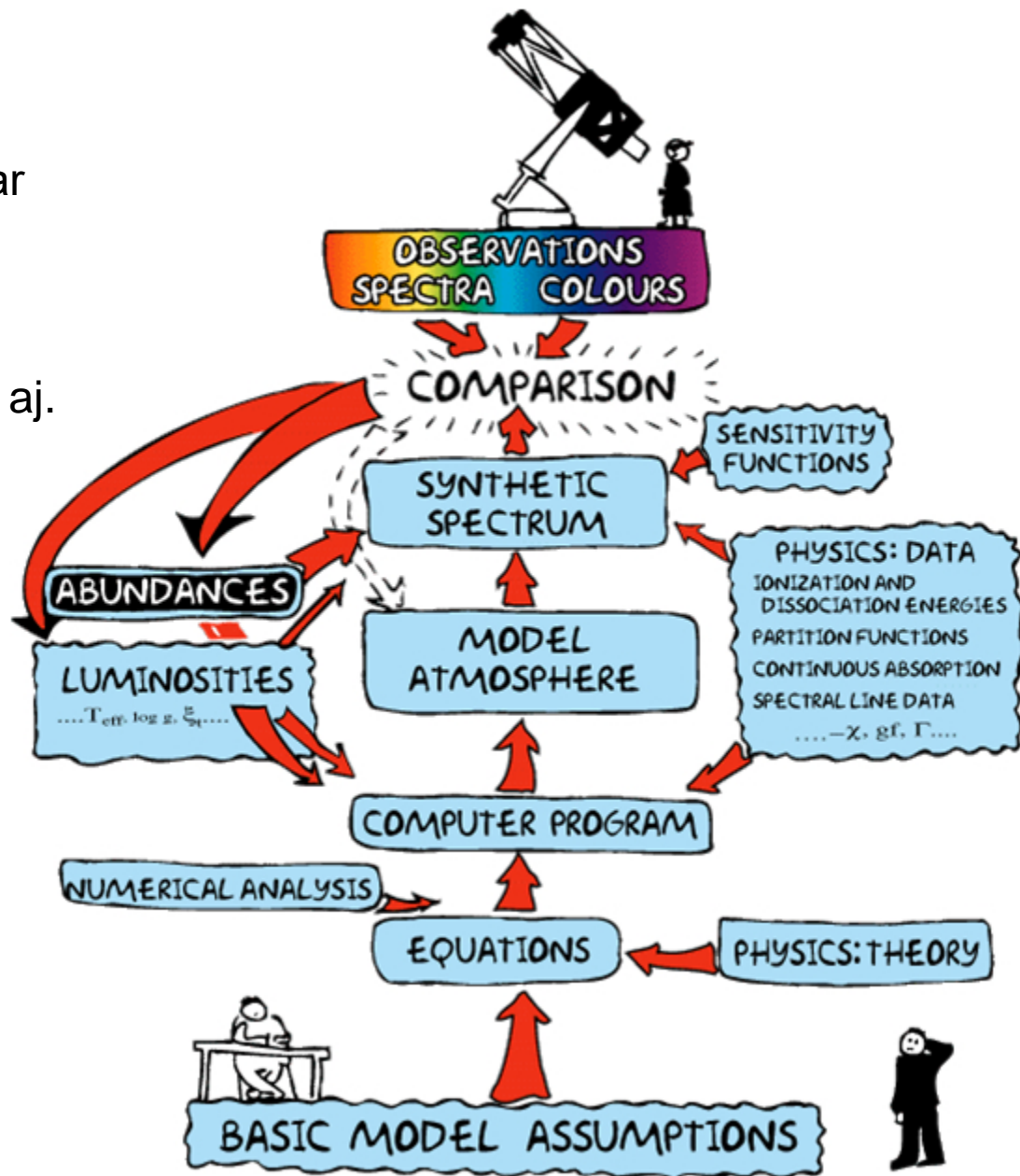


Reálné čáry – i „pěkné, čisté“ čáry  
– blendy

dříve: snaha o detailní identifikaci čar

dnes:

- modelová spektra
  - ke stažení ATLAS9, PHOENIX aj.
  - vlastní výpočet - TLUSTY, SYNTHE aj.
- disentangling



## Spektroskopické proměnné

### hvězdy

- změny spektra – globální x detailní (lokální)

kataklyzmické proměnné, periodicky proměnné (SB), pulsující, Ap hvězd